

# Analyse von Messverfahren zur Dichtebestimmung in der additiven Fertigung

## Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Studie .....	2
1.1	Bedeutung Dichtebestimmung für die additive Fertigung.....	2
1.2	Struktur der Studie.....	2
2	Grundlagen der Verfahren zur Dichtebestimmung.....	3
2.1	Besonderheiten additive Fertigung.....	3
2.2	Mikroskopische Analyse von Querschliffen .....	4
2.3	Computertomographie .....	5
2.4	Archimedes-Verfahren.....	6
2.5	Automatisierte Dichtebestimmung.....	7
3	Experimenteller Vergleich der Methoden .....	7
3.1	Definition der Randbedingungen.....	7
3.2	Probengeometrie .....	8
4	Analyse der Probekörper .....	9
4.1	Genauigkeit .....	12
4.2	Reproduzierbarkeit .....	15
4.2.1	Auflösung der Messmittel.....	15
4.2.2	Bestimmung der Wiederholbarkeit .....	18
4.2.3	Reproduzierbarkeit .....	18
4.3	Defektdetektion .....	18
5	Bewertung der Verfahren .....	19
5.1	Eignung für die additive Fertigung.....	19
5.2	Aufwand.....	20
5.2.1	Mikroskopische Analyse von Querschliffen .....	20
5.2.2	Computertomographie .....	20
5.2.3	Archimedes-Verfahren.....	21
5.2.4	Automatisierte Dichtebestimmung.....	21
5.2.5	Fazit zur Aufwandsabschätzung.....	22
5.3	Finanzielle Betrachtung.....	22
5.3.1	Anwendungsfälle .....	22
5.4	Potentiale in der Qualitätssicherung .....	26

## 1 Ziel der Studie

In der additiven Fertigung existieren verschiedene Verfahren um die Dichte bzw. Porosität eines Bauteils zu bestimmen. Eine neue Methode zur automatisierten Dichtebestimmung von Dimensionics Density, die auf dem Archimedes-Verfahren basiert, soll in dieser Studie untersucht werden. Ein Vergleich der verschiedenen Verfahren hinsichtlich technischer Eignung, Genauigkeit, zeitlichem Aufwand und Kosten wird gezogen. Dieser Vergleich wird aus der Perspektive von drei unterschiedlichen Anwendungsfällen betrachtet.

### 1.1 Bedeutung Dichtebestimmung für die additive Fertigung

In dieser Studie werden verschiedene Methoden zur Bestimmung der Dichte eines Probekörpers untersucht und verglichen. Es werden hierbei im Speziellen die Besonderheiten der additiven Fertigung berücksichtigt. Die additive Fertigung ist gegenüber anderen Fertigungsverfahren eine vergleichsweise junge Produktionsmethode.

Laser Powder Bed Fusion, das in dieser Studie verwendete additive Produktionsverfahren, basiert auf einer schichtweisen Belichtung von Pulver mit einem oder mehreren Lasern. Diese schmelzen das Pulver lokal auf, die anschließende Erstarrung verbindet die einzelnen Schichten miteinander. Im nächsten Schritt wird eine neue dünne Schicht Pulver aufgetragen, die wieder lokal belichtet wird. So werden Bauteile schichtweise im Pulverbett aufgebaut

In der Materialentwicklung für additive Fertigungsprozesse wird zur Entwicklung von praktikablen Parametersätzen eine hohe Anzahl an Proben erzeugt. Eine erste Einschätzung der Güte der Parameter ist über eine Bestimmung der Dichte möglich. Durch Porositäten innerhalb des Materials weicht die gemessene Dichte von der theoretisch möglichen Dichte ab. Für neue Werkstoffe verfolgt man das Ziel ein Prozessfenster für die Prozessparameter zu finden, in dem die erzeugte Dichte möglichst nah an der theoretisch möglichen Dichte liegt.

In der Serienfertigung kann die Dichtebestimmung als statistische Prozesskontrolle verwendet werden. Gleichzeitig kann diese Technologie für die Maschinenfreigabe eingesetzt werden, um die Prozessschwankungen der Maschine schnell zu ermitteln. Hierbei ist es möglich die Dichtebestimmung als sinnvolle Ergänzung zu den etablierten Verfahren, wie z.B. Zugproben einzusetzen. Eine kontinuierliche Überwachung des Fertigungsprozesses ist besonders in der additiven Fertigung erstrebenswert, da der Fertigungsprozess starken Schwankungen unterworfen ist. Diese Schwankungen können beispielsweise durch Variationen im Pulvermaterial, Veränderungen in den Optiken des Lasers, oder der Degradation des Beschichters hervorgerufen werden. Die Dichte des Bauteils kann als Indikator für die Güte des Prozesses dienen.

### 1.2 Struktur der Studie

Es existieren verschiedene Arten der Dichtebestimmung, eine neue Methode zur automatisierten Dichtebestimmung nach Archimedes wurde von Dimensionics Density entwickelt. Auf Basis dieser neuen Entwicklung soll das neue Verfahren mit den etablierten Methoden und Verfahren gegenübergestellt werden.

Zunächst werden die einzelnen Prüfverfahren vorgestellt und deren Wirkprinzip erläutert. Anschließend werden in einem experimentellen Vergleich alle Prüfverfahren betrachtet und die Ergebnisse des Vergleichs analysiert, sowie die Eignung der verschiedenen Messmethoden beurteilt. Der Vergleich wird mit Probekörpern aus AlSi10Mg durchgeführt, einem in der additiven Fertigung gängigen Material.

Zuletzt werden die Ergebnisse der Verfahren bewertet und in Kontext zum benötigten zeitlichen, räumlichen und finanziellen Aufwand gesetzt. Es werden hier drei verschiedene Anwendungsfälle betrachtet, die sich hauptsächlich in der zu analysierenden Stückzahl unterscheiden. In einem Fazit wird die optimale Dichtebestimmungsmethode für jeden Anwendungsfall dargelegt und eventuelle Kombinationsmöglichkeiten der Verfahren erläutert.

## 2 Grundlagen der Verfahren zur Dichtebestimmung

In diesem Kapitel werden zunächst die Besonderheiten der additiven Fertigung gegenüber konventioneller Fertigung hervorgehoben. Anschließend werden die Funktionsprinzipien der untersuchten Dichtebestimmungsverfahren vorgestellt.

### 2.1 Besonderheiten additive Fertigung

Die additive Fertigung weist gegenüber konventionellen Fertigungsmethoden einige Besonderheiten auf. Das additiv gefertigte Bauteil besitzt in der Regel eine geringere Dichte, als ein konventionell gefertigtes Bauteil mit gleicher Form. Diese negative Abweichung von der theoretischen Dichte wird als Porosität bezeichnet und in Prozent angegeben. Innerhalb des Bauteils existieren geschlossene Poren, die unterschiedliche Formen haben können. Diese Poren können die mechanischen Eigenschaften signifikant beeinflussen und gefährden die Eignung des Bauteils. In einem Serienfertigungsprozess mit Prozessparametern, die für das gewählte Material optimiert wurden, liegt die Dichte eines additiv gefertigten Bauteils bei  $>99,5\%$  der theoretisch möglichen Dichte, entsprechend sind  $<0,5\%$  des Bauteils Poren.

Die Oberfläche additiv gefertigter Bauteile ist ohne eine Nachbehandlung rauer als spanend bearbeitete Flächen. Diese Oberflächenrauheit kann Einfluss auf die Dichtebestimmung haben, da eine vollständige Benetzung der Oberfläche aufwändiger wird. Es kann hier allerdings auf Fluide mit sehr niedrigen Oberflächenspannungen und damit Kontaktwinkeln zurückgegriffen werden, die das Problem verringern bzw. eliminieren.

In der additiven Fertigung existieren viele Prozess- und Fertigungsparameter, die teilweise signifikanten Einfluss auf die Qualität des gefertigten Bauteils haben. Diese Parameter sind Schwankungen unterworfen, daher ist eine kontinuierliche Qualitätssicherung notwendig, um die Eignung des Bauteils und der Maschine zu gewährleisten.

Additive Fertigungsverfahren sind zeitaufwendiger und damit teurer als konventionelle Fertigungsverfahren, es sollten daher so viele Bauteile wie möglich zur Funktion qualifiziert werden. Eine zerstörende Prüfung von zu verwendenden Bauteilen ist nicht sinnvoll. Die Eignung der Teile wird daher über Begleitproben, oder über zerstörungsfreie Prüfung bestimmt. Um die Auswirkungen der Schwankungen des Fertigungsprozesses zu ermitteln werden Zugproben als Begleitproben gefertigt, die anschließend zerstörend geprüft werden. Zerstörungsfreie Prüfverfahren können direkt am zu qualifizierenden Bauteil angewendet werden, es muss keine Korrelation zwischen Bauteil und Begleitprobe durchgeführt werden.

Die Bestimmung der Dichte ist die am häufigsten verwendete Metrik zur initialen Qualifizierung des Bauteils, sowie des Prozesses. Die Dichte kann auf verschiedene Arten bestimmt werden, sowohl zerstörend als auch zerstörungsfrei. Die Qualifizierung der Dichte ist ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung in der additiven Fertigung. Es ist daher wichtig, neue Methoden und Verfahren im Markt zu testen, und deren Leistungsfähigkeit hinsichtlich Prüfdauern, Genauigkeit, sowie Reproduzierbarkeit zu bewerten. In dieser Studie werden vier Messverfahren verglichen, zwei dieser Messverfahren bestimmen eine absolute Dichte, also einen einheitenbehafteten Messwert. Die anderen beiden Messverfahren ermitteln eine relative, einheitenlose Dichte. Um alle Messverfahren vergleichen zu können werden die absoluten Dichten mithilfe einer Referenzdichte in relative Dichten umgewandelt. Eine genauere Erläuterung dieser Konvertierung ist in Abschnitt 4 dargestellt. Durch die Wahl der Referenzdichte kommt es zu einer Fehlerfortpflanzung, dies muss beim Vergleich der Verfahren beachtet werden.

Additiv gefertigte Bauteile werden momentan in Bereichen eingesetzt, in denen hohe Anforderungen an die Qualität des Bauteils gestellt werden, beispielsweise in der Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt, Schienenverkehr oder der Rüstungsindustrie. Daher ist die Qualitätssicherung und deren eingesetzte Methoden zur Bauteilqualifizierung von großer Bedeutung. Möglichkeiten zur Optimierung der Qualitätssicherung und damit einhergehende Kostensenkungen ermöglichen eine Verbreitung der additiven Fertigung in andere Bereiche. Im Folgenden werden gängige Verfahren vorgestellt, die in der Qualitätssicherung zum Einsatz kommen.

## 2.2 Mikroskopische Analyse von Querschliffen

Schliffbilder werden in der Materialforschung und -entwicklung eingesetzt. Die zu untersuchende Probe wird in eine Matrix aus Epoxidharz eingebettet und anschließend in mehreren Schritten mit Schleifpapieren abrasiv bearbeitet. Größere Bauteile müssen zunächst durch ein Trennverfahren auf ein kleineres Volumen reduziert werden. Die Maße der Probe werden durch die Schleif- und Einbettgeräte beschränkt. Durch das Schleifen und Polieren entsteht eine glatte, plane Schnittfläche, die einen Einblick in den Materialzustand ermöglichen. Die Detektion und Klassifikation von Defekten ist möglich. Auch können Risse, Inklusionen und andere Fehler beobachtet werden.

Der betrachtete Ausschnitt eines Probekörpers und das dafür zu entfernende Material ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Nach der Anfertigung des geschliffenen Probekörpers wird dieser mikroskopisch untersucht. Es wird ein zweidimensionaler Ausschnitt des Probekörpers betrachtet. Dieser Ausschnitt wird vermessen, die Fläche an der Material vorhanden ist wird mit der Gesamtfläche verglichen. Jede Verringerung dieser Fläche durch Poren entspricht damit einer Verringerung der Dichte des Bauteils.

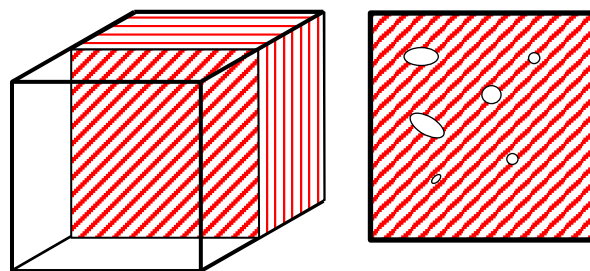


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Querschliffs und das dabei erzeugte Schliffbild mit Defekten

Am Fraunhofer IAPT werden Schleifgeräte der Firma Struers eingesetzt. Zur Einbettung der in Abschnitt 3 beschriebenen Probekörper wird ein Warmeinbettgerät verwendet. Dieses erzeugt Zylinder mit einem Durchmesser von 30mm, in denen sich 5-6 der Probekörper einbetten lassen. Durch das simultane Schleifen der Probekörper in einem einzelnen Zylinder lässt sich die benötigte Zeit reduzieren. Für größere Teile kann dieser Vorteil nur bedingt ausgenutzt werden. Teile, die größer als der beschriebene Durchmesser von 30mm sind, müssen im Kalteinbettprozess vorbereitet werden. Der Prozess ist aufwändig und geruchsintensiv, daher wird in der Regel eher die Größe der Teile auf das notwendige Maß reduziert.

Nach dem Schleifen der Proben werden diese mikroskopisch untersucht. Häufig ist dies ein iterativer Prozess, da das Endergebnis der Schleif- und Polierbearbeitung die Anforderungen nicht erfüllt. Am Fraunhofer IAPT wird ein optisches Mikroskop der Firma Keyence verwendet. Dieses erstellt Bilder der Schliffflächen, wobei häufig ein Bild pro Schliff erstellt wird. Dieses Bild wird anschließend über einen Algorithmus binärisiert und die detektierten Poren in der Schlifffläche analysiert. Das Ergebnis der gesamten Analyse ist ein Porositätswert, sowie eine Einteilung der Poren nach Größe und Form.

Die Vorteile in der Betrachtung von Querschliffen liegen in der Möglichkeit, den tatsächlichen Zustand des Materials zu betrachten. Poren können mit einer hohen Auflösung detektiert und vermessen werden. Auch können Risse und andere Defekte im Bauteil erfasst werden. Die Form der Poren, die Aufschluss über Fehler im Prozess gibt, ist bestimmbar. Auch ist es möglich eine Porengrößenverteilung zu erstellen, diese Verteilung kann auf nicht geprüfte Bauteile angewendet werden, und deren Einfluss bestimmt werden.

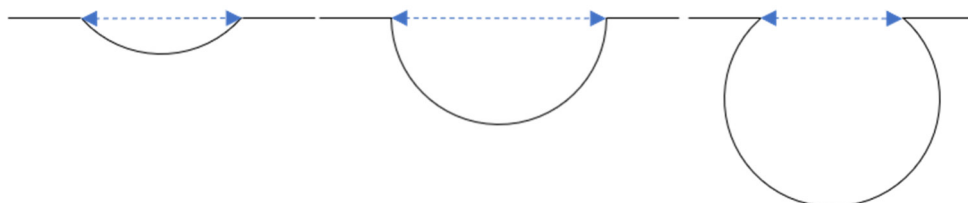


Abbildung 2: Bestimmung der Porengröße über den sichtbaren Durchmesser an der Schlifffläche

Nachteilig wirkt sich die ausschließlich zweidimensionale Betrachtung aus. Es ist nicht möglich eine Dichte über das gesamte Bauteil zu bestimmen, es wird lediglich vom Schliffbild auf den dreidimensionalen Zustand zurückgeschlossen. Sollten Fehler

lokalisiert an einer Position im Bauteil auftreten, ist die Detektionswahrscheinlichkeit gering. Die Porengröße ist abhängig von der Position des Schliffes, daher wird die wahre Größe der Pore unter- oder überschätzt. Dies führt zu Abweichungen zwischen bestimmter Dichte und tatsächlicher Dichte. Die Problematik dieser Art der Bestimmung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Weiterhin ist die Qualität der Schliffe und damit auch der Dichtebestimmung vom Anwender und vom Material abhängig. Die Erstellung von Schliffbildern ist mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden, die Schleifpapiere müssen regelmäßig gewechselt werden. Speziell in der additiven Fertigung entstehen noch weitere Probleme. In einem pulverbasierten Fertigungsprozess können Poren mit Pulver gefüllt sein. Wird dieses beim Schleifen freigelegt, so gelangt es auf das Schleifpapier und kann Kratzer und Riefen im Material hinterlassen. Diese Kratzer müssen anschließend weggeschliffen werden, wodurch die Prozessdauer deutlich ansteigt.

Außerdem ist die Analyse von Schliffbildern die einzige hier aufgeführte Methode, die den Prüfkörper zerstört. Gerade in der additiven Fertigung mit den vergleichsweise hohen Stückkosten von Bauteilen in der Serienfertigung ist eine Zerstörung dieser ein Problem. Es werden daher in der Regel Begleitproben gefertigt, die im gleichen Bauprozess erzeugt werden, und von denen dann auf den Zustand im eigentlichen Bauteil geschlossen wird. Allerdings fallen auch hier zusätzliche Materialkosten für die Herstellung der Begleitproben an.

Diese Methode ist trotz der verfügbaren Maschinen noch immer manuell geprägt, sei es beim Abtrennen und Zusägen der Probekörper, beim Einbetten in Epoxidharz, oder auch beim Wechsel von Schleifpapier und Suspensionslösungen. Es ist auf eine saubere Arbeitsweise zu achten, die geschliffene bzw. polierte Oberfläche ist besonders empfindlich gegenüber Verschmutzungen und Kratzern. Oft lassen sich gute Ergebnisse erst mit gewonnener Erfahrung sammeln, die Ergebnisse sind stark vom jeweiligen Anwender abhängig.

Das Schleifen von Materialien ist aufgrund des geringen Materialabtrags und häufigen Wechsels von Schleifpapieren zeitaufwändig. Vorteilhaft ist die Möglichkeit, mehrere Proben simultan zu bearbeiten, sodass bei höheren Stückzahlen ein Skalierungseffekt eintritt und eine geringere Gesamtzeit möglich ist. Es ist auch möglich Maschinen mit einem höherem Automatisierungsgrad zu erwerben um die manuelle Arbeitszeit zu verringern, der Effekt auf die Bearbeitungszeit ist aber gering. Die Erstellung von Schliffbildern ist trotz der höheren Automatisierung noch immer stark manuell geprägt.

## 2.3 Computertomographie

In der Computertomographie (CT) wird der Probekörper mit Röntgenstrahlung belichtet. Die Dichte beeinflusst die Helligkeit des belichteten bildgebenden Sensors. Während der Transmission durch das Material wird Röntgenstrahlung absorbiert, diese Absorption ist bei höherer Dichte des Materials stärker. Trifft ein Röntgenstrahl während der Transmission durch das Material auf eine Pore, so wird die Energie aufgrund der geringeren Dichte innerhalb der Pore weniger absorbiert. Daher trifft die Strahlung mit einer höheren Energie auf den Detektor und erzeugt ein dunkleres Bild. Durch eine dreidimensionale Belichtungsstrategie ist es möglich die Form und Lage der Poren zu bestimmen.

Für die Untersuchungen wurde ein V|tome|x M der Firma GE verwendet. Die Auflösung des CTs hängt maßgeblich von der Größe des durchstrahlten Volumens ab. Für die verwendeten Probekörper mit 10mm Kantenlänge ist eine Auflösung von  $10\mu\text{m}$  möglich, dies entspricht einer Voxelgröße von  $10\mu\text{m}^3$ . Voxel sind dreidimensionale Volumenkörper, sie entsprechen dem kleinstmöglichen, durch das CT darstellbaren, Volumen. Die Betrachtung ist äquivalent zu Pixeln eines Bildschirms oder einer Kamera, allerdings im dreidimensionalen Raum. Bei einer Auflösung von  $10\mu\text{m}$  in alle Raumrichtungen hat der Voxel ein Volumen von  $10 \times 10 \times 10\mu\text{m} = 10\mu\text{m}^3$ . Der Voxel hat neben seinen Koordinaten zusätzlich einen Grauwert, der mit der lokalen Dichte an dieser Position korreliert. Um Poren verlässlich zu detektieren benötigt es mindestens 3 Voxel pro Raumrichtung, die kleinste detektierbare Pore hat damit einen Durchmesser von  $30\mu\text{m}$ .

Die in dieser Studie betrachteten Probekörper (vgl. Abschnitt 3.2) wurden für eine Zeit von circa 1-2 Stunden im CT untersucht, die Zeit zur Rekonstruktion der Bilddaten und Analyse der Ergebnisse unterschied sich stark, abhängig von der Porenanzahl und -größe. Für diese Analyse wurde etwa eine weitere Stunde benötigt.

Die Auflösung eines CTs ist begrenzt durch den verwendeten Sensor und die Größe des Bauteils. Die minimale Auflösung bei herkömmlichen CTs liegt bei etwa  $1\mu\text{m}$ . Geringere Auflösungen sind möglich, allerdings können nur kleine Bauteile analysiert

werden und die Dauer der Prüfung steigt an. Es wird hier eine Abwägung getroffen zwischen einer feinen Auflösung, die auch kleine Poren detektiert, und der benötigten Zeit zur Prüfung des Bauteils.

Die Vorteile des CTs liegen in der Möglichkeit, Defekte innerhalb des Bauteils zerstörungsfrei zu detektieren. Diese können mit geeigneten Computerprogramm dreidimensional dargestellt werden und der Effekt der Defekte kann bestimmt werden ohne dass das Bauteil belastet werden muss.

Ein klarer Nachteil liegt in den hohen Anschaffungskosten für das CT und der Notwendigkeit nach qualifizierten Personal. Diese muss nach ISO 9712 zertifiziert sein, um verlässliche Aussagen zur Dichte des Bauteils treffen zu können. Für die Bildverarbeitung und Analyse ist eine Kombination aus leistungsfähiger Software, Rechenkapazität und einem erfahrenen und qualifizierten Anwender notwendig. Die Soft- und Hardware, sowie die notwendige IT-Infrastruktur zur Transferierung großer Datenmengen ist mit entsprechenden Kosten verbunden. Der Transfer zu externen Partnern über beispielsweise Cloud-Anwendungen ist aufgrund der Datengröße schwierig.

Gerade bei komplexeren Geometrien kann nicht ausschließlich auf automatisierte Softwaretools zurückgegriffen werden. Hier müssen geeignete Filter und Algorithmen verwendet werden, um Artefakte und Rauschen zu minimieren, ohne vorhandene Porendaten aus den Bildern zu entfernen. Weiterhin können Poren die unter der minimalen Auflösung liegen nicht verlässlich detektiert werden.

Die Computertomographie bestimmt die Dichte ohne Zerstörung des Probekörpers, daher ist der Vorbereitungsaufwand für diese Prüfmethode gering. Der zeitliche Aufwand ist maßgeblich von der benötigten Auflösung, sowie der Bauteilgröße abhängig, es treten keine Skalierungseffekte bei höherer Stückzahl auf.

In den in dieser Studie durchgeführten CT Analysen wurde die Dichte auf Basis einer 2D Auswertung ermittelt. Es besteht die Möglichkeit der Rekonstruktion und Analyse der Morphologie der Poren um Defekte dreidimensional darzustellen, diese Anwendung war für diese Studie allerdings nicht relevant. Der Fehler zwischen 2D und 3D Auswertungen ist gering, da die Datenbasis identisch ist. Für die 3D Auswertungen werden zusätzliche Annahmen hinsichtlich der Morphologie getroffen, um aus einer würfelförmigen Voxeldarstellung eine porenähnliche Darstellung zu erzeugen.

## 2.4 Archimedes-Verfahren

Die Dichtebestimmung nach Archimedes beruht auf der Messung der Masse eines Probekörpers in zwei verschiedenen Fluiden. Zunächst wird das Gewicht in Luft bestimmt, anschließend in einer Flüssigkeit, beispielsweise Wasser. Aufgrund der unterschiedlichen Auftriebskraft des Probekörpers in beiden Medien kann die Dichte bestimmt werden.

Der Aufwand zur Durchführung dieses Dichtebestimmungsverfahrens ist sehr gering, man benötigt lediglich eine Waage, sowie ein Becken mit Flüssigkeit und eine Apparatur zur Halterung. Allerdings sind die ermittelten Ergebnisse von der Genauigkeit der Waage, sowie von der Präzision der Versuchsdurchführung abhängig. Eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist schwierig, diese wird von menschlichen Einflussfaktoren stark beeinflusst. Probekörper werden nie exakt gleich auf die Waage aufgelegt und durch die manuelle Bedienung der Waagen kommt es zu Messabweichungen.

Bei Probekörpern, deren Dichte geringer ist, als die des Fluidmediums ist das Verfahren nur erschwert durchführbar. Eine unvollständige Benetzung beeinflusst die Bestimmung der Dichte. Lufteinschlüsse zwischen Körper und Fluid erhöhen den Auftrieb und verfälschen das Ergebnis. Es ist daher auf eine geeignete Materialpaarung zwischen Fluid und Festkörper zu achten. Gegenüber den vorherigen Verfahren kann ausschließlich die Dichte bestimmt werden, es ist kein Rückschluss auf Porengeometrie oder -lage möglich. Auch die Dichtebestimmung nach Archimedes ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode.

Die Umgebung kann in diesem Verfahren die Dichtebestimmung beeinflussen. Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen der Luft, sowie des Fluidmediums können die Ergebnisse der Wiegevorgänge beeinflussen. Um zuverlässige Messergebnisse zu erzeugen bedarf es Laborbedingungen, sowie geschultes Personal.

Das Archimedes-Verfahren hat einen geringen zeitlichen Aufwand, da lediglich zwei Messungen des Gewichts vorgenommen werden müssen und der Probekörper nicht bearbeitet werden muss. Um eine Beeinflussung durch das Eintauchen bzw.

Turbulenzen im Fluid zu verhindern wird die Messung erst durchgeführt, wenn das Fluid wieder in Ruhe ist. Daher verlängert sich die Messdauer im Fluid. Auch hier treten keine positiven Skalierungseffekte bei höheren Stückzahlen auf.

Für die Messungen wurde eine Shimadzu AUW220D Analysewaage mit dem dazugehörigen Dichtebestimmungskit verwendet. Die Waage wurde mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1mg betrieben.

Für die additive Fertigung ist die Porosität des Bauteils wichtig, die als prozentuelle Abweichung von der Dichte angegeben wird. Für das Archimedes-Verfahren, sowie die automatisierte Dichtebestimmung ist eine Referenzdichte sinnvoll. Diese kann beispielsweise über ein Gutteil, oder über die theoretische Materialdichte bestimmt werden.

## 2.5 Automatisierte Dichtebestimmung

Die automatisierte Dichtebestimmung nutzt das erläuterte Archimedes-Verfahren in Kombination mit moderner Automatisierungstechnologie. Dafür werden die zu messenden Proben in einen speziellen Bauteilträger eingelegt, welcher mit Öffnungen an der Unterseite versehen ist. Diese Bauteilträger werden durch einen Achsroboter durch die Anlage transportiert und dadurch zentral und präzise auf die Waagen herabgelassen. Auf den Waagen selbst ist ein Aushebegestell mit Stiften platziert, welches das Bauteil über die Öffnungen im Bauteilträger aushebt und so das Bauteil aus dem Träger aushebt. Durch das automatisierte Handling wird der menschliche Einfluss auf die Messung eliminiert, da die Teile immer identisch auf die Waagen aufgebracht werden.

Um auch in der Fertigungsumgebung maximale Genauigkeit zu ermöglichen, sind die Waagen schwingungsentkoppelt aufgebaut. Zudem werden über Klimasensoren alle Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, Luftdruck und Wassertemperatur aufgezeichnet, deren Einfluss auf das Messergebnis wird direkt im Auswertalgorithmus bei der Dichtebestimmung berücksichtigt.

Die Messung in beiden Medien findet automatisch statt, der Anwender muss lediglich die Maschine bestücken. Während der Messung treten keine Skalierungseffekte auf, allerdings kann durch die einmalige Bestückung und automatisierte Dichtebestimmung der notwendige Personalaufwand reduziert werden.

Der Vorteil der Automatisierung liegt zum einen in der schnelleren Bearbeitung der Dichtebestimmung, zum anderen in der höheren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Als Fluid wird die Flüssigkeit „STL-liquid“ verwendet, eine speziell entwickelte Tensidlösung, die eine geringe Oberflächenspannung besitzt und dementsprechend auch einen niedrigeren Kontaktwinkel zwischen Fluid und Festkörper erzeugt, daher ist die Benetzung deutlich höher. Der Probekörper kann über einen Sprühnebel oder durch eine zusätzliche Tauchfahrt vorbefeuchtet werden, wodurch Kavitäten, raue Oberflächen sowie komplexe Geometrien deutlich besser benetzt werden.

Die Ergebnisse der Messungen werden automatisiert an übergeordnete Systeme übertragen, es sind keine weiteren Auswertungs- oder Beurteilungsschritte notwendig. Daher ist eine schnelle Datenweitergabe an Qualitätssysteme möglich.

## 3 Experimenteller Vergleich der Methoden

### 3.1 Definition der Randbedingungen

Es werden insgesamt 3 x 15 Probekörper aus AlSi10Mg hergestellt. Diese wurden in drei Reihen eingeteilt, wie Tabelle 1 zeigt. Die Probekörper werden mit Laser Powder Bed Fusion additiv gefertigt. Es werden für die Probekörper unterschiedliche Prozessparameter gewählt, die Defekte in Form von Poren erzeugen. Der Probekörpersatz A wird ausschließlich mit der automatisierten Dichtebestimmung vermessen. Der Probekörpersatz B wurde vor den anderen Messungen geschliffen und analysiert um die erwarteten Porositäten zu bestätigen. Der Probekörpersatz C wird für den Vergleich der verschiedenen Messverfahren verwendet. Die Dichte der Probekörper wird mit den verschiedenen Verfahren bestimmt, zunächst den zerstörungsfreien Prüfverfahren, anschließend zerstörend mittels eines Schlibfbildes.

Tabelle 1: Darstellung der Probekörperreihen und deren Funktion

Probekörperreihe	Messverfahren	Bemerkung
A	Automatisierte Dichtebestimmung	Zur Bestimmung der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit
B	Schliffbild	Zur Untersuchung ob Prozessparameter die gewünschten Poren erzeugen
C	Automatisierte Dichtebestimmung, Computertomographie, Archimedes manuell, Schliffbild	Vergleichstest zur Analyse der Unterschiede verschiedener Messverfahren

### 3.2 Probengeometrie

Als Probengeometrie werden Würfel verwendet. Diese werden am Fraunhofer IAPT standardmäßig zur Entwicklung von Parametern entwickelt und haben den Vorteil, dass eine größere Anzahl gleichzeitig in der Schleifmaschine bearbeitet werden kann. Die Würfel haben eine konisch zulaufende Fläche, damit sie einfach voneinander, sowie von der Bauplattform getrennt werden können. Die gewählte Größe der Würfel ermöglicht eine optimale Auslastung der Schleifmaschinen, die Form der Würfel ist für den Schleifprozess optimiert. In Abbildung 3 sind die Probekörper dargestellt.

Es werden aufgrund der gewählten Prozessparameter unterschiedliche Defekte erzeugt. Diese können auch in der Serienfertigung auftreten und haben daher industrielle Relevanz. Die Defekte lassen sich in drei Kategorien einteilen: Gasporen sind Poren, die bei einer lokal zu hohen Erhitzung des Pulvers entstehen. Die Poren sind verhältnismäßig klein und annähernd kugelförmig. Sollten mehrere Gasporen in direkter Nähe auftreten, können diese sich miteinander verbinden und von der Kugelform abweichen. Aufgrund der geringen Größe der Poren besteht die Gefahr, dass diese nicht verlässlich von einem CT mit geringer Auflösung detektiert werden.



Abbildung 3: Untersuchte Probekörper nach der Fertigung

Spritzige Poren oder Lack-of-Fusion Poren entstehen, wenn die Energiedichte lokal zu niedrig ist. Das Pulver wird nicht vollständig aufgeschmolzen und verbleibt im Bauteil. Spritzige Poren sind deutlich größer als Gasporen, haben eine annähernd linsenförmige Kontur und scharf zulaufende Kanten. Sie entstehen unter anderem auch durch Spritzer des flüssigen Metalls, die sich während der Belichtung aus dem Schmelzbad lösen und im Pulverbett verteilen. Lack-of-Fusion Poren sind durch ihre Größe und Form Kerben innerhalb des Bauteils. Sie fungieren auch als Nukleationspunkte für Risse in dynamisch belasteten Bauteilen, und sind daher für die Bauteileignung besonders relevant.



Randporositäten entstehen am Übergang zwischen Konturbelichtung und Hatching. Die Poren sind eher durch ihre Lage im Bauteil als durch ihre Form zu charakterisieren. Sie entstehen in oberflächennahen Bereichen und haben negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils. In Abbildung 4 sind die verschiedenen Defekte beispielhaft dargestellt.

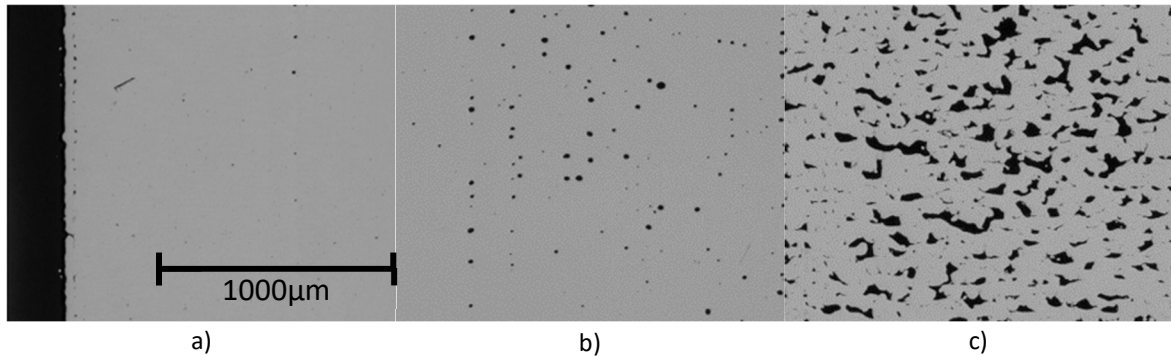


Abbildung 4: Detailaufnahmen von Schlifffbildern der Probekörper mit a) Randporositäten, b) Gasporen und c) spratzigen Poren

#### 4 Analyse der Probekörper

Es wurden die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Probekörper analysiert. Die Dichte aller Proben der Messreihe C wurde mit jedem Messverfahren bestimmt. Es wurden unterschiedliche Prozessparameter gewählt, mit denen verschiedene Defekte erzeugt werden. Weiterhin wurden Referenzprobekörper produziert, die eine möglichst seriennahe Fertigung mit sehr niedriger Porosität repräsentieren. Die angestrebten relativen Dichten sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Schlifffbilder wurden zuletzt angefertigt, da diese den Probekörper zerstören.

Tabelle 2: Angestrebte relative Dichten und Defektformen der Probekörper

Probekörper	Angestrebte relative Dichte	Bemerkung
C1-C3	>99,5%	Möglichst hohe Dichte als Referenzwerte, bzw. um einen seriennahen Prozess abzubilden
C4-C9	94-99%	Lack-of-Fusion Defekte, wahrscheinlich mit Pulver gefüllt
C10-C15	~98-99,5%	Gasporen, Poren nicht mit Pulver gefüllt

#### Korrelation der gemessenen Dichten und relativen Dichten

Schlifffbilder, sowie die CT Messung bestimmen eine relative Dichte in Prozent, während die anderen Messverfahren auf dem archimedischen Prinzip beruhen und eine einheitenbehaftete Dichte ermitteln. Um alle Messverfahren in einer Darstellung vergleichen zu können ist die Kenntnis der absoluten Dichte notwendig. Diese kann über das Pulver, oder über Referenzmessungen bestimmt werden. Es kann auch auf Standarddichten zurückgegriffen werden. In dieser Studie wurde keine absolute Dichte bestimmt. Es wird daher eine Korrelation der Messverfahren verwendet, um auf eine absolute Dichte zu schließen. Die Herleitung dieser Korrelation ist nachfolgend dargestellt, diese ist nur notwendig sofern keine Kenntnis über die absolute, theoretisch erreichbare Dichte besteht. Die Korrelation wurde verwendet, um eine möglichst genaue Dichte nach der additiven Fertigung zu ermitteln. Durch Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung des Pulvers, bzw. durch Verdampfungseffekte und unterschiedliche Laserparameter können die Dichten gegenüber Standard, oder Referenzdichten abweichen. Da in dieser Studie Messverfahren verglichen werden ist es sinnvoll eine Abweichung durch unterschiedliche Pulverzusammensetzungen oder Standarddichten zu vermeiden.

In den Messreihen wurden unterschiedliche Größen bestimmt. In den Messungen mit CT (Abk. CT) und Schlifffbild (Abk. MS) wurde die Porosität  $\Phi$  bestimmt. Diese ist definiert als:

$$\Phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_0}$$

Mit der Relativdichte  $\rho$  und der absoluten Dichte  $\rho_0$ . In den Archimedischen Messungen (Abk. D) wurde die Relativdichte  $\rho$  bestimmt. Diese Größen sind zueinander in Bezug zu setzen. Alle unbekanntenen Größen werden mit einem Querstrich über der Größe dargestellt:

$$\Phi_{CT} = 1 - \frac{\bar{\rho}}{\rho_0}, \quad \Phi_{MS} = 1 - \frac{\bar{\rho}}{\rho_0}, \quad \bar{\Phi}_D = 1 - \frac{\rho}{\rho_0};$$

Die absolute Dichte ist in allen Messungen gleich und damit das verbindende Glied der Messungen. Die Bestimmung der absoluten Dichte ist folgendermaßen möglich:

$$\bar{\rho}_0 = \frac{\bar{\rho}}{1 - \Phi_{CT,MS}} = \frac{\rho}{1 - \bar{\Phi}_D}$$

Die Dichte des Pulvers wurde vor den Versuchen nicht bestimmt. Ist diese Dichte bekannt kann auf die folgende Umrechnung verzichtet werden. Da Verdampfungseffekte vernachlässigt werden muss die Porosität  $> 0$  sein und die gemessene Dichte  $\rho$  damit kleiner als die absolute Dichte  $\rho_0$ . Die maximale gemessene, mittlere Dichte aus 18 Messungen beträgt  $\rho = 2,6606 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , wodurch die untere Grenze der absoluten Dichte bestimmt werden kann. Diese Dichte wurde im Probenwürfel C1 gemessen, dieser Würfel hat in den anderen Messverfahren eine relative prozentuale Dichte von

$$1 - \Phi_{CT} = 99,79\%, \\ 1 - \Phi_{MS} = 99,89\%.$$

Kombiniert man diese Porositätswerte mit der gemessenen Dichte erhält man eine absolute Dichte von

$$\rho_{0CT} = \frac{\rho_D}{1 - \Phi_{CT}} = 2,6662 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \quad \rho_{0MS} = \frac{\rho_D}{1 - \Phi_{MS}} = 2,6636 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \quad \Delta_{\rho_{0CT,MS}} = 0,0026 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}.$$

Die Verwendung des Würfels C1 als Referenz für die Bestimmung der absoluten Dichte ist sinnvoll, da hier die Porosität besonders niedrig ist, und damit entstehende Messfehler durch Poren am geringsten ausgeprägt sind. Basierend auf dieser absoluten Dichte können die Porositätswerte der anderen Würfel bestimmt werden. Wie nachfolgend gezeigt wird ist die Streuung der relativen Dichte bei Schlifffbildern stark, daher ist der durch dieses Messverfahren bestimmte Porositätswert nicht vertrauenswürdig und wird daher für die Bestimmung der absoluten Dichte vernachlässigt. Die absolute Dichte wird somit durch Korrelation von CT-Messungen und automatisierter Dichtebestimmung ermittelt und beträgt  $\rho_0 = 2,6662 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ .

#### Statistische Streuung der Porosität innerhalb des Probekörpers

Sowohl CT als auch Schlifffbilder sind einem systematischen Fehler bei der Porositätsbestimmung unterworfen. Das CT hat eine Auflösungsgrenze, unter der kleine Poren nicht länger verlässlich detektiert werden können. Bei einer Auflösung von  $10\mu\text{m}$  ist die kleinste sicher detektierbare Pore  $30\mu\text{m}$  im Durchmesser groß. Dies entspricht einer Fläche von 9 Pixeln, bzw. einem Volumen von 27 Voxeln. Der Einfluss einer einzelnen, nicht detektierten Pore auf die Gesamtporosität ist gering. Allerdings steigt die Anzahl dieser sehr kleinen Poren stark an, wodurch in der Summe betrachtet eine Beeinflussung entsteht, dies wird in Abschnitt 4.2.3 gezeigt

Das Schlifffbild kann als Schnitt durch das Bauteil betrachtet werden. Bei der Annahme einer zufälligen Porenverteilung ist die Porosität eines Schlifffbilder durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert. Um diese Verteilung zu bestimmen kann die Porositätsbestimmung des CTs verwendet werden. Das CT ermöglicht virtuelle Schnitte durch das Bauteil, mit einem minimalen Abstand entsprechend der Auflösung.

In Abbildung 5 sind Histogramme der Probekörper dargestellt. Es werden die Daten der CT Untersuchungen verwendet, diese bestehen aus tausenden zweidimensionalen Schnitten durch das Bauteil, äquivalent zu einem Schlifffbild. Es wird nun in jedem dieser Schnitte die Porosität bestimmt. Die Histogramme entsprechen damit der Summe aller Schnitte durch den Probekörper und stellen die lokale Streuung der Porosität dar. Es werden nur Schnitte betrachtet, deren Schnittfläche über  $2\text{mm}^2$  liegt, um Porositätsausreißer aufgrund von sehr kleinen Schnittflächen auszuschließen. In dieser Betrachtungsweise besteht ein Unterschied zur dreidimensionalen Volumenauswertung. Die Poren werden als Voxel analysiert und nicht rekonstruiert, daher kommt es gegebenenfalls zu einer Überschätzung der Porosität. Da in beiden Analysemethoden die Geometrie basierend auf den detektierten Voxeln bestimmt wird, ist der Unterschied vergleichsweise gering.

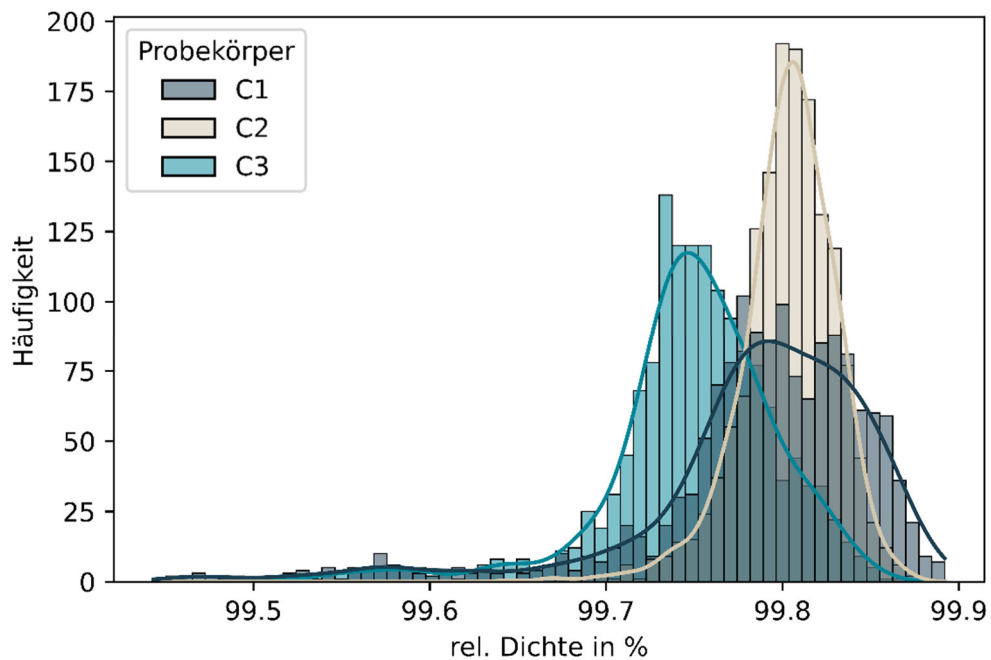


Abbildung 5: Histogramm der relativen Dichte der CT-Scans für Probekörper C1-C3

Beispielsweise gibt es im Probekörper C1 etwa 100 Schnittflächen, deren Porosität 99,80% beträgt. Es existieren aber auch Ausreißer von 99,50% bis 99,70%. Für die CT Untersuchungen sind diese Ausreißer vernachlässigbar, da das Bauteil global betrachtet wird. Dies bedeutet, dass die Schnitte gemittelt werden, mit einer Gewichtung entsprechend der Schnittfläche eines Schnitts zur Gesamtfläche aller Schnitte. Die Betrachtung über Histogramme ermöglicht aber Rückschlüsse auf die Aussagekraft von Schliffbildern. Hier wird das Bauteil nur lokal betrachtet, weshalb die globale Dichte nicht genau bestimmt werden kann. Bei Extrapolation von einem Schliffbild auf das gesamte Bauteil besteht die Gefahr der falschen Bestimmung der Dichte. Für eine minimale statistische Sicherheit müssen mindestens 3 Schliffbilder eines Bauteils durchgeführt werden, was den zeitlichen und finanziellen Aufwand deutlich erhöht.

Abbildung 6 zeigt die Histogramme der relativen Dichte für die Probekörper mit Lack-of-Fusion Defekten. Die relative Dichte streut deutlich stärker als bei den Probenkörpern C1-C3. Während die mittlere Dichte von Probekörper C9 bei etwa 94,1 % liegt, sind deutliche Abweichungen nach unten, bzw. auch zu höheren Dichte sichtbar. Hier ist die Gefahr der Vorhersage von falschen Dichten noch höher als bei den zuvor betrachteten Probekörpern in Abbildung 5. Die Aussagekraft der Schliffbilder ist dementsprechend für eine größere Porosität geringer. Auch für lokale Porositätserscheinungen ist das Schliffbild ungeeignet, die Annahme einer homogenen Porenverteilung im Bauteil ist falsch.

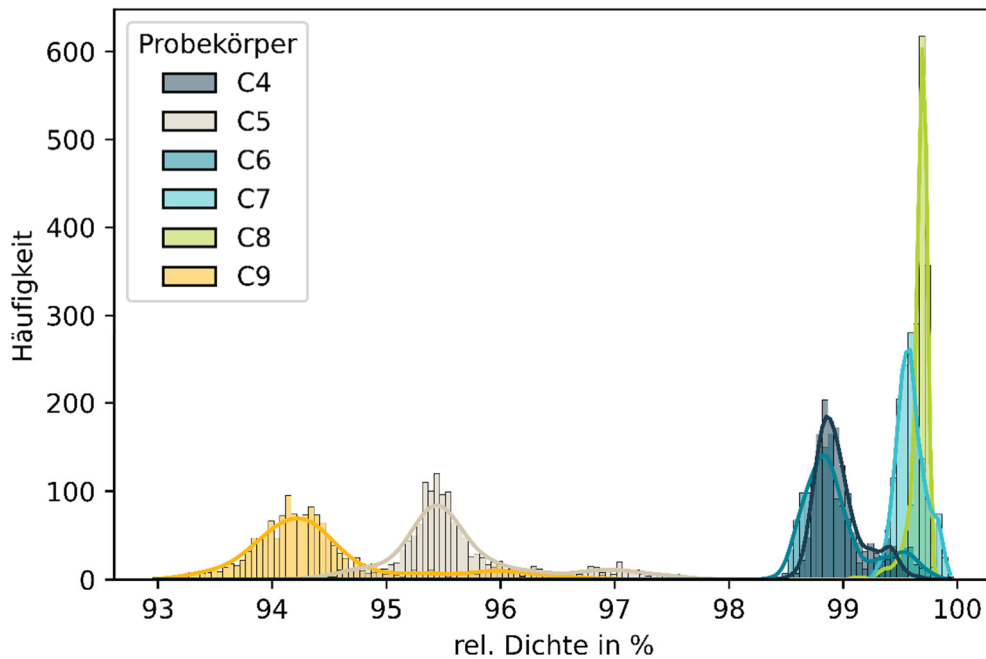


Abbildung 6: Histogramm der relativen Dichte der CT-Scans für Probekörper C4-C9

### 4.1 Genauigkeit

Die relative prozentuale Dichte die mit allen Messverfahren bestimmt wurde wird nun verglichen. Es wird eine Aufteilung auf die verschiedenen Defektkategorien vorgenommen. Es ist davon auszugehen, dass bei Lack-of-Fusion Defekten Pulver in den Poren verbleibt, welches die Dichtebestimmung nach dem Archimedisches Verfahren beeinflusst. Die Porosität sollte daher in diesen Messungen geringer ausfallen, bzw. die relative prozentuale Dichte höher. Ebenso wird ein Einschluss von Gas in Gasporen die gemessene Dichte beeinflussen. Da das Gas eine deutlich niedrigere Dichte als das Pulver besitzt wird die relative prozentuale Dichte niedriger ausfallen.

Messverfahren	Abkürzung	Farbe
Computertomographie	CT	Dark Blue
Schliffbild	MS	Teal
Automatisierte Dichtebestimmung	D	Magenta
Manuelles Archimedesverfahren	A	Yellow

In Abbildung 7 ist die Dichte der Referenzprobekörper dargestellt. Für den Probekörper C1 ist die Dichte bei den Messverfahren mit CT und der Dichtewaage identisch. Die Dichtewaage ermöglicht mehrere, schnelle Messungen. Daher wurden für eine höhere statistische Genauigkeit drei Messungen durchgeführt. Das Schliffbild weicht bei den Probekörpern C1 und C2 von den anderen Messverfahren ab, dies ist durch die Streuung der Porosität im Bauteil erklärbar. Beim manuellen Archimedes-Verfahren wurden für den Probekörper C1 insgesamt drei Messungen durchgeführt, die Streuung der relativen Dichte ist gegenüber der automatisierten Dichtebestimmung deutlich höher, dies ist auf manuelle Einflüsse rückführbar.

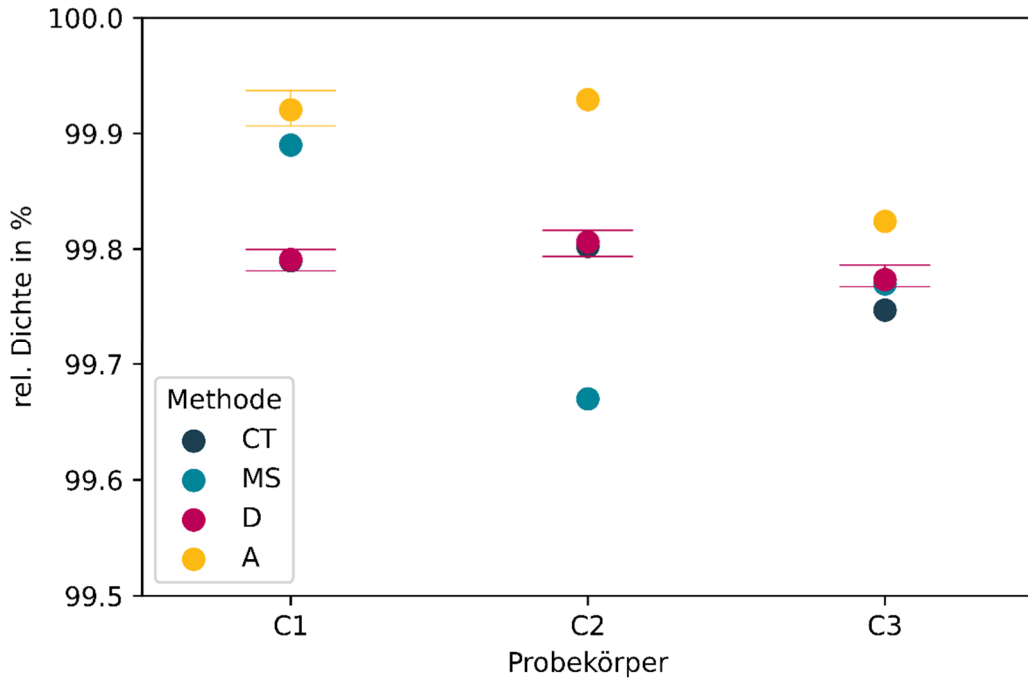


Abbildung 7: Relative prozentuale Dichte für die Referenzprobekörper C1-C3

Die Abbildung 8 zeigt ebenfalls die relativen prozentualen Dichten, im speziellen für die Probekörper mit induzierten Lack-of-Fusion Defekten. Die Dichte unterscheidet sich hier deutlich über die gesamte Messreihe, dieser Trend wird von allen Messverfahren wiedergegeben. Die Messung mit CT bestimmen für alle Probekörper die höchste jeweilige relative prozentuale Dichte. Die Ergebnisse der Schlißbilder unterscheiden sich in Probekörper C5 und C9 deutlich von den Ergebnissen der anderen Messverfahren. In den anderen Probekörpern gibt es eine annähernde Übereinstimmung über die bestimmte relative Dichte, wobei die Ergebnisse der Dichtewaage zwischen den anderen Messverfahren platziert ist.

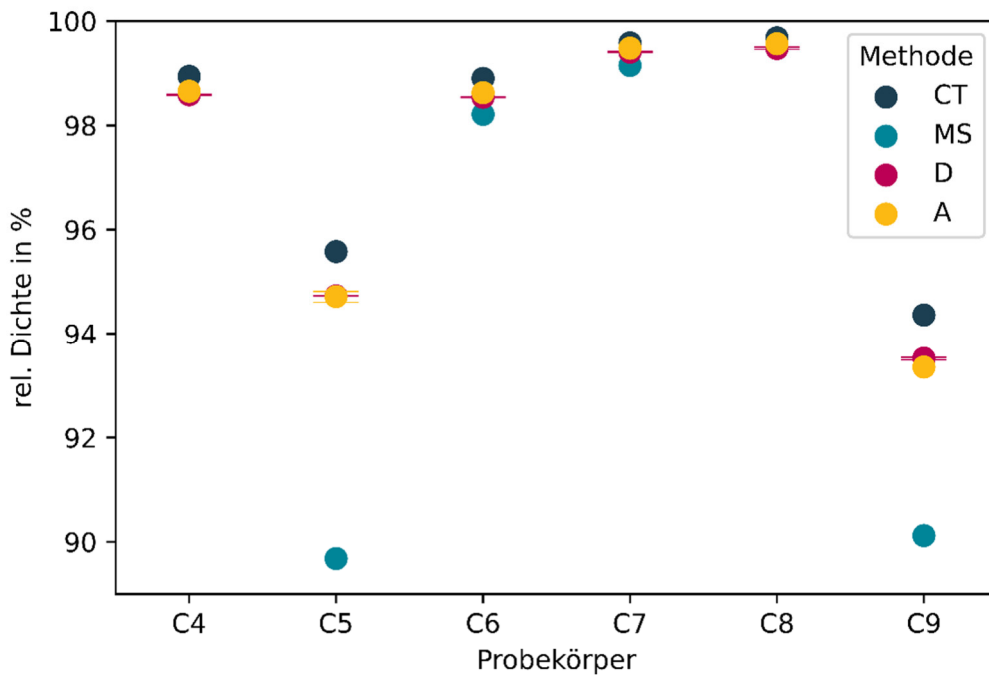


Abbildung 8: Relative prozentuale Dichte für die Probekörper C4-C9 mit Lack-of-Fusion Defekten

Die Unsicherheit aller Messverfahren nimmt bei einer höheren Porosität zu. Für die archimedischen Messverfahren ist dies durch die erwähnte Beeinflussung durch Gas, bzw. Pulver begründet. Im CT wird durch den geringeren Dichteunterschied zwischen Bauteil und Pulver die Größe der Pore schwerer bestimmbar. Dadurch wird die Dichte höher eingeschätzt. Im Schliffbild können durch Pulvereinschluss Kratzer entstehen, die die automatisierte Dichtebestimmung erschweren, weiterhin streuen die relativen Dichte deutlich breiter, wie in Abbildung 6 sichtbar ist.

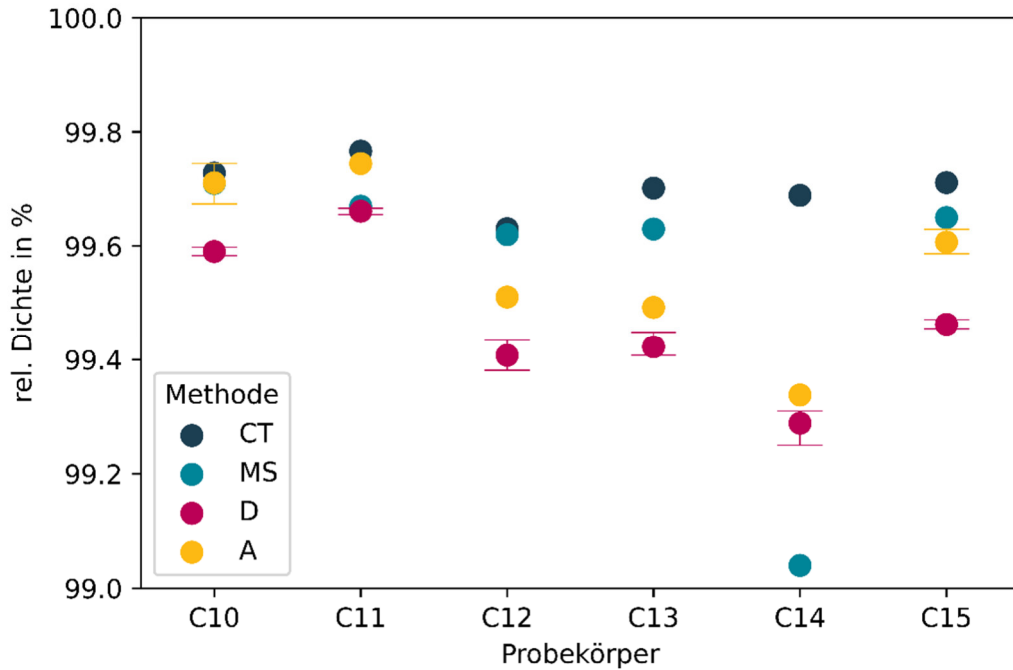


Abbildung 9: Relative prozentuale Dichte für die Probekörper C10-C15 mit Gasporen

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Messungen für die Probekörper mit Gasporen dargestellt. Die Dichteunterschiede der Probekörper untereinander sind hier deutlich niedriger als bei den Probekörpern mit Lack-of-Fusion Defekten. Gasporen sind deutlich kleiner als Lack-of-Fusion Defekte, die Detektion dieser Poren mit einem CT Scan gestaltet sich daher schwierig. Diese Abweichung ist besonders in Probekörper C14 ausgeprägt, bei der die relative Dichte zwischen  $1 - \Phi_{CT} = 99,69\%$  und  $1 - \Phi_{MS} = 99,04\%$  bestimmt wurde. Die Messungen mit der automatisierten Dichtewaage liegen zwischen den Ergebnissen der anderen Messverfahren. In Tabelle 3 sind die relativen Dichten der Probekörper, die mit den verschiedenen Messverfahren ermittelt wurden, dargestellt. Die CT Daten wurden zusätzlich mit einer theoretischen Auflösung von  $50\mu\text{m}$  analysiert, die relativen Dichten steigen durch die niedrigere Auflösung an.

Tabelle 3: Die relativen Dichten, sowie Standardabweichungen in %, die mit den betrachteten Messverfahren ermittelt wurden. Für das CT und die Schliffbilder können aufgrund des Messverfahrens keine Standardabweichungen bestimmt werden.

Probekörper	CT (10 $\mu\text{m}$ )	CT (50 $\mu\text{m}$ )	Schliffbild	Dimensionics <sup>1</sup>	Archimedes manuell <sup>2</sup>
C1	99,79	99,92	99,89	$99,79 \pm 0,022$	$99,92 \pm 0,029$
C2	99,80	99,94	99,67	$99,81 \pm 0,011$	99,93
C3	99,75	99,92	99,77	$99,77 \pm 0,011$	99,82
C4	98,94	99,19	98,63	$98,59 \pm 0,013$	98,65

<sup>1</sup> Die Werte werden mit einer Standardabweichung in beide Richtungen als Toleranz angegeben. Für die Probekörper C1, C5, C10, C15 beträgt die Anzahl der Messungen n=18, für die anderen Probekörper ist n=3.

<sup>2</sup> Die Werte werden mit einer Standardabweichung in beide Richtungen als Toleranz angegeben. Für die Probekörper C1, C5, C10, C15 beträgt die Anzahl der Messungen n=3, für die anderen Probekörper ist n=1. Daher ist die Bestimmung der Standardabweichung nicht möglich.

Probekörper	CT (10µm)	CT (50µm)	Schliffbild	Dimensionics <sup>1</sup>	Archimedes manuell <sup>2</sup>
C5	95,58	96,07	89,68	94,73 ± 0,020	94,72 ± 0,186
C6	98,90	99,02	98,21	98,54 ± 0,009	98,63
C7	99,58	99,63	99,16	99,40 ± 0,011	99,48
C8	99,68	99,88	99,48	99,47 ± 0,025	99,57
C9	94,36	94,79	90,13	93,52 ± 0,024	93,35
C10	99,73	99,92	99,71	99,59 ± 0,017	99,71 ± 0,057
C11	99,77	99,93	99,68	99,66 ± 0,006	99,74
C12	99,63	99,90	99,62	99,41 ± 0,026	99,51
C13	99,70	99,90	99,64	99,42 ± 0,023	99,49
C14	99,69	99,91	99,04	99,29 ± 0,034	99,34
C15	99,71	99,90	99,65	99,46 ± 0,019	99,61 ± 0,036

## 4.2 Reproduzierbarkeit

Neben der Genauigkeit der Messung ist die Reproduzierbarkeit des Prüfprozesses für eine Serienfertigung von großer Wichtigkeit. In Abbildung 5 und Abbildung 6 wurde die Streuung von Schliffbildern anhand von virtuellen Schlifften mit CT-Daten gezeigt. Um eine statistische Sicherheit über die relative Dichte zu erhalten sind daher mehrere Schliffe im Probekörper notwendig. Dies erhöht den Zeit- und Kostenaufwand erheblich.

Bei CT-Scans wird die Dichte über das Volumen bestimmt, durch das größere Verhältnis von Poren zu Material und die Mittelung über das gesamte Volumen ist diese Methode weniger anfällig für die bei Schliffbildern auftretende Streuung. Die Qualität der CT-Rekonstruktion nimmt mit einer steigenden Anzahl an Bildern zu, allerdings ist die Aufnahme dieser Bilder zeitaufwändig und steigert damit die Gesamtkosten der Messmethode erheblich.

Die generelle Eignung eines Mess- bzw. Prüfsystems für die Bestimmung eines Kennwerts, im speziellen den Fähigkeitsindizes  $c_g$  und  $c_{gk}$ , wird unter anderem durch die VDA 5 beschrieben. Diese teilt sich auf in den Nachweis der Messsystemeignung, der Messprozesseignung, der Konformitätsbewertung und der laufenden Überprüfung. Die komplette Betrachtung der Prüfprozesseignung wird in dieser Studie nicht betrachtet. Allerdings werden einige Bewertungen zu Teilfaktoren der Eignung der verschiedenen Systeme gegeben.

### 4.2.1 Auflösung der Messmittel

Die Auflösung der Messmittel muss ausreichend hoch für die Messung sein. Es wird in der Regel eine Auflösung von  $< 5\%$  gefordert. Der Prozentwert bezieht sich hierbei auf die Toleranz. Zum Beispiel wäre die notwendige Auflösung für die Messung von einem Maß  $10 \pm 0,1\text{mm}$  gleich  $0,01\text{mm}$  ( $5\%$  von  $0,2\text{mm}$  Toleranz).

Sowohl in Schliffbildern als auch in CT-Scans wird die Porosität optisch bestimmt. Für CT-Scans ist die Auflösung abhängig von der Bauteilgeometrie und -größe. Bei Schliffbildern ist die Auflösung abhängig von der Vergrößerung des Mikroskops und der Auflösung der verwendeten Kamera. Es besteht die Möglichkeit des Stitchings, bei denen mehrere Detailaufnahmen zu einer großen Aufnahme zusammengeführt werden. Dadurch kann eine größere Fläche mit hoher Auflösung analysiert werden. Die Auflösung einer Kamera wird in Pixeln angegeben, Pixel sind die kleinsten quadratischen Flächen, in denen ein Farb-, bzw. Helligkeitswert konstant ist. In den durchgeführten Versuchen entsprechen 218 Pixel  $1000\ \mu\text{m}$ , ein Pixel hat damit eine Kantenlänge von  $4,59\ \mu\text{m}$ . Eine höhere Auflösung ist durch eine Kamera mit mehr Pixeln, oder durch stärkere optische Vergrößerung möglich.

Für die Dichtebestimmung wird ein Toleranzbereich  $TOL = 0.2\%$  definiert. Eine beispielhafte Bestimmung der relativen Dichte kann über  $1 - \Phi = 99,5\% \pm 0,1\%$  dargestellt werden. Nachfolgend wird überprüft ob die Messmethoden die geforderte Auflösung für diesen Toleranzbereich besitzen.

Im betrachteten Fall haben die Probekörper eine würfelförmige Kontur mit einer Kantenlänge von  $10\text{mm}$ . Dies führt im Querschliff zu einer Fläche von  $10\text{mm} \cdot 10\text{mm} = 100\text{mm}^2$ . Bei der oben dargestellten erwarteten relativen Dichte von  $99,5\%$  beträgt die Porenfläche somit  $0,5\text{mm}^2 \pm 0,1\text{mm}^2$ . Es wird eine Auflösung von  $< 5\%$  gefordert, somit ist die

Toleranzfläche  $0,2\text{mm}^2 \cdot 5\% = 0,01\text{mm}^2$ . Die Auflösung bei Schlibfbildern beträgt  $4,59\mu\text{m} \cdot 4,59\mu\text{m} = 21,07\mu\text{m}^2$  und ist damit deutlich kleiner als die geforderte Auflösung.

Für größere Bauteile ist es möglich, über Stitching mehrere hochauflösende Aufnahmen zu erstellen. Daher ist die minimale Auflösung in der Theorie von der Bauteilgröße unabhängig. In der Praxis wird die Auflösung der Bauteilgröße angepasst, da die zu verarbeitenden Daten stark ansteigen, genauso wie die benötigte Zeit und der Nutzen einer sehr hohen Auflösung verhältnismäßig gering ist.

In den CT-Aufnahmen wird das Volumen betrachtet. Die Probekörper haben ein Volumen von  $100\text{mm}^3$ , für die gleiche angenommene Toleranz von  $\pm 0,1\%$  entspricht das Porenvolumen  $0,5\text{mm}^3 \pm 0,1\text{mm}^3$ , daher ist eine minimale Volumenauflösung von  $0,2\text{mm}^3 \cdot 5\% = 0,01\text{mm}^3$  nötig. Die in den Versuchen verwendete Auflösung beträgt  $10\mu\text{m}$ , wobei erst ab 3 Pixeln eine Pore detektiert werden kann, weshalb die minimale Längenauflösung auf  $30\mu\text{m}$  ansteigt, dementsprechend ist die Voxelgröße  $(30\mu\text{m})^3 = 27000\mu\text{m}^3$  und damit deutlich kleiner als die geforderte Volumenauflösung.

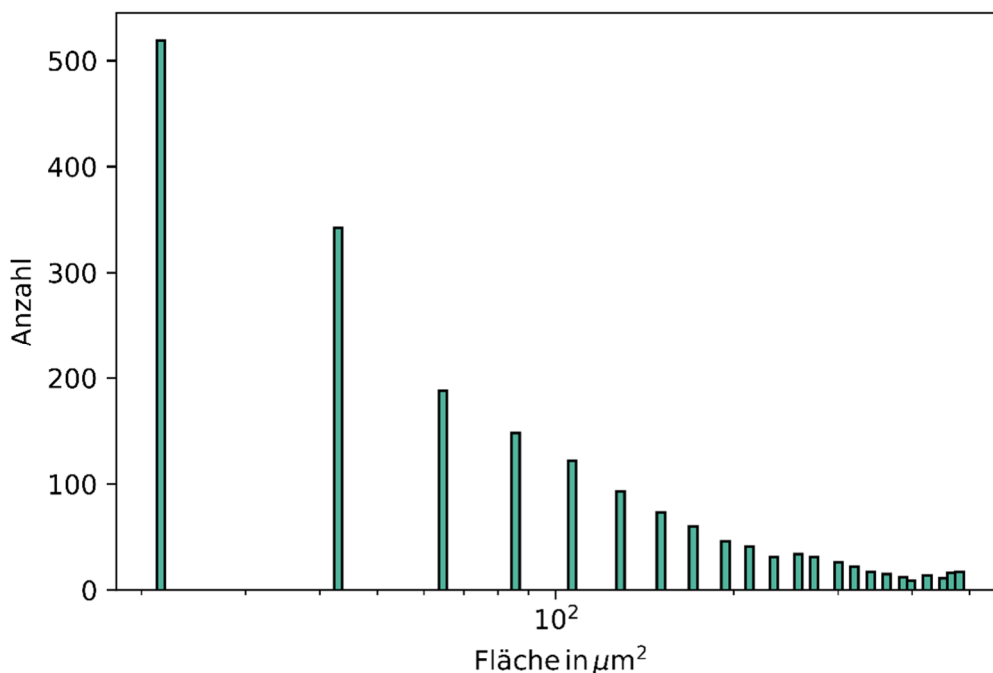


Abbildung 10: Ausschnitt eines Histogramms der Porenflächenverteilung im Schlibfbild in halblogarithmischer Darstellung von 0 bis  $500\mu\text{m}^2$ . Durch die diskrete Pixelanzahl kann die Porengröße und -fläche nicht kontinuierlich dargestellt werden.

Bei größeren Bauteilen sinkt die Auflösung des CT-Scans ab. Für einen würfelförmigen Probekörper mit Kantenlänge  $100\text{mm}$  steigt die Kantenlänge der Voxel auf  $100\mu\text{m}$  an. Bei gleichen Toleranzwerten ist eine Volumenauflösung von  $2\text{mm}^3 \cdot 5\% = 0,1\text{mm}^3$  notwendig. Das Voxelvolumen entspricht  $(300\mu\text{m})^3 = 0,027\text{mm}^3$  und ist nun deutlich höher als im vorherigen Fall.

Diese Berechnungen sind nicht zielführend, da sie davon ausgehen, dass die Porosität als eine große Fläche, bzw. Volumen vorliegt. In der Realität entspricht die Dichte allerdings einer Summe aus vielen unterschiedlich großen Poren. Die kleinsten detektierbaren Poren entsprechen damit der Auflösungsgrenze des Messgeräts. Für das Schlibfbild liegt diese Grenze im betrachteten Fall bei der Fläche eines Pixels, also  $(4,59\mu\text{m})^2 = 21,07\mu\text{m}^2$ . Die nächstgrößere Pore hat eine Ausdehnung von 2 Pixeln in eine Richtung und einem Pixel in die andere, die Fläche entspricht  $21,07\mu\text{m}^2 \cdot 2 = 42,14\mu\text{m}^2$ . Kleine Poren können also nur in diskreten Schritten beschrieben werden, abhängig von der Größe der Pixel.

Dies ist in Abbildung 10 erkennbar. Im Bereich kleiner Poren entstehen durch die diskrete Auflösung des Bildes starke Sprünge der Porenflächen. Die erste Säule entspricht einer Porenfläche von einem Pixel, die zweite Säule einer Porenfläche von zwei Pixeln. Kleinere Poren können nicht erkannt werden, hier hat das Schlibfbild eine Auflösungsgrenze. Für CT-Scans ist das in Abbildung 10 dargestellte Porenverhalten ähnlich, allerdings aufgrund der dreidimensionalen Auflösung auf das



Porenvolumen statt die Fläche bezogen. Im betrachteten Fall können Poren mit einem Volumen  $V \geq (3 \cdot 10\mu\text{m})^3 = 27000\mu\text{m}^3 = 27 \text{ Voxel}$  erfasst werden. Kleinere Poren können dementsprechend nicht erkannt werden.

Die Auswirkungen der Poren an der Auflösungsgrenze auf die relative Dichte ist von mehreren Faktoren abhängig. Ist die gesamte Porosität hoch, wie beispielsweise bei den gezeigten Probekörpern mit Lack-of-Fusion Defekten, so ist der Anteil der kleinen Poren an der gesamten Porenfläche niedrig. Mit steigender relativer Dichte sinkt die Porenfläche, bei gleichbleibender Anzahl kleiner Poren steigt also deren Anteil an der Porenfläche. Für eine Serienfertigung mit hohen relativen Dichten kann die Auflösungsgrenze also durchaus einen relevanten Einfluss auf die Fähigkeit des Messmittels haben.

Im Histogramm in Abbildung 10 haben 519 Poren eine Fläche von einem Pixel, dies entspricht einer gesamten Porenfläche von 519 Pixeln, also  $10934,34\mu\text{m}^2$ . Dieser Wert liegt über der geforderten Toleranzfläche von  $0,01\text{mm}^2 = 10000\mu\text{m}^2$ . Während diese kleinen Poren also einen geringen Einfluss auf die Gesamtfläche haben, so wird durch die beschränkte Auflösung der Schlibbilder die Tolerierungsmöglichkeit limitiert. Es ist davon auszugehen, dass auch Poren jenseits der Detektionsgrenze von einem Pixel existieren, ausgehend von der ansteigenden Anzahl immer kleinerer Poren sind diese wahrscheinlich in größerer Zahl vertreten als die detektierten Poren. Es ist möglich durch eine feinere Auflösung kleinere Poren zu detektieren, allerdings steht dies im Kontrast zum zeitlichen und finanziellen Aufwand.

Die Problematik der beschränkten Auflösung ist auch für CTs relevant. Hier ist die maximal mögliche Auflösung auch stark vom verwendeten Material, sowie der Dicke des Bauteils abhängig. Für größere Bauteile sind nur niedrige Auflösungen möglich. Es besteht daher die Gefahr, dass dem Bauteil eine höhere relative Dichte, bzw. eine Porenfreiheit attestiert wird, obwohl es in der Realität eine Porosität aufweist. Dieses Problem wird in Abbildung 11 veranschaulicht. Es betrachtet exemplarisch die relative Dichte in Probekörper C14 für verschiedene CT Auflösungen. Die relative Dichte nähert sich mit steigender Voxelgröße einem Wert von 100% an, da kleine Poren nicht mehr detektiert werden können.

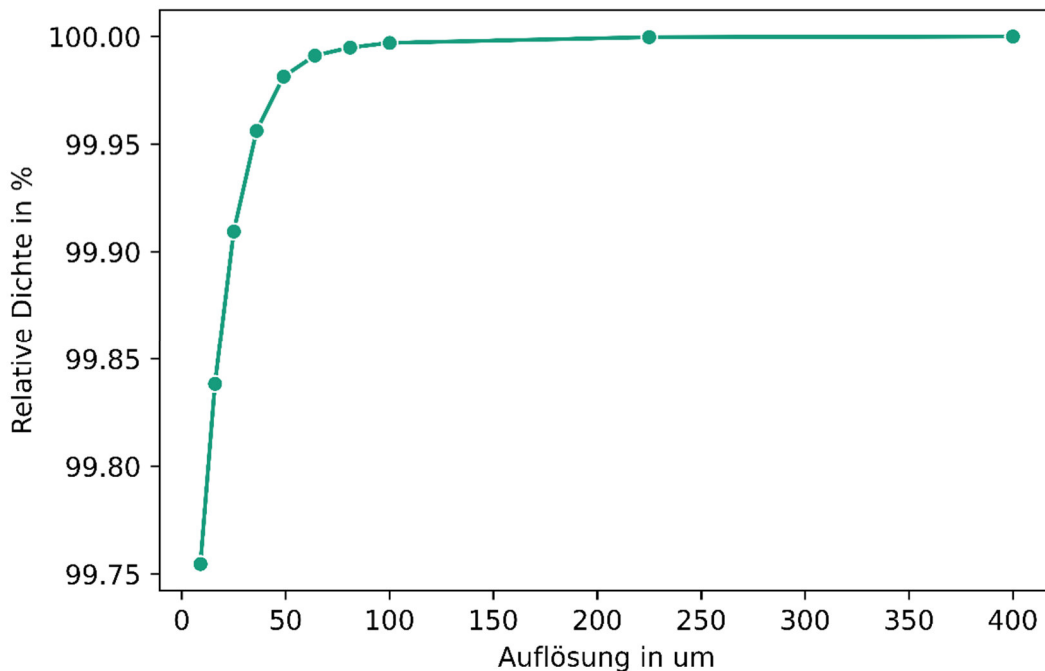


Abbildung 11: Berechnete relative Dichte des Probekörpers C14 für verschiedene Auflösungen des CTs

Die Auflösung der Messungen nach dem Archimedischen Prinzip ist abhängig von der Genauigkeit der verwendeten Waage. Bei der verwendeten Absolutdichte von  $\rho_{0CT} = 2,6662 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  entspricht die Toleranz von  $\pm 0,1\%$  einer Dichteänderung von  $\Delta\rho = 0,002662 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Die automatisierte Dichtebestimmung gibt eine Genauigkeit von  $0,001 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  an und liegt damit innerhalb der notwendigen Toleranz. Die Auflösung der manuellen Dichtebestimmung ist gleich mit der Auflösung der automatisierten

Dichtebestimmung. Eine Diskretisierung der Ergebnisse findet nur durch die Waage statt, der mögliche Toleranzbereich ist daher direkt von der Auflösung der verwendeten Waagen abhängig.

#### 4.2.2 Bestimmung der Wiederholbarkeit

Die Wiederholbarkeit wird über wiederholte Messungen an einem Teil ermittelt. Für Schliiffbilder und CT-Scans ist das Ergebnis der wiederholten Messung gleich gegenüber einer Einzelmessung, da beide Verfahren einen deterministischen Algorithmus zur Bestimmung der relativen Dichte verwenden. Eventuelle Abweichungen können somit nur auf die Datengewinnung zurückführbar sein. Aufgrund der hohen Kosten wurden keine wiederholten CT-Scans durchgeführt, daher ist die Wiederholbarkeit hier nicht bestimmbar.

Da die Porosität von Schliiffbildern innerhalb des Bauteils erheblich schwankt, wie in Abschnitt 4 gezeigt wurde, ist die erwartete Wiederholbarkeit der Messung gering. Durch die zerstörende Prüfung kann bei diesem Messmittel keine Untersuchung der Wiederholbarkeit durchgeführt werden.

Die Wiederholbarkeit von CT Aufnahmen ist abhängig von der Platzierung des Probekörpers auf der Scanplattform. Kleine Poren könnten bei einer anderen Platzierung als kleiner oder größer detektiert werden. Die reale Größe und Form der Poren kann an der Auflösungsgrenze nur unzureichend erfasst werden. Es ist daher von einer geringfügigen Schwankung der Porositätswerte bei gleicher Auflösung und gleichem Probekörper auszugehen.

In der automatisierten Dichtebestimmung wurde an 11 verschiedenen Probekörpern jeweils 15 Messungen durchgeführt, die maximale ermittelte Standardabweichung beträgt  $\sigma = 0,0008 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,03\%$ . Alle Messwerte befinden sich für jeden Probekörper innerhalb  $6\sigma$ .

#### 4.2.3 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit bildet den Einfluss verschiedener Prüfer auf das Messergebnis ab. Unter gleichen Voraussetzungen messen mehrere Prüfer dasselbe Teil mehrmals. Das Schliiffbild ist für diese Prüfung ungeeignet, da die Probenpräparation das Bauteil zerstört. CT Scans finden abgesehen von der Probenplatzierung automatisiert statt, daher ist ein Einfluss durch Anwender gering. In der Bildverarbeitung und Filterung der Aufnahmen kann allerdings wieder ein Bedieneinfluss auftreten, abhängig von der Erfahrung der Anwender. Für die automatisierte Dichtebestimmung ist lediglich die Platzierung im Probenträger manuell, die restliche Messung findet automatisiert statt. Daher ist von einem geringen manuellen Einfluss auf die Messungen auszugehen, entsprechend eine hohe Reproduzierbarkeit. Das manuelle Archimedes Verfahren ist basierend auf Erfahrungswerten am Fraunhofer IAPT stark vom jeweiligen Benutzer und dessen Erfahrung, sowie Sorgfalt abhängig.

### 4.3 Defektdetektion

Die Messungen nach dem Archimedischen Prinzip erlauben keine direkte Bestimmung des Defekttyps. Hier haben das Schliiffbild, sowie der CT-Scan einen Vorteil. Mit diesen Verfahren ist eine zwei- bzw. dreidimensionale Rekonstruktion der Poren möglich, was eine anschließende Bewertung hinsichtlich Auswirkungen auf statische oder dynamische Werkstoffeigenschaften vereinfacht. CT-Scans sind in der Auflösung durch die Dicke, bzw. das Volumen des Materials limitiert. Bei den verwendeten Dichtewürfeln mit einem Volumen von 10x10x10mm konnte eine Auflösung von 10µm erreicht werden. Für größere Bauteile kann nur eine niedrigere Auflösung erreicht werden, daher ist die Detektion von Defekten schwieriger. Für eine sichere Detektion und räumliche Darstellung muss der Defekt die dreifache Größe der minimalen Auflösung besitzen, im betrachteten Fall sind das 30 µm in jede Raumrichtung. Gerade Gasporen haben eine geringere Größe, die Detektion dieser Poren ist mit einem CT-Scan nicht möglich. Dies ist auch in Abbildung 9 ersichtlich. Die Probekörper C10-C15, in denen gezielt Gasporen erzeugt wurden, werden im CT-Scan mit einer höheren Dichte bewertet, als in den anderen Verfahren. Bei den archimedischen Verfahren ist eine Beeinflussung durch das in den Poren enthaltene Gas möglich, dieses senkt die relative Dichte zu niedrigeren Werten ab.

Bei den Probekörpern mit Lack-of-Fusion Defekte treten ebenfalls Abweichungen zwischen allen Messverfahren auf. CT-Scans schätzen hier die relative Dichte am höchsten ein. Es besteht die Möglichkeit, dass Lack-of-Fusion Defekte nur schwer durch diese Verfahren darstellbar sind. Die CT Daten werden zur Dichtebestimmung binärisiert. Der klassische Algorithmus zur Binärisierung ist der Otsu-Algorithmus, der das Graustufenbild in zwei Klassen aufteilt und versucht die Varianz innerhalb dieser Klassen zu minimieren. Die Graustufen entsprechen hier der relativen Dichte, wobei Material als dunkel, Poren als hell

gekennzeichnet sind. Bei Lack-of-Fusion Defekten ist der Dichteunterschied zwischen Material und Pore geringer als bei Gasporen. Daher ist auch die Aufteilung in zwei Klassen deutlich schwieriger, der Algorithmus betrachtet Teile des Lack-of-Fusion Defekts noch als Vollmaterial. Daher werden die Defekte kleiner als in der Realität vorhanden geschätzt und dementsprechend ist die relative Dichte höher.

Das Schliffbild ist als lokale Momentaufnahme ungeeignet um eine qualifizierte Aussage über die relative Dichte zu treffen. Gerade bei Lack-of-Fusion Defekten schwankt die lokale Porosität stark, wie auch in Abbildung 6 sichtbar ist. Eine Aussage ist hier nur mit erheblicher statistischer Unsicherheit möglich. Bei den Methoden nach dem Archimedischen Verfahren ist ebenfalls von einer Abweichung auszugehen, da das Pulver innerhalb der Poren die relative Dichte beeinflusst. Eine quantitative Bewertung dieser Abweichung ist schwierig, da die Menge des noch vorhandenen Pulvers in den Defekten, sowie die relative Dichte innerhalb des Defektes nicht bestimmbar ist. Die Messergebnisse folgen allerdings dem Trend der CT Messungen, weshalb von einer Grundfähigkeit des Messsystems zur Dichtebestimmung auch bei Lack-of-Fusion Defekten auszugehen ist.

## 5 Bewertung der Verfahren

### 5.1 Eignung für die additive Fertigung

Alle Verfahren sind grundsätzlich in der Lage die relative Dichte von additiv gefertigten Bauteilen zu bestimmen. Es kommt zu Unterschieden bei der Genauigkeit, der Auflösung, der Wiederholbarkeit, sowie der Möglichkeit zur Defektdetektion.

Am Fraunhofer IAPT werden für die Parameterentwicklung in der Regel Schliffbilder erstellt. Diese ermöglichen einem Blick in den Probekörper, wodurch Defekte nach deren Art klassifiziert werden können. In Abschnitt 4 wurde gezeigt, dass diese Schliffbilder nur lokale Rückschlüsse ermöglichen und die relative Dichte innerhalb des Probekörpers stark abweichen kann. Für belastbare Aussagen über die relative Dichte muss der Probekörper an mehreren Positionen geschliffen und analysiert werden, was den Arbeits- und Zeitaufwand erhöht. Die Ergebnisse haben für das Institut eine ausreichende Genauigkeit, auch wenn Beschränkungen hinsichtlich der minimalen Porengröße auftreten.

CT-Scans ermöglichen eine dreidimensionale Betrachtung durch das Bauteil hindurch. Das entspricht der Durchführung von hunderten bis tausenden Schliffen durch das Material. Es ist damit möglich eine globale Aussage über die Porosität zu treffen, genauso können aber auch Schichten auf Anomalien oder starke Abweichungen analysiert werden. Die Aufnahmen mit einem CT sind beschränkt durch die Auflösung, diese ist gegenüber einem Schliffbild geringer. Es können also weniger kleine Poren detektiert werden. Das CT arbeitet basierend auf den Dichteunterschieden des Materials. Während es bei Gasporen einen großen Unterschied zwischen Vollmaterial und Pore gibt, so ist dieser bei Lack-of-Fusion Defekten geringer, weshalb die Größe dieser Defekte unterschätzt wird.

Die Archimedes Methode ist grundsätzlich in der Lage die globale relative Dichte des Bauteils zu bestimmen. Das Hauptproblem dieser Methode ist die fehlende Wiederholgenauigkeit und Schwankung durch die manuelle Messung. Die Auflösung wird hier maßgeblich durch die verwendete Waage bestimmt, solange diese ausreichend genau misst sind klare Aussagen zur relativen Dichte möglich.

Die automatisierte Dichtebestimmung entfernt den Anwender aus der archimedischen Messung und hat daher eine deutlich höhere Wiederholgenauigkeit und geringere Schwankungen. Die Methode ist als einziges Verfahren rückführbar, kann also über eine Messkette auf einen anerkannten Standard bezogen werden. Gegenüber Schliffbild und CT-Scans ist die Messung außerdem auch deutlich kürzer, weshalb mehrere Messungen für eine höhere statistische Sicherheit leichter möglich sind und somit ist dieses Verfahren auch für die Bewertung der Prozessfähigkeit von Maschinen geeignet. Die Schaffung der Prozessfähigkeit von Maschinen ist ein essentieller Schritt für die Fertigung von additiv hergestellten Serienbauteilen. Es werden kontinuierlich von externen Einflussfaktoren, wie z.B. der Temperatur ermittelt. Diese Einflussfaktoren werden in die Dichteberechnung einbezogen und kompensiert, dadurch ist auch ein Betrieb in Räumen ohne Laborbedingungen möglich.

## 5.2 Aufwand

Der Aufwand für die Bestimmung der Dichte unterscheidet sich in den Verfahren und ist auch von der untersuchten Stückzahl abhängig. Nachfolgend wird eine Betrachtung der benötigten Zeit, der Dimensionen der Maschinen, sowie dem benötigten Qualifizierungsgrad für Mitarbeitende durchgeführt.

### 5.2.1 Mikroskopische Analyse von Querschliffen

Die benötigte Arbeitszeit für die mikroskopische Analyse von Querschliffen ist in Tabelle 4 dargestellt. Es besteht die Möglichkeit mehrere Proben gleichzeitig zu bearbeiten. Dadurch sinkt die benötigte Zeit pro Probekörper ab. Dieser Skalierungseffekt wird in der finanziellen Betrachtung berücksichtigt. Der benötigte Raum für den Betrieb der Maschinen ist gering, dieser ist abhängig von dem Automatisierungsgrad der Schleifmaschine. Einfache Maschinen können auf einem handelsüblichen Tisch platziert werden, größere Maschinen mit einer automatischen Wechseleinheit haben einen Raumbedarf von circa 3,5 m<sup>3</sup>. Zusätzlich zu den Schleifmaschinen ist ein Gerät zur Einbettung notwendig, sollte eine Kalteinbettung verwendet werden muss das Arbeiten unter einem Abzug gewährleistet sein. Wenn das Bauteil zu groß für das Einbetten, bzw. die Bearbeitung in der Schleifmaschine ist, muss es auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Dies wird über Trennmaschine, eine Säge mit starker Wasserkühlung vollzogen. Diese kann genauso wie eine Einbettmaschine auf einem Tisch platziert werden.

*Tabelle 4: Arbeitsschritte zur Analyse von Querschliffen*

Arbeitsschritte	Zeit in min
Vorbereitung der Probe	5
Einbettung in Polymermatrix	15
Grobes Schleifen	120
Feinschleifen	120
Polieren	30
Mikroskopieren / Dichtebestimmung	2
<b>Summe</b>	<b>292</b>

Neben den Schleif- und Einbettmaschinen wird ein Mikroskop benötigt. Hier ist eine räumliche Trennung der Arbeitsschritte notwendig, da die optischen Geräte des Mikroskops empfindlich gegenüber Verunreinigungen sind. Das Mikroskop kann ebenfalls auf einem Tisch platziert werden.

Für den Betrieb der Maschinen ist keine spezielle Qualifikation notwendig. Allerdings ist die Qualität und der zeitliche Aufwand der Schlibfbilder durch die Erfahrung des Anwenders beeinflussbar. Diese beinhaltet beispielsweise die optische Qualitätsprüfung nach jeder Schleifphase, oder die Wahl der verschiedenen Schleifpapiere und -dauern. Für den Vergleich mehrerer Probekörper zueinander empfiehlt sich ein paralleler Schliff der Probekörper.

### 5.2.2 Computertomographie

*Tabelle 5: Arbeitsschritte für die Computertomographie*

Arbeitsschritte	Zeit in min
Platzierung der Probe	5
Tomographie	90
3D Rekonstruktion des Probekörpers	30
Dichtebestimmung	25
<b>Summe</b>	<b>150</b>

Computertomographen sind deutlich größer als Schleifmaschinen. Die Maschinengröße ist auch abhängig von der Größe des zu untersuchenden Bauteils. Die in dieser Studie betrachteten Probekörper wurden von einem Computertomographen V|tome|x M der Marke GE analysiert. Dieses CT hat eine Größe von 2600x2060x1570 (BxHxT in mm) und ein Gewicht von etwa 8 Tonnen. Die Arbeitsschritte zur Analyse von CT Daten zur Dichtebestimmung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Ein CT Gerät arbeitet mit Röntgenstrahlung, daher ist zum Schutz des Anwenders und Dritter eine entsprechende Qualifikation erforderlich. Auch ist die Bestimmung eines Strahlenschutzbeauftragten, sowie Strahlenschutzverantwortlichen, im Unternehmen notwendig. Ein erfahrener Anwender kann unter Umständen die benötigte Maschinenzeit reduzieren und die Qualität der erstellten Daten verbessern. Durch eine Zertifizierung des Bedieners werden Fehlinterpretationen reduziert und die Belastbarkeit der Ergebnisse erhöht. Die Zeit bis zur Inbetriebnahme der Maschine kann, abhängig von den genehmigenden Behörden, etwa einen Monat dauern.

Neben der formalen Genehmigung durch Behörden muss der Bediener des CTs gut geschult und erfahren sein, um Fehler in der Bildaufnahme und der Bildverarbeitung zu minimieren. Diese Fehler, beispielsweise Artefakte oder Rauschen, können die Ermittlung der Dichte erschweren und die Genauigkeit des Messverfahrens eklatant beeinflussen.

### 5.2.3 Archimedes-Verfahren

*Tabelle 6: Arbeitsschritte im manuellen Archimedes Verfahren*

Arbeitsschritte	Zeit in min
Messung in Luft	1
Messung in Fluid	3
Dichtebestimmung	1
Datenerfassung und Weitergabe	2
<b>Summe</b>	<b>7</b>

Der benötigte Raum für die Messung ist gering. Es wird lediglich eine Waage, sowie eine passende Messapparatur benötigt. Allerdings sind Messungen nach dem Archimedes Verfahren sensitiv gegenüber Umwelteinflüssen, daher sind für genaue Messungen Laborbedingungen erforderlich. Die Temperatur der Luft, der Luftdruck, sowie die Fluidtemperatur sollten möglichst konstant gehalten werden, Änderungen dieser Einflussfaktoren haben einen starken Einfluss auf die Messergebnisse. Die Arbeitsschritte sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Kosten für die Errichtung und Betrieb eines Laborraums wurden in der finanziellen Betrachtung nicht berücksichtigt.

Der Anwender muss die notwendige Sorgfalt walten lassen und muss die Einflussfaktoren aus der Umwelt (Temperaturen, Luftdruck) kennen. Durch manuelle Tätigkeit kann der Anwender das Ergebnis versehentlich beeinflussen, deshalb ist erfahrenes Personal zu bevorzugen..

### 5.2.4 Automatisierte Dichtebestimmung

*Tabelle 7: Arbeitsschritte in der automatisierten Dichtebestimmung*

Arbeitsschritte	Zeit in min
Messung in Luft	0,5
Messung in Fluid	1
Dichtebestimmung & internes Probenhandling	0,5
<b>Summe</b>	<b>2</b>

Der benötigte Raum ist durch die Automatisierung größer als beim manuellen Archimedes-Verfahren, allerdings deutlich kleiner als eine CT-Maschine, oder eine komplette Schleifeinrichtung. Eine geschlossene Anlage als großes Modell hat einen Raumbedarf von 3 m<sup>2</sup>, kleinere Anlagen etwa 1 m<sup>2</sup>. Durch die Kapselung der Maschine und die kontinuierliche Erfassung der Umweltbedingungen sind keine Laborbedingungen notwendig. Die automatisierten Arbeitsschritte sind in Tabelle 7 dargestellt.

Da die Messung automatisiert abläuft und der Anwender lediglich die Bestückung übernimmt ist keine besondere Qualifizierung notwendig. Für den Umgang mit der Anlage wird lediglich eine einmalige Schulung benötigt.

### 5.2.5 Fazit zur Aufwandsabschätzung

Eine tabellarische Darstellung der Aufwandsabschätzung ist in Tabelle 8 sichtbar. Diese Bewertung stellt eine Zusammenfassung der oben getroffenen Abschätzungen, sowie der Ergebnisse der Analysen dar. Die Bewertung ist bewusst unscharf getroffen worden, da je nach Anwendungsfall die einzelnen Faktoren unterschiedlich gewichtet sind.

*Tabelle 8: Aufwandsabschätzung der Dichtebestimmungsverfahren*

	Schliffbilder	CT	Archimedes	Automatisierte Dichtebestimmung
<b>Zeitlicher Aufwand</b>	Hoch	Hoch	Niedrig	Niedrig
<b>Räumlicher Aufwand</b>	Mittel	Hoch	Niedrig	Mittel
<b>Qualifizierungsgrad Anwender</b>	Mittel	Hoch	Mittel	Niedrig
<b>Bauteilgröße begrenzt durch</b>	Schleifmaschine	Auflösung	Flüssigkeitsbad	Flüssigkeitsbad
		Maschine	Waage	Waage
<b>Genauigkeit</b>	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch
<b>Reproduzierbarkeit</b>	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
<b>Güte der Ergebnisse</b>	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
<b>Bemerkung</b>		Auflösungssensitivität	Referenzdichte notwendig	Referenzdichte notwendig

## 5.3 Finanzielle Betrachtung

### 5.3.1 Anwendungsfälle

Es werden für die Analyse unterschiedliche Szenarien betrachtet. Diese unterscheiden sich hauptsächlich in den Stückzahlen und Automatisierungsgraden der Produktion. Der finanzielle Aufwand zur Bewertung der Probekörper wird nachfolgend aufgeführt. Die Qualität der erzielten Daten wird nicht in die finanzielle Betrachtung eingebunden. Es ist davon auszugehen, dass Verfahren mit einer geringen Reproduzierbarkeit eine höhere Anzahl an notwendigen Versuchen benötigen um eine statistisch valide Aussage treffen zu können.

Die Anwendungsfälle unterscheiden sich finanziell hauptsächlich in den Stückzahlen und den Personalkosten. Die Investitionskosten sind in allen Fällen ähnlich und werden in der nachfolgenden Tabelle 9 aufgeführt. Die aufgeführten Preise dienen als Richtwerte, es sind individuelle Kombinationen auf Grundlage des bestehenden Anwendungsfalls möglich. Beispielsweise könnte beim CT auf eine teure Analysesoftware verzichtet werden, wenn fähiges Personal die Analyse übernimmt. Dies geht mit höheren Personalkosten einher.

Mit höherer Stückzahl ist eine weitere Automatisierung der Maschinen zur Erstellung der Schliffbilder denkbar, allerdings ist das Angebot für komplett automatisierte Schleifmaschinen stark begrenzt. Die automatisierte Dichtebestimmung ist in mehreren Automatisierungsstufen ausführbar, für den Anwendungsfall 1 wird aufgrund der geringeren Stückzahl die Version S betrachtet, für die anderen Anwendungsfälle die Version M.

Tabelle 9: Notwendige Investitionen zur Dichtebestimmung

Schliffbild	$\mu$ CT	Archimedes	Disionic Density S		Disionic Density M	
Auflichtmikroskop inkl. Software	50 t€ $\mu$ CT	210 t€				
Nasstrennschleifmaschine	8 t€ Software	30 t€				
Einbettgerät	2 t€ Schulungen	5 t€		Anlage inkl. Software		Anlage inkl. Software
Schleif- und Poliergerät	5 t€ Abnahme etc.	5 t€	Dichtewaage	2,2 t€	100 t€	180 t€
<b>Summe</b>	<b>65 t€</b>	<b>250 t€</b>		<b>2,2 t€</b>	<b>100 t€</b>	<b>180 t€</b>

Es wird eine Nutzungsdauer von 7 Jahren betrachtet, bei 230 Arbeitstagen im Jahr und einer 40 Stunden Woche. In Tabelle 10 sind die Kosten für den Betrieb der Messverfahren dargestellt. Diese beinhalten die Investitionskosten, die Stromkosten, sowie die Kosten für das Verbrauchsmaterial. Für das Schliffbild werden die möglichen Skalierungseffekte inkludiert. Es wird angenommen, dass 30 Probekörper simultan geschliffen werden können. Diese Optimierung ist nur möglich mit kleinen Probekörpern wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind. Für größere Körper oder reale Bauteile erhöhen sich daher die Kosten pro Messung. Als Verbrauchsmaterial sind hier die verwendeten Schleifpapiere, das Einbettmaterial, sowie Suspensionen zum Polieren zu nennen. Das Archimedes-, sowie das automatisierte Dichtebestimmungsverfahren verwenden eine Wasser-Tensid Lösung, die regelmäßig erneuert werden muss.

#### Anwendungsfall 1: Forschungsinstitut

Es wird ein Forschungsinstitut wie das Fraunhofer IAPT betrachtet. Die Fertigung ist hier geprägt durch die Entwicklung von Parametersätzen mit einer hohen Anzahl von gefertigten Probekörpern, sowie durch die Fertigung einzelner Bauteile in kleinen Stückzahlen zu Forschungszwecken. Im Fraunhofer IAPT werden jährlich etwa 1500 Dichtewürfel analysiert. Für Arbeiten ohne speziell notwendige Fachkenntnisse kann auf studentische Hilfskräfte zurückgegriffen werden, daher sind die Personalkosten gering. Das  $\mu$ CT kann aufgrund von fehlenden Qualifikationen nicht von Studierenden benutzt werden, der Personalkostensatz ist entsprechend höher. Tabelle 10 zeigt die Gesamtkosten der verschiedenen Verfahren für den Anwendungsfall 1. Die geringsten Gesamtkosten pro Messung sind mit der automatisierten Dichtebestimmung möglich, gefolgt vom manuellen Archimedes Verfahren, der Erstellung von Schliffbildern und dem  $\mu$ CT.

Für die automatisierte Dichtebestimmung, sowie das CT wurden nicht 100% der benötigten Zeit als Personalarbeitszeit gerechnet. Dies hat den Hintergrund, dass beide Verfahren einen erhöhten Automatisierungsgrad aufweisen, somit muss das Personal die Maschine nicht durchgehend bedienen und kann die Zeit an einer anderen Stelle produktiv nutzen. In der automatisierten Dichtebestimmung wird ein Durchsatz von 12 Teilen pro Stunde angenommen. Der Personalaufwand für die Bestückung und das Starten der Messungen beträgt 10 Minuten pro Stunde, dies entspricht einem Personalaufwand von 0,83 Minuten pro Bauteil. Für das CT wird von einer Messdauer von 150 Minuten ausgegangen, dies entspricht einem Bauteildurchsatz von 0,4 Bauteilen pro Stunde. Es wird ein Personalaufwand von 30 Minuten pro Bauteil angenommen.

Tabelle 10: Gesamtkosten der Dichtebestimmungsverfahren für den Anwendungsfall 1

	Schliffbild	$\mu$ CT	Archimedes	Disionic Density
Messdauer in Minuten	292	150	5	2
<u>Investitionskosten</u>	Pro Minute	0,08 €	0,32 €	0,003 €
	Pro Messung	<b>24,56 €</b>	<b>48,52 €</b>	<b>0,014 €</b>
<u>Stromkosten</u>	Stromverbrauch	1,06 kW	8 kW	0,1 kW
	Pro Minute	0,006 €	0,06 €	0,0008 €
	Pro Messung	<b>2,32€</b>	<b>9 €</b>	<b>0,004 €</b>
<u>Verbrauchsmaterial</u>	Pro Messung	<b>50,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>0,50 €</b>
<u>Stückkosten</u>	Pro Messung	<b>76,88 €</b>	<b>57,52 €</b>	<b>0,52 €</b>
<u>Personalkosten</u>	Pro Minute	0,22 €	0,83 €	0,22 €
	Pro Messung	<b>63,27 €</b>	<b>25,00 €</b>	<b>1,08 €</b>
<u>Gesamtkosten</u>	Pro Messung	140,15 €	82,52 €	1,60 €
	Skalierungsfaktor	30	-	-
	Pro Messung	<b>4,67 €</b>	<b>82,52 €</b>	<b>1,60 €</b>
	Minimal notwendige Messungen für stat. Sicherheit	3	-	3
	Pro Bauteil	<b>14,02 €</b>	<b>82,52 €</b>	<b>4,80 €</b>

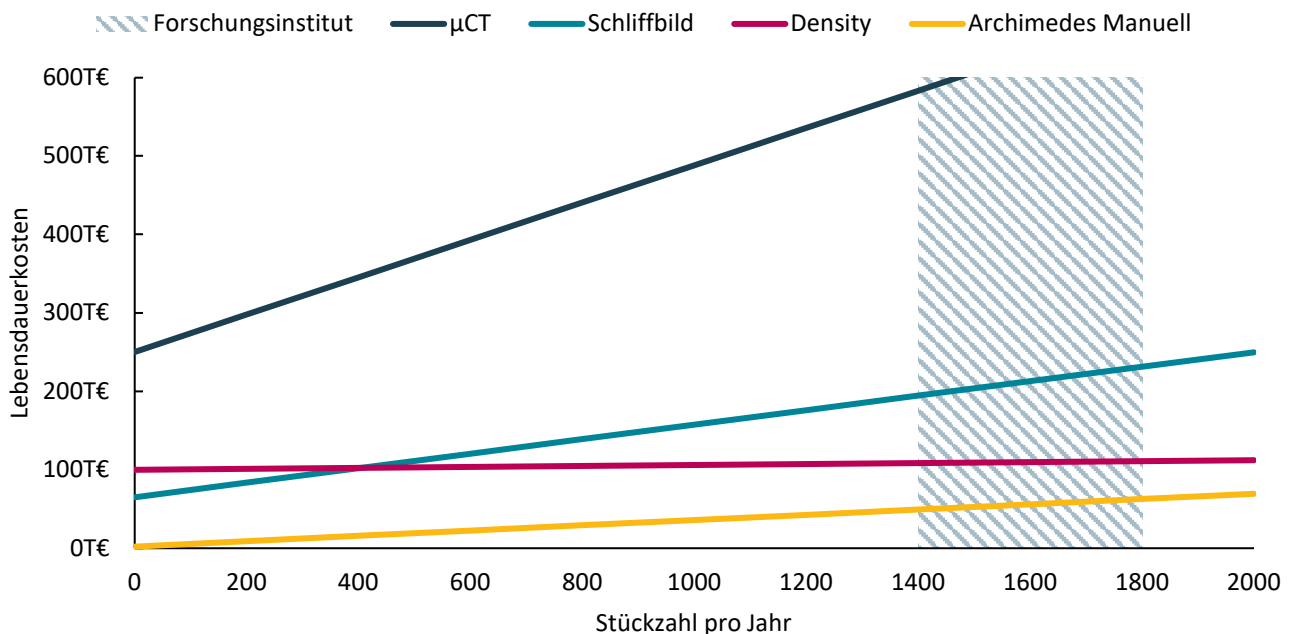


Abbildung 12: Anfallende Kosten der Dichtebestimmungsverfahren in Abhängigkeit von der analysierten Stückzahl pro Jahr für den Anwendungsfall 1

In Abbildung 12 sind die anfallenden Kosten über die Lebensdauer der Maschinen in Abhängigkeit von der jährlich analysierten Stückzahl dargestellt. Durch die am Forschungsinstitut geringen Personalkosten und die geringen Anschaffungskosten ist die manuelle Archimedes Methode am günstigsten. Das  $\mu$ CT ist sowohl in der Anschaffung, als auch im Betrieb teuer, da hier nicht auf Hilfskräfte zurückgegriffen werden kann. Die Kosten für Schliffbilder steigen aufgrund der hohen Personalarbeitszeit, sowie des hohen Anteils an Verbrauchsmaterial steil an. Die automatisierte Dichtebestimmung ist bei der betrachteten Stückzahl günstiger als die Erstellung von Schliffbildern. Am Fraunhofer Institut wird für die Bestimmung der Dichte in der Regel ein Schliffbild erstellt. Gerade in der Erstellung von Parameterfenstern ist es sinnvoll nicht nur die Dichte des Probekörpers, sondern auch die Morphologie der Defekte zu kennen, daher bietet sich das Schliffbild als Messverfahren an, auch



wenn dieses Verfahren starke Einschränkungen in der Reproduzierbarkeit hat, wie in Abschnitt 4.2 gezeigt wurde. Auf das manuelle Archimedes Verfahren wird in der Regel nicht vertraut, da die Messunsicherheit aufgrund menschlicher und Umwelteinflussgrößen hoch ist.

Anwendungsfall 2 & 3: Lohnfertiger und Serienfertigung

Tabelle 11: Gesamtkosten der Dichtebestimmungsverfahren für die Anwendungsfälle 2 & 3

		Schliffbild	μCT	Archimedes	Disonic Density
Messdauer in Minuten		292	150	5	2
<u>Investitionskosten</u>	Pro Minute	0,08 €	0,32 €	0,003 €	0,36 €
	Pro Messung	<b>24,56 €</b>	<b>9,70 €</b>	<b>0,014 €</b>	<b>0,725 €</b>
<u>Stromkosten</u>	Stromverbrauch	1,06 kW	8 kW	0,1 kW	0,8 kW
	Pro Minute	0,006 €	0,06 €	0,0008 €	0,006 €
	Pro Messung	<b>1,75€</b>	<b>1,8 €</b>	<b>0,004 €</b>	<b>0,012 €</b>
<u>Verbrauchsmaterial</u>	Pro Messung	<b>50 €</b>	<b>0 €</b>	<b>0,5 €</b>	<b>0,5 €</b>
<u>Stückkosten</u>	Pro Messung	<b>76,31 €</b>	<b>57,52 €</b>	<b>0,52 €</b>	<b>0,98 €</b>
<u>Personalkosten</u>	Pro Minute	0,83 €	0,83 €	0,83 €	0,83 €
	Pro Messung	<b>243,33 €</b>	<b>25,00 €</b>	<b>4,17 €</b>	<b>0,69 €</b>
<u>Gesamtkosten</u>	Pro Messung	320,21 €	82,52 €	4,17 €	1,67 €
	Skalierungsfaktor	30	-	-	-
	Pro Messung	<b>10,67 €</b>	<b>82,52 €</b>	<b>4,17 €</b>	<b>1,67 €</b>
	Minimal notwendige Messungen für stat. Sicherheit	3	-	3	-
	Pro Bauteil	<b>32,02€</b>	<b>82,52 €</b>	<b>14,05 €</b>	<b>1,67 €</b>

Im zweiten Anwendungsfall wird ein Lohnfertiger betrachtet, der Bauteile im Auftrag fertigt und deren Qualität eigenständig sicherstellen muss. Die Stückzahlen sind hier deutlich höher als im ersten Anwendungsfall. Zudem wird davon ausgegangen, dass bewährte Parameter verwendet werden und die Streuung der Dichte weniger ausgeprägt sind als an einem Forschungsinstitut. Die Qualitätssicherung erfolgt entweder direkt am Bauteil, oder über Begleitproben, die während des Druckprozesses simultan mit den Bauteilen gefertigt und anschließend untersucht werden.

Es wird im Anwendungsfall 2 von einer höheren Stückzahl als im Anwendungsfall 1 ausgegangen. Die Dichtebestimmung kann hier über Begleitproben, beispielsweise Dichtewürfel, oder direkt am gefertigten Bauteil durchgeführt werden, solange die Prüfmethode zerstörungsfrei ist. Gegenüber dem Forschungsinstitut sind die Personalkosten nun für jedes Verfahren identisch und liegen auf dem Niveau eines Technikers. Die Untersuchung von den tatsächlichen Bauteilen ist vorteilhaft, da keine Extrapolation der Daten von Begleitproben auf das Bauteil durchgeführt werden muss. Weiterhin wird Pulver eingespart und der begrenzte Platz auf der Bauplatzform kann besser genutzt werden. Auch hier wird für die automatisierte Dichtebestimmung, sowie das CT eine anteilige Kalkulation der Personalkosten verwendet. Für die Disonic Density wird von einem Bauteildurchsatz von 24 Teilen pro Stunde, sowie einem Personalaufwand von 10 Minuten pro Stunde ausgegangen. Das CT hat im betrachteten Anwendungsfall einen Durchsatz von einem Bauteil alle 2,5 Stunden, also 0,4 Bauteile pro Stunde. Es wird von einem Personalaufwand von 30 Minuten pro Bauteil ausgegangen.

In der Serienfertigung, dem dritten betrachteten Anwendungsfall, entsteht eine höhere Anzahl an gleichen Bauteilen. Deren Qualität muss entweder kontinuierlich oder über Stichproben sichergestellt werden. Mögliche Kosteneinsparungen während des Betriebs sind hier deutlich ausschlaggebender als die initialen Investmentkosten. Da die meisten konventionellen Verfahren zur Dichtebestimmung nur bedingt serientauglich sind, wird unter Umständen auf eine 100% Prüfung der Bauteile verzichtet.

In Abbildung 13 sind ähnlich wie in Abbildung 12 die anfallenden Kosten der Dichtebestimmungsverfahren in Abhängigkeit der jährlich analysierten Stückzahl dargestellt. Gegenüber dem Anwendungsfall 1 sind die Personalkosten deutlich höher, daher steigen die Kosten für alle manuellen Verfahren stärker an.

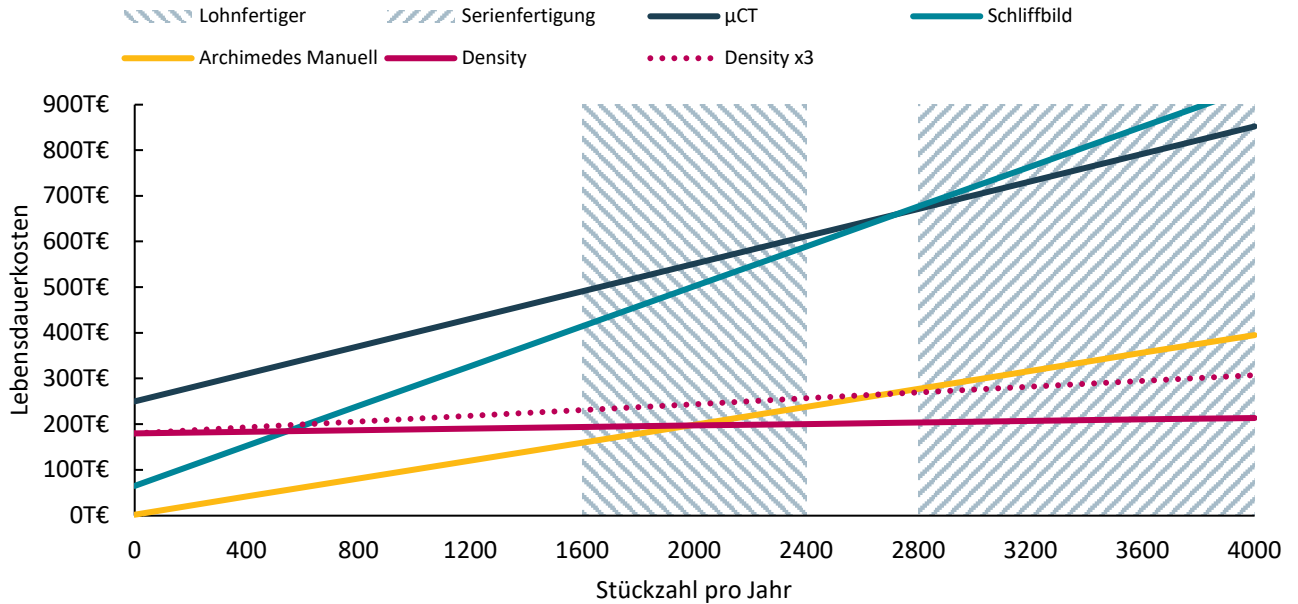


Abbildung 13: Anfallende Kosten der Dichtebestimmungsverfahren in Abhängigkeit der Stückzahl pro Jahr für die Anwendungsfälle 2 und 3

Für die Anwendungsfälle 2 & 3 ist die automatisierte Dichtebestimmung das günstigste Messverfahren. Gegenüber den anderen Anwendungsverfahren sind die laufenden Kosten durch Personal deutlich niedriger, ebenso ist die Notwendigkeit von mehrfachen Messungen nicht gegeben. Selbst bei Durchführung von Mehrfachmessungen zur Erhöhung der statistischen Sicherheit (gestrichelte rote Linie in Abbildung 13) ist das Verfahren weiterhin das kostengünstigste.

## 5.4 Potentiale in der Qualitätssicherung

Die untersuchten Verfahren unterscheiden sich im zeitlichen und finanziellen Aufwand, in der notwendigen Qualifikation des Anwenders und der Qualität der erzielten Ergebnisse.

Schliffbilder ermöglichen einen Einblick in die Mikrostruktur eines Bauteils und erlaubt eine Bewertung der Porenform. Dies ist für die Parameterentwicklung sinnvoll, da verhältnismäßig einfach ein Parametersatz bewertet werden kann. Für einen Einsatz in der Serienfertigung ist das Schliffbild aus der Sicht des Autors ungeeignet. Die signifikante Schwankung der Porosität innerhalb des Bauteils ermöglicht keine statistische signifikante Aussagen. Nur mit einer hohen Anzahl an Schliffbildern des gleichen Probekörpers kann eine belastbare Aussage getroffen werden. Die Schliffbilder sind allerdings verhältnismäßig aufwendig und langwierig und daher nicht serientauglich. Da das Verfahren destruktiv ist, können zudem nur Begleitproben untersucht werden.

CT Untersuchungen erlauben eine dreidimensionale Rekonstruktion eines Bauteils. Durch die globale Betrachtung der Porosität ist dieses Verfahren gutmütig gegenüber Schwankungen der Porosität innerhalb des Bauteils. Einem Einsatz in der Serienfertigung stehen lediglich die vergleichsweise hohen Investitionskosten, sowie die verhältnismäßig hohe Prüfdauer im Weg. Weiterhin sind Poren nur bis zu einer bestimmten Auflösungsgrenze darstellbar, diese steigt mit größeren Bauteildimensionen. Das heißt, bei größeren Bauteilen können potentiell kritische Poren nicht detektiert werden. Für komplexere Bauteile ist die Bildverarbeitung und Porositätsbestimmung deutlich aufwändiger. Hier bedarf es einen erfahrenen Anwender, sowie leistungsstarker Algorithmen.

Das manuelle Archimedes Verfahren ist grundsätzlich in der Lage die Dichte eines additiv gefertigten Bauteils zu bestimmen. Durch den manuellen Einsatz kann es allerdings zu Beeinflussung und Beeinträchtigung des Messergebnisses führen. Diese Beeinflussung führt zu einer hohen statistischen Unsicherheit, weshalb das Verfahren häufig vernachlässigt wird.

Die automatisierte Dichtebestimmung behebt die Schwächen des manuellen Archimedes Verfahrens, indem es den Großteil der Messung automatisiert. Durch das Erfassen der Umgebungsparameter wird zudem ein Umwelteinfluss kompensiert. Zudem ist die Messung deutlich schneller als andere betrachtete Verfahren. Daher empfiehlt sich dieses Verfahren besonders in Bereichen in denen schnell, bzw. häufig eine Aussage zur Dichte getroffen werden soll. Mit dieser Methode können Maschinenfreigaben vereinfacht und damit die Kosten zur Qualitätssicherung gesenkt werden.

Ein Nachteil der archimedischen Verfahren ist, dass diese keine, oder nur begrenzte Aussagen zur Morphologie der Defekte treffen können. Ein Kombination aus einer standardmäßigen automatisierten Dichtebestimmung, sowie der Durchführung von Schliffbildern zur genaueren Untersuchung von detektierten Abweichungen in Teilen wäre denkbar. Ebenso wäre auch eine Kombination aus automatisierter Dichtebestimmung und CT sinnvoll, möglicherweise mit einer Auslagerung der CT Scans an externe Dienstleister, sofern die automatisierte Dichtebestimmung eine Abweichung von der tolerierten Porosität festgestellt hat. Somit hat man sowohl eine serientaugliche Dichtebestimmung, als auch die Möglichkeit der genauen Untersuchung bei Detektion von fehlerhaften Bauteilen. Die Qualitätssicherung wäre damit zum einen schneller und günstiger, zum anderen potentiell genauer als ein einzelnes Verfahren.

## 6 Weiterführende Literatur

Du Plessis, Anton; Sperling, Philip; Beerlink, Andre; Tshabalala, Lerato; Hoosain, Shaik; Mathe, Ntombi; Le Roux, Stephan G. (2018): Standard method for microCT-based additive manufacturing quality control 2: Density measurement. In: *MethodsX* 5, S. 1117–1123. DOI: 10.1016/j.mex.2018.09.006.

Taute, C.; Möller, H.; Du Plessis, A.; Tshibalanganda, M.; Leary, M. (2021): Characterization of additively manufactured AlSi10Mg cubes with different porosities. In: *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 121 (4). DOI: 10.17159/2411-9717/1331/2021.

Spierings, A. B.; Schneider, M.; Eggenberger, R. (2011): Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. In: *Rapid Prototyping Journal* 17 (5), S. 380–386. DOI: 10.1108/13552541111156504.

Du Plessis, Anton; Yadroitsev, Igor; Yadroitsava, Ina; Le Roux, Stephan G. (2018): X-Ray Microcomputed Tomography in Additive Manufacturing: A Review of the Current Technology and Applications. In: *3D Printing and Additive Manufacturing* 5 (3), S. 227–247. DOI: 10.1089/3dp.2018.0060.

Bai, Shigang; Perevoshchikova, Nataliya; Sha, Yu; Wu, Xinhua (2019): The Effects of Selective Laser Melting Process Parameters on Relative Density of the AlSi10Mg Parts and Suitable Procedures of the Archimedes Method. In: *Applied Sciences* 9 (3), S. 583. DOI: 10.3390/app9030583.

Arvieu, Corinne; Galy, Cassiopée; Le Guen, Emilie; Lacoste, Eric (2020): Relative Density of SLM-Produced Aluminum Alloy Parts: Interpretation of Results. In: *JMMP* 4 (3), S. 83. DOI: 10.3390/jmmp4030083.

### Danksagung:

Fa. Dimensionics und das Fraunhofer IAPT möchten sich herzlich bei Frau Gabriele Fruhmann für Ihren Einsatz als Lektorin bedanken. Frau Fruhmann hat uns Ihre fachlichen Kompetenz im Bereich additive Fertigungsverfahren und Ihre Kenntnissen als Anwenderin zur Verfügung gestellt und konnte diese Studie mit wertvollen Hinweisen unterstützen.