

Erschwingliche Produktion von Kleinserien

Bewährte
Leistung eines
3D-Drucksystems
mit hoher Präzision





Einführung

3D-Druck bzw. additive Fertigung ist eine wirtschaftlich sinnvolle Methode zur Produktion von Kleinserien. Bei diesem Verfahren entfällt der Bedarf an teuren Werkzeugen mit langen Vorlaufzeiten. Obwohl viele 3D-Drucksysteme erhebliche Fortschritte gemacht haben und Produktionsanforderungen mittlerweile weitestgehend erfüllen, sind höchste Genauigkeit und Wiederholbarkeit weiterhin nur schwerlich zu erreichen.

Die neue Origin® bietet Herstellern nun eine alternative Lösung für die Produktion von Großserien unter Einhaltung strengster Anforderungen. Das war bisher mit additiver Fertigung einfach nicht möglich. In diesem Whitepaper wird das Potenzial der Plattform als produktionsreife Lösung dargelegt.

Je mehr sich die Anwendung der additiven Fertigung der Produktion annähert, desto mehr gewinnt die Quantifizierung des Potenzials des Verfahrens an Bedeutung. Die Fertigung von gebrauchsfertigen Produktionsteilen erfordert eine solide Beurteilung von Präzision und Kontrollverfahren.

Hier stellen wir eine eingehende Studie der Genauigkeit und Wiederholbarkeit des Druckers Origin® Two vor. Im Rahmen der Studie wird deutlich, inwieweit die Origin® Two druckerübergreifend in verschiedenen Drucken mit unterschiedlichen Geometrien, Materialien und Druckköpfen durchgängig hochwertige Teile mit hoher Präzision gefertigt werden.





Schlussfolgerungen

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die Ergebnisse von 258 gedruckten Teilen und 15.999 Messungen beschrieben, die mit drei Druckern, sechs Druckköpfen aus zwei Materialien und mit zwei Teilegeometrien erstellt wurden:

- 1) ein aus Loctite 3955™ FST gedruckter Mustersteckverbinder,
- 2) ein aus Loctite 3843™ Black gedrucktes Prüfmuster.

Die Teile wurden sorgfältig mit einem optischen Scanner und einem 3D-Scanner vermessen. Die Ergebnisse wurden von uns sowohl druckerübergreifend als auch druckerintern ausgewertet.

Aus den Ergebnissen konnten wir ablesen, dass Origin® Two und Origin Cure™ eine Präzision erreichten, die den Standardtoleranzen von Spritzguss gleichkommen, und sich somit für die industrielle Produktion von Polymerteilen eignen. Bei 95,0 % der Lochdurchmesser des Mustersteckverbinders betragen die Abweichungen vom Mittelwert weniger als 50 µm und bei 99,7 % aller gemessenen Elemente weniger als 100 µm. Die Werte der 3-fachen Standardabweichung lagen (mit 99,7 % der Messungen im Rahmen) für alle Drucke, Drucker und Druckköpfe im Mittel bei 0,067 mm. Im Vergleich dazu wird bei Spritzguss bei Elementen aus bis zu 30 % glasfaserverstärktem Nylon und einer Größe von 1 mm bis 20 mm von einer herkömmlichen Standardtoleranz von 60 µm und bei einer Größe von 21 mm bis 100 mm von 120 µm ausgegangen.

Bei den Messungen aller Elemente des Prüfmusters wichen 91,3 % weniger als 50 µm und 100 % weniger als 100 µm vom jeweiligen Mittelwert ab. Die Werte des Prüfmusters für 3-fache Standardabweichung lagen im Mittel bei allen gemessenen Elementen/Größen und Drucken bei 97 µm. Im Vergleich dazu wird bei Spritzguss bei Elementen aus ABS und einer Größe von 1 mm bis 20 mm von einer herkömmlichen Standardtoleranz von 100 µm und bei einer Größe von 21 mm bis 100 mm von 150 µm ausgegangen.

Alles in allem zeigen diese Daten, dass der Drucker Origin® Two in Kombination mit dem Aushärtungsgerät Origin Cure™ einheitlich hochwertige Teile produziert, die auch auf verschiedenen Druckern an unterschiedlichen Standorten in mehreren Druckvorgängen ein Höchstmaß an Wiederholbarkeit aufweisen. Die Komplettlösung kann auch die Anforderungen von Herstellern erfüllen, die konsistente, funktionelle Polymerteile für den Endverbrauch in großem Maßstab herstellen möchten.

Industrielle Fertigungsanlagen und -prozesse müssen zuverlässig einheitliche Ergebnisse liefern, um in der Produktion Platz zu finden. Bei dieser Studie sollte das System unter den in Produktionsumgebungen herrschenden Betriebsbedingungen getestet werden. Anhand der in diesem Dokument abgebildeten Datentabellen und Grafiken können Sie alle Einzelheiten dazu erfahren.

Sie spiegeln die mit dem Drucker Origin® Two und dem Aushärtungsgerät Origin Cure™ erreichte Genauigkeit und Präzision wider.

Produktionsreifer 3D-Druck muss Genauigkeit und Wiederholbarkeit gewährleisten

3D-Druck wurde von Beginn an im Prototyping sehr geschätzt. In den vergangenen Jahren haben die Benutzer die additive Fertigung zunehmend als erschwingliche Alternative zur herkömmlichen Großserienfertigung eingesetzt – zur Herstellung von funktionalen Endbauteilen in großem Maßstab.

Herstellungsverfahren in Produktionsumgebungen bringen jedoch andere Anforderungen als das Prototyping mit sich. Bei der Produktion müssen 3D-Drucklösung und Workflow in Bezug auf die geometrischen Abmessungen und Materialeigenschaften gefertigten Teile sehr genau sein. Zudem müssen die genauen Ergebnisse sowohl bei demselben Druck als auch druckerübergreifend bei mehreren Drucken wiederholbar sein.

Eine allumfassende Lösung für die additive Fertigung von genauen und wiederholbaren Endbauteilen endet dabei nicht beim Drucker. Es ist der gesamte Arbeitsablauf von der Druckvorbereitung bis hin zur Nachbearbeitung zu berücksichtigen. Es sind Standardbetriebsverfahren zu befolgen und gegebenenfalls geeignete Ausrüstungen einzusetzen. Stratasys veröffentlicht die Leitfäden für Materialverarbeitung mit P3™ DLP, in denen Ausrüstungen, Verfahren und End-to-End-Workflows für die einzelnen Materialien jeweils im Detail beschrieben werden. In den Leitfäden für Materialverarbeitung wird zudem der Gesamtarbeitsablauf zur Herstellung von hochwertigen Teilen für die einzelnen validierten Materialien genau dargelegt: Verfahren und Empfehlungen zur Druckvorbereitung, Reinigungs- und Trocknungsverfahren sowie das Aushärtungsprogramm.

Durch den Einsatz von spezifizierten Anlagen und Standardbetriebsverfahren in Kombination mit kontrollierten Verfahren lassen sich Abweichungen vorab kalkulieren, die Ausbeute verbessern, der Fertigungsbetrieb stabilisieren und eine bestmögliche Teilequalität erreichen.

Die additive Fertigung ist vielfältig. Bei der in der Origin® Two eingesetzten P3™-Technologie wird UV-DLP-Bild zur selektiven Aushärtung eines Photopolymerharzes projiziert. Aus der Kombination mit dem P3-Trennmechanismus und dem Aushärtungssystem Origin Cure™ ergeben sich hochpräzise Teile und Elemente. Wie genau? Lesen Sie weiter, um mehr darüber zu erfahren.



Genauigkeit und Präzision

Genauigkeit, Präzision (auch Wiederholbarkeit genannt) und Einheitlichkeit sind drei miteinander verwandte, aber nicht synonyme Begriffe. In der Umgangssprache werden Genauigkeit und Präzision oft miteinander gleichgesetzt, doch in einem technischen Kontext weisen Sie Unterschiede auf.

Die Genauigkeit bezeichnet, wie genau die einzelnen gedruckten Teile den Abmessungen der CAD-Ausgangsdatei für den Druck entsprechen. Die Genauigkeit gibt an, wie korrekt einzelnen Teile gedruckt wurden. Die Wiederholbarkeit wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Präzision bezeichnet die Variabilität bei der Herstellung vieler Teile unter gleichbleibenden Bedingungen. Zudem gibt sie darüber Auskunft, wie ähnlich (oder unterschiedlich) deren Abmessungen sind. Die Präzision kann als die „Streuung“ der Daten betrachtet werden. Im vorliegenden Dokument werden die Maßgenauigkeit und die Präzision der gedruckten Teile sowie der in diesen enthaltenen Elemente beurteilt. Die Begriffe „Präzision“ und „Wiederholbarkeit“ werden in diesem Dokument synonym verwendet.



Ungenauigkeiten können gegebenenfalls mit einem hinlänglich präzisen Verfahren und Softwarekompensationstechniken ausgeglichen werden. Diese sind zusammen mit Origin® Two und GrabCAD Print™ erhältlich. Die Wiederholbarkeit/Präzision ist für die Einschränkungen oder das Potenzial eines Systems ausschlaggebend und wird durch die ermittelbaren Toleranzen definiert. Somit ist das Potenzial der Wiederholbarkeit eines Systems das Hauptanliegen für Kunden, die in großem Maßstab funktionale Teile produzieren möchten.

Wir sind uns der wichtigen Rolle bewusst, die eine einheitliche Maßgenauigkeit und sonstige Aspekte der Teilequalität bei der Einsatzmöglichkeit der additiven Fertigung spielen. Auch Nachweise sind für uns wichtig. Deshalb stellen wir hiermit eine Studie zur Beschreibung der Maßgenauigkeit und Wiederholbarkeit der Origin® Two vor.

Maßgenauigkeit ist für die meisten Anwendungen von grundlegender Bedeutung. Doch bei einem Verfahren mit hoher Maßgenauigkeit können Maßungenauigkeiten durch Softwaretechniken ausgeglichen werden. Vielmehr sagt die Wiederholbarkeit/Präzision über die Beschränkung/Potenzial eines Systems aus. Diese kann anhand der Toleranzen ermittelt werden. Deshalb ist die Wiederholbarkeit das Hauptanliegen für Kunden, die in großem Maßstab funktionale Endbauteile produzieren möchten.





Versuchsaufbau

Im Rahmen des Prüfverfahrens dieser Studie wird die Variabilität des additiven Fertigungsverfahrens durch die Erfassung quantitativer Messdaten aus unterschiedlichen Maßprüfungen untersucht und die sich daraus ergebenden Daten mit verschiedenen statistischen Techniken analysiert.

Die mittlere Abweichung und die Standardabweichungen der Elementabmessungen dienen als Standardkennwerte für Genauigkeit bzw. Präzision und werden als entsprechend angegeben. Darüber hinaus wurden von uns die Werte für Maximum und Minimum, Spannweiten, Variationskoeffizienten sowie die Werte für 2-, 3- und 6-fache Standardabweichung ermittelt und gemessen.

Alle Teile wurden mit den Standardeinstellungen für die einzelnen Materialien gedruckt und mit dem Standardbetriebsverfahren gemäß den Leitfäden zur Materialverarbeitung von Stratasys verarbeitet: Druckereinstellungen, Drucker-/Materialvorbereitung, Entfernen der Teile, Reinigung und Aushärtung. Die Teile wurden nicht zusätzlich fein nachbearbeitet oder oberflächenbehandelt. Mithilfe der GrabCAD-Softwarefunktion „Z-Kompensation“ wurden die anfänglichen Z-Ungenauigkeiten korrigiert und 16 vom optischen Scanner fälschlicherweise erfasste Datenpunkte heraus gefiltert.

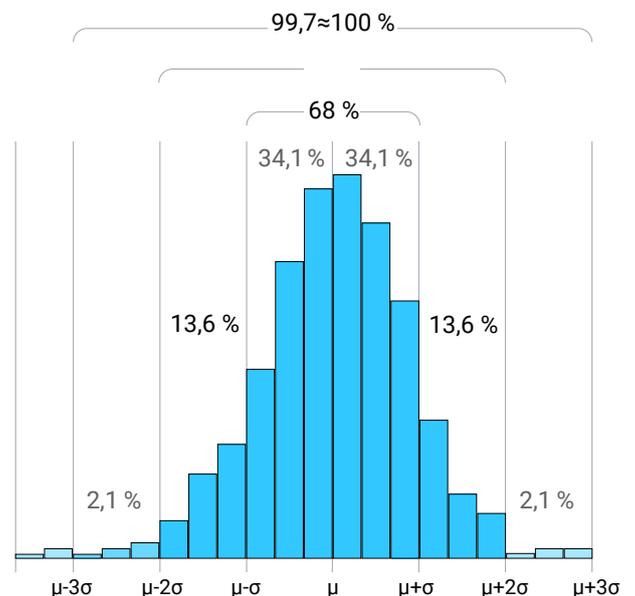
Nach dem Druck wurden die Teile in zwei 2-minütigen Ultraschallbädern mit Isopropylalkohol (IPA) gereinigt, anschließend mit Druckluft getrocknet und 60 Minuten lang in einer kontrollierten Laborumgebung weiter getrocknet. Nach dem Trocknen wurden alle Teile im Aushärtungsgerät Origin Cure™ mit dem für das jeweilige Material geeigneten Programm nachträglich ausgehärtet.

Die Prüfmuster wurden mit Ultraschall in Isopropylalkohol gereinigt und im Origin Cure ausgehärtet. Die Mustersteckverbinder wurden mit Loctite® Cleaner T gereinigt und in einem programmierbaren Wärmeschrank gemäß den Leitfäden für Materialverarbeitung von Stratasys ausgehärtet. Nach der Reinigung wurden die Teile mit Druckluft getrocknet und anschließend 60 Minuten lang in einer kontrollierten Laborumgebung weiter getrocknet. Nach dem Trocknen wurden alle Teile im Aushärtungsgerät Origin Cure™ mit dem für das jeweilige Material geeigneten Programm nachträglich ausgehärtet.

Druckvorgang, Nachbearbeitung, Vorbereitung, Inspektion und Messungen erfolgten in einer gut gelüfteten Laborumgebung mit kontrollierter Temperatur und Luftfeuchte. Sämtliche Messungen erfolgten zwischen 24 und 48 Stunden nach Aushärtung.

Im vorliegenden Dokument legen wir mehrere statistische Metriken dar. Deren Definition lautet wie folgt:

- **Mittelwert (auch Mittel genannt):** Die Summe aller Messungen, geteilt durch die Anzahl der Messungen.
- **Maximum:** Der höchste gemessene Wert.
- **Minimum:** Der geringste gemessene Wert.
- **Median:** Zentralwert des Datensatzes, bei dem eine Hälfte der Messungen größer und die andere Hälfte kleiner als der besagte Wert sind.
- **Spannweite:** Das gemessene Maximum abzüglich des gemessenen Minimums.
- **Standardabweichung (auch als σ bezeichnet):** Streuungsmaß des Datensatzes im Verhältnis zum Mittelwert. Bei einem normalen Dispersionsmaß liegen 68 % der Punkte innerhalb von $\pm\sigma$.
- **2-fache Standardabweichung (auch als 2σ bezeichnet):** Bezeichnet die zweifache Standardabweichung. Bei einem normalen Dispersionsmaß liegen 95 % der Punkte innerhalb von $\pm 2\sigma$.
- **3-fache Standardabweichung (auch als 3σ bezeichnet):** Bezeichnet die dreifache Standardabweichung. Bei einem normalen Dispersionsmaß liegen 99,7 % der Punkte innerhalb von $\pm 3\sigma$.
- **6-fache Standardabweichung (auch als 6σ bezeichnet):** Bezeichnet die sechsfache Standardabweichung. Bei einem normalen Dispersionsmaß liegen 99,9997 % der Messungen innerhalb von $\pm 6\sigma$.



Zusätzlich zu den oben definierten Messungen wird auch der prozentuale Anteil der gemessenen Teile angegeben, die innerhalb von drei Toleranzwerten (35 μm , 50 μm und 100 μm) liegen. Dadurch wird auf praktische Weise der Bereich für die gewählte Toleranz definiert. Diese Werte werden sowohl druckerintern als auch druckerübergreifend miteinander verglichen.



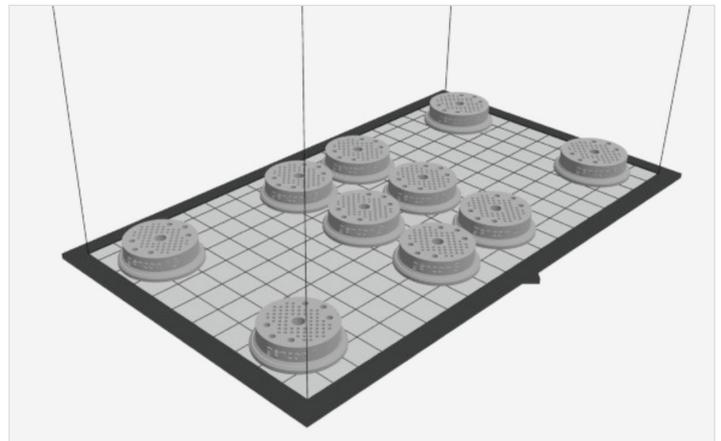
Die Teile

Wir haben Teile mit zwei Geometrien gedruckt und bewertet:

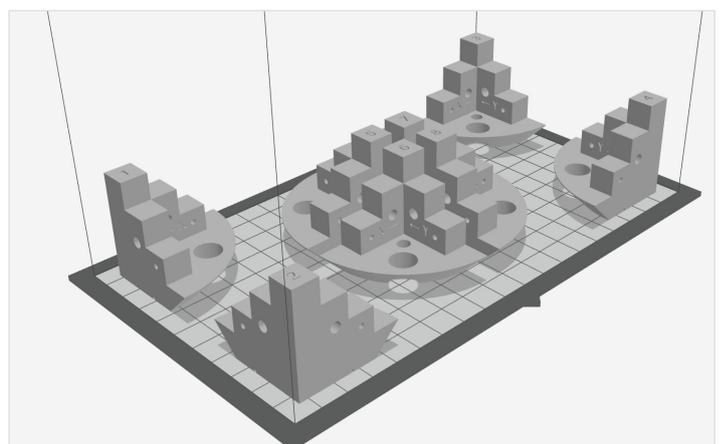
- ein aus Loctite 3955™ FST gedruckter Mustersteckverbinder,
- ein aus Loctite 3843™ Black gedrucktes Prüfmuster.

Die einzelnen Geometrien wurden jeweils in separaten Druckvorgängen gedruckt. Pro Druckvorgang für die Geometrieprüfung wurden je zehn Mustersteckverbinder und acht Prüfmuster gedruckt. Die einzelnen Druckvorgänge wurden auf drei Druckern mit drei verschiedenen Druckköpfen jeweils zweimal ausgeführt. Insgesamt wurden 210 Mustersteckverbinder gedruckt und geprüft. Die Prüfmuster wurden mit Ultraschall in Isopropylalkohol gereinigt und im Origin Cure ausgehärtet. Die Mustersteckverbinder wurden mit Loctite® Cleaner T gereinigt und in einem programmierbaren Wärmeschrank gemäß den Leitfäden für Materialverarbeitung von Stratasys ausgehärtet.

Mustersteckverbinder



Prüfmuster



Die Teile dienen jeweils verschiedenen Zwecken und werden auf unterschiedliche Weise geprüft:

- Der Mustersteckverbinder spiegelt eine realistische, funktionstüchtige Endanwendung wider und wurde aus einem Funktionsmaterial (Loctite 3D 3955™) gedruckt. Dieses Teil wurde mit einem optischen Scanner der Serie IM von Keyence geprüft. Dabei wurden der Außendurchmesser (AD) von 29 mm und die Durchmesser der einzelnen Löcher (1 mm, 2 mm und 4 mm) vermessen. Jedes Teil weist ein Volumen von 3,6 cm³ auf.
- Das Prüfmuster weist verschiedene Elemente zur Beurteilung von Genauigkeit und Präzision anhand von unterschiedlichen Geometrien auf. Dieses Teil wurde mit dem Scanner der Serie IM von Keyence und einem 3D-Scanner Typ GOM geprüft. Bei den GOM-Daten wird mit der Scanner-Software die resultierende Punktwolke mit der überlagerten CAD-Datei an 10 verschiedenen Stellen des Teils verglichen. Die einzelnen Teile weisen jeweils ein Volumen von 17,5 cm³ und die Abmessungen 39,5 mm × 39,5 mm × 40 mm auf.



Die Einschränkungen

Wie alle Untersuchungen unterliegt auch diese Studie gewissen Einschränkungen. Hier führen wir einige der Einschränkungen auf, die bei der Studie zu berücksichtigen sind.

Geometrie: Im Rahmen dieser Studie haben wir drei unterschiedliche Bauteilgeometrien gedruckt und vermessen, die jeweils zur Beurteilung der spezifischen Eigenschaften und des Präzisionspotenzials des Systems entwickelt wurden. Es wird eine begrenzte Anzahl an Teilen und Elementen untersucht. Erfahrungsgemäß richten sich Genauigkeit und Wiederholbarkeit stark nach der Geometrie. Aus diesem Grund treffen die nachstehend aufgeführten Ergebnisse möglicherweise nicht auf alle Geometrien zu. Die Form des Mustersteckverbinders bildet einen herkömmlichen elektrischen Steckverbinder nach. Dabei kommen allerdings nicht alle Geometrien zu Einsatz, da diese bei der additiven Fertigung gemeinhin sehr unterschiedlich ausfallen können. Das Prüfmuster besteht aus Elementen unterschiedlicher Größe. Das größte Element misst 40 mm.

Material: Unserer Erfahrung zufolge richten sich Genauigkeit und Präzision nicht nur nach der Geometrie, sondern auch nach dem Material. In dieser Studie wurden zwei Materialien untersucht. Die Ergebnisse fallen bei anderen Materialien gegebenenfalls anders aus. Im Rahmen der Studie wurden nicht die Auswirkungen von Chargen oder Alterung des Harzes auf die Genauigkeit und Wiederholbarkeit untersucht. Alle im Rahmen der Studie eingesetzten Harze wurden von dem Stratasys-Partner für Material Henkel Loctite® hergestellt. Die für diese Studie verwendete Harz-Kartuschen wurde nicht gesondert hergestellt, sondern aus im Handel erhältlichen Beständen entnommen. Keines der Harze war abgelaufen und die einzelnen Kartuschen wurden nach dem Öffnen innerhalb einer Woche aufgebraucht.

Das Druckverfahren: Die Teile wurden alle im Hauptsitz von Stratasys in Rehovot, Israel, von Ingenieursfachkräften von Stratasys unter entsprechend kontrollierten Laborbedingungen auf Druckern des Typs Origin® Two mit Standard-Firmware gedruckt. Die Teile aus Loctite 3843™ wurden mit einem Branson-Ultraschallreiniger in IPA gereinigt und im Origin Cure™ ausgehärtet. Die Teile aus Loctite 3955 wurden mit einem Ultraschallreiniger von Branson mit Loctite Cleaner T gereinigt. Alle Druckvorgänge wurden mit GrabCAD Print™ verarbeitet. Der Druck mit der Origin® und die Nachbearbeitung sollten in gut gelüfteten, kontrollierten Laborumgebungen erfolgen. Von den Standardbedingungen abweichende Bedingungen können sich auf Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Teile auswirken und zu anderweitigen Problemen bei der Teilequalität führen.

Größe der Stichprobe: Idealerweise sollten die einzelnen Drucker und Druckköpfe mit viel mehr Drucken und vielen Teilen pro Druck getestet werden. Wir haben drei Druckern eingesetzt und jeweils mit drei Druckköpfen gedruckt. Wir laden unsere Kunden dazu ein, die Ergebnisse mit ihrer eigenen Origin® Two zu prüfen.

Daten und Analyse: Die Daten der Studie wurden auf einem PC und mit den oben im Abschnitt „Teile“ beschriebenen Prüfgeräten erfasst. Die der Studie zugrunde liegende Datenanalyse wurde in Microsoft Excel durchgeführt. Dabei wurden die üblichen statistischen Methoden und Berechnungen angewendet. Die von uns erfassten Daten können gegebenenfalls mit modernen oder alternativen statistischen Methoden ausgewertet werden. Mit den hier vorgestellten Daten möchten wir viele anfängliche Fragen in Bezug auf das Potenzial der Genauigkeit und Präzision der Origin® Two und des Systems Origin Cure™ beantworten.

Unbekannte Faktoren: Wahrscheinlich gibt es weitere, von uns nicht vorhergesehene Einschränkungen. Trotz unserer Bemühungen um eine solide, gründliche Studie sind Fehler nicht ausgeschlossen. Die Studie soll unseren Plänen und Erwartungen zufolge die Leistung künftiger Drucker widerspiegeln, doch diese Aussichten bedürfen einer kontinuierlichen Untersuchung. Bei der Fertigung der Drucker werden diese jeweils auf Genauigkeit und Druckleistung geprüft, sobald Sie die Produktionsanlagen von Stratasys verlassen. Diese Daten dienen uns zur Bestätigung der Konformität der Drucker sowie zur Durchführung künftiger Studien zur genaueren Untersuchung der Genauigkeit und Wiederholbarkeit bei einer größeren Anzahl von Druckern.





Die Ergebnisse im Detail

Nachstehend werden sämtliche Abmessungen der beiden Teile aufgeführt:

Mustersteckverbinder

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Statistische Metriken <ul style="list-style-type: none"> • 1–4 mm Lochdurchmesser • 1 mm Lochdurchmesser • 2 mm Lochdurchmesser • 4 mm Lochdurchmesser • 29 mm Außendurchmesser (AD) | <ul style="list-style-type: none"> - Punkte innerhalb von x % des Mittelwerts <ul style="list-style-type: none"> • 1–4 mm Lochdurchmesser • 1 mm Lochdurchmesser • 2 mm Lochdurchmesser • 4 mm Lochdurchmesser • 29 mm Außendurchmesser (OD) | <ul style="list-style-type: none"> - Abweichungsdiagramme <ul style="list-style-type: none"> • Druckerergreifend • Druckerintern |
|--|---|--|

Prüfmuster

- 3D-Scan-Punktwolken-Vergleichsdaten
- Statistische Metriken
- Abweichungsdiagramme

In den nachstehenden Abweichungsdiagrammen gibt die X-Achse die Anzahl der Messungen und die Y-Achse die Maßeinheit in mm an.

Mustersteckverbinder

Zusammengefasste Daten für alle 1–4 mm Lochdurchmesser (statistische Metriken). Optischer Scanner von Keyence, 6482 gemessene Löcher.

		Alle Drucker	Drucker 1	Drucker 2	Drucker 3
Mittel aller Lochdurchmesser	Mittl. Spannweite	0,083	0,092	0,055	0,102
	Mittl. Standardabw.	0,020	0,014	0,014	0,020
	Mittl. 2 σ	0,041	0,028	0,028	0,041
	Mittl. 3 σ	0,061	0,041	0,042	0,061
	Mittl. 6 σ	0,123	0,083	0,084	0,122

Zusammengefasste Daten aller 1–4 mm Lochdurchmesser (Werte innerhalb von x % des Mittelwerts). Optischer Scanner von Keyence, 6482 Löcher gemessen.

		Alle Drucker	Drucker 1	Drucker 2	Drucker 3
Alle Lochdurchmesser	% weichen weniger als 35 μm vom Mittelwert ab	95,5 %	98,8 %	95,5 %	92,3 %
	% weichen weniger als 50 μm vom Mittelwert ab	98,9 %	100,0 %	99,4 %	97,4 %
	% weichen weniger als 100 μm vom Mittelwert ab	99,7 %	100,0 %	99,6 %	99,4 %

Daraus ergibt sich ein solider Datensatz mit insgesamt n=6482 Messungen von Durchmessern an vielen Teilen und Elementen. Bei allen Druckern und Druckköpfen ist bei Löchern mit einem Durchmesser von 1 mm bis 4 mm eine Spannweite von etwa 83 μm , eine Standardabweichung von etwa 20 μm und ein 3-fache Standardabweichung von etwa 66 μm (oder besser) zu erwarten.



Schlussfolgerung

Bei allen Druckern, Druckköpfen, Druckvorgängen und Elementgrößen wiesen die Ergebnisse des mit der Origin® Two gedruckten Mustersteckverbinders ein hohes Maß an Präzision an den durchgehenden 1-mm-, 2-mm- und 4-mm-Löchern auf. Alles in allem wichen bei 95 % der Messungen an allen Lochgrößen weniger als 50 µm und bei 99,7 % weniger als 100 µm vom jeweiligen Mittelwert ab.

29 mm Außendurchmesser (statistische Metriken), Datensatz n=83*

		Alle Drucker	Drucker 1	Drucker 2	Drucker 3
29 mm AD	Max.	29,100	29,081	29,067	29,100
	Min.	28,949	28,950	28,949	28,991
	Mittelwert	29,026	29,015	29,015	29,052
	Mittl. Abweichung	0,026	0,015	0,015	0,052
	Median	29,028	29,015	29,017	29,060
	Spannweite	0,151	0,131	0,118	0,109
	St.-Abw.	0,036	0,036	0,118	0,030
	2σ	0,072	0,071	0,029	0,060
	3σ	0,108	0,107	0,059	0,089
	6σ	0,216	0,213	0,088	0,179

29 mm Außendurchmesser (Werte innerhalb von x % des Mittelwerts), Datensatz n=83

		Alle Drucker	Drucker 1	Drucker 2	Drucker 3
29 mm AD	% weichen weniger als 35 µm vom Mittelwert ab	72,6 %	63,3 %	78,6 %	76,0 %
	% weichen weniger als 50 µm vom Mittelwert ab	89,4 %	83,3 %	92,9 %	92,0 %
	% weichen weniger als 100 µm vom Mittelwert ab	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

*Hinweis: Pro Bauteil war nur jeweils nur ein Element mit einem Außendurchmesser von 29 mm vorhanden. Somit wurden insgesamt 83 Messungen durchgeführt. Aufgrund von fehlerhaften oder fehlenden Daten wurden somit weniger als 90 Teile vermessen.

Schlussfolgerung

Bei allen Druckern Druckköpfen, Druckvorgängen und Elementgrößen wiesen die Ergebnisse des mit der Origin® Two gedruckten Mustersteckverbinders ein hohes Maß an Präzision an dem Außendurchmesser von 29 mm auf. Mit einer mittleren Abweichung von 26 µm (0,026 mm) und einer Spannweite von 151 µm bei 210 gemessenen Teilen von allen Druckern und Druckköpfen erweist sich die Origin® Two als einheitlich und zuverlässig.

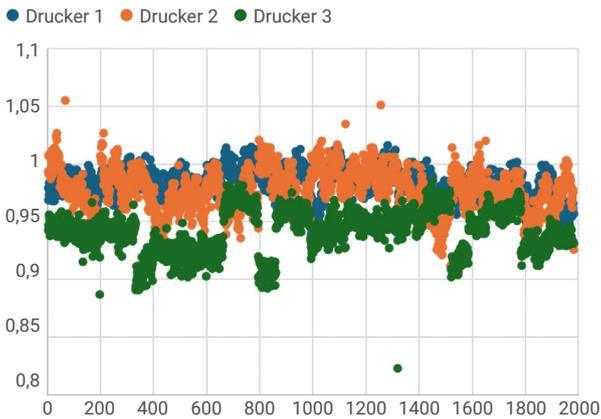


Abweichungsdiagramme und druckerinterne Daten

Durchgehende Löcher mit 1 mm Durchmesser

Auf den nachstehenden Diagrammen werden die Abweichungen der Messungen der durchgehenden Löcher mit 1 mm Durchmesser auf allen drei Druckern dargestellt. Die Messungen weisen je nach Druckernummer unterschiedliche Farben auf. Für jeden Drucker wurden Daten für je drei Druckköpfe erfasst.

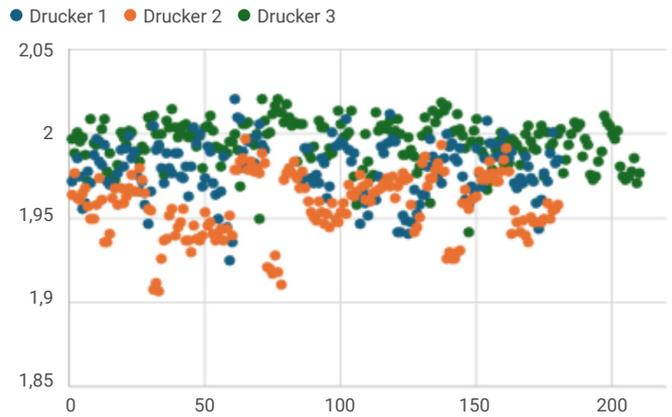
Abweichung bei 1 mm Lochdurchmesser, Datensatz n=5916



Durchgehende Löcher mit 2 mm Durchmesser

Auf den nachstehenden Diagrammen werden die Abweichungen der Messungen der durchgehenden Löcher mit 2 mm Durchmesser auf allen drei Druckern dargestellt. Die Messungen weisen je nach Druckernummer unterschiedliche Farben auf. Für jeden Drucker wurden Daten für je drei Druckköpfe erfasst.

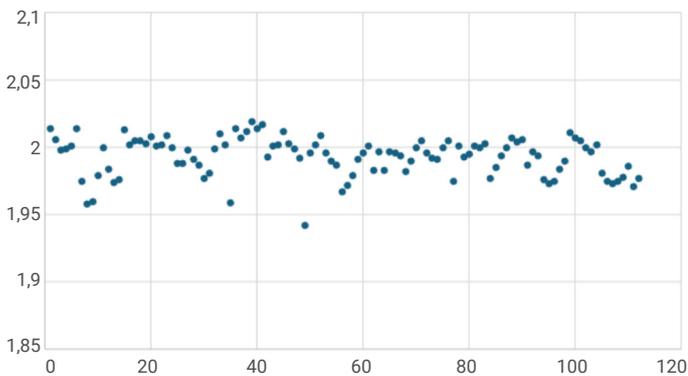
Abweichung bei 2 mm Lochdurchmesser, Datensatz n=5916



Druckerintern fallen die Ergebnisse sogar noch besser aus. In der nachstehenden Tabelle werden die statistischen Metriken für alle druckerintern ausgeführten Drucke aufgeführt. Druckerintern sind für die verschiedenen Druckköpfe noch geringere Standardabweichungen von etwa $0,011 \mu\text{m}$ bis $0,016 \mu\text{m}$ und eine noch geringere Spannweite von etwa $0,048 \mu\text{m}$ bis $0,072 \mu\text{m}$ zu erwarten.

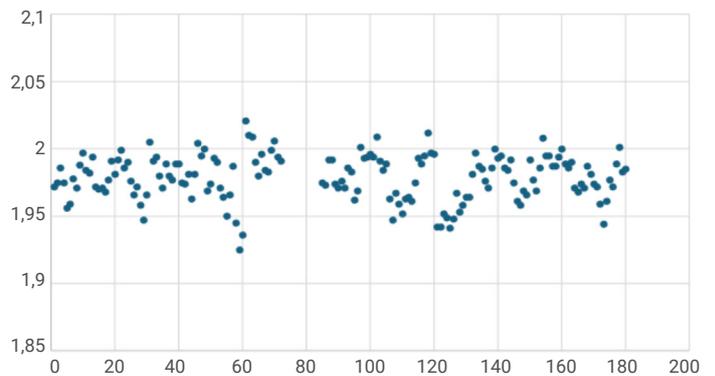
Drucker 1

Abweichung bei 2 mm Lochdurchmesser



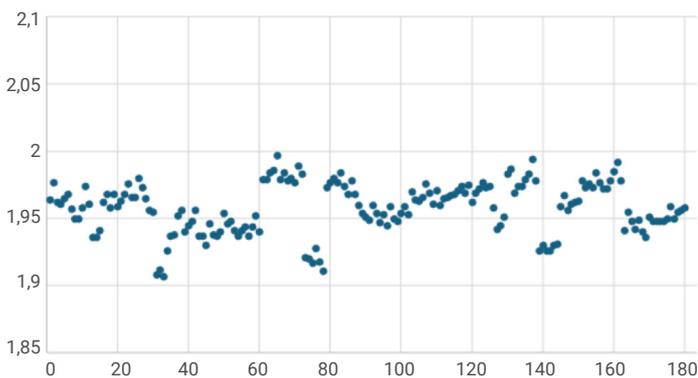
Drucker 2

Abweichung bei 2 mm Lochdurchmesser



Drucker 3

Abweichung bei 2 mm Lochdurchmesser



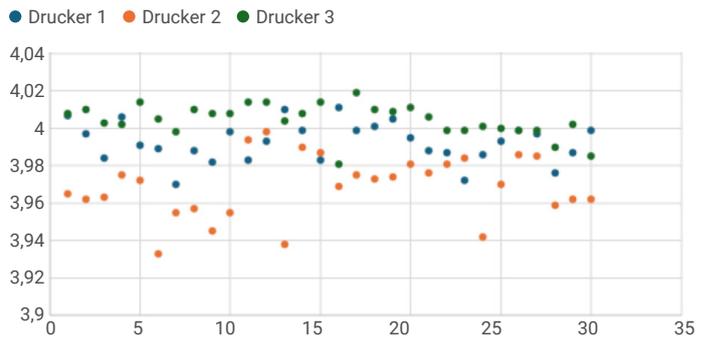


Durchgehende Löcher mit 4 mm Durchmesser

Die folgenden Diagramme veranschaulichen die druckerübergreifenden Abweichungen der Messungen an den Durchgangslöchern mit 4 mm Durchmesser für alle drei Drucker.

Die Messungen weisen je nach Druckernummer unterschiedliche Farben auf. Für jeden Drucker wurden Daten für je drei Druckköpfe erfasst.

Abweichung bei 4 mm Lochdurchmesser, Datensatz n=90

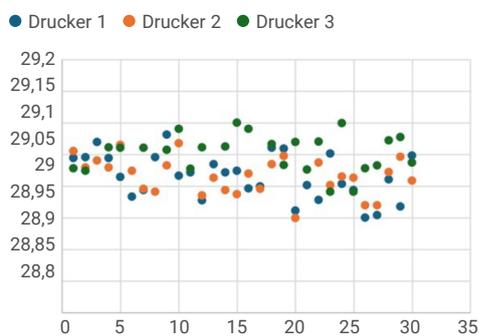


29 mm Außendurchmesser

In den nachstehenden Diagrammen werden die Abweichungen der Messungen des Außendurchmessers von 29 mm bei allen drei Druckern und Bauköpfen veranschaulicht.

Die Messungen weisen je nach Druckernummer unterschiedliche Farben auf. Für jeden Drucker wurden Daten für je drei Druckköpfe erfasst.

Abweichung 29-mm-Außendurchmesser, Datensatz n=90



Druckerintern fallen die Ergebnisse sogar noch besser aus. In der nachstehenden Tabelle sind die statistischen Kennzahlen für alle Drucke eines jeden Druckers aufgeführt. Druckerintern sind für die verschiedenen Druckköpfe noch geringere Standardabweichungen von etwa 31 μm bis 36 μm und eine noch geringere Spannweite von etwa 122 μm bis 144 μm zu erwarten.

Für einzelne Drucker-Druckkopf-Kombination fallen die Ergebnisse sogar noch besser aus. In der nachstehenden Tabelle sind die statistischen Metriken für die einzelnen Drucker-Druckkopf-Kombinationen aufgeführt. Für einzelne Drucker-Druckkopf-Kombinationen sind noch geringere Standardabweichungen von etwa 26 μm bis 36 μm und eine noch geringere Spannweite von etwa 86 μm bis 119 μm zu erwarten.

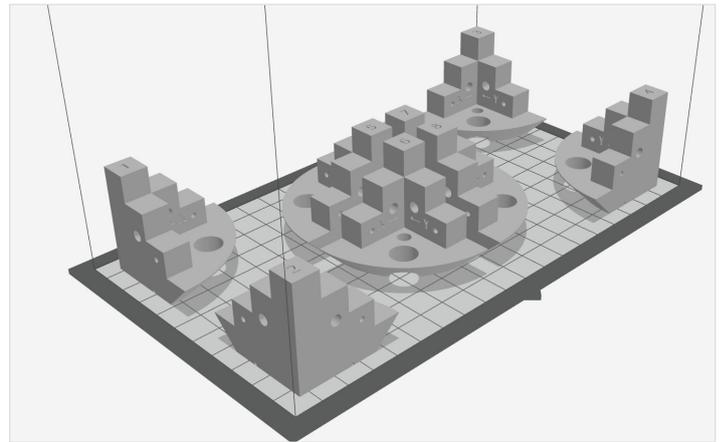
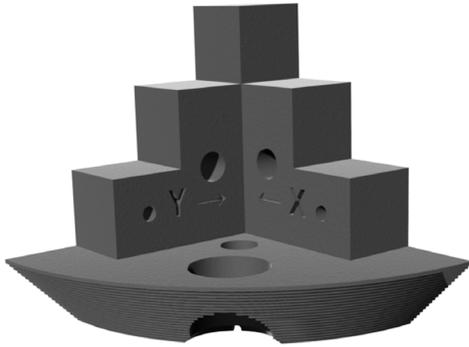
Schlussfolgerung für Mustersteckverbinder

Unsere Ergebnisse zufolge kann das P3™ DLP-System aus dem Drucker Origin® Two und dem Aushärtungsgerät Origin Cure™ die Anforderungen an eine solide gesteuerte Präzision in der Produktion erfüllen. Je nach Anwendungsfalle sind die Anforderungen unterschiedlich. Zudem richtet sich die Wiederholbarkeit nach der Geometrie. Deshalb sollte die Eignung für die jeweilige Anwendung anhand einer internen Beurteilung geprüft werden.





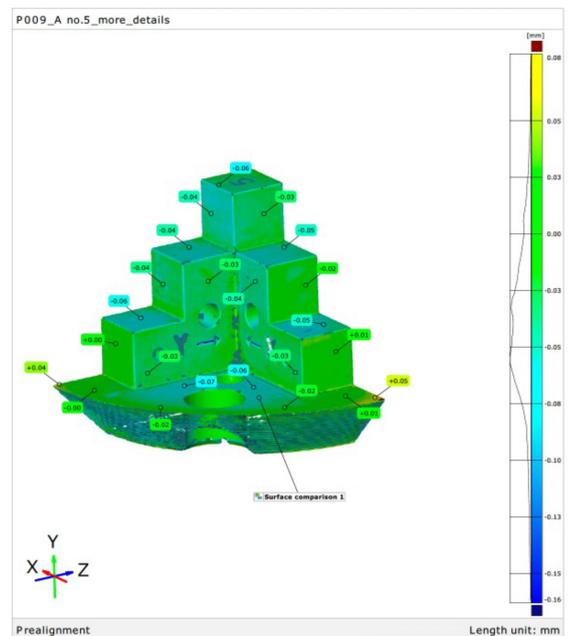
Prüfmuster



Scanner-Daten

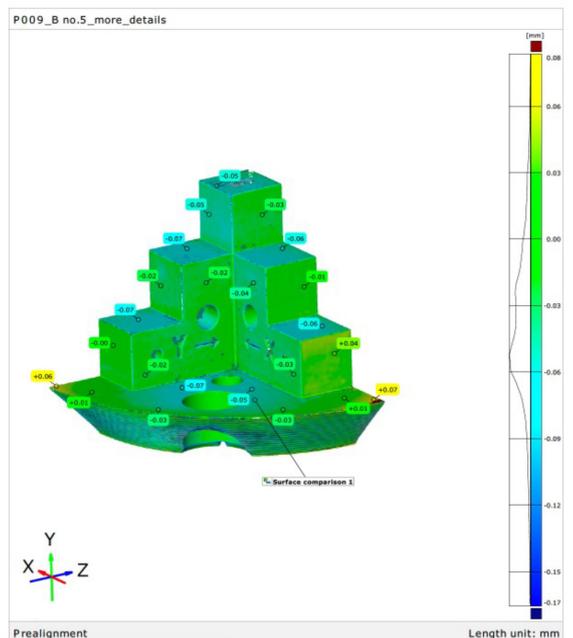
Diese Teile wurden mit einem GOM-3D-Scanner eingescannt. Anschließend wurde mit der ATOS Professional Software die Ausgabe als Punktwolke mit den ursprünglichen CAD-Daten verglichen. Diese Scanner-Daten belegen die Genauigkeit und Wiederholbarkeit dieses Teils, und zwar nicht nur hinsichtlich der Größenabmessungen, sondern auch bezüglich der Teile und Oberflächen insgesamt.

Zunächst wurden die Druckergebnisse für ein Teil aus einem Drucker (009) mit zwei verschiedenen Druckköpfen (A und B) betrachtet. Auf den einzelnen Abbildungen wird die Abweichung der Scanner-Daten von den ursprünglichen CAD-Daten für das jeweilige Teil dargestellt. Anhand der 23 auf Etiketten angegebenen Zahlen kann die Abweichung an dem jeweiligen Punkt abgelesen werden.



Die nächste Abbildung stellt das gleiche Teil dar, dass auf demselben Drucker (009) mit einem anderen Druckkopf gedruckt wurde. Zwar haben sich die Farben und Werte geringfügig leicht verändert, doch lassen sich die gleichen Tendenzen und ähnliche Größenordnungen in den Abweichungen ablesen.

Bei Betrachtung von zwei Teilen, die von anderen Druckern (190, 574) mit jeweils zwei verschiedenen Druckköpfen gedruckt wurden, fallen die Ergebnisse ähnlich aus.



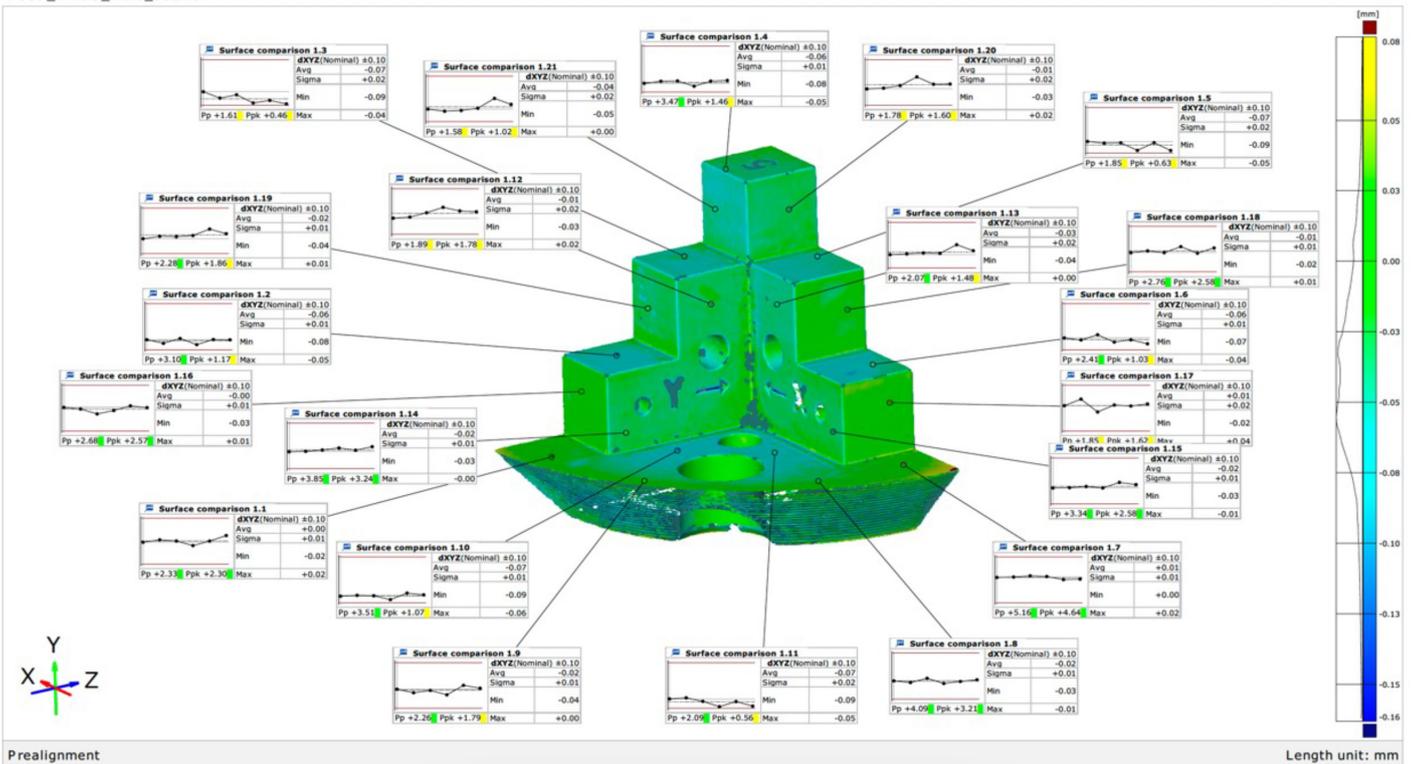


Pp ist eine „Leistungskennzahl“. Diese Kennzahl gibt an, inwieweit die Daten innerhalb der Spezifikationsgrenzwerte (USL, LSL) liegen. Die Spezifikationsgrenzwerte dienen als Toleranzmaß. Bei einem mit 10 mm $\pm 0,1$ mm spezifizierten Teil wäre USL=10,1 mm und LSL=9,9 mm. Bei dem Pp-Wert wird nicht berücksichtigt, wie gut das Verfahren auf dem Nennmaß zentriert ist, sondern nur die Einhaltung des Toleranzmaßes bei zentrierter Anordnung. Ein Pp-Wert von über 1,50 gilt gemäß den Qualitätsanforderungen an die 6-fache Standardabweichung im Ingenieurwesen als akzeptabel.

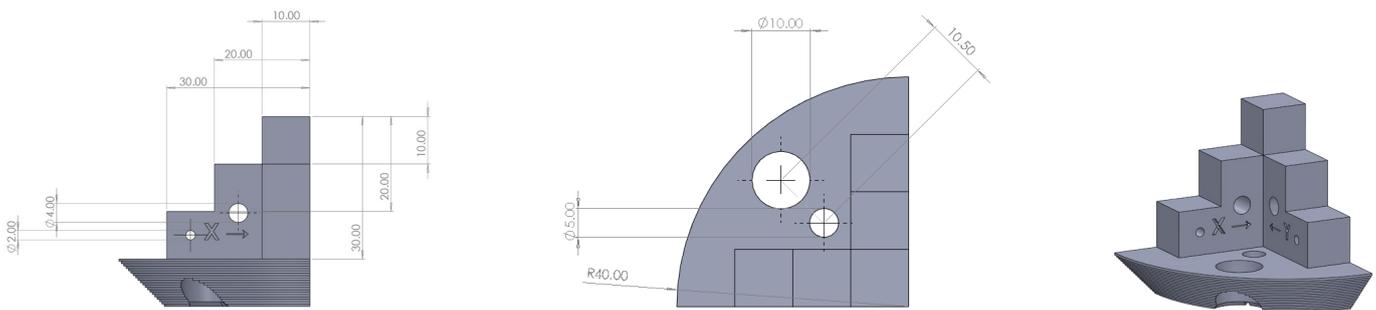
Ppk ist die „Leistungskennzahl der Zentrierung“. Dieser Wert gilt als Maß dafür, wie gut die Daten innerhalb der Spezifikationsgrenzwerte zentriert sind. Ein Ppk-Wert von über 1,50 gilt gemäß den Qualitätsanforderungen an die 6-fache Standardabweichung im Ingenieurwesen als akzeptabel.

Die sich aus den Scanner-Daten ergebenden Ppk-Werte liegen bei allen Teilen zwischen 1,07 und 4,64. Die Pp-Werte liegen zwischen 1,61 und 5,16.

P009_A no.5_more_details



Ein Bild sagt mehr als tausend Worte, doch Abbildungen allein enthalten nicht immer alle Informationen und Daten sind gemeinhin erforderlich und hilfreich. Zur Zusammenstellung dieser Daten kehren wir zum optischen Scanner von Keyence zurück und führen die Daten zur Maßgenauigkeit und Wiederholbarkeit über für mehrere Drucke, Drucker, Druckköpfe und Teile auf. Bei der ersten Tabelle wurde das gescannte Teil jeweils auf die beiden flachen Seiten – „Seite X“ und „Seite Y“ – gelegt. Bei der zweiten Tabelle stand das Teil aufrecht. Die nachfolgend aufgeführten Daten stammen aus sechs Drucken, in denen jeweils acht Teile gedruckt wurden – insgesamt 48 Teile. Beachten Sie, dass die einzelnen Spalten jeweils unterschiedliche Elemente/Nennmaße angeben.



Die Abmessungen des oben genannten Prüfmusters wurden mit Keyence gemessen.



Druckerübergreifend insgesamt

In der nachstehenden Tabelle werden statistische Daten für alle Drucke, Drucker und Druckköpfe aufgeführt.

Nennmaße		4	2	10	20	30	40	30	20	10
Seite A	Maximum	4,033	2,024	10,046	20,12	30,194	40,079	30,061	20,057	10,135
	Minimum	3,917	1,944	9,959	19,976	29,996	39,916	29,897	19,907	10,017
	Mittelwert	3,987	1,986	10,008	20,042	30,086	39,998	29,985	19,987	10,069
	Mittl. Abweichung	-0,013	-0,014	0,008	0,042	0,086	-0,002	-0,015	-0,013	0,069
	Spannweite	0,116	0,080	0,087	0,144	0,198	0,163	0,164	0,150	0,118
	Standardabweichung	0,020	0,019	0,025	0,037	0,052	0,042	0,041	0,034	0,029
	6σ	0,123	0,113	0,148	0,223	0,315	0,254	0,248	0,207	0,172
	3σ	0,061	0,057	0,074	0,112	0,157	0,127	0,124	0,103	0,086
	2σ	0,041	0,038	0,049	0,074	0,105	0,085	0,083	0,069	0,057

Nominale Abmessungen		4	2	10	20	30	40	30	20	10
Seite B	Maximum	4,027	2,02	10,137	20,05	30,051	40,073	30,176	20,105	10,065
	Minimum	3,939	1,938	9,977	19,865	29,872	39,906	29,983	19,97	9,951
	Mittelwert	3,987	1,984	10,064	19,98	29,979	39,993	30,079	20,037	10,005
	Mittl. Abweichung	-0,013	-0,016	0,064	-0,02	-0,021	-0,007	0,079	0,037	0,005
	Spannweite	0,088	0,082	0,16	0,185	0,179	0,167	0,193	0,135	0,114
	Standardabweichung	0,021	0,021	0,037	0,041	0,044	0,040	0,046	0,033	0,025
	6σ	0,126	0,124	0,220	0,248	0,262	0,239	0,277	0,198	0,149
	3σ	0,063	0,062	0,110	0,124	0,131	0,120	0,138	0,099	0,075
	2σ	0,042	0,041	0,073	0,083	0,087	0,080	0,092	0,066	0,050

Nominale Abmessungen		10	5	10,5	40
Oben	Maximum	10,002	5,013	10,534	40,065
	Minimum	9,909	4,907	10,482	39,896
	Mittelwert	9,950	4,948	10,511	39,975
	Mittl. Abweichung	-0,050	-0,052	0,011	-0,025
	Spannweite	0,093	0,106	0,052	0,169
	Standardabweichung	0,021	0,026	0,013	0,042
	6σ	0,126	0,154	0,081	0,249
	3σ	0,063	0,077	0,040	0,125
	2σ	0,042	0,051	0,027	0,083



Nominale Abmessungen		4	2	10	20	30	40	30	20	10
Seiten A und B, druckerübergreifend	Maximum	4,033	2,024	10,102	20,12	30,194	40,079	30,176	20,105	10,135
	Minimum	3,917	1,938	9,959	19,865	29,872	39,906	29,897	19,907	9,951
	Mittelwert	3,985	1,985	10,036	20,011	30,032	39,996	30,032	20,012	10,037
	Mittl. Abweichung	-0,046	-0,039	-0,101	-0,109	-0,162	-0,084	-0,144	-0,093	-0,098
	Spannweite	0,116	0,086	0,143	0,255	0,322	0,173	0,279	0,198	0,184
	Standardabweichung	0,020	0,019	0,025	0,037	0,052	0,042	0,041	0,034	0,029
	6σ	0,123	0,113	0,148	0,223	0,315	0,254	0,248	0,207	0,172
	3σ	0,061	0,057	0,074	0,112	0,157	0,127	0,124	0,103	0,086
	2σ	0,041	0,038	0,049	0,074	0,105	0,085	0,083	0,069	0,057

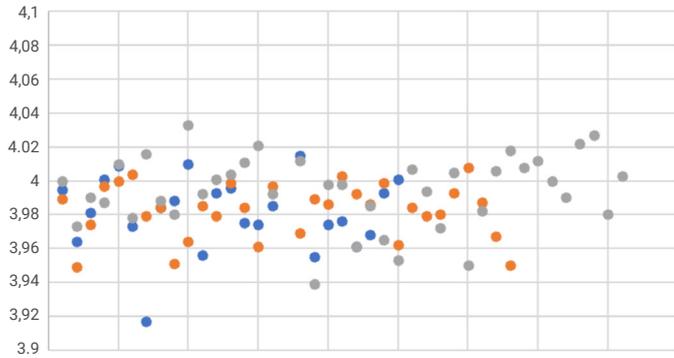


Druckerintern und druckerübergreifend

Die Abweichungsdiagramme stellen die Abweichungen an verschiedenen Elementen/Größen druckerintern (anhand von Farben) und druckerübergreifend (alle Datenpunkte) dar. Hinweis: Die Spannweite lässt sich anhand der Breite der Y-Achse ablesen.

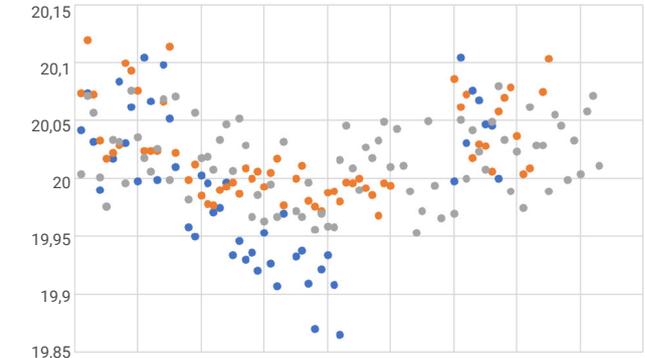
Prüfmuster – Abweichung bei 4 mm Lochdurchmesser

● Drucker 1 ● Drucker 2 ● Drucker 3



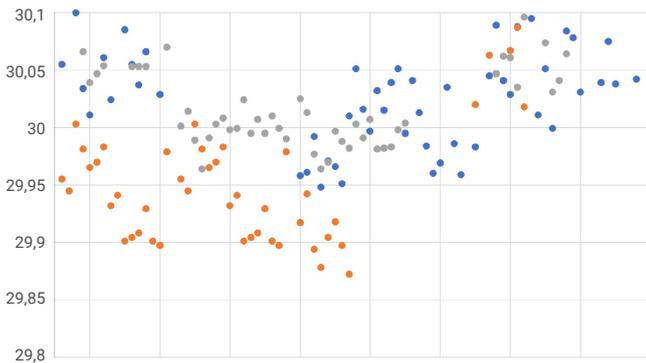
Prüfmuster – Lineare Abweichung 20 mm Lochdurchmesser – Seite A und B

● Drucker 1 ● Drucker 2 ● Drucker 3



Prüfmuster – Lineare Abweichung 30 mm Lochdurchmesser – Seite A und B

● Drucker 1 ● Drucker 2 ● Drucker 3



Ergebnisse im Vergleich zum Spritzguss

Der 3D-Druck von Polymerteilen für industrielle Produktionsanwendungen ist für uns und für viele Kunden von Stratasys ein wichtiges Ziel. Herkömmlicher Weise werden solche Teile meist im Spritzgussverfahren gefertigt. Wie sind diese Ergebnisse im Vergleich zu den Toleranzen beim Spritzguss zu lesen? In der nachstehenden Tabelle werden die Standardtoleranzen für im Spritzgussverfahren aus fünf verschiedenen Thermoplasten gefertigte Kunststoffteile aufgeführt. Sowohl beim Spritzguss als auch beim DLP-Druck nehmen in der Regel mit zunehmender Steifigkeit der Materialien die Toleranzen ab.

IM-Material	Größenabmessung		
	1 mm bis 20 mm	21 mm bis 100 mm	101 mm bis 160 mm
ABS	0,100	0,150	0,325
PA	0,075	0,160	0,310
PP	0,125	0,170	0,375
HDPE	0,125	0,170	0,375
30 % GF PA	0,060	0,108	0,240

Im Vergleich mit den Standardtoleranzen für Spritzguss schneidet die mittlere 3-fache Standardabweichung für das in ABS 3D-gedruckte Prüfmuster sehr gut ab. Die 3-fache Standardabweichung wurde (als konservativ Ansatz) gewählt, da 99,7 % der Teile in diese Spannweite fallen sollten und der anteilige Ausschuss bei Spritzgussteilen gemeinhin in einer Größenordnung von 1 % bis 5 % liegt. Zwar ist nicht jeder Ausschuss immer auf Maßungenauigkeiten zurückzuführen, doch bei den meisten Spritzgussteilen entsprechen vermutlich mehr als 0,3 % der Teile nicht den Maßvorgaben.



		1 bis 20 mm	21 bis 100 mm	
Standardtoleranz	IM ABS	0,100	0,150	–
Mittl. 3 σ	3DP 3843	0,082	0,125	Prüfmuster

Ähnliche Ergebnisse erhalten wir beim Vergleich der mittleren 3-fachen Standardabweichung des Mustersteckverbinders aus Loctite 3955™ mit den Standardtoleranzen von mit zu 30 % glasfaserverstärktem Nylon (30 % GF PA) vergleichen.

		1 bis 20 mm	21 bis 100 mm	
Standardtoleranz	IM 30 % GF ABS	0,060	0,120	
Mittl. 3 σ	3DP 3955	0,066	0,108	Mustersteckverbinder

Es ist an dieser Stelle auf einige Einschränkungen der Studie hinzuweisen. In dieser Studie werden zwei Teile aus zwei Materialien untersucht. Wir sind uns bewusst darüber, dass die Ergebnisse je nach Geometrie und Material unterschiedlich ausfallen. Angesichts der 150-jährigen Geschichte des Spritzgussverfahrens ist additive Fertigung ein noch sehr junger Industriezweig, und der Weg zu einer Genauigkeit und Wiederholbarkeit mit demselben Niveau ist weit. Wir möchten unsere Kunden mit Origin® Two und Origin Cure™ dazu ermutigen, weitere Studien und Ergebnisse mit eigenen Geometrien zu veröffentlichen.

Abschließende Schlussfolgerungen

Die oben dargelegten Daten zeigen die Genauigkeit und Präzision, die mit dem Drucker Origin® Two und dem Aushärtungsgerät Origin Cure™ erreicht werden können.



[stratasys.com](https://www.stratasys.com)

Zertifiziert nach
ISO 9001:2015

Stratasys-Hauptsitz

7665 Commerce Way,
Eden Prairie, MN 55344, USA

+1 800 801 6491 (gebührenfrei innerhalb der USA)

+1 952 937-3000 (International)

+1 952 937-0070 (Fax)

1 Holtzman St., Science Park,
PO Box 2496

Rehovot 76124, Israel

+972 74 745 4000

+972 74 745 5000 (Fax)

WHITEPAPER
P3™ DLP

© 2024 Stratasys. Alle Rechte vorbehalten. Stratasys, das Stratasys Signet-Logo, Origin, Origin Cure, P3 und GrabCAD Print sind eingetragene Marken von Stratasys Inc. Alle anderen Marken sind das Eigentum der jeweiligen Inhaber, und Stratasys haftet nicht für die Auswahl, Leistung oder Nutzung dieser nicht von Stratasys bereitgestellten Drittprodukte. Technische Produktdaten können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. WP_P3_Production Accuracy Repeatability_DE_0824a