

Hypotubes präzise vermessen – trotz feinsten Strukturen

3D-Messtechnik für hochauflösende Oberflächenanalysen in der Medizintechnik



Alle Bilder: © Aerotech



Autor:
RJ Hardt
Präsident
Peak Metrology
www.peakmetrology.com

Lasergeschnittene Hypotubes (LCHT) sind aus der modernen Medizintechnik nicht mehr wegzudenken. Die filigranen Strukturen der extrem dünnen Metallröhrchen ermöglichen minimalinvasive Eingriffe – etwa bei der Katheterablation, dem Einsetzen von Stents oder bei neurovaskulären Verfahren. Mit der fortschreitenden Miniaturisierung steigen jedoch auch die Anforderungen an die Qualitätssicherung. Klassische Prüfverfahren stoßen dabei schnell an ihre Grenzen. Innovative 3D-Messtechnologien eröffnen hier neue Möglichkeiten, selbst kleinste Merkmale zuverlässig zu erfassen – bei gleichzeitig hoher Prozesssicherheit.

Bild 1 zeigt ein Beispiel für ein lasergeschnittenes Hypotube (LCHT), das mit 200-facher Vergrößerung aufgenommen wurde. Bild 2 zeigt ein lasergeschnittenes Hypotubes (LCHT) mit den verwendeten Prüfgeräten.

Hohe Auflösung ist entscheidend

Hypotubes verfügen über feine Schnitte und Bohrungen, die ihnen ihre Flexibilität und Funktionalität verleihen. Um deren Geometrie zuverlässig zu prüfen, muss die Messauflösung im einstelligen Mikrometerbereich liegen. Eine bewährte Faustregel: Die Auflösung des eingesetzten Systems sollte drei- bis zehnfach kleiner sein als das kleinste zu messende Merkmal. Wer etwa ein 30-Mikrometer-Feature erfassen möchte, braucht mindestens eine Auflösung von 3 bis 10 Mikrometern – das bedeutet, es muss alle 3 bis 10 Mikrometer ein Datenpunkt generiert werden. Nur so lassen sich auch kleinste Abweichungen sicher identifizieren.

Je kleiner die Strukturen, desto höher die Anforderungen an das verwendete Messsystem. Das gilt insbesondere für medizinische Anwendungen, bei denen absolute Zuverlässigkeit gefordert ist. Fehlerhafte Schnitte, nicht exakt platzierte Bohrungen oder Materialunregelmäßigkeiten können hier gravierende Folgen haben – für das Produkt ebenso wie für den Patienten. Deshalb ist eine präzise Vermessung integraler Bestandteil jedes Fertigungsprozesses (Bilder 3,4 und 5).

2D oder 3D? Eine grundsätzliche Entscheidung

Zwar sind 2D-Messsysteme weit verbreitet und schnell einsetzbar – doch sie stoßen bei komplexen, dreidimensionalen Strukturen an ihre Grenzen. Gerade bei zylindrischen Hypotubes, deren Oberfläche sich durch die Krümmung schwerer fokussieren lässt, ist die Wahl eines 3D-Messsystems in der Regel unumgänglich. Es erlaubt

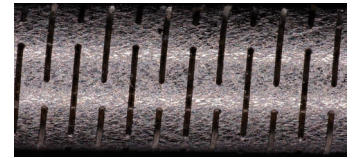


Bild 1: Beispiel für ein lasergeschnittenes Hypotube (LCHT), das mit einem Digitalmikroskop vermessen wird.

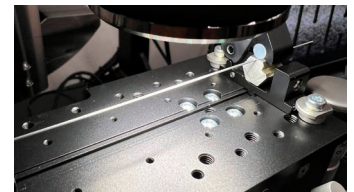


Bild 2: Lasergeschnittener Hypotube (LCHT) mit den verwendeten Prüfgeräten.

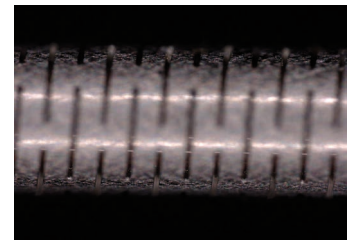


Bild 3: Bild mit einfacher Schärfentiefe – die Brennebene liegt auf dem unteren Radius der Röhre

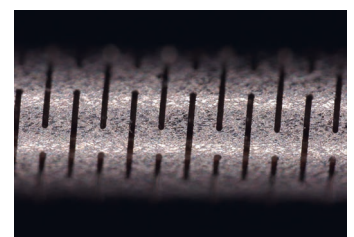


Bild 4: Bild mit einfacher Schärfentiefe – die Brennebene befindet sich am oberen Rand des Rohrs.

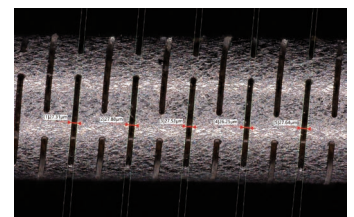


Bild 5: Vollständig fokussiertes Bild einer Röhre, erzeugt durch Tiefenstapelung mehrerer Bildebenen. Diese Technik ermöglicht eine präzisere Anwendung der Messwerkzeuge.

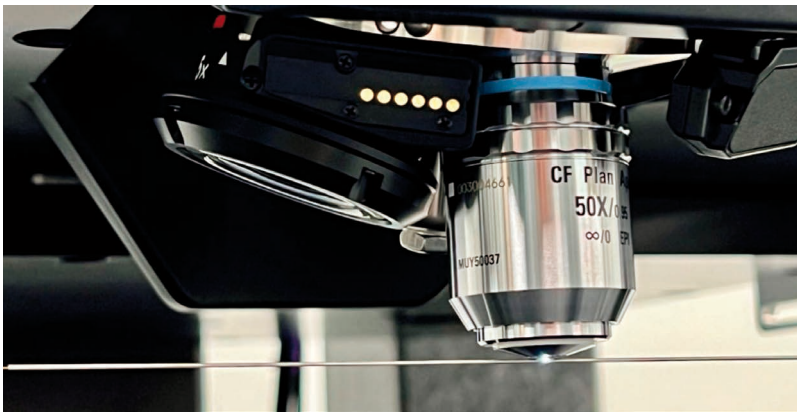


Bild 6: 3D-Lasermikroskop bei der Vermessung eines Schnitts in einem lasergeschnittenen Hypotube. Der erzeugte Datensatz bildet eine vollständige 3D-Oberfläche ab.

nicht nur eine bessere Abbildung von Neigungen, sondern auch eine umfassendere Analyse der räumlichen Struktur.

Denn die dünnen Röhrcen sind keine flachen Werkstücke, sondern komplex geformte, oftmals mehrlagige Strukturen mit variabler Wandstärke. Entsprechend muss die Messtechnik in der Lage sein, sich flexibel an Geometrie und Materialverhalten anzupassen – und dabei zugleich reproduzierbare Ergebnisse zu liefern. 3D-Systeme leisten genau das: Sie erfassen nicht nur die X- und Y-Koordinaten, sondern auch die Höheninformation (Z-Achse) und geben so ein vollständiges Bild des untersuchten Bereichs (Bild 6). Bild 7 zeigt das optische 2D-Bild mit einer Höhenprofilinie, die über eine Laserschnittkontur gelegt wurde. Da ein vollständiger 3D-Datensatz vorliegt, lassen sich Referenzlinien auf den Innenwänden der Schnittkontur sowie auf der Oberseite des Rohrs definieren. Die Schnittpunkte dieser Linien ermöglichen eine präzise Bestimmung der Rohrbreite.

Vorteile der 3D-Messtechnik

3D-Messsysteme punkten besonders dort, wo Geometrien von der Idealform abweichen. Abgeschrägte Schnitte oder schräge Bohrungen lassen sich mit 2D-Ansätzen oft nur schwer bewerten, da Start- und Endpunkte der Kanten nicht eindeutig definiert sind. Ein 3D-System hingegen erfasst die komplette Topografie – und sorgt so für reproduzierbare Ergebnisse.

Auch bei der Analyse möglicher Defekte – etwa Dellen, Kratzer oder Materialanhaftungen – verschaffen

3D-Systeme entscheidende Vorteile. Wo 2D-Bilder nicht zwischen Ein- und Auswölbung unterscheiden können, liefert die Höheninformation aus dem 3D-Datensatz verlässliche Aussagen zur Art des Fehlers. Die Defektcharakterisierung ist damit deutlich einfacher, schneller und vor allem objektiver möglich.

Zudem lassen sich mit modernen 3D-Systemen auch funktionale Merkmale analysieren:

- Sind die Schnitte symmetrisch?
- Entsprechen die Winkel der Bohrungen den Konstruktionsvorgaben?
- Liegt die Schnittbreite innerhalb der erlaubten Toleranz?

All diese Fragen lassen sich mit präzisen 3D-Daten beantworten – entweder manuell oder automatisiert durch softwaregestützte Auswertung. Bild 8 zeigt ein optisches 2D-Abbild der Rohroberfläche. Bild 9 zeigt, wie sich mithilfe der 3D-Daten

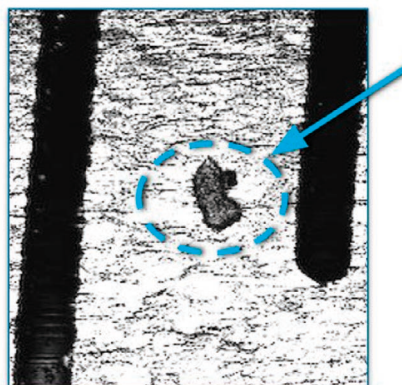


Bild 8: Optisches 2D-Abbild der Rohroberfläche.

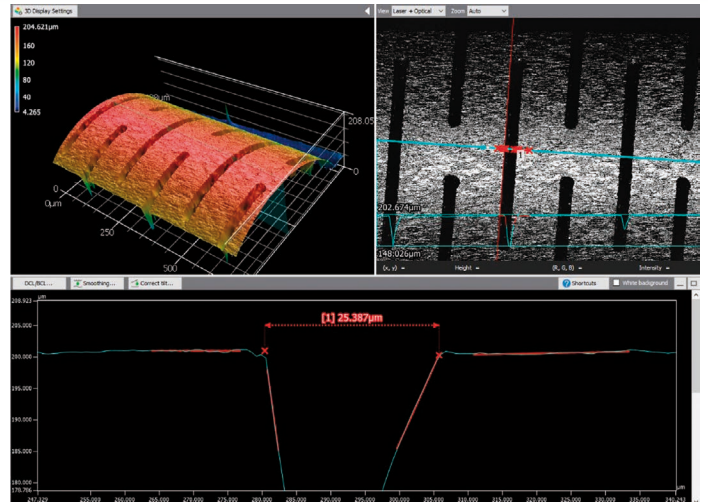


Bild 7: Optisches 2D-Bild mit einer Höhenprofilinie, die über eine Laserschnittkontur gelegt wurde.

die Oberfläche im Winkel betrachten lässt – so wird deutlich, dass es sich bei dem sichtbaren Defekt um einen Überstand handelt. Dieser kann vermessen und mit den Spezifikationen abgeglichen werden. In diesem Fall beträgt die ermittelte Fehlerhöhe 8,8 Mikrometer.

Auswahl des passenden Systems

Bei der Auswahl des geeigneten 3D-Messsystems kommt es also auf den konkreten Einsatzfall an. Drei Technologien haben sich in unserer Praxis bewährt:

- **Konfokale Mikroskope** liefern eine exzellente Auflösung und große Schärfentiefe. Sie eignen

sich ideal für hochpräzise Detailaufnahmen, sind jedoch relativ langsam – eine Messung von wenigen hundert Mikrometern kann bis zu 30 Sekunden dauern. Für Inline-Messprozesse sind sie deshalb nur bedingt geeignet. Ihre Stärken liegen in der Einzelteilprüfung, der Produktentwicklung und der Prozessvalidierung.

- **Digitale Bildverarbeitungssysteme** sind deutlich schneller und erzeugen 3D-Daten durch Stapelung mehrerer Bildebenen. Sie sind ein guter Kompromiss, wenn Geschwindigkeit wichtiger ist als maximale Höhengauflösung. Gerade bei Stichprobenkontrollen oder in der Qualitätssicherung

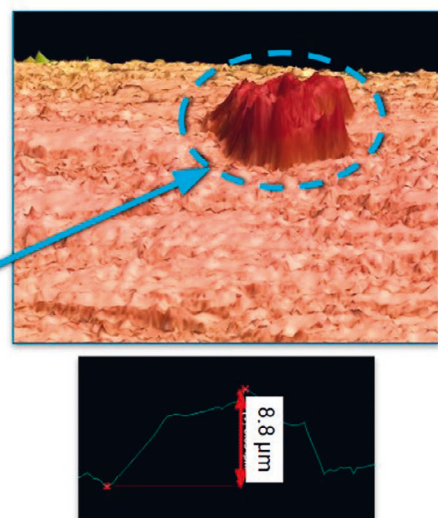


Bild 9: Mithilfe der 3D-Daten lässt sich die Oberfläche im Winkel betrachten – so wird deutlich, dass es sich bei dem Defekt um einen Überstand handelt.



Bild 10: Digitales 3D-Mikroskop, das durch das Stapeln von Bildern aus verschiedenen Fokusebenen eine Tiefenschärfe erzeugt.

können sie ihre Vorteile ausspielen – insbesondere dann, wenn große Stückzahlen zu prüfen sind.

- **Konfokale 3D-Sensoren** vereinen hohe Auflösung mit schneller Datenerfassung. Sie liefern Rohdaten in Form von Höhenprofilen und ermöglichen die flächige Analyse kompletter Hypotube-Oberflächen. In Kombination mit einem hochpräzisen Bewegungssystem – etwa mit Motion-Control-Technologie von Aerotech – lassen sich erfahrungsgemäß selbst in automatisierten Produktionslinien hochgenaue und wiederholbare Messungen realisieren. Dank ihrer Modularität können solche Systeme flexibel in bestehende Fertigungsumgebungen integriert werden.

Bild 10 zeigt ein digitales 3D-Mikroskop, das durch das Stapeln von Bildern aus verschiedenen Fokusebenen eine Tiefenschärfe

erzeugt. Es arbeitet schneller als ein Lasermikroskop, bietet jedoch nicht denselben Funktionsumfang: So fehlen etwa präzise Höheninformationen, die für bestimmte Messungen – wie etwa zur Bestimmung der Oberflächenrauheit – erforderlich wären.

Ein Beispiel

Ein konkretes Beispiel verdeutlicht die Leistungsfähigkeit solcher Systeme: Bei einer Anwendung wurde eine konfokale Technik eingesetzt, um fünf Schnittbreiten entlang eines Hypotubes zu messen. Diese Punktmessung ließ sich problemlos auf die gesamte Länge des Rohrs ausdehnen – und bot dabei jederzeit reproduzierbare Ergebnisse. Die eingesetzte Software ermöglichte darüber hinaus eine automatische Klassifikation von Defekten und geometrischen Abweichungen – ein echter Mehrwert für die Prozess- und Qualitätskontrolle.

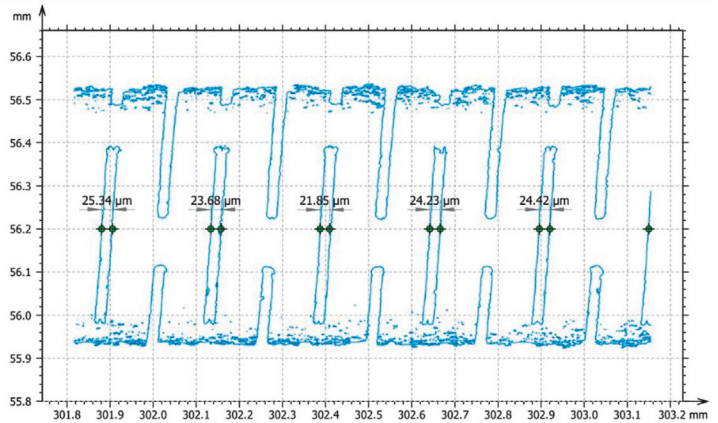


Bild 11: Einzeler Datensatz eines 3D-Messensors mit 1 µm Auflösung.

Bild 11 zeigt einen einzelnen Datensatz eines 3D-Messensors mit 1 µm Auflösung. Sichtbar sind die Messungen der Schnittbreite an fünf definierten Positionen. Bild 12 ist eine Übersichtsdarstellung, die die Ergebnisse von zehn separaten Messläufen am selben Rohrabchnitt zusammenfasst. Die Wiederholgenauigkeit der Messung (in der Tabelle als „Range“ angegeben) lag im ungünstigsten Fall bei 1,2 µm.

Software und Integration

Die beste Messtechnik nützt wenig, wenn sie sich nicht effizient in bestehende Prozesse integrieren lässt. Die präzise 3D-Datenerfassung gelingt durch den Einsatz hochgenauer Sensoren in Kombination mit Motion-Control-Technologie von Aerotech. Diese Modularität erlaubt eine flexible Integration in bestehende automatisierte Fertigungsprozesse. Die eingesetzte Software unterstützt die automatische Auswertung und Klassifikation von Defekten und geometrischen Abweichungen, wodurch eine zuverlässige Prozesskontrolle ermöglicht wird.

3D-Messtechnik als Schlüssel zur Qualitätssicherung

Die Prüfung lasergeschnittener Hypotubes gehört zu den anspruchsvollsten Aufgaben in der medizintechnischen Qualitätssicherung – und die Anforderungen steigen mit jedem Mikrometer Miniaturisierung. Moderne 3D-Messsysteme bieten dafür die nötige Auflösung und Flexibilität, um auch komplexe Geometrien exakt zu erfassen.

Welches System zum Einsatz kommt – ob konfokal, bildbasiert oder sensorisch – hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Entscheidend ist ein durchdachtes Gesamtkonzept: von der Wahl zwischen 2D- und 3D-Messtechnik über die passende Technologie bis zur nahtlosen Integration in bestehende Fertigungs- und Auswertesysteme.

Wer frühzeitig auf 3D setzt, legt das Fundament für stabile, reproduzierbare und effiziente Prozesse – und schafft damit die Basis für eine zukunftssichere Fertigung in der Medizintechnik.

Wer schreibt:

RJ Hardt ist Präsident von Peak Metrology, einem Tochterunternehmen des Motion-Control-Spezialisten Aerotech. Als langjähriger Ingenieur bei Aerotech verfügt er über umfassende Erfahrung in der Entwicklung hochpräziser Messtechniklösungen für industrielle Anwendungen. Peak Metrology bündelt dieses Know-how speziell für den Bereich Oberflächenmesstechnik – von der Sensorintegration bis zur vollständigen Systemlösung. ◀

Statistical Summary					
µm	Mean	Std dev	Min	Max	Range
Distance 1	25.1	0.1	25.0	25.3	0.3
Distance 2	24.5	0.4	23.7	24.8	1.2
Distance 3	21.8	0.4	21.1	22.2	1.1
Distance 4	24.0	0.1	24.0	24.2	0.2
Distance 5	25.0	0.3	24.4	25.5	1.1

Bild 12: Übersichtsdarstellung, die die Ergebnisse von zehn separaten Messläufen am selben Rohrabchnitt zusammenfasst.