

NEUE HYBRID-TECHNOLOGIE FÜR TAKTILE UND OPTISCHE MESSTECHNIK

Die Anforderungen in der Verzahnungsmesstechnik sind extrem hoch: Genauigkeiten im Nanometerbereich auf der einen Seite, geringe Messzeiten bei gleichzeitig höherer Informationsdichte auf der anderen Seite. Ende 2018 bringt Klingelnberg eine neue Hybrid-Technologie auf den Markt, die die Vorteile der taktilen und optischen Messtechnik optimal verbindet.

Der Wunsch nach einer berührungslosen, schnellen und vollständigen Erfassung der Geometrie von Verzahnungen ist mindestens so alt wie die CNC-gesteuerte Verzahnungsmesstechnik selbst. Letztere hat Klingelberg im Jahr 1985 eingeführt. Beflügelt durch die neuen Möglichkeiten, die die CNC-Technik nun plötzlich bot, hatte Klingelberg schon damals die Vision, nicht nur die Bewegungsabläufe der Messmaschine zu revolutionieren, sondern auch eine Möglichkeit zu finden, um auf die berührende Antastung der Bauteile zu verzichten.

Intensive Forschung schon in den 1990ern

Bereits Anfang der 1990er Jahre beteiligte sich Klingelberg daher maßgeblich am ersten Forschungsprojekt zur optischen Verzahnungsmessung am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen. Hierzu stattete das Expertenteam eine Klingelberg PNC33 mit einem Laser-Triangulationssensor aus. Da man damals schon erkannt hatte, dass die Abschattung des Laserstrahls in Richtung des Detektors bei der Verzahnungsmessung ein Problem darstellt, war der Laser-Triangulationssensor mit zwei versetzt angeordneten Detektoren ausgestattet. Damit konnte gewährleistet werden, dass – unabhängig vom Schrägungswinkel der Verzahnung – immer mindestens einer der beiden Detektoren ein Signal bekommt. Den Sensor hatte die Gesellschaft für Messtechnik mbH (GFM in Aachen) mit dem Fraunhofer IPT in enger Zusammenarbeit mit Klingelberg speziell für diese Zwecke entwickelt.

Reflektionsverhalten steht Lösung im Weg

Rückblickend ist es schon bemerkenswert, wie weit die Überlegungen bezüglich der optischen Verzahnungsmessung damals bereits gediehen waren. Trotzdem konn-

ten Messungen mit brauchbaren Ergebnissen leider nur an einem komplett freigeschnittenen Zahn durchgeführt werden. Das schwierige Reflektionsverhalten der Verzahnungsoberfläche in Kombination mit den ungünstigen Antastbedingungen führte trotz intensiver zweijähriger Forschungsarbeit enttäuschenderweise nicht zu einer praxistauglichen Lösung.

Seit diesem ersten Forschungsprojekt am Fraunhofer-Institut hat sich die optische Messtechnik inzwischen deutlich weiterentwickelt. Viele Messverfahren sind durch die technische Verbesserung von Detektoren und die hohe Leistungsfähigkeit der rechnergestützten Messdatenverarbeitung erst sinnvoll nutzbar geworden. Andere Messverfahren sind dazugekommen. Und durch neue Technologien konnten auch neue Sensoren entwickelt werden. Klingelberg hat diese Entwicklungen sehr intensiv verfolgt und aktiv begleitet. So hat das Hückeswagener Unternehmen immer wieder an Untersuchungen mit unterschiedlichen optischen Messverfahren und Sensoren gearbeitet, entweder in weiteren Forschungsprojekten im eigenen Hause oder aber bei Entwicklungspartnern.

Hohe Anforderungen an Messgenauigkeit

Doch die Anforderungen an die Verzahnungsmessung sind außergewöhnlich hoch, so dass es bis zur Lösung der Problemstellung noch eine Weile dauern sollte. Vor allem die geforderte Messgenauigkeit stellte Klingelberg vor große Herausforderungen: Wurde vor ca. zehn Jahren noch das „µm“ als das Maß der Dinge bezeichnet, so bewegen wir uns bei den Anforderungen an die Messgenauigkeit mittlerweile im Nanometerbereich. Um z. B. die Welligkeitsanalyse (Gravel) durchführen zu können, werden bei der Messwertaufnahme feinste geometrische Abweichungen in der Größenordnung von 50-100 Nanometern erfasst.

Kompakt

Die Vision: optische Messung

Bereits Anfang der 1990er Jahre beteiligte sich Klingelberg maßgeblich am ersten Forschungsprojekt zur optischen Verzahnungsmessung am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie in Aachen und begleitete über Jahrzehnte intensiv neue Technologien in diesem Bereich. Auf der EMO Hannover 2011 stellte Klingelberg ein erstes optisches Messsystem vor, das in den Folgejahren intensiv weiterentwickelt wurde, um die Datenrate und die Signalqualität deutlich zu verbessern.

Der Wunsch nach einer berührungslosen, schnellen und vollständigen Erfassung der Geometrie von Verzahnungen ist mindestens so alt wie die CNC-gesteuerte Verzahnungsmesstechnik selbst. Letztere hat Klingelberg im Jahr 1985 eingeführt. Beflügelt durch die neuen Möglichkeiten, die die CNC-Technik nun plötzlich bot, hatte Klingelberg schon damals die Vision, nicht nur die Bewegungsabläufe der Messmaschine zu revolutionieren, sondern auch eine Möglichkeit zu finden, um auf die berührende Antastung der Bauteile zu verzichten.

Intensive Forschung schon in den 1990ern

Bereits Anfang der 1990er Jahre beteiligte sich Klingelberg daher maßgeblich am ersten Forschungsprojekt zur optischen Verzahnungsmessung am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen. Hierzu stattete das Expertenteam eine Klingelberg PNC33 mit einem Laser-Triangulationssensor aus. Da man damals schon erkannt hatte, dass die Abschattung des Laserstrahls in Richtung des Detektors bei der Verzahnungsmessung ein Problem darstellt, war der Laser-Triangulationssensor mit zwei versetzt angeordneten Detektoren ausgestattet. Damit konnte gewährleistet werden, dass – unabhängig vom Schrägungswinkel der Verzahnung – immer mindestens einer der beiden Detektoren ein Signal bekommt. Den Sensor hatte die Gesellschaft für Messtechnik mbH (GFM in Aachen) mit dem Fraunhofer IPT in enger Zusammenarbeit mit Klingelberg speziell für diese Zwecke entwickelt.

Reflektionsverhalten steht Lösung im Weg

Rückblickend ist es schon bemerkenswert, wie weit die Überlegungen bezüglich der optischen Verzahnungsmessung damals bereits gediehen waren. Trotzdem konn-

ten Messungen mit brauchbaren Ergebnissen leider nur an einem komplett freigeschnittenen Zahn durchgeführt werden. Das schwierige Reflektionsverhalten der Verzahnungsoberfläche in Kombination mit den ungünstigen Antastbedingungen führte trotz intensiver zweijähriger Forschungsarbeit enttäuschenderweise nicht zu einer praxistauglichen Lösung.

Seit diesem ersten Forschungsprojekt am Fraunhofer-Institut hat sich die optische Messtechnik inzwischen deutlich weiterentwickelt. Viele Messverfahren sind durch die technische Verbesserung von Detektoren und die hohe Leistungsfähigkeit der rechnergestützten Messdatenverarbeitung erst sinnvoll nutzbar geworden. Andere Messverfahren sind dazugekommen. Und durch neue Technologien konnten auch neue Sensoren entwickelt werden. Klingelberg hat diese Entwicklungen sehr intensiv verfolgt und aktiv begleitet. So hat das Hückeswagener Unternehmen immer wieder an Untersuchungen mit unterschiedlichen optischen Messverfahren und Sensoren gearbeitet, entweder in weiteren Forschungsprojekten im eigenen Hause oder aber bei Entwicklungspartnern.

Hohe Anforderungen an Messgenauigkeit

Doch die Anforderungen an die Verzahnungsmessung sind außergewöhnlich hoch, so dass es bis zur Lösung der Problemstellung noch eine Weile dauern sollte. Vor allem die geforderte Messgenauigkeit stellte Klingelberg vor große Herausforderungen: Wurde vor ca. zehn Jahren noch das „µm“ als das Maß der Dinge bezeichnet, so bewegen wir uns bei den Anforderungen an die Messgenauigkeit mittlerweile im Nanometerbereich. Um z. B. die Welligkeitsanalyse (Gravel) durchführen zu können, werden bei der Messwertaufnahme feinste geometrische Abweichungen in der Größenordnung von 50-100 Nanometern erfasst.

Kompakt

Die Vision: optische Messung

Bereits Anfang der 1990er Jahre beteiligte sich Klingelberg maßgeblich am ersten Forschungsprojekt zur optischen Verzahnungsmessung am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie in Aachen und begleitete über Jahrzehnte intensiv neue Technologien in diesem Bereich. Auf der EMO Hannover 2011 stellte Klingelberg ein erstes optisches Messsystem vor, das in den Folgejahren intensiv weiterentwickelt wurde, um die Datenrate und die Signalqualität deutlich zu verbessern.

Abb. 1: Entwicklungen der optischen Messtechnik im Zeitverlauf



1992
Doppel-Triangulations-
Lasersensor, Versuchsaufbau



2004
Werkzeugmessung mit
Streifenlichtprojektion



2005
Optische Vermessung
von Biegeteilen



2015
Verzahnungsmessung mit interferometri-
schem Fasertaster



2011
Optische Zahnkantenmessung
mit Weißlichtsensor



2018
Schneller optischer Scanning Sensor



2017
Triangulations-Lasersensor

Lichtreflektionen und Winkelverhältnisse – eine Herausforderung

Ebenfalls sehr anspruchsvoll ist die optische Messwerterfassung aufgrund der Oberflächengüte der Verzahnung. Mittlerweile können Oberflächen mit Rauheiten von $R_z < 1 \mu\text{m}$ prozesssicher in der Serienproduktion hergestellt werden. Da diese glatten, glänzenden Oberflächen wie ein Spiegel wirken, ist physikalisch bedingt der Anteil der diffusen Reflektion sehr gering. Der größte Teil des Lichts reflektiert entsprechend dem Gesetz „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“ in eine definierte Richtung. Unabhängig vom optischen Messverfahren wird von den im Sensor befindlichen Detektoren aber nur dann ein Signal erzeugt, wenn ein Teil des Lichts in Richtung des Detektors reflektiert wird. Hierzu ist eine diffuse Reflektion, also eine gewisse Streuung des reflektierten Lichts, erforderlich. Kombiniert mit den ungünstigen Winkelverhältnissen der Zahnoberfläche relativ zum Sensor führt die spiegelnde Wirkung nicht nur zur weiteren Reduzierung des detektierten Lichts, sondern auch zu Mehrfachreflektionen innerhalb der Zahnücke.

In Summe bleibt festzuhalten, dass die Verzahnungsgeometrie und -oberfläche in Verbindung mit den geforderten Genauigkeiten für die optische Messtechnik eine große Herausforderung darstellt.

2015: Fasersensor verbessert Genauigkeit

Mit einer Sensorik, die in die Zahnücken eintaucht, kann die Situation jedoch verbessert werden. Dies zeigte sich bereits 2015 in dem Forschungsprojekt OptoGear der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). Hierbei wurde ein interferometrisch arbeitender Fasersensor in die Zahnücke getaucht und mit geringem, gleichmäßigem Abstand über die

Der Anspruch an das optische Messen: einen deutlichen Geschwindigkeitsgewinn zum taktilen Messen erhalten.

Zahnoberfläche geführt. Die so erzielbaren Genauigkeiten sind vergleichbar mit der taktilen Messung. Da jedoch auch die Bewegungsabläufe ähnlich zur taktilen Messung erfolgen, war leider kein nennenswerter Vorteil erreichbar. Eine wirklich schnelle Messwertaufnahme mit sehr vielen Messpunkten und idealerweise kompletter Erfassung der gesamten Geometrie war so noch nicht möglich.

Kostenvorteile durch reduzierte Messzeit

Der Anspruch, bahnbrechende Innovationen zu entwickeln, ist bei Klingelberg traditionell aber immer schon sehr hoch: Die optische Messung von Verzahnungen muss auf alle Fälle einen deutlichen Geschwindigkeitsgewinn bieten, das war klar. Denn nur, wenn z. B. bei gleicher Messpunktdichte die Messzeit reduziert wird, kann ein wirtschaftlicher Vorteil erzielt werden. Alternativ käme noch in Frage, dass die Messpunktdichte und damit der Informationsgehalt deutlich erweitert werden, ohne dass dafür unverhältnismäßig lange Messzeiten in Kauf zu nehmen sind.

Klingelberg stellt erste Lösung 2011 vor

Das optische Messsystem, das bereits auf der EMO Hannover 2011 von Klingelberg vorgestellt wurde, folgte damals schon diesem Anspruch. Der wirtschaftliche Vorteil war allerdings – bedingt durch die im Jahre 2011 möglichen Messdatenraten – noch nicht ganz ausreichend,

um den Mehraufwand für die optische Sensorik zu rechtfertigen. Seit 2011 konnte Klingenberg dann durch eine intensive Weiterentwicklung die Datenrate und die Signalqualität noch mal deutlich verbessern – und entschied daher, eine neue Lösung zur optischen Messung vorzustellen.

Optische und taktile Messtechnik verbinden

Durch die vielen Untersuchungen und die langjährige Erfahrung mit unterschiedlichen optischen Messverfahren ist im Hause Klingenberg aber auch die Erkenntnis gereift, dass es nicht möglich ist, die taktile Messung komplett durch ein optisches Messverfahren zu ersetzen. Damit war im Grunde genommen klar,

dass beide Systeme kombiniert werden müssen – in einer Hybrid-Lösung. Um bei einem solchen Hybrid-System die Vorteile der taktilen und der optischen Messung möglichst ideal miteinander kombinieren zu können, gibt es eine Grundvoraussetzung: Der Wechsel zwischen beiden Messverfahren muss sehr schnell möglich sein. Denn nur dann kann durch diese optimale Verbindung beider Technologien die Gesamtmesszeit reduziert werden.

Der Vorteil der schnellen Messwertaufnahme durch den optischen Sensor wird mit der Flexibilität und der sehr hohen Genauigkeit des taktilen Tastsystems 3D NANOSCAN kombiniert. Damit ist gewährleistet, dass die neuen, sehr attraktiven Möglichkeiten der optischen

ANWENDUNGSBEISPIELE

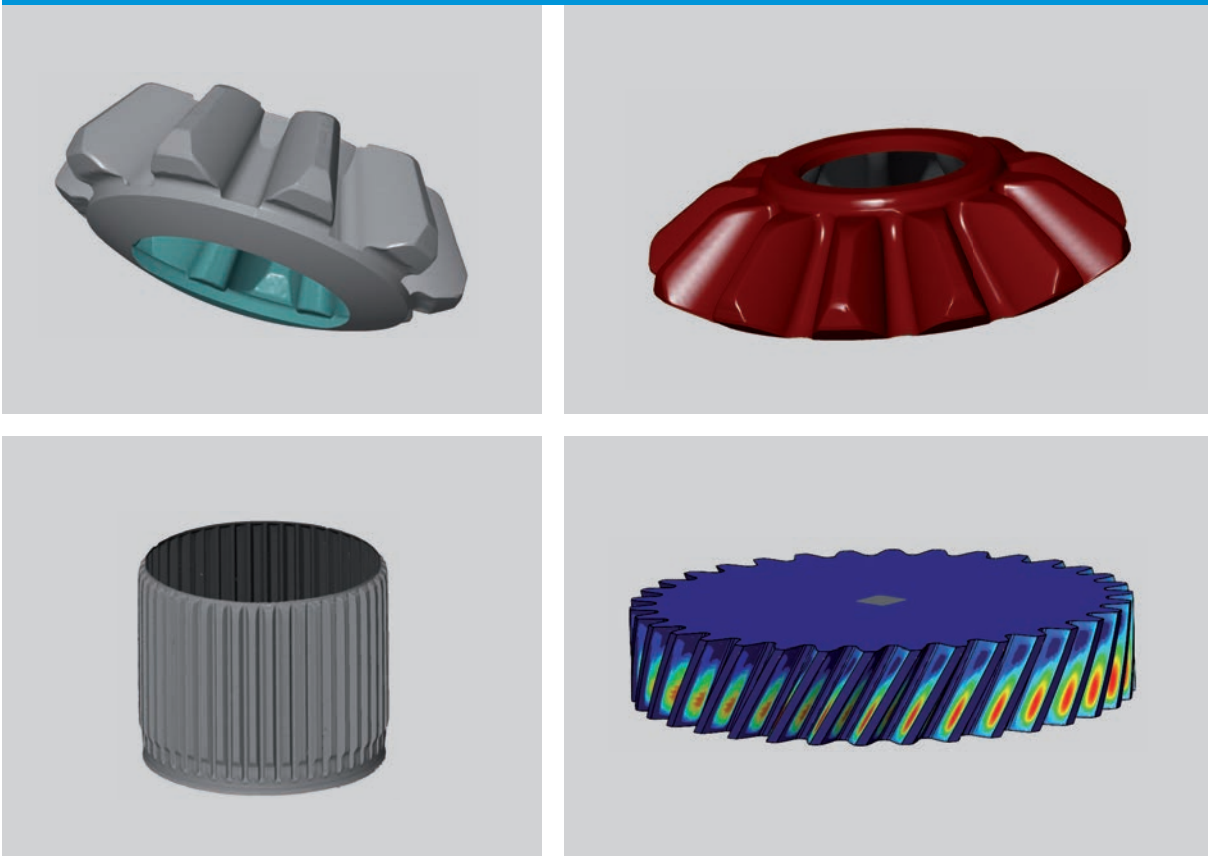


Abb. 2: Ausgleichkegelrad (oben links), Seitenwellenkegelrad flach (oben rechts), Steckverzahnung (unten links), Stirnrad (unten rechts)

Messung genutzt werden können, ohne Kompromisse bei der Messgenauigkeit eingehen zu müssen.

Schnelles Scannen bei hoher Punktdichte

Dabei ist das Hybrid-System so ausgelegt, dass die optische Sensorik flexibel adaptiert werden kann. Eine Festlegung auf nur ein Sensorprinzip hat Klingelnberg vermieden. In der aktuellen Entwicklungsstufe wird mit einem sehr schnellen Scanning Sensor gearbeitet. So können beliebige rotationssymmetrische Bauteile durch einen schnellen Scan-Ablauf mit extrem hoher Punktdichte digitalisiert werden.

Der Messablauf ist dabei denkbar einfach. Der optische Sensor wird über die CNC-Achsen entlang der Bauteil-Außenkontur geführt – bei einer Stirnverzahnung z. B. durch eine Linearbewegung in vertikaler Richtung. Das Bauteil dreht sich dabei mit bis zu 1,5 Umdrehungen pro Sekunde. Durch diese kombinierte Bewegung wird eine Punktwolke mit einer sehr hohen Punktdichte von 0,5 Millionen Punkten pro Minute aufgenommen.

BEST CASE: HYBRID-TECHNOLOGIE

Die jahrzehntelange Erfahrung mit unterschiedlichen optischen Messverfahren zeigt: Es ist nicht möglich, die taktile Messung komplett durch ein optisches Messverfahren zu ersetzen. Deswegen setzt Klingelnberg auf eine Hybrid-Lösung, die beide Messarten in idealer Weise miteinander kombiniert. Grundvoraussetzung für ein solches System ist, dass der Wechsel zwischen beiden Verfahren sehr schnell möglich ist.



Abb. 3: Optisches Messen

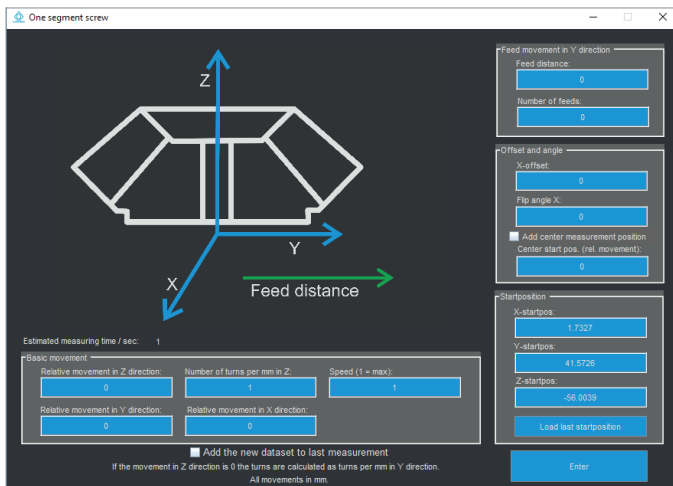


Abb. 4: Dateneingabe für den Messablauf

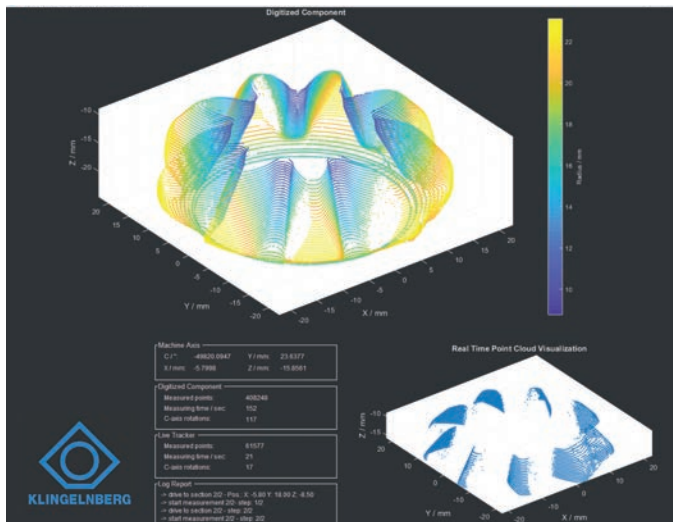


Abb. 5: Online-Darstellung der Messwertaufnahme

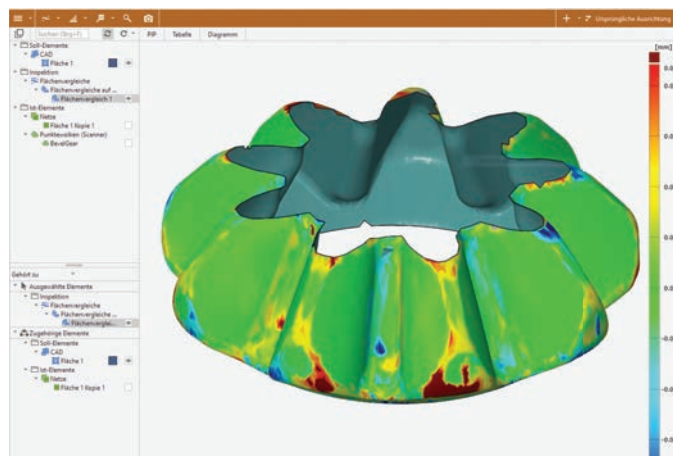


Abb. 6: Auswertung in der GOM-Software: Soll-Ist-Vergleich mit Falschfarbendarstellung

Mehrere Scans erfassen auch komplexe Bauteile

Um optimale Antastbedingungen zu gewährleisten, können mehrere Scans aneinandergesetzt werden. So lassen sich z. B. die linken und rechten Flanken einer Verzahnung mit zwei Scans aus unterschiedlichen Richtungen antasten. Diese Funktion kann außerdem genutzt werden, um den Messbereich am Bauteil, unabhängig vom tatsächlichen Messbereich des Sensors, zu erweitern. Selbst komplexe Bauteilgeometrien lassen sich lückenlos erfassen. Dazu werden mehrere Scans auf unterschiedlichen Radien durchgeführt und nach dem Zwiebelschalen-Prinzip aneinandergesetzt.

Schnelle und flexible Messwertaufnahme

Ein weiterer Vorteil: Um einen Messablauf zu programmieren, müssen weder Verzahnungsdaten noch andere Bauteilparameter eingegeben werden. Die Scan-Bewegungen werden sehr einfach mit einer Teach-Funktion über Stützpunkte definiert. Die Vorbereitung für die Messwertaufnahme dauert dadurch nur wenige Minuten und die Messwertaufnahme ist sehr flexibel nutzbar.

Bereits während des Scan-Vorgangs wird auf dem Bildschirm die Entstehung der Punktwolke dargestellt. Bei mehreren Scans werden die vorhandenen Punktwolken Schritt für Schritt ergänzt. Die hohe Genauigkeit der Maschinenachsen ist eine Grundvoraussetzung, um dieses Messverfahren überhaupt einsetzen zu können. Nur so lassen sich bei diesen hohen Abtastraten die Sensorwerte mit den Maschinenkoordinaten in der erforderlichen Genauigkeit zusammenführen.

Messwerte fließen in CAD-Auswertung

Unmittelbar nach der kompletten Messwertaufnahme steht die gesamte Punktwolke zur Verfügung und wird mit einem speziell auf dieses Messverfahren abgestimmten Algorithmus in eine .stl-Datei umgewandelt. Diese .stl-Datei enthält dann alle durch die Messwertaufnahme gewonnenen Informationen über die Bauteilgeometrie und kann mit CAD-basierten Auswerteprogrammen zügig weiterverarbeitet werden. Klingelberg nutzt und empfiehlt dazu die Auswertesoftware der Firma GOM. Dabei handelt es sich um eine sehr umfangreiche, etablierte Software, die speziell auf die Auswertung von optisch erfassten Messdaten ausgelegt ist.

Hybrid-Technologie erschließt Potenziale

Die optische Messung ist eine neue, sehr leistungsfähige Option für die Präzisionsmesszentren P 26 bis P 100L. Diese Option ist ab Ende 2018 verfügbar und beinhaltet den optischen Sensor HISPEED OPTOSCAN inklusive der schnellen Wechsel-Vorschubeinheit, die Software für die Messwertaufnahme und Visualisierung der gemessenen Punktwolke sowie die GOM-3D Auswertesoftware. Eine Retrofit-Lösung für Maschinen ab dem Baujahr 2012 ist ebenfalls in Kürze erhältlich. ◆

AUF EINEN BLICK

- Hybrides System mit schnellem Wechsel zwischen taktiler und optischer Messung
- Sehr schnelle Messwertaufnahme mit hoher Punktdichte
- Einfaches Handling und Bedienung
- Optische Messung an hochgenau geschliffenen Verzahnungen
- Digitalisierung von komplexen rotationsymmetrischen Bauteilen
- Option „Optische Messung“ auch als Nachrüstsatz erhältlich

OPTISCHE MESSTECHNIK – DAS VIDEO

Die wichtigsten Informationen zur optischen Messung sind in diesem Video zu sehen:



Dipl.-Ing. Georg Mies

Leiter Entwicklung
Präzisionsmesszentren
KLINGELBERG GmbH