



Präzision in der Robotik durch das Klingelberg Produktionssystem

Roboter als fester Bestandteil moderner Produktions- und Handhabungssysteme

Roboterbasierte Automatisierungslösungen sind heutzutage fester Bestandteil industrieller Produktionsstätten, Roboter übernehmen dabei eine Vielzahl an komplexen Aufgaben. Beispielsweise in der Automobilindustrie, wo sie unter anderem in Presswerken, im Rohbau und in der Lackiererei zum Einsatz kommen – der Automatisierungsgrad beträgt dort mittlerweile über 90 %. Aber auch in weniger stark automatisierten Bereichen der automobilen Fertigung und Produktion, z. B. in der Endmontage der Fahrzeuge, finden Industrieroboter zunehmend Anwendung. Zum einen lässt sich dank der Unterstützung durch Robotersysteme und Automatisierungslösungen die physische Belastung von Mitarbeitern bei sich wiederholenden, ergonomisch kritischen Tätigkeiten und Bewegungen wesentlich reduzieren. Zum anderen punkten Roboteranlagen und -systeme im Vergleich zu konventionellen manuellen und mechanisierten Bearbeitungslösungen durch ihre hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit sowie durch Positioniergenauigkeit und Reproduzierbarkeit in den Bewegungsabläufen. Aus diesen Gründen haben sich Robotersysteme in zahlreichen Anwendungsbereichen und Branchen etabliert und das nicht nur in der Industrie: Hochpräzise sowie sensitive Roboterassistenzsysteme helfen beispielsweise auch Medizinern bei der erfolgreichen Durchführung minimal-invasiver Eingriffe. Ebenso kommen sie zunehmend in der Pflege bedürftiger Menschen zum Einsatz. Der allgemein wachsende Bedarf an Robotersystemen fordert in einem preis- und stückzahlgetriebenen Markt eine effiziente wie robuste Fertigung qualitätsbestimmender Bauteile.



Inhalt:

- Struktureller Aufbau von Robotersystemen,
... Seite 2
- Mechanische Getriebe als Ursprung von Präzision und Laufruhe
... Seite 2
- Klingelberg Kegelradverzahnung für Greifer und Endeffektoren
... Seite 3
- Stirnradverzahnungen für Roboter Gelenke
... Seite 3
- Komplettmessung auf einem Präzisionsmessgerät – direkt in der Produktion
... Seite 5

Seit 2010 ist der weltweite Markt für Industrieroboter stetig mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von ca. 15 % pro Jahr gewachsen.

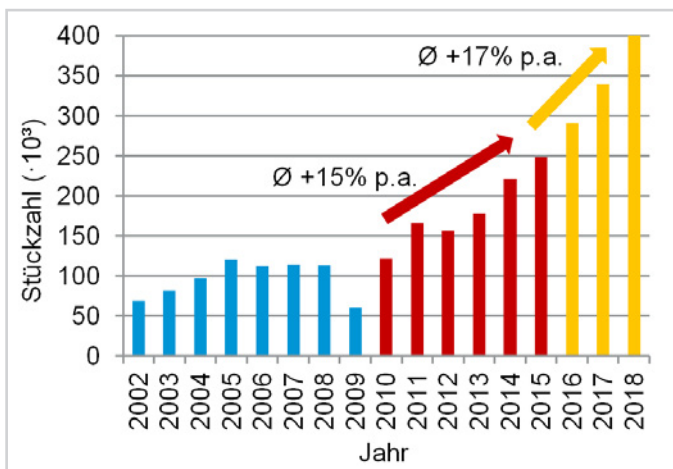


Abbildung 1: Weltweiter Absatz von Industrierobotern (Schätzung Klingelberg Management)

So wurden in den Jahren 2011 bis 2015 durchschnittlich ca. 200.000 Industrieroboter in den Markt gebracht. [Schätzung Klingelberg Management] Dies entspricht einer Erhöhung der weltweit installierten Industrieroboter um ca. 80.000 Stück im Vergleich zu den konjunkturell starken Jahren 2005 bis 2008. [Schätzung Klingelberg Management] Insbesondere die Vertikal-Knickarm-Roboter mit fünf oder sechs Achsen nehmen mit einem Marktanteil von 66 % einen bedeutenden Anteil ein.

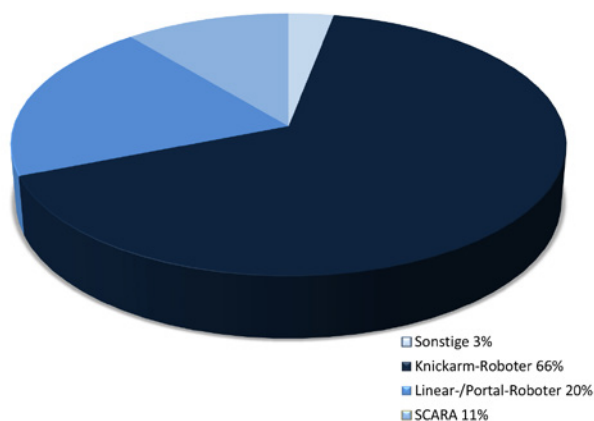


Abbildung 2: Marktanteil nach Robotertypen (Schätzung Klingelberg Management)

Mit Blick in die Zukunft erscheint aufgrund der erwarteten stetigen Nachfrage aus den Bereichen Elektronik sowie aus der Automobilindustrie eine weitere Wachstumsrate von ca. 17 % pro Jahr in den kommenden Jahren als wahrscheinlich.

Struktureller Aufbau von Robotersystemen

Grundsätzlich wird beim kinematischen Aufbau von Robotern zwischen einer seriellen und einer parallelen Struktur unterschieden. Bei Robotern mit serieller Struktur erfolgt die Übertragung der Bewegungs- und Handhabungsaufgaben über starre Gliedmaße, die paarweise an Gelenken miteinander verbunden sind. Beispiele hierfür sind die sogenannten SCARA- und Vertikal-Knickarmroboter. Hier sind die Gelenke im Allgemeinen als ebene Getriebe in Form von Planeten- bzw. Zykloidgetrieben ausgeführt. Werden in einem Gelenk zwei oder mehr Freiheitsgrade kombiniert, wie es beispielweise beim Gelenk am Endeffektor eines Vertikal-Knickarmroboters der Fall ist, werden zumeist Kegelrad- bzw. Hypoidgetriebe verwendet. Die serielle Struktur zeichnet sich durch ein hohes Maß an Flexibilität aus.

Im Vergleich hierzu wirken bei Parallelkinematiken die Antriebsachsen parallel auf den Endeffektor. Parallele Roboterstrukturen weisen in der Regel eine feste und eine bewegte Ebene aus, die über mehrere, parallele Glieder miteinander verbunden sind. Aufgrund des parallelen Aufbaus zeichnen sich diese Robotersysteme durch ein hohes Maß an Genauigkeit aus. Jedoch sind derartige Lösungen stets Sonderlösungen für dezidierte Anwendungsfälle, so dass Roboter mit paralleler Struktur weniger flexibel einsetzbar sind.

Mechanische Getriebe als Ursprung von Präzision und Laufruhe

Um Bewegungs- und Handhabungsaufgaben möglichst effizient und wirtschaftlich umsetzen zu können, müssen Robotersysteme zum einen über hohe Beweglichkeit und Dynamik in den Verfahrenoperationen und der Positionierung verfügen. Zum anderen stellt eine präzise und gleichförmige Übertragung von Bewegungen und Drehmomenten die wesentliche Herausforderung an die verwendeten Getriebe in den Gelenken und Aktuatoren von Robotersystemen dar. Das erfordert wiederum eine geringe Spielfreiheit sowie eine hohe Verdrehsteifigkeit.

Doch wie können die beschriebenen Anforderungen an die verwendeten Getriebe und Verzahnungen fertigungstechnisch umgesetzt und abgesichert werden? Welche qualitätsbestimmenden Einflussgrößen müssen bei einer auf hohe Stückzahlen ausgelegten Fertigung von Verzahnungsbauteilen betrachtet werden? Klingelberg **bietet mit seinem Produktionssystem Lösungen, die Herstellern von Robotersystemen** ermöglichen, hochpräzise Antriebe in Serie zu fertigen.

Klingelberg Kegelradverzahnung für Greifer und Endeffektoren

Die Präzision der Kegelradverzahnung im Endeffektor oder in der „Roboterhand“ ist maßgeblich für die Positionierung des Tool-Center-Points (TCP). Zur Sicherung der Qualität bietet Klingelberg eine bewährte und am Markt etablierte Lösung an: das Klingelberg Produktionssystem. Dieses mit dem Industrie 4.0 Award der ROI ausgezeichnete System steht für eine vollständige Closed Loop-Fertigung von Kegelradverzahnungen. Durch den geschlossenen Regelkreis ist es möglich, an qualitätsbestimmenden Abschnitten der Prozesskette proaktiv und korrigierend einzugreifen und somit zu effizienten und optimalen Ergebnissen zu gelangen. Beginnend mit der Auslegung der Verzahnung werden alle an die Verzahnung gestellten Anforderungen entlang der Fertigungskette optimal umgesetzt. Die notwendigen Korrekturen und Anpassungen, die entlang einer toleranzbehafteten Produktion entstehen, werden mit Hilfe des Closed Loop-Produktionssystems quantifizierbar.

Zu Beginn eines neuen Fertigungsprozesses steht die Auslegung des Radsatzes. Basierend auf der Simulation des Herstellprozesses werden die makro- und mikrogeometrische Zahnflankenform des Radsatzpaares generiert. Anschließend optimiert der Verzahnungsexperte die Verzahnung im Spannungsfeld der geforderten Eigenschaften und unter Zuhilfenahme der Zahnkontaktanalyse unter Last für die entscheidenden Betriebsfälle. Eine hohe Tragfähigkeit, ein geringes Geräuschverhalten, optimale Verlagerungseigenschaften unter Last sowie ein geringes Verdrehflankenspiel können schon während der Auslegung bestmöglich analysiert und eingestellt werden. Die theoretische Auslegung des Radsatzes entspricht somit der Übersetzung der durch den Anwendungsfall bestimmten Anforderungen an die notwendigen Informationen zur Fertigung innerhalb des Closed Loop-Produktionssystems.

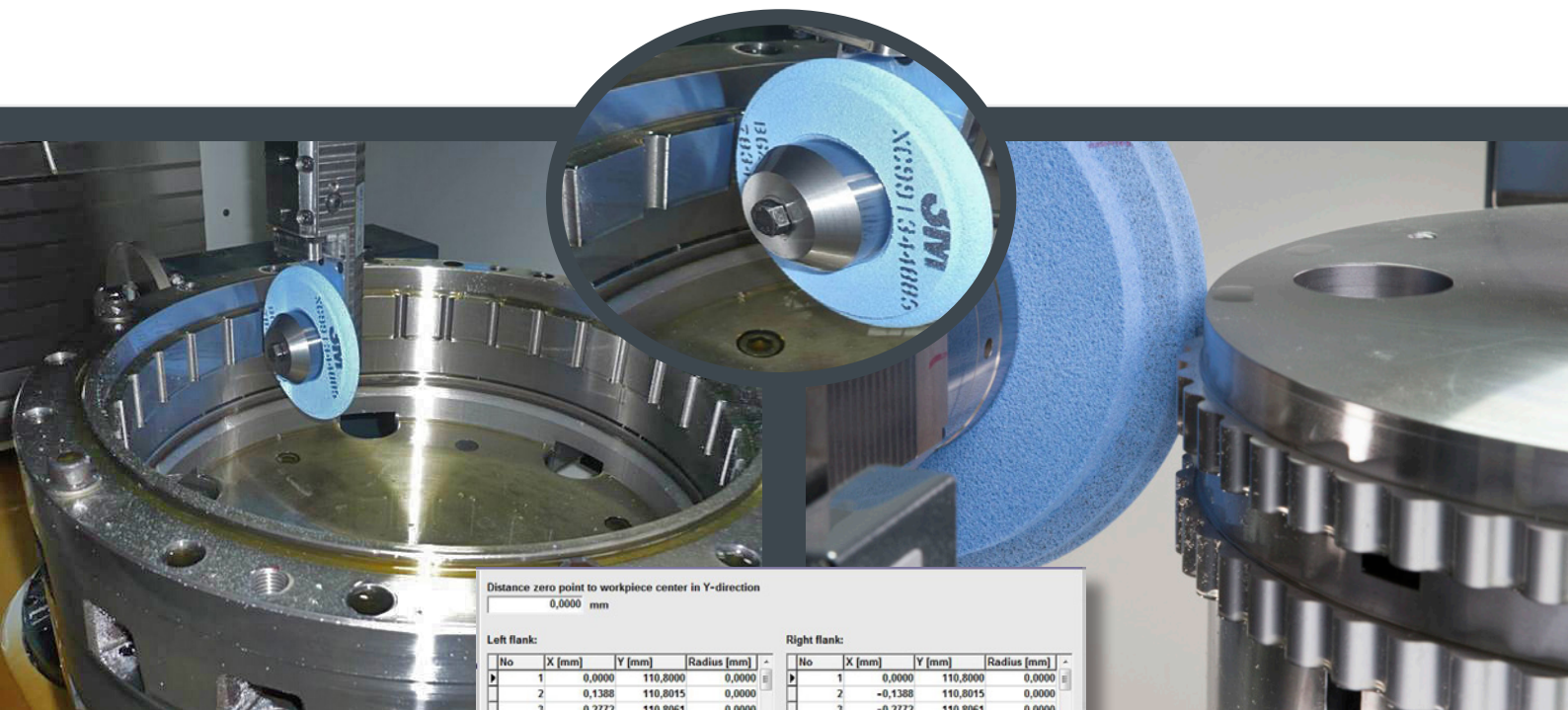
Innerhalb dieses Systems werden auf Basis der Auslegungen alle notwendigen Informationen für jeden Bearbeitungsschritt entlang der Fertigungskette zentral zusammengeführt: Die Geometrie des Verzahnungsrohlings, die zur Herstellung der Verzahnung notwendige bauteilspezifische Maschinenkinematik und Werkzeuggeometrie für das Fräsen und Entgraten der Vorverzahnung sowie das Vorhalten von Härteverzügen – das alles sind wesentliche Bestandteile zur Beschreibung der Vorverzahnung innerhalb des Closed Loop-Produktionssystems. Die Bearbeitungsdaten für das Schleifen und die jeweiligen Sollmesswerte für das Vermessen der Verzahnungsgeometrie entlang der Fertigungskette komplettieren den durch Klingelberg vorangetriebenen Industrie 4.0-Ansatz. Alle qualitätsbestimmenden Produktionsmaschinen sind über den durch Klingelberg gewählten Vernetzungsansatz optimal miteinander verbunden. Das Closed Loop-Produktionssystem bietet auf Basis einer konsequenten und transparenten Informationsrückführung entlang der Fertigungskette ideale Voraussetzungen zur optimalen Analyse und Gestaltung von Kegel- und Stirnradsätzen.

Bei der Auswahl eines geeigneten Verzahnungsverfahrens zur Erreichung höchster Verzahnungsqualitäten stellt das Schleifen von Kegelrad-, Stirnrad- sowie Hypoidverzahnungen einen optimalen Kompromiss aus Flexibilität, Leistungsfähigkeit und Produktivität dar. Mit der Kegelrad-Verzahnungsschleifmaschine G 30 bietet Klingelberg durch konsequente Weiterentwicklung des Vertikalmaschinenkonzepts ein wirtschaftliches und flexibles Gesamtpaket zur Fertigung hochpräziser Verzahnungen in der Serie an. Die hohe Steifigkeit und thermische Stabilität des neuentwickelten, schwingungsdämpfenden Maschinenbetts sind ein Garant für optimale Schleifergebnisse bei gleichzeitig hochproduktiven Bearbeitungsprozessen. Die im Vergleich zur Vorgängermaschinen generation weiterentwickelte Achsanordnung führt zu einer Verringerung der benötigten Verfahrenswege – und damit zu einer steiferen Maschinengesamtstruktur. Die Verwendung hochdynamischer Antriebe führt bei dieser Maschinen generation im Zusammenspiel mit der neuentwickelten, touch screen-basierten Maschinenbedienoberfläche und modernster Steuerungstechnik zu minimalen Haupt- und Nebenzeiten bei der Bearbeitung von Kegelrädern. Die konsequent auf intuitive Handhabung ausgerichtete Softwarebedienoberfläche überzeugt durch eine einfache und strukturierte Menüführung entlang des Maschineneinrichtungsprozesses sowie durch direktes Feedback bei falscher oder fehlerhafter Eingabe.

Dank der kontinuierlichen Überwachung des Maschinenzustands und des Bearbeitungsprozesses sorgt die G 30 Kegelrad-Verzahnungsschleifmaschine für maximale Prozesssicherheit – und das bei hochproduktiven Serienanwendungen. Die Kontrolle der Bauteil-Eingangsqualität durch Überwachung der Werkstückanlage sowie des Zahnflankenaufmaßes der Vorverzahnung stellt eine gleichbleibende Bauteilqualität nach dem Schleifen sicher. Die Grundlage eines jeden hochproduktiven Serienprozesses ist eine taktzeitoptimierte, automatische Beladung. Unter Verwendung des vollständig in der Maschine integrierten und NC-seitig optimal abgestimmten Beladesystems kann der Werkstückwechsel mit der G 30 in Minimalzeit durchgeführt werden. Das integrierte taktile Messsystem bietet die Möglichkeit einer schnellen produktionsbegleitenden Qualitätsabsicherung unmittelbar in der Maschine. Die hohe Präzision und Wiederholgenauigkeit der auf der G 30 erzeugten Messergebnisse führt im Zusammenspiel mit den automatisch erzeugten Korrekturen der Maschinenkinematik und des Werkzeugprofils zu einem verringerten Bauteilausschuss und damit zu einer effizienteren Produktion.

Stirnradverzahnungen für Robotergelenke

Die Anforderungen an ebene Robotergetriebe, die größtenteils in den Gelenken von Knickarmrobotern eingesetzt werden, sind eine hohe Übertragungsgenauigkeit und ein geringes Verdrehflankenspiel. Es werden unterschiedlichste Getriebeformen eingesetzt: In Asien sind Zykloidgetriebe gängig, in Europa und Amerika werden



Distance zero point to workpiece center in Y-direction
0,0000 mm

Left flank:				Right flank:			
No	X [mm]	Y [mm]	Radius [mm]	No	X [mm]	Y [mm]	Radius [mm]
1	0,0000	110,8000	0,0000	1	0,0000	110,8000	0,0000
2	0,1388	110,8015	0,0000	2	-0,1388	110,8015	0,0000
3	0,2772	110,8061	0,0000	3	-0,2772	110,8061	0,0000
4	0,4152	110,8137	0,0000	4	-0,4152	110,8137	0,0000
5	0,5523	110,8243	0,0000	5	-0,5523	110,8243	0,0000
6	0,6884	110,8378	0,0000	6	-0,6884	110,8378	0,0000
7	0,8251	110,8541	0,0000	7	-0,8251	110,8541	0,0000
8	0,9563	110,8732	0,0000	8	-0,9563	110,8732	0,0000
9	1,0877	110,8948	0,0000	9	-1,0877	110,8948	0,0000
10	1,2171	110,9189	0,0000	10	-1,2171	110,9189	0,0000
11	1,3444	110,9454	0,0000	11	-1,3444	110,9454	0,0000
12	1,4693	110,9741	0,0000	12	-1,4693	110,9741	0,0000
13	1,5918	111,0047	0,0000	13	-1,5918	111,0047	0,0000
14	1,7116	111,0373	0,0000	14	-1,7116	111,0373	0,0000
15	1,8287	111,0716	0,0000	15	-1,8287	111,0716	0,0000
16	1,9430	111,1074	0,0000	16	-1,9430	111,1074	0,0000
17	2,0544	111,1446	0,0000	17	-2,0544	111,1446	0,0000
18	2,1628	111,1831	0,0000	18	-2,1628	111,1831	0,0000
19	2,2682	111,2226	0,0000	19	-2,2682	111,2226	0,0000
20	2,3706	111,2630	0,0000	20	-2,3706	111,2630	0,0000
21	2,4700	111,3042	0,0000	21	-2,4700	111,3042	0,0000
22	2,5664	111,3460	0,0000	22	-2,5664	111,3460	0,0000
23	2,6597	111,3883	0,0000	23	-2,6597	111,3883	0,0000
24	2,7501	111,4310	0,0000	24	-2,7501	111,4310	0,0000
25	2,8375	111,4739	0,0000	25	-2,8375	111,4739	0,0000

Abbildung 3: Schleifen von Zykloidenverzahnungen auf einer VIPER 500 K

Planetengetriebe mit evolventischem Zahnprofil oder auch Wellgetriebe verwendet. Alle Robotergetriebe haben dabei eins gemeinsam: die kompakte Bauform und das sehr große Übersetzungsverhältnis.

Die engen Toleranzen erfordern Fertigungstechnologien, die höchste Verzahnungsqualitäten ermöglichen. Daher werden die wesentlichen Wirkflächen der in Robotergetrieben verwendeten Maschinenelemente geschliffen. Eine Verzahnungsschleifmaschine ist entsprechend in jedem Fall Bestandteil der Fertigungskette der verzahnten Bauteile. Da Robotergetriebe Außen- wie auch Innenverzahnungen aufweisen, sollte die Verzahnungsschleifmaschine Innen- und Außenverzahnungen bearbeiten können – und möglich kurze Rüstzeiten aufweisen. Außenverzahnungen in mittleren bis großen Serien werden in vielen Anwendungen wälzgeschliffen, so dass eine Verzahnungsschleifmaschine für die Roboterindustrie idealerweise alle wesentlichen Verzahnungsschleiftechnologien vereint. So wie die VIPER 500 W, die entsprechend eine ideale Maschinenbasis zur Bearbeitung von Roboterverzahnungen darstellt. Einige Kunden der Firma Klingelnberg setzen aber auch eine VIPER 500 K für die Bearbeitung von Zykloidverzahnungen ein. Abbildung 3 zeigt die Bearbeitung von Komponenten eines Exzentergetriebes auf einer solchen VIPER 500 K.

Die Innenverzahnung wird mit dem Innenschleifarm V5 bearbeitet. Durch Verwendung von abrichtbaren Werkzeugen können Zahnweite und Profil punktwise korrigiert werden. Bei nicht-evolventischem Zahnprofil – wie bei Zykloidverzahnungen – wird die Zahnform über die Funktion „Freiprofile“ in Gear Production editiert. Diese Funktion

ist für Außen- und für Innenverzahnungen verfügbar.

Robotergetriebe sollen möglichst spielfrei sein. Die Exzentergetriebe müssen, damit diese funktionieren, minimale Form- und Lagetoleranzen erfüllen. Auf Zeichnungen der Kurvenscheiben ist daher die Position der Stegbohrungen zur Verzahnung toleriert. Die Qualität der Kurvenscheibe hängt von der Verzahnungsgeometrie selbst und der Lage der Verzahnung bezogen auf die Stegbohrung ab. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Bemaßung einer Kurvenscheibenpaarung.

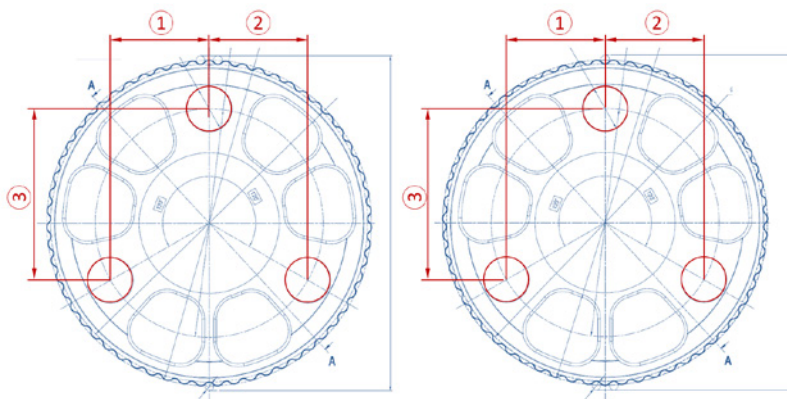


Abbildung 4: Zeichnung einer Zykloidenverzahnung

Die Bearbeitung von Kurvenscheiben stellt Anforderungen an die Ausrichtung der Kurvenscheiben auf einer Maschine. Es existieren zwei Fertigungsfolgen, die Vor- und Nachteile aufweisen. Die Stegbohrungen werden entweder vor oder nach dem Verzahnungsschleifen bearbeitet. Er

folgt die Bearbeitung der Zykloidverzahnung im Anschluss an die Bearbeitung der Bohrungen, muss das Bauteil mit Bezug zu den Stegbohrungen gespannt werden. Die Verzahnung wird dann immer relativ zum Tisch geschliffen. Das erfordert, dass beim Einrichten des Prozesses die Verzahnung eines Bauteils vermessen und die Relativlage der Stegbohrungen zur Verzahnung korrigiert werden muss. Sofern die Vorrichtung nicht demontiert wird, kann die Verzahnung wiederholt geschliffen werden. Alternativ lässt sich zuerst die Verzahnung in das Bauteil einbringen, um dann im Anschluss die Stegbohrungen relativ zur Verzahnung zu bearbeiten. In diesem Fall ist das Spannmittel zur Bearbeitung der Verzahnung auf der VIPER 500 weniger aufwändig gestaltet. Dennoch muss auch hier eine Positionierung der Stegbohrungen, wenn auch mit größeren Toleranzen, relativ zur Verzahnung gewährleistet sein.

Komplettmessung auf einem Präzisionsmessgerät – direkt in der Produktion

Neben der Verzahnungsmessung deckt ein Präzisionsmesszentrum von Klingelberg eine Vielzahl weiterer Messaufgaben ab. So ist es möglich, alle an einer Zykloidenverzahnung anfallenden Messaufgaben auf einem Messgerät in einer Aufspannung effizient durchzuführen. In den vorhergehenden Abschnitten wurden typische Zykloidenverzahnungen vorgestellt, die neben der Verzahnung mehrere Formelemente enthalten, die für die Funktion relevant sind und damit gemessen werden müssen. Hinzu kommen Optionen wie zum Beispiel die Rauheitsmessung, wodurch sich die Investition in weitere Geräte im Messraum einsparen lässt.

Im Zuge der Digitalisierung in der Produktion werden auch die Werkzeugmaschinen mit den Messmaschinen vernetzt, was den Closed Loop für Zykloidenverzahnungen ermöglicht. Die Werkzeugmaschine fertigt im ersten Schritt gegen die Soll-daten der Verzahnung. Die Messmaschine misst gegen die Soll-daten und meldet die Ist-Daten und die Abweichungen digital zurück an die Werkzeugmaschine. So kann der Bearbeitungsprozess optimiert werden, um die Abweichungen von der Soll-Geometrie zu minimieren. Die Genauigkeit und die Qualität der Zykloidenverzahnungen lassen sich darüber signifikant steigern.

Die Präzisionsmesszentren von Klingelberg sind für den direkten Einsatz in der Produktion entwickelt. Klingelberg setzt dabei die Erfahrung aus der Werkzeugmaschinenentwicklung ein und verbindet diese mit der Kompetenz in der Präzisionsmesstechnik. Die wesentlichen Erfolgsfaktoren sind die Robustheit der Maschine in Verbindung mit einer präzise arbeitenden Temperaturkompensation.

Das Produktionsumfeld ist geprägt von Verschmutzung und Erschütterungen durch Produktionsmaschinen und Transportsysteme. Bei den Präzisionsmesszentren von Klingelberg ist die hochgenaue Rundtischlagerung als Wälzlager ausgeführt und damit im Vergleich zu luftgelagerten Systemen sehr unempfindlich gegen Verschmutzung. Die Messsysteme sind entsprechend gut ge-

schützt – aber gleichzeitig auch leicht zugänglich, um sie im Rahmen einer Wartung bei Bedarf mit reinigen zu können. Im Ganzen ergibt sich ein robustes System für das Fertigungsumfeld. Hinzu kommt die Möglichkeit, die Maschinen mit einer angepassten Schwingungsisolierung auszustatten, um sicherzustellen, dass sich Erschütterungen und Vibrationen aus dem Umfeld nicht auf das Messergebnis auswirken.

Ein weiteres Merkmal des Produktionsumfeldes sind Temperaturschwankungen. Alle Präzisionsmesszentren von Klingelberg haben ein Maschinenbett aus präzisiertem Stahlguss. Damit ist sichergestellt, dass alle Komponenten der Maschine und das zu messende Bauteil aus Stahl einen identischen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen. Die Temperaturen von Werkstück, Maschine und Umgebung werden durch Sensoren erfasst. Mithilfe eines Temperaturmodells lassen sich diese Einflüsse direkt kompensieren. Dieses Temperaturmodell wird regelmäßig in einem Temperatur-Labor bei Klingelberg überprüft. Dabei werden reale, in Produktionshallen gemessene Temperaturverläufe vorgegeben und so die Praxistauglichkeit des Systems sichergestellt.

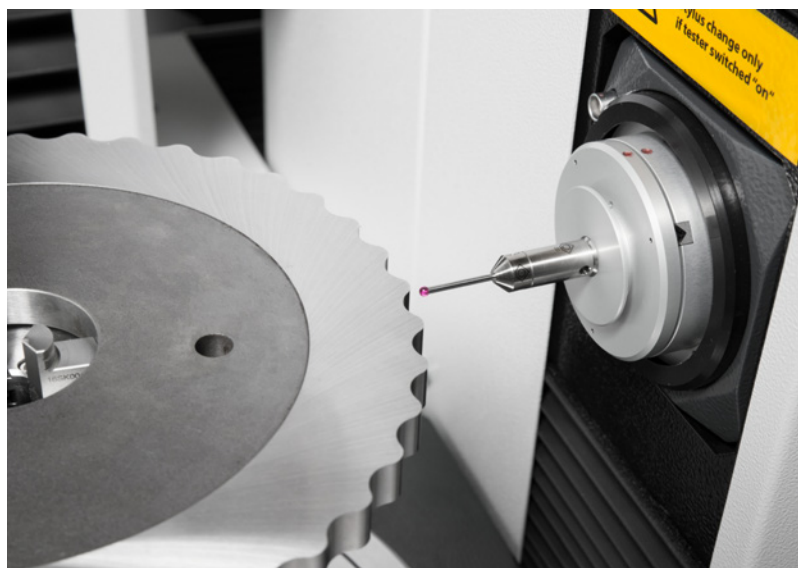


Abbildung 5: Messen einer Zykloidenverzahnung auf einer Klingelberg P 40



Dr.-Ing. Christof Gorgels
Geschäftsbereichsleiter
Präzisionsmesszentren

KLINGELNBERG GmbH
Peterstraße 45
42499 Hückeswagen, Deutschland
Fon: +49 2192 81-0
info@klingelberg.com
www.klingelberg.com