



## Vorsprung durch Messtechnik

### Inhalt:

- Industrie mit Rückenwind  
...Seite 1
- Neuartige Getriebe-  
konstruktionen  
...Seite 2
- Messen unter veränderten  
Vorzeichen  
...Seite 3
- Moderne Messtechnik als  
wichtiger Teil der Weiter-  
entwicklung  
...Seite 5

**Diese Industrie hat Rückenwind:** Die Windkraftbranche wächst rasant. Gründe dafür gibt es viele: Ehrgeizige Klimaziele, notwendige CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen und die aktuelle Atomdebatte sorgen für einen Boom der Branche und damit für eine hohe Dynamik des technologischen Fortschritts.

Moderne Messtechnik zur Steigerung der Effizienz in der Qualitätssicherung ist ein wichtiger Teil dieser Dynamik. Optimale Bauteilqualität bedeutet einen Wettbewerbsvorteil, der es den Windkraftgetriebeherstellern ermöglicht, an der Spitze der Entwicklung zu sein.

Die Industrie hat die Leistung der Windkraftanlagen in den vergangenen Jahren deutlich gesteigert – durch die schiere Größe der Anlagen wird dies auch nach außen sichtbar. Ein zentrales Anliegen aller an der Entwicklung beteiligten Unternehmen ist es daher, die Leistungsdichte der einzelnen Komponenten zu erhöhen, um zu vermeiden, dass die Abmessungen und das Gewicht der Gondel im gleichen Maße wie die Leistung der Anlage zunehmen.

Die meisten Windkraftanlagen arbeiten mit einem Getriebe, um die relativ geringe Drehzahl des Rotors über mehrere Übersetzungsstufen auf eine für den Generator passende Drehzahl von ca. 1.500 min<sup>-1</sup> zu übertragen. Dazu werden typischerweise mehrere Planetengetriebestufen hintereinander angeordnet. Mit den hohen zu übertragenden Leistungen sind auch die Abmessungen der Getriebe gestiegen, sodass die verwendeten Innenverzahnungen teilweise einen Durchmesser von zwei Metern deutlich übersteigen.

Das Getriebe ist somit eine der Schlüsselkomponenten, an der durch geschickte Auslegung aller Bauteile nicht nur der Wirkungsgrad, der Verschleiß und die Geräuschemission optimiert, sondern auch die Größe und das Gewicht der Gondel verringert werden können.

**Neuartige Getriebekonstruktionen**

Deshalb wird schon bei der Entwicklung gezielt auf bestimmte Komponenten verzichtet, um ein möglichst kompaktes und leichtes Getriebe (Bild 1) zu erhalten. Dies ist möglich, indem einzelne Bauteile verschiedene Aufgaben gleichzeitig übernehmen, die in konventionellen Konstruktionen auf mehrere Bauteile verteilt waren.

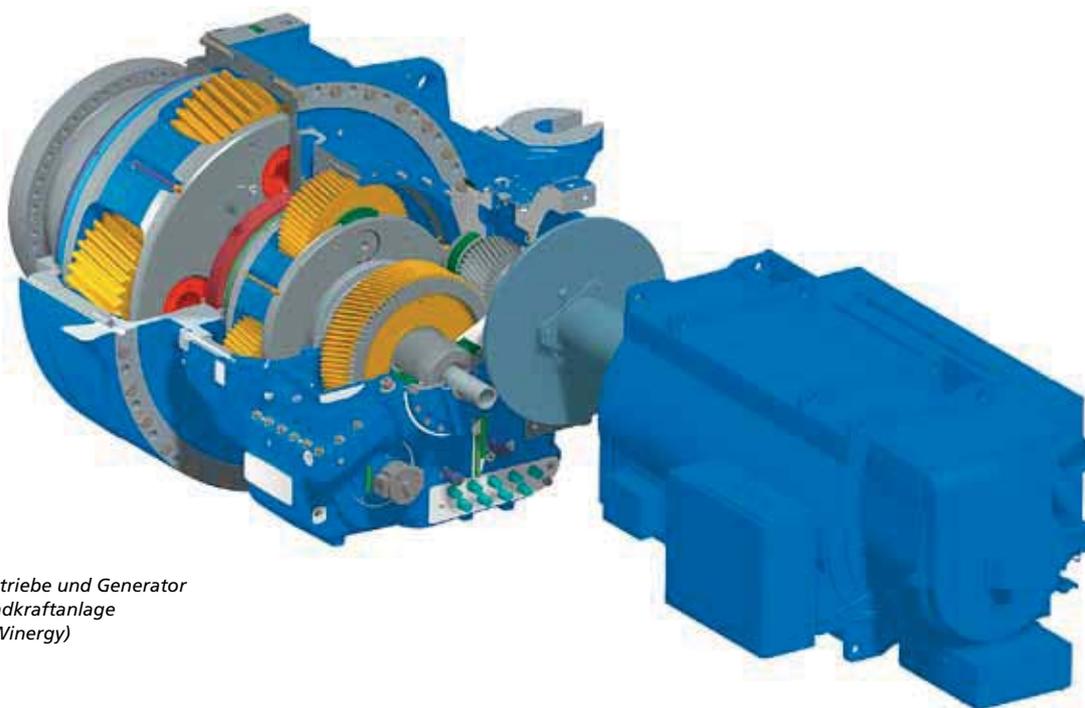


Bild 1: Getriebe und Generator einer Windkraftanlage (Quelle: Winergy)

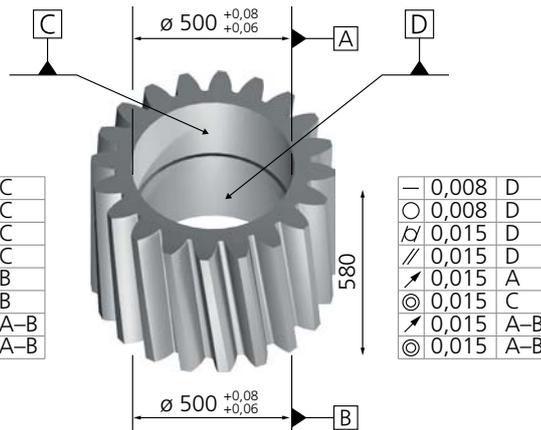


Bild 2: Verzahnungsbauteil (Planetenrad) aus einem Windkraftgetriebe mit Toleranzen

Der Innenverzahnungsring der Planetenstufen ist beispielsweise zugleich tragendes Teil und Außenhaut des Getriebes – auf Maschinenträger und Gehäuse kann somit verzichtet werden. Zusätzlich wird die erste von zwei Getriebestufen direkt in das Hauptlager integriert.

Die Planetenlagerung wiederum wird in das Planetenrad verlagert. Anstelle von separaten äußeren Lagerringen an den Planetenrädern werden entsprechend ausgeformte Laufflächen in das Verzahnungsbauteil eingeschliffen. Die Wälzkörper der Lagerung laufen somit direkt in der Bohrung der Verzahnung. Die Bauteile werden dadurch nicht nur kompakter, es entstehen auch Vorteile bei der Montage, Fehlerquellen werden reduziert und die Rundlaufgenauigkeit wird erhöht.



Bild 3: Messzentrum P 150 W

Die Anforderungen an die verbleibenden Bauteile wachsen allerdings deutlich – neue Fertigungsverfahren werden erforderlich. Dadurch, dass in der Bohrung der Planetenräder die Wälzkörper der Lagerung laufen, werden an den Laufflächen Schleifbearbeitungen in Lagerqualität benötigt. Die Geometrie dieser Lagerflächen ist mitunter relativ komplex und mit sehr geringen Toleranzen versehen. Diese werden am Beispiel eines solchen Planetenrads mit integrierten Lagerlauf- flächen deutlich (Bild 2).

**Messen unter veränderten Vorzeichen**

Aufgrund der veränderten Konstruktion sind nicht nur für die Fertigung, sondern auch für die Qualitätssicherung dieser Bauteile neue Verfahren erforderlich.

Um alle für die Funktion der – nun mit mehreren Aufga- ben ausgestatteten – Bauteile relevanten Parameter zu prü- fen, müssen neben der vollständigen Verzahnungsmessung auch Maß-, Form- und Lagemessungen durchgeführt werden. Insbesondere die Formmessungen an den Lagerflächen sind dabei sehr anspruchsvoll und stellen hohe Anforderungen an die verwendete Mess- technik.

Die Lösung, um die Gesamtmesszeit für alle Messungen inklusive Rüstzeit zu mi- nimieren, ist eine automatisch ablaufende Komplettmessung auf nur einem Messgerät.

Hierzu entwickelte Klingelberg ausgehend von den Maschinen der P-Baureihe speziell für die Anforderungen der Windkraft-

getriebekomponenten die P 150 W. Anders als bei den bekannten P-Maschinen ist das neue 3D-Tastsystem an einem senkrecht angeordneten Ausleger angebracht, sodass ein

Eintauchen in Bohrungen möglich ist (Bild 3). Somit sind sowohl Außenverzahnungen als auch Innenverzahnungen gleichermaßen mit kurzen Tastgestängen messbar. Diese Anord- nung bietet außerdem besondere Vorteile für Formmessungen in Bohrungen.

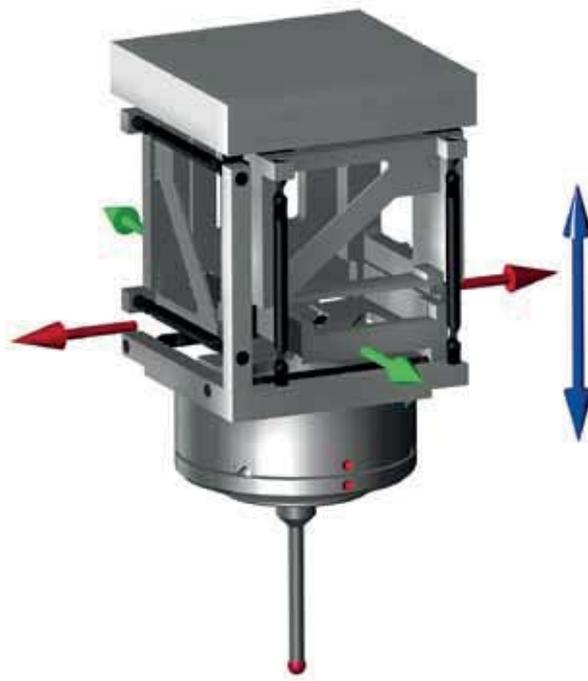


Bild 5: Schematische Darstellung des Klingelberg-3D-Tastsystems mit paralleler Kinematik

Messende Tastsysteme von KMG sind üblicherweise so auf- gebaut, dass die Kinematik für die drei Koordinatenrichtun- gen physikalisch hintereinander angeordnet ist. Diese Ausführ- ung mit serieller Kinematik hat den entscheidenden Nachteil, dass die bewegte Masse in den drei Koordinatenrichtungen unterschiedlich und darüber hinaus je nach Richtung sehr groß sein kann. Zur Reduzierung der Baugröße werden diese Tastsysteme ineinander verschachtelt aufgebaut. Dies hat aber keinen Einfluss auf den Nachteil der seriellen Kinematik. In Bild 4 ist ein solches 3D-Tastsystem vereinfacht ohne Ver- schachtelung dargestellt.



Bild 4: Schematische Darstellung eines konventionellen 3D-Tast- systems mit serieller Kinematik

Bei der Formmessung werden bekanntermaßen besondere Anforderungen an die Dynamik des Tastsystems gestellt. Dies gilt ebenso für die Ver- zahnungsmessung, die prinzipiell eine Kombina- tion aus Form- und 3D-Messung ist.

Aus diesem Grund verfügen die Klingelberg 3D- Tastsysteme (Bild 5) grundsätzlich über eine ein- zigartige, patentierte Parallelkinematik mit drei ineinander verschachtelten, aber physikalisch ne- beneinander angeordneten Koordinatenrichtun- gen. Dieser Aufbau schafft entscheidende Vor- teile: Die bewegte Masse ist nicht nur in allen

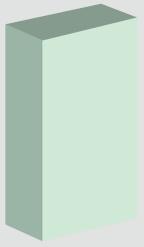
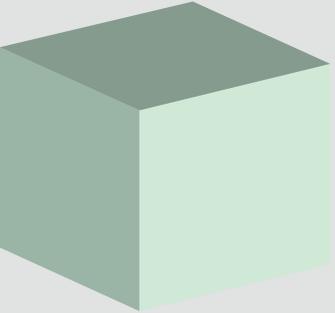
	P 150 W	KMG
Volu- mengrö- ße in mm (HxTxB)	1.500 x 600 x 800	1.500 x 1.500 x 1.500
		

Tabelle: Schematischer Vergleich der kartesischen Messvolumina:  
Das geringere Volumen bei der P 150 W ermöglicht eine sehr hohe Grundgenauigkeit.

Richtungen identisch, sondern vor allem deutlich geringer als bei herkömmlich aufgebauten 3D-Tastsystemen. Dadurch eignen sich die Tastsysteme der Klingelberg P-Baureihe neben der Verzahnungsmessung und der allgemeinen 3D-Messung ebenfalls für hochauflösende Formmessaufgaben.

Eine weitere Voraussetzung für Formmessungen an rotationssymmetrischen Bauteilen ist die Verwendung einer hochgenauen Drehlagerung. Die Lagerung der P 150 W beispielsweise besitzt eine statische Belastbarkeit von 20 Tonnen und bietet dabei eine Rundlaufgenauigkeit, die unter 0,5 Mikrometer liegt. Die Entwicklung sowie die Fertigung und Integration dieser Lagerung ist eine Kernkompetenz von Klingelberg. Eine Lagerung mit dieser Rundlaufqualität und der Belastbarkeit von 20 Tonnen ist am Markt nicht erhältlich.

Bei einem Vergleich (siehe Tabelle oben) des konzeptionellen Aufbaus der P 150 W mit einem herkömmlichen KMG wird deutlich, welche Vorteile sich durch den Aufbau der P150W mit drei linearen Präzisionsachsen und einer hochgenauen Drehachse ergeben.

Bei der P 150 W ist das durch die drei Linearachsen aufgebaute kartesische Messvolumen bewusst deutlich kleiner (Bild 6) als bei einem KMG. Dadurch ist in diesem Messvolumen eine sehr hohe Grundgenauigkeit erreichbar, die durch ein speziell für diesen Maschinenaufbau entwickeltes, patentiertes Kompensationsverfahren zusätzlich verbessert wird.

Durch die Kombination dieses somit geometrisch perfekt zu beherrschenden kartesischen Messvolumens und der hochgenauen Drehachse entsteht in der Summe ein deutlich größeres, zylinderförmiges Messvolumen (Bild 7) mit einer vergleichbar geringen Messunsicherheit.

Bei einem herkömmlich aufgebauten KMG ist im Gegensatz dazu das gesamte, relativ große Messvolumen zu kompensieren (Bild 8). Dies ist physikalisch bedingt schwer beherrschbar, sehr aufwendig und muss in gewissen Abständen wiederholt werden.



Bild 6: Kartesisches Messvolumen P 150 W

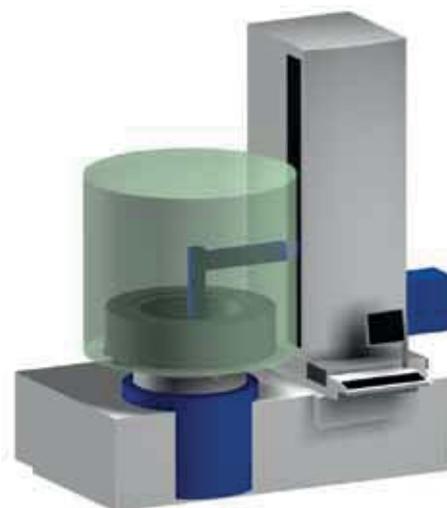


Bild 7: Gesamtes Messvolumen P 150 W

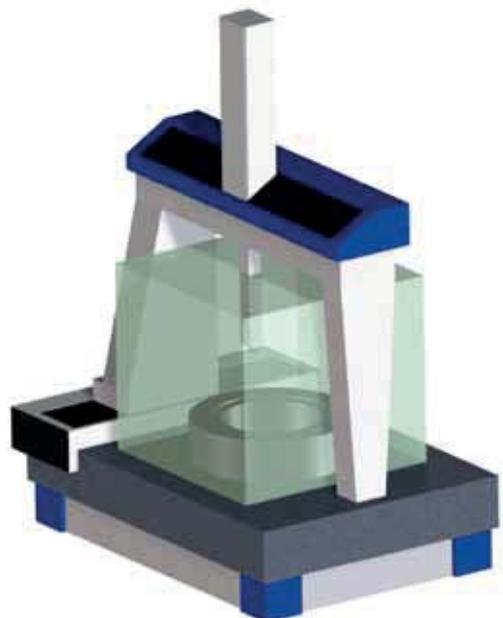


Bild 8: Kartesisches Messvolumen Koordinatenmessgerät



*Bild 9: Messung eines Sonnenrads aus einem Windkraftgetriebe auf einer P 150 W*

Für die Kreisformmessung in der Bohrung des oben beschriebenen Planetenrads muss bei einem solchen KMG der Kreis aus einer kombinierten Bewegung zweier Linearachsen erzeugt werden. Dabei wird ein relativ großer Bereich des Messvolumens von beiden Achsen durchfahren, mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Messgenauigkeit. Diese Messstrategie eignet sich zwar für eine Koordinatenmessung, allerdings nicht für hochgenaue Kreisformmessungen.

**Moderne Messtechnik als wichtiger Teil der Weiterentwicklung**

Effiziente und moderne Messmaschinen sind ein entscheidender Teil der Dynamik für die aktuelle und weitere Entwicklung in der Windkraftbranche. Sie unterstützen die Unternehmen, die dazu beitragen, dass der Rückenwind weiter anhält –

damit Klimaziele erreicht, Emissionen reduziert und eine Alternative zur Atomkraft sowie zu CO<sub>2</sub>-intensiven Energien gestärkt werden.



Dipl.-Ing. Georg Mies  
Leiter Entwicklung Messtechnologie