

Schlussbericht

gemäß Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

| | |
|---|---|
| Zuwendungsempfänger: Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) | Förderkennzeichen: 0325490A |
| Vorhabenbezeichnung: Erhöhung der Verfügbarkeit und Qualitätsoptimierung von Triebstrangkomponenten und Großverzahnungen für Windenergieanlagen (EVeQT) | |
| Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2012 - 31.01.2017 | |

Teilprojekt:

Entwicklung von Messstrategien für die Prüfung von Windenergieanlagen-Komponenten

Autoren:

Jan F. Westerkamp

Dirk Stöbener

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325490A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

| | |
|---|----|
| I. Kurze Darstellung..... | 2 |
| 1. Aufgabenstellung..... | 2 |
| 2. Voraussetzungen | 3 |
| 3. Planung und Ablauf des Vorhabens | 4 |
| 4. Stand der Kenntnisse, an den angeknüpft wurde | 5 |
| 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... | 8 |
| II. Eingehende Darstellung..... | 9 |
| 1. Zuwendungsverwendung und erzielte Ergebnisse..... | 9 |
| 1.1. Themenbereich Rückführbarkeit von Messdaten | 9 |
| 1.2. Themenbereich Mess- und Auswerteroutinen..... | 13 |
| 1.3. Prozessoptimierung der Verzahnungsherstellung..... | 17 |
| 1.4. Themenbereich zusätzliche, berührungslose Sensorik am KMG..... | 19 |
| 2. Zahlenmäßiger Nachweis | 23 |
| 3. Notwendigkeit der geleisteten Arbeit | 24 |
| 4. Verwertbarkeit | 26 |
| 4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten..... | 26 |
| 4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten | 27 |
| 4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit | 29 |
| 5. Fortschritt anderer Stellen | 30 |
| 6. Literaturverzeichnis | 30 |

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Windenergieanlagen (WEA) unterliegen in ihrem Betrieb hohen dynamischen Lasten durch die wetterbedingt zwischen lastfrei und Vollast wechselnden Betriebszustände und die zusätzlich auftretenden Belastungen durch zeitliche und örtliche Windgeschwindigkeitsänderungen (Böen, höhenabhängige Strömungsänderungen). Aufgrund dieser Belastungen weisen ihre Komponenten im Vergleich zu anderen Anlagen gleicher Dimension (z. B. Schiffsdiesel, Zementmühlen) hohe Ausfallraten auf. Insbesondere für größere WEA wird das ursprüngliche Ziel einer Betriebsdauer von 20 Jahren bisher zu selten erreicht. Ein größerer Teil dieser Ausfälle betrifft sowohl Getriebe als auch Lager des Triebstrangs. Um zielgerichtete Fortschritte bei der Konstruktion, der Fertigung und der Werkstoffwahl dieser Komponenten erzielen zu können, sind umfangreichere und aussagekräftigere Messdaten über die Komponenten erforderlich.

Die Aufgabe dieses Projekts war daher die nachhaltige Sicherstellung zuverlässiger Messmöglichkeiten von Großverzahnungen für WEA. Damit sollten die oben erwähnten Fortschritte ermöglicht und daraus folgend eine Erhöhung der Verfügbarkeit der WEA sowie eine Senkung der spezifischen Kosten erzielt werden.

Für die Sicherstellung einer zuverlässigen Messung in der Fertigung von Großverzahnungen mussten verschiedene Themenbereiche bearbeitet werden:

- Rückführbarkeit der geometrischen Messergebnisse auf die SI-Basiseinheiten durch Realisierung eines bislang nicht existierenden Großverzahnungsnormals mit einem Durchmesser von 2000 mm und durch Entwicklung von angepassten Kalibrierstrategien. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für eine quantitative Beurteilung der Verzahnungsgeometrie, da nur mit rückgeführten Ergebnissen eine sichere Beurteilung der Einhaltung von Toleranzvorgaben für die Verzahnungen erfolgen kann. Um diese Rückführung zu ermöglichen, ist der Aufbau einer vollständigen Kalibrierkette beginnend bei dem deutschen Metrologieinstitut, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), über akkreditierte Laboratorien unter der Obhut der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) bis hinein in die Industrie erforderlich.
- Entwicklung neuer, flächenhafter Mess- und Auswertestrategien zur möglichst vollständigen Erfassung der sehr breiten Funktionsflächen von Großverzahnungen hinsichtlich der Geometrie und der Werkstoffeigenschaften, um umfangreichere Erkenntnisse über den Zustand der Zahnflanken erzielen zu können. Im Zuge der Bearbeitung von Auswerteroutinen wurde auch geprüft, in wie weit sich die erzielten Mess- und Auswertungsergebnisse für Regelungsansätze zur Optimierung von Fertigungsprozessen verwenden lassen, um durch verbesserte Bauteile eine höhere Verfügbarkeit zu realisieren.

- Konzipierung und Erprobung von optischen Sensoren zur berührungslosen Bestimmung von Oberflächen-Eigenschaften (z.B. Rauheit, Rissprüfung) und zur Bestimmung von Randzoneneigenschaften (z. B. Härtebestimmung, Detektion von thermischen Schädigungen). Die Messungen mit diesen Sensoren sollen gleichzeitig neben der eigentlichen Geometriemessung erfolgen und so zusätzliche Informationen über die Qualität des Bauteils liefern, ohne die Messzeit zu erhöhen.

2. Voraussetzungen

Das Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) gehört zum Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen. Es hat 25 Jahre Erfahrung im Bereich der optischen und taktilen Messtechnik. Zwei der Forschungsschwerpunkte liegen in der optischen Randzonencharakterisierung von Werkstücken und der Verzahnungsmess- und Auswertetechnik.

Zur Ausstattung des BIMAQ gehören neben anderen Laborräumen insbesondere ein klimatisierter Messraum mit einer Grundfläche von ca. 160 m² sowie verschiedene taktile und berührungslose Messgeräte. Diese Ressourcen kamen für die Untersuchungen zur Entwicklung von zusätzlichen Messverfahren für Verzahnungen im Projekt zum Einsatz.

Die Fertigung von Prototypen oder einzelnen Bauteilen der entwickelten Sensoren erfolgte in der institutseigenen Fertigungshalle mit mehreren Fertigungsmaschinen und einer integrierten Werkstatt.

Seit August 2009 wurde im BIMAQ das vom BMU geförderte „Inside-Sensoring Labor für Großverzahnungen“ (Förderkennzeichen: 0325153) aufgebaut. Es beinhaltet insbesondere Laboreinrichtungen für die optische Messtechnik im Bereich der Windenergie. Zeitgleich führte das BIMAQ das ebenfalls vom BMU geförderte Projekt „Labor für Großverzahnungsmessungen“ (Förderkennzeichen: 0325140) durch. Im Laufe dieses Projektes wurde ein Großverzahnungsmessgerät der Firma Leitz vom Typ PMM-F 30.20.7 angeschafft und in einem für das Gerät neu erstellten, etwas kleineren, klimatisierten Messraum aufgebaut. Das Messgerät ermöglicht die Untersuchung von Zahnrädern bis zu einem Durchmesser von 3000 mm und wurde für die Arbeiten an großen Verzahnungen (Testzahnräder und Ringnormal) im Projekt eingesetzt.

Die Universität Bremen ist mit ihren beiden Fachbereichen Produktionstechnik und Elektrotechnik Mitglied im ForWind-Verbund. In ihm sind die Kompetenzen und Forschungsaktivitäten der beiden Fachbereiche hinsichtlich der Windenergie mit denen weiterer Fachdisziplinen der Universitäten Hannover und Oldenburg gebündelt. Über diese Mitgliedschaft bestand die Möglichkeit, bei Bedarf einfach und schnell auf erforderliche Kompetenzen der Partner zurückgreifen zu können. Das BIMAQ ist zudem Mitglied im WindPowerCluster, in welchem über 100 Partner aus dem Bereich der Windenergie ihre Kompetenzen gebündelt haben und arbeitet eng mit der Windenergie Agentur Bremerhaven (WAB e.V.) zusammen.

Der ehemalige Leiter des BIMAQ (Prof. G. Goch) wirkte in verschiedenen nationalen und internationalen Vereinigungen auf dem Feld der Messtechnik und Sensorik mit:

- Arbeitskreis der Hochschullehrer für Messtechnik e.V. - AHMT
- Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V. - WLT
- Gesellschaft für Qualitätswissenschaften e.V. - GQW
- Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik - WGP
- Internationale Akademie der Produktionstechnik - CIRP
- American Society for Precision Engineering -ASPE
- Society of Manufacturing Engineers - SME

Über diese Mitgliedschaften gewährleistete er die Einbindung des national und international verfügbaren Standes der Forschung in die Projektarbeiten.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten im Vorhaben gliederten sich in acht Hauptarbeitspakete, in denen die unterschiedlichen (oben genannten) Themenbereiche in Unterpaketen bearbeitet wurden. Zwei der Hauptarbeitspakete (AP 0: Projektkoordination und AP 2: Gremienarbeit) wurden kontinuierlich während der gesamten Projektlaufzeit bearbeitet. Sie dienten dazu, die Projektergebnisse über z.B. Vorträge der Öffentlichkeit zugänglich zu machen und in Gremien zu präsentieren. Innerhalb dieser Arbeitspakete erfolgten auch die Arbeiten für die Publikation der Projektergebnisse in Zeitschriften und Tagungsbänden. Die erstellten Publikationen sind im Kapitel II.6 aufgelistet. Im Arbeitspaket 5 wurde das für die Untersuchungen erforderliche Prüflabor für Großverzahnungen über einen größeren Teil der Projektlaufzeit aufgebaut.

Die verbleibenden fünf Hauptarbeitspakete:

- AP 1: Konzeptphase,
- AP 3: Voruntersuchungen,
- AP 4: Entwicklung,
- AP 6: Demonstration und Test,
- AP 7: Ergebnisumsetzung bzgl. Großverzahnungen

sind für jeden Themenbereich im Wesentlichen auf eine sequentielle Bearbeitung ausgelegt gewesen. Diese Planung ließ sich jedoch nicht für jeden Themenbereich vollständig umsetzen, da sich während der Projektlaufzeit Umstände ergaben, die eine Anpassung des Projektplans erforderten. Hierzu wurden während der Projektlaufzeit ein umfangreicherer Änderungsantrag und nachfolgend ein Antrag auf kostenneutrale Laufzeitverlängerung gestellt, wodurch ausreichend Zeit zur Verfügung stand, die meisten Schwierigkeiten bei der Projektbearbeitung zu beheben. Die Details der einzelnen Umstände sind in den genannten Anträgen, den Zwischenberichten und teilweise dem Erfolgskontrollbericht aufgelistet worden.

4. Stand der Kenntnisse, an den angeknüpft wurde

Trotz ihrer hohen wirtschaftlichen Bedeutung ist die Messung großer Verzahnungen heutzutage immer noch eine Herausforderung. Eine qualifizierte Aussage zu der erreichbaren aufgabenspezifischen Messunsicherheit, wie sie von internationalen Normen und Richtlinien zur Quantifizierung der Güte einer Messung gefordert wird, konnte bislang nicht gegeben werden.

Es existieren zwar Geräte zur Messung großer Zahnräder mit Durchmessern von bis zu 3.800 mm, Zahnhöhen bis zu 2.000 mm und einem Gewicht von bis zu 20.000 kg und darüber hinaus, allerdings ist die Frage der Zuverlässigkeit dieser Messungen weitgehend ungeklärt. Hauptursache hierfür sind die fehlenden Rückführungsmöglichkeiten der Messung auf SI-Einheiten. Weitere Herausforderungen ergeben sich aus der Handhabung, der Werkstückdeformation aufgrund von Eigengewicht sowie der Temperaturstabilität der Verzahnungen. Diese Einflüsse waren bislang mangels zuverlässiger Messtechnik nicht eindeutig zu identifizieren.

Der große Handlungsbedarf zeigte sich insbesondere in den häufigen Nachfragen der Industrie nach eindeutigen Empfehlungen für Messgeräte. In der Industrie ist bekannt, dass bei Messungen der Flankenlinien-Winkelabweichung von Großverzahnungen auf verschiedenen Messgeräten Unterschiede von bis zu 100 µm zwischen den Messergebnissen auftreten. Verständlicherweise ist hier der Wunsch nach einer Beurteilung dieser Abweichungen vorhanden. Dies ist jedoch nicht möglich, da die Istwerte der jeweiligen Verzahnung nicht zweifelsfrei bekannt sind.

Insbesondere für in WEA-Getrieben eingesetzte Großverzahnungen existierten bislang keine geeigneten Normale und Kalibrierstrategien, so dass Aussagen über die erreichbaren Messunsicherheiten nur geschätzt werden konnten.

Im Jahr 2010 wurde von der PTB im Rahmen eines EU-Projektes erstmals ein Prototyp für Großverzahnungsnormale mit einem Durchmesser von 1.000 mm entwickelt [EU, Här10]. Die PTB verfügt als einziges Metrologieinstitut weltweit über ein Normal dieser Größenordnung. Allerdings kann mit dem Normal nur der untere Bereich der in WEAs eingesetzten Zahnräder abgedeckt werden. Damit stellte das Normal zunächst nur einen ersten Schritt hin zur Rückführung von Großverzahnungen dar.

Außerhalb des inzwischen von der PTB abgedeckten Bereiches wird weltweit von keinem metrologischen Staatsinstitut eine Kalibrierung von Verzahnungsnormalen angeboten. Damit ist eine Konformitätsaussage bezüglich der Einhaltung von Toleranzen entsprechend der ISO 14253-1 bei der Fertigung von Großgetrieben nicht möglich.

Weitere Ansätze zur Verkörperung und Kalibrierung von Zahnradnormalen außerhalb des abgedeckten Durchmesserbereiches sind nur aus der Forschung und Entwicklung für Mikroverzahnungen bekannt [DFG01, BMBF01]. Sie konzentrieren sich auf so genannte Ersatznormale, bei denen beispielsweise das Evolventenprofil näherungsweise durch eine Kugel verkörpert wird [Kub05, Fle07, Goc03].

Ein Kalibrierservice zur Rückführung von Großverzahnungen kann nicht durch die PTB geleistet werden. Es entspricht der politischen Zielsetzung der PTB, Kalibrierdienstleistungen weitest möglich über akkreditierte Laboratorien durchführen zu lassen und über Beratung und Begutachtungen die Arbeiten der DAkKS zu unterstützen. Für den Bereich der Großverzahnungen existierte noch keine Grundlage für den Aufbau eines Akkreditierungsservices.

Der Standard bei Messstrategien und Auswertelgorithmen liegt aktuell bei linienhaften Messungen und ist über diverse Normen und Richtlinien definiert (ISO 1328, DIN EN ISO 14253, DIN ISO 21771, DIN 21772 + 21773, VDI 2612). Im Bereich der flächenhaften Auswertung, welche eine präzisere und größere Informationsmenge erwarten lässt, sind Ansätze von [Lot06, Goc02] erarbeitet worden. Vereinzelt sind sie in die Software von Messgeräte-Herstellern integriert. Die entsprechenden Algorithmen waren jedoch nicht in die Normung eingeflossen. Darüber hinaus existierten weder eine geometrische noch eine numerische Rückführung zur sicheren Beurteilung von Flankenflächen.

Im Bereich der Sensorik zur Beurteilung der Randzone von Großverzahnungen existierten keine verbreiteten Verfahren auf der Basis optischer Methoden. Es ist immer noch Standard, die Randzone des Bauteils mittels Nitalätzung und Sichtprüfung hinsichtlich Schleifbrandbildung zu prüfen. Für die Bestimmung der Rauheit der Verzahnungsoberflächen kamen in der Regel mobile, taktile Messsysteme zum Einsatz, welche von Hand positioniert werden. Sie liefern normkonforme Messdaten, sind aber in der Anwendung vergleichsweise langsam und nicht für den parallelen Messeinsatz an einem Koordinatenmessgerät geeignet. Für die im Projekt vorgesehenen optischen Verfahren zur Randzonencharakterisierung waren keine publizierten Ergebnisse zum Einsatz an Großverzahnungen zu ermitteln und auch Normale für die optische und thermographische Messtechnik existierten nicht.

Angabe der verwendeten Fachliteratur:

- ISO 1328-1 Zylinderräder - ISO-Toleranzsystem - Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken, Beuth Verlag, 2013
- DIN 4150-1 Erschütterungen im Bauwesen - Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Beuth Verlag, 2001
- DIN EN ISO 10360-2, -3 Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG), Beuth Verlag, 2010, 2000
- DIN EN ISO 14253-1,-2,-3 Prüfung von Werkstücken durch Messen, Beuth Verlag, 2013, 2011, 2011
- DIN EN ISO/IEC 17025 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, Beuth Verlag, 2005
- DIN ISO 21771 Zahnräder - Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung - Begriffe und Geometrie, Beuth Verlag 2014
- DIN 21772 +21773 Zahnräder - Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung, Beuth Verlag, 2012, 2014

| | |
|------------------|---|
| VDI 2062-1 | Schwingungsisolierung - Begriffe und Methoden, Beuth Verlag, 2011 |
| VDI 2083-1, -5.1 | Reinraumtechnik, Beuth Verlag, 2013, 2007 |
| VDI 2610 | Format für den Austausch von Verzahnungsdaten, Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format) - Definition, Beuth Verlag, 2014 |
| VDI 2612-1 | Messen und Prüfen von Verzahnungen - Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil, Beuth Verlag, 2016 |
| VDI 2612-5 | Messen und Prüfen von Verzahnungen - Rauheitsmessung an Zylinder- und Kegelrädern mit dem Tastschnittverfahren, Beuth Verlag, 2015 |
| VDI 2617-2.1 | Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-2 zur Messung von Längenmaßen, Beuth Verlag, 2014 |

Angabe der verwendeten Informations- und Dokumentationsdienste:

- Die verwendeten DIN-Normen und VDI-Richtlinien waren am BIMAQ vorhanden oder wurden über das Patent- und Normenzentrum der Hochschule Bremen beschafft.
- Für die Recherche erforderliche Publikationen wurden über die Universitätsbibliothek oder über von der Universität finanzierte Zugänge zu Online-Repositories (z. B. sciencedirect, springerlink) beschafft. Ergänzende Recherchen insbesondere für die eigenen Publikationen erfolgten im „web of science“.

Angabe der zitierten Literatur:

- [BMB01] BMBF, Projektträger VDI/VDE GmbH, Verbundprojekt MODUS, Förderkennzeichen 16 SV 1881: Modulares Multisensorsystem für die 3D-Höchstpräzisionsvermessung von Mikroteilen.
- [DFG01] DFG Schwerpunktprogramm 1159: New Strategies for Measurement and Test Techniques for Production of Microsystems and Nanostructures.
- [EU] www.euramet.org; European Metrology Research Programm (EMRP), iMera Plus; Metrology for New Industrial Measurement Technologies (NIMTech); T3 J 2.2.
- [Fle07] Fleischer, J.; Behrens, I.; Komori, M.; Okamoto, K.; Kubo, A.; Härtig, F.; Dai, G.: A Geometrical Standard for Micro Gears. In: Book of Abstracts with CD-ROM for the 10th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing, 21.-23. März 2007, Erlangen.
- [Goc02] Goch, G.; Günther, A.: Future Gear Metrology Superficial Description and Inspection of Flanks. VDI-Berichte 1665, 2002, S. 751-768.
- [Goc03] Goch, G.: Gear Metrology. Annals of the CIRP 52/II, 2003, S. 659-695.
- [Här10] Härtig, F.; Rost, K.; Goch, G.: Large Gear Material Standard for the Traceability of Gears for Transmission Manufacturing, International Conference on Gears, 2010.

- [Kub05] Kubo, A.; Kondo, K.; Takatsuji, T.; Osawa, S.; Komori, M.; Naoi, K.: Calibration System of Involute Tooth Form Checker Using Ball Artifact. VDI-Berichte 1904, Vol. 1, 2005, S. 505-521.
- [Lot06] Lotze, W.: Zahnradmessungen mit Koordinatenmessgeräten. Sächsisches Digitaldruck Zentrum, Dresden, 3. Auflage 2006, ISBN 3-00-015962-2.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit mit den beiden Projektpartnern Hexagon und PTB wurde mit der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) und dem Fachbereich Fertigungstechnik an der Hochschule Darmstadt (h_da) zusammengearbeitet, welche die Fertigung von kleineren, zerspannten und umgeformten Testzahnradern übernahmen. Darüber hinaus wurden große Testwerkstücke für Untersuchungen am BIMAQ durch die Firma Stelter Zahnradfabrik GmbH und das IWT bereitgestellt.

Die Firma GearSoft hat das BIMAQ in mehreren Gesprächsrunden hinsichtlich der Beurteilung und Vergleichbarkeit von Verzahnungsparametern beraten. Da der im Projekt bearbeitete Themenbereich der Mess- und Auswertestrategien gut zur Zielrichtung des VDI Fachausschusses 3.61 „Verzahnungsmesstechnik“ passt, wurden die Fachausschusssitzungen durch einen der Projektbearbeiter regelmäßig besucht und dazu genutzt, den Themenbereich der Auswertestrategien insbesondere mit den anwesenden Vertretern von Messtechnikanwendern zu diskutieren.

II. Eingehende Darstellung

1. Zuwendungsverwendung und erzielte Ergebnisse

Die Verwendung der Zuwendung erfolgte gemäß den Vorgaben aus den Bewilligungsbescheiden. Die erzielten Ergebnisse sind im Folgenden geordnet nach den bearbeiteten Themenbereichen dargestellt.

1.1. Themenbereich Rückführbarkeit von Messdaten

Um die Einhaltung von Fertigungstoleranzen prüfen zu können, muss der entsprechende Messprozess geprüft und seine Ergebnisse auf die SI-Basiseinheiten rückführbar sein. Um die Rückführbarkeit belegen zu können, sind **kalibrierte Normale** erforderlich, welche bislang für den Bereich der Großverzahnungen > 1 m fehlten. Daher wurde in diesem Vorhaben von der PTB als nationalem Metrologieinstitut ein primäres Großverzahnungsnormal entwickelt (AP 1.2, 3.1, 3.2, 4.12) und mit Unterstützung der anderen Projektpartner kalibriert (AP 4.1, 5.5). Da in diesem Fall keine Vergleichsnormale existierten, wurde das Großverzahnungsnormal von mehreren externen Partnern im Rahmen eines Ringvergleichs (AP 6.1) gemessen, um durch einen Ergebnisvergleich sicherzustellen, dass die kalibrierten Werte die wahren Werte möglichst gut repräsentieren. Nach der Erweiterung des BIMAQ-Prüflabors (siehe unten) erfolgten auch dort Ringvergleichsmessungen mit angepassten Kalibrierroutinen (AP 5.5). Die erhaltenen, geringen Streuungen der verschiedenen Messdatensätze der Partner bestätigten die Kalibrierung der PTB sehr gut. Die Messungen des BIMAQ ergaben Abweichungen von unter $1 \mu\text{m}$ für die wesentlichen Flankenparameter des Normals, so dass davon ausgegangen wird, dass das erweiterte Koordinatenmessgerät und die im Vorhaben entwickelten Messstrategien und Auswertalgorithmen (siehe unten) gut für die vorgesehenen Kalibrierungen geeignet sind.

Im Rahmen der Arbeiten wurde am BIMAQ auch ein Algorithmus auf mehreren Koordinatenmessgeräten implementiert, welcher zur Selbstkalibrierung einer (ein Verzahnungsnormal repräsentierenden) Kugelplatte dient (AP 4.1). Mit dem Algorithmus ergaben sich auf den unterschiedlichen Koordinatenmessgeräten sehr ähnliche Ergebnisse für die Geometrie der Kugelplatte, so dass sie im Anschluss für Untersuchungen zum Deformationsverhalten der Palette (AP 5.1) und des Drehtisches des Koordinatenmessgeräts (AP 3.10) eingesetzt werden konnte.

Ergänzend zum Ringnormal fertigte das BIMAQ mehrere Verzahnungsprototypen mit 3 Gruppen unterschiedlicher Verzahnungen. Sie kamen für Unsicherheitsbetrachtungen bei der Repräsentation einer Verzahnungsachse (AP 5.5) und auch bei Testmessungen im AP 7.1 zum Einsatz.

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes war es erforderlich, das bestehende **Prüflabor des BIMAQ zu erweitern**. Hierzu wurde das vorhandene Koordinatenmessgerät um einen Drehtisch erweitert (AP 5.4), um die in der herstellenden Verzahnungsindustrie

neben der statischen Messmethode ebenfalls häufig anzutreffende Messmethode mit Drehtisch abzubilden. Da das Normal schwerer wurde, als bei der Projektkonzeption geplant, wurde im Projektverlauf festgestellt (AP 3.9), dass die ursprüngliche Dimensionierung der Traglasten des Tisches und des Zuführsystems nicht ausreichte. Daher kam statt eines aerodynamischen ein hydraulischer Tisch zum Einsatz, mit welchem bislang nur wenige Erfahrungen für die Verwendung zur Verzahnungsmessung vorlagen. Aufgrund dieser erforderlichen Umplanung und mehreren technischen Schwierigkeiten bei der Implementierung des Tisches wurden ein Änderungsantrag und auch ein Antrag auf kostenneutrale Laufzeit erforderlich. Durch diese Maßnahmen konnte der Projekterfolg hinsichtlich der Prüflaborerweiterung sichergestellt werden und das Koordinatenmessgerät für die Untersuchungen (insbesondere am Großverzahnungsnormal) eingesetzt werden.

Da am vorhandenen Prüflabor keine Möglichkeit existierte, die zu messenden Verzahnungen temperiert zu lagern, bestand die Gefahr, dass Fehlmessungen aufgrund von Abweichungen von der Standardmesstemperatur auftreten. Daher wurde das Systemhaus des Koordinatenmessgeräts im Rahmen des Vorhabens um eine Vortemperierungszone (AP 5.7) für schwere und große Zahnräder sowie verbesserte Belademöglichkeiten und aufgerüstete Zuführsysteme zum Koordinatenmessgerät (AP 5.3) erweitert und mittels Prüfgewichten von mehreren Tonnen hinsichtlich Traglast und Funktionsfähigkeit getestet.

Die Erweiterung des klimatisierten Messraums führte durch die Vergrößerung der Wärmekapazität und der Luftmenge des klimatisierten Bereichs zu einer geringeren Anfälligkeit der Messraumtemperatur gegenüber kurzfristigen Störungen (Betreten, Ein- / Auslagern von Bauteilen) und äußeren Einflüssen. Nach Behebung von anfänglichen Störungen ließen sich im Messbereich des Koordinatenmessgeräts Temperaturabweichungen von in der Regel weniger als $0,2 \text{ °C}/24 \text{ h}$ und $0,1 \text{ °C}/\text{m}$ erzielen (siehe Bild 1), wenn keine Störung durch eine Öffnung eines Rolltors erfolgte. Die angestrebten Werte für die Temperaturgradienten werden somit erreicht, so dass der Messraum den projektinternen Vorgaben gemäß klimatisiert ist. Neben der Charakterisierung des Temperaturverhaltens war auch eine Bestimmung des Verhaltens des neu eingebauten Drehtisches unter den hohen Lasten des Großverzahnungsnormal erforderlich. Hier wurden Masseneinflüsse auf die Drehachse des Tisches (AP 3.10) und auf das eigentliche Koordinatenmessgerät (AP 5.1) untersucht, indem Prüfgewichte und schwere Zahnräder mit Gesamtmassen von bis zu 4 t auf dem Drehtisch positioniert wurden. Bei den Untersuchungen am KMG konnten nur geringe Verformungen festgestellt werden, welche keine nennenswerten Einflüsse auf die ermittelten Messdaten von Verzahnungen haben. Diese Ergebnisse stimmen mit den Verformungsanalysen der FEM-Simulationen vom Partner Hexagon überein. Es ist daher davon auszugehen, dass keine signifikanten Abweichungen von Messdaten durch den Einfluss der Werkstückmasse auf die KMG-Struktur entstehen.

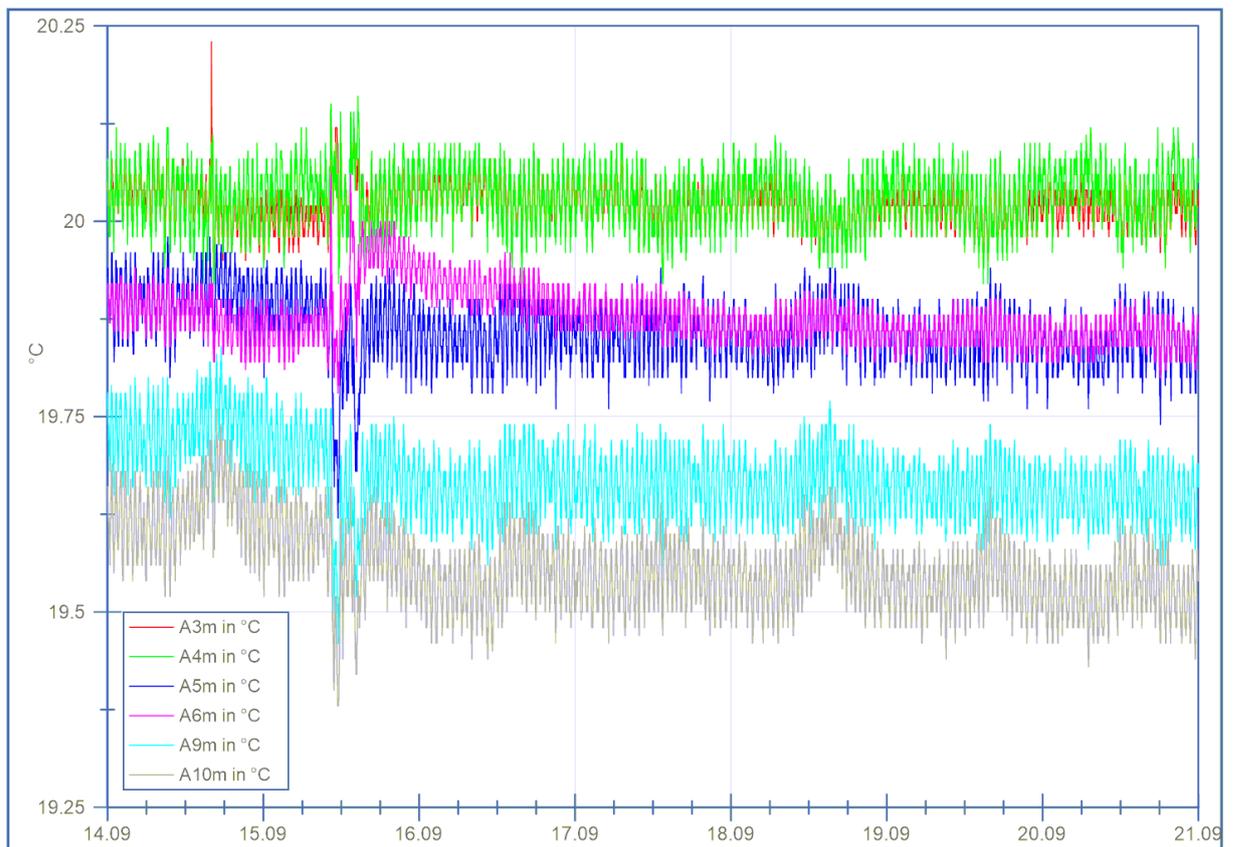


Bild 1: Temperaturverlauf von 6 ausgewählten Temperatursensoren im klimatisierten Messraum des Großkoordinatenmessgeräts über einen Zeitraum von 7 Tagen nach der Fertigstellung der Erweiterungsarbeiten im Jahr 2015.

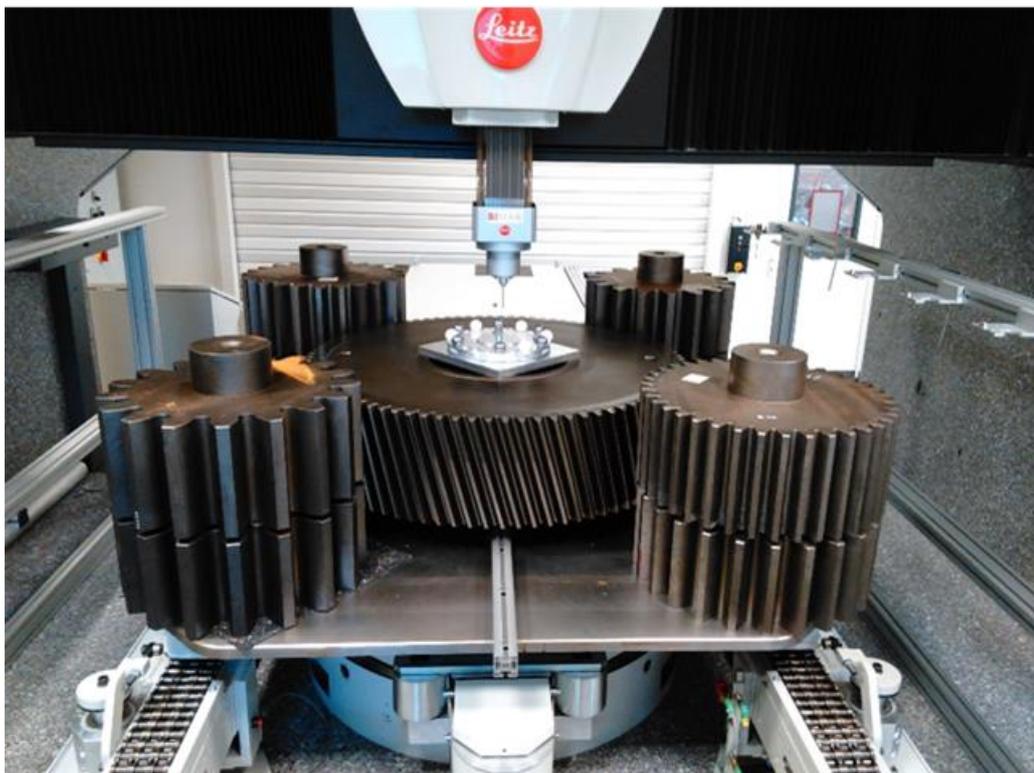


Bild 2: Anordnung des Kugeltellers und der Gewichte (Zahnräder) zur Untersuchung des Masseneinflusses auf die Drehtischbewegung.

Für die Untersuchungen der Masseneinflüsse auf das Verhalten des Drehtisches kamen die gleichen Gewichte sowie der im AP 4.1 charakterisierte Kugelteller zu Einsatz (siehe Bild 2).

Dabei zeigte sich, dass der Tisch in Verbindung mit der neuen Granitplatte ebenfalls kaum durch die hohen Massen beeinflusst wird. Die mit dem Kugelteller und dem angepassten Auswertalgorithmus aus AP 4.1 festgestellten Abweichungen des Tisches liegen für alle Abweichungsarten unter $1\ \mu\text{m}$. Bild 3 stellt beispielhaft die Verschiebung des Tischmittelpunktes in x-Richtung für unterschiedliche Lasten dar.

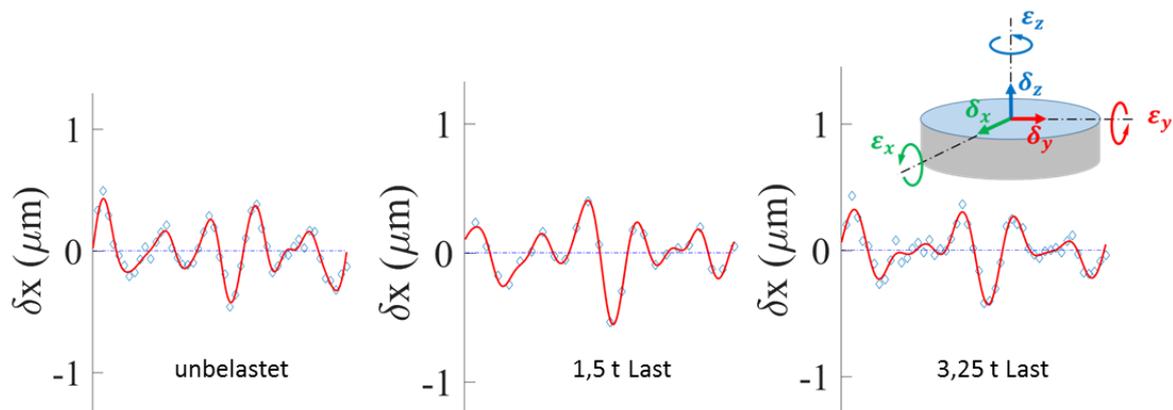


Bild 3: Verschiebung des Tischmittelpunktes in x-Richtung bei jeweils einer vollen Umdrehung des Drehtisches unter unterschiedlichen Lasten.

Untersuchungen zur Positionierungsunsicherheit der Rotationsposition des Tisches zeigten eine erkennbare Abhängigkeit vom Trägheitsmoment des aufliegenden Bauteils. Diese konnten durch aufwändige Testmessungen und Anpassungen in der Regelung des Tisches so weit reduziert werden, dass eine Verwendung des Tisches für gesteuerte Messungen im Projekt möglich ist. Eine positionsgeregelte Messung ist mit großen Trägheitsmomenten jedoch nicht zu erreichen. Diese Tatsache beeinträchtigt die Untersuchungsergebnisse jedoch nicht, da sie im Wesentlichen einen Zeitvorteil bedeutet, welcher im Vorhaben nicht im Fokus stand.

Im Zuge der Messungen am Großverzahnungsnorm (AP 6.1) und anderen kleinen und großen Zahnrädern sowie den in AP 4.12 gefertigten Testbauteilen (AP 7.1, 7.3) konnte die Funktionsfähigkeit aller Komponenten des Koordinatenmessgeräts und des Systemhauses in Kombination bestätigt werden.

Somit sind die erforderlichen technischen Voraussetzungen für Messungen an und Kalibrierungen von Großverzahnungen durch die Erweiterung des klimatisierten Messraums erreicht worden.

Die Entwicklung des **QM-Systems** sowie die Erstellung von Verfahrensanweisungen (AP 5.2, 5.3) sind bis zum Projektende weiter vorangetrieben worden, konnten aber aufgrund ihres erheblichen Umfangs und den zusätzlich anfallenden Arbeiten zur Behebung der technischen Schwierigkeiten mit dem Drehtisch und den optischen Sensoren nicht beendet werden. Die entsprechenden Arbeiten am QM-System sowie an einem Konzept für die Akkreditierung eines Prüflabors an einer Universität werden nach dem Projektende fortgeführt. Es ist wei-

terhin das erklärte Ziel des BIMAQ, eine DAkkS-Zertifizierung für Großverzahnungen anzustreben und anschließend Kalibrierdienstleistungen anzubieten. Dementsprechend konnten geometrische **Kalibrierungen von Industrienormalen** (AP 5.6) in der Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden. Da die DAkkS-Akkreditierung des Labors weiter vorbereitet werden muss, ist mit ersten Kalibrierungen von Industrienormalen voraussichtlich erst im Jahr 2018 zu rechnen.

In diesem Themenbereich konnten als Ergebnis Kalibriernormale inkl. entsprechenden Routinen entwickelt werden. Darüber hinaus wurde mit der Erweiterung des Prüflabors am BIMAQ eine Infrastruktur entwickelt, welche erstmalig ein unabhängiges Prüflabor für Großverzahnungen für Forschung und Industrie zur Verfügung stellt.

1.2. Themenbereich Mess- und Auswerteroutinen

Typische Messpunktdichten zur Geometrieerfassung bei Verzahnungsmessungen liegen laut den üblichen Standards bei Werten von mindestens 10 Punkten/mm. Dies gilt sowohl für Messungen der Profil- als auch der Flankenlinien, wobei zu beachten ist, dass die Punktverteilung in Profilrichtung für die Auswertung nicht zwangsläufig äquidistant verläuft. Diese Punktdichte resultiert aus der Verwendung vorgeschriebener Filteralgorithmen.

Für die Entwicklung von flächenhaften **Messstrategien** (AP 4.7) bedeutet dies, dass diese Punktdichte grundsätzlich sowohl in Flankenlinien- als auch Profillinienrichtung umgesetzt werden muss, wenn unveränderte Auswertelgorithmen zum Einsatz kommen sollen. Daraus folgt für die taktil oder optisch punktuell messende Verzahnungsmesstechnik die Aufnahme einer hohen Anzahl von entweder Profil- oder Flankenlinien pro Flanke, um die Punktdichte auch von Messprofil zu Messprofil zu erreichen. Dies bedeutet einen sehr hohen Messzeit-Aufwand und stößt bei einigen Systemen an Grenzen der Speicherkapazität und der graphischen Darstellungsmöglichkeiten. Für flächenhaft messende, optische Sensoren ist eine in beiden Richtungen gleiche, mittlere Punktdichte in der Regel schon durch das Messverfahren selbst sichergestellt, wobei jedoch meist keine äquidistanten Datensätze mehr vorliegen. Für flächenhafte Messstrategien kann die Datenpunktdichte prinzipiell reduziert werden, wenn entsprechend angepasste Auswerte- und Filterroutinen verwendet werden.

Im Arbeitspaket 3.8 wurden taktile Messungen an Testverzahnungen mit der ursprünglichen Messpunktdichte gemäß der Richtlinie VDI 2612 durchgeführt, deren Daten im Anschluss auf andere Messpunktdichten ausgedünnt wurden. Außerdem erfolgten Geometriemessungen mit taktilen Sensoren gemäß einer flächenhaften Messstrategie (AP 4.7). Auch mit den im Vorhaben durch den Partner Hexagon entwickelten faseroptischen Sensoren (HP-O) konnten Messungen auf dem Koordinatenmessgerät des BIMAQ durchgeführt werden, welche zwischen Faktor 2 bis 4 schneller waren als die taktilen Messungen. Mit diesen Datensätzen wurden Vergleiche zwischen dem konventionellen, linienbasierten Auswertungsansatz mit hoher Punktdichte und flächenhaften Auswertungsansätzen durchgeführt. Die Messmethoden teilen sich in die Messung mehrerer Profillinien, mehrerer Flankenlinien oder mehrerer

Linien in beide Messrichtungen auf. Jede Methode generiert unterschiedliche Messpunktdichten in Flanken- und Profilrichtung.

Neben diesen Messungen wurden auch drei verschiedene Verzahnungsnormale (A-, Bm- und M-Normal) taktil und optisch, linien- und flächenhaft gemessen. Die Wahl fiel für diese Sonderuntersuchungen auf Verzahnungsnormale, damit die Rückführbarkeit der linienhaften Messungen gegeben ist. Die flächenhafte Erfassung der Messpunkte ist somit indirekt über die Rückführung der Standardmessungen, die in den Flächen enthalten sind, ebenfalls gegeben.

Für die Auswertung der umfangreichen Messungen kamen konventionelle und neue Auswerteverfahren, die im AP 4.9 entwickelt wurden, zum Einsatz. Im Vorhaben wurde ein Konzept für eine **flächenhafte Auswertemethode** von Verzahnungsgeometrien entwickelt, welches vom konventionellen Verfahren der linienhaften Messung und Auswertung einzelner Flanken abweicht. Es sieht keine definierten Messpositionen mehr vor, sondern die Daten können in Form von mehreren Geraden oder Schlangenlinien sowie flächenhaft mit einer bestimmten Gitterkonstanten erfasst sein. Dies ist für die Auswertung nahezu unerheblich, solange der Schwerpunkt der Daten ungefähr in der Mitte der Flanke liegt und die Messdaten auch die äußeren Regionen der Flanke widerspiegeln. Dabei werden alle erfassten Daten gemeinsam ausgewertet, so dass die Ergebnisse jeder Flanke in Bezug zu den Daten der anderen Flanken stehen. Die Auswertung bestimmt die Abweichungen der Messpunkte zu ihren Sollpositionen und wertet diese Abweichungen anschließend flächenhaft mit Approximationsverfahren aus. Bild 4 zeigt als Auswertungsbeispiel eine Ebene, welche in die Abweichungen der Messdaten von den Sollpunkten der Flanke approximiert wurde, um aus den Steigungen in Profil- und Flankenlinienrichtung die Winkelabweichungsparameter $f_{H\alpha,a}$ und $f_{H\beta,a}$ zu ermitteln.

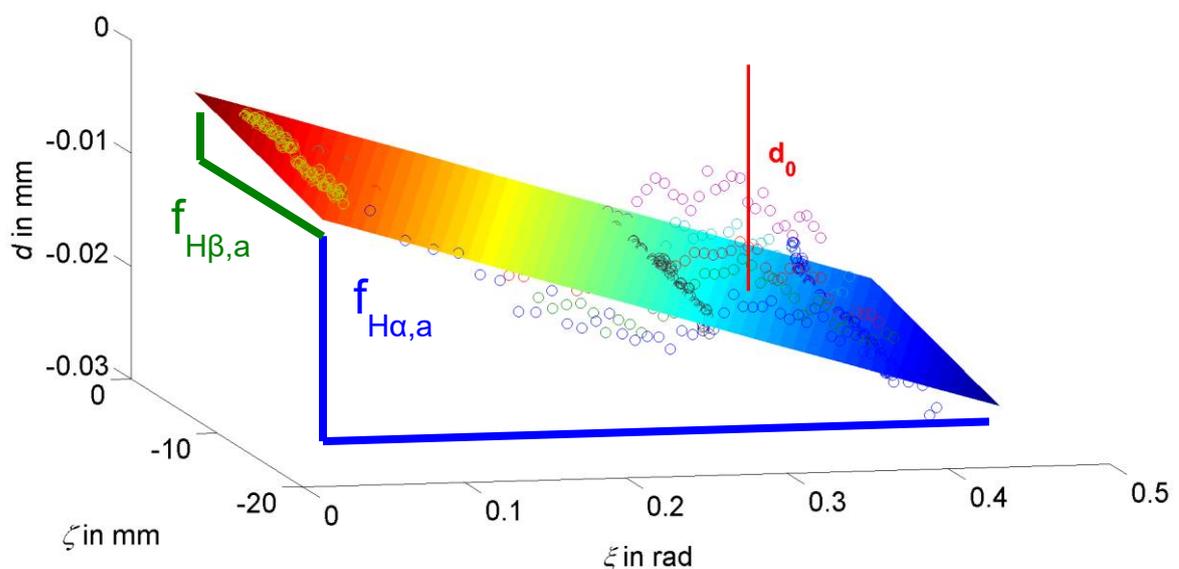


Bild 4: In die Abweichungen d von den Sollwerten approximiert Ebene mit den Winkelabweichungsparametern $f_{H\alpha,a}$ und $f_{H\beta,a}$ und dem Teilungsoffset d_0 .

Nach diesem Approximationsschritt erfolgt abschließend noch eine optionale Auswertung von zusätzlichen Parametern eventuell vorhandener Profilmodifikationen mit automatischen Separationsalgorithmen, wobei bei der Berechnung der zusätzlichen Parameter bislang teilweise Abweichungen von den Sollwerten auftreten, deren Ursache noch unklar ist.

Bei Gesprächen auf Konferenzen, Messen und in Fachausschüssen ließ sich erkennen, dass aktuell keine Einheitlichkeit hinsichtlich der Sichtweise der Industrie auf die flächenhafte Messstrategie und Datenauswertung erreicht werden kann. Einige konventionelle Hersteller sind der Ansicht, dass eine hochaufgelöste Linienmessung sinnvoller als eine flächenhafte Messung mit gleicher Punktzahl (und damit geringerer Flächendichte) ist, während Hersteller flächenhafter Messtechnik die ebenfalls flächenhafte Auswertung favorisieren. Beide Verfahren finden ihren Wiederhall in den Entwürfen bzw. aktuellen Versionen der entsprechenden Normen und Richtlinien (VDI 2612, Blatt 1; DIN 21772) und sind daher im Rahmen des Vorhabens auch in Auswerteroutinen implementiert worden. Wenn sich nach dem Projektende mit einigen Beispielpartnern demonstrieren lässt, dass die flächenhafte Messung und Auswertung bei geringfügig erhöhten Messzeiten umfangreichere Qualitätsinformationen liefert, ist ein langsamer Ersatz der linienhaften Auswertung bei den Anwendern in der Fertigungsindustrie zu erwarten.

In die Arbeiten zu **industriegerechten Messroutinen** im AP 4.4 flossen die Erkenntnisse aus den AP 3.8, 4.7 und 4.9 ein. Für industriegerechte Routinen ist die Messzeit ein entscheidender Faktor. Die in den genannten AP entwickelten Mess- und Auswerteroutinen sind nicht zeitoptimiert, wobei die Verwendung neuer, flächenhafter Messstrategien das größte Optimierungspotenzial aufweist, wenn die Messpunktdichte durch neue Filteralgorithmen und erweiterte Unsicherheitsbetrachtungen deutlich reduziert werden kann. Bei der Verwendung der neuen faseroptischen Sensoren (HP-O) kann in diesem Zusammenhang die beschleunigte Messzeit ausgenutzt werden, um entweder eine weitere Zeitreduktion zu erzielen oder die Punktdichte bei gleicher Messzeit wieder deutlich zu erhöhen und damit zur konventionellen Auswertung ähnlichere Datensätze zu generieren. Wie bereits erwähnt, gibt es Bedenken hinsichtlich der industriellen Akzeptanz der flächenhaften Messstrategie mit ausgedünnten Punktdichten. Sollten sich diese Bedenken in Zukunft ausräumen lassen, besteht die Möglichkeit, auf Basis der Untersuchungen industriegerechte Messroutinen zu entwickeln, die einen Mehrwert gegenüber dem aktuellen Stand der Technik bieten und nur vergleichsweise geringe Messzeitverlängerungen bedeuten.

Eine Implementierung der Auswerteroutinen aus AP 4.9 in Quindos erfolgte entgegen der ursprünglichen Planung für das AP 4.10 nicht. Stattdessen wurde der anwenderfreundliche Weg der Auslagerung der **Auswerteroutinen in das externe Softwarepaket** Matlab umgesetzt, welcher im Vorhaben zuerst erfolgreich für die Anbindung zusätzlicher Sensoren eingesetzt werden konnte (siehe Abschnitt 1.4). Die externen Routinen lassen sich von Quindos aus starten und über eine XML-Datei parametrieren. Die Auswerteergebnisse dieser externen Routinen werden in Dateien im GDE-Format gespeichert, welche der Anwender aus Quindos heraus aufrufen kann, aber nicht muss. Sie können auch eigenständig für die Inter-

pretation der Auswertungsergebnisse verwendet werden. Somit kann der Anwender die schon in Quindos vorhandenen linienhaften Auswertungen oder auf einfache Weise die flächenhaften Auswertelgorithmen verwenden. Als Rechner für die Auswertung kann entweder der Quindos-PC, ein gegebenenfalls vorhandener Sensor-Controller (siehe Abschnitt 1.4) oder ein beliebiger anderer PC verwendet werden. Mit diesem Konzept können die bislang in AP 4.9 entwickelten Auswertemethoden (mit einigen Modifikationen) direkt für die Auswertung am industriellen Messplatz verwendet werden. Das Konzept ermöglicht dem Anwender, die flächenhafte Auswertung für seine Anwendung zu testen und die Messdaten mit konventionellen Ergebnissen zu vergleichen. Dazu ist es nicht erforderlich direkt auf eine neue Softwareversion zu wechseln, wodurch die Akzeptanz der neuen Auswertemethoden bei den Anwendern erhöht wird.

Die **Archivierung und der Austausch der Messpunkte** erfolgten in einem allgemeingültigen Verzahnungsdatenformat. Hintergrund ist die allgemeine Verwertbarkeit der Messpunkte in verschiedenen Auswertungsprogrammen, um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse gewährleisten zu können. Die Projektpartner Hexagon und BIMAQ haben sich hierbei auf das Verzahnungsdatenformat GDE (VDI/VDE-Richtlinie 2610) geeinigt und im Vorhaben entsprechende Konverter erstellt.

Auch für die neu entwickelten, zusätzlichen, **optischen Sensoren** sind im AP 4.8 **Auswerterroutinen** erstellt worden, welche auf den Erkenntnissen für die Entwicklung von Geometrie-Auswerterroutinen basieren. Aufgrund der deutlich niedrigeren Anforderungen an die Positionsunsicherheit und die laterale Auflösung dieser Sensoren, ergaben sich hier jedoch keine Schwierigkeiten bei der Umsetzung. Für die Implementierung wurde ebenfalls der oben dargestellte Weg der XML-Anbindung eines externen Auswerterechners an Quindos gewählt, um hier die größtmögliche Flexibilität für unterschiedliche Sensorprinzipien und –datensätze zu ermöglichen. Die entwickelten Messprogramme für die optische Rauheitsmessung und die Mikromagnetik kamen bei Messungen an Zahnradserien (AP 7.2) zum Einsatz.

Das Ergebnis der Arbeiten in diesem Themengebiet sind demzufolge Messstrategien und Auswerterroutinen für die flächenhafte Datenerfassung und –auswertung sowohl von Geometriesensoren als auch anderen Sensoren, welche in Zukunft das Potenzial bieten, umfangreichere Informationen über die Qualität von gemessenen Verzahnungen zu ermitteln. Sie wurden in den AP 7.1, 7.2 und 7.3 umfangreich getestet, wobei ihre Funktionsfähigkeit inklusive der Anbindung der externen Sensoren über die Sensorschnittstelle bestätigt werden konnte. Einem sofortigen, umfassenden Einsatz in der Fertigungsindustrie steht jedoch die Skepsis potenzieller Anwender gegenüber, welche traditionalistisch agieren und neue Systeme nur zögerlich akzeptieren. Um diese Anwender über die Vorteile der neuen Entwicklungen zu informieren, sind die entsprechenden Projektergebnisse auf Konferenzen und in Publikationen vorgestellt worden.

1.3. Prozessoptimierung der Verzahnungsherstellung

Ein Ziel des Projekts bestand darin, Grundlagen und Konzepte für die messdatengesteuerte Prozessoptimierung von Verzahnungs-Produktionsprozessen zu erarbeiten. Hierzu erstellten die Projektpartner im Rahmen des AP 3.5 eine Liste von die Verzahnungsqualität beeinflussenden Qualitätskriterien und Bewertungskriterien für die Prozessoptimierung. Diese wurden in den AP 3.6 und 3.7 experimentell an zwei Prozessen (Verzahnungsschleifen und WPM-Walzen) erprobt und weiterentwickelt. Die weiteren Arbeiten zur Entwicklung der Konzepte fanden am WPM-Walzprozess als Demonstrationsprozess statt.

Aufgrund der Maschinenstruktur und der zu erwartenden Messprozedur schien für das Regelungskonzept des Demonstrationsprozesses (und diverse andere Verzahnungsfertigungsprozesse) eine In-Prozess-Regelung der Fertigung als auch eine post-Prozess-Regelung für das nächste Werkstück zielführend zu sein. Als Randbedingungen wurden die Einflussmöglichkeiten über Steuerdaten und Parameter und die Stellgrößenbegrenzung und die Umformkräfte im Hinblick auf einen optimalen Umformungsgrad identifiziert. Dabei ist eine Gewichtung nach funktionalen und nicht funktionalen Bereichen der Zahnflanke vorgesehen.

Der darauf aufbauend im AP 4.11 entwickelte Hauptregelkreis fokussiert auf die automatische Nachjustierung der Werkzeuglage bzw. -wege bei auftretendem Verschleiß über die Veränderung der Stellgrößen, wobei die beiden Hauptlagen des Werkzeugs die Tiefe und die Symmetrie der Zahnausprägung beeinflussen. Als Messgröße wird im Demonstrationsprozess die Zahnkontur während des Prozesses nach jedem Wälzschritt aufgenommen.

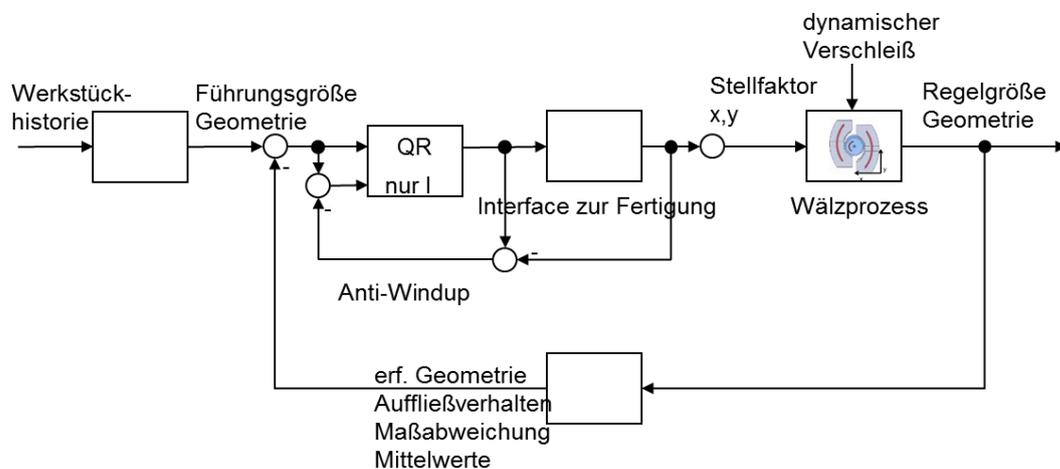


Bild 5: Regelkreis post-prozess Qualitätsregler.

Als erster Ansatz für den Regler wurde eine proportional-integrale (PI) Bewertung der Regelabweichung der Größe Füllfaktor Zahngeometrie angenommen. Da der Prozess stark mit Stellgrößenbeschränkungen arbeitet, wurde für die Stabilität und Robustheit des Verfahrens eine Struktur mit Anti-Windup-Eigenschaften gewählt (Bild 5).

Eine Anbindung des Reglers an Quindos als internes Software-Modul ist nicht erfolgt. Es wurde festgestellt, dass eine Anbindung der WPM-Maschine über eine SPS und eine Kopplung über eine IP-Datenverbindung zielführender als eine vollständige Integration als Quin-

dos-Modul ist. So können Messdaten direkt nach der Fertigung an Quindos übertragen werden und von dort post-prozess für das nächste Werkstück bereitgestellt werden, um dessen Qualität zu verbessern.

Für den Test der Qualitätsregelung wurde eine Simulation in Matlab-Simulink implementiert, welche auf einem einfachen Modell des Fertigungsprozesses basiert, virtuell gemessene Daten hinsichtlich der Bauteilgeometrie verwendet und in der Lage ist, mehrere Zahngeometrien simultan (wie im WPM-Prozess erforderlich) zu verarbeiten.

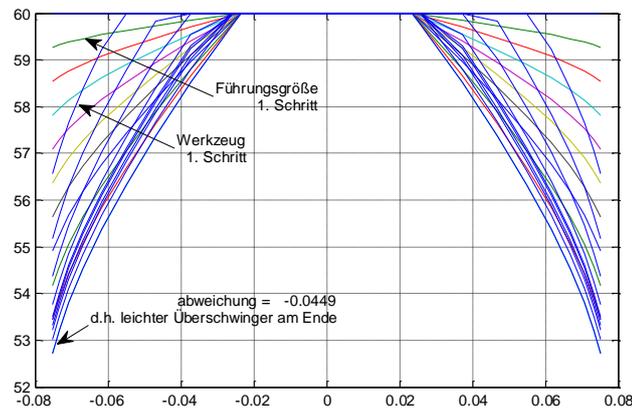


Bild 6: Visualisierung der Simulation eines Fertigungsprozesses mit Zahnhöhe 60 mm und Fußkreis 53 mm

Das in Bild 6 dargestellte Simulationsergebnis zeigt einen leichten Überschwinger am final ausgeprägten Zahn. Eine umfangreiche Optimierung der Reglerparameter für eine minimale Regelabweichung im letzten Bearbeitungsschritt hat allerdings erst Sinn, wenn ein reales Fertigungsmodell in der Simulation hinterlegt wurde. Für eine post-prozess Regelung ist ein einfaches lineares Interpolationsverfahren zur Generierung der Bearbeitungsschritte umgesetzt. Dieses kann in künftigen Anwendungen mit Hilfe von erweitertem Prozesswissen in ein nicht-lineares Verfahren überführt werden. Mögliche Erweiterungen im Anschluss an dieses Projekt sind dabei unterschiedliche Definitionen der Qualitätsparameter, Bewertung verschiedener Algorithmen, Betrachtung funktional bewerteter Abweichungen, Berücksichtigung von Materialeigenschaften, Erweiterung der Qualitätsreglerstruktur, Optimierung der Reglerparameter, Integration von Messtechnik, Anbindung an den Fertigungsprozess, Modellierung des Fertigungsprozesses und in letzter Konsequenz Erforschung einer Modell-prädiktiven Regelung.

Da der aktuell zur Verfügung stehende WPM-Prozess in der Anzahl der Stellgrößen eingeschränkt ist, wurde im Rahmen des AP 6.3 zusätzlich zu den oben genannten Erweiterungsmöglichkeiten eine Liste von Anforderungen erarbeitet, mit deren Umsetzung sich ein optimierter Echtzeit-Regelkreis realisieren ließe.

Als Ergebnis konnte somit anhand der Untersuchungen am Demonstrationsprozess des WPM-Walzens die Funktionsweise eines Konzepts zur Qualitätsreglerentwicklung für Verzahnungsprozesse dargestellt werden. Dieses ist in zukünftigen Arbeiten auf andere Ferti-

gungsprozesse zu übertragen, um erste Umsetzungen und anschließend eine Verbreitung bei Anwendern zu erreichen.

1.4. Themenbereich zusätzliche, berührungslose Sensorik am KMG

Die Arbeiten im Bereich der zusätzlichen, berührungslosen Sensoren gliedern sich in mehrere Untergebiete:

1. Sensorschnittstelle zur Anbindung der neuen Sensoren;
2. Zusatzkinematik zur Positionierung neuer Sensoren im Arbeitsraum des Koordinatenmessgeräts für parallele Messungen;
3. Sensor zur photothermischen Randzonenanalyse;
4. Sensor zur mikromagnetischen Randzonenanalyse;
5. Am Koordinatenmessgerät montierbarer Sensor zur optischen Rauheitsmessung.

Um für Industrie und Forschung eine flexible Einbindung neuer Sensoren zu ermöglichen, ist im Projekt eine Software- und Hardware-Struktur (**Sensorschnittstelle**) entstanden, die einen modularen Ansatz verfolgt (vgl. Bild 7).

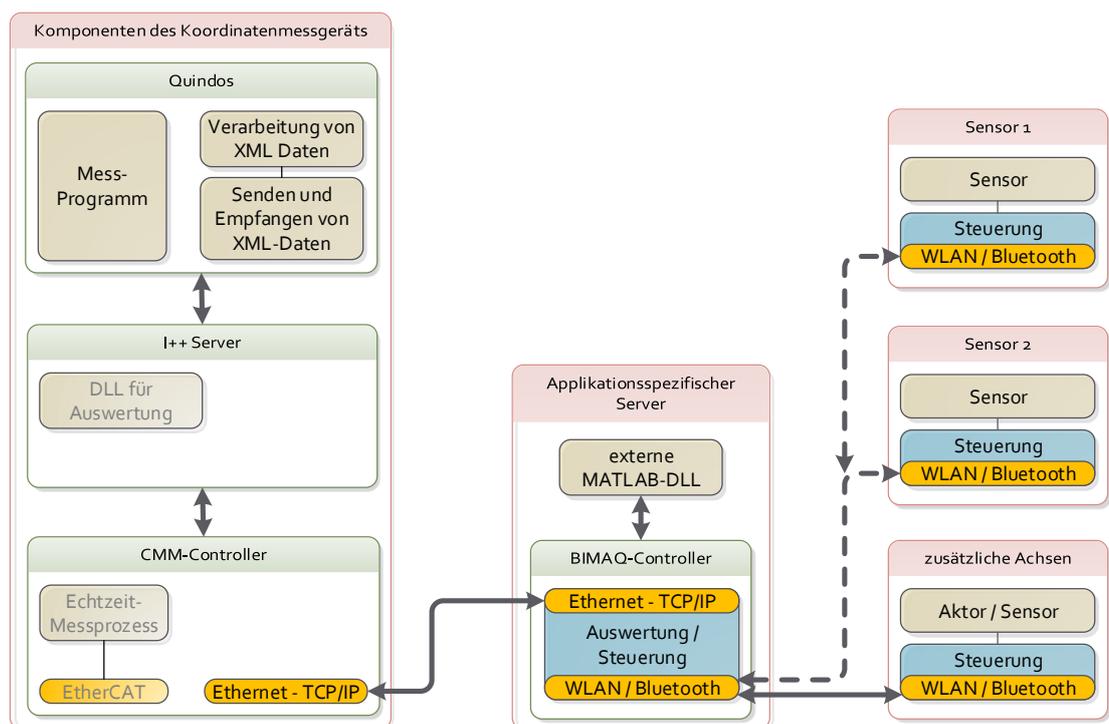


Bild 7: Modularer Aufbau der Kommunikations-Infrastruktur zur Einbindung neuer Sensoren in Koordinatenmessgeräte. Zusätzliche Sensoren und Achsen, werden über einen applikationsspezifischen Server, als Gateway am Koordinatenmessgerät angebunden.

Sie ermöglicht die Anbindung einer sehr großen Bandbreite von Sensoren an das Koordinatenmessgerät inklusive einer Steuerung der Sensoren durch Quindos und eine Datenkommunikation von und zu Quindos. Die Entwicklung der Sensorschnittstelle wurde im AP 3.3 vorbereitet und in den AP 4.2, 4.3 und 4.8 durchgeführt.

Die Software der Schnittstelle verwendet einheitliche Kommunikationsprotokolle auf der Basis von XML zwischen Koordinatenmessgerät und Sensor-Controller sowie Sensor-Controller und Sensor, so dass ein Gateway-Modus zur direkten Ansteuerung eines Sensors durch die Steuerungssoftware Quindos möglich ist.

Die Hardware besteht im Wesentlichen aus einem applikationsspezifischen Server, welcher zusätzliche Sensoren über drahtlose oder drahtgebundene Schnittstellen anbindet, so dass diese nicht kompatibel zum eigentlichen Koordinatenmessgerät bzw. der Steuerungssoftware Quindos sein müssen. Der zusätzliche Server übernimmt bei komplexen Sensoren auch die Aufbereitung und Auswertung der Sensorsignale und kann dafür dynamisch auf externe Bibliotheken zugreifen, die der Anwender z.B. mit Matlab entwickeln kann. Der Server kann darüber hinaus auch komplexere Messaufgaben übernehmen. So kann ein Sensor, der z.B. zu schwer ist für die Sensoraufnahme des Koordinatenmessgeräts, auf einer zusätzlichen Kinematik (siehe unten) montiert und im Messvolumen des Koordinatenmessgeräts unter Zuhilfenahme z.B. des Drehtisches Messungen durchführen, wobei die Bewegung der Zusatzkinematik von Quindos aus über die Schnittstelle gesteuert wird. Alternativ lassen sich mit der Kinematik auch Messungen mit einem zusätzlichen Sensor parallel zur Geometriemessung durch das Koordinatenmessgerät abarbeiten. Für die Erforschung neuer Sensoren und ihre Validierung am Koordinatenmessgerät ist die gewählte Lösung am flexibelsten einsetzbar. Sie kam bei den Arbeiten in den AP 4.6, 6.2 und 7.2 erfolgreich zum Einsatz.

Die im Rahmen der AP 4.4, 4.6 und 6.2 entwickelte **Zusatzkinematik** besteht aus bis zu drei mit Schrittmotoren angesteuerten Bewegungsachsen (2 x Linearachse, 1 x Rotationsachse) und einem Microcontrollerboard. Sie kommuniziert über den Sensor-Controller mittels eines XML-Protokolls mit den Steueralgorithmen in Quindos und ist in der Lage die Lageinformationen im Koordinatensystem des Koordinatenmessgeräts zu interpretieren. Die erforderliche Umrechnung der anzusteuern Messpositionen (aus dem Koordinatensystem des Koordinatenmessgeräts) in das Koordinatensystem der Zusatzkinematik erfolgt auf dem Microcontroller der Zusatzkinematik. Hierzu ist nach der freien Positionierung der Zusatzkinematik im Messraum des Koordinatenmessgeräts einmalig ein manuelles Einmessen der Kinematikposition erforderlich, welches durch den Microcontroller gesteuert und mittels einer an der Kinematik montierten Kalibrierkugel erreicht wird. Hierbei wird während des Einmessens die Kugelposition für unterschiedliche Positionen der Bewegungsachsen erfasst und über die Sensorschnittstelle an den Microcontroller der Kinematik gesendet. Aufgrund des gewählten Aufbaus ist die Kinematik in der Lage, die deutlich größere Masse einiger zusätzlicher Sensoren (Photothermik, Mikromagnetik) zu tragen und kann darüber hinaus einen Sensor mit einer definierten Kraft gegen das Werkstück drücken (Mikromagnetik).

Die Wiederholpräzision der Kinematik beträgt ca. 50 μm im gesamten Messraum des Koordinatenmessgeräts. Für Messungen mit den Sensoren zur Randzonenanalyse ist diese Abweichung allerdings vernachlässigbar klein, da beide Messprinzipien Mittelwerte von Flächen in der Größenordnung weniger Quadratmillimeter erfassen. Für die Positionierunsi-

cherheit ergab sich ein gleichermaßen gutes Ergebnis von unter 55 μm . Aufgrund dieser guten Charakteristika kam die Zusatzkinematik bei Teilen der Untersuchungen im AP 7.2 zum Einsatz, wo sie ihre Funktionalität erneut belegen konnte.

Die Randzonenanalyse eines Bauteils kann aussagekräftige Zusatzinformationen über die Bauteilqualität generieren. Daher wurde im Vorhaben überprüft, ob sich ein Messverfahren als zusätzliches Verfahren für Messungen an einem Koordinatenmessgerät eignet. Die beiden unterschiedlichen, untersuchten Verfahren waren die photothermische und die mikromagnetische Randzonenanalyse.

Die Entwicklung eines funktionsfähigen **photothermischen Sensors** für Messungen mit Koordinatenmessgerät-Anbindung erwies sich im AP 6.2 als zu komplex, obwohl die grundsätzliche Einsetzbarkeit an Verzahnungen in theoretischen Betrachtungen (AP 3.3, 3.4) und Laboruntersuchungen (AP 4.5, 4.6) gezeigt werden konnte. Für den Einsatz am Koordinatenmessgerät traten bei diesem Sensorprinzip messtechnische Fragestellungen auf, die sich nicht zufriedenstellend beantworten ließen. Beispielsweise zeigte sich das photothermische Signal deutlich abhängig von der Oberflächenkrümmung des beobachteten Materials. Bei der Messung entlang einer Evolvente waren trotz der senkrecht zur Oberfläche nachgeführten Ausrichtung stetig geänderte Signale aufgrund der kontinuierlich sinkenden Oberflächenkrümmung der Evolvente zu erfassen. Eine rechnerische Kompensation dieser Abweichungen anhand der bekannten Evolventenform ist nicht den industriellen Anforderungen entsprechend gelungen. Bei der Betrachtung der Summe der zu erwartenden Schwierigkeiten und Messwert-Abweichungsquellen wurde klar, dass das Messprinzip mit dem aktuellen technischen Stand noch nicht für eine Messung am Koordinatenmessgerät geeignet ist.

Statt mit dem Photothermiksensor wurde mit der **mikromagnetischen Randzonenanalyse** weitergearbeitet, welche sich wie das photothermische Prinzip für eine phänomenologische Randzonenanalyse von Stahlwerkstoffen eignet. Die Anforderungen an die mikromagnetische Randzonenanalyse wurden ebenfalls in AP 3.3 ermittelt und ähneln denen der photothermischen Sensorik, wobei der kommerziell erhältliche Sensorkopf zusätzlich mit einer definierten Kraft auf die Messoberfläche gepresst werden muss. Hierfür ist die Kinematik eines Koordinatenmessgeräts grundsätzlich nicht geeignet. Der Sensor wurde daher mit einer angepassten Halterung an der dafür vorgesehenen Extrakinematik (siehe oben) im Arbeitsraum des Koordinatenmessgeräts montiert und an die Kommunikation mit dem Sensorcontroller gemäß den Definitionen aus den AP 4.2 und 4.3 angepasst. Nach Tests im Labor (AP 4.5) erfolgten Testmessungen im AP 4.6 und 4.10 nach denen der Sensor im AP 6.2 im Arbeitsraum des Koordinatenmessgeräts integriert wurde.

Der Sensor kam im AP 7.2 für Messungen an den geschliffenen, verzahnten Wellen unter Anwendung der in AP 4.4 erstellten Messroutinen zum Einsatz. Die Auswertungsergebnisse dieser Messungen zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den Randzoneneigenschaften der linken und der rechten Zahnflanke aller bislang ausgewerteten Proben, wobei dieser

Effekt auf die spezielle Fertigungssituation der Proben zurückgeführt werden kann. Anhand dieser Messungen konnte durch den umfangreichen Vergleich mit metallografischen Untersuchungen belegt werden, dass mikromagnetische Sensoren grundsätzlich in der Lage sind, Randzonenunterschiede an Verzahnungen zu detektieren und somit auch Scheifbrand mit diesem Sensorprinzip erkannt werden kann. Eine detailliertere Aussage zur Unsicherheit der Messungen ist hier nicht möglich, da an einzelnen Wellen deutlich vom mittleren Verhalten abweichende Messdaten erfasst wurden, deren Ursache sich bislang nicht eindeutig nachweisen ließ.

Eine Messung der gewalzten Proben ließ sich mit dem verwendeten (an die geschliffenen Proben angepassten Sensor) nicht durchführen, da hier die Flankenform aufgrund des Fertigungsprozesses noch nicht voll ausgeprägt war und der Sensor daher nicht sicher positioniert werden konnte.

Ursprünglich war die Entwicklung eines **optischen Rauheitssensors** auf der Basis der Speckle-Korrelation nicht im Projekt vorgesehen. In anderen Projekten am BIMAQ bestanden aber gute Erfahrungen mit Laboraufbauten dieses Sensorprinzips und die Untersuchungen im AP 3.3 zeigten, dass die Anforderungen des Sensors für eine Koordinatenmessgerätmontage im Vergleich zu anderen Sensoren geringer sind. Daher wurde entschieden, im Rahmen des Vorhabens einen am Koordinatenmessgerät montierbaren Rauheitssensor zu entwickeln, um möglichst früh einen Demonstrationssensor für die Schnittstellenanbindung und den Betrieb am Koordinatenmessgerät zu erhalten. Insgesamt wurden vier Prototypen des Rauheitssensors entwickelt, mit denen sich die besonderen Herausforderungen beim mechanischen (Massebeschränkung) und elektrischen (Energieversorgung + Datenübertragung) Anschluss des Sensors an das Koordinatenmessgerät lösen ließen. Der jeweils aktuelle Prototyp kam als Demonstrator bei der Entwicklung der Software in AP 4.2 und 4.3 zu Einsatz. Bei allen im AP 4.6 entwickelten Prototypen gab es Auswertungsschwierigkeiten aufgrund von Streulichteinfall auf dem Sensorchip, welche zu unbefriedigenden Schwankungen des Messsignals führten. Diese Schwierigkeiten waren auch aus den Laboraufbauten im AP 4.5 bekannt, traten dort aber aufgrund der besseren Justierbarkeit in wesentlich geringerem Ausmaß auf, so dass keine signifikante Beeinflussung der Messdatenauswertung auftrat. Die Übertragung der Justierkonzepte aus dem Laboraufbau und auch ein völliges Neudesign (beim 4. Prototypen) der feinmechanischen Justiermöglichkeiten des optischen Strahlengangs unter Berücksichtigung der Beschränkungen durch die maximale Sensormasse konnten den Streulichteinfluss auf die Messungen jedoch nicht ausreichend reduzieren. Dementsprechend konnte der Sensor für die Untersuchungen im AP 7.2 leider nicht eingesetzt werden.

Ein Ergebnis der Arbeiten in diesem Themengebiet ist die offene Sensorschnittstelle, welche zur Anbindung unterschiedlicher Sensoren an die Steuerungssoftware des Koordinatenmessgeräts und zur Ansteuerung zusätzlicher Linearachsen für parallele Messungen im Messraum des Koordinatenmessgeräts dient. Mit ihr können Hersteller und auch Anwender neu entwickelte Sensoren für Test- oder Betriebszwecke schnell an die Steuerungssoftware des Koordina-

tenmessgeräts anschließen und damit Zykluszeiten für Soft- und Hardwaretests reduzieren. Auf der Seite der untersuchten Sensorprinzipien sind die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Die photothermische Randzonenanalyse ist mit den heute verfügbaren Mechanik- und Infrarotoptikkomponenten nicht sinnvoll an Koordinatenmessgeräten einsetzbar. Im Gegensatz dazu konnte für die mikromagnetische Analyse ein Verwertungspotenzial für zusätzliche Messungen am Koordinatenmessgerät aufgezeigt werden, wobei jedoch noch Forschungsbedarf hinsichtlich der Interpretation und der Messunsicherheit der Daten erforderlich ist. Der specklebasierten Rauheitsmessung kann aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls ein hohes Verwertungspotenzial für die Anwendung bei Verzahnungsmessungen bescheinigt werden, wenn sich die Störeinflüsse im Strahlengang und bei der Auswertung lösen lassen.

2. Zahlenmäßiger Nachweis

Die Zuwendung wurde der Bewilligung und dem Antrag entsprechend für personelle und sachliche Aufwendungen verwendet. Die wesentlichen Positionen der sachlichen Aufwendungen gehören zu den folgenden Bereichen und sind zu deren Bearbeitung erforderlich gewesen:

1. Erweiterung des Prüflabors:

Hierzu gehören:

- die Erweiterung des klimatisierten Messraums um eine vorklimatisierte Lagerfläche inklusive der dazu erforderlichen Aufrüstung der Klimatechnik und Temperaturüberwachung
- die Beladungsmöglichkeiten des vorhandenen Großkoordinatenmessgeräts (Rolltore, Kran, Zuführeinheit, 4-Arm-Traverse, Hebezeuge, Spannsystem).

2. Ausrüstung des Großkoordinatenmessgeräts mit einem Drehtisch:

Die Drehtischerweiterung umfasst im Detail

- den Drehtisch
- eine stärkere Granitpalette zur Lagerung der Prüflinge
- das Hydraulikaggregat inkl. Kühlung für die hydraulische Lagerung des Tisches.

3. Komponenten für optische Sensoren und die Sensor-Schnittstelle:

- Sensor-Controller für Sensor-Schnittstelle
- Komponenten für optische Sensoren:
 - Framegrabber-PC-Karte
 - Hochgeschwindigkeitskamera
 - USB-Kamera
 - Fasergekoppelter Diodenlaser
 - Laserstrahl-Messgerät

- Tasteraufnahme mit elektr. Anschlüssen.

3. Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt erbrachten Arbeiten waren erforderlich und angemessen, um das Projektziel der Sicherstellung zuverlässiger Messmöglichkeiten von Großverzahnungen für WEA zu erreichen.

Ein wesentlicher Eckpfeiler für das Erreichen des Ziels ist die Etablierung einer bislang nicht vorhandenen Großverzahnungs-Kalibrierkette von der PTB (Nationales Metrologieinstitut) über akkreditierte Kalibrierlaboratorien bis hin zu den industriellen Anwendern, um die Rückführbarkeit von Messungen gewährleisten zu können. Für diese Kalibrierkette muss eine messtechnische Infrastruktur aufgebaut werden, die aus (Primär)normalen und Messgeräten in Kalibrierlaboratorien besteht, welche die industriellen Anwender mit Sekundär- und Werknormalen versorgen können. Um die Realisierung der Kalibrierkette zu initiieren, erfolgte im Rahmen des Vorhabens sowohl die Fertigung eines werkstückähnlichen Primärnormals als auch der technische und organisatorische Aufbau eines unabhängigen Prüflabors für Großverzahnungen am BIMAQ.

Durch die hohen Werkstückmassen der Zahnräder und Normale ist eine massebedingte Verformung und damit ein Einfluss auf die (kalibrierten) Verzahnungsparameter nicht auszuschließen, so dass nur über Untersuchungen und ein daraus resultierendes Verständnis der Masseffekte (auf sowohl das Bauteil als auch auf das Messgerät) gewährleistet werden kann, dass die (kalibrierten) Messdaten des Bauteils korrekt angegeben werden. Hierzu mussten speziell angepasste Kalibrier-, Mess- und Auswertestrategien entwickelt werden, um die Verformungen bei den Messungen berücksichtigen zu können. Die im Vergleich zu Standardverzahnungen großen Flankenflächen sind anfälliger gegen Fertigungsabweichungen, so dass zur Sicherstellung zuverlässiger Messmöglichkeiten auch erweiterte Mess- und Auswertestrategien erprobt werden mussten. Mit ihnen lassen sich flächenhaft erfasste Messdaten auswerten, so dass präzisere Informationen über die Qualität der gefertigten, großen Zahnflanken erzielt werden.

Da das Primärnormal, die Kalibrierroutinen und auch die Prüflabore unabhängig von finanziellen oder anderen Interessen einzelner Beteiligter der Kalibrierkette (entwickelt) sein müssen, konnte die erreichte Realisierung der ersten Teile einer Großverzahnungskalibrierkette und der angepassten Mess- und Auswertestrategien nur durch die PTB und andere, nicht-kommerzielle Institutionen umgesetzt werden. Hierzu ist eine projektbezogene Finanzierung durch öffentliche Fördergeber unabdingbar, da die Grundausstattungsmitel der Institutionen nicht für die erforderlichen Investitionen beim Normal und dem Prüflabor vorgesehen waren.

Bislang existiert nur für Automobil-Kegelräder eine Lösung für die automatisierte Optimierung der Verzahnungsfertigung. Sie basiert auf einem Post-Prozess-Regelkreis, welcher aus automatisierten Geometriemessungen eines gefertigten Zahnrades Korrekturparameter für

die Fertigung des nächsten Zahnrades ableitet. Da die Kosten für die Fertigung großer Verzahnungen um Größenordnungen über denen von Standardzahnradern aus der Automobilindustrie liegen, würde die Realisierung eines Qualitätsregelkreises für die Prozessoptimierung der Großverzahnungsfertigung dazu beitragen, die Fertigungstoleranzen deutlich zu senken, damit die Toleranzprüfungen zu erleichtern und die Gesamtkosten zu reduzieren. Um einen solchen Regelkreis realisieren zu können, welcher auch für kleine Zylinderräder noch nicht existiert, sind umfangreiche Untersuchungen zu Fertigungszusammenhängen und möglichen Stellgrößen sowie angepassten Regelungskonzepten erforderlich. Die im Rahmen dieses Vorhabens erstellten, grundsätzlichen Auflistungen, Betrachtungen und Regelungskonzepte legen einen der Grundsteine für zukünftige Realisierungen eines solchen Regelkreises.

Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge und der mit der späteren Realisierung verbundenen Risiken ist eine selbstfinanzierte Bearbeitung durch die Industrie sehr unwahrscheinlich. Um Fortschritte in diesem Bereich zu initiieren, konnten diese Arbeiten ebenfalls nur über eine geförderte Finanzierung von einem unabhängigen Forschungsinstitut durchgeführt werden.

Aufgrund der immer wieder vor Ende der geplanten Lebensdauer auftretenden Ausfälle von WEA-Getrieben, besteht offensichtlich noch eine Kenntnislücke bei den verantwortlichen Mechanismen. Da die Geometrie der Verzahnungen zwar nicht rückgeführt, aber doch recht präzise gemessen werden kann, wird davon ausgegangen, dass auch andere Parameter der gefertigten Verzahnungen zu den Ausfällen beitragen. Daher ist für die Sicherstellung zuverlässiger Messmöglichkeiten von Großverzahnungen für WEA auch die Entwicklung neuer Messverfahren zur Qualitätsanalyse von Großverzahnungen erforderlich. Zusätzliche Informationen wie die Rauheit der Zahnflanken oder eine Schleifbranderkennung sind wünschenswert, um die Fertigungsqualität besser überwachen zu können, so dass die Ausschussrate dieser teuren Bauteile minimiert werden kann. Dementsprechend erfolgte im Vorhaben die Untersuchung mehrerer Sensorprinzipien auf ihre Einsetzbarkeit an Koordinatenmessgeräten. Um diese Untersuchungen zu ermöglichen, wurde eine universelle Sensorschnittstelle entwickelt, die externe Sensoren und zusätzliche Bewegungsachsen an die Steuerungssoftware des Koordinatenmessgeräts anbindet, so dass auf eine aufwändige Implementierung der Steuerungsalgorithmen in die Steuerungssoftware des Koordinatenmessgeräts verzichtet werden konnte.

Die Erforschung der Anwendbarkeit von neuen Sensorprinzipien zur Qualitätsprüfung von Großverzahnungen birgt ein hohes finanzielles Risiko, da sich nicht vorab abschätzen lässt, ob die vorgesehenen Prinzipien erfolgreich eingesetzt werden können. Ohne ein Proof-of-Concept oder die Vorführbarkeit von kommerziell erhältlichen Sensoren ist auch die grundsätzliche Akzeptanz neuer Prinzipien bei den Anwendern von Großverzahnungsmessgeräten gering, da sich die Auswirkungen auf die Qualitätsprüfung und ihre Kosten anhand eines Konzepts nur sehr schwer vorhersagen lassen. Dementsprechend können Fortschritte auf

diesem technologisch und wirtschaftlich wichtigen Gebiet in der aktuellen Phase der Machbarkeitsuntersuchungen im Wesentlichen nur über eine finanzielle Förderung erfolgen.

4. Verwertbarkeit

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Nach Projektende ist vorgesehen, das **Prüflabor** des BIMAQ über die Deutsche Akkreditierungsstelle für die Kalibrierung von Großverzahnungen zu akkreditieren. Damit können zukünftig Großgetriebebauer ihre werkseigenen Normale und Meisterräder rückgeführt kalibrieren lassen. Dadurch wird sich das Qualitätsmanagement innerhalb der Betriebe wesentlich verbessern. Eine zuverlässige Qualitätsbewertung ist die Grundlage für eine gewinnbringende Erfassung und Steuerung von Fertigungsprozessen. Fertigungsfehler können frühzeitig behoben und ggf. korrigiert werden, so dass die Fertigungskosten für WEA-Getriebe sinken. Der interessierte Kundenkreis umfasst insbesondere Getriebebauer und Messgerätehersteller.

Die entwickelten **Normale** werden weiterhin für Rückführungsmaßnahmen verwendet. Durch sie kann die Akkreditierung und Überwachung weiterer Kalibrierlaboratorien für Großverzahnungen ermöglicht werden. Aufgrund der hohen wirtschaftlichen Bedeutung des Großgetriebebaus in Deutschland wird das Angebot einer Kalibrierdienstleistung auf diesem Gebiet sehr lukrativ sein. Es entstehen neue Arbeitsplätze.

Mit der Etablierung einer Kalibrierkette für Großverzahnungen können Großgetriebebauer Messgeräte zuverlässig vergleichen und Messprozesse beurteilen. Durch die Forschungsergebnisse ist es Großverzahnungsherstellern möglich, die für ihre Messaufgaben passende Messtechnik anzuschaffen. Aufgrund der Größenordnung der Anschaffungskosten (mind. 500.000 €) sind Fehlentscheidungen hier sehr kostenintensiv. Derartige Fehlinvestitionen können durch die Verwendung von kalibrierten Prüfkörpern für die Annahme- und Bestätigungsprüfungen von Messgeräten vermieden werden.

Durch die vom Partner Hexagon entwickelten **faseroptischen Sensoren (HP-O)** wird sich die Geschwindigkeit von Verzahnungsmessungen deutlich erhöhen. Darüber bieten sich dem Messgeräteanwender verschiedene wirtschaftliche Potenziale. Nutzt er den Geschwindigkeitsvorteil zur Reduktion der Messzeiten, können so Messkosten gespart und höhere Bauteildurchsätze auf einem Messgerät realisiert werden. Alternativ lassen sich bei gleichbleibender Messzeit auch mehr Messpunkte an unterschiedlichen Stellen der Zahnflanke erfassen. Damit bietet sich die Möglichkeit über die **flächenhaften Mess- und Auswertestrategien** einen umfangreicheren Datensatz zu generieren, welcher zu umfangreicheren Parametersätzen der Auswertung führt. Darüber kann eine Prozessoptimierung der Verzahnungsfertigung erreicht werden, welche zu reduzierten Fertigungskosten führt. Eine entsprechende Umsetzung in der Software der Messgerätehersteller erweitert das Angebotsspektrum und ermöglicht entsprechende Mehreinnahmen. Diese Strategien bieten darüber hinaus auch

Messgeräteherstellern von optischen Sensoren mit flächenhafter Messcharakteristik ein wirtschaftliches Verwertungspotenzial. Sie ermöglichen für geeignete Sensoren einen Markteintritt in die Verzahnungsmessung, welcher bislang aufgrund nicht-normkonformer Auswertemethoden nicht zu beobachten war. Hier können insbesondere die umfangreicheren Datensätze ein Beschaffungsargument für Messtechnikanwender sein.

Die entwickelte **Sensorschnittstelle und die Zusatzkinematik** erlauben Messgeräteherstellern und ihren Kunden die schnelle Anbindung neuer, externer Sensoren und deren Auswertalgorithmen an die Steuerung des Koordinatenmessgeräts ohne das Risiko des Messgerätausfalls durch neu implementierte Steuerungsmodule. Damit lassen sich bei beiden Kosten für Sensor- und Prüfprozessentwicklungsprozesse aufgrund der reduzierten time-to-market einsparen. Neben diesen Einsparungen bietet sich auch ein neuer Markt für innovative Sensorhersteller, die Sensorkonzepte zur Erweiterung der Qualitätsprüfung für Anwender umsetzen und diese über die Sensorschnittstelle in die beim Anwender etablierten Prüfprozesse integrieren. Über die Schnittstelle und die Kinematik können auch neuartige Multisensorkonzepte, welcher mehrere, gleichzeitige Prüfprozesse neben der eigentlichen Koordinatenmessung vorsehen, realisiert werden. Hiermit lassen sich Kosten beim Anwender durch die Reduktion der Prüfzyklen und durch eine verbesserte Qualitätsprüfung der Bauteile und eine daraus resultierende Fertigungsoptimierung einsparen.

Auch für die beiden zusätzlichen Messmethoden der **mikromagnetischen Randzonenanalyse** und der **specklebasierten Rauheitsmessung** konnten wirtschaftliche Verwertungspotenziale durch die Erweiterung der Qualitätsinformationen bzw. die Reduktion der Messzeit bei Implementation ins KMG identifiziert werden, sofern sich die Performance der Sensoren in weiteren Entwicklungen verbessern lässt (siehe Kap. II.1.4).

Sowohl die Sensorschnittstelle als auch die zusätzlichen Messmethoden sind nicht nur für den Einsatz an Verzahnungen von Interesse, sondern können auch auf andere Bauteilgeometrien und Prüfprozesse ausgeweitet werden, so dass sich ein zusätzliches Marktpotenzial für diese Lösungen anbietende Messgerätehersteller ergibt.

Etwa zwei Jahre nach Projektende sollen die entwickelten Verfahren und Normale richtungsweisend in weitere nationale Normungsgremien einfließen. Beispielhaft seien hier die ISO TC 60 WG 2 ‚Accuracy of gears‘ und der DIN NA 060-34-11 AA genannt. Durch Deutschlands Vorreiterstellung wird der deutschen Industrie hier ein Wettbewerbsvorsprung entstehen.

4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Unmittelbar nach Projektende:

- Mit dem Abschluss des Projekts ist in Deutschland eine Infrastruktur zur Kalibrierung von Großzahnradern aufgebaut. Als Dienstleister verfügt die PTB über nationale Bezugsnormale, die sie im Auftrag der DAkS einsetzt, um das noch zu gründende Kalibrierlabor für Großverzahnungen am BIMAQ bei der Akkreditierung zu unterstützen. Nach der

erfolgreichen Akkreditierung kalibriert das neue DAkkS-Kalibrierlabor Normale für die Industrie. Die im Projekt erarbeitete Infrastruktur wird der Industrie, zukünftigen Messdienstleistern und Forschenden zur Verfügung stehen und zur Optimierung des messtechnischen Umgangs mit Großgetriebebauteilen beitragen.

- Das Labor für Großverzahnungsmessungen ergänzt das vom BIMAQ betriebene Labor für Inside-Sensoring zur Entwicklung von Sensoren für die Windenergienutzung und die weiteren grundlegenden Messtechniklabore stehen neuen Vorhaben als umfangreiche Forschungsumgebung zur Verfügung und werden mit den Erfahrungen aus einer Vielzahl durchgeführter F&E-Messtechnikprojekte ergänzt.

1 - 2 Jahre nach Projektende:

- Kalibrierdienstleistungen und Schulungen zu den neuen Messverfahren werden vom BIMAQ durchgeführt.
- Aufgrund der ausgearbeiteten Verfahren, Normale und Dokumente können weitere Unternehmen Kalibrierlaboratorien aufbauen, um so der Nachfrage an kalibrierten Meisterrädern nachzukommen.
- Anhand von Großverzahnungsnormen sind Messgerätehersteller erstmals in der Lage, die Qualität Ihrer Verzahnungsmessung normgerecht und im Anschluss an die SI-Einheiten nachzuweisen. Abweichungen zwischen Messgeräten verschiedener Herstellern von bis zu 100 µm können bei rückgeführten Messung nicht mehr auftreten. Durch das Substitutionsverfahren ist die Korrektur systematischer Fehler und damit ein Genauigkeitsgewinn um den Faktor 10 möglich. Neben der Reputation fördert dies das Vertrauen in die oftmals teureren deutschen High-Tech-Produkte.

> 2 Jahre nach Projektende:

- Anhand zuverlässiger Daten können Forschungseinrichtungen und Entwicklungsabteilungen Arbeiten zur effizienteren Getriebeauslegung zielgerichteter vorantreiben. Durch Eingabe verlässlicher Parameter mit geringen Messunsicherheiten, lassen sich somit Simulationsmodelle besser einsetzen.
- Die flächenhafte Auswertung wird sich als Ergänzung zu den traditionellen Auswerteverfahren etablieren, da sie mehr funktionsbezogene Informationen über die Laufeigenschaften der Großverzahnungen liefern kann. Die eingeführten Parameter werden Einfluss auf die nationale und internationale Normung ausüben. Deutschland hat hier aufgrund des Erfahrungsvorsprunges gute Chancen seine Ideen im Bereich der Tolerierung als auch im Bereich der Messtechnik international zu festigen. Die Projektpartner werden in den nationalen und internationalen Normungsgremien aktiv mitarbeiten.
- Das Labor für Großverzahnungsmessungen mit dem Koordinatenmessgerät wird für mindestens weitere 10 Jahre für forschungsrelevante Aufgaben geeignet sein und damit Grundlage für weitere Forschungsvorhaben im Bereich der geometrischen Messtechnik von Großbauteilen und Multi-Sensorik eingesetzt werden.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Erkenntnisse zu den zusätzlichen Sensoren und zum Konzept für die Prozessoptimierung der Verzahnungsherstellung sollen in zu beantragenden Forschungsprojekten weiterverwendet werden, um die Erkenntnisse in diesen Bereich zu vertiefen und einer wirtschaftlichen Verwendung zuzuführen.

Die PTB und die Universität Bremen haben einen Auftrag zum Technologietransfer, welcher durch die beiden Institutionen systematisch unterstützt wird. Um Kontakt zu möglichen Kooperationspartnern für weitere Forschungsinitiativen aufzubauen, werden die folgenden Kanäle verwendet:

| Maßnahme | Inhalt | Zielgruppe |
|---|---|---------------------------------------|
| PTB-Jahresbericht; Internetseiten der PTB bzw. des BIMAQ | Allgemeine Information über das Projekt Erweiterung des Bekanntheitsgrades | PTB-intern/ ext. Interessierte |
| Gezielte Ansprache von Industrieunternehmen; Technologietransferangebot der PTB bzw. des BIMAQ | Verbreitung der Ergebnisse in Industrie | Interessierte Unternehmen |
| Veröffentlichung in Fachzeitschrift | Wissenschaftliche Publikationen der Ergebnisse und Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten | Fachpublikum |
| Fachvortrag | Know-How-Transfer der Forschungsergebnisse an ein breites Messtechnikpublikum | Fachpublikum |
| Messe | Präsentation der Ergebnisse auf internationalen Industriemessen durch Poster, Flyer und Ausstellung | Fachpublikum |
| Ergebnistransfer in nationale & internationale Normung | Überführung wesentlicher Ergebnisse in die nationale und internationale Normung | ISO TC 60 WG 2 DIN NA 060-34-11 AA |

Darüber hinaus sind die Projektpartner durch die bereits bestehende Gremienarbeit und die Mitgliedschaft in zahlreichen wissenschaftlichen/industriellen Organisationen strukturell gut aufgestellt, um die Erkenntnisse des Vorhabens in neue Projektideen einzubringen. Hier ist insbesondere die Kooperation mit zahlreichen Anwendern (z.B. Sensor-Hersteller, Messtechnikdienstleister, WEA-Hersteller usw.) in der Windenergie Agentur Bremerhaven (WAB e.V.) und dem Forschungsverbund ForWind bezüglich des Einsatzes der Projektergebnisse zu nennen. Damit soll sichergestellt werden, dass das Prüflabor und die entwickelten Algorithmen auch zukünftig Erkenntnisse zur Verbesserung der Fertigung, des Betriebs und der Wartung von WEA beitragen.

5. Fortschritt anderer Stellen

Allgemein hat sich ein ebenfalls vom BMWi gefördertes Verbundvorhaben mit der Entwicklung von Windenergieanlagen und deren Optimierung befasst („Erhöhung der Verfügbarkeit von Windkraftanlagen“). Hierbei liegt der Fokus jedoch nicht im Bereich der Messtechnik von Getriebekomponenten, sondern auf Analysen, Strategien und Methoden für einen optimierten Betrieb und die Instandhaltung.

Hinsichtlich der Erweiterung der Messmöglichkeiten von Koordinatenmessgeräten sind keine Fortschritte anderer Stellen bekannt.

Neben dem im Projekt entstandenen faseroptischen Geometriesensor für Verzahnungen (HP-O) befinden sich auch andere Sensoren aktuell in der Entwicklung. Sowohl im Bereich der Streifenprojektion als auch im Bereich der Laser-Lichtschnittmessung werden durch Messtechnikhersteller Versuche unternommen, Verzahnungen schnell und optisch zu erfassen (z.B. Firma GOM: Streifenprojektion; Firma Gleason: 3GMSL; Firma Nikon: HN-C3030). Im Gegensatz zum in diesem Projekt entwickelten Sensor, sind diese Verfahren jedoch nur für sehr raue bzw. nur vorbearbeitete Verzahnungen geeignet. Darüber hinaus werten sie die erfassten Datensätze nicht konsequent flächenhaft aus, so dass zukünftig noch weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich flächenhafter Mess- und Auswertestrategien besteht.

6. Literaturverzeichnis

Publikationen in Zeitschriften und Tagungsbänden:

- [Fre2014] von Freyberg, A.; Stöbener, D.; Pols, A.; Goch, G.: Indexing generation milling of gears and large gear segments. In: MTTRF Annual Meeting, San Francisco, USA, 2014, S. 153-170.
- [Bal2015] Balzer, F., Schäfer, M., Lindner, I., Günther, A., Stöbener, D., Westerkamp, J., 2015, Recent advances in optical gear measurements - A new approach for fast measurements of large gears, VDI-Berichte, International Conference on Gears, Garching, S. 655-666.
- [Stö2015] Stöbener, D.; von Freyberg, A.; Pols, A.; Goch, G.: Quality improvement of gears and large gear segments manufactured by indexing generation milling. In: MTTRF Annual Meeting, San Francisco, USA, 2015.
- [Gün2016] Günther, A.; Stöbener, D.; Goch, G.: Self-Calibration Method for a Ball Plate Artefact on a CMM. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 1 (2016), S. 503-506.
- [Fis2017] Fischer, A. (Hrsg.): BIMAQ Jahresbericht 2016/2017, Beschreibung EVeQT-Projekt, 2017, S. 5, 19.
- [Fre2017] v. Freyberg, A.; Fischer, A.: Automatic geometry segmentation of involute flank regions. In: International Conference on Gears 2017 (akzeptiert).

Pressemitteilungen:

<https://idw-online.de/de/news641928>

<http://www.bine.info/en/publications/news/grosse-getriebebauteile-zuverlaessig-vermessen/>