

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18200 N

## Thema

Integrierter optischer Absolutgeber und Drehmomentmesser (IntegrAD)

## Berichtszeitraum

01.05.2014 – 31.12.2016

## Forschungsvereinigung

Deutschen Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik e.V. (DFAM)

## Forschungsstelle(n)

Nr. 1, IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH (IPH)

Nr. 2, LZH – Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH)

Hannover, 17.03.2017

Ort, Datum

Tobias Schneider (IPH), Dr. Oliver Suttmann (LZH)

*T. Schneider*

*O. Suttmann*

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)



Forschungsnetzwerk  
Arbeitsmittelstand

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **1. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse**

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines kombinierten Messsystems zur optischen Bestimmung des Drehwinkels und des Drehmoments einer Welle und der dazugehörigen Produktionstechnologie für die Herstellung einer geeigneten Markierung der Welle. Insgesamt wurden drei Teilziele definiert:

### **1.1 Teilziel 1: Modularer Aufbau**

*Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:*

Das Messsystem soll aus unabhängigen Modulen aufgebaut sein, die sowohl getrennt die Winkelmessung, als auch zusammengesetzt die Drehmomentmessung erlauben. Zur einfacheren Integration des Systems in eine Anwendung (z. B. E-Motor), soll auf Codierscheiben und zusätzliche Torsionswellen verzichtet werden. Stattdessen sollen die Markierungen der Maßverkörperung durch ein Laserverfahren direkt auf die Oberfläche der Welle aufgebracht werden.

*Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:*

Im Forschungsprojekt wurden unabhängige Module entwickelt, die getrennt voneinander die absolute Winkelmessung ermöglichen und zusammengesetzt das Drehmoment bestimmen können. Auf Codierscheiben kann verzichtet werden, da die Markierungen direkt durch das untersuchte Laserverfahren auf die Oberfläche der Welle aufgebracht werden. Die Codierung des Winkels wird im nächsten Teilziel näher beschrieben.

### **1.2 Teilziel 2: Codierung des absoluten Winkels**

*Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:*

Zur Codierung des absoluten Winkels bietet sich z. B. das Nonius-Prinzip an. Hierfür werden mehrere Messskalen auf den Umfang der Welle aufgebracht. Jede Messskala besteht aus einer unterschiedlichen Anzahl an Perioden. So ist es möglich bei der Messung festzustellen, in welcher Periode die Welle sich befindet und den absoluten Winkel zu ermitteln. Je mehr Messskalen genutzt werden, desto höher wird der Interpolationsgrad der Hauptskala und desto höher wird die Winkelauflösung. Da das Drehmoment aus der Differenz der beiden Winkel bestimmt wird, hat die Winkelauflösung einen direkten Einfluss auf die Drehmomentmessgenauigkeit. Die Grenzen des Noniusprinzips für die Drehmomentmessung sollten deshalb untersucht werden. Daneben sollten auch andere Codierungsmöglichkeiten, wie die Binärcodierung, betrachtet werden.

Zur Erzeugung der Maßverkörperungen sollen drei unterschiedliche Laserverfahren auf ihre Eignung überprüft und evaluiert werden. Die zu untersuchenden Markierverfahren sind thermische Oxidation der Oberfläche, Materialabtrag mit einer Tiefe im Bereich der Oberflächenrauheit und die Oberflächenmodifikation. Bei den beiden erstgenannten Verfahren entsteht ein detektierbarer Kontrast aufgrund der Änderung des Reflektionsverhaltens der Oberfläche. Diese beiden Verfahren werden an gütegeschalteten Festkörperlasern entwickelt. Markierungen durch Oberflächenmodifikation verstärken die Streuung des reflektierten Lichtes. Für das Erstellen dieser Markierungen werden modengekoppelte Festkörperlaser benötigt. Die Evaluation der Markierverfahren beinhaltet die erreichbare Lesbarkeit (Detektion der

Markierungen), die Robustheit des Markierungsprozesses, die Prozessgeschwindigkeit und die Investitionskosten der für den jeweiligen Markierprozess notwendigen Strahlquellen.

*Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:*

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde die im Antrag beschriebene Nonius-Codierung untersucht und mit der so genannten Pseudo-Random-Codierung (PRC) verglichen. Aufgrund der Vorteile der PRC-Codierung und den Nachteilen der Nonius-Codierung wurde für diesen Anwendungsfall zur absoluten Winkelcodierung die PRC-Codierung genutzt und weiterentwickelt. Bisherige PRC-Codierungen konnten nur für eine feste Anzahl  $e$  verwendet werden, die durch  $2^m$  beschrieben werden kann mit  $m \in \mathbb{N}^*$ . (Es gilt entsprechend  $m = \log_2 e$  nach <sup>1</sup>). Beispiele für typische Markierungsanzahlen sind 1024, 2048 oder 4096. Durch die Weiterentwicklung ist nun eine beliebige Anzahl an Markierungen möglich, sodass die Markierung an beliebige Radien von Wellen angepasst werden kann. Die entwickelte PRC-Codierung wurde im Weiteren durch die sogenannte Manchester-PRC-Codierung (MPRC) erneut codiert, um die Genauigkeit zu verbessern. Daraus folgt, dass nun für die Anzahl der Markierungen alle geraden ganzen Zahlen realisiert werden können (es gilt also  $e = 2k$  mit  $k \in \mathbb{N}^*$ ).

Für die zu erzeugende Maßverkörperung wurden die drei Laserverfahren untersucht, hinsichtlich der definierten Kriterien bewertet und verglichen. Resultierend wurde die thermische Oxidation als Markierprozess für die Herstellung der Maßverkörperung gewählt, da hiermit kaum bis keine Oberflächenveränderungen erzeugt werden und die Detektierbarkeit, aufgrund eines deutlichen Farbumschlages, sehr gut ist.

### **1.3 Teilziel 3: Robustheit**

*Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:*

Das zu entwickelnde optische Messsystem soll besonders zuverlässig und robust gegenüber Störungen sein. Es soll Temperaturschwankungen und Erschütterungen aushalten, sowie Verschmutzungen und Kondensationsanfälligkeit der Welle tolerieren. Besonders soll es aber unempfindlich gegenüber verschiedenen Reflektionseigenschaften unterschiedlicher Oberflächen (glänzend, matt) sein.

*Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:*

Für die Umsetzung dieses Teilziels wurde eine robuste Bildverarbeitung entwickelt, die sowohl mit leichten Erschütterungen sowie Verschmutzungen und unterschiedlich reflektierenden Oberflächen gut funktioniert. In Hinblick auf das gesamte Messverfahren ist das hier verwendete Zoomobjektiv nicht für eine industrielle Anwendung zu verwenden. Das Zoomobjektiv ist für die optische Abbildung der Wellenoberfläche auf der Kamera verantwortlich. Diese bietet mit nur 10  $\mu\text{m}$  einen kleinen Schärfentiefenbereich, sodass Vibrationen dazu führen können, dass das Bild unscharf und dadurch unbrauchbar wird. Nichtsdestotrotz ist dieses Objektiv mit einer guten Abbildungsqualität und einer anpassbaren Vergrößerung gut für umfangreiche Untersuchungen des Messsystems geeignet, die im Rahmen des Forschungsprojekts notwendig waren. Für weitere Untersuchungen sind Festbrennweiten zu wählen und im besten Fall für dieses

---

<sup>1</sup> Balle B, Ventura E, Fuertes J M. An algorithm to design prescribed length codes for single-tracked shaft encoders. In: 2009 IEEE International Conference on Mechatronics. 2009. p. 1-6.

Messverfahren ausgelegte Festbrennweiten, die als Mikrolinsen ausgeführt sind. Die Simulation und Fertigung solcher Mikrolinsen war nicht Gegenstand dieses Vorhabens und bietet ausreichend Inhalt für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

#### **1.4 Zusammenfassung erzielter Ergebnisse**

Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass das Gesamtziel erreicht wurde. Ein kombiniertes Messverfahren zur optischen Bestimmung des absoluten Drehwinkels und Drehmoments wurde umgesetzt. Sowohl absolute Codierungen des Winkels als auch dazugehörige Produktionstechnologien für die Herstellung geeigneter Markierungen auf der Welle wurden untersucht und erfolgreich umgesetzt. Zu erwähnen ist, dass das dritte Teilziel – bezüglich der Robustheit – nur zum Teil erreicht wurde und weiterer Untersuchungen bedarf.

Der absolute Drehwinkel konnte mit einer Auflösung von etwa  $0,001^\circ$  bei einer Genauigkeit von besser als  $0,2^\circ$  (entspricht  $0,05\%$  v. E.) erfasst werden. Das Drehmoment wurde mit einer Genauigkeit von etwa  $3\%$  v. E. bestimmt.

**Weitere Informationen erhalten Sie unter:**

**DFAM e.V.**

**Lyoner Straße 18**

**60528 Frankfurt**

**Judith Binzer**

**[judith.binzer@vdma.org](mailto:judith.binzer@vdma.org)**