

Rotationsgeschwindigkeitsmessung mit Hilfe von „Self-Mixing“-Interferometrie

Yang Liu^{1,2}, Dr. -Ing. habil. Jigou Liu¹, Qiankun Song^{1,3}, Prof. Dr. -Ing. Dr. h.c. Ralph Kennel²

¹ ChenYang Technologies GmbH & Co. KG., Markt Schwabener Str. 8, 85464 Finsing, Deutschland

² Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München, Deutschland

³ Hochschule München, Lothstraße 64, 80335 München, Deutschland

E-Mail: yang.liu@chenyang.de

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Optimierung eines Messsystems beschrieben, mit der über die Methodik der „Self-Mixing“-Interferometrie ein Signal (SMI-Signal), das für die präzise Rotationsgeschwindigkeitsmessung eines Servomotors in Echtzeit genutzt werden kann, generiert wird. Das Messsystem zeigt initial ein hohes Rauschverhalten, was das SMI-Signal in erheblichem Maße stört und die Rotationsgeschwindigkeitsmessung signifikant erschwert. Als Ursache ist der Servomotor selbst identifiziert worden, dessen Einfluss durch Abschirmungen und durch die Eliminierung von Systemschwachstellen minimiert worden ist. Dadurch konnte das Rauschverhalten des Messsystems stark verbessert werden. Nach der Beseitigung des Störsignals wird eine neuentwickelte Signalverarbeitungsmethode zur Ermittlung der Rotationsgeschwindigkeit über das SMI-Signal vorgestellt. Diese Methode nutzt zur Rauschunterdrückung die Autokorrelationsfunktion und selektiert mithilfe eines Algorithmus Signalabschnitte, die für eine präzise Messung geeignet sind. Weiterhin wird über eine Nullpunktdetektion die Frequenz des SMI-Signals, die für die Ermittlung der Rotationsgeschwindigkeit essentiell ist, ermittelt. Mithilfe dieser Methode konnten vielversprechende Ergebnisse erzielt werden.

Keywords: Drehzahlmessung, Drehzahlgeber, „Self-Mixing“-Interferometrie, Autokorrelation, Rauschunterdrückung

Einleitung

In Anwendungen der Automobilindustrie erweisen sich Geschwindigkeit und Position als bedeutsame Parameter. Insbesondere bei Servomotoren sind sie wichtige Themen, da hier eine dreifach kaskadierte Regelungsstruktur für Torsions-, Geschwindigkeits- und Positionsregelung verwendet wird [1]. Während Servomotoren mit analogen Regelungen für jede Regelungsdimension jeweils einen separaten Sensor benötigen, ist bei digitalen Regelungen nur ein Sensor vonnöten. Für Geschwindigkeitsmessungen wird daher in vielen Fällen ein optischer Encoder verwendet [2]. Dabei werden eine Lichtquelle und ein Fotodetektor auf verschiedene Seiten einer Scheibe mit transparenten und undurchsichtigen Bereichen positioniert. Das Licht der Lichtquelle passiert lediglich die transparenten Bereiche. Dadurch wird eine Pulssequenz generiert, mit der die Geschwindigkeit sowie die Position der Scheibe ermittelt werden kann. Da bei einem optischen Encoder 10000 bis 50000 Linien pro Umdrehung möglich sind, erweist sich ihre Auflösung als hoch. Für hohe Auflösungen müssen jedoch hohe Kosten in Kauf

genommen werden. Darüber hinaus kommt beispielsweise in elektrischen Antrieben in der Elektromobilität der Geschwindigkeit im Gegensatz zu Industrieantrieben ein höheres Gewicht als der Position zu. In solchen Fällen wird eine direkte Geschwindigkeitsmessung angestrebt, die nicht über den Umweg der Position erfolgt. Deshalb konzentriert sich die Forschung auf die Laserinterferometrie.

Bei der Laserinterferometrie handelt es sich um eine etablierte Technologie, die in vielen Bereichen wie die mechanische Messtechnik, Profilometrie, Vibrometrie und Geschwindigkeitsanalyse Anwendung findet. Im Gegensatz zu optischen Encoder, deren Funktionsweise auf die Zählung der Striche am Zielobjekt beruht, erhalten Interferometrie-Sensoren ihre Messergebnisse durch die Interferenz ihrer intrinsischen Wellenlängen. Dadurch erhält man inhärent hohe Auflösungen und Genauigkeiten [3].

Die „Self-mixing“-Interferometrie (SMI) ist eine Subkategorie der Laserinterferometrie, die sich wachsender Beliebtheit in der Forschung erfreut [4] [5]. Dabei handelt es sich um eine Messtechnik, in welcher der Laserstrahl einer

Laserdiode von einem Objekt zurück zum Laser reflektiert wird. Gemäß dem schematischen Aufbau in Abbildung 1 kann diese Messtechnik für die Rotationsgeschwindigkeitsmessung genutzt werden.

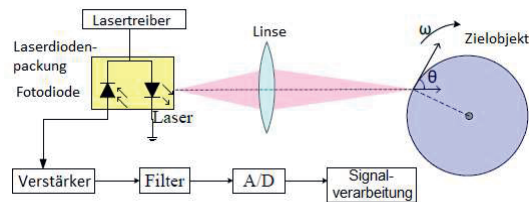


Abb.1: Schematische Aufbau einer SMI-Geschwindigkeitsmessung (in Anlehnung an [3])

Es kommt zu einer Interferenz zwischen dem reflektierten Licht und dem Lichtstrahl des Lasers, wodurch die Amplitude und Frequenz des Lasers infolge des Doppler-Effekts verändert wird. Die Frequenzverschiebung (f_D) moduliert die Ausgangsleistung des Lasers und ist gemäß Gl. (1) direkt proportional zur Rotationsgeschwindigkeit eines Objekts.

$$f_D = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

Dabei repräsentiert λ die Wellenlänge der Laserdiode, θ den Winkel zwischen der Einfallrichtung des Laserstrahls und der Bewegungsrichtung des Zielobjekts und v die lineare Geschwindigkeit des Zielobjekts. Indem die Ausgangsleistung eines Lasers mit einer in der Laserdiode integrierte Fotodiode beobachtet wird [6], kann ein Signal (SMI-Signal) extrahiert werden, mit dem die Rotationsgeschwindigkeit des Objekts über analoge und digitale Signalverarbeitungsmethoden ermittelt werden kann [3].

Im Folgenden wird das Messsystem, das für die SMI-Signal Extrahierung aufgebaut worden ist, sowie ein initiales Systemdefizit vorgestellt. Anschließend wird erläutert, wie das Defizit behoben werden konnte. Im zweiten Teil wird eine neuentwickelte Signalverarbeitungsmethode präsentiert, mit dem die Rotationsgeschwindigkeit des Objekts mithilfe des SMI-Signals präzise ermittelt werden soll.

Messsystemaufbau und Optimierung

Abbildung 2 präsentiert den Aufbau des Messsystems.

Über die Stromversorgung und der Treiberschaltung wird der Laserdiode im Sensorkopf ein konstanter Strom zugeführt. Die Laserdiode sendet ein Laser, der von den Linsen im Sensorkopf fokussiert wird und auf

die Mantelfläche einer zylindrischen Scheibe trifft, die mit der Achse eines Servomotors verbunden ist. Der Servomotor wird dabei über einen Computer gesteuert und rotiert die Scheibe mit einer festgelegten Rotationsgeschwindigkeit um die eigene Achse. Es wird ein optisches Feedback im Laserstrahl generiert, der sich in der Ausgangsleistung des Lasers bemerkbar macht und von der Fotodiode, die in der Laserdiode integriert ist, erfasst wird. Die Fotodiode leitet die Ausgangsleistung an die Vorverarbeitungsschaltung weiter, in der das SMI-Signal extrahiert und verstärkt wird. Abschließend sendet die Schaltung das SMI-Signal an das Oszilloskop weiter, welches das SMI-Signal visualisiert. Aus dem Oszilloskop können Datensätze zum SMI-Signal entnommen werden, die mithilfe von verschiedenen Softwareprogrammen bearbeitet werden können.

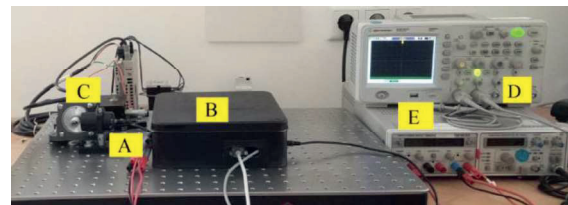


Abbildung 2: initialer Systemaufbau A: Sensorkopf; B: Treiberschaltung + Vorverarbeitungsschaltung; C: Servomotor; D: Oszilloskop; E: Stromversorgung

Das System hat jedoch Schwächen vorzuweisen. Eine davon ist das hohe Rauschverhalten, welchem das System ausgesetzt ist.

Abbildung 3 visualisiert das Rauschverhalten des Systems sowie das dadurch generierte SMI-Signal.

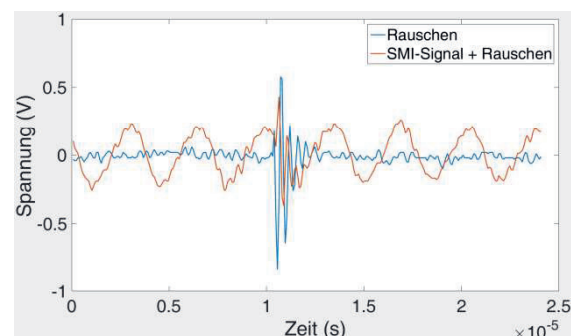


Abbildung 3: initiales Rauschverhalten des Messsystems und generiertes SMI-Signal

Das Rauschen überlagert sich mit dem SMI-Signal, wodurch das Signal in erheblichem Maße verzerrt wird. Auch sind in regelmäßigen

Abständen sehr hohe Spitzen des Rauschverhaltens zu finden. Somit wird das SMI-Signal signifikant gestört, was die Nutzung des Signals für die präzise Geschwindigkeitsmessung erschwert.

Aus diesem Grund sind Maßnahmen erforderlich, mit denen das Rauschverhalten des Messsystems auf ein akzeptables Maß reduziert wird. Es können dabei drei Vorgehensweisen verfolgt werden:

1. Eliminierung der Störquellen
2. Analoge Rauschunterdrückung in der Schaltung
3. Digitale Rauschunterdrückung durch Signalverarbeitungsmethoden

Dieser Teil des Beitrags befasst sich mit der Verfolgung der ersten Vorgehensweise. Auf Basis einer ausführlichen Ursachenanalyse sollen die Störquellen identifiziert und mithilfe geeigneter Maßnahmen eliminiert oder ihre Wirkungen zumindest auf ein Minimum reduziert werden.

Die Ursachenanalyse hat ergeben, dass das Rauschen insbesondere durch den Einfluss des verwendeten Servomotors entsteht. Im Betriebsmodus sendet der Motor elektromagnetische Wellen sowie Schallwellen aus, welche die Vorverarbeitungsschaltung im erheblichen Maße stören.

Um die Einfluss beider Wellen zu beseitigen sind zwei Ansätze verfolgt worden. Als ersten Schritt ist um den Servomotor ein Aluminiumgehäuse angebracht worden. So können beide Wellen um einen gewissen Maß abgedämpft werden. Abbildung 4 stellt die Wirkung dieser Maßnahme dar.

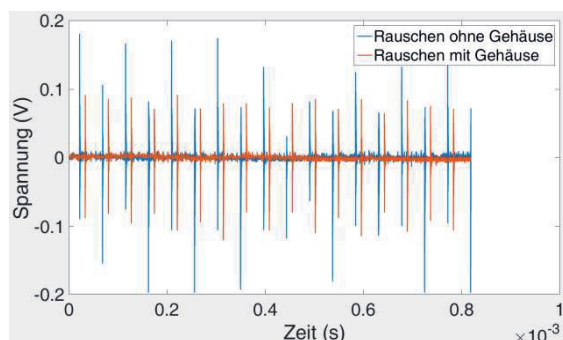


Abbildung 4: Rauschen des Messsystems mit und ohne Aluminiumgehäuse zur Dämpfung hochfrequenten Schalls

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Spitzen kleiner geworden sind (siehe Abb. 4), weshalb die Maßnahme als Erfolg quitiert wird. Um die

Dämpfung der Schallwellen zu erhöhen, muss entweder die Blechdicke des Gehäuses erhöht oder ein Material mit höherer Masse pro Rohdichte verwendet werden. Wird eine industrielle Anwendung der „Self-mixing“-Interferometrie angestrebt, müssten zur Verringerung der Rauschleistung durch vollständige Dämpfung der Schallwellen möglicherweise hohe Materialkosten und/oder ein hohes Gewicht des Sensors in Kauf genommen werden.

Um diese Probleme zu vermeiden, ist für den Umgang mit beiden Wellenarten ein weiterer Ansatz verfolgt worden. Anstatt die Schallwellen zu dämpfen, ist die Suche nach der Stelle des Messsystems initiiert worden, die am stärksten durch die Schallwellen gestört wird. Als Systemschwachstelle hat sich dabei der Verbindungskabel zwischen Fotodiode und Vorverarbeitungsschaltung herausgestellt. Über diesem Kabel sendet die Fotodiode die Ausgangsleistung des Lasers als Stromfluss an die Vorverarbeitungsschaltung, wo er als ersten Schritt über einen Transimpedanzverstärker in eine Spannung umgewandelt wird. Der Stromfluss erweist sich als sehr störanfällig, weshalb die Strecke, die der Ausgang der Fotodiode als Stromfluss zurücklegt, minimiert werden muss. Aus diesem Grund ist der Verbindungskabel entfernt und die Vorverarbeitungsschaltung ausschließlich durch eine Steckverbindung mit der Laserdiode angeschlossen worden.

Abbildung 5 visualisiert das Resultat dieser Maßnahme.

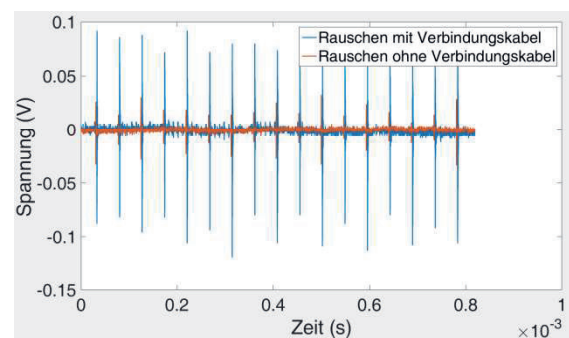


Abbildung 5: Rauschen des Messsystems mit und ohne Verbindungskabel zwischen Fotodiode und Verarbeitungsschaltung

Es ist eine deutliche Reduzierung des Rauschens festzustellen. Die Verbesserung erweist sich als höher als bei der Dämpfung der Schallwellen durch das Aluminiumgehäuse.

Abbildung 6 zeigt das Resultat beider Maßnahmen.

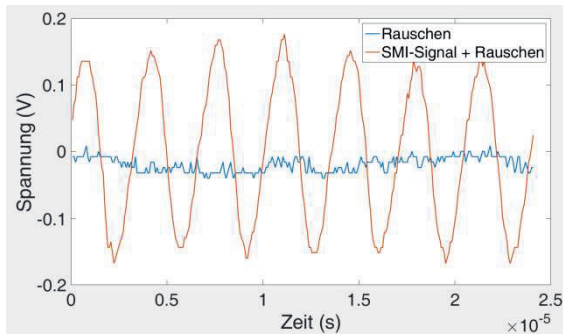


Abbildung 6: Rauschverhalten des Messsystems und generiertes SMI-Signal nach den Maßnahmen

Insgesamt kann eine erhebliche Reduzierung der Rauschleistung festgestellt werden. Das SMI wird durch Rauschen in geringerem Maße gestört und weist eine sauberere Form auf.

Signalverarbeitungsmethode

In den letzten Jahren sind Anstrengungen unternommen worden, Signalverarbeitungsmethoden für eine industrielle Nutzung des SMI-Signals für Rotationsgeschwindigkeitsmessungen zu nutzen. [7] verwendet die analoge Phasenregelschleife-Methode sowie eine angemessene Abtastfrequenz, um im Messbereich von 10-470mm eine Genauigkeit von 1.3% zu erreichen. In [3] wird die Fast-Fourier-Transformation zur Abschätzung der Rotationsgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von 1% genutzt, während sich [8] [9] mit dem Einfluss verschiedener Parameter auf den SMI-Signal und die Genauigkeit von Geschwindigkeitsmessungen befassen. Eine industrielle Anwendung konnten mit den Methoden aus [3] [7] aber noch nicht umgesetzt werden.

In diesem Teil des Beitrags wird deswegen eine alternative Signalverarbeitungsmethode, die für die präzise Geschwindigkeitsmessung entwickelt worden ist, vorgestellt. Mit ihr soll es möglich sein, die Frequenz des SMI-Signals sowohl in Echtzeit als auch mit hoher Genauigkeit zu ermitteln. Wie bereits erläutert worden ist, wird das Verhältnis zwischen Frequenz des SMI-Signals und der Rotationsgeschwindigkeit des Zielobjekts durch Gl. (1) beschrieben. Es ist hierbei eine lineare Abhängigkeit festzustellen. In der Regel sind die anderen Parameter der Gleichung wie beispielsweise Einfallswinkel des Lasers und Laserwellenlänge nach einer festen Positionierung des Sensors Konstanten, wodurch die Rotationsgeschwindigkeit die

einzigste Variable der Gleichung darstellt. Wenn die Frequenz bekannt ist, kann nach einer Umstellung der Formel die Rotationsgeschwindigkeit mit Leichtigkeit ermittelt werden. Somit stellt die Frequenzabschätzung der wichtigste Teil der Rotationsgeschwindigkeitsmessung dar.

Abbildung 7 visualisiert ein typisches SMI-Signal, das aus dem System generiert wird.

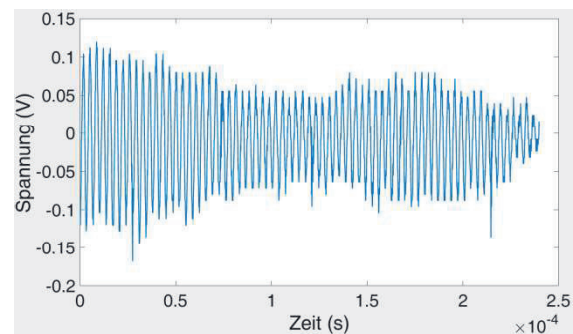


Abbildung 7: typisches SMI-Signal

Es handelt sich um eine sinusförmige Welle mit variierender Amplitude, die durch Rauschen gestört wird. Der Signalverarbeitungsalgorithmus muss in der Lage sein, den Einfluss des Rauschens zu minimieren, ohne die Frequenz des Nutzsignals zu verändern.

Dementsprechend werden im entworfenen Signalverarbeitungsalgorithmus folgende Schritte durchgeführt.

1. Autokorrelation
2. Signalselektion
3. Nullpunktdetektion und Frequenzbestimmung

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte näher erläutert.

Autokorrelation

Die Autokorrelation ist ein Begriff der Signalverarbeitung, mit dem die Ähnlichkeit bzw. Korrelation eines Signals mit sich selbst bei unterschiedlichen Zeitverschiebungen τ zwischen den betrachteten Funktionswerten ermittelt wird. Allgemein ist sie wie folgt definiert:

$$\phi_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) * x(t - \tau) dt \quad (2)$$

Folgende Eigenschaften macht die Autokorrelationsfunktion für die Rauschunterdrückung interessant [10]:

- Die Autokorrelationsfunktion eines periodischen Signals ist ebenfalls

periodisch und besitzt dieselbe Frequenz.

- Unabhängig von seiner Phasenlage ist für jede harmonische Schwingung die Autokorrelationsfunktion eine Kosinusfunktion.
- die Autokorrelationsfunktion eines stochastischen offsetfreien Rauschsignals stellt einen Deltaimpuls dar, die mit wachsender Verzögerungszeit τ gegen null verläuft.

Mit der Autokorrelationsfunktion ist es somit möglich, das Rauschen eines Signals zu unterdrücken, ohne Informationen über die Signalfrequenz zu verlieren.

Aus diesen Gründen wird im ersten Schritt der Signalverarbeitungsmethode die Autokorrelationsfunktion des SMI-Signals berechnet und fortlaufend aktualisiert. Dabei wird die diskrete Version der Autokorrelation angewandt [11].

$$\phi_{xx}(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) * x(k-n) \quad (3)$$

Für die Ermittlung der Signalfrequenz f_D muss n mindestens die Anzahl an Punkte für dreiviertel einer Signalperiode betragen. Für bessere Messgenauigkeiten hat sich jedoch während unserer Forschungsarbeiten eine Betrachtung von zwei ganzen Perioden bewährt, weshalb eine Punktezahl für mindestens das 2.25-fache einer Signalperiode empfohlen wird. Diese Anzahl wird vom Algorithmus zuvor ermittelt.

N kann prinzipiell beliebig groß gewählt werden. Eine vollständige Rauschunterdrückung ist bei einer unendlich großen Menge an Abtastpunkte ($N \rightarrow \infty$) möglich. Dies ist zwar in der Praxis nicht realisierbar, doch auch mit einer begrenzten Zahl an Abtastpunkte sind Rauschunterdrückungen bis zu einem gewissen Maß umsetzbar. Dabei gilt, dass gegenüber der geometrischen Standardabweichung $\overline{\sigma_{xx}}(n)$ des Produkts der Abtastwerte in einer Periode die Standardabweichung der Autokorrelationsfunktion $\sigma_{\phi_{xx}}(n)$ entsprechend dem Faktor \sqrt{N} verkleinert wird [11].

$$\sigma_{\phi_{xx}}(n) \approx \frac{\overline{\sigma_{xx}}(n)}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

Abbildung 8a und b visualisieren das Ergebnis der Autokorrelation.

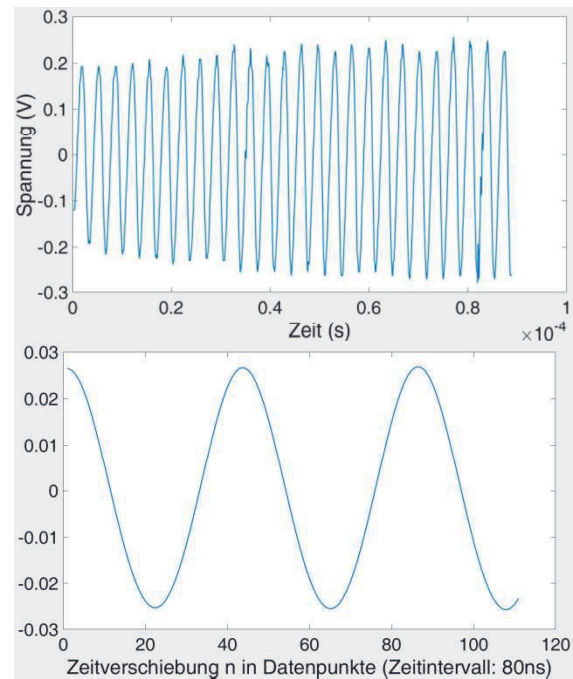


Abbildung 8: a) betrachteter SMI-Signalabschnitt; b) Autokorrelationsfunktion des Signalabschnitts

Aus dem betrachteten Signalabschnitt in Abbildung 8a resultiert die Autokorrelationsfunktion in Abbildung 8b. Für die Parameter τ und N sind die Werte 110 und 1000 gewählt worden. Es entsteht eine saubere Kosinusfunktion, an der keine Störungen zu erkennen sind.

Somit gestaltet sich die Rauschunterdrückung als stärker, je größer die N gewählt wird. Auf diese Weise kann die Messgenauigkeit erhöht werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass große Werte für N die Reaktionsfähigkeit der Signalverarbeitungsmethode auf Geschwindigkeitsänderungen reduziert. Diese Vermutung muss in spätere Forschungsvorhaben geprüft werden.

Signalselektion

Wie Abbildung 7 verdeutlicht, erweist sich das SMI-Signal als eine sinusförmige Welle mit variierender Amplitude. Dadurch sind bestimmte Teile des SMI-Signals mehr für die Dopplerfrequenzbestimmung geeignet als andere. Dies liegt im Signal-Rausch Verhältnis (=SNR) begründet. Sie ist wie folgt definiert [10].

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{P_{Signal}}{P_{Rauschen}} \right) dB \quad (5)$$

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen und Systemeigenschaften die

durchschnittliche Rauschleistung über die Zeit nicht oder nur in geringfügige Maße verändert. Dementsprechend erhöht sich mit steigender Signalamplitude auch die SNR und umgekehrt. Für eine präzise Messung muss der Einfluss des Rauschens so gering wie möglich gehalten werden, weshalb ein hoher SNR angestrebt wird. Im Signalverarbeitungsalgorithmus wird deshalb eine Signalselektion implementiert, in der Signalabschnitte mit zu geringem SNR von den nachfolgenden Verarbeitungsschritten ausgeschlossen werden. Als Entscheidungskriterium wird dabei der Effektivwert der Autokorrelation eines Signalabschnitts gewählt. Erst wenn sie einen bestimmten Schwellenwert überschritten hat, wird eine Weiterverarbeitung des betrachteten Signalabschnitts initiiert.

Nullpunktdetektion und Frequenzbestimmung

An der Autokorrelationsfunktion der Signalabschnitte, die der Signalselektionsalgorithmus als geeignet für die Weiterverarbeitung befunden hat, wird anschließend eine Nullpunktdetektion durchgeführt. Die Signalverarbeitungsmethode detektiert die Stellen, an denen sich die Vorzeichen der Signalwerte ändern. An diesen Stellen wird über eine lineare Regression mit Datenpunkten um die Stellen herum eine Ausgleichsgerade generiert, mit der die Nullstelle ermittelt wird (siehe Abbildung 9).

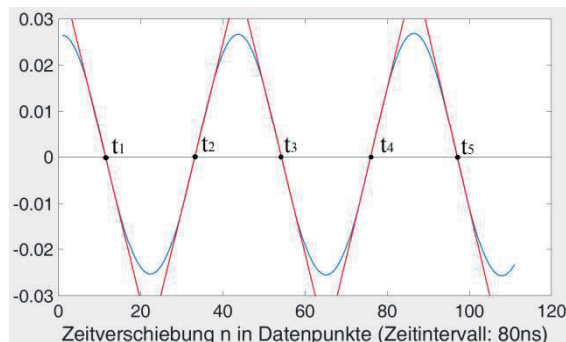


Abbildung 9: Ausgleichsgeraden für die Nullpunktbestimmung

Sind die Positionen von alle erforderlichen Nullstellen in der Autokorrelationsfunktion ermittelt worden, so wird die Frequenz des SMI-Signals über folgende Formel ermittelt.

$$f_D = \frac{1}{0,5 \cdot (t_5 - t_1) \cdot f_s} \quad (6)$$

Dabei stehen t_5 und t_1 für die Position der Nullstellen, während f_s die Abtastfrequenz repräsentiert. Abschließend kann die

Rotationsgeschwindigkeit mithilfe von Gl. 1 ermittelt werden.

In unseren Forschungsanstrengungen sind mehrere Möglichkeiten für die Ermittlung der Dopplerfrequenz mithilfe von maximal fünf Nullstellen überprüft worden. Zum Zeitpunkt dieses Beitrages ist Gl. 6 die Berechnungsmethode, bei denen die Nichtlinearitäten am geringsten gewesen sind. Weitere Forschungsarbeiten für die ideale Bestimmung der Dopplerfrequenz über Nullstellen sind geplant.

Messergebnisse

Die Wirksamkeit des Signalverarbeitungsmethode ist wie folgt geprüft worden:

Im ersten Schritt ist die Linearität zwischen der Dopplerfrequenz, die über die Signalverarbeitungsmethodik ermittelt worden ist, und der Rotationsgeschwindigkeit geprüft worden. Dazu sind unter folgenden Parametern SMI-Signale extrahiert worden.

Tabelle 1: Parametereinstellungen des Messsystems

Parameter	Wert
Rotationsgeschwindigkeit	5, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 RPM
Objektdurchmesser	40 mm
Laserwellenlänge	785 nm

Anschließend ist die Signalverarbeitungsmethode an Ihnen angewandt worden. Dabei sind für n 400 und für N 3000 ausgewählt worden. Aus 15000 Messwerten pro Rotationsgeschwindigkeit sind für jede Geschwindigkeit Mittelwerte erzeugt worden. Tabelle 2 visualisiert das Resultat.

Tabelle 2: Ergebnisse des Messexperiments

Rotationsgeschwindigkeit (in RPM)	Ergebnis (in Hz)
5	19709.384
10	39452.750
20	78844.825
30	118441.050
40	157385.265
50	197586.159
75	295866.171
100	392123.353
125	492757.194
150	591602.127
175	688991.484
200	787732.170

Mithilfe dieser Datenpunkte wird anschließend über die lineare Regression eine Ausgleichsgerade erstellt, um die Nichtlinearität $NL(w)$ der Daten zu ermitteln. Die Nichtlinearität bei einer Geschwindigkeit wird in diesem Beitrag wie folgt definiert:

$$NL(w) = \frac{f_o(w) - f_{ag}(w)}{f_{ag}(w)} * 100\% \quad (7)$$

f_o repräsentiert dabei die Dopplerfrequenz der Signalverarbeitungsmethodik, während f_{ag} die Dopplerfrequenz der Ausgleichsgerade darstellt. Das Resultat ist in Abbildung 10 und Tabelle 3 zu sehen.

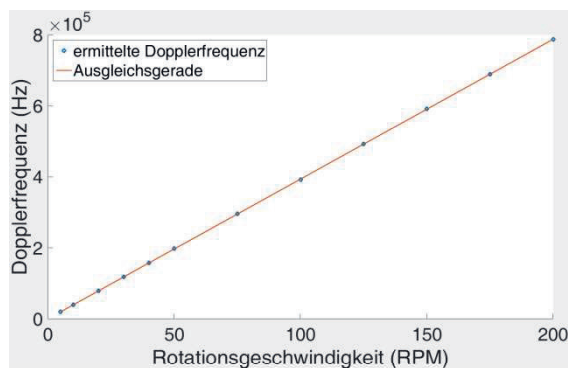


Abbildung 10: Proportionalität zwischen Rotationsgeschwindigkeit

Tabelle 3: Nichtlinearität der ermittelten Dopplerfrequenzen

Rotationsgeschwindigkeit (in RPM)	Dopplerfrequenz der Ausgleichsgerade (in Hz)	Nichtlinearität (in %)
5	19783.872	0.38
10	39474.372	0.05
20	78855.372	0.01
30	118236.372	-0.17
40	157617.372	0.15
50	196998.372	-0.30
75	295450.872	-0.14
100	393903.372	0.45
125	492355.872	-0.08
150	590808.372	-0.13
175	689260.872	0.04
200	787713.372	0.00

Es ist eine maximale Nichtlinearität von 0.45 % festzustellen. Somit besteht grundsätzlich eine Proportionalität zwischen Messergebnissen der Verarbeitungsmethode und Rotationsgeschwindigkeit, was eine Ermittlung der Geschwindigkeit mithilfe dieser Methode möglich macht. Es besteht die Möglichkeit, dass die Abweichungen in Abbildung 10

reduziert oder sogar eliminiert werden, falls eine größere Menge an Werten für die Durchschnittsbildung angewandt wird. Dieser Vermutung wird in weitergehenden Forschungsanstrengungen nachgegangen.

Tabelle 4 stellt weitere Informationen bezüglich der Messwerte der Methode zur Verfügung. Es sind die maximale Abweichungen sowie die Standardabweichungen von 15000 Messwerten pro Geschwindigkeit zum entsprechenden Wert der Ausgleichsgerade ermittelt und in Prozentzahlen dokumentiert worden. Auf diese Weise werden erste Aussagen über die Genauigkeit der Methode gemacht.

Tabelle 4: Abweichungen der Messergebnisse vom Mittelwert

Rotationsgeschwindigkeit (in RPM)	Max. Abweichung (in %)	Standardabweichung (in %)
5	1.50	0.60
10	1.11	0.53
20	0.86	0.46
30	1.03	0.57
40	1.48	0.64
50	1.72	0.73
75	1.26	0.62
100	1.31	0.37
125	1.13	0.57
150	0.77	0.33
175	0.98	0.33
200	0.57	0.28

Die Ergebnisse in Tabelle 4 erweisen sich als sehr vielversprechend. Die maximale Abweichung beträgt höchstens 1.72%, während die Standardabweichung mit 0.73% als höchster Wert stets unter 1% bleibt. Bei 200 RPM beträgt die Standardabweichung zum Mittelwert sogar 0.278 %, was das große Potenzial dieser Methode verdeutlicht, auch industriell genutzt werden zu können.

Zusammenfassung und Ausblick

In Rahmen eines Forschungsprojektes wird ein Messsystem genutzt, der mithilfe „Self-Mixing“-Interferometrie ein Signal (SMI-Signal), das für die präzise Messung von Rotationsgeschwindigkeiten eines Servomotors genutzt werden kann, erzeugt. Dieses Messsystem weist hohes Rauschverhalten auf, das sich mit dem SMI-Signal überlagert und Messergebnisse signifikant beeinträchtigt. Nach einer Ursachenanalyse sind Schallwellen und elektromagnetische Wellen, die der

Servomotor aussendet und auf die Vorverarbeitungsschaltung des Messsystems einwirken, als die primären Störquellen identifiziert worden. Die Wirkung dieser Wellen ist minimiert worden, indem der Servomotor mit einem Aluminiumgehäuse abgeschirmt und beide Wellen abgedämpft worden sind. Außerdem ist mit dem Verbindungskabel zwischen Fotodiode und Vorverarbeitungsschaltung das Systemteil entfernt worden, das am empfindlichsten auf Störfaktoren reagiert. Dadurch konnte die Rauschleistung des Messsystems stark verringert und die Messergebnisse verbessert werden. Es ist darüber hinaus eine neue Signalverarbeitungsmethode zur Ermittlung der Rotationsgeschwindigkeit über das SMI-Signal entstanden. Diese Methode nutzt im ersten Schritt die Autokorrelationsfunktion, da sie in der Lage ist, das Rauschen eines Signals zu unterdrücken, ohne zu einem Verlust von Informationen bezüglich der Signalfrequenz zu führen. Mithilfe eines Selektionsalgorithmus werden anschließend Signalabschnitte, die zu schlechten Messergebnissen führen, von der Weiterverarbeitung ausgeschlossen. An den verbleibenden Abschnitten wird über eine Nullpunktdetektion die Frequenz des SMI-Signals, die für die Ermittlung der Rotationsgeschwindigkeit essentiell ist, ermittelt. Die Nullpunktdetektion erfolgt dabei über eine Ausgleichsgerade, die über eine lineare Regression mit Datenpunkten um die Nullstelle herum gebildet wird. Erste Messergebnisse erweisen sich als vielversprechend und zeigen das Potenzial der Methode, auch in industriellen Anwendungen genutzt werden zu können. Dennoch müssen weitere Untersuchungen bezüglich folgender Aspekte unternommen werden:

- Verbesserung der Signalverarbeitungsmethodik zur Erhöhung der Genauigkeit
- Reduzierung der Nichtlinearitäten der Signalverarbeitungsmethodik
- Analyse der Reaktionsfähigkeit der Methodik auf Geschwindigkeitsänderungen
- Prototypenherstellung

Literaturnachweis

- [1] R. M. Kennel. IEEE Transactions on Industry Applications 43, 1572-1577 (2007); doi: 10.1109/TIA.2007.908161
- [2] P. Drabarek, R. M. K. Fiet. 4th IET Conference on Power Electronics Machines and Drives, 149-153 (2008); doi: 10.1049/cp:20080501
- [3] H. Sun, J. G. Liu, Q. Zhang, R. Kennel. Applied Optics 55, 236-241 (2016). doi: 10.1364/AO.55.000236.
- [4] S. Donati. Laser & Photonics Reviews 6, 393-417 (2012). doi: 10.1002/lpor.201100002
- [5] T. Taimre, M. Nikolic, K. Bertling, Y. L. Lim, T. Bosch, A. D. Rakic. Advances in Optics and Photonics 7, 570-631 (2015). doi: 10.1364/AOP.7.000570
- [6] G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati, and T. Bosch, Journal of Optics A Pure and Applied Optics 4, 283 (2002). doi: 10.1088/1464-4258/4/6/371
- [7] W. Huang, H. Q. Gui, L. Lu, J. P. Xie, H. Ming, D. Y. He, H. Q. Wang, T. P. Zhao. Optics Communications 281, 1662-1667 (2008). doi: 10.1016/j.optcom.2007.11.029
- [8] H. Sun, J. G. Liu, R. Kennel. Adaptive Optics: Analysis, Methods & Systems, JT3A.4 (2016). doi:10.1364/3D.2016.JT3A.4
- [9] H. Sun, J. G. Liu, R. Kennel. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 236-241 (2017). doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969922
- [10] J. Detlefsen, U. Siart. Grundlagen der Hochfrequenztechnik. 2. Auflage, Oldenbourg, München (2006), ISBN: 3-486-57866-9
- [11] J.G. Liu. Eigenkalibrierende Meßverfahren und deren Anwendungen bei den Messungen elektrischer Größen. Technische Universität Dresden, Dissertation (1999).