

Robuste Mehrachsendirektantriebe hoher Leistungsdichte mit sensorloser Drehzahlregelung

Robust multiple axes direct drive with high power density and sensorless control

Dr.-Ing. Ralf Kruse, Dr.-Ing. Mathias Gutemann, Dr.-Ing. Georg Konstas, Dr.-Ing. Thomas Kalker
WITTENSTEIN AG, Igersheim

Kurzfassung

Der Beitrag beschäftigt sich mit einem neuartigen Zweiachsendirektantrieb, bestehend aus zwei permanentmagneterregten Synchronmotoren und einem Doppelwechselrichter. Die Motoren werden sensorlos geregelt, womit eine Minimierung des Verkabelungsaufwands einhergeht. Dieses ist insbesondere im Hinblick auf eine Vervielfältigung der vorgestellten Antriebslösung zu einem Mehrachsenantrieb interessant. Die Motoren sind sehr schlank ausgeführt: Der Gehäusequerschnitt beträgt nur 32mm mal 32mm. Hervorzuheben ist die hohe Leistungsdichte der Motoren von 2500W/kg. Die Motoren verfügen einerseits über ein für die Baugröße hohes Maximaldrehmoment von rund 1Nm, andererseits über eine hohe Leerlaufdrehzahl von 19.000U/min. Der Doppelwechselrichter ermöglicht ein hohes Leistungsvolumen von 2200VA/l bei einem Wirkungsgrad von bis zu 97%. Die hier eingesetzte sensorlose Regelung ermöglicht die vollständige Ausnutzung der Leistungsfähigkeit des Antriebs. Als Anwendung stehen insbesondere mehrachsige Hauptspindel-Direktantriebe im Fokus, beispielsweise zum Bohren, Fräsen oder Pumpen.

Abstract

A new two-axes direct drive is presented consisting of two permanent-magnet-excited synchronous machines and a double inverter. The motors are sensorless controlled. This minimizes the complexity for cabling and wiring and is very advantageous especially in case of duplicating the presented solution into multiple axes applications. The motors have a very slender cross-section of only 32mm multiplied 32mm. They are distinguished by their high power density of 2500W/kg. The motors enable a high maximum torque of about 1Nm as well as a high maximum speed of 19,000rpm. The double inverter supplies the motors with a high power per volume of 2200VA/dm³ combined with a high efficiency of up to 97%. The implemented sensorless speed control enables the full performance of the drive. The presented solution is suited especially for direct drives in main spindle applications with multiple axes, e.g. for drilling, milling or pumping.

1 Einleitung

Im vorliegenden Beitrag wird ein neuartiger Zweiachsendirektantrieb vorgestellt, bestehend aus zwei permanentmagneterregten Synchronmotoren und einem Doppelwechselrichter samt zugehöriger Regelung. Die Motoren zeichnen sich durch ihre sehr schlanke Bauform (Gehäusequerschnitt 32mm mal 32mm) und ihre sehr hohe Leistungsdichte von 2500W/kg aus. Drehzahlen bis 19.000U/min sind dauerhaft möglich. Die schlanke Bauform ermöglicht

den Direktantrieb zweier unmittelbar benachbarter Hauptspindeln, zum Beispiel zum Bohren, Fräsen oder Pumpen. Selbstverständlich lässt sich die hier vorgestellte Antriebslösung vervielfältigen. Auf diese Weise erhält man einen schnell laufenden Mehrachsendirektantrieb auf engstem Raum.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass der Trend im Maschinen- und Anlagenbau seit Jahren in Richtung derartiger dezentraler Direktantriebe geht. Die Vorteile gegenüber älteren Lösungen mit Zentralmotor und Verteilermechanik liegen auf der Hand: Dezentrale Direktantriebe ermöglichen eine enorme Vereinfachung des mechanischen Aufbaus. Damit einher gehen große Einsparungen beim

Bauraumbedarf und beim Gewicht. Weiterhin führen die dezentralen Lösungen zu erheblichen Geräuschvorteilen. Die Drehzahlen der einzelnen dezentral angetriebenen Achsen können individuell geregelt und damit unabhängig voneinander eingestellt werden. Darüber hinaus ist eine Fehlererkennung für jede Achse einzeln ohne gesonderten Aufwand möglich. Die hier vorgestellte Antriebslösung mit zwei schnell laufenden Motoren verfügt über eine Drehzahlregelung, die ohne einen entsprechenden Sensor auskommt. Die Lösung ist daher sehr robust bei zugleich sehr niedrigem Verkabelungsaufwand. Letzteres ist umso vorteilhafter, wenn mehrere der Zweiachsenantriebe parallel zum Einsatz kommen. Nachfolgend wird zunächst der eingesetzte Synchronmotor vorgestellt. Im weiteren Verlauf werden die Eigenschaften des Doppelwechselrichters und der sensorlosen Regelung beschrieben. Messungen stellen die Eignung für Mehrachsen-Hauptspindel-Anwendungen unter Beweis.

2 Der permanentmagneterregte Synchronmotor

Die beiden beim Zweiachsenantrieb eingesetzten Motoren sind baugleich und verfügen über ein schlankes Gehäuse mit quadratischem Querschnitt. Gemäß **Bild 1** beträgt die Kantenlänge nur 32mm bei einer axialen Länge von 148mm. Die Motoren sind luftgekühlt.

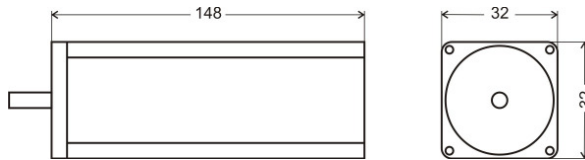


Bild 1: Gehäuseabmessungen des Motors

Die Simulationsergebnisse zum Betriebsverhalten zeigen die **Bilder 2 und 3**.

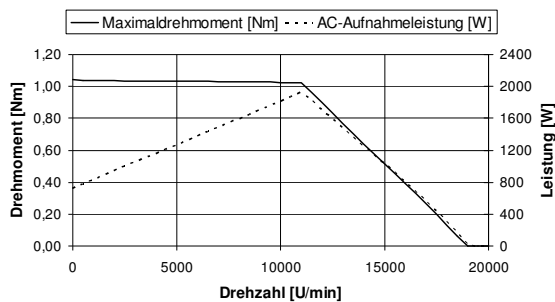


Bild 2: Simulierte Maximalkennlinie

Der Motor erreicht demnach ein Maximaldrehmoment von 1,03Nm bei 11.000U/min. Das Dauerdrehmoment beträgt bei gleicher Drehzahl 0,29Nm. Die Simulationsergebnisse für die AC-Aufnahmeleistungen des Motors in den genannten

Betriebspunkten belaufen sich auf 1925W beziehungsweise 413W. Die Leerlaufdrehzahl beträgt 19.000U/min. Gerechnet wurde mit einer Speisespannung von 320V DC und einer Phasenstrombegrenzung auf maximal 5,6A rms.

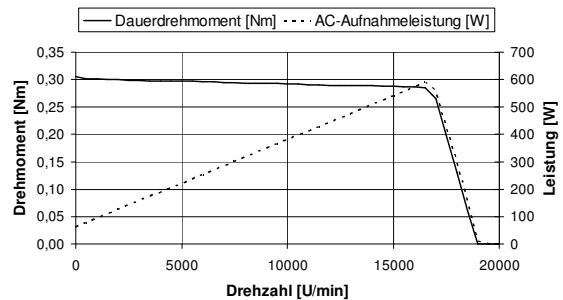


Bild 3: Simulierte Dauerkennlinie

Die bisher durchgeführten Messungen bestätigen die Ergebnisse der Simulationen. **Bild 4** zeigt das gemessene Betriebsverhalten für den unteren und mittleren Drehzahlbereich entlang der Maximalkennlinie, **Bild 5** entlang der Dauerbetriebskennlinie. Die Dauerbetriebsgrenze war bei der Messung ebenso wie bei der Simulation durch eine Übertemperatur von 100K der Ständerwicklung zur Umgebung charakterisiert. Diese Begrenzung wurde im Hinblick auf die Applikation in Mehrachsen-Hauptspindelantrieben als sinnvoll erachtet, liegt aber weit unterhalb der tatsächlichen thermischen Belastungsgrenze des Motors.

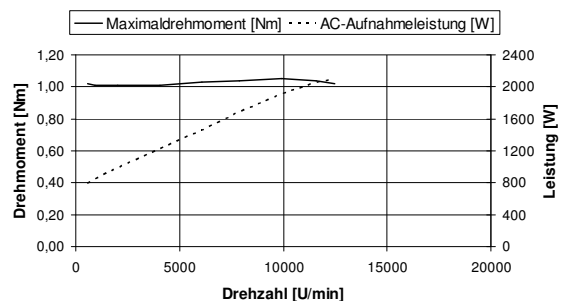


Bild 4: Gemessene Maximalkennlinie (unterer und mittlerer Drehzahlbereich)

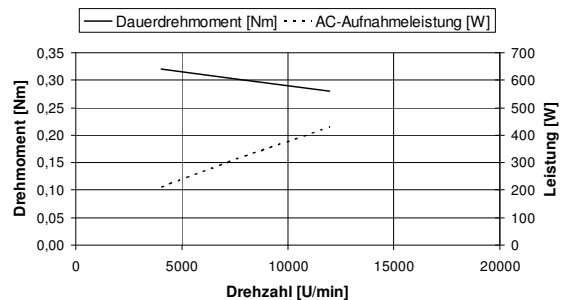


Bild 5: Gemessene Dauerkennlinie (mittlerer Drehzahlbereich)

Insgesamt besteht – soweit Messergebnisse vorliegen – eine gute Übereinstimmung zu den Simulationen. Die Messung nach Bild 4 zeigt, dass ein Drehmoment von 1,02Nm sogar bis zu einer Drehzahl von 12.400U/min erreicht wird. Dieses bedeutet eine mechanische Abgabeleistung von 1325W. Weil der Motor einschließlich Gehäuse nur 522g wiegt, ergibt sich ein sehr hohes Leistungsgewicht von 2500W/kg. Bei der Auslegung des Motors wurden Strombelag und Induktion ebenso optimiert wie die Höhe der Induktivität und das Zusammenspiel mit dem Doppelwechselrichter. Das Ergebnis ist ein Motor, der bedingt durch seinen speziellen Wicklungsaufbau und seinen speziellen Blechschnitt eine sehr geringe Drehmomentwelligkeit aufweist. Dieses ist vorteilhaft für die Regelgüte. Das von den Permanentmagneten im stromlosen Zustand verursachte Rastmoment liegt ebenfalls auf sehr niedrigem Niveau. **Bild 6** zeigt den diesbezüglich gemessenen Verlauf über einer Umdrehung des Läufers. Die Amplitude des Rastmoments beträgt ungefähr 4mNm und liegt somit bei nur 4 Promille des Maximaldrehmoments.

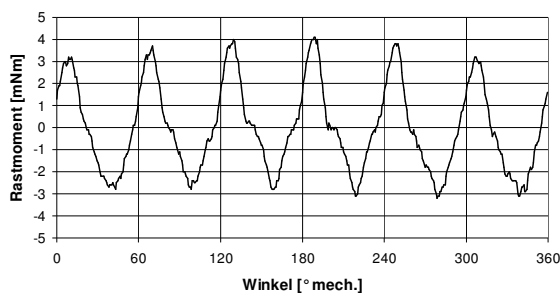


Bild 6: Gemessener Verlauf des Rastmoments

Bild 7 zeigt indirekt das gemessene Sättigungsverhalten des Motors. Dargestellt ist das Drehmoment M als Funktion des Phasenstroms I_1 , der die Funktion eines reinen Querstroms erfüllt. Weiterhin ist die Drehmomentkonstante k_T dargestellt, die gemäß

$$M = k_T \cdot I_1$$

den Zusammenhang zwischen Drehmoment und Phasenstrom herstellt.

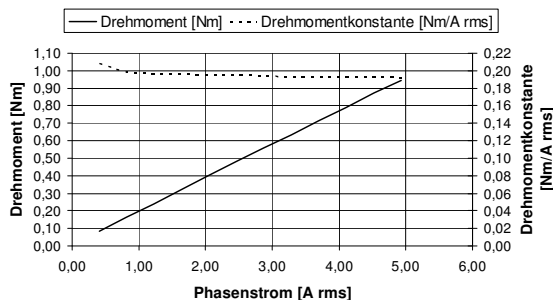


Bild 7: Drehmoment, gemessen als Funktion des Phasenstroms (zur Bewertung der Eisensättigung)

Man erkennt einen weitgehend linearen Anstieg des Drehmoments verbunden mit einer Drehmomentkonstante, die auch bei höheren Strömen kaum sinkt. Dieses zeigt, dass auch bei hohen Strömen und Drehmomenten keine zu starke Sättigung im Eisenkreis auftritt.

Der mechanische Aufbau wurde im Hinblick auf die angestrebten hohen Drehzahlen speziell optimiert. Die mechanische Stabilität der Magnete spielte dabei ebenso eine Rolle wie die biegekritische Drehzahl. Die spezielle Lagerung der Welle ermöglicht hohe Quer- und Axialbelastungen des Abtriebs, wie sie etwa beim Fräsen oder Bohren auftreten.

Die Maschine ist sechspolig ausgeführt. Angesichts der hohen Drehzahlen ist die Polzahl für die Baugröße relativ hoch. Gerade diese Polpaarzahl ermöglicht aber die schlanke Bauform und das kleine Massenträgheitsmoment. Letzteres unterstützt die hohe Dynamik des Antriebs. Auf der anderen Seite erfordert die hohe Polzahl Speisefrequenzen von bis zu 1000Hz. Die Eisenverluste bleiben dennoch durch den Einsatz einer hochwertigen Blechqualität auf niedrigem Niveau.

3 Der Doppelwechselrichter

Zur Versorgung der in Abschnitt 2 vorgestellten permanentmagneterregten Synchronmotoren wurde ein Doppelwechselrichter entwickelt, der sich insbesondere für die Realisierung von Mehrachsenantrieben eignet. Bei der Konstruktion des Doppelwechselrichters wurde besonders auf eine Anpassung der Baugröße an die anzutreibenden Synchronmotoren geachtet. So entspricht die Breite des Doppelcontrollers mit 64mm exakt der doppelten Kantenlänge des permanentmagneterregten Synchronmotors (vgl. Bild 1). Dadurch wird eine besonders einfache konstruktive Integration des dezentralen Direktantriebes in Mehrachsenanwendungen ermöglicht.

Durch die konsequente Anpassung der Ausgangsleistung des Wechselrichters an die Erfordernisse des Synchronmotors wird eine besonders kompakte Bauweise ermöglicht. Der hohe Wirkungsgrad von bis zu 97% gestattet es, einen im Vergleich zu üblichen Servoumrichtern besonders kleinen Kühlkörper einzusetzen. Die Integration von zwei Endstufen zur gleichzeitigen, unabhängigen Versorgung von zwei Servomotoren in einem gemeinsamen Gehäuse und auf einem gemeinsamen Kühlkörper ist eine weitere Maßnahme, um den für die Servocontroller erforderlichen Raumbedarf in Mehrachsenanwendungen deutlich zu minimieren.

Bei einer Zwischenkreisspannung von 320V beträgt die Dauerausgangsleistung des Doppelwechselrichters 600VA für jede Endstufe. Kurzzeitig wird eine vierfache Überlastung des Wechselrichters zugelassen, so dass sich für jede der beiden Endstufen eine

maximale Ausgangsleistung von 2400VA ergibt. Das Volumen des Doppelwechselrichters (64mm mal 340mm mal 100mm) beträgt ca. 2,18l. Das Leistungsvolumen des ausschließlich konvektiv gekühlten Doppelwechselrichters beläuft sich in den genannten Arbeitspunkten auf 550VA/l beziehungsweise auf 2200VA/l. Bei Verwendung einer forcierten Kühlung, die jedoch in vielen Applikationen nicht zulässig oder zumindest nicht erwünscht ist, kann eine weitere Steigerung des Leistungsvolumens erzielt werden. Ein Eindruck vom kompakten Aufbau des Wechselrichters wird durch die Fotografie in **Bild 8** vermittelt.

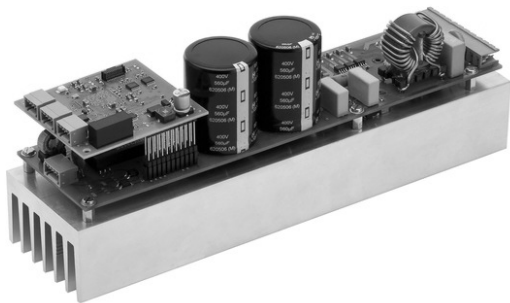


Bild 8: Fotografie des Doppelwechselrichters

Durch die Verwendung hochintegrierter Endstufenmodule konnte die Bauteilanzahl sowie die Komplexität des Gerätes deutlich reduziert werden, was sich in einer hohen Zuverlässigkeit des Servocontrollers niederschlägt. Die Versorgung des Pulswechselrichters kann wahlweise durch eine Gleichspannung von bis zu 400V DC oder durch eine einphasige Wechselfspannung von bis zu 250V rms erfolgen, welche durch den integrierten Brückengleichrichter im Gerät gleichgerichtet wird. Die Ansteuerung der beiden Endstufen des Doppelwechselrichters erfolgt durch einen gemeinsamen digitalen 32bit-Signalprozessor. Dieser realisiert neben der Erzeugung der PWM-Pulsmuster und der Überwachungsfunktionen auch die feldorientierte Drehmoment- sowie die Drehzahlregelung für die beiden angeschlossenen Servomotoren. Die hohe PWM-Pulsfrequenz von 16kHz ermöglicht sinusförmige Ausgangsspannungen mit Frequenzen von mehr als 1kHz. Bei den in Abschnitt 2 vorgestellten sechspoligen Synchronmotoren lassen sich auf diese Weise Drehzahlen bis über 20.000U/min realisieren, bei zweipoligen Motoren sogar bis über 60.000U/min.

4 Die sensorlose Drehzahlregelung

Im Servocontroller ist eine sensorlose Erfassung sowohl der Motordrehzahl als auch des Rotorpositionswinkels der beiden permanentmagnet-

erregten Synchronmotoren implementiert. Dadurch kann auf den Einsatz von Lagesensoren verzichtet werden, die üblicherweise für die Realisierung einer Drehzahlregelung mit unterlagerter feldorientierter Stromregelung erforderlich sind.

Die Verwendung von Inkrementalgebern, Resolvemern oder Hallsensoren zur Erfassung der Rotorposition ist grundsätzlich mit Einschränkungen hinsichtlich der zulässigen Maximaldrehzahl oder der maximal zulässigen Betriebstemperatur des Motors verbunden. Durch den vollständigen Verzicht auf einen derartigen Sensor spielen die genannten Einschränkungen beim hier vorgestellten Zweiachsenantrieb keine Rolle. Dies ermöglicht prinzipiell die vollständige Ausnutzung der thermischen Belastungsgrenze des Synchronmotors.

Da auch die Wicklungstemperatur der Motoren durch den Servocontroller sensorlos ermittelt wird, kann der sonst erforderliche, in die Wickelköpfe des Motors integrierte Thermistor ebenfalls entfallen. Damit ergibt sich eine äußerst einfache Verkabelung zwischen dem Doppelwechselrichter und den angeschlossenen Servomotoren. Diese sind nämlich bereits durch den alleinigen Anschluss der drei Motorphasen sowie des Schutzleiters voll betriebsfähig. Insbesondere bei Mehrachsensystemen machen sich der Entfall der Sensorik sowie der deutlich reduzierte Verkabelungsaufwand auch in den Systemkosten sehr positiv bemerkbar.

Das eingesetzte Verfahren zur Erfassung des Rotorpositionswinkels stellt sicher, dass trotz des Verzichts auf eine Positionssensorik eine feldorientierte Führung der Servomotoren erfolgt. Auch im sensorlosen Betrieb können das maximale Drehmoment und die volle Leistung der Servomotoren abrufen werden. Dazu ist der Einsatz einer besonders hochwertigen Erfassung und Verarbeitung der als einziges Messsignal zur Verfügung stehenden Motorphasenströme erforderlich. Zudem wurden die grundsätzlich vorhandenen nichtlinearen Effekte des Leistungsteils bei der Auslegung der sensorlosen Drehzahlregelung geeignet berücksichtigt.

Die gemessenen Kennlinien (Bilder 4 und 5) wurden im sensorlosen Betrieb des Motors aufgenommen. Dies zeigt das ausgezeichnete Leistungsvermögen der geberfreien Drehzahlregelung. Im Vergleich zu einer Regelung mit Geber führt das geberfreie Verfahren zu keinerlei Einschränkung hinsichtlich des maximalen Drehmoments sowie der abrufbaren Maximalleistung des Zweiachsenantriebs.

Auch das dynamische Verhalten der in Form eines Proportional-Integral-Reglers realisierten Drehzahlregelung wurde durch entsprechende Messungen überprüft. Hierfür wurde der permanentmagnet-erregte Synchronmotor mit einem weiteren, drehmoment-geregelt betriebenen Motor belastet.

Bild 9 zeigt den Verlauf der Drehzahl sowie des Drehmoments des Motors bei einem sprunghaftem

Anstieg des Belastungsmomentes auf einen Wert von 0,65Nm. Dieser Wert entspricht dem 2,2-fachen Nennmoment des Motors. Die Drehzahlvorgabe wurde auf 8000U/min eingestellt. Beim Sprung des Drehmoments ergibt sich ein kurzzeitiger Einbruch der Drehzahl auf etwa 6600U/min, der jedoch innerhalb von rund 140ms wieder ausgeregelt wird. Sowohl im Leerlauf als auch unter Last wird die Drehzahl ohne bleibende Abweichung auf ihren Sollwert eingeregelt.

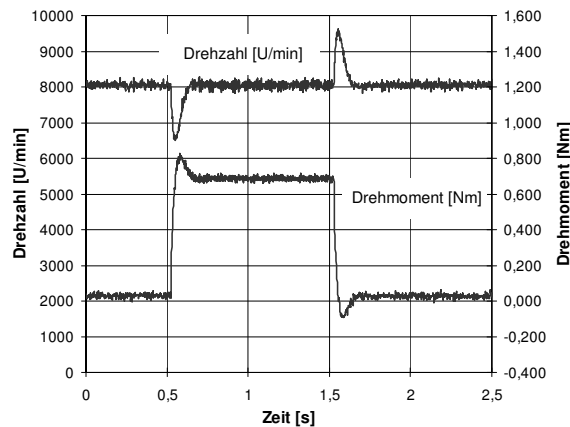


Bild 9: Gemessener Drehzahl- und Drehmomentverlauf bei einem Sprung des Drehmoments auf 0,65Nm

Das dynamische Verhalten des Regelsystems beim Auftreten von Drehzahlsprüngen bzw. -rampen zeigen die **Bilder 10 und 11**. Die Messung in Bild 10 wurde hierbei mit dem unbelasteten Motor durchgeführt, wohingegen der Motor für die Messung in Bild 11 mit seinem Nenndrehmoment in Höhe von 0,29Nm belastet wurde.

Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens wurde ein Sprung der Drehzahl von 4000U/min auf 12.000U/min kommandiert. Sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand erreicht der Motor bereits nach 40ms den neuen Drehzahlwollwert. Dies entspricht einer mittleren Drehbeschleunigung von 21.000rad/s². Der Drehzahlverlauf beim Erreichen der Enddrehzahl kann durch die Wahl der Einstellparameter des Reglers nahezu beliebig vorgegeben werden. Im Hinblick auf die Verwendung in Mehrachsen-Hauptspindelantrieben wurde ein geringes Überschwingen zu Gunsten einer sehr kurzen Beschleunigungszeit für akzeptabel und sinnvoll erachtet.

Auch das Verhalten des Drehzahlreglers bei langsamen Drehzahländerungen kann den Messungen in den Bildern 10 und 11 entnommen werden. In beiden dargestellten Lastfällen folgt der Regler sehr exakt der linearen Drehzahlverringerng von 12.000U/min auf 4000U/min.

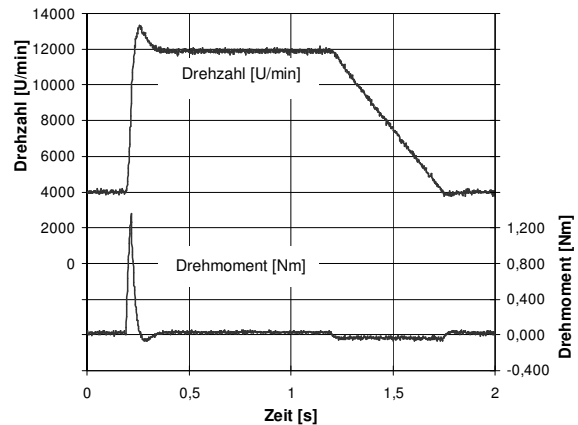


Bild 10: Gemessener Drehzahlverlauf im Leerlauf

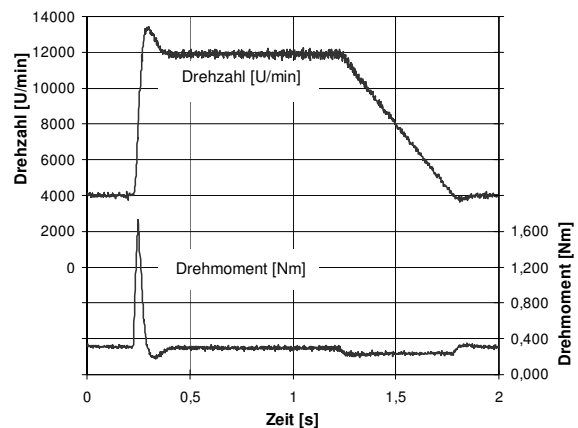


Bild 11: Gemessener Drehzahlverlauf bei Nennlast

5 Zusammenfassung

Die Bedeutung dezentraler Einzelantriebe wird aufgrund des reduzierten mechanischen Aufwandes insbesondere auch bei mehrachsigen Hauptspindel-Applikationen in den nächsten Jahren deutlich zunehmen. Die hohe Leistungsdichte der vorgestellten Motoren sowie das hohe Leistungsvolumen des präsentierten Doppelwechselrichters führen auch bei Applikationen, in denen keine forcierte Kühlung möglich ist, zu einem sehr kompakten Antriebssystem.

Durch die Verwendung eines sensorlosen Drehzahlregelverfahrens wird der Verkabelungsaufwand erheblich verringert. Auf diese Weise wird eine sehr einfache, robuste und kostengünstige Realisierung von Mehrachsenantrieben ermöglicht. Abschließend sei nochmals betont, dass mittels der hier eingesetzten sensorlosen Regelung die Leistungsfähigkeit des Antriebs im vollen Umfang zur Verfügung steht.