

# ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

**Christian Heyers**

Energieeffizienter Betrieb von  
Asynchron-Hauptspindelantrieben  
in Werkzeugmaschinen

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 33/2013

**WZL**  
**RWTHAACHEN**

 **Fraunhofer**  
IPT

# Inhaltsverzeichnis

## Content

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik in Forschung und Industrie</b> .....	<b>7</b>
2.1	Steigerung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen .....	7
2.2	Energieeffizienter Betrieb elektrischer Antriebe in Werkzeugmaschinen ....	10
2.3	Aufbau und Funktionsweise der Hauptantriebssysteme in Werkzeugmaschinen .....	13
2.3.1	Regelungstechnik und Energieversorgung .....	14
2.3.2	Kühlsystemaufbau .....	25
2.4	Fazit .....	29
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>Optimierung der Leistungsaufnahme von Asynchron- Hauptspindelantrieben</b> .....	<b>35</b>
4.1	Systemmodell .....	35
4.1.1	Rotorflussorientierte Betrachtung der Asynchronmaschine .....	36
4.1.2	Regelungsstruktur .....	40
4.1.3	Identifikation der Hauptinduktivität .....	42
4.1.4	Betriebsgrenzen .....	45
4.1.5	Adaption der Motorwiderstände .....	48
4.1.6	Leistungsaufnahme des Motors .....	51
4.1.7	Leistungsaufnahme des Umrichtersystems .....	55
4.1.8	Fazit aus Kapitel 4.1 .....	60
4.2	Auslastungsabhängige automatische optimale Feldstromvorgabe .....	60
4.2.1	Verlustminimaler Feldstrom .....	63
4.2.2	Optimaler Feldstromabbau .....	67
4.2.3	Optimaler reaktiver Feldstromaufbau .....	69
4.2.4	Optimierung der Feldstromvorgabe durch Vorsteuerung .....	72
4.3	Verlustminimale Vorgabe der Schaltfrequenz .....	78
4.3.1	Modellbasierte Wahl der Schaltfrequenz .....	79
4.3.2	Randbedingungen im Betrieb .....	81
4.4	Betriebspunktabhängige Regelung der Motorkühlleistung .....	83
4.4.1	Thermisches Ersatzschaltbild des Motors .....	85
4.4.2	Regelung der Statortemperatur .....	94
4.4.3	Optimierte Betriebsführung des Kühlaggregats .....	98
<b>5</b>	<b>Prototypische Umsetzung der optimierten Spindelregelung</b> .....	<b>101</b>
5.1	Beschreibung des Antriebsprüfstands .....	101
5.1.1	Aufbau des Prüfstands .....	102
5.1.2	Steuerungsarchitektur des Prüfstands .....	105
5.2	Umsetzung der automatischen Inbetriebnahme .....	108

5.2.1	Automatisierter Abgleich der Verlustleistungsmodelle .....	109
5.2.2	Automatisierter Abgleich des thermischen Modells.....	115
5.3	Realisierung für eine SINUMERIK 840D sl Steuerung .....	118
5.3.1	Steuerungintegrierte Umsetzung der Vorsteuerung .....	119
5.3.2	Vorsteuerung der Feldstromvorgabe.....	121
5.4	Fazit aus Kapitel 5.....	123
<b>6</b>	<b>Verifikation und Ergebnisse .....</b>	<b>125</b>
6.1	Ergebnisse bei Anwendung der Feldstromabsenkung .....	125
6.1.1	Gültigkeit des Betriebspunkts.....	125
6.1.2	Vergleich reaktiver und vorgesteuerter Feldstromabsenkung .....	129
6.2	Ergebnisse beim Einsatz geregelter Motorkühlleistung.....	132
6.2.1	Thermisches Verhalten und Energiebilanz im Produktivbetrieb ...	132
6.2.2	Systemverhalten bei externen Störungen .....	138
6.2.3	Systemverhalten bei variabler Vorlauftemperatur .....	140
6.3	Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems .....	142
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>145</b>
7.1	Zusammenfassung.....	145
7.2	Ausblick.....	147
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>151</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>163</b>
9.1	Auslegung von Lage- und Geschwindigkeitsregler.....	163
9.2	Raumzeiger-Modulation .....	164
9.3	Zusätzliche Messungen.....	166
9.4	Prüfstandsdaten .....	175
9.5	Ablaufdiagramme der ELFE zur Anwendung von Vorsteuerungsdaten ....	176
9.6	Bedienoberfläche des Trace Analyser.....	179