



Universität Stuttgart

iew
Institut für
Elektrische Energiewandlung

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Javier Stillig

Modulare, kontaktlose Energieversorgungseinheiten
für industrielle Produktions- und Transportsysteme



Band 19

**SHAKER
VERLAG**

Modulare, kontaktlose Energieversorgungseinheiten für industrielle Produktions- und Transportsysteme

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.–Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Javier Stillig
aus Kirchheim unter Teck.

Hauptberichter: Univ.–Prof. Dr.–Ing. **Nejila Parspour**
Mitberichter: Univ.–Prof. Dr.–Ing. **Robert Schulz**

Tag der mündlichen Prüfung: 17.04.2024

Institut für Elektrische Energiewandlung der Universität Stuttgart

2024

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Band 19

Javier Stillig

**Modulare, kontaktlose Energieversorgungseinheiten
für industrielle Produktions- und Transportsysteme**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9519-7

ISSN 2196-9213

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
Zusammenfassung	vii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	2
1.2 Zielbild	6
1.3 Stand der Forschung	6
1.4 Forschungsfragen	15
2 Grundlagen	17
2.1 Elektrisches Feld und Magnetfeld	18
2.2 Magnetfeld und Strom	22
2.3 Magnetfeld bewegter Ladungen	25
3 Analyse	29
3.1 Spulensystem	31
3.2 Leistungselektronik	43
4 Umsetzung	63
4.1 WPT für Mini-FTF	63
5 Diskussion und Rückschlüsse	89
5.1 Wandlungsfähigkeit	89
5.2 Integration	93
5.3 Aufbau und Verhalten	101
5.4 Systemvergleich	120
6 Ausblick	129
6.1 Wandelbare Fertigung	130

6.2	Intelligenter Boden	131
6.3	WPT-System	133
Quellenverzeichnis		137
A Kontaktlose Energieübertragung		169
A.1	Versatz	170
A.2	Modell der Spiralspule	173
A.3	Effizienz und Leistung	183
A.4	Magnetische Kopplung	193
A.5	Koppelfaktorbestimmung mit FEMM4.2	197
A.6	Basiskompensation	199
A.7	Auswahlverfahren Basiskompensation	215
A.8	Kompensationsmodule	217
A.9	Vergleichsindikatoren	255
A.10	Leistungseinteilung	258
A.11	Markübersicht WPT	264
A.12	Spulengeometrie	272
A.13	Spulengeometrien automatisiert erzeugen	289
A.14	Hochfrequenzlitzten	301
A.15	Weichmagnetischer Kern	305
A.16	Steuerung	318
A.17	Fremdobjektdetektion	320
A.18	Messergebnisse Versuchsstrecke Ib	330
A.19	Messergebnisse Versuchsstrecke II	338
A.20	Schaltplan Leistungselektronik Versuchsstrecke II	341
A.21	WPT für Montagezellen	343
B FTF Scooty		361
B.1	Marktübersicht FTF	363
B.2	Logistikkonzept	365
B.3	Aufbau eines FTF	371

B.4	FTF–Baukasten	374
B.5	Routenführung	379
B.6	Lastspiel	389
B.7	Projekt ANTS	406
C	Intelligenter Boden	409
C.1	Mobilität in der wandelbaren Fertigung	411
C.2	Anwendungsbeispiele	418
C.3	Versorgungsnetz	424
D	Umfeldstudie	433
D.1	Flexibilitätskennwert	436
D.2	Standardisierung	442
D.3	Energiespeicher	449
D.4	Bewertungskriterien zur WPT–Integration	475

Zusammenfassung

In der Fabrik der Zukunft wird der Grad der Wandelbarkeit einer Fertigung entscheidend für ihren wirtschaftlichen Erfolg sein. Aufgrund der sich stetig verkürzenden Produktinnovationszyklen und der wachsenden Anzahl von Produktvarianten ist die Notwendigkeit zur Flexibilisierung der Produktionsmittel gegeben. Zur Erreichung der Flexibilisierungsziele müssen Produktionsmittel mobiler, zueinander kompatibler und wiederverwendbarer werden.

Die vorliegende Dissertation adressiert diesen Themenbereich und stellt eine Möglichkeit zur Mobilisierung von Produktionsmittel aus dem Umfeld der Montagetechnik (Robotik) und Intralogistik vor. Dazu wird ein Verfahren zur elektrischen Energieversorgung der Produktionsmittel verwendet, das auf der induktiven, kontaktlosen Energieübertragung basiert. Der neuartige Aufbau des induktiven Übertragungssystems, kann an beliebigen Punkten in einer Fertigungsfläche den Produktionsmitteln zielgenau Energie zuführen. Die Arbeit startet mit der Einführung in die wandelbare Fertigung und reflektiert den Stand der Wissenschaft und Technik von kontaktlosen, induktiv arbeitenden Systeme, die für die Energieübertragung im Nahfeld konzipiert sind. Das Kapitel *Grundlagen* zeigt die elektrotechnisch relevanten Größen des Systems auf und erklärt analytisch deren Zusammenspiel. Die sich anschließende Simulation erweitert das zur Systembeschreibung angewendete analytische Verfahren, erläutert deren Unterschiede sowie nennt Vor- und Nachteile beider Verfahren.

Der Praxisteil der Dissertation verifiziert anhand eines konkreten Aufbaus die analytisch und numerisch gefundenen Lösungen. Dieser Aufbau beinhaltet ein vollständig ausgebildetes Übertragungssystem, dessen Primär- und Sekundärseite für die Integration in die Platte eines Doppelbodens bzw. in ein fahrerloses Transportfahrzeug / Montagezelle vorgesehen sind. In Versuchen werden reale Betriebsdaten des Übertragungssystems ermittelt, die im Diskussionskapitel ausgewertet und den Anforderungen der wandelbaren Fertigung gegenübergestellt werden.

Darüber hinaus werden die Möglichkeiten und Grenzen des neuartigen Energieübertragungssystems aufgezeigt und seine Vor- und Nachteile gegenüber heutigen Übertragungssystemen abgewogen.

Die Fabrik der Zukunft benötigt neue Formen flexibler Energieversorgung und stellt konventionelle Systeme in Frage. Diese Arbeit schlägt zwei Lösungsvariante vor, die unter anderem für Intralogistikanwendungen im Leistungsbereich zwischen 24 W und 3,7 kW die Anforderungen der wandelbaren Fertigung erfüllt. Die Lösung hat zudem das Potenzial auf eine Vielzahl weiterer (industrieller) Anwendungen adaptiert zu werden, um dort eine flexible und kabellose Energieversorgung sicherzustellen.

Abstract

In the factory of the future, the degree of convertibility of a production will be essential for its economic success. Due to the shortening product innovation cycles and the growing number of product variants to be manufactured, the need for more flexible production equipment in manufacturing is already given today. To achieve the flexibility goals, production equipment must become more mobile, compatible, and reusable.

The presented doctoral thesis focuses on this topic and demonstrates a possibility for the mobilization of production equipment, especially production equipment from the assembly industries (robotics) and intralogistics. For this purpose, a method for the electrical energy supply of production equipment based on the inductive wireless power transfer is used. The new design of the inductive power transfer system proposed here can supply energy to the production equipment exactly over a defined area. The introduction leads into the convertible production and gives an overview of commercially available wireless power transfer systems. Among other things, new specific parameters are presented here, which allow inductive transfer systems to be classified, compared, and evaluated. The introduction reflects the state of the art in science and technology of wireless power transfer systems, focusing on inductive systems for near-field energy transfer. The chapter *Basics* describes the theory of the newly developed transfer system. It lists the electrical system parameters and explains their interaction analytically. The following simulation extends the analytical method used to describe the system, explains the differences between the two methods and lists the advantages and disadvantages of both.

The practical part of the doctoral thesis verifies the analytically and numerically found solutions based on a specific setup. This setup includes a fully assembled transfer system whose primary and secondary sides are designed for integration into the panel of a raised floor or an automated guided vehicle / assembly cell.

Real operating data of the transfer system are determined in test runs, which are analyzed in the discussion chapter and contrasted with the requirements of the convertible production. In addition, the chapter shows the possibilities and limitations of the new energy transfer system as well as its advantages and disadvantages compared to existing systems.

Convertible production requires new forms of flexible power supply for equipment and challenges conventional systems. This thesis shows a feasible technical solution that meets the requirements of convertible production for industrial intralogistics in the investigated power range between 24 W and 3,7 kW. The solution also has the potential to be adapted to many other (industrial) applications in order to ensure a flexible and wireless power supply.

Struktur der Dissertation

Die vorliegende Dissertation ist strukturiert in den Hauptteil (1 ... 6), der die modulare, kontaktlose Energieversorgungseinrichtung behandelt, sowie die Anhänge (A ... D). Im Hauptteil werden die sechs Phasen *Einleitung*, *Grundlagen*, *Analyse*, *Umsetzung*, *Diskussion* und *Ausblick* besprochen, deren Reihenfolge sich an dem Konzept *IMRaD*^a orientiert. Aufgrund der Umfangslimitierung dieser Arbeit, beinhaltet nur der Hauptteil alle IMRaD-Phasen. Die Anhänge ergänzen den Hauptteil. Sie sind hilfreich, um den Kontext zur modularen, kontaktlosen Energieversorgungseinrichtung herzustellen und tiefere Einblicke in die WPT-Technologie zu erhalten, bauen jedoch nicht aufeinander auf.

Der Anhang (A) vertieft Aspekte der kontaktlosen Energieübertragung und deren Umfeld. Im Anhang (B) wird eine spezifische Anwendung für kontaktlose Energieversorgungseinheiten beschrieben: Scoory — Ein neuartiges, fahrerloses Transportfahrzeug. Scoory wurde im Rahmen der Dissertation gemeinsam mit dem Institut für Fördertechnik der Universität Stuttgart entwickelt und prototypisch hergestellt. Der intelligente Boden wird im Anhang (C) vorgestellt. Das elektromechanische System wurde ebenfalls im Zuge der Doktorarbeit erfunden und mithilfe von Bosch Rexroth hergestellt.

Der Boden ist eine universelle Infrastrukturplattform zum Einsatz in der industriellen Fertigung und dient auch zur kontaktlosen Energieversorgung von Produktionsmitteln in der wandelbaren Fertigung. Die Versorgungseinrichtungen sind in austauschbaren Bodenplatten integriert und können entsprechend den sich stetig wandelnden Produktionserfordernissen leicht rekonfiguriert werden. Abschließend beleuchtet der Anhang (D) das Umfeld der kontaktlosen Energieversorgungseinheit, in der bspw. der Energiespeicher oder die Einsatzumgebung genauer betrachtet werden.

^a **I**: Introduction, **M**: Methods, **R**: Results, **a**: and, **D**: Discussion. Mehr Informationen zur IMRaD-Struktur finden sich bspw. unter: <https://en.wikipedia.org/wiki/IMRAD>

