



Universität Stuttgart

iew
Institut für
Elektrische Energiewandlung

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Alexander Enssle

Ganzheitliche Methodik zur Auslegung und
Optimierung von transkutanen induktiven
Energieübertragungssystemen



Band 15

**SHAKER
VERLAG**

**Ganzheitliche Methodik zur Auslegung und
Optimierung von transkutanen induktiven
Energieübertragungssystemen**

**Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik
und Informationstechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von
Alexander Enssle
aus Mutlangen**

**Hauptberichterin: Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter P. Pott**

Tag der mündlichen Prüfung: 21.06.2023

**Institut für Elektrische Energiewandlung
der Universität Stuttgart**

2023

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Band 15

Alexander Enssle

**Ganzheitliche Methodik zur Auslegung und
Optimierung von transkutanen induktiven
Energieübertragungssystemen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9245-5

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

Symbolverzeichnis	V
Zusammenfassung	XIII
Abstract	XV
1 Einleitung	1
1.1 Ausführungen von Herzunterstützungssystemen und Therapiearten	2
1.2 Energieversorgung und Herausforderungen	4
1.3 Transkutane Energieübertragungssysteme	6
1.4 Stand der Technik transkutaner Energieübertragungssysteme . . .	7
1.5 Ziele, inhaltliche Abgrenzung und Aufbau der Arbeit	13
2 Grundlagen induktiver Energieübertragung	15
2.1 Transformator und schwach gekoppelte Übertrager	15
2.2 Blindleistungskompensation induktiver Übertrager	18
2.2.1 Beidseitig serielle Kompensation (1s2s)	18
2.2.2 Beidseitig parallele Kompensation (1p2p)	23
2.3 Umrichtertopologien für induktive Übertragungssysteme	29
2.3.1 Topologien 1s2s-kompensierte Systeme	29
2.3.2 Topologien für 1p2p-kompensierte Systeme	30
2.4 Analytische Beschreibung von Luftspulensystemen	31
2.4.1 Beschreibung von Induktivitäten und Kopplung von Wicklungen in Luftspulensystemen	31
2.4.2 Rotationssymmetrische Spulensysteme	33
2.5 Grundlagen der Verlustmodellierung in Leitern und Hochfrequenzlitzen	37
2.5.1 Analytische Beschreibung von Verlusteffekten	37
2.5.2 Verlustberechnung in Hochfrequenzlitzen	39
3 Modellierung der Verlustleistungseffekte in rotationssymmetrischen Spulensystemen	43
3.1 Modellierung und Verlustleistungsbestimmung des Spulensystems	43

3.2	FEM-gestützte Modellierung der externen Proximityverluste in Spulensystemen	44
3.3	Analytische Beschreibung der externen Proximityverluste	45
4	Thermisches Verhalten implantierter Spulen	51
4.1	Biokompatibilität implantierter Komponenten	51
4.2	Modellierung des Wärmeaustausches in perfundiertem Gewebe und Umgebung	52
4.3	Thermisches FEM-Modell	53
5	Verlustleistungsoptimierung sekundärseitiger Wicklungen	57
5.1	Einflussmöglichkeiten bei Wicklungsauslegung	58
5.2	Einflussmöglichkeiten bei Systemauslegung	67
5.3	Einfluss des Systemarbeitspunktes auf leistungselektronische und Resonanzkreiskomponenten	71
5.4	Strategien zur Auslegung verlustleistungsoptimierter Systeme	74
6	Positionierungstolerante Auslegung von Zweiwicklungssystemen	79
6.1	Verhalten von planaren Luftspulensystemen bei Fehlpositionierung	80
6.2	Optimierung des Verhaltens bei lateraler Fehlpositionierung	87
6.2.1	Optimierungsmethodik	87
6.2.2	Ergebnisse und Vergleich	89
7	Ganzheitlich optimierte Auslegung transkutaner Energieübertragungssysteme	99
7.1	Übersicht und Vorstellung der Optimierungsmethodik	100
7.2	Anforderungen und Randbedingungen eines beispielhaften Übertragungssystems	102
7.3	Ergebnisse aus Auswertung	104
7.4	Experimentelle Verifikation eines Prototypen-Übertragungssystems	107
7.4.1	Aufbau und Vermessung des Spulensystems	107
7.4.2	Prototypische Umsetzung des Übertragungssystems	111
8	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	121