

Untersuchungen zu berührungslosen Beleuchtungen von Photobioreaktoren durch resonant induktive Kopplungen

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel
Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Stich
Sun-Hwa Jung, M.Sc.
Sebastian Linhardt, M.Eng.
Bendix Wojaczek, B.Eng.
Steven Fischer

Zusammenfassung

Motiviert durch die Zunahme der Elektrifizierung des Straßenverkehrs hat auch das Forschungsgebiet der berührungslosen Energieübertragung (WPT) an Fahrt aufgenommen. Diese Art der Energieübertragung kann neben der Elektromobilität auch in anderen technischen Anwendungen vielversprechende Verbesserungen bewirken. Im Bereich der berührungslosen Beleuchtung von Bioreaktoren für die Algenzucht ist mit dieser Technik eine intensivere LED-Beleuchtung am Ort der Biomasse möglich geworden, was zu einem vermehrten Algenwachstum gerade in großen Bioreaktoren führen kann.

Dafür wurde in der folgenden Untersuchung ein WPT-System zur Versorgung von LED-Beleuchtungen in Bioreaktoren entwickelt. Als Sendeeinheit dient ein modifizierter Klasse-C Schwingkreisverstärker. Als Empfänger wurden berührungslose Lichtemitter (WLE) mit LED-Technik entworfen, deren induktiv lose gekoppelte Schwingkreise auf die Trägerfrequenz des Senders abgestimmt wurden. Ein Proof of Concept des Algenwachstums des aufgebauten Systems schließt die Untersuchungen ab.

Abstract

Motivated by the increase in electrification of road traffic, the field of non-contact energy transfer (Wireless Power Transfer - WPT) has also gained momentum. This type of energy transfer can bring promising improvements not only to electromobility but also to other technical applications. In the field of non-contact illumination of bioreactors for algae cultivation, this technology has enabled more intense LED illumination at the site of biomass, potentially leading to increased algae growth, particularly in large bioreactors.

To achieve this, in the following study a WPT system was developed for supplying LED lighting in bioreactors. A modified Class-C resonant circuit amplifier serves as the transmitting unit. As receivers, non-contact light emitters (wireless light emitter - WLE) using LED technology were designed, with their inductively loosely coupled resonant circuits tuned to the carrier frequency of the transmitter. The investigations conclude with a Proof of Concept of the algae growth of the constructed system.

1 Einleitung

Der Einsatz berührungsloser Beleuchtungen von Photobioreaktoren durch resonant induktive Kopplungen erfreut sich zunehmender Beliebtheit, da die Beleuchtung intern direkt am Ort der photosensitiven liquiden Biomasse erfolgen kann. Damit kann gezielt das Wachstum beeinflusst werden, ohne die Strömung durch störende Kabel zu beeinflussen oder Ablagerungen an diesen zu verursachen.

Nachteilig sind derzeit noch der komplexe Aufbau der Sendevorrichtung sowie der hohe Stückpreis der

berührungslosen Lichtemitter (WLEs) von circa einem Euro/Stück. Als Lösungsansatz zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit wurde in dieser Arbeit daher als Sender ein modifizierter Schwingkreisverstärker nach [1] untersucht, der eine minimale Anzahl an Bauelementen für die Aufgabe erfordert. Zur Reduktion des Stückpreises der WLEs wurde ein platinenloses Verfahren gewählt, bei dem die Bauelemente durch Stapelung positioniert werden, aber ohne auf die Reflowtechnik verzichten zu müssen.

Abschließend wurden vergleichende Wachstumsuntersuchungen zwischen einem extern beleuchteten Bioreaktor sowie der neu aufgebauten Reaktorbeleuchtung

nach Abbildung 1 bei dem Cyanobakterium *Arthrospira platensis* (*A. platensis*) durchgeführt. Gewählt wurde ein Reaktor mit einem Innendurchmesser von nur 50 mm, bei dem der zu erwartende Unterschied zu einem extern beleuchteten Reaktor aufgrund der guten Durchleuchtung externer Lichtquellen nur gering ist. Bei Zunahme des Durchmessers des Bioreaktors werden die Wachstumsunterschiede zwischen beiden Verfahren deutlich zunehmen, da die Lichtintensität der externen Quellen exponentiell zum Inneren des Bioreaktors abfällt.



Abbildung 1: Bioreaktor mit WLEs ($d = 50 \text{ mm}$)

Nach Vorstellung des elektrischen Gesamtsystems werden die Entwurfsgleichungen von Sender und Empfänger näher beschrieben. Anschließend werden die simulierten Werte des elektrischen Systems

mit Messungen hinterlegt sowie die Ergebnisse der Wachstumsmessungen des Cyanobakteriums *A. platensis* eines intern beleuchteten Bioreaktors vorgestellt.

Abschließend werden aus den Ergebnissen Schlussfolgerungen gezogen sowie ein Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben.

2 Berührungslose Energieübertragung

2.1 Elektrisches Gesamtsystem

Das untersuchte Gesamtsystem nach [1] zeigt Abbildung 2. Die Sendeeinheit ist ein modifizierter Klasse-C Verstärker (links) mit einem Parallelschwingkreis zwischen Drain-Anschluss des Feldeffekttransistors (FET) Q und der Versorgungsgleichspannung V_{cc} . Der WLE ist ein Parallelschwingkreis mit zwei antiparallel geschalteten Dioden, um beide Halbwellen der sinusförmigen Spannung zur Versorgung nutzen zu können.

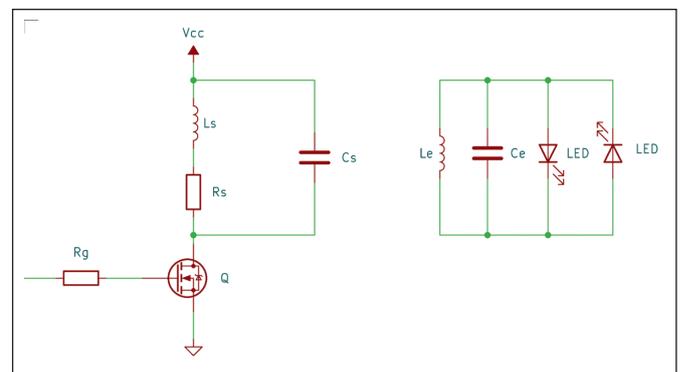


Abbildung 2: Modifizierte Schaltung eines Klasse-C Verstärkers (links) als Sender zur berührungslosen resonant induktiven Energieversorgung von LED-Lichtquellen sowie Ersatzschaltbild einer LED-Lichtquelle (rechts)

2.2 Sender

Im Vergleich zu den heute bei diesen Anwendungen für Bioreaktoren üblichen Klasse-E Verstärkern [2-5], die mit einem Serienschwingkreis ausgestattet sind und sowohl bei Nullspannung (zero voltage switching – ZVS) als auch bei Nullsteigung der Spannung (zero derivative switching – ZDS) schalten, fehlt der dargestellten Schaltung nach Abbildung 2 sowohl die Ladeinduktivität als auch der Abstimmkondensator sowie ein weiterer Kondensator zwischen Drain und Source.

Dadurch vereinfacht sich die Schaltung erheblich, obgleich der Strom durch die Sendespule L_s dadurch nur noch annähernd sinusförmig ist und somit Oberwellenanteile beinhaltet. Ähnlich wie der Klasse-E Verstärker hat die Schaltung ZVS-Verhalten, jedoch kein ZDS-Verhalten mehr. Durch das gemeinsame ZVS-Verhalten sind beide Schaltungsvarianten verlustarm, haben aber den Nachteil, dass die Gate-Source-Spannung mehr als das Dreifache der Versorgungsspannung V_{cc} annehmen kann. Daher ist bei

Wahl des Schalttransistors besonderes Augenmerk auf die Spannungsfestigkeit zu legen.

Anfänglich wird als Grundfrequenz des Senders die Resonanzfrequenz

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (1)$$

des Parallelschwingkreises oder, falls man den Wicklungswiderstand der Sendeleinduktivität berücksichtigt,

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_s C_s} - \left(\frac{R_s}{L_s}\right)^2} \quad (2)$$

festgelegt. Die Induktivität der Sendespule L_s kann dabei aus m parallel geschalteten Spulensystemen L_{Sps} bestehen, die wiederum aus k in Serie geschalteten gleichen Einzelspulen L_{S1} aufgebaut sind. Die Induktivität L_s der Sendespule berechnet sich dann unter Berücksichtigung der Gegeninduktivität M der Einzelspulen aus [6]:

$$L_s = \frac{L_{Sps}}{m} = \frac{1}{m} k(L_{S1} + M) \quad (3)$$

Vorzugsweise werden die Einzelspulen annähernd in einer Helmholtz-Konfiguration um den Bioreaktor gewickelt, um ein in der Reaktormitte weitgehend homogenes Wechselmagnetfeld zu erzeugen. Für diesen Fall existieren einfache analytische Näherungsgleichungen zur Berechnung von L_{S1} und M [7].

Bei einer kreisförmigen Einzelspule mit der Windungszahl N , dem Spulenradius a sowie der Spulenbreite l gilt für das Verhältnis $0 \leq \frac{2a}{l} \leq 10$ in guter Näherung:

$$L_{S1} = \left[\frac{1}{1 + 0,45 \left(\frac{2a}{l}\right) - 5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{2a}{l}\right)^2} \right] \frac{\mu\pi a^2 N^2}{l} \quad (4)$$

Nagoaka-Faktor K_n

Für die Gegeninduktivität M folgt in Helmholtz-Konfiguration:

$$M = 4,94078 \cdot 10^{-7} \cdot N^2 \cdot a \quad (5)$$

Um die Leitungsverluste zu begrenzen, sollten die Wicklungen bei Sendefrequenzen im Kilohertzbereich mit HF-Litze ausgeführt werden, da der Skin-Effekt nach Abschätzung der Eindringtiefe

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \lambda \mu}} \quad (6)$$

bereits zu einer signifikanten ohmschen Widerstandserhöhung der Sendespule führt. Zudem folgt aus höheren Sendefrequenzen in kreisrunden Bioreaktoren (Radius r) bei einer sinusförmigen Flussdichte B und elektrisch leitfähigem Wasser mit der Leitfähigkeit λ eine quadratische Zunahme der Verlustleistungsdichte p [8]:

$$p = \frac{\pi^2}{3} \lambda B^2 f^2 r^2 \quad (7)$$

Diese Wirbelstromverluste sind bei der Wahl der Sendegrundfrequenz im Vorfeld vor allem bei Bioreaktoren mit größeren Durchmessern abzuschätzen und begrenzen die elektromagnetische Grundwelle auf den Frequenzbereich von Langwellensendern (30 kHz – 300 kHz).

2.3 Empfänger

Zur Induktion einer Spannung in den Empfangsspulen sind ungeschirmte Varianten mit der Induktivität L_e zu verwenden, die zusammen mit verlustarmen Keramik-Chipkondensatoren C_e auf die Sendegrundfrequenz abzustimmen sind. Als LEDs werden ebenfalls Chipvarianten verwendet, die farblich an die für das Algenwachstum optimale Wellenlänge angepasst sein sollten. Der Schutz vor Eindringen von Flüssigkeit wird durch transparente Kunststoffisolationen realisiert, wobei das dabei eingeschlossene Luftvolumen zusammen mit der Elektronikmasse einer Dichte von etwa 1 g/ml (Dichte von Wasser) entsprechen sollte. Dadurch wird ein Aufschwimmen oder Absinken der WLEs vermieden. Zudem sollte die Form der Isolation eine selbstständige koaxiale Ausrichtung zum Erregerfeld sicherstellen, um eine gute Kopplung zwischen Sender und Empfänger sicherzustellen.

3 Methoden und Messungen

3.1 Sender

Als Sendegrundfrequenz wurde eine Frequenz von $f = 50$ kHz gewählt. Bei 3 g/l NaCl-Lösung folgt eine elektrische Leitfähigkeit des Mediums von $\lambda = 0,5$ S/m [5]. Bei einer Flussdichte von $B = 1$ mT ergibt sich nach (7) eine Verlustleistungsdichte von lediglich $p \approx 4$ W/m³ und ist damit vernachlässigbar. Gleiches gilt für die Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle mit $\delta = 3,2$ m.

Die Sendespule wurde aus $m = 2$ parallel geschalteten Wicklungssystemen aufgebaut, die aus jeweils $k = 5$ Spulen á 10 Windungen bei einer Wicklungslage bestanden. Als Wicklungslitze diente eine HF-Litze (RUPALIT V155, Rudolf Pack GmbH & Co. KG) bestehend aus 80 Einzellitzen und einem Litzendurchmesser von jeweils 100 µm. Dieser entspricht bei der gewählten Sendegrundfrequenz für das Material Kupfer mit einer elektrischen Leitfähigkeit von $\lambda = 56 \cdot 10^6$ S/m einem Drittel der Eindringtiefe von $\delta \approx 300$ µm. Der Spulenabstand entsprach in etwa der einer Helmholtz-Konfiguration mit einem Spulendurchmesser von $2a = 62$ mm und einer Spulenbreite von $l = 14$ mm.

Bei einem Nagoaka-Faktor von $K_n = 0,345$ ergibt sich rechnerisch eine Induktivität von $L_{Sps} = 54,5$ µH für ein aus 5 Spulen bestehendes Spulensystem. Der rechnerische Widerstandswert des Spulensystems hat unter Berücksichtigung einer Zuleitungslänge von $l_{zul} = 35$ cm den Wert $R_{Sps} = 349$ mΩ.

Die Messung von Induktivität und äquivalentem Serienwiderstand mit einer Messbrücke (SOURCETRONIC ST2829C Precision LCR Meter) war bei einer Messfrequenz von $f = 112 \text{ kHz}$ mit $L_{\text{Sps,m}} = 54,8 \text{ } \mu\text{H}$ und $R_{\text{Sps,m}} = 353 \text{ m}\Omega$ in sehr guter Übereinstimmung mit den theoretischen Werten. Durch die Parallelschaltung beider Spulensysteme ergeben sich für die Sendespule die Werte $L_S = \frac{L_{\text{Sps,m}}}{2} = 27,4 \text{ } \mu\text{H}$ sowie $R_S = \frac{R_{\text{Sps,m}}}{2} = 176,5 \text{ m}\Omega$.

Mit den ermittelten Werten wurde unter Verwendung des Programmpakets KiCAD (www.kicad.org) eine Spice-Simulation aufgebaut und anschließend die Platine entworfen sowie deren Fertigungsunterlagen erstellt. Der bei einer Resonanzfrequenz von $f = 50 \text{ kHz}$ theoretische Kapazitätswert von $C_s = 360 \text{ nF}$ wurde auf $C_s = 200 \text{ nF}$ reduziert, um eine etwas längere Einschalt- und damit Ladephase der Induktivität L_s zu gewährleisten. Das endgültige Tastverhältnis betrug $D = \frac{t_{\text{ein}}}{T} = 0,55$. Die maximale Drain-Source-Spannung am FET beträgt bei einer Versorgungsspannung von $V_{\text{cc}} = 36 \text{ V}$ etwa $U_{\text{DS,max}} = 130 \text{ V}$.

Nach dem Entwurf sowie Fertigung und Bestückung der Treiberplatine wurden die zeitlichen Verläufe sowohl von Spannung als auch von Strom an der Sendespule L_s gemessen (RIGOL DS4034 Digitaloszilloskop, Agilent N2774A 50 MHz Strommesszange) und mit den simulierten Werten verglichen (siehe Abbildung 3). Die Berechnung der Wirkleistung sowohl über eine FFT als auch über eine einfache zeitliche Mittelwertbildung der Augenblicksleistung über eine Periode ergab an der Sendespule eine Wirkleistung von $10,8 \text{ W}$ bei einer Blindleistung von 218 var .

3.2 Empfänger

Die Empfänger wurden mit den Werten $L_e = 47 \text{ } \mu\text{H}$, $C_e = 2 \cdot 100 \text{ nF} = 200 \text{ nF}$ sowie zwei roten LEDs [9] wie in Abbildung 1 dargestellt aufgebaut. Als Baugrößen wurde für die Induktivität CD43 und für die Kapazitäten sowie LEDs 1206 oder metrisch 3216 gewählt. Dadurch konnten die beiden parallel geschalteten Kondensatoren und die beiden LEDs ohne zusätzliche Platine auf den Anschlüssen gestapelt verlötet werden. Die Empfänger wurden abschließend zum Schutz vor Feuchtigkeit in transparenten PP-Halmen verschweißt. Durch die Stabform richten sich diese derart aufgebauten WLEs leichter coaxial zur Strömung und damit zum Erregerfeld aus als beispielsweise WLEs in Kugelform. Zudem reduzierte sich die Geräuschentwicklung bei Kollision der WLEs in der Strömung.

3.3 Algenwachstum

Zur Validierung des Prinzips der induktiven Energieversorgung zur Beleuchtung phototropher Organismen wurde eine Kultivierung des Cyanobakteriums *Arthrospira platensis* (*A. platensis*) durchgeführt. Die Lichtversorgung erfolgte mittels 56 drahtloser Leuchtdioden (LEDs), wie in Abschnitt 3.2 beschrieben. Als Kulturmedium wurde das Vollmedium SOT verwendet, wobei der pH-Wert durch die Einleitung von mit 3 % CO_2 angereicherter Luft stabilisiert wurde. Die Biomassekonzentration wurde durch Messung der Lichtabsorption bei 750 nm ermittelt (UV7-Spektrometer, Mettler Toledo). Zu diesem Zweck wurden während der exponentiellen Wachstumsphase des Organismus täglich Proben aus dem Reaktor entnommen. Die Kultivierung wurde über einen Zeitraum von 35 Tagen durchgeführt.

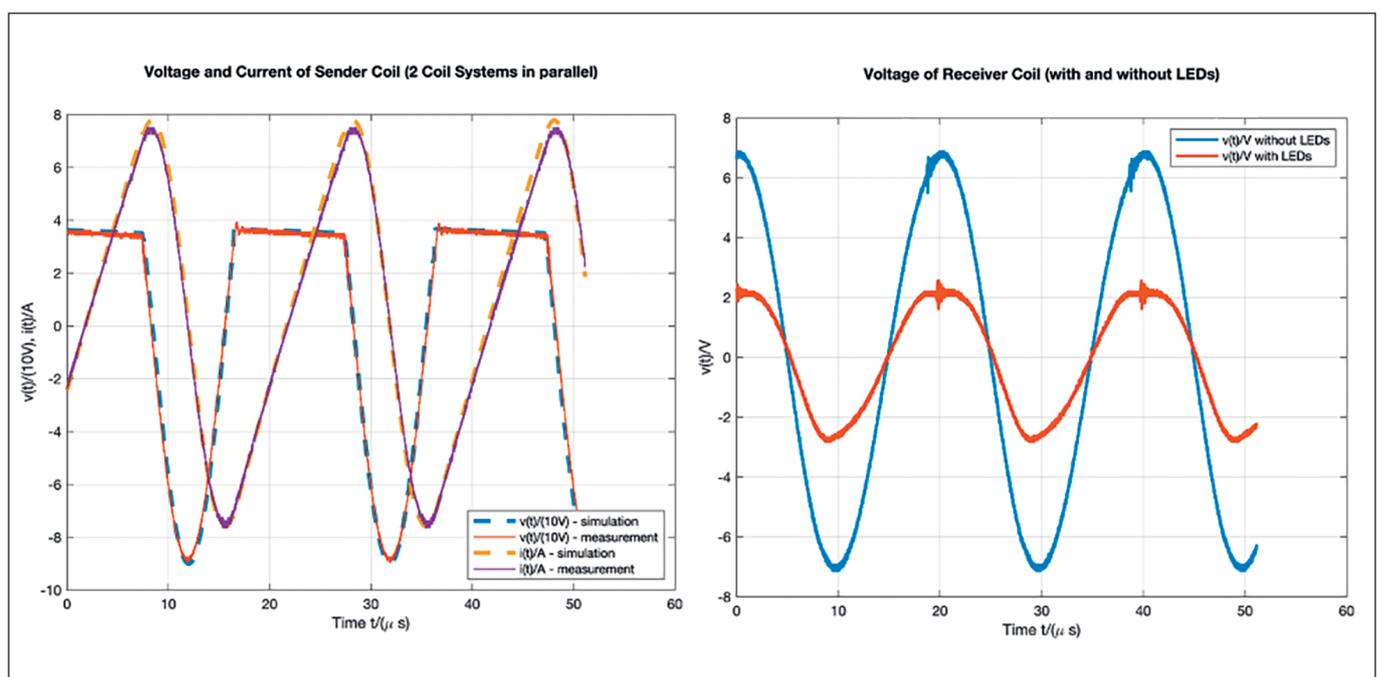


Abbildung 3: Spannung und Strom an Sendespule (links) sowie Spannung an WLE-Empfänger sowohl mit als auch ohne LEDs (rechts).

4 Ergebnisse und Ausblick

Die Funktionsfähigkeit des modifizierten Klasse-C Verstärkers konnte für den Anwendungsfall zur internen Beleuchtung von Bioreaktoren erfolgreich nachgewiesen werden. Die Herstellungskosten der WLEs konnten nach ersten Abschätzungen mit Annahme von 100 % Aufschlag für die Fertigung deutlich auf etwa 20 % vergleichbarer WLEs reduziert werden, mit weiterem Reduktionspotenzial. Um die Herstellung der Stapelbauweise in konventionellen Bestückungsautomaten zu gewährleisten, werden zeitnah erste Entwürfe für Bestückungsschablonen angefertigt.

Die Ergebnisse des Wachstumsverlaufs einer Kultur von *A. platensis* sind in Abbildung 4 veranschaulicht. In den ersten sieben Tagen wurde ein nahezu exponentielles Kulturwachstum beobachtet. In den folgenden Tagen nahm das Wachstum aufgrund von Selbstverschattungseffekten zwar ab, erreichte jedoch während des gesamten Prozesszeitraums keine stationäre Phase. Ein Vergleich der Messdaten mit einem Wachstumsmodell, bei dem die Lichtversorgung als wachstumsbegrenzend betrachtet wurde, zeigte, dass das Wachstum gut durch das Modell beschrieben werden kann (Residual Sum of Squares (RSS) $< 0,006$). Bei der Modellierung wurden dieselben biologischen Parameter ($\mu_{\max} = 2,36$, $K_S = 61,4$) verwendet, wie sie von Jung et al. für die Modellierung einer *A. platensis*-Kultur mit externer Beleuchtung vorgeschlagen wurden [11].

Daraus ergibt sich, dass die Verwendung von induktiv betriebenen LEDs keinen negativen Einfluss auf das Kulturwachstum von *A. platensis* hat. Eine positive Auswirkung der verbesserten Lichtversorgung wird besonders in größeren Reaktorsystemen erwartet, in denen bereits bei geringen Biomassekonzentrationen die Lichtdurchdringungstiefe die Limitierungsfaktoren in der Zellversorgung durch externe Beleuchtung darstellt.

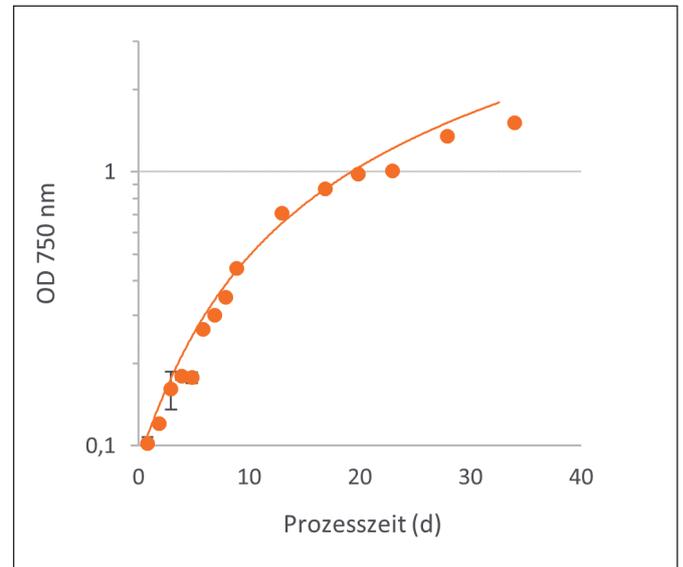


Abbildung 4: Wachstumsverlauf von *A. platensis*. Die Punkte repräsentieren die Messwerte in Dreifachbestimmung, die Line ist das Wachstumsmodell nach Jung et al. (2021) [10]

Referenzen:

- [1] Sukma I., Kitagawa A. (2018): Comparison Topologies of Resonant Tank from Class-C Wireless Power Transfer, Proceedings of iWEM2018, Nagoya, Japan
- [2] Sokal N. O. (2001): Class-E RF Power Amplifiers, QEX, No. 204, S. 9-20
- [3] Sokal, N.O. (2003). Class-E High-Efficiency RF/Microwave Power Amplifiers: Principles of Operation, Design Procedures, and Experimental Verification. In: Huijsing, J.H., Steyaert, M., van Roermund, A. (eds) Analog Circuit Design. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-306-47950-8_14
- [4] Kuipers J. et al. (2012): Near field resonant inductive coupling to power electronic devices dispersed in water, Sensors and Actuators A, vol. 178, S. 217-222
- [5] Sutor A., Heining M., Buchholz R. (2019): A Class-E Amplifier for a Loosely Coupled Inductive Power Transfer System with Multiple Receivers, Energies, vol. 12, p. 1165, doi:10.3390/en12061165

- [6] Huber E., Urban M. (1995): Helmholtzspulen zur Kalibrierung von Magnetfeldsensoren, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe; ISSN 0947-8620
- [7] Welsby V. G. (1950): The Theory and Design of Inductance Coils; Macdonald & Co. LTD., London, UK; S. 25 ff
- [8] Fiorillo, F. (2004): Characterization and Measurement of Magnetic Materials; Academic Press: Cambridge, MA, USA, S. 25–36
- [9] Heining M. (2016): Interne Beleuchtung von Photobioreaktoren mittels Wireless Light Emitttern, Dissertation, Technische Fakultät, FAU Erlangen-Nürnberg
- [10] Jung S. (2021): A new approach for calculating microalgae culture growth based on an inhibitory effect of the surrounding biomass, Bioprocess and Biosystems Engineering, vol. 44, p. 1671-1684, doi:1007/s00449-021-02550-6
- [11] Jung S. (2022): Influence of Process Operation on the Production of Exopolysaccharides in *Arthrospira platensis* and *Chlamydomonas asymmetrica*, Frontiers in Sustainable Food Systems, vol. 6, doi: 10.3389/fsufs.2022.883069

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
 Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
 Labor für Mechatronik und Regelungstechnik
 Kaiser-Wilhelm-Ring 23
 92224 Amberg

b.frenzel@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
 Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
 Labor für Biotechnologie
 Kaiser-Wilhelm-Ring 23
 92224 Amberg

c.lindenberger@oth-aw.de



Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Stich

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
 Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
 Labor für Mechatronik und Regelungstechnik
 Kaiser-Wilhelm-Ring 23
 92224 Amberg

j.stich@oth-aw.de



Bendix Wojaczek, B.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Labor für Biotechnologie
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

b.wojaczek@oth-aw.de



Steven Fischer

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Labor für Mechatronik und
Regelungstechnik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

s.fischer6@oth-aw.de



Sebastian Linhardt, M.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Labor für Biotechnologie
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

s.linhardt@oth-aw.de



Sun-Hwa Jung, M.Sc

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Labor für Biotechnologie
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

s.jung@oth-aw.de