

Ortsungebundene Aufnahme von Prozesssignalen

Neue Messmethode in State-of-the-Art-Bioreaktorsystemen

M.Sc. Tobias Lücke • Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme – ENAS Advanced System Engineering, Paderborn

Dipl.-Ing. Tim Lauterbach • Technische Universität Dresden, Institut für Naturstofftechnik, Dresden

Korrespondenz: M.Sc. Tobias Lücke, Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme – ENAS Advanced System Engineering, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn;
e-mail: tobias.lueke@enas-pb.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt das Konzept der Sens-o-Spheres vor. Mit dieser neuen Entwicklung ist es möglich, die bisherige Form der Messwerterfassung in Bioreaktoren, z. B. diejenigen der pharmazeutischen Biotechnologie, zu revolutionieren. Anstelle der üblichen Stabsonden, die über definierte Einlässe in den Reaktor eingeführt werden, werden sehr kleine, mobile Sensorkugeln direkt in den Prozess appliziert. Das Verfahren arbeitet ortsungebunden und ermöglicht eine Messauflösung über das gesamte Probenvolumen hinweg, was zu einer höheren Informationsdichte führt und somit einen optimierten Prozessablauf ermöglicht.

1. Einleitung

Für die Bioverfahrenstechnik ist eine genaue Kenntnis der ablaufenden Prozesse essenziell. Dadurch können Zielprodukte wie pharmazeutische Wirkstoffe erzeugt, aber auch die Gewinnung z. B. von Enzymen mithilfe nachwachsender Rohstoffe ressourcenschonend und effizient umgesetzt werden.

Die typische Ausführung einer Messvorrichtung umfasst das Einbringen einer Sonde über einen standardisierten Port in das Prozessvolumen. So wird lediglich eine örtlich aufgelöste, punktartige Messwerterfassung abgebildet, welche keine Aussage über Inhomogenitäten im Bilanzraum zulässt. Durch die schlechte Auflösung kann es zu ungünstigen Reglereinstellungen kommen und dies wiederum zu unerwarteten Ergebnissen oder Nebenprodukten führen. Des Weiteren können klassische Ausführungen von Messvorrichtungen die Misch- und Trans-

Autoren



M.Sc. Tobias Lücke

M.Sc. Tobias Lücke arbeitet seit Mitte 2016 in der Abteilung Advanced System Engineering (ASE) am Fraunhofer ENAS in Paderborn. Zu seinen Aufgabengebieten zählen u. a. die drahtlose Energieübertragung sowie die Simulation von HF-Komponenten. In vielen Forschungsprojekten wurden Lösungen zur drahtlosen Energieübertragung am Standort Paderborn entwickelt. Darüber hinaus entwickelt das Team aus Paderborn kundenspezifische Lösungen und deckt dabei den kompletten Entwicklungsbereich ab.



Dipl.-Ing. Tim Lauterbach

Dipl.-Ing. Tim Lauterbach ist seit 4 Jahren wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Naturstofftechnik (INT) der Technischen Universität Dresden. Zu seinen Aufgabengebieten zählen u. a. die Auslegung von Mess- und Automatisierungslösungen für das Labor sowie Strömungssimulationen in biotechnologischen Umgebungen. Die Forschungsgruppe SmartLab-Systeme an der Professur für Bioverfahrenstechnik des INT beschäftigt sich außerdem mit der Automatisierung rund um die Petrischale und der photogrammetrischen Analyse biologischer Strukturen auf festen Nährböden.

Key Words

- Drahtlose Energieübertragung
- Drahtlose Kommunikation
- Minimalinvasive Messung
- Autarkes Messsystem



Abbildung 1: Produktidee der Sens-o-Spheres (Quelle: Technische Universität Dresden).

portvorgänge im biotechnologischen Prozess so stark beeinflussen, dass daraus Probleme beim Upscaling resultieren können. Ferner machen innovative Bioreaktoren für neue biotechnologische Produktionsprozesse den Einbau gängiger Sensordensysteme durch ihre Bauart (z.B. bei Flat-Panel-Bioreaktoren) oder durch ihre Ausmaße (z.B. bei parallelisierten Mikroreaktoren zur Herstellung von Wirkstoffen) oft unmöglich oder weisen konstruktiv bedingte Inhomogenitäten auf (z.B. bei kilometerlangen Röhrenreaktoren für die Algenkultivierung). In diesem Fall ist eine ortsgebundene Auswertung von Messsignalen wenig sinnvoll. Folglich ist die Überwachung solcher Prozesse oftmals nur mit sehr großem Aufwand möglich bzw. durch den Preis des Zielprodukts häufig nicht mehr zu rechtfertigen.

Mit den neu entwickelten Sens-o-Spheres (Abb. 1) werden die genannten Nachteile umgangen. Die 7,9 mm großen Kugeln sind mit einem Low-Power-Mikrocontroller und einer speziell für die Messsphären entwickelten Elektronik ausgestattet. Für einen völlig autarken Betrieb

wird diese Elektronik über einen Akkumulator mit Energie versorgt. Während des Prozessablaufes senden die Sphären per Funk kontinuierlich Messdaten an eine externe Basisstation, welche in Echtzeit die Daten auswertet und als Messsignal für eine Regelstrecke bereitstellt. Eine geeignete Kapselung der Elektronik macht sie zu einer minimalinvasiven Mikromessvorrichtung. Durch die Anpassung der Dichte auf typische Prozessmedien sind die Kugeln in der Lage, sich frei zu bewegen. Dadurch können die Messgrößen wie z.B. die Temperatur überall innerhalb des Volumens gemessen werden. Mit einer eigens entwickelten drahtlosen Ladetechnik werden die Sphären nach Ablauf eines Prozesses wieder aufgeladen, um sie anschließend erneut einsetzen zu können.

2. Theorie und Grundlagen

2.1 Drahtlose Energieübertragung

Das Prinzip der drahtlosen Energieübertragung basiert auf der elektromagnetischen Kopplung zweier Spulen, wie es schon Nikola Tesla im 20. Jahrhundert beschrieben hatte [1]. Diese auch als Wireless Energy Transmission (WET) bezeichnete Technologie überträgt elektrische Energie im Nahfeldbereich. Nahfeldbereich bedeutet, dass die Energie über einen Abstand von wenigen Zentimetern vom Energiesender zum Energieempfänger übertragen wird.

Das einfachste System besteht aus einem Paar gekoppelter Induktivitäten

(Abb. 2). Zur Identifikation solcher Systeme ist die Qualität der Kopplung der beiden Paare miteinander entscheidend. Aufschluss hierüber gibt der Kopplungsfaktor k . Dieser kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Er beträgt bei großer Entfernung oder völliger Abschirmung zum Energiesender $k = 0$. Umgekehrt nimmt er den Wert nahe $k = 1$ an, wenn beide Spulen vom gleichen magnetischen Fluss Φ durchsetzt sind. Bei $k = 0$ wird von Entkopplung und bei $k = 1$ von totaler Kopplung gesprochen.

Ein weiteres wichtiges Merkmal ist der Wirkungsgrad η . Für einen hohen Wirkungsgrad muss bei der Energieübertragung lediglich Wirkleistung umgesetzt werden. Aufgrund der Induktivitäten im Netzwerk wird zusätzlich auch Blindleistung erzeugt. Um diesen unerwünschten Nebeneffekt zu kompensieren, werden Kondensatoren mit in das Netzwerk eingebracht, so dass sich das Ersatzschaltbild nach Abb. 3 ergibt. Zu sehen sind neben den Induktivitäten L_1 und L_2 jeweils die zugehörigen Innenwiderstände R_1 und R_2 sowie die Kompensationskondensatoren C_1 und C_2 . Damit der Blindanteil der Induktivitäten komplett kompensiert wird, müssen die Kapazitäten auf die Übertragungsfrequenz des Senders f_{Sender} ausgelegt werden. Dies geschieht im einfachsten Fall mit der Thomsonschen Schwingungsgleichung [2]. Proportional zur Kopplung ist die Gegeninduktivität M . Mit ihr lässt sich das gesamte System über einen geschlossenen mathematischen Ausdruck beschreiben.

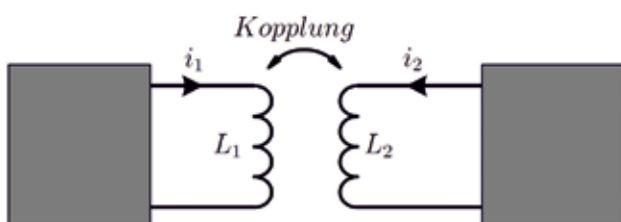


Abbildung 2: Paar gekoppelter Induktivitäten (Quelle: Fraunhofer ENAS).

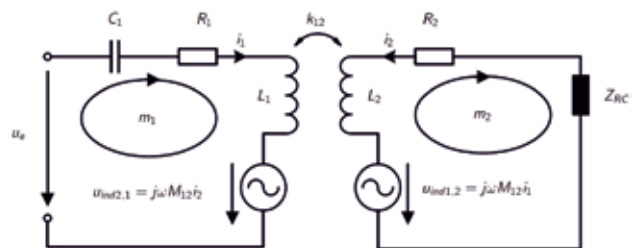


Abbildung 3: Ersatzschaltbild des Übertragungskanal (Quelle: Fraunhofer ENAS).

3. Aufbau und Funktionsweise des Systems

Abbildung 4 illustriert das Konzept des neuen Sensors. Zu sehen sind die verschiedenen Komponenten, die sich jeweils im Messsystem befinden. Wichtig hierbei und für die nachfolgenden Betrachtungen sind die Position des Energieempfängers sowie dessen Größe.

3.1 Energieempfänger

Das völlig autarke Messsystem wird während des Prozesses über einen internen Energiespeicher mit der nötigen Energie versorgt. Für eine erneute Verwendung muss die Batterie immer wieder aufgeladen werden.

3.1.1 Batterie

Die Batterie stellt die nötige Energie bereit, die während des Prozessablaufs zum Messen und Senden der Daten benötigt wird. Sie befindet sich in der Mitte der Sphäre. Aus folgenden Gründen wurde der Ort der Batterie bewusst gewählt: Einerseits ist dort am meisten Platz vorhanden, was zu einer Batterie mit einer ausreichenden Kapazität führt. Andererseits ist sie das schwerste Bauteil,

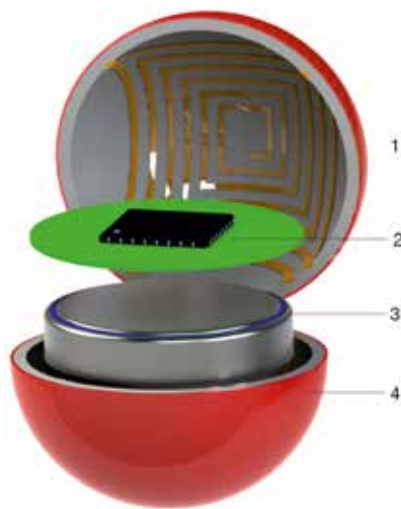


Abbildung 4: Konzept der Sens-o-Spheres. 1 = Energieempfänger, 2 = Mikrocontroller und Signalverarbeitung, 3 = Batterie, 4 = Kapselung (Quelle: Technische Universität Dresden).

womit gewährleistet werden kann, dass der Masseschwerpunkt im Zentrum der Kugel liegt. Zum Laden der Batterie wird eine Gleichspannung benötigt. Die empfangene Spannung des Energieempfängers ist eine Wechselspannung, welche daher zunächst gleichgerichtet werden muss. Bedingt durch den geringen Bauraum befindet sich kein konventionelles Batteriemanagement-Tool zur Überwachung des Ladevorgangs in der Sphäre. Vielmehr überwacht ein Mikrocontroller den Ladeprozess. Er reagiert auf Überspannung beim Laden und gewährleistet zudem, dass sich die Batterie nicht tiefenentlädt.

3.1.2 Spule in der Sphäre

Weil sich die Batterie bereits im Zentrum der Messgeräte befindet, muss zunächst ein geeigneter Ort für die Energieempfängerspule gefunden werden. Dafür wurde eingangs ein grobes Design der Spule erstellt. Für den Aufbau einer drahtlosen Energieübertragung gibt es mehrere relevante Parameter, die im ersten Schritt frei gewählt werden. Mittels computergestützter Simulationen durch CST Studio Suite [3] können diese Parameter in einem vordefinierten Bereich einem sog. Parameter-Sweep unterzogen werden. Wird eine Zielfunktion definiert, hier die Güte Q der Spule, ermittelt der Algorithmus durch die Linearkombination aller Parameter miteinander die beste Geometrie für das vorliegende Problem. Sie wurde auf ihre Güte Q hin optimiert, da dieser Parameter ein gutes Maß einer geeigneten Spule darstellt.

3.2 Ladestation

Mit der gefundenen, optimierten Empfängerspule muss als nächstes die Ladestation entwickelt werden. Um für ein gegebenes Energieübertragungssystem die größtmögliche Kopplung k zu erreichen, haben Energiesender und Energieempfänger eine identische Größe. Weiterhin hängt die Kopplung vom Abstand beider Spulen und ihrer Ausrichtung zueinander ab [4, 5]. Dabei gilt: Je

größer der Abstand ausfällt, desto kleiner ist die Kopplung. Die Kopplung ist bei einem gegebenen Abstand für eine parallele Ausrichtung und ohne horizontale Verschiebung der Spulen am größten.

3.2.1 Anforderungen an die Ladestation

Um das System für den Endanwender einfach in der Handhabung zu gestalten, soll die Ladestation das Laden positionsunabhängig ermöglichen. Zusätzlich sollen mehrere Sphären gleichzeitig geladen werden. Dazu muss die Ladespule um ein Vielfaches größer sein als die Spule in der Sphäre. Für das geforderte Maß an Flexibilität und bedingt durch die große Divergenz zwischen Sende- und Empfangsspule ist es erforderlich, dass die Ladestation höchsten technischen Ansprüchen genügt.

Während der Untersuchungen wurden die verschiedensten Ladetopologien erarbeitet und bzgl. ihrer Tauglichkeit untersucht. Das den Anforderungen am besten entsprechende Design ist in Abb. 5 zu sehen.

Dieses dreidimensionale Ladesystem besteht aus insgesamt 5 Spulen. 4 der 5 Spulen sind planar auf Printed Circuit Board (PCB) gedruckte rechteckige Spulen. Die 5. Spule ist eine gewickelte zylindrische Spule. Sie deckt eine parallele Orientierung der Sphären für den Ladeprozess ab. Nachfolgende Untersuchungen zeigen, dass allein durch das 5-Spulen-Laderohr die Ladeabdeckung für sämtliche Orientierungen noch nicht ausreichend ist. Mittels einer intelligenten Phasensteuerung jeder einzelnen Spule des genannten Energiesenders kann die Feldverteilung bewusst eingestellt werden. Damit können die Sphären in nahezu jeder Position geladen werden.

3.3 Drahtlose Kommunikation

Das für die Sens-o-Spheres verwendete Verfahren der drahtlosen Kommunikation basiert auf jenem, welches aus der Radio-Frequency-Identification (RFID)-Technik bekannt ist.

Bei RFID-Systemen wird zwischen passiven und aktiven Systemen unterschieden. Passive Systeme besitzen keine eigene Spannungsversorgung – sie beziehen ihre Energie aus dem Feld des Datenempfängers (Reader). Innerhalb des Datensenders (Tag) der Kugeln befindet sich eine Batterie, welche das System zu einem aktiven System macht. Dadurch sind die Sphären in der Lage, ihre Daten kontinuierlich und unabhängig vom Reader zu senden. Überdies ist die Reichweite solcher Systeme gegenüber derjenigen passiver Systeme deutlich erhöht.

3.3.1 Charakterisierung der Flüssigkeiten

Für die Kommunikationsantenne ist das genaue Verständnis über die elektrischen Eigenschaften der jeweiligen Medien essenziell. Anders als bei der Übertragung im Wasser wird die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im dielektrischen

Medium bzw. der biotechnologischen Flüssigkeit noch stärker gedämpft. Dieses veränderte Verhalten spiegelt sich in der Vergrößerung des Imaginärteils der komplexwertigen Permittivität $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ wieder – wobei an dieser Stelle ϵ'' für den Imaginärteil steht. Dieser Wert ist ein Maß für die Energieabsorption.

3.3.2 Kommunikationsantenne

Die Messungen wurden mittels eines Netzwerkanalysators (NWA) durchgeführt. Die Ergebnisse bzw. die gemessenen Werte lassen sich direkt in den Simulator integrieren, so dass die Simulationsumgebung den realen Bedingungen entspricht. Bei den prozessierten Substanzen bewegt sich die imaginäre Permittivität ϵ'' im Bereich von bis zu $\epsilon'' = 62$, wobei sich der Realteil der Permittivität mit $\epsilon' = 82$ nicht wesentlich von jener von Wasser unterscheidet. Durch den gesteigerten Wert des Imaginärteils der Permittivität steigt die

Dämpfung der Welle gegenüber der Ausbreitung im Wasser an, was sich negativ auf die Reichweite auswirkt. Hierbei wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt, um die geeignetste Kommunikationsantenne zu finden. Als optimal stellte sich dabei eine ringförmige Geometrie um die Batterie heraus.

3.3.3 Kommunikationsprotokoll

Das Kommunikationsprotokoll beinhaltet neben den prozesstechnischen Messwerten u. a. die Nummer des Bioreaktors (Vessel-ID) und die Nummer der Sphäre (Sphären-ID). Diese beiden Informationen sind notwendig, um einzelne Sphären sowie parallel laufende Prozesse voneinander unterscheiden zu können. Die Zeit eines biotechnologischen Prozesses kann je nach Verfahren und Organismus stark variieren. Die Variation reicht hierbei von einigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen und Wochen. Dementsprechend ist die zeitliche Auflösung der Messung von großer Bedeutung. Die Kapazität der internen Batterie ist begrenzt, so dass auch nur eine begrenzte Anzahl von Sendezyklen zur Verfügung steht. Mit dem a-priori-Wissen der Laufzeit eines Prozesses lässt sich das Sendeintervall so einstellen, dass ein perfekter Kompromiss aus Wiederholrate und Dauer geschaffen werden kann. Zu Beginn wird die Sphäre zunächst mit Sphären-ID und Vessel-ID geprägt. Aus der Vessel-ID lassen sich intern das jeweilige Setup berechnen und die Zeit zwischen 2 Sendezyklen individuell einstellen.

3.4 Basisstation

Alle gesammelten Informationen laufen in der Basisstation zusammen. Sie ist das Herzstück der gesamten Entwicklung. Durch den vorherigen Prägevorgang haben die Sphären eine eigene Signatur (Sphären-ID) und lassen sich unterscheiden. Über die Vessel-ID kann der Bezug zu den einzelnen Bioreaktoren hergestellt werden. Eine grafische Oberfläche ordnet die empfangenen Messwerte

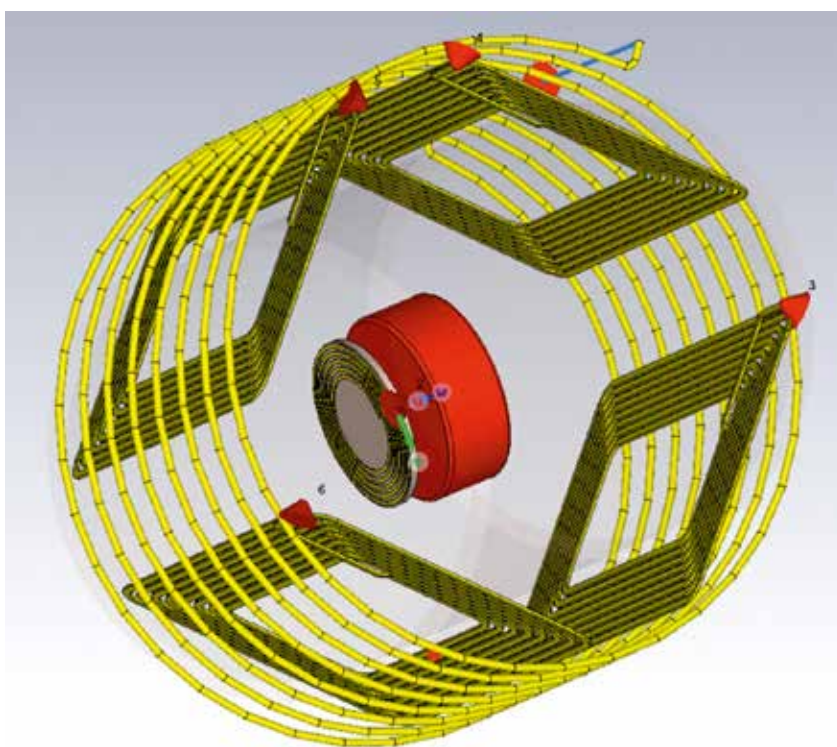


Abbildung 5: Computer-Aided-Design (CAD)-Modell des Laderohrs. Zu sehen sind die 4 planaren Spulen und die gewickelten zylindrischen Spulen. Zudem sind der Energieempfänger (kleine runde Spule) und die Batterie (roter Block) dargestellt (Quelle: Fraunhofer ENAS).

zu und visualisiert diese. Zusätzlich zu den Messwerten werden der Batteriestand und die Sendeleistung der einzelnen Sphären mitübertragen. Die aufgenommenen Messwerte werden in einer eigens entwickelten Software gespeichert und ausgewertet. Mit ihr lässt sich der gesamte Prozess im Nachhinein bewerten und rückverfolgen. Für die Zukunft soll die Basisstation über ein standardisiertes Protokoll in jede handelsübliche Prozessleitstelle integriert werden. Dadurch entsteht die Möglichkeit, die aktuellen SONDENSYSTEME sehr einfach und schnell durch die neuen Sensoren zu ersetzen.

3.5 Kapselung

Die Kapselung der Sensorsphäre besteht aus Polypropylen (PP). Die Formgebung erfolgt im Mikrospritzgussverfahren, wobei 2 Halbschalen gegossen werden. Das Fügen der beiden Halbschalen wird mit dem Verfahren des Laserschweißens realisiert, was eine feste Verbindung und somit die Dichtigkeit sicherstellt. Die innere Struktur ist so gestaltet, dass die Platine sicher in einer Position gehalten wird. Außen ist die Kapsel hingegen glatt, um ein Aufwachsen von Biofilmen zu vermeiden und eine einfache Reinigungsfähigkeit zu ermöglichen. Für Einsatz in biologischen Prozessen muss eine Keimfreiheit der Sensoren gewährleistet werden. Hierfür können gängige chemische Substanzen wie ethanolhaltige Lösungen oder auch andere Lösungen mit unphysiologischen pH-Werten wie peressigsäurehaltige Lösungen genutzt werden. Obendrein verhält sich die Kapselung gegenüber biologischen Proben inert und ist somit biokompatibel.

3.6 Praktische Anwendung

Ein großer Vorteil des Systems zur drahtlosen Erfassung von Messwerten mittels miniaturisierter Sensoren ist der variable Einsatz in verschiedenen Reaktorsystemen. Insbesondere in kleinskaligen Reaktoren wie im Schüttelkolben ist eine einfache

Messwertaufnahme nicht ohne größeren technischen Aufwand möglich. Abbildung 6 zeigt den Demonstrator des gesamten Systems. Die etwa erbsengroßen Sensoren können während des Inokulationsvorganges dem Kultivierungsgefäß hinzugegeben werden und ermöglichen so eine Online-Erfassung der Messwerte, ohne dass bauliche Veränderungen am Inkubator vorgenommen werden müssen. Dabei können Form und Größe des Reaktors bis zu einem Volumen von 3 l variabel gewählt werden. So können die Messeinheiten auch in gerührten Systemen im Labormaßstab oder in Wave-Reaktoren eingesetzt werden.

Zudem kann mithilfe des vorgestellten Konzepts eine redundante Messwertaufnahme einfach realisiert werden. Da die Basisstation bis zu 24 Messsonden parallel erfassen kann, können innerhalb eines abgegrenzten Prozessvolumens mehrere Sensoren für die gleiche Messgröße genutzt werden. Sollte es zum Ausfall eines Sensors kommen, kann dies durch die anderen kompensiert wer-

den, so dass eine durchgängige Dokumentation bzw. Regelung gewährleistet bleibt.

Für den verbauten Temperatursensor wurde das System charakterisiert. Die Messstrecke zeigt dabei ein PT1-Verhalten mit einer Verzögerungszeit von etwa 12 Sekunden, welche mittels der Tangentenmethode bestimmt wurde. Damit ist die Dynamik ausreichend, um für biologische Prozessführung Anwendung zu finden. Auch im Vergleich zu kabelgebundenen Temperatursonden in gerührten Reaktoren zeigen die mobilen Sensoren ein paralleles Verhalten.

Trotz der hohen Rührerdrehzahlen kommt es zu keinen Beschädigungen der Sphären. Die Verkapselung ist auch nach einer Kollision mit dem Rührer dicht, so dass die Kugeln mehrfach benutzt werden können. Durch die vom Rührer erzeugten Turbulenzen in der Flüssigkeit in Verbindung mit der angepassten Dichte der Messeinheit konnte beobachtet werden, dass sich die Sphären zu unterschiedlichen Zeit-



Abbildung 6: Demonstrator der Sens-o-Spheres. Zu sehen sind das Ladegerät, die Basisstation, die Sensorkugeln in einer Petrischale und ein Handapparat, um die Sphären steril zu applizieren (Quelle: Technische Universität Dresden).

punkten stochastisch über den gesamten Probenraum verteilen. Eine genaue Aussage über die Verteilung ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. In einer weiteren Projektphase soll die Ortung der Kugeln umgesetzt werden. Dadurch können die genaue Verteilung über die Prozesszeit hinweg abgebildet und die Position einer jeden Kugel bestimmt werden.

4. Förderung und weitere Projektpartner

Das Forschungsprojekt „Sens-o-Spheres II | Ortsungebundene Aufnahme von Prozessmesssignalen in neuartigen Bioreaktorsystemen“ wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen: 031B0048A.

Alle vorgestellten Ergebnisse entstanden in Kooperation mit folgenden Projektpartnern:

- Technische Universität Dresden, Professur für Bioverfahrenstechnik, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden
- e-nema GmbH
Klausdorfer Str. 28–36,
24223 Schwentinental
- IMST GmbH
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2–4,
47475 Kamp-Lintfort
- SAAS GmbH
Neues Leben 30, 01728 Bannewitz
- Ökoplast GmbH
Industrieweg 10, 09648 Mittweida
- Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS
Abteilung ASE
Warburger Str. 100, 33098 Paderborn

Literatur

- [1] Tesla, Nikola: Apparatus for transmitting electrical energy. Dez. 1, 1914. – US Patent 1,119,732
- [2] Finkenzeller, Klaus: RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. 4., aktualisierte und erw. Aufl. München [u. a.]: Hanser, 2006. – ISBN 3–446–40398–1, 9783446403987, 3446403981, 978–3–446–40398–7
- [3] Computer Simulation Technology, CST Studio Suite 2015. <https://www.cst.com/products/csts2> (zuletzt abgerufen am 24.07.2017)
- [4] Kyriaki Fotopoulou, Brian W. Flynn: Wireless Power Transfer in Loosely Coupled Links: Coil Misalignment Model, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS Vol. 47
- [5] X. L. Huang, H. Qiang, and L. L. Tan: The Coil Misalignment Model of Inductively Coupled Wireless Power Transfer System: Mutual Inductance Analysis and Transfer Efficiency Optimization, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, Aug. 19–23, 2012

Profitieren Sie von:

- ▶ über 160 Experten, die für Sie nahezu jedes GMP-Projekt abwickeln
- ▶ einem flexiblen und bedarfsgerechten Qualifizierungs- und Validierungssupport
- ▶ herstellerunabhängigen Kalibrierungen und über 200 DAkkS-akkreditierten Kalibrierverfahren

Testo industrial services GmbH
Gewerbstraße 3 · 79199 Kirchzarten
gmp@testotis.de · Fon 07661 90901-8000

www.testotis.de

Wir messen es. 

Full-Service für Ihre GxP-Compliance

Kalibrierung, Qualifizierung,
Validierung & GxP-Services