

Sens-o-Spheres III – ein extrem miniaturisierter, drahtloser Sensor zur Prozessüberwachung in Bioreaktorsystemen

Fischer, Horst; Lohmann, Dirk; Buchner, Peter; Moll, Rüdiger; Uhlig, Peter
IMST GmbH, Kamp-Lintfort

Kurzfassung

Ziel des Sens-o-Spheres-Projektes ist die Entwicklung eines Messsystems zur durchgängigen Erfassung verschiedener Prozessparameter in Bioreaktoren. Zur Prozessüberwachung, -regelung und -optimierung in Bioreaktoren sollen die Temperatur, der pH-Wert und der Gehalt an gelöstem Sauerstoff innerhalb des Reaktors orts aufgelöst erfasst werden. Dazu werden miniaturisierte Sensoren verwendet, die im Bioreaktor verteilt sind und die erfassten Messdaten drahtlos an eine Basisstation übertragen. Die im Folgenden beschriebenen Sensoren befinden sich in kleinen Kunststoffkugeln ($d < 9$ mm), die neben den eigentlichen Sensoren auch noch jeweils einen Mikrocontroller zur Datenauswertung, einen Transceiver zur Datenübertragung sowie die Stromversorgung in Form eines Akkumulators plus Ladeelektronik beinhalten. Die Ladung des Akkus erfolgt (außerhalb des Bioreaktors) kontaktlos über eine Induktionsspule, die in die Kugel integriert ist. Diese Induktionsspule bildet zusammen mit einer zusätzlichen Kapazität einen Schwingkreis, der auf 13,56 MHz abgestimmt ist. Beim Einsatz im Bioreaktor dient dieser Schwingkreis der Erzeugung eines Backscatter-Signals, welches die Ortung der Kugel ermöglicht, wodurch jedem Messwert eine Ortsinformation innerhalb des Bioreaktors zugeordnet werden kann. Die Messwerte werden in regelmäßigen Zeitintervallen erfasst und drahtlos an eine Basisstation übertragen, wo sie dann dokumentiert und ausgewertet werden. Es sind 3 Typen von Sensorkugeln geplant:

- Sensorkugeln zur Temperaturmessung
- Sensorkugeln zur Temperatur- und pH-Wertmessung
- Sensorkugeln zur Temperaturmessung und Messung des gelösten Sauerstoffs

Besondere Herausforderungen bei der Entwicklung der Sensorkugeln stellen die Miniaturisierung der Elektronik sowie die Minimierung des Stromverbrauchs dar.

1. Anwendung

Für die nachhaltige, biobasierte Herstellung von Pflanzenschutzmitteln und anderen Wirkstoffen werden zur industriellen Produktion Festbettbioreaktoren eingesetzt. Mit zunehmendem Volumen wird die Bestimmung von wichtigen Prozessparametern wie Sauerstoffgehalt oder pH-Wert durch Inhomogenität im Reaktor immer schwieriger.

Kleine drahtlose Sensoren, die in dem dafür eingesetzten Drehtrommelreaktor schweben, sollen in Echtzeit die Prozessparameter orts aufgelöst erfassen und übertragen. Aus der extremen Miniaturisierung der hierfür notwendigen Funktionen ergeben sich neue Herausforderungen in der Schaltungstechnik, der Telemetrie und der Stromversorgung. Zur Lösung dieser komplexen Aufgaben haben sich die SAAS GmbH, die IMST GmbH, die Ökoplast GmbH und die e-nema GmbH gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut ENAS und der TU Dresden zu einem Verbundforschungsvorhaben zusammengeschlossen. Dieses Vorhaben wird unter dem Namen Sens-o-Spheres III vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

2. Hardware

In einer Vielzahl von Anwendungen schweben die Sensorkugeln in einem mehr oder weniger flüssigen Reaktionsmedium, das regelmäßig durchmischt bzw. umgewälzt wird. Dabei sollen die Sensorkugeln weder an der Oberfläche schwimmen noch zu Boden sinken, idealerweise schweben sie im Medium und verteilen sich dabei gleichmäßig im Volumen. Daher ist es erforderlich, dass die Dichte der Sensorkugeln möglichst exakt der Dichte des Mediums entspricht, in dem sie sich befindet. Nach Abschätzen des Gesamtgewichts wurde unter Berücksichtigung der gewünschten Dichte von ca. $1,1 \text{ g/cm}^3$ der Außendurchmesser der Sensorkugel auf 8,9 mm festgelegt. Zur optimalen Nutzung des Kugelvolumens besteht die Elektronik aus drei Leiterplatten, die übereinander gestapelt werden (siehe Abb. 1).

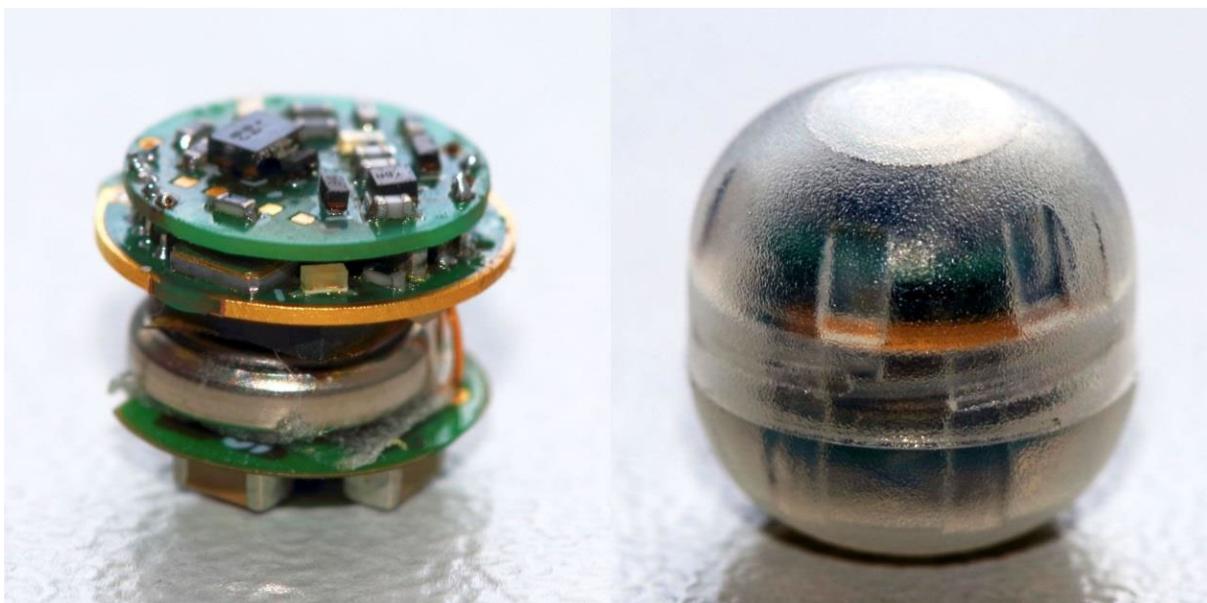


Abb. 1: Elektronik der Sensorkugel (links), komplette Sensorkugel (rechts)

Die zentrale Hauptplatine mit dem Mikrocontroller und dem Transceiver stellt sechs Kupferlagen für das Routing zur Verfügung, ist dabei aber nur $300 \mu\text{m}$ dick. Darüber

befindet sich die Platine mit der Ladeelektronik und der Sensorik. Unterhalb der Hauptplatine befinden sich die Batterie und eine Leiterplatte mit den Stützkondensatoren, die die Stromversorgung bei Stromspitzen aufrechterhalten. Die drei Platinen sind mit Drähten untereinander verbunden. Die Hauptplatine und die Stromversorgung sind bei allen Varianten identisch. Die Varianten unterscheiden sich durch unterschiedliche Sensorplatinen. Das komplette Elektronikpaket wird von einem Kapselgehäuse aus Polypropylen vor Feuchtigkeit und anderen äußeren Einflüssen geschützt. Das Kugelgehäuse wurde von Firma Ökoplast entworfen und gefertigt. Es besteht aus zwei Halbschalen, die miteinander verschraubt und mit einem O-Ring abgedichtet werden.

2.1. Stromversorgung

Die Batterie ist eine zentrale Komponente, da sie nicht nur das Gewicht und das Volumen, sondern auch die maximal zur Verfügung stehende Energie vorgibt. Für die Sensorkugeln kommt der Typ MS412FE von Seiko zum Einsatz. Der maximal zulässige Entladestrom der Batterie ist mit 0,1 mA vergleichsweise klein, Stromspitzen müssen also über hinreichend Stützkapazität abgefangen werden. Die Spannung darf dabei auch bei niedrigem Ladezustand der Batterie 2,1 V nicht unterschreiten. Da sich die gesamte Elektronik in einem wasserdicht gekapselten Gehäuse befindet, muss das Laden der Batterie drahtlos erfolgen. Zu diesem Zweck befindet sich auf einer Leiterplatte eine gedruckte Induktionsspule. Diese Induktionsspule bildet gemeinsam mit zwei Kondensatoren einen Parallelschwingkreis, der auf die Frequenz des Ladestroms von 13,56 MHz abgestimmt ist. Über einen Feldeffekttransistor kann ein weiterer Kondensator zugeschaltet werden, was den Schwingkreis verstimmt. Damit wird verhindert, dass bei Erreichen der Ladeendspannung weiterhin Energie in die Sensorkugel eingebracht wird, die dann wiederum verbraucht werden müsste. Dieser verstimmbare Schwingkreis wird außerdem für die Ortung verwendet.

MS412FE	Wert
Nominalspannung	3 V
Ladeendspannung (Standardwert)	2,8 V...3,3 V (3,1 V)
Nominale Kapazität¹	1,0 mAh
Innenwiderstand	100 Ω
Standard Lade- / Entladestrom	10 µA
Maximaler Entladestrom (kontinuierlich)	100 µA
Durchmesser	4,8 mm
Höhe	1,2 mm
Gewicht	0,07 g

Tab. 1: Spezifikationen der verwendeten Batterie MS412FE

¹ Typischer Kapazitätswert bei Entladung von 3,1 V auf 2,0 V

Die PCB-Spule für das induktive Laden der Batterie sollte möglichst weit außen und freistehend realisiert werden, was aber im Widerspruch zum Gedanken der Miniaturisierung steht. Hier musste ein Kompromiss gefunden werden. Wichtig ist vor allem ein möglichst großer Abstand zur Batterie, da diese aus ferromagnetischem Material besteht und das Magnetfeld im schlimmsten Fall abschirmen würde. In untenstehender Abbildung sind die räumlichen Verhältnisse dargestellt. Die Ladespule ist auf der Unterseite der mit COIL_LOAD PCB bezeichneten Platine realisiert.

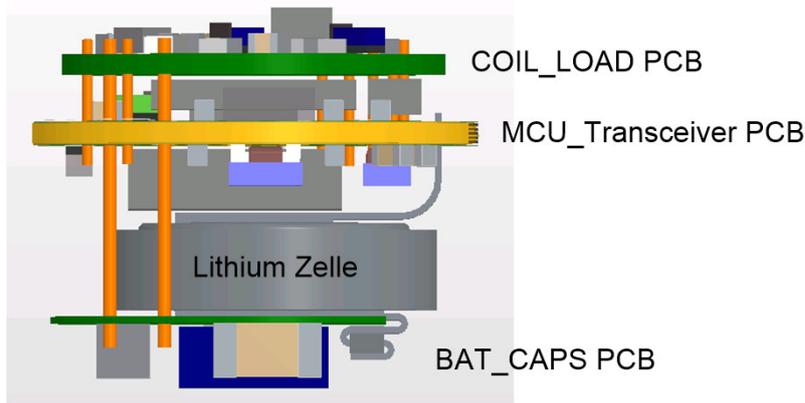


Abb. 2: Modularer Aufbau der Elektronik

2.2. Mikrocontroller

Die wichtigsten Auswahlkriterien für den Mikrocontroller sind Größe, Gewicht und Stromverbrauch. Außerdem gibt es Mindestanforderungen an die Art und Anzahl der Schnittstellen, den Speicherplatz und die Rechenleistung. Weiterhin muss die Versorgungsspannung zur verwendeten Batterie passen. Die Wahl fiel schließlich auf einen Happy Gecko Mikrocontroller von Silicon Labs mit der Typenbezeichnung EFM32HG350F64- B-CSP36, einen 32 Bit ARM® Cortex®-M0+. Der Platzbedarf beträgt 3,02x2,89 mm. Die geringen Abmessungen werden durch ein Chip Scale Package (CSP) erreicht. Bei dieser sehr kompakten Bauform ist die Rückseite durch eine undurchsichtige schwarze Beschichtung (in Abb. 3 durch die Flip-Chip-Montage oben) geschützt und die Vorderseite durch die Umverdrahtungsebene und die Lötkekeln. An den Kanten jedoch liegt das Halbleitermaterial des Chips frei.

Beim Betrieb der Sensorkugeln unter freiem Himmel stellte sich heraus, dass direktes Sonnenlicht zu einem Totalausfall der Elektronik führen kann. Genauere Untersuchungen zeigten, dass die vorab erwähnten ungeschützten Seitenflächen des Chips für die Lichtempfindlichkeit verantwortlich sind [1]. Bei starkem Lichteinfall, erfährt der Mikrocontroller immer wieder einen Reset, was zu einem stark erhöhten Stromverbrauch führt, da das Hochfahren des Systems den maximalen Stromverbrauch bedeutet. Im konkreten Fall reichten ein bis zwei Stunden in der Mittagssonne aus, um die Batterie durch Tiefentladen zu zerstören. Das Problem konnte durch Abdecken der Seitenflächen mit Glob-Top gelöst werden.



Abb. 3: Mikrocontroller im Chip Scale Package (CSP)

2.3. Transceiver

Der verwendete Transceiver Chip Si4455 von Silicon Labs hat sich bereits im Vorgängerprojekt Sens-o-Spheres II bewährt und wurde übernommen. Es wurde ein proprietäres Datenprotokoll implementiert, bei dem ein Datenpaket aus insgesamt 18 Bytes besteht, wovon 8 Bytes für Nutzdaten reserviert sind. Die Datenrate wurde mit 100 kbit/s recht hoch gewählt. Die Übertragung eines Datenpakets dauert 1,44 ms. Während des Sendens mit einer Leistung von nominal 13 dBm beträgt die Stromaufnahme der Gesamtschaltung ca. 20 mA. Da die Batterie aber mit maximal 100 μ A belastet werden darf, müssen die Stützkondensatoren diesen Strombedarf abdecken. Die relativ hohe Datenrate wurde gewählt, um die Sendedauer und somit die Dauer der maximalen Stromaufnahme kurz zu halten. Die Kondensatorspannung darf während der gesamten Dauer um maximal 0,2 V einbrechen. Geringere Datenraten führen zu einer längeren Sendedauer, somit zu größeren Stützkapazitäten und folglich zu mehr Volumen und Gewicht.

Der Transceiver nutzt das ISM Band bei 433 MHz. Als Modulation kommt hier eine 2FSK zum Einsatz. Die Wellenlänge im Freiraum beträgt ca. 69 cm. Ein $\lambda/2$ -Dipol wäre entsprechend 34,5 cm lang. Auch hier musste ein Kompromiss gemacht werden. Die Antenne wurde in Form einer Kantenmetallisierung der Hauptplatine ausgeführt. Diese Kantenmetallisierung bildet eine Stromschleife, die sich näherungsweise als magnetischer Dipol beschreiben lässt [2].

2.4. Ortung

Wie bereits erwähnt, kann der Schwingkreis, der von der Ladespule und zwei Kondensatoren gebildet wird, durch Zuschalten eines dritten Kondensators verstimmt werden. Ein von außen eingebrachtes, magnetisches Wechselfeld bei der Resonanzfrequenz von 13,56 MHz regt den in Resonanz befindlichen Schwingkreis seinerseits zum Schwingen an. Die Induktionsspule erzeugt dabei ein Magnetfeld bei 13,56 MHz, das dem von außen zugeführten Magnetfeld überlagert wird. Wird der Schwingkreis regelmäßig mit einer Modulationsfrequenz f_M verstimmt, entstehen neben dem Träger zusätzliche Seitenbänder bei $13,56 \text{ MHz} \pm f_M$. Diese Seitenbänder können zur Ortung

ausgewertet werden. Die hier beschriebene Methode des Backscatterings bietet zwei Vorteile:

- Es wird keine zusätzliche Hardware benötigt.
- Das Schalten über einen FET benötigt sehr wenig Energie.

Die Ortung selbst erfolgt über insgesamt 6 Antennen, die das Reaktionsvolumen in den 3 Raumkoordinaten aufspannen. Über diese Antennen wird ein Träger bei 13,56 MHz gesendet und der Träger sowie die Seitenbänder empfangen. Die Ortung erfolgt über die Feldstärke der empfangenen Seitenbänder an den 6 vorab genannten Antennen. Die Ortung der Sphären liegt in der Verantwortung des Fraunhofer Instituts ENAS.

2.5. Sensorik

Geplant sind insgesamt drei Varianten der Sensorkugeln. Eine Version, die ausschließlich Temperatur misst, wurde bereits realisiert. Es sollen noch eine Variante zur pH-Wert-Messung plus Temperaturmessung sowie eine Variante zur Messung des gelösten Sauerstoffs plus Temperaturmessung folgen. Die Auswahl und Realisierung der Sensoren liegt in der Verantwortung der TU Dresden, die Anbindung an die Elektronik erfolgt in Zusammenarbeit mit der IMST GmbH.

2.5.1. Temperaturmessung

Eine erste Variante der Sensorkugeln kann ausschließlich die Temperatur messen. Der Temperatursensor befindet sich auf der Hauptplatine im Randbereich. Er ist für einen Temperaturbereich von -40°C bis 125°C spezifiziert und verfügt über eine I²C-Schnittstelle. Die Temperaturwerte werden mit einer Auflösung von 12 Bit erfasst.

2.5.2. pH-Wert-Messung

Der pH-Sensor wird von zwei Elektrodendrähten gebildet, die in die Kapseloberfläche integriert sind und direkten Kontakt zum umgebenden Medium haben. Dieses Paar von Iridiumoxid (IrO_x)/Silberchlorid (AgCl)-Elektroden erzeugt in Lösungen abhängig vom pH-Wert elektrische Potentiale durch elektrochemische Mechanismen [3]. Bezogen auf die Referenzelektrode (AgCl) kann das Potential der Sensorelektrode sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Das Potential der Referenzelektrode ist deshalb auf die halbe Batteriespannung gelegt.

2.5.3. Messung des Sauerstoffgehalts

Die Auswahl des Sauerstoffsensors ist noch nicht endgültig abgeschlossen. Favorisiert wird ein optischer Sensor unter Nutzung von Ruthenium(II)-Komplex-basierten Fluorochromen, wobei der Quenching-Effekt in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration genutzt wird [4].

3. Software

Die Software der Sensorkugeln ist auf größtmögliche Energieeffizienz optimiert. Dazu zählt neben der sinnvollen Nutzung der verschiedenen Energiespar-Modi des Mikrocontrollers auch die Vermeidung komplexer Rechenoperationen. Es werden nur Rohdaten der Messwerte zur Basisstation übertragen, wo dann der dazugehörige physikalische Messwert berechnet wird.

3.1. Lademodus

Beim Aufladen der Batterie in der Ladestation werden 3 verschiedene Ladezustände unterschieden:

- Die Batteriespannung ist zu niedrig für ein fehlerfreies Hochfahren des Systems. Die Batterie wird geladen. Es werden keine Messwerte gesendet.
- Die Batteriespannung ermöglicht den Regelbetrieb. Die Batterie wird geladen. Die Sensorkugel sendet alle 10 Sekunden ihre ID, Temperatur, Ladespannung und Batteriespannung.
- Die Batteriespannung erreicht die Ladeendspannung bzw. überschreitet sie. Um Überladung zu vermeiden verstimmt der Mikrocontroller über einen FET die Ladespule. In regelmäßigen Abständen überprüft der Mikrocontroller, ob die Kugel noch auf der Ladestation liegt. Dazu wird die Ladespule kurzzeitig wieder aktiviert und die Ladespannung gemessen. Liegt keine signifikante Ladespannung mehr an, bleibt die Ladespule aktiv und der Mikrocontroller wird in den Shutoff Mode versetzt.

3.2. Shutoff Modus

Nimmt man die Sensorkugel aus der Ladestation, erkennt die Elektronik, dass keine Ladespannung mehr anliegt. Der Mikrocontroller wird dann in den Shutoff Mode versetzt, womit auch alle anderen Verbraucher ausgeschaltet werden. Bis zum Einsatz im Messsystem ist der Stromverbrauch somit auf ein Minimum reduziert. Durch einen 2 Sekunden dauernden Ladeimpuls über die Ladespule kann die Elektronik aktiviert werden. Der Mikrocontroller wird in den Run Mode versetzt.

3.3. Messmodus

Im normalen Regelbetrieb übermittelt die Sensorkugel in regelmäßigen Zeitintervallen Messwerte an die Basisstation. Nach dem Übermitteln eines Datenpakets wird der Mikrocontroller in den Sleep-Modus versetzt, bis das nächste Datenpaket gesendet wird.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden zunächst 5 Sensorkugeln für Temperaturmessung aufgebaut. Mit diesen Sensorkugeln wurden erste Messreihen im Schüttelkolben erfolgreich durchgeführt. Diese erste Version der Sensorkugeln misst die Temperatur im 30 Sekunden-Intervall. Bei voll aufgeladenem Akku beträgt die mögliche Einsatzdauer ca. 7 Tage. In diesen 7 Tagen können insgesamt ca. 20.000 Datensätze von jeder Kugel übertragen werden. Je nach Anwendung können andere Messintervalle sinnvoll sein. Zurzeit wird das Intervall per Software vorgegeben und ist dann nicht mehr veränderlich. Für die Zukunft ist eine bidirektionale Verbindung zwischen Sensorkugel und Basisstation geplant, die neben dem Messintervall noch weitere Konfigurationen der Kugel ermöglicht. Eine Variante mit pH-Sensor wird in den nächsten Monaten aufgebaut, danach folgt die Variante zur Sauerstoffmessung. Die für die Ortung erforderliche Hardware ist in der Sensorkugel bereits vorhanden, die Software kann einfach um die Ortungsfunktionalität erweitert werden.

Literatur

- [1] Silicon Labs: Application Note AN0878: Methods of Reducing Light Sensitivity in CSP Packages.
- [2] Kark, Klaus: Antennen und Strahlungsfelder. 2. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006, S. 225-227.
- [3] Huang, W.-D.; Cao, H.; Deb, S.; Chiao M.; Chiao, J. C.: A flexible pH sensor based on the iridium oxide sensing film. In: Sensors and Actuators A: Physical, Bd. 169, Nr. 1, Sep. 2011, S. 1-11.
- [4] Wang, X.; Wolfbeis, O. S.: Optical methods for sensing and imaging oxygen: materials, spectroscopies and applications. In: Chemical Society Reviews, Band 43, 2014, S. 3666-3761.

Kontakt

Horst Fischer, Dipl. Ing.
IMST GmbH
Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2-4
47475 Kamp-Lintfort
E-Mail: Horst.Fischer@IMST.de