

imare- Institut für Marine Ressourcen  
Abteilung Windenergie

**imare**

Institut für Marine Ressourcen GmbH

&

iSiTEC GmbH

**iSiTEC** Innovative  
System- und  
Informations  
technologien

## Optimierung einer Sedimentbatterie als Energiequelle für maritime Sensorsysteme

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 29798 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Tim Heusinger von Waldegge, Mirko Bögner, Thomas Hanken &  
Heiko Lilienthal

Bremerhaven, April 2014

Dr. Hanno Schnars  
(Institutsleiter)

Dr. Christof Baum  
(Prokurist)

Tim Heusinger von Waldegge  
(Projektleiter)

imare- Institut für Marine Ressourcen  
Abteilung Windenergie

**imare**

Institut für Marine Ressourcen GmbH

&

iSiTEC GmbH

**iSiTEC** Innovative  
System- und  
Informations  
technologien

## Optimierung einer Sedimentbatterie als Energiequelle für maritime Sensorsysteme

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 29798 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Tim Heusinger von Waldegge, Mirko Bögner, Thomas Hanken &  
Heiko Lilienthal

Bremerhaven, April 2014

Dr. Hanno Schnars  
(Institutsleiter)

Dr. Christof Baum  
(Prokurist)

Tim Heusinger von Waldegge  
(Projektleiter)

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>29798</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>119.175 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Optimierung einer Sedimentbatterie als Energiequelle für maritime Sensorsysteme</b>				
<b>Stichworte</b>	benthische mikrobielle Brennstoffzelle, Sedimentbatterie, mikrobielle Energiegewinnung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>24 Monate</b>	<b>01.01.2012</b>	<b>31.01.2014</b>			
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Institut für Marine Ressourcen GmbH - IMARE GmbH Bussestraße 27 27570 Bremerhaven			Tel	0471/4831-2200
				Fax	0471/4831-2210
				<b>Projektleitung</b> Dipl. Biol. Tim Heusinger von Waldegge (Dr. Corinna Kanzog bis 12.2012)	
<b>Bearbeiter</b> Dipl. Biol. Tim Heusinger von Waldegge, Dipl. Biol. Mirko Bögner, (Dr. Corinna Kanzog bis 12/2012)					
<b>Kooperationspartner</b>	iSiTEC GmbH Bussestrasse 27 27570 Bremerhaven				

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Gegenstand der Projektidee ist die Entwicklung und der Aufbau eines Energieversorgungssystems auf mikrobieller Brennstoffzellenbasis für die Energieversorgung von Unterwasseranwendungen. Als Basis für dieses Forschungsvorhaben dient ein bereits bestehendes Sedimentbatterie-Feldsystem, welches soweit optimiert und weiterentwickelt werden soll, dass traditionelle Energielieferanten für maritime Sensorsysteme entlastet bzw. sogar ersetzt werden können. Aktuell liefert die Sedimentbatterie noch sehr geringe Energiemengen bei sehr geringen Zellspannungen, was den direkten Betrieb von entsprechenden Verbrauchern wie z.B. Sensoren für Langzeit-Temperaturmessungen bislang noch unmöglich macht. Der Fokus dieses Projektvorhabens liegt neben der Designoptimierung bei der Entwicklung eines Energiemanagementsystems (EMS) zur Erhöhung und Regelung der Batteriespannung sowie der Akkumulation der produzierten Energiemenge.

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Das Projekt soll zum einen die Entwicklung und den Aufbau eines Testsystems für die Anwendung im Labormaßstab beinhalten. Dazu werden neue Elektrodenmaterialien und -formen für eine effektivere Funktionsweise untersucht, ein Energiemanagement zur Erhöhung der Zellspannung und Akkumulation der produzierten Energiemenge konzipiert sowie ein Batterie-Design entwickelt, welches im Ergebnis die Versorgung eines maritimen Messensors (z.B. Temperatursensor) gewährleistet. Diese Projektphase beinhaltet die Konzeptentwicklung des Batteriedesigns und des EMS, sowie die Fertigung der Systemkomponenten, den Aufbau des Testsystems und anschließender Laborvalidierung. Im Anschluss daran wird das Testsystem an die gegebenen Bedingungen im Feld (z.B. Hafenbereich, Küstengebiete) angepasst und als Feldsystem für *in situ* Einsätze realisiert. Bestandteil dieses Projektteils ist die mechanische und elektrische Konstruktion der einzelnen Systemkomponenten unter Berücksichtigung der geplanten Unterwassereinsatzbereiche. Zur Optimierung werden alternative Ausführungsvarianten des Batteriedesigns und des EMS unter Feldbedingungen getestet. Im Ergebnis dieser Aktivitäten soll ein erprobtes Feldsystem die Energieversorgung eines Messensors gewährleisten.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

## **Ergebnisse und Diskussion**

Das Ziel ein funktionsfähiges und langzeitstabiles Testsystem für die Anwendung im Labormaßstab zu etablieren wurde vollständig erreicht. Dabei wurden vier unterschiedliche Batteriearchitekturen getestet, die sich durch unterschiedliche Elektrodenmaterialien auszeichneten. Als leistungsfähigste Variante wurde ein System mit eigens definierten Edelstahl-Lochblechen und einem karbonisierten Graphitfilz (Anode) sowie Kohlenstofffaserbürsten mit Titandraht (Kathode) identifiziert. Ein Energiemanagement zur Erhöhung der Zellspannung und Akkumulation der produzierten Energiemenge wurde konzipiert, gefertigt und einer erfolgreichen Funktionsprüfung unterzogen. Schaltpläne und Prototypen der Systemkomponenten liegen am Projektende zur Sicherung der Anschlussfähigkeit vor. Das EMS ist am Projektende dazu in der Lage, einen oder mehrere maritime Messensor (Temperatur, Sauerstoff, Trübung, Leitfähigkeit) versorgen zu können.

Im Anschluss an die Konzept- und Technikentwicklung wurde in einem Upscaling-Prozess ein Feldsystem konzipiert, das an die gegebenen Bedingungen im Feld (z.B. Hafenbereich, Küstengebiete) angepasst ist. Im Anschluss fanden der Bau des BMBZ-Feldtyps, eines Sicherheits- und Transportgestells sowie eine Verschmelzung mit den technischen Komponenten statt. Die Systemkomponenten mussten dazu an den U-W-Einsatz angepasst werden, beispielsweise durch eigens konzipierte Druckgehäuse. Marktübliche Sensoren wurden angeschafft und in das EMS-BMBZ-System integriert. In den Feldversuchen wurde nachgewiesen, dass es zu einer Produktion von elektrischem Strom kommt, also mussten sich zumindest Teile der Anode im anaeroben Sediment befinden. Die Batteriespannung stieg in den fünf Auslagerungsmonaten von 6 mV auf 20mV. Gemessen an der notwendigen Spannung reichte dieser Wert nicht, um einen Sensor autark zu betreiben. Es kann an dieser Stelle also nur spekuliert werden, dass die Anodenfläche nicht ausreichend im Sediment vergraben war, obwohl eine Prüfung des Standortes eindeutig einen Sedimentuntergrund ergab. Auszuschließen ist hingegen, dass die Batterie bis zu der Kathode im Sediment versackt war. Dies konnte anhand der Daten der Sauerstoff-Optode sowie der Temperaturlanze nachvollzogen werden, die stets logische Messdaten lieferten. Aufgrund des unbekanntes Strömungsregimes im Hafenbereich kann es möglich sein, dass sich Teile der Anodenfläche stets frei gespült haben, vergleichbar mit einem Kolk-Effekt. Eine weitere Möglichkeit ist eine deutlich verlängerte Anlaufphase, da die Besiedlungsflächen der Elektroden um ein vielfaches größer sind als im Laborversuch. Aufgrund der geschilderten Erfahrungen sollte für zukünftige Überlegungen in Betracht gezogen werden, dass die Batterie einer langen Einlaufphase (>5 Monaten) unterliegt, bevor sie beständig und autark zu einer Stromerzeugung im Stande ist. Ein funktionsfähiges Batteriedesign, passende Sensoren sowie ein funktionsfähiges Energie-Management-System für eine Feldapplikation mit einer Anodenfläche von 1m<sup>2</sup> liegen jedoch mit Projektende vor. Weiterführende Untersuchungen sollen klären, wie sich die Batteriespannung im weiteren Verlauf entwickelt, um die Einlaufphase für zukünftige An-

wendungen besser charakterisieren zu können.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

18.10.2013 DECHEMA/GfKORR-Fachgruppe „Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz“, Frankfurt

### **Fazit**

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass es am Markt befindliche, praxistaugliche Messsensoren gibt, die mit einer BMBZ betrieben werden können. Dies belegen vor allem die stabilen Langzeitreihen aus den Laborexperimenten. Zudem geht von der Batteriearchitektur, insbesondere in puncto Elektrodenmaterial, ein Einfluss aus, der die Stromausbeute signifikant beeinflusst. Insgesamt kann also hinsichtlich der Batteriearchitektur von einem gelungenen System gesprochen werden, dass den Projektzielen entspricht. Hinsichtlich der elektronischen Komponenten kann ebenfalls von einer Erfüllung der Ziele berichtet werden. Es ist gelungen, ein Sensorsystem aus zwei Verbrauchern (Temperaturlanze und Aandaraa Sauerstoff-Optode) in die Batteriearchitektur und Verschaltung zu integrieren. Je nach gewünschtem Sensorportfolio kann die Sauerstoff-Optode gegen einen Aandaraa Leitfähigkeitssensor (Messbereich 0 - 7,5 S/m bzw. 0 - 75 mS/cm, Genauigkeit 0,005S/m, Temperaturbereich -5 °C bis 40 °C, Genauigkeit 0,1°C) oder einen Sea-guard Trübungssensor (Sensorbereich 0 - 500 FTU) getauscht werden. Der entwickelte Datenlogger zeichnete während der Feldauslagerung kontinuierlich Daten auf. Das Energie-Management-System wurde ebenfalls integriert und lief unter Testbedingungen ebenfalls fehlerfrei. Problematisch war jedoch, dass die Batteriespannung der BMBZ im Feld nicht auf ein ausreichendes Maß anstieg. So reichte die Spannung nicht aus, um eine ereignisgesteuerte Messung der Sensoren auszulösen. In den Feldversuchen wurde nachgewiesen, dass es zu einer Produktion von elektrischem Strom kommt, also mussten sich zumindest Teile der Anode im anaeroben Sediment befinden. Aufgrund der geschilderten Erfahrungen sollte für zukünftige Überlegungen in Betracht gezogen werden, dass die Batterie einer langen Einlaufphase (>5 Monaten) unterliegt, bevor sie beständig und autark zu einer Stromerzeugung im Stande ist. Ein funktionsfähiges Batteriedesign, passende Sensoren sowie ein funktionsfähiges Energie-Management-System für eine Feldapplikation mit einer Anodenfläche von 1m<sup>2</sup> liegen jedoch mit Projektende vor. Hinsichtlich der Stromerzeugung wäre es ratsam, einen geeigneteren Standort zu evaluieren und die Einlaufphase unter realen Umweltbedingungen näher zu untersuchen. Ferner sollte eine hydrodynamische Betrachtung stattfinden, wie die Batteriearchitektur von der Strömung beeinflusst wird. Möglicherweise bedingen bauliche Gegebenheiten, dass die Anode der Batterie nicht gänzlich ins anoxische Sediment eindringen bzw. sich eingegraben kann. Sollte dies der Fall sein, wäre eine bauliche Adaption notwendig. Diese lassen sich jedoch auf Grundlage der aus diesem Projekt hervorgegangenen Erkenntnisse, Baupläne, Schaltpläne, Systemkomponenten und binnen kürzester Zeit realisieren.

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt .....	2
Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen .....	6
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen .....	8
Zusammenfassung.....	9
Einleitung .....	11
Hauptteil.....	13
Markt- und Literaturstudie (AP2) .....	13
Anforderungsprofil und Systemdefinition (AP3) .....	13
Konzeptentwicklung des Batteriedesigns (AP4).....	14
Konzeptentwicklung Energie-Management-System (AP5).....	15
Fertigung der Systemkomponenten (AP6) .....	18
Aufbau des Testsystems (AP7).....	24
Laborvalidierung des ersten Testsystems (AP8).....	25
Modifikation und Optimierung des Testsystems (AP9) .....	27
Laborvalidierung des zweiten Testsystems (AP10) .....	30
Erstellung eines Erprobungskonzeptes (AP11).....	33
Aufbau des Feldsystems und Feldapplikation (AP12 – AP16) .....	36
Fazit .....	43
Literaturverzeichnis .....	45
Danksagung.....	47

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1 Stahllochbleche nach eigens definierten Geometrien zum Aufbau des Anodensystems.....	15
Abbildung 2 Elektrisches Schaltbild für Energieerzeuger/Verbraucher-System.....	15
Abbildung 3 Funktionsdiagramm für das angestrebte EMS.....	16
Abbildung 4 Konzeptentwicklung und Konstruktionszeichnung für den Deckel sowie das Unterwassergehäuses zur Aufnahme des Energie-Management-Systems und zum Einbau der drei U-W-Steckverbindungen.....	17
Abbildung 5 Spannungswandlung mit Baustein LTC3105 (hier Anwendung mit einer Fozelle als Energiequelle).....	18
Abbildung 6 Ultra-Low Power DC-DC Wandlers von iSiTEC Version 0.2.....	18
Abbildung 7 Schaltungsteil mit DC/DC-Wandler LTC3105 und Leistungsanpassung (MPPC).....	19
Abbildung 8 Umsetzung des LTC3105-Schaltungsteils im Layout der iSiTEC-Platine .....	19
Abbildung 9 Schaltungsteil mit DC/DC-Wandler MCP1640 zur 3,3V Erzeugung aus 2,3V Pufferspeicher und Freigabe durch Power-Good-Signal.....	20
Abbildung 10 Schaltungsteil zur 9V-Erzeugung mit DC/DC-Wandler LM2577 .....	21
Abbildung 11 Das Platinenlayout vom Spannungsversorgung/Energiemanagementsystem .....	22
Abbildung 12 Gesamtschaltung des Energiesammlers und Spannungsaufbereitung .....	21
Abbildung 13 Schaltplan zum Shutdown-Prozess .....	23
Abbildung 14 Aufbau des Elektronik-Prototypen Spannungsversorgung/Energiemanagementsystem der BMBZ.....	23
Abbildung 15 Labordesign der gekammerten Edelstahl-Kathoden (V4A) ausgestaltet mit Graphitfilz.....	24

Abbildung 16 Einbringung der Sedimentbatterie in den Versuchstank .....	26
Abbildung 17 Leistungskennzahlen des Laborsystems für vier verschiedene Batteriedesigns.....	27
Abbildung 18 Strom-Spannungskurven des Batteriedesigns ohne Graphitfilz (links) und mit Graphitfilz (rechts).....	29
Abbildung 19 Vervielfältigung des Labor-Designs mit Stahlgitter-Graphitfilz-Anode/Kohlenstofffaserbürste-Kathode.....	31
Abbildung 20 Spannung ( $\mu\text{V}$ ) von zwei Sedimentbatterien innerhalb eines Versuchstanks.....	32
Abbildung 21 Darstellung des Zellpotentials (V) für sechs laborgestützte BMBZ in Abhängigkeit von der Zeit.....	33
Abbildung 22 Konstruktionszeichnung des Abstellgestells zur Aufnahme, Sicherung und Absetzung der BMBZ.....	36
Abbildung 23 Aufbau des Feldsystems mit gekammerter Edelstahl-Graphitfilz-Anode .....	37
Abbildung 24 Anschlussplan der drei Anschlüsse für die Sedimentbatterie, die Temperaturlanze und die Optode innerhalb des U-W-Gehäuses .....	38
Abbildung 25 Innenansicht der betriebsbereiten Elektronik mit Datenlogger, Anschlussboard und Netzteil .....	39
Abbildung 26 Messdaten der Temperaturlanze im laborgestützten Testlauf. ....	40
Abbildung 27 Datenlogger-Gehäuse aus Kunststoff (PE-HD) für den Einsatz in Wassertiefen bis zu 300m mit Edelstahl-Unterwassersteckern und innenliegender Elektronik zur Stromversorgung der Sensorsysteme bzw. zur Speicherung des von der BMBZ erzeugten Stroms. ....	40
Abbildung 28 Ausbringung des Feldsystems im Handelshafen von Bremerhaven...	41
Abbildung 29 Eintauchphase der BMBZ.....	42

Tabelle 1 Auswahl potentiell geeigneter Sensorsysteme zur autarken Versorgung mittels einer Sedimentbatterie.....14

Tabelle 2 Upscaling-Prozess des validierten Laborsystems auf die Kennwerte des konzipierten Laborsystems.....37

## Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	m <sup>2</sup> mS/cm	Quadratmeter Mikro-Siemens pro cm
EMS	Energie-Management- System	OCP PAN	Open circuit potential Polyacrylnitril
A	Ampere	PE	Polyethylen
AP	Arbeitspaket	Ri	innerer Widerstand
BMBZ	benthische mikrobielle Brennstoffzelle(n)	RL s	Leitungswiderstand Sekunden
D	Durchmesser	S/m	Siemens pro Meter
DC	Gleichstrom	U	Spannung
F	Farrad	UL	Lastspannung
F&E	Forschung und Entwick- lung	Ue U-W	Eingangsspannung Unterwasser
FTU	Formazine Turbidity Unit	V	Volt
HD	High Density	W	Watt
I	Stromstärke	μ	Mikro
kg	Kilogramm	Ω	Ohm (Widerstand)
L	Länge	Vgl.	Vergleiche
l	Liter	u.a.	unter anderem
m	Milli	z.B.	zum Beispiel

## Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Projektberichtes „Optimierung einer Sedimentbatterie als Energiequelle für maritime Sensorsysteme“ war die Entwicklung und der Aufbau eines Energieversorgungssystems auf mikrobieller Brennstoffzellenbasis für die autarke Energieversorgung von Unterwasseranwendungen. Als Grundlage zur Durchführung des abgeschlossenen Forschungsvorhabens diente der Prototyp eines bereits bestehenden Feldsystems einer benthischen-mikrobiellen Brennstoffzelle (BMBZ) (max. Leistungsdichte von ca.  $9 \text{ mW m}^{-2}$ ). Es ging aus einer Förderung der DBU (AZ26746-21/0) in Zusammenarbeit mit der Firma iSiTEC GmbH hervor und sollte während der Projektlaufzeit baulich und technisch auf potentielle Anwendungsbereiche optimiert werden. Insbesondere die Entwicklung eines geeigneten Energiemanagement-Systems (EMS) zur Anhebung und Regelung der Batteriespannung, um diese auf ein speicherfähiges Niveau zu bringen stand im Vordergrund. Zudem musste ein Konzept zur Bereitstellung der erzeugten elektrischen Energie erarbeitet werden. In der technischen Entwicklungsarbeit lag ein Fokus der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Optimierung des bestehenden Energiemanagements. Ein zweiter Schwerpunkt befasste sich mit dem Batteriedesign und dem Upscaling. Übergeordnetes Ziel der optimierten Sedimentbatterie war es, traditionelle Energielieferanten, die allesamt einer Verfallszeit unterliegen, gegen ein regeneratives, autarkes System zu ersetzen. In Abhängigkeit von der maximal zu generierenden Batteriespannung sollten praxisrelevante Sensoren (z.B. Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff) in ein feldtaugliches System integriert werden, die nach definierbaren Zeitintervallen impulsartig ihren Messbetrieb aufnehmen.

Mit Ende der Laufzeit liegt ein baulich auf die marine Meeresumwelt angepasstes Feldsystem vor, dass mit gängigen ozeanographischen Sensoren bestückt ist. Dazu gehörten eine Temperaturlanze, die sowohl in der Wassersäule als auch im Boden Daten erfasst sowie eine Sauerstoff-Optode. Folgeuntersuchungen beziehungsweise bauliche Weiterentwicklungen des Prototyps sind somit möglich. Es ist geplant, den Prototypen in Zukunft als Teil eines Monitoring-Konzeptes von Sedimenten im Bereich von Offshore-Windparks einzusetzen. Vor und während der Betriebsphase soll durch den Einsatz der Sedimentbatterie beurteilt werden, ob eine stoffwechsel-

physiologische Belastung die Kapazität aerober benthischer Abbauprozesse überschreitet. Insbesondere in den sauerstoffarmen Bereichen der Ostsee soll der Einsatz angestrebt werden. Zentrale Bedeutung haben Messungen von Sauerstoffkonzentrationen im Wasser und im Sediment. Diese Parameter dienen als Indikatoren für die Abbaukapazität. Eingebettet in diese Aktivitäten soll ein Sensormesssystem für die spätere Langzeitmessung von Sauerstoff und der Umgebungstemperatur im Feld etabliert werden, welches als Sedimentbatterie (seinen Ladezustand einzig und direkt aus den Potentialunterschieden der mikrobiellen Abbauprozesse von Biomasse in oxischen (Sauerstoff-reichen) und anoxischen (Sauerstoff-freien) Umgebungen regeneriert.

Kooperationspartner des imare – Instituts für Marine Ressourcen GmbH im Rahmen des durchgeführten Projekts „Optimierung einer Sedimentbatterie als Energiequelle für maritime Sensorsysteme“ war die Firma iSiTEC GmbH.

Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 29798 gefördert.

## Einleitung

Ausgangslage für das bestehende Projekt ist die Nutzung natürlich vorkommender, elektrischer Potentialdifferenzen an Wasser/Sediment-Zonen. Durch die Einbringung einer Metall-Anode in das Sediment und einer Metall-Kathode in der Wassersäule wird eine elektrochemische Wechselwirkung zwischen den Elektroden erzielt. Das elektrische Potential der Anode im Sediment ist geringer als das der in der Wassersäule befindlichen Kathode. Diese Differenz basiert auf der abnehmenden Sauerstoffkonzentration und Produktion reduzierter Verbindungen mit zunehmender Sedimenttiefe, wo die mikrobielle Oxidation von organischem Material mittels alternativer Elektronenakzeptoren (z.B. Fe(III), Mn(IV),  $\text{SO}_4^{2-}$ ) stattfindet. Die Energieerzeugung einer Sedimentbatterie beruht zum einen auf der Oxidation von reduzierten Verbindungen (z.B. Sulfid) in dem die Anode umgebenden Sediment-Porenwasser (Ryckelynck *et al.* 2005). Zum anderen kann die Anode von metallreduzierenden benthischen Mikroorganismen (z.B. *Geobacteraceae*) besiedelt werden, welche organisches Material im Sediment (z.B. Acetat) mithilfe der Anode als Elektronenakzeptor oxidieren (Tender *et al.* 2002; Abb. 1). Dabei freiwerdende Elektronen werden direkt, über sogenannte Nanokabel, oder indirekt mithilfe von Mediatoren an die Anode transferiert (Schröder *et al.* 2007). Der Zusammenschluss der Anode und Kathode über einen elektrischen Widerstand (Verbraucher) ermöglicht den Transfer von Ladungsträgern, so dass ein Stromfluss in Abhängigkeit sowohl des inneren als auch des externen elektrischen Widerstandes messbar ist. Die Kathodenreaktion der Sedimentbatterie wird durch die Reduktion von gelöstem Sauerstoff als Elektronenakzeptor mit hohem Redoxpotential im Seewasser bestimmt.

Die oben genannten mikrobiellen Stoffwechselprozesse sind ausschlaggebend für den natürlichen, regenerativen Prozess, der zu einer  $\text{CO}_2$  neutralen Stromerzeugung genutzt werden kann. Für Unterwasseranwendungen ist vor allem der regenerative Aspekt entscheidend, da Kosten gesenkt (z.B. durch Wegfall des Batteriewechsels inkl. Bergung etc.) und dennoch die Datengüte erhöht werden kann. Trotz dieser offenkundigen Vorteile eines solchen Systems ist der praktische Erfahrungsschatz gering. Dies liegt u.a. darin begründet, dass der generierte Strom einer Sedimentbatterie bei sehr geringen Zellspannungen produziert wird. Eine direkte

Nutzung der erzeugten Energie durch einen am Markt befindlichen Endverbraucher ist daher nicht möglich. Das eine Erhöhung der Zellspannung durch Reihenschaltung mehrerer Brennstoffzellen erreicht werden kann, zeigten Aeltermann *et al.* 2006 und Shin *et al.* 2006. Eine Potentialerhöhung wird Hong *et al.* 2008 zufolge dadurch jedoch nicht erreicht, da die Elektroden von demselben Elektrolytmedium umgeben sind Kurzschlüsse könnten somit die Folge sein. Ein weiteres Problem des initialen Stand der Technik waren die Schwankungen im maximalen Batteriepotential sobald ein elektrischer Verbraucher angeschlossen wird (vgl. Dumas *et al.* 2007). Die Diskrepanz zwischen der Batteriespannung der BMBZ und der Betriebsspannung gängiger Sensoren, die sich üblicherweise von 1V bis 5 V bewegt, galt es demnach im Projekt zu überwinden.

Da der grundlegende Prozess einer BMBZ von natürlichen Vorgängen abhängt, wird dieser zwangsläufig von Umweltparametern beeinflusst. Diese lassen sich in einer Phase der Laborvalidierung beherrschen, sind jedoch im Feld den natürlichen Schwankungen beziehungsweise Einflüssen unterworfen. Leistungsschwankungen sind die Folge. Ein Energiespeicher ist demnach für die Etablierung eines zuverlässigen Systems notwendig. Dieser Speicher muss, ebenso wie ein Datenlogger, intelligent in das EMS integriert werden. Donovan *et al.* (2008) entwickelten ein Energiemanagement bestehend aus Kondensator, Spannungsgleichrichter und DC/DC-Wandler für die Versorgung eines kabellosen Temperatursensors. Grundsätzlich ist anzumerken, dass es zu Projektbeginn keine praxistaugliche EMS-Einheit gab, die über das experimentelle Niveau hinausgeht und speziell für den hier beabsichtigten Einsatzzweck einer BMBZ geeignet wäre. Eine Apparatur, deren Funktionsprinzip auf die Verwertung mikrobiell erzeugter biochemischer Ladungsgradienten an der Wasser/Sediment-Zone basiert, ist aktuell ebenfalls nicht auf dem Markt erhältlich.

Neben der technischen Zielsetzung stehen die Batterie-Architektur und die Elektrodenmaterialien bei den Optimierungsmaßnahmen im Vordergrund (vgl. Lowy *et al.* 2006, Nielsen *et al.* 2007, Scott *et al.* 2008). Eine Vergrößerung der Elektrodenoberfläche sowie die Verwendung von Kohlenstoff-Graphitbürsten verspricht laut Literatur (Nielsen *et al.* 2008) die größten Erfolge. Eigene Vorarbeiten zeigten bereits die Eignung von graphitiertem und karbonisierten Weichfilz auf PAN-Basis im Ver-

gleich zu Graphitplatten. Im Zuge dessen diente auch bei der Kathode eine Graphitbürste als Elektrodenmaterial.

## Hauptteil

### Markt- und Literaturstudie (AP2)

Im initialen Arbeitspaket wurde der Wissenstand zum Thema BMBZ vertieft und hinsichtlich der anstehenden Arbeiten evaluiert. Ein besonderes Augenmerk lag auf den bisher publizierten Ergebnissen zum Batteriedesign, dem Elektrodenmaterial, Energiespeichern, Messsensoren und funktionellen Bauteilen für ein Energie Management. Des Weiteren wurde eine Marktsondierung zu potentiell in Frage kommenden Sensoren mit geringem Leistungsbedarf durchgeführt. Dabei sollten die Leistungsdaten der Sensoren mit den Kriterien eines praxistauglichen Unterwasser-Monitorings vereinbar sein.

### Anforderungsprofil und Systemdefinition (AP3)

Die gesammelten Erkenntnisse aus dem AP2 wurden in eine konzeptionelle Analyse (AP3) einbezogen, um dem späteren Einsatz- und Anwendungsfall möglichst genau zu entsprechen. Gerade der bauliche Ansatz (Abmessungen, Elektrodenoberfläche und Sicherungsmaßnahmen) sowie die autarke Funktion elektronischer Bauteile gehörten zu den Hauptanforderungen im F&E Bereich. Unter Einbeziehung eigener Vorarbeiten erstellten die Partner daraufhin ein Anforderungsprofil einer BMBZ für den Betrieb von mindestens zwei Unterwassersensoren. Tabelle 1 gibt Aufschluss über die in der Recherche (AP2) identifizierten Sensoren. Über einen Energiespeicher galt es den elektrischen Strom der Batterie zu speichern und impulsartig an die Sensoren abzugeben. Bei den Messungen war darauf zu achten, dass diese in einem praxistauglichen Intervall zu realisieren sind. Zudem bedurfte es einem Logger, der möglichst eine hohe Speicherkapazität sowie eine Möglichkeit zur Datenauslese liefert.

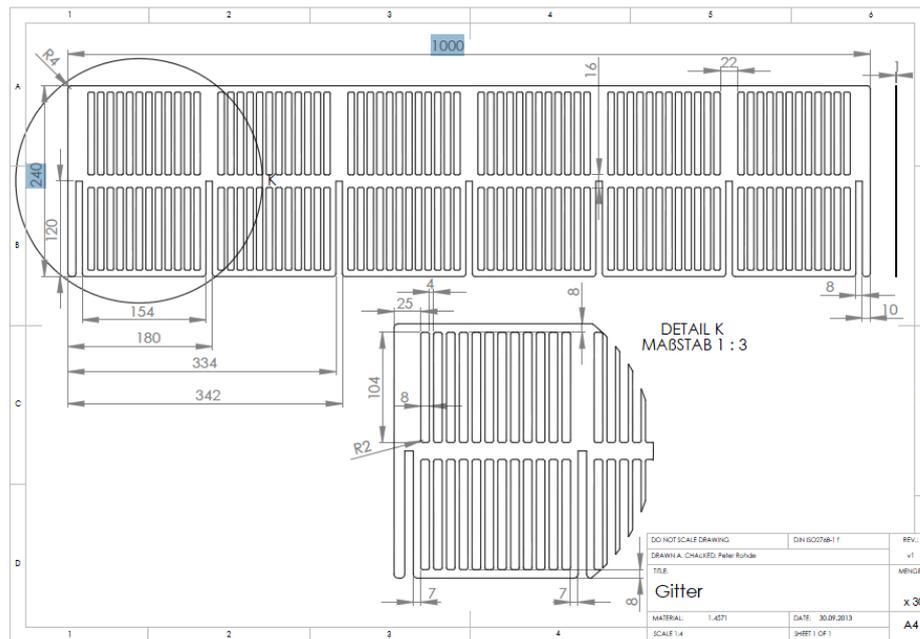
**Tabelle 1** Auswahl potentiell geeigneter Sensorsysteme zur autarken Versorgung mittels einer Sedimentbatterie. Die Angaben beruhen auf den Informationen der jeweiligen Hersteller

Typ	Hersteller	Modell	Spannung min. [V]	Spannung max. [V]	Strom [mA]	Leistung max. [mW]	Einstellzeit [s]
Temperatur	DALLAS Semiconductor	DS1621	2,7	5,5			
	seabird	SBE 56	3,6				
	Texas Instruments	TMP006	2,4	5,5	0,24	0,576 (gerechnet)	
Leitfähigkeit	Mettler Toledo	InPro7250		16	150	155	
	AADI (Aanderaa)	3919	5	14	48		3
CTD	AADI (Aanderaa)	SEAGUARD®	6	14	1,2	7,2 (gerechnet)	3
	seabird	SBE 16plus V2 SE-ACAT	9		3000	27000 (gerechnet)	
O <sub>2</sub>	AADI (Aanderaa)	Oxygen Optode 4330/4330F	5	14	48	240 (gerechnet)	8 – 25
Fluoreszenz	TriOS	MicroFlu-DS	5	15		200	

### Konzeptentwicklung des Batteriedesigns (AP4)

In AP4 stand die Konzeptentwicklung zum Batteriedesign an. Bauliche Charakterisierungen, wie das Elektrodenpaar, Absetzgestell, Druckgehäuse, Anbringungsmöglichkeiten von Sensoren, Anschlüsse und Verkabelung sollten miteinander in einer konstruktiven Vorausplanung verbunden werden. Dabei wurde die Funktionalität der entstandenen Blaupausen regelmäßig im Hinblick auf den Feldeinsatz und die vorliegenden elektronischen Bauteile diskutiert.

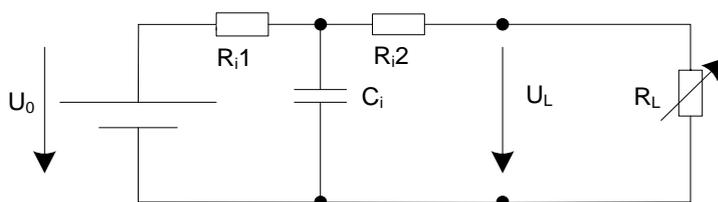
Für den Versuchseinsatz im Labor wurden auf Basis der gesammelten Informationen und baulichen Abwägungen (Stabilität, Oberfläche, Material etc.) drei Varianten zur Evaluierung entwickelt. Zelle 1 bestand aus einer Anordnung einer Stahlgitter-Anode mit einer Kohlenstoffbürsten-Kathode. Variante 2 setzte sich aus einer Stahlgitter-Anode und einer Kohlenstofffaserbürste-Kathode zusammen. Die dritte Zelle kombinierte eine Graphitfilz-Anode in einem Kunststoffgehäuse mit einer Kohlenstofffaserbürsten-Kathode.



**Abbildung 1** Stahllochbleche nach eigens definierten Geometrien zum Aufbau des Anodensystems. Das Anodensystem wird vervollständigt durch eine Zwischenschicht aus graphitiertem und karbonisiertem Weichfilz

### Konzeptentwicklung Energie-Management-System (AP5)

Bei der Konzepterstellung für das EMS galt es zuerst die Frage der Stromversorgung zu klären. Für das Energieerzeuger/Verbraucher-System wurde ein elektrische Schaltbild (**Abbildung 2**) erstellt, was sich wie folgt darstellt:

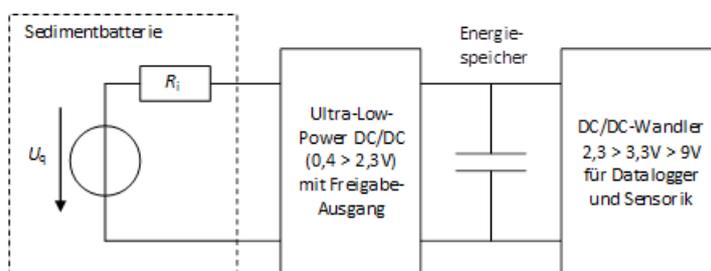


Die Spannung ( $U_0$ ) liegt typischerweise bei 800 mV. Der Innenwiderstand der BMBZ ergibt sich aus  $R_{i1} + R_{i2}$ , was in unserem Fall rund 30 Ohm entspricht. Dieser Wert hängt jedoch von der Größe und Anordnung der Elektroden ab. Der Lastwiderstand ( $R_L$ ), in unserem Fall der Eingang des nachgeschalteten Spannungswandlers, ist variabel ausgeführt. Ein optimaler Arbeitspunkt (maximale Energieausbeute) ist

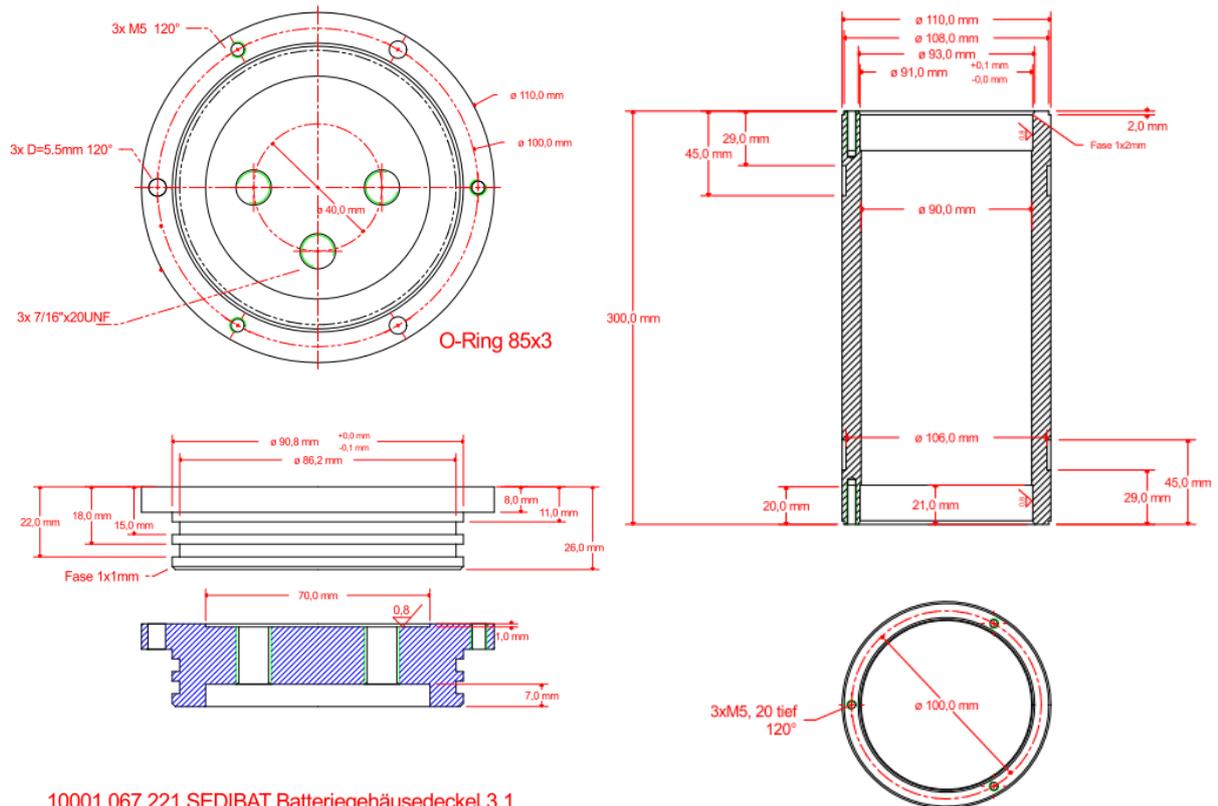
dann gegeben, wenn eine Leistungsanpassung stattgefunden hat und  $R_L = R_i$  ist. Somit ergibt sich im optimalen Arbeitspunkt eine Lastspannung  $U_L = 0,5 \times U_0 = 400\text{mV}$ .

Daraus resultierend wurde ein Energiemanagementsystem gesucht, das für Sensoren und Energiespeicher mit einem Eingangsspannungsbereich zwischen 400 und 800mV qualifiziert war. Der eingangsseitige Arbeitspunkt der Stromversorgung sollte  $U_e = 400\text{mV}$  betragen (Leistungsanpassung). Der Eingang der Stromversorgung (Spannungswandler) muss hierbei die Stromquelle (BMBZ) immer soweit belasten, dass sich eine Eingangsspannung von 400mV einstellt. Verschiedene Schaltungen wurden als Test diskret aufgebaut (AP6). Nach der Evaluierung der Ergebnisse wurde beschlossen, den DC/DC-Wandler LTC3105 von LINEAR Technology in das Konzept einzubinden. Der Ultra-Low-Power Baustein, der für „Energy-Harvesting“ Anwendungen eingesetzt wird, zeichnet sich dadurch aus, dass er in der Lage ist eine  $U_e$  bis auf 225mV zu verarbeiten und diese bis auf zu 5 V Ausgangsspannung zu transformieren. Ein weiteres technisches Merkmal des Bausteins ist ein MPPC-Eingang (Maximum Power Point Control), mit dem der Arbeitspunkt (Leistungsanpassung) eingestellt werden kann.

Des Weiteren wurde ein U-W-Druckgehäuse konzipiert, um später die gesamte Elektronik in der Batteriearchitektur aufnehmen zu können. Der Deckel wurde mit drei maßgenauen Bohrungen für passende Unterwasserstecker der Firma Subconn versehen.



**Abbildung 3** Funktionsdiagramm für das angestrebte EMS



10001.067.221 SEDIBAT Batteriegehäusedeckel 3.1

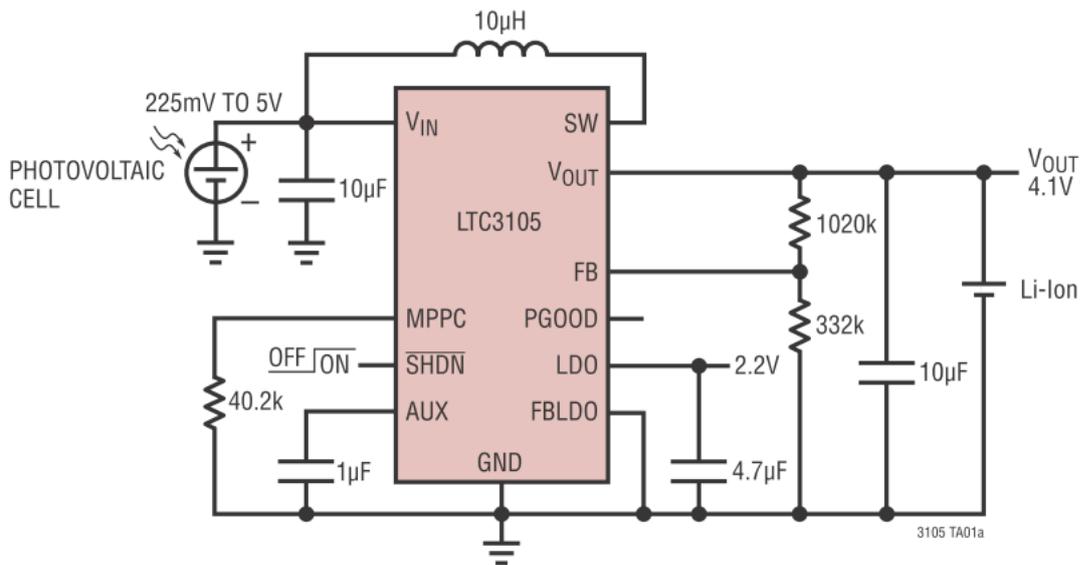
PE100 schwarz

10001.067.212 SEDIBAT Batteriegehäuserohr V3.2

PE 100 schwarz

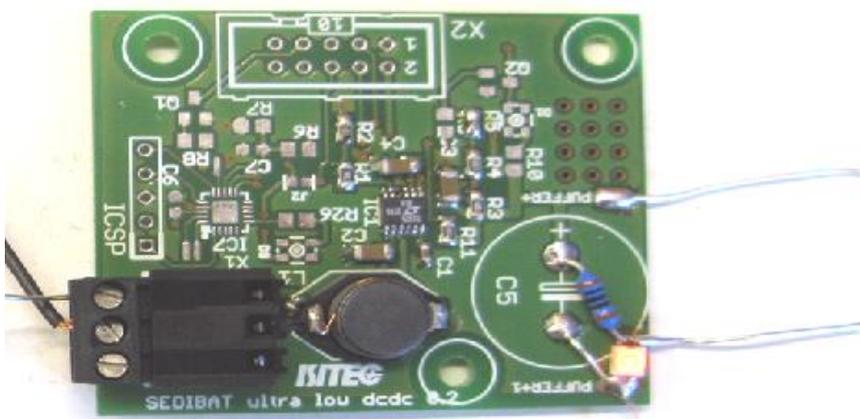
**Abbildung 4** Konzeptentwicklung und Konstruktionszeichnung für den Deckel sowie das Unterwassergehäuses zur Aufnahme des Energie-Management-Systems und zum Einbau der drei U-W-Steckverbindungen.

## Fertigung der Systemkomponenten (AP6)



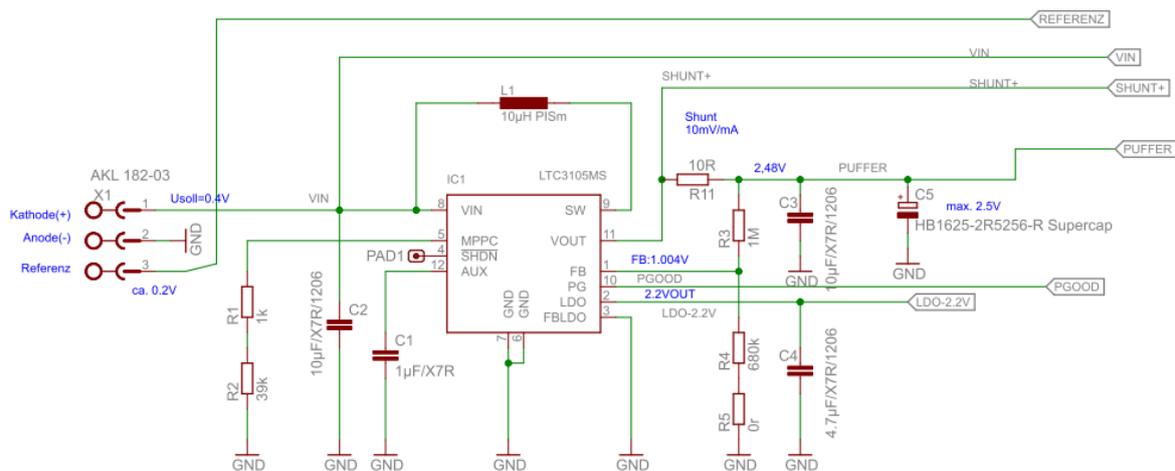
**Abbildung 5** Spannungswandlung mit Baustein LTC3105 (hier Anwendung mit einer Fotозelle als Energiequelle)

Zu Beginn wurde ein Prototyp des DC/DC-Wandlers (Version 0.2 **Abbildung 6**) aufgebaut, um die grundsätzlichen Funktionen des Bausteins für sich, und in Kombination mit den Sedimentbatterien im Labormaßstab zu testen. Als Zustandskontrolle während der Laborvalidierung diente eine Leuchtdiode. Der DC/DC-Wandler lieferte zuverlässige Messwerte hinsichtlich der Spannung an Kathode und Anode (418 - 420 [mV]), und ersetzte zudem die vorher verwendeten Potentiostaten.

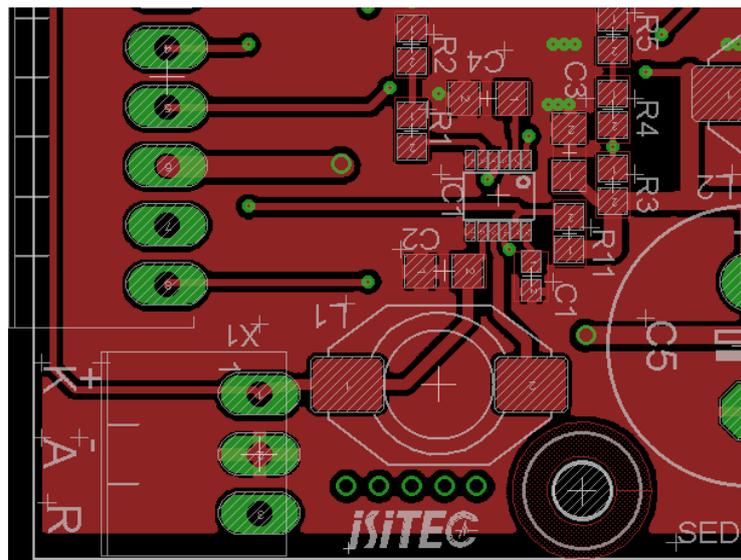


**Abbildung 6** Ultra-Low Power DC-DC Wandlers von iSiTEC Version 0.2

In diesem AP wurde der DC/DC-Wandler LTC3105 so konfiguriert, dass die in AP5 definierten konzeptionellen Anforderungen für den weiteren Projektverlauf von SEDIBAT-II erfüllt werden konnten. Die Energiequelle kann mit der entwickelten Schaltung genau so stark belastet werden, dass sich eine Eingangsspannung von ca. 400mV einstellt. Fällt die Eingangsspannung unter 400mV, regelt die Schaltung mit dem Baustein LTC3105 den Strom herunter und umgekehrt. Die bauliche Umsetzung des modifizierten Bausteins in der iSITEC Leiterplatte ist auf den folgenden, beiden Bildern ersichtlich:



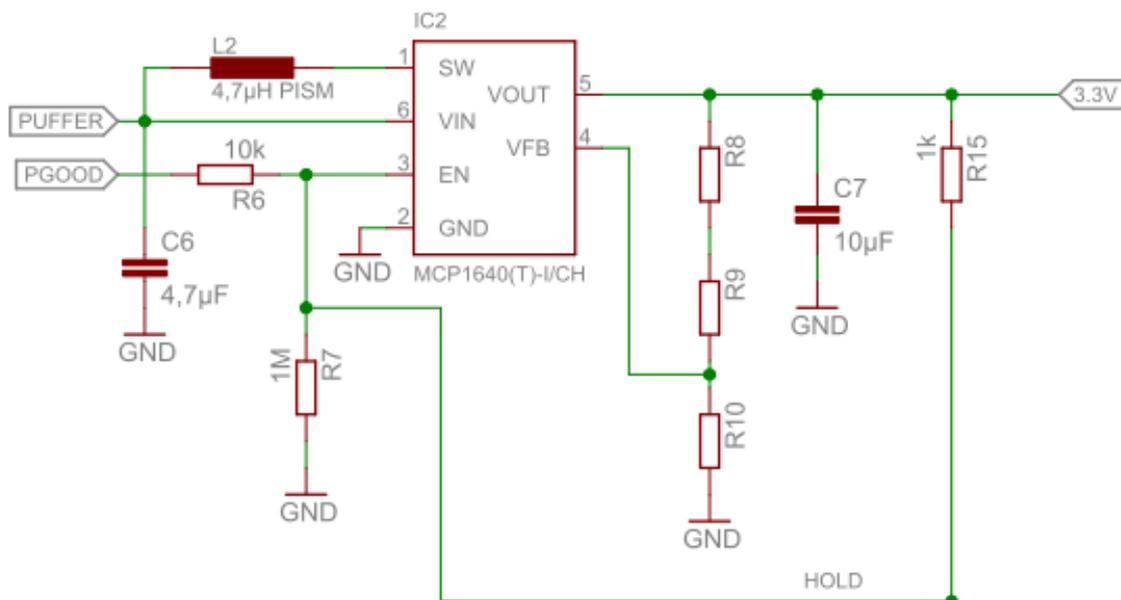
**Abbildung 7** Schaltungsteil mit DC/DC-Wandler LTC3105 und Leistungsanpassung (MPPC)



**Abbildung 8** Umsetzung des LTC3105-Schaltungsteils im Layout der iSITEC-Platine

Als Energiezwischenpeicher diente ein Kondensator (Supercapacitor) der Firma Cooper Bussmann. Diese Kondensatoren zeichnen sich durch eine sehr hohe Kapazitätsdichte aus. Der gewählte Kondensator weist eine maximale Arbeitsspannung von 2.5V auf. Die Kapazität beträgt nominal 25F. Der DC/DC-Wandler LTC3105 ist, wie bereits ausgeführt wurde, so konfiguriert worden, dass er so viel Strom aus der Energiequelle entnimmt (maximal 400mA) bis die Eingangsspannung auf 400mV zusammenbricht. Zudem soll er die Ausgangsspannung entsprechend des verwendeten Kondensators bis maximal 2.49V hochtransformieren. Für nachfolgende Schaltungsteile wird ein Power-Good-Signal erzeugt, wenn die Pufferspannung am Kondensator 95% der Maximalspannung (Ladeschlussspannung) = 2,35V überschreitet. Das Power-Good-Signal wird zurückgesetzt, wenn die Pufferspannung = 2,15V unterschreitet. Für nachfolgende Schaltungsteile wurde das Power-Good-Signal genutzt, um Komponenten zu- oder abzuschalten (Energiemanagement). Ein weiterer DC-DC-Wandler für die 3.3V-Erzeugung verwendet das Signal direkt als Freigabe.

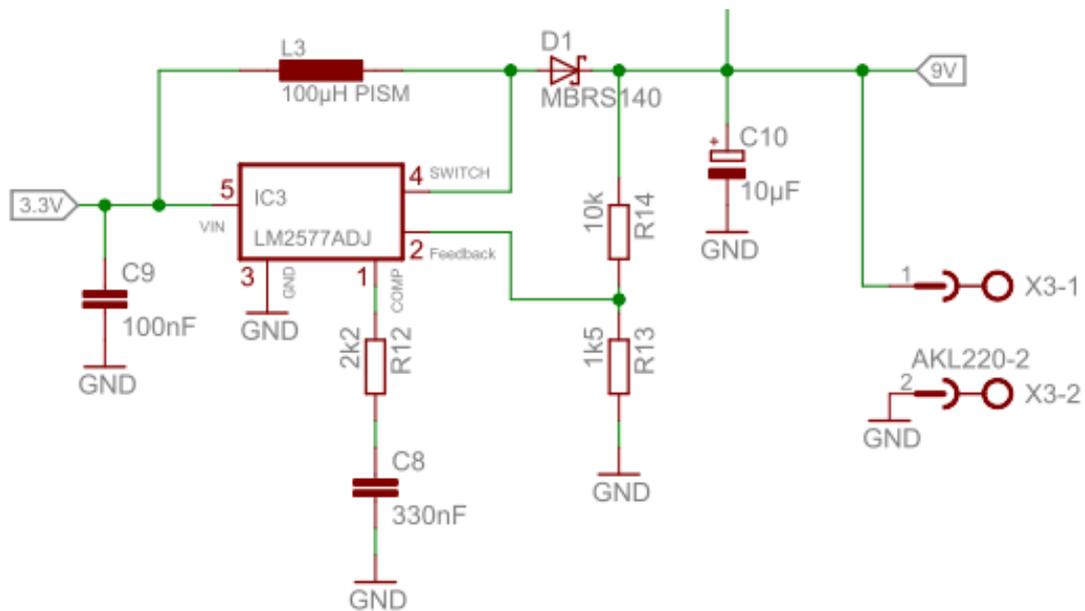
Die Funktion des Energiemanagements wurde somit sehr einfach und effektiv gelöst, in dem die nachgeschalteten Verbraucher wie Datenlogger und Sensoren nur aktiviert werden, wenn genügend Energie zur Verfügung steht. Ist die zu Verfügung stehende, im Kondensator gespeicherte, Energie verbraucht, werden die Verbraucher abgeschaltet.



**Abbildung 9** Schaltungsteil mit DC/DC-Wandler MCP1640 zur 3,3V Erzeugung aus 2,3V Pufferspeicher und Freigabe durch Power-Good-Signal

Als Schaltregler wurde in der 3.3V-Erzeugung ein MCP1640 von Mikrochip verwendet. Ist die Spannung am Pin 3 (Enable) größer 90% der Eingangsspannung an Pin 6, schaltet sich der Baustein ein und die Eingangsspannung von ca. 2.3V wird auf 3.3V am Ausgang hochtransformiert. Die 3.3V werden nachfolgend für die Controllerversorgung des Datenloggers sowie für einen weiteren DC-DC-Wandler (9V-Spannungserzeugung) genutzt.

Die 9V DC werden mit dem DC/DC-Wandler Baustein LM2577ADJ vom Hersteller Texas Instruments aus den 3.3V erzeugt. Der Schaltungsteil auf der Leiterplatte sieht folgendermaßen aus:



**Abbildung 10** Schaltungsteil zur 9V-Erzeugung mit DC/DC-Wandler LM2577

Die Gesamtschaltung des Energiesammlers und Spannungsaufbereitung baute sich folgendermaßen auf (**Abbildung 11**):

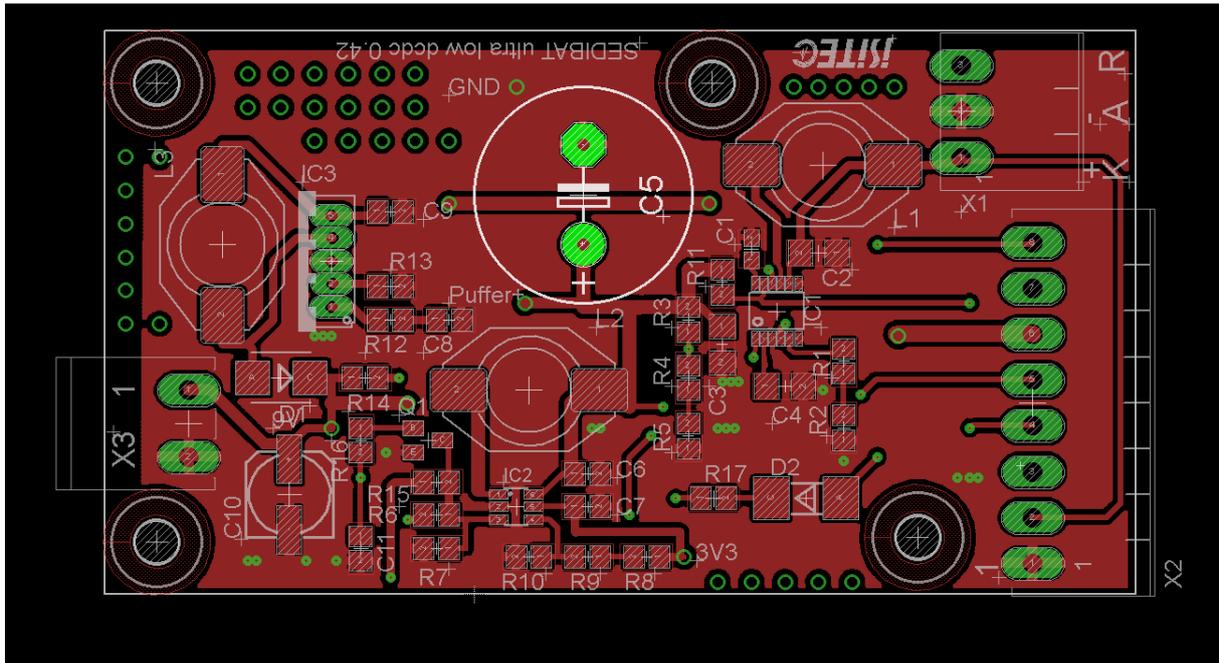
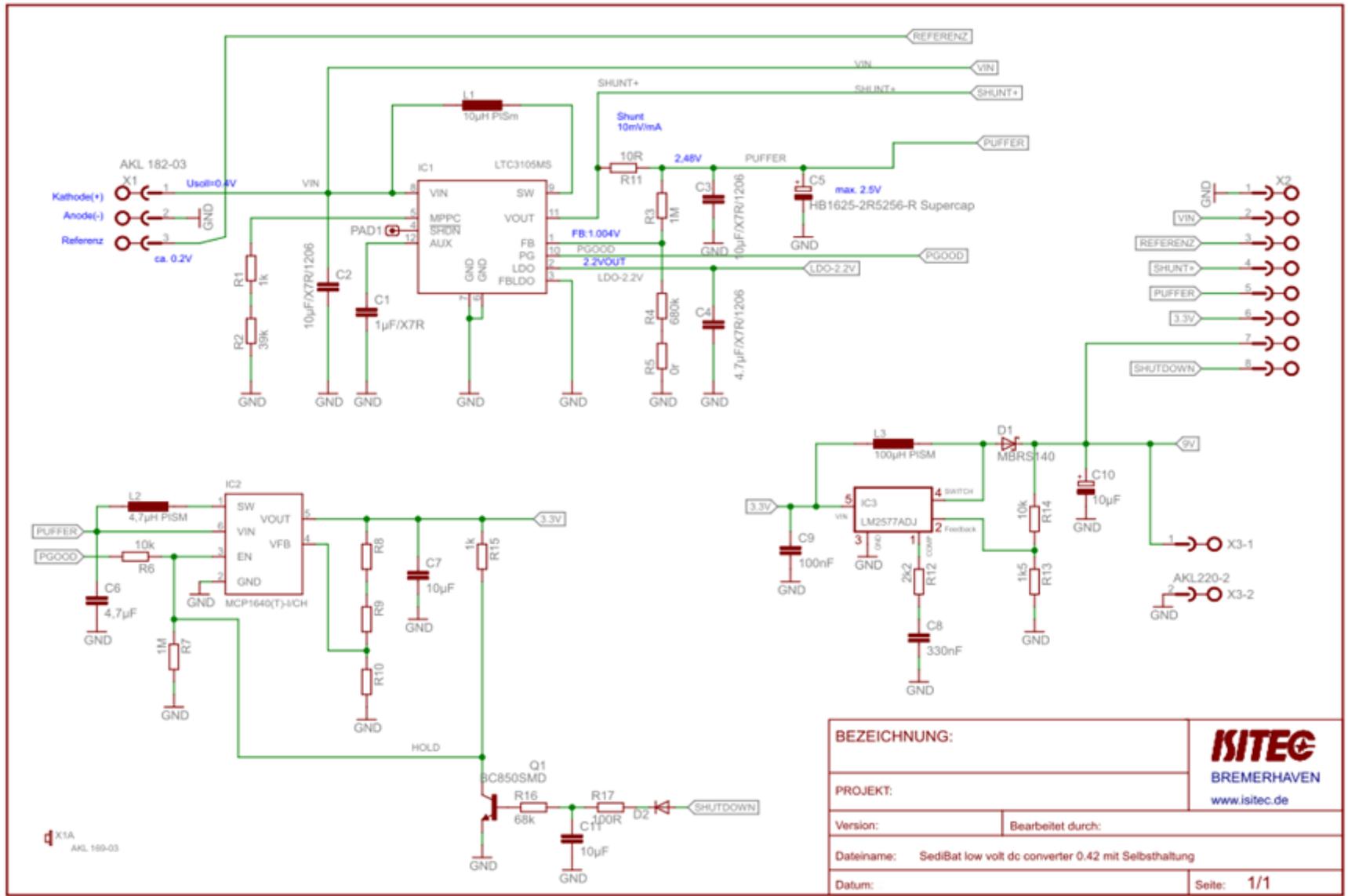
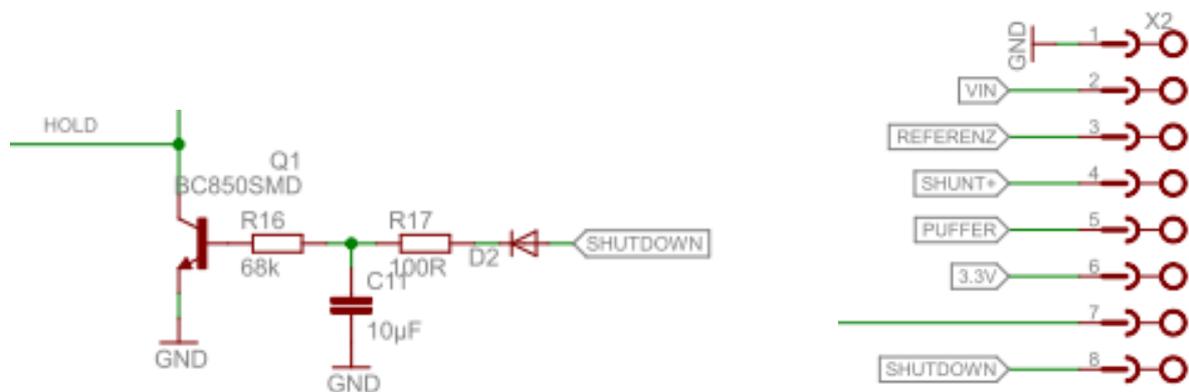


Abbildung 12 Das Platinenlayout des Spannungsversorgung/Energiemanagementsystem

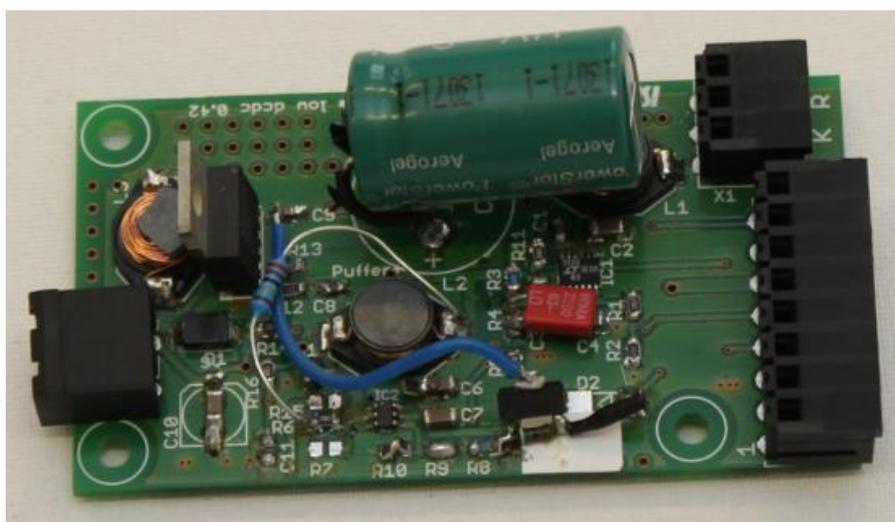


Oben links in dem Schaltplan ist der Stecker X1 zum Anschluss der Sedimentbatterie an die Elektronik erkennbar. Rechts der Anschluss X2 für die Stromversorgung der nachfolgenden Sensorik zusammen mit dem Datenlogger. Dem Datenlogger stehen noch die Informationen über die Batteriespannung der Sedimentbatterie, Pufferspannung und Ladestrom in den Zwischenpuffer zur Verfügung. Außerdem hat die Schaltung einen Signaleingang „Shutdown“. Mit einem positiven Impuls hat der Datenlogger die Option, seine eigene Stromversorgung auszuschalten. Somit besteht die Möglichkeit, nur den wirklich benötigten Energieanteil aus dem Zwischenpuffer zu entnehmen und diesen nicht unnötig zu entladen.



**Abbildung 13** Schaltplan zum Shutdown-Prozess

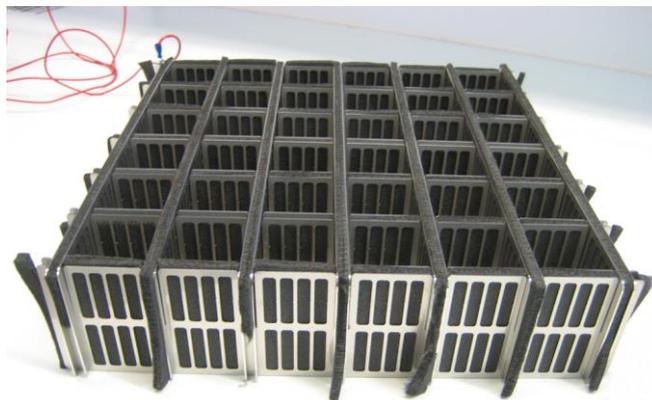
Die aufgebaute Elektronik mit leichten Modifikationen stellte sich abschließend so dar:



**Abbildung 14** Aufbau des Elektronik-Prototypen Spannungsversorgung/Energiemanagementsystem der BMBZ

## Aufbau des Testsystems (AP7)

Die theoretischen Baupläne zu den Laborsystemen wurden in diesem Projektabschnitt nach den festgelegten Geometrien und Abmessungen angefertigt. Der Aufbau der drei Testsysteme sollte bis auf die oben definierten Unterschiede in den Materialien der Elektroden identisch sein, um eventuelle Artefakte während der Versuchsreihe zu minimieren und eine spätere Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Für die V4A-Edelstahl Anoden wurden Steckbleche gefertigt, die ineinander gesteckt werden konnten, um eine möglichst hohe Stabilität zu erzeugen. Je nach Ansatz waren die Anodenbleche mit definierten Öffnungen in der Blechstruktur versehen oder gänzlich geschlossen. In einem der äußeren Bleche wurde ein kleines Loch (Durchmesser 3 mm) als Anschluss eines leitenden Kabels gebohrt. Verbunden mit der gekammerten Anodenstruktur waren zwei jeweils an den äußeren Seiten angebrachte, aufragende Kunststoffrohre, die sich nach einem Abstand von 50 cm in der Mitte über ein Verbindungsrohr verbinden ließen. An dieser Querverbindung wurden die Bürsten- Kathoden angebracht, die ihrerseits ebenfalls ein leitendes Kabel am Titan draht ( $\varnothing$  0.81 mm, 99.7%) besaßen. Die eingesetzten Bürsten besaßen in den Laborversuchen die Maße 50x160x200 mm sowie 50x85x140 mm. Die Kathoden befanden sich nach Einbringung in den Versuchstank (AP 8) im mittleren, gut durchmischten Bereich der Wassersäule. Die Verkabelung der Anode und Kathode ließ sich an die elektronischen Komponenten außerhalb des Versuchstanks anschließen. Dies sollte Messungen, Wartungsarbeiten, Reparaturen und Optimierungen an den elektronischen Bauteilen ermöglichen. Ein Gestell zur sicheren Ausbringung der BMBZ war in diesem Versuchsschritt noch nicht Teil des Experimentes.



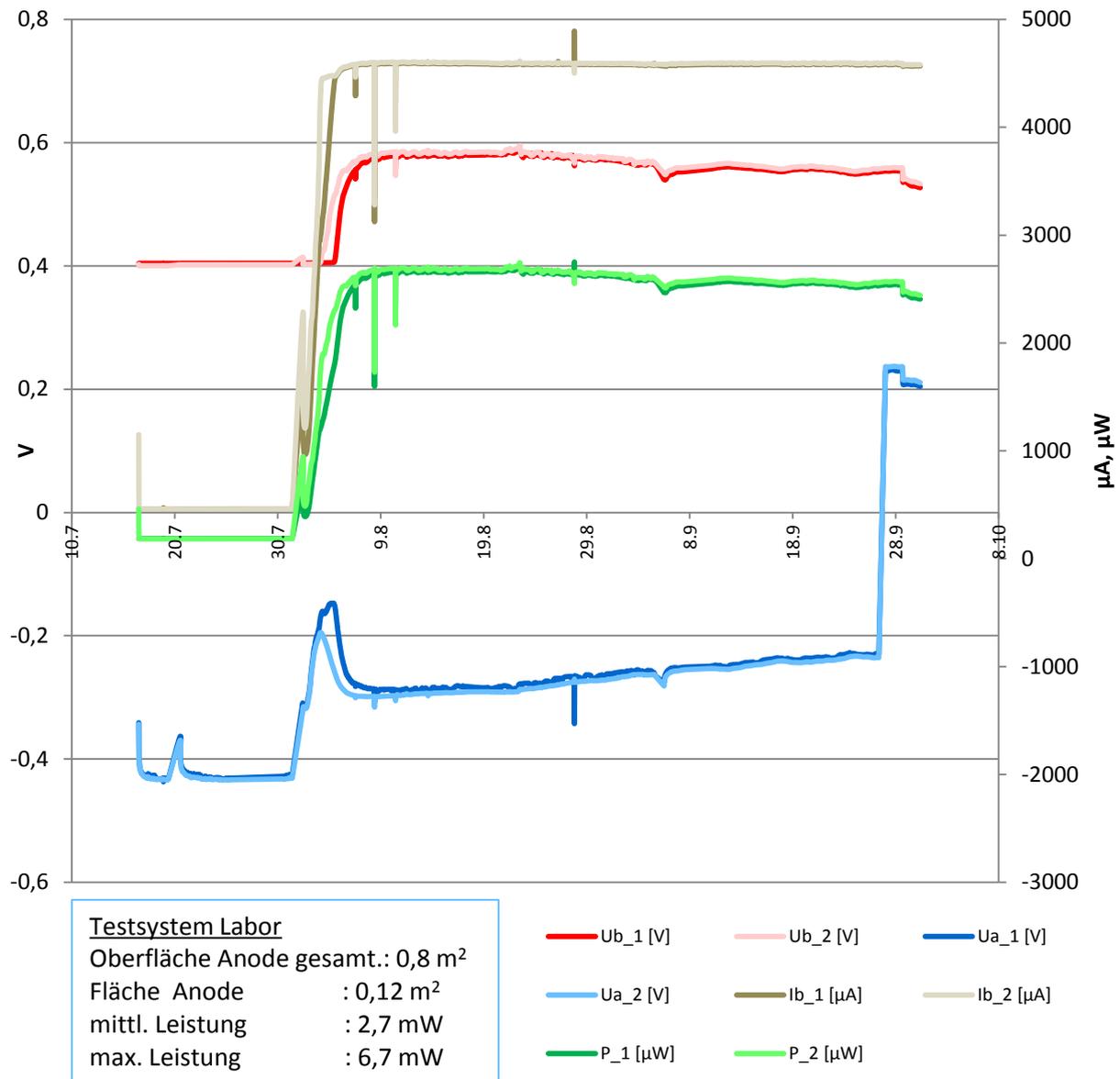
**Abbildung 15** Labordesign der gekammerten Edelstahl-Kathoden (V4A) ausgestaltet mit Graphitfilz

## Laborvalidierung des ersten Testsystems (AP8)

Die in AP3 definierten Bauformen der BMBZ wurden nach der baulichen Fertigstellung eines jeweils einzelnen Prototyps in einen 360 Liter fassenden Versuchstank integriert. Zur Füllung wurde Sediment aus dem Dorumer Watt verwendet. Das Wasser wurde aus der Weser bei Bremerhaven gewonnen. Auf eine Schicht aus bodenbedeckendem Sediment wurden die Versuchsbatterien in ausreichendem Abstand aufgestellt und dann langsam mit Sediment überschichtet, um keine Schäden zu verursachen. Dieser Prozess wurde solange fortgeführt, bis die Anode vollkommen bedeckt und der obere Rand ca. 5 cm überschichtet war. Die Anoden sollten frei im oxischen Bereich der Wassersäule verbleiben. Nach der Einbringung erfolgte der Eintrag des Wassers unter Vermeidung allzu starker Turbulenzen. Dadurch sollte verhindert werden, dass es zu einer zusätzlichen Durchmischung des Sedimentes kommt. Nach der Gewinnung des Sediments im Watt ist bereits mit einer Störung des Systems (insbesondere der anoxischen /oxischen Kompartimente) zu rechnen, so dass zusätzliche Einflüsse zu vermieden werden sollten. Um eine ausreichende Belüftung und Durchmischung des Wassers zu gewährleisten wurde über Membranpumpen kontinuierlich Sauerstoff eingetragen. Von Testsystem 1 und 2 wurden Daten (Zell- und Anodenpotential, Strom) kontinuierlich und automatisch über eine eigens konzipierte und geschriebene Dokumentationssoftware in einem Zeitintervall von je einer halben Stunde erfasst. Zusätzlich zur permanenten Aufnahme der Potentiale und der Stromwerte erfolgte die Aufnahme der Strom/Spannungs-Kurve von Testsystem 1 und 2 zu unterschiedlichen Zeiten. Diese Messungen dienten zur Abschätzung der max. erreichbaren Leistung für die jeweilige Bauform. Zudem konnte anhand der gesammelten Daten, in Abhängigkeit der Anoden- und Kathodenoberflächen der laborgestützten Prototypen, ein Upscaling auf die baulichen Dimensionen eines Feldsystems stattfinden. Ferner wurde das System mit unterschiedlichen elektrischen Widerständen belastet. In einer Widerstandsdekade wurden abnehmende Widerstände von groß- zu kleinohmigen verwendet. Der Wechsel zwischen den Widerständen erfolgte im Abstand von 5 Minuten. Danach wurde jeweils die entsprechende Spannung notiert, Strom und Leistung wurden entsprechend berechnet. Erkennbar wurde dadurch die Spannung, bei der die Zelle ihre max. Leistung erreicht. Untersucht wurde, wie sich das Leistungspotential über die Zeit während permanenten Betriebes der Zelle verändert.



**Abbildung 16** Einbringung der Sedimentbatterie in den Versuchstank



**Abbildung 17** Leistungskennzahlen des Laborsystems für zwei verschiedene Batteriedesigns.  $U_{b1}$  = Batteriespannung Batterie 1 in V,  $U_{b2}$  = Batteriespannung Batterie 2 in V,  $I_{b1}$  = Batterie Strom in  $\mu A$ ,  $I_{b2}$  = Batterie Strom in  $\mu A$ ,  $U_{a1}$  = Anodenpotential Batterie 1 in Volt,  $U_{a2}$  = Anodenpotential Batterie 2 in Volt, P elektrische Leistung in  $\mu W$ . Grundsätzlich gilt:  $P = U_{b1} \times I_{b1}$ .

## Modifikation und Optimierung des Testsystems (AP9)

Eine Evaluierung der in AP8 gesammelten Messdaten zeigte deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Elektrodenmaterialien. Anoden, die zusätzlich mit einer 0,7 cm dicken Schicht aus Graphitfilz versehen wurden, erzeugten eine höhere Leistung in mW als die anderen Bauformen. Exemplarisch ist in der **Abbildungen 18** dargestellt, die den Widerstand ( $k\Omega$ ) und die Stromstärke (mA) einer Stahl- und einer Stahl-Graphitfilz Anode gegenüber stellen. Bei der Stahlanode lag der gemessene Strom bei maximal 3 mA. Im Gegensatz dazu zeigte die Graphitfilz-Anode einen maximalen Strom von 7 mA. Testsystem 2 wurde daher als aussichtsreichster Kandidat vervielfältigt bis eine Anzahl von vier baugleichen Zellen vorlag. Die erzielten Versuchsergebnisse zur Optimierung der Anode mit Graphitfilz stimmten mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche überein.

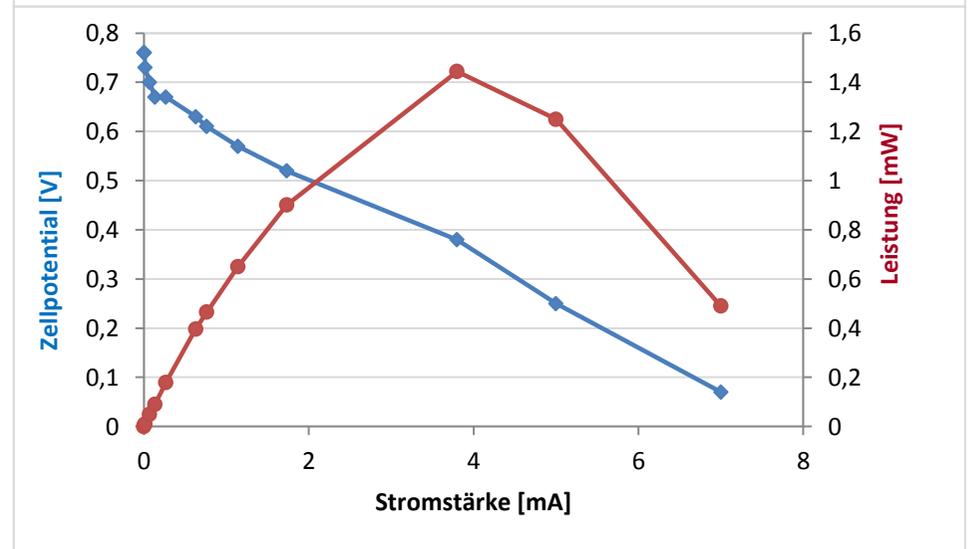
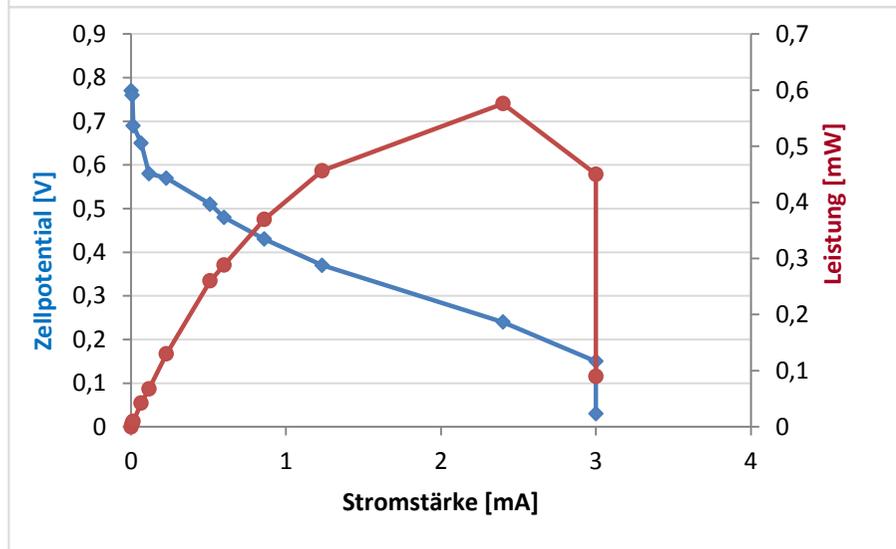
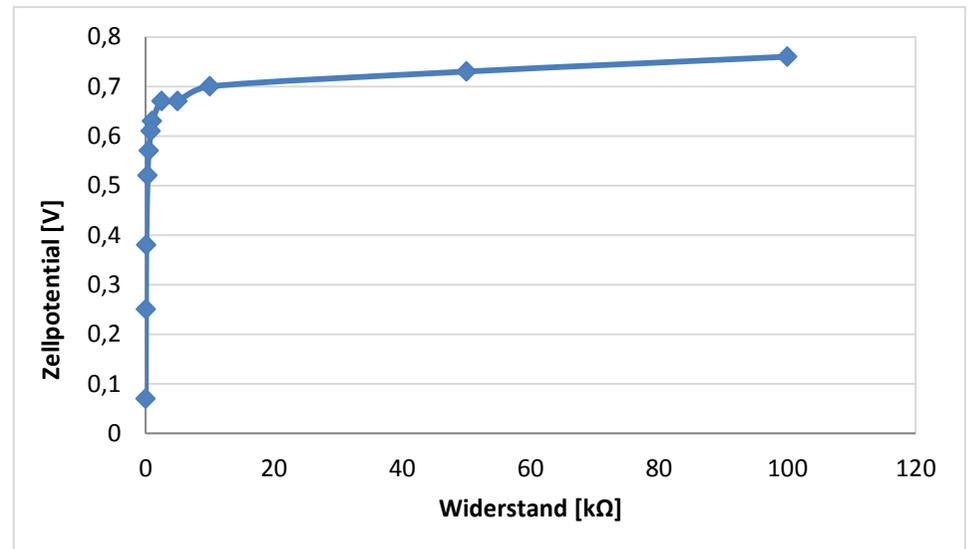
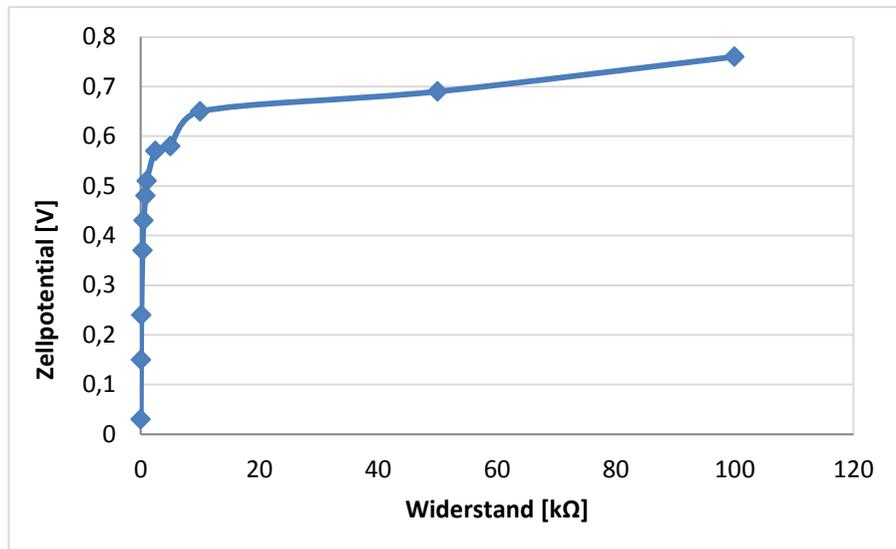


Abbildung 18 Strom-Spannungskurven des Batteriedesigns ohne Graphitfilz (links) und mit Graphitfilz (rechts) (Zeitintervall R-Wechsel  $t = 5$  min)

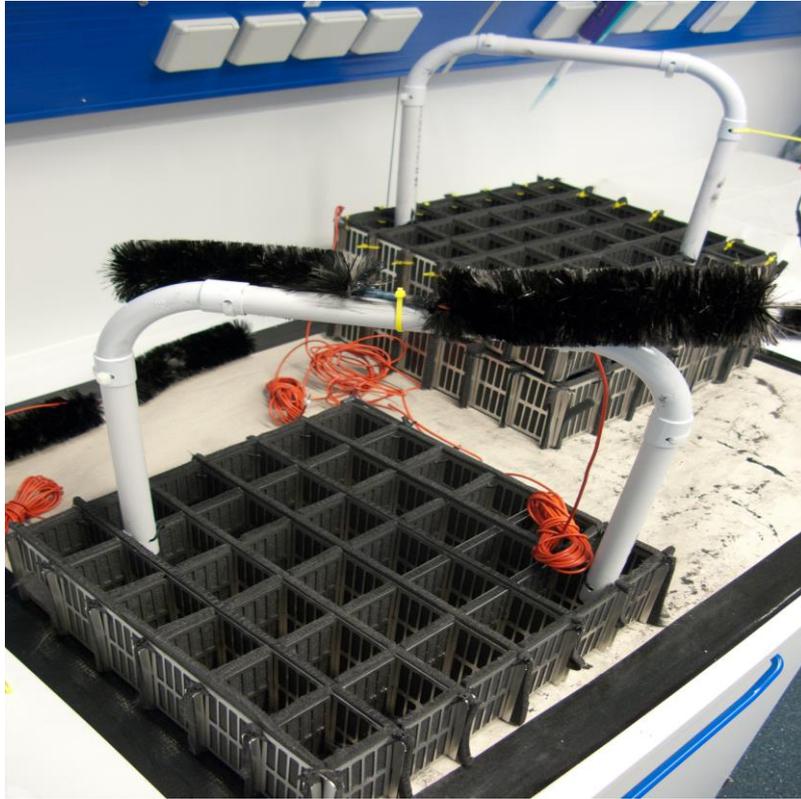
Bei den elektronischen Komponenten fand eine Optimierung des Potentiostaten statt, der bislang nicht die Gesamtmenge an erzeugtem Strom aufnehmen konnte. Die Erkenntnisse aus dem Zusammenspiel von elektronischen und baulichen Komponenten in AP8 erlaubten die Aussage, dass sich die Funktionen zur Energiegewinnung auch beim Upscaling nicht nachteilig verändern. Über die Auslegung des Verhältnisses von Anoden- zu Kathodenoberfläche kann dabei die Stromausbeute variiert werden. Ein Nutzungskonzept, welches den Betrieb mehrerer Stromabnehmer vorsieht, kann demnach einfach in ein größer dimensioniertes oder in Reihe geschaltetes Batteriedesign münden.

### Laborvalidierung des zweiten Testsystems (AP10)

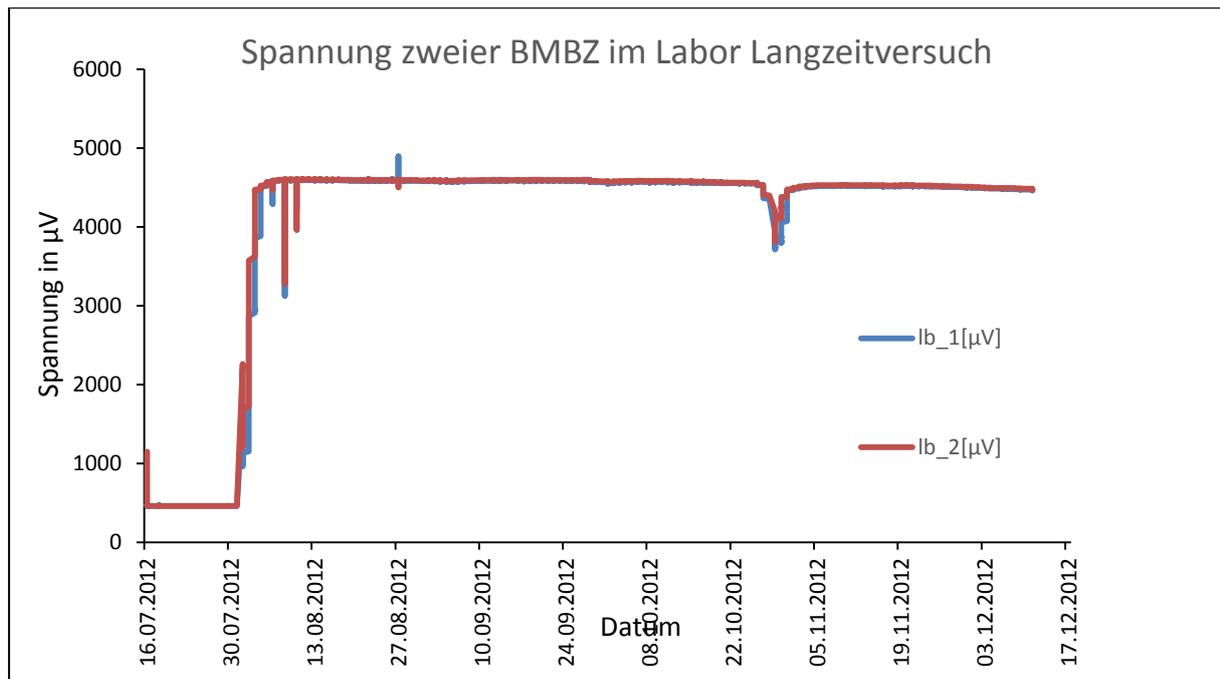
Eine Zelle des Testsystems 2 verblieb für einen Langzeitversuch in dem ersten Versuchstank. Drei weitere Zellen wurden in einen zweiten Versuchstank nach dem bereits etablierten Prozedere (AP 8) eingebracht. Ziel war es, drei baugleiche Systeme intelligent zu verschalten, um eine Potentialerhöhung zu erreichen. Eine Reihenschaltung stellte sich als komplexe Lösung dar, da die Batterien von einem gemeinsamen Elektrolyten umgeben waren, was zu Kurzschlussströmen führt. Daher wurde eine Parallelschaltung etabliert, um eine Leistungssteigerung über einen erhöhten Strom zu realisieren.

Des Weiteren wurden realistischen Szenarien zur Einbringung des Feldsystems durchgespielt. Einspülen, was mit positiven Ergebnissen durchgeführt werden konnte wurde aufgrund des in größeren Tiefen vorherrschenden Wasserdrucks verworfen, der mit einer Pumpe überbrückt werden müsste. Das Einbringen der Anoden durch Druck auf den oberen Teil der Konstruktion erzielte nicht den gewünschten Erfolg. Das Sediment, welches einen hohen, für Wattsedimente typischen Schlickanteil aufwies, war für diese Art der Einbringung zu verdichtet. Außerdem war fraglich, wie dieser Druck in größeren Tiefen ausgeübt werden sollte. Als weitere Variante war das Einrütteln über einen Elektromotor angedacht worden, der die gesamte bauliche Struktur in Schwingungen versetzt. Ein solches System müsste jedoch über eine Batterie versorgt werden, die leistungsstark genug wäre um auch einen größeren Feldtyp so in Schwingung zu versetzen, dass die Anoden in das verdichtete Sediment eindringen. Gemessen an der seinerzeit zu erwartenden Größe und dem Gewicht wurde dieser Gedanke aus Praktikabilitätsgründen verworfen. Abschließend wurde

darauf gesetzt, dass sich ein System mit ausreichend Stabilität und Gewicht selbstständig im Sediment vergräbt, sobald Strömungsparameter dazu kommen. Dieser Prozess geht allerdings mit einer verlängerten Auslagerungsphase einher, der den Betriebsstart mutmaßlich nach hinten verlegt.



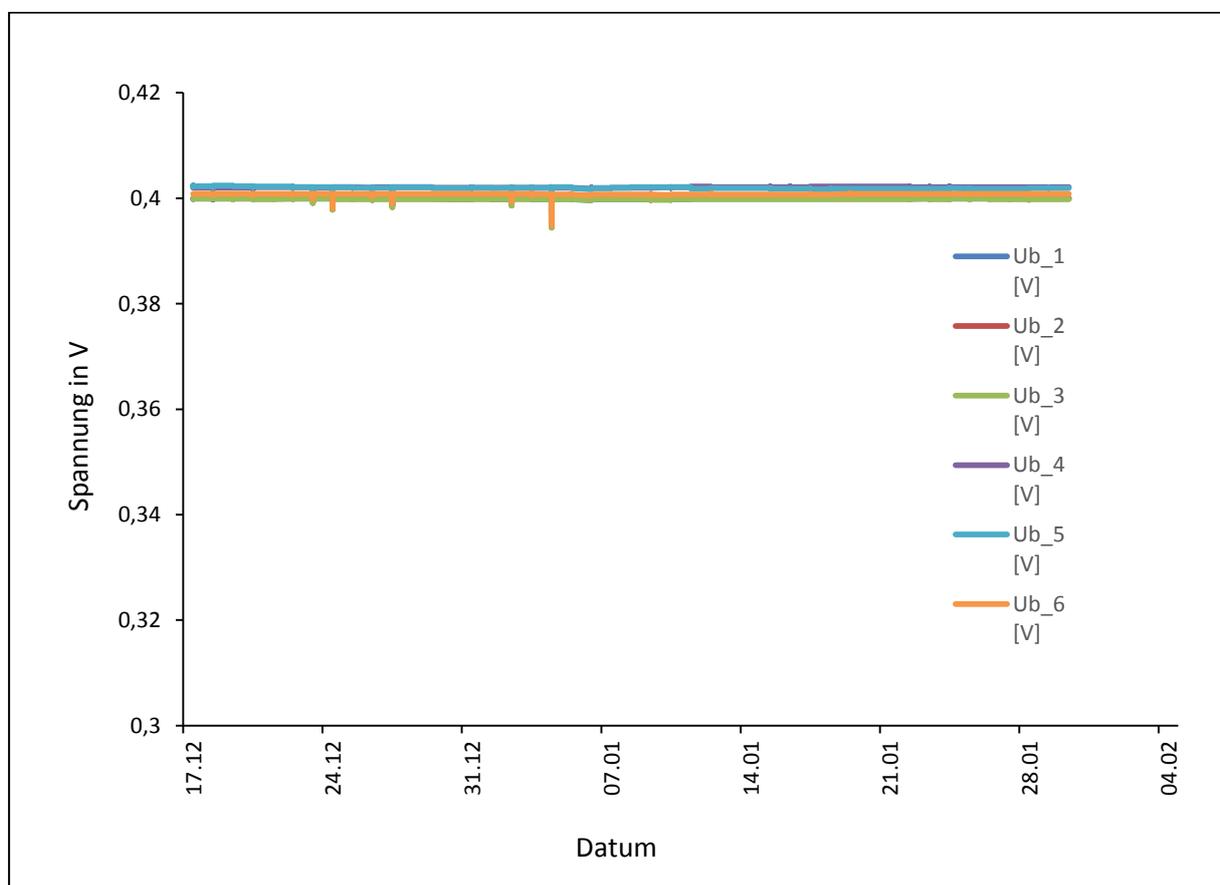
**Abbildung 19** Vervielfältigung des Labor-Designs mit Stahlgitter-Graphitfilz-Anode/Kohlenstofffaserbürste-Kathode für die Methodensuche zur Einbringung



**Abbildung 20** Spannung ( $\mu\text{V}$ ) von zwei Sedimentbatterien innerhalb eines Versuchstanks. Nach einer Initialphase von ungefähr 14 Tagen nahm die Spannung bis auf einen Wert von rund  $4500 \mu\text{V}$  zu und zeigte, bis auf ein kurzes Ereignis an dem Modifikationen am Potentiostaten vorgenommen wurde (01.11.2012-04.11.2012), einen konstanten Verlauf.

In der Spannungskurve der Sedimentbatterien zeigt sich im Labor eine Startphase in der es über einen Zeitraum von 14 Tagen zuerst zu einer linearen, unveränderten Batteriespannung von rund  $500 \mu\text{V}$  kommt. Nach dem 14 Tag beginnt die Batteriespannung exponentiell deutlich anzusteigen, bis sie nach weiteren 14 Tagen eine Batteriespannung von rund  $4500 \mu\text{V}$  erreicht. Die anschließenden 7 Tage unterliegen bei der zweiten Batterie (lb\_2) größeren Schwankungen als die bei der Ersten (lb\_1) der Fall war. Danach stabilisiert sich jedoch die Batteriespannung beider Batterien und zeigt über einen Zeitraum von insgesamt  $1 \frac{1}{2}$  Jahren einen konstanten Verlauf. Die elektronischen Systemkomponenten des EMS arbeiteten hier fehlerfrei. Die biologischen Prozesse an den Elektroden unterlagen somit ebenfalls keinen Schwankungen. Eine ausreichende Nährstoffverfügbarkeit für den mikrobiellen Stoffumsatz in den Versuchstanks war gegeben, so dass ein Leistungsabfall aufgrund limitierender Faktoren während der gesamten Laborlaufzeit nicht beobachtet werden konnte. Nach der Initialbesiedlung durch die elektro-aktiven Mikroorganismen in dem

ersten Monat nach der Einbringung erfolgten keine signifikanten Schwankungen. SRBs nutzen Sulfat und Schwefel als terminalen Elektronen-Akzeptor, sind aber auch in der Lage andere Substrate wie Nitrat,  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  zu nutzen. Diese generalistische Substratverwertung unterstützt die Langzeitstabilität des Prozesses im Labor. Folglich kann aus den geschilderten Zusammenhängen von einer Langzeitstabilität ausgegangen werden, insofern der Bodengrund keinen massiven Veränderungen ausgesetzt ist. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich in einem offenen System, das ständig neue Nährstoffe an die Elektroden heranführt, ebenfalls eine Langzeitstabilität und damit ein zuverlässiger, autarker Betrieb gewährleistet wird.



**Abbildung 21** Darstellung des Zellpotentials (V) für sechs laborgestützte BMBZ in Abhängigkeit von der Zeit. Durch die Systemkomponenten konnte das Zellpotential der Batterien stabil zwischen 0,39 und 0,40 V eingestellt werden.

Die Stabilisierung des Zellpotentials (V) zwischen 0,39 und 0,40V verdeutlicht die zuverlässige Arbeit des modifizierten und optimierten LTC3105 Bausteins. Das

Wechselspiel der Systemkomponente mit der stromerzeugenden BMBZ erreicht eine konstante Ausgangsbelastung der Zelle. Durch die Regeltechnik konnte die Eingangsspannung konstant in dem vorher definierten Bereich gehalten werden, der später für einen Betrieb der Messsensorik obligat war.

### Erstellung eines Erprobungskonzeptes (AP11)

Das konzipierte Rahmengerüst für den Feldeinsatz (**Abbildung 22**) diene dazu die Funktionsfähigkeit des Batteriedesigns zu gewährleisten und damit einer Zerstörung beim Einbringen bzw. bei der Bergung vorzubeugen. Ferner erlaubte die Vorrichtung gleichzeitig eine Rückholung an die Meeresoberfläche, um zukünftig auch Positionsveränderungen vornehmen zu können. In dieser Projektphase wurden bereits zukünftige Einsatzszenarien (Monitoring-Konzept) skizziert, die eine Mobilität und keinen stationären Verbleib voraussetzen. Mit der Rückholoption wurde demnach gleichzeitig die Flexibilität, Rentabilität und Mobilität solcher Systeme gesteigert.

Ein erarbeitetes Konzept beinhaltet die Integration einer oder mehrerer Sedimentbatterien in die ökologische Begleitforschung zum Monitoring von Eutrophierung im Umgebungsbereich von Offshore-Fundamenten für Windkraftanlagen, insbesondere in der Ostsee. Die Anwendung der mikrobiellen Sedimentbatterie bietet sich aus zwei Gründen an. Zum einen als autarke, kostengünstige und nachhaltige Energiequelle, die es erlaubt notwendige physikalische Messdaten über einen langen Zeitraum zu erfassen und damit eine verlässliche und kontinuierliche Datengrundlage für ein Monitoring schafft. Besonders von Interesse wären z.B. eine zeitgleiche Temperaturerfassung in der Wassersäule und dem Sediment sowie eine Messung des Sauerstoffgehaltes. Aus diesem Grund werden die Sensorsysteme des Prototyps aus einer mit Temperatursensoren bestückten Sedimentlanze, einer Sauerstoffsonde von Aanderaa sowie aus einem in der Wassersäule befindlichen Temperatursensor bestehen. Die elektronischen Komponenten des Projektpartners iSiTEC dienen zur intelligenten Steuerung der Messintervalle sowie zur Speicherung bzw. dem Transfer der Daten. Gegen Ende der Projektlaufzeit findet dann eine Datenauswertung unter Berücksichtigung der Messwerte statt. Hieraus lässt sich die Güte dieser Me-

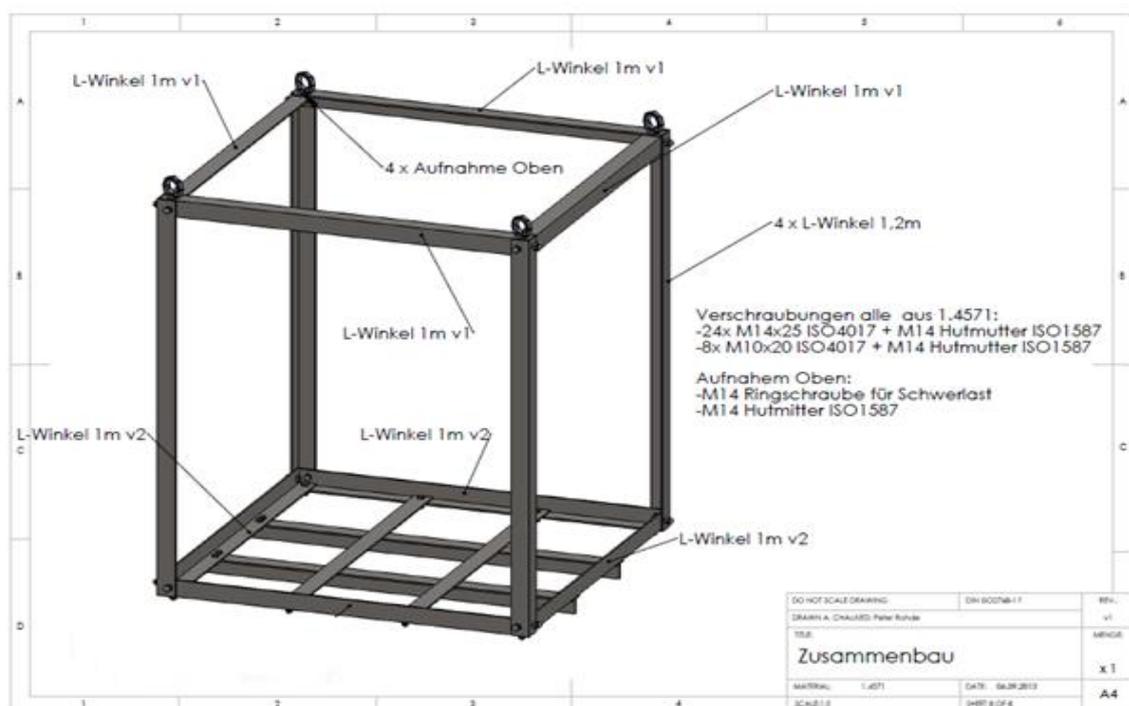
thodik bzw. die Praxistauglichkeit der Batterie für den genannten Anwendungsfall ableiten.

Ein weiterer Anwendungsfall wäre in diesem Zusammenhang der Einsatz einer Sedimentbatterie als Indikator für Eutrophierung. Vergegenwärtigt man sich die hohen Aufwuchsraten von Organismen an Offshore-Fundamenten unterhalb der Spritzwasserzone, kommt es temporär (bspw. nach Sturmereignissen oder im Winter) und sukzessiv zu einer hohen Akkumulation von Biomasse in einem lokal eng begrenzten Gebiet. Fallen diese Organismen auf den Meeresboden erhöht sich aufgrund von Verwesungsprozessen die Sauerstoffzehrung. Gerade in der Ostsee, mit einer ausgeprägten lokalen Sauerstoffarmut und einem äußerst sensiblen Ökosystem, ist dies ein essentieller Faktor den es abzubilden gilt. Hier liefert die Sedimentbatterie, unter Berücksichtigung der theoretischen Vorgänge, einen Indikator über die erzeugte Strommenge. Unter optimalen Bedingungen, im Falle hoher Nährstoffverfügbarkeit, produziert die Batterie am Limit ihres Leistungsspektrums. Dies könnte der Fall sein, wenn es zu einer Eutrophierung kommen würde. Kommt es jedoch zu einer Sauerstoffzehrung in der bodennahen Wassersäule, in deren Bereich sich die Kathode befindet, könnte die produzierte Strommenge sinken. Auskolkung, Sedimentfracht und fortwährende Störungen des Systems ließen sich nach theoretischen Gesichtspunkten ebenfalls über die Strommenge ableiten. Im Rahmen der erzielten Messdaten könnten definierte Zustandsbeschreibungen mit der Strommenge korreliert werden, so dass Sedimentbatterien als sinnvolle und zweckdienliche Ergänzung der Monitoring Instrumente zur ökologischen Begleitforschung bei der Errichtung und während des Betriebes Offshore-Fundamenten eingestuft werden.

Bei der Konzeption des Rahmens wurde darauf Wert gelegt, dass die eigentlichen Abläufe an den Anoden bzw. Kathoden nicht gestört werden. Es muss sich daher um eine an allen Seiten durchlässige Konstruktion handeln, um den Durchfluss und damit auch die Sauerstoff- und Nährstoffzufuhr nicht negativ zu beeinflussen. Aufgrund der bereits oben beschriebenen Laborexperimente sind Lösungen zum einvibrieren bzw. eindrücken mit Hilfe eines höheren Eigengewichts (laut Berechnungen ca. 100 kg) für den Feldtyp verworfen worden. Vor allem geschah dies aufgrund der Kompaktheit des Sediments. Am zielführendsten für die Erreichung der Projektziele erschien das natürliche Einspülen durch die standortspezifische Hydrodynamik.

Um stetige Funktionsprüfungen der Sensoren sowie Messungen der Batteriekennwerte zu ermöglichen, wurde in dieser Phase des Projektes entschieden, den Datenlogger in einer geschützten Zarges-Kiste an Land zu positionieren, der über Seewasserkabel und Unterwasserstecker mit der BMBZ verbunden sein sollte. Zudem sollte parallel ein U-W-System entwickelt werden, dass diese Landverbindung im Anwendungsfall ersetzen sollte.

Aufgrund der gesammelten Labordaten und dem daraus resultierenden Mittelwert für die Batteriespannung wurde das Felddesign im Hinblick auf die Abmessungen der Anode auf eine Grundfläche von 1 m<sup>2</sup> konzipiert, exklusive des schützenden Rahmengestells.



**Abbildung 22** Konstruktionszeichnung des Abstellgestells zur Aufnahme, Sicherung und Absetzung der BMBZ

### Aufbau des Feldsystems und Feldapplikation (AP12 – AP16)

Das Feldsystem wurde auf Basis der Kennzahlen aus der Laborvalidierung konzipiert. Als maximale Leistung auf einer Anodenoberfläche von 0,8 m<sup>2</sup> sind 6,7 µW gemessen worden. Ein Upscaling erbrachte eine Vergrößerung der Anodenoberfläche für das Feldsystem um den Faktor 10 auf eine Gesamtoberfläche der Anode

von 7,31 m<sup>2</sup> (**Tabelle 2**). Als Material für die Kathode wurden Graphitfaserbürsten mit Titandraht mit folgenden Abmessungen angefertigt: 50 x160 x 250 mm. Insgesamt wurden sieben dieser Bürsten zusammenschaltet so dass sich eine Gesamtabmessung von 50 x 160 x 1750 mm ergab.

**Tabelle 2** Upscaling-Prozess des validierten Laborsystems auf die Kennwerte des konzipierten Laborsystems

<b>Stahlgitter-Elektroden</b>	Laboransatz mit Graphitfilz	Upscaling für Feldtyp
Höhe [cm]	8	24
Breite [cm]	32	100
Dicke [cm]	0,1	1
Dicke mit Filz [cm]	0,8	1,7
Fläche [m <sup>2</sup> ]	0,1024	1,00
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	0,728	7,31

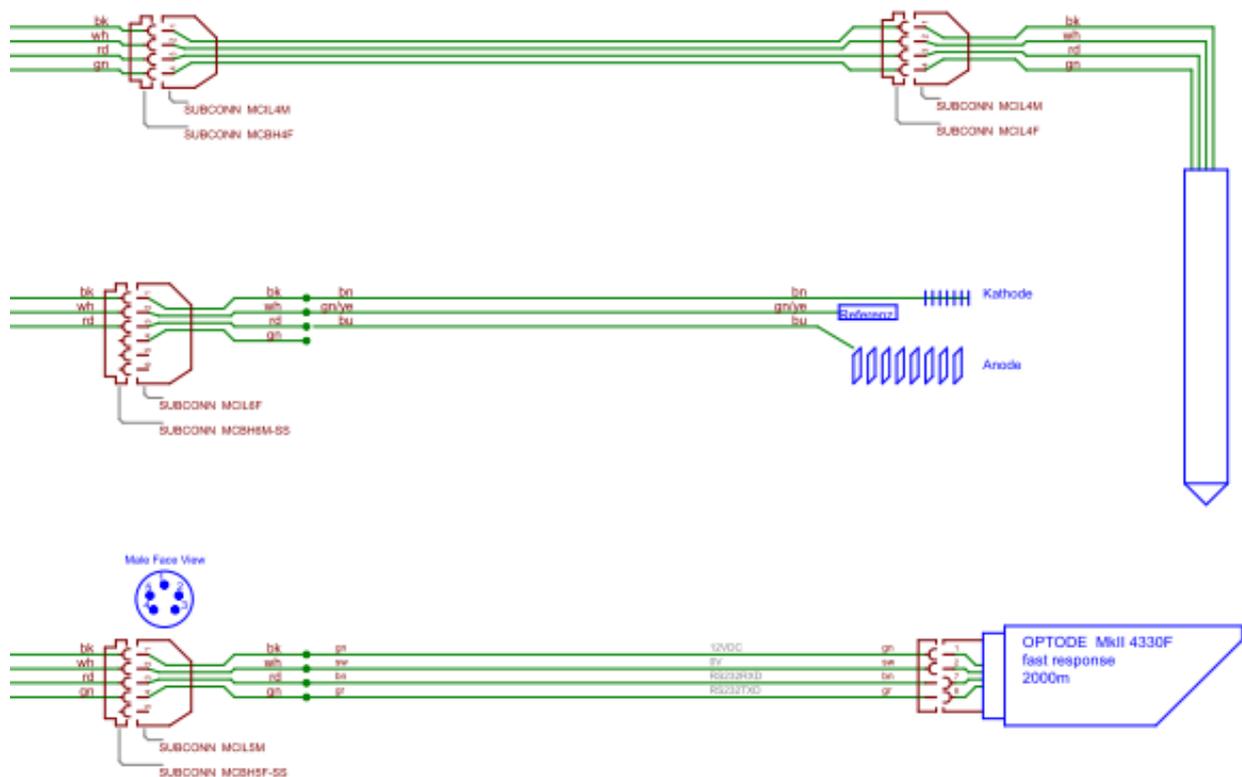
Die für das Upscaling gefertigten Einzelkomponenten wurden zusammengesetzt und in den maßgefertigten Rahmen integriert (**Abbildung 23**).

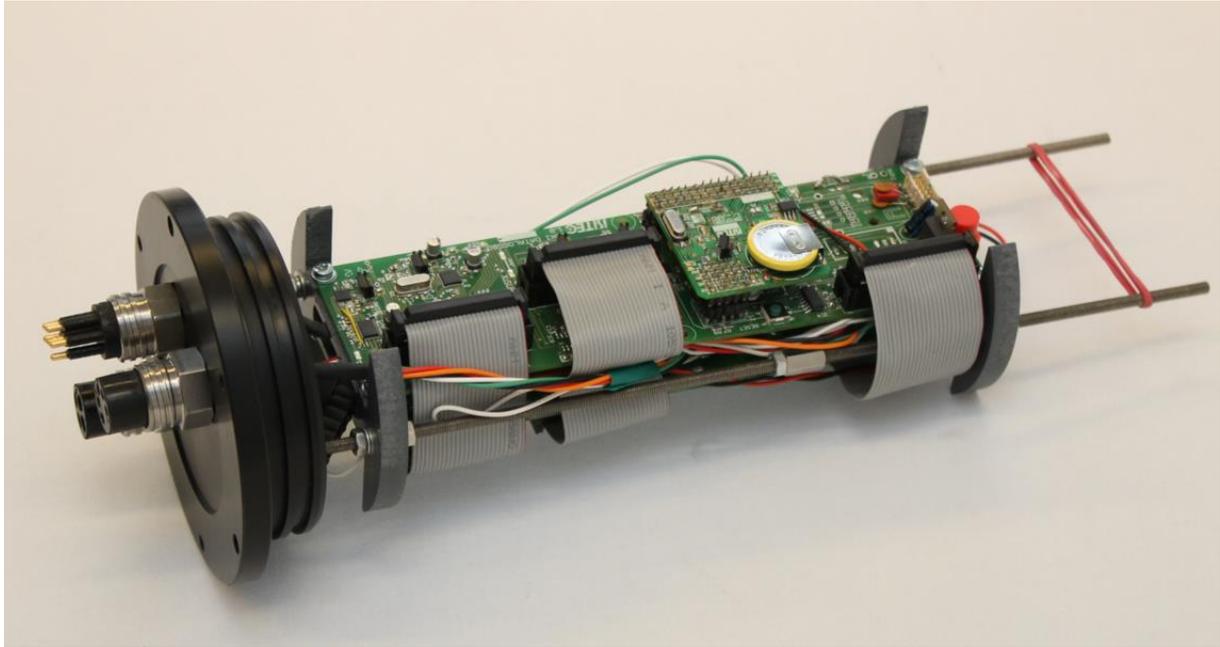


**Abbildung 23** Aufbau des Feldsystems mit gekammerter Edelstahl-Graphitfilz-Anode

Auf dem Bild der **Abbildung 23** ist die gekammerte Edelstahl-Graphitfilz Anode nach dem Einbau in den Rahmen zu erkennen. Die Verbindung der Anode mit einem U-W-Kabel hat ebenfalls schon stattgefunden. In den folgenden Bauschritten folgte die Integration der EMS-Systemkomponenten, der Sensoren sowie dem Halterungssystem, an dem sich die als Kathode fungierenden Graphitfaserbürsten befinden.

Für die Praxistauglichkeit und Sicherheit der Systemkomponenten war es notwendig ein speziell angepassten U-W-Gehäuse zu entwerfen, das zum einen die Kabelanschlüsse realisiert und zum anderen die Hardware aufnehmen kann. Auf dem unteren Plan (**Abbildung 24**) ist erkennbar, wie die in **Abbildung 25** ersichtlichen drei Anschlüsse für die Sedimentbatterie, die Temperaturlanze und die Optode innerhalb des U-W-Gehäuses verdrahtet sind:





**Abbildung 25** Innenansicht der betriebsbereiten Elektronik mit Datenlogger, Anschlussboard und Netzteil

Die Aandaraa Sauerstoff-Optode wurde mit dem zugehörigen U-W-Anschlusskabel in den Rahmen der BMBZ integriert. Je nach gewünschtem Sensorportfolio kann die Sauerstoff-Optode gegen einen Aandaraa Leitfähigkeitssensor (Messbereich 0 - 7,5 S/m bzw. 0 - 75 mS/cm, Genauigkeit 0,005S/m, Temperaturbereich -5 °C bis 40 °C, Genauigkeit 0,1°C) oder einen Seaguard Trübungssensor (Sensorbereich 0 - 500 FTU) getauscht werden. Im Falle der eigens angefertigten Temperaturlanze wurde im Laborversuch vorab getestet, ob die volle Funktionalität gewährleistet ist. Die produzierten Daten des Testlaufs wurden aufbereitet und zeigten ein korrektes Messspektrum (**Abbildung 26**). Zudem wurde der Datenlogger speziell konfiguriert und um eine Spezialfunktion zum vorzeitigen Abschalten der Betriebsspannung erweitert.

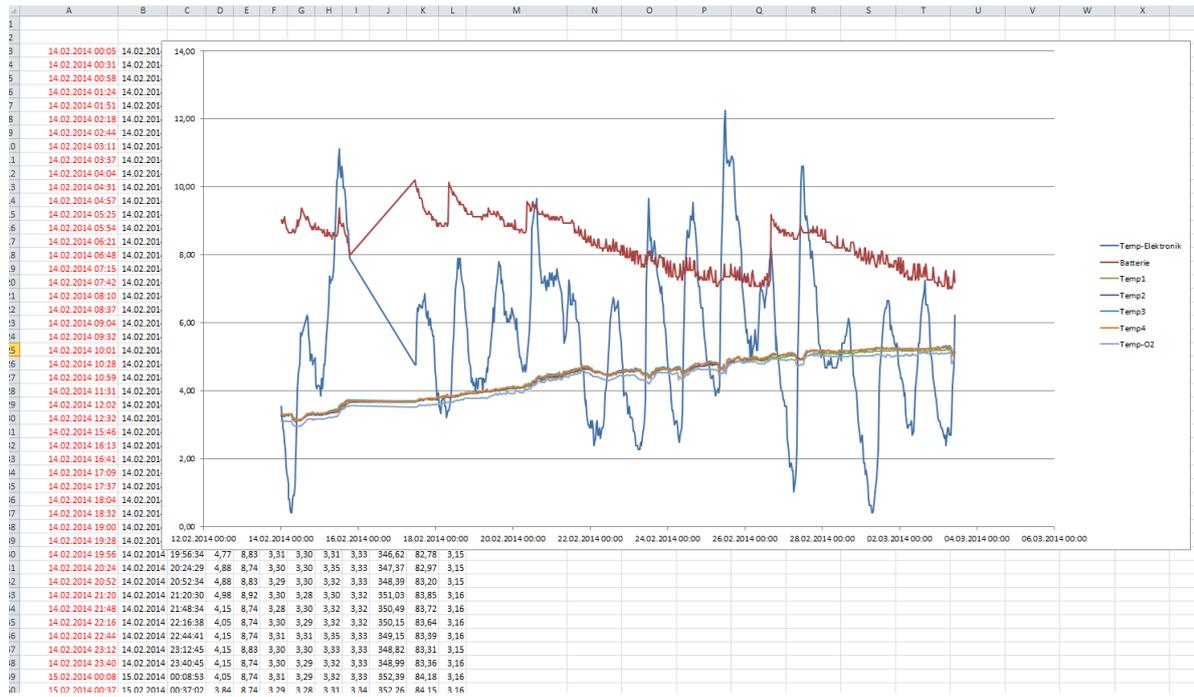


Abbildung 26 Messdaten der Temperaturlanze im Testlauf.



Abbildung 27 Datenlogger-Gehäuse aus Kunststoff (PE-HD) für den Einsatz in Wassertiefen bis zu 300m mit Edelstahl-Unterwassersteckern und innenliegender Elektronik zur Stromversorgung der Sensorsysteme bzw. zur Speicherung des von der BMBZ erzeugten Stroms.

Nach der Fertigstellung der Gesamtkonstruktion erfolgte die Ausbringung des rund 100 kg schweren Feldsystems im Handelshafen von Bremerhaven. In **Abbildung 28** ist das schützende Rahmengestell mit der Aufhängung für die Auslagerung und Bergung, das gekammerte Anodensystem mit Graphitfilz, die Verkabelung und die Graphitbürsten als Kathodensystem zu erkennen. Hinten rechts ist die Aandaraa Optode 4330 MkII zur Sauerstoffmessung angebracht. Vorne links ist die Temperaturlanze angebracht, auf der sich mehrere Temperatursensoren befinden. Diese liefern Messdaten aus dem Sediment, der Grenzschicht und der angrenzenden Wassersäule.



**Abbildung 28** Ausbringung des Feldsystems im Handelshafen von Bremerhaven



**Abbildung 29** Eintauchphase der BMBZ

Vom Tag der Auslagerung bis zum Ende des Versuchs (5 Monate) stieg die dokumentierte Batteriespannung von 6mV auf 20mV. Alle Systemkomponenten arbeiteten in dieser Zeit innerhalb der definierten Parameter. Die erzeugte Batteriespannung reichte jedoch nicht, um einen der Sensoren autark betreiben zu können. Eine Untersuchung des Untergrundes ergab, dass es sich um einen sandigen Untergrund in ca. 7,5m Tiefe handelt, so dass entweder die Batterie (noch) nicht vollständig in die anoxischen Kompartimente des Sediments eingedrungen ist oder die bereits im Labor erkennbare Initialphase aufgrund des Upscalings bedeutend mehr Zeit erfordert (>5 Monate). U-W-Aufnahmen, die ein genaueres Bild der Situation hätten liefern können sind trotz mehrmaliger Versuche an den starken Trübungswerten im Hafengebiete gescheitert. Das eine Batteriespannung auftritt, verdeutlicht jedoch, dass sich zumindest an Teilen der Anode anoxischen Prozesse abspielen müssen. Zudem lieferten die ersatzweise per Akku betriebenen Sensoren zuverlässig impuls-

gesteuerte Messdaten, die ihrerseits eine Funktionalität der entwickelten Systemkomponenten zeigen.

## Fazit

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass es am Markt befindliche, praxistaugliche Messsensoren gibt, die mit einer BMBZ betrieben werden können. Dies belegen vor allem die stabilen Langzeitreihen aus den Laborexperimenten. Zudem geht von der Batteriearchitektur, insbesondere in puncto Elektrodenmaterial, ein Einfluss aus, der die Stromausbeute signifikant beeinflusst. In diesem Projekt zeigte sich im Bereich der Anode ein Vorteil, wenn Graphitfilz genutzt wurde. Bei der Kathode waren Kohlenstofffasern die aussichtsreichsten Baumaterialien. Die Öffnungen in den gekammerten Edelstahlblechen gewährleisteten sowohl eine ausreichende Festigkeit als auch eine gute Versorgung mit Nährstoffen. Das Porenwasser im Sediment kann so durch die Bleche und das umschlossene Filz diffundieren bzw. fließen. Insgesamt kann also hinsichtlich der Batteriearchitektur von einem gelungenen System gesprochen werden, dass den Projektzielen entspricht.

Hinsichtlich der elektronischen Komponenten kann ebenfalls von einer Erfüllung der Ziele berichtet werden. Es ist gelungen, ein Sensorsystem aus zwei Verbrauchern (Temperatursonde und Aandaraa Sauerstoff-Optode) in die Batteriearchitektur und Verschaltung zu integrieren. Der entwickelte Datenlogger zeichnete während der Feldauslagerung kontinuierlich Daten auf. Das Energie-Management-System wurde ebenfalls integriert und lief unter Testbedingungen ebenfalls fehlerfrei. Problematisch war jedoch, dass die Batteriespannung der BMBZ im Feld nicht auf ein ausreichendes Maß anstieg, um eine ereignisgesteuerte Messung der Sensoren auszulösen. In den Feldversuchen wurde nachgewiesen, dass es zu einer Produktion von elektrischem Strom kommt, also mussten sich zumindest Teile der Anode im anaeroben Sediment befinden. Um dies zu evaluieren wurde versucht mit Scheinwerfern und einer Unterwasserkamera Bilder bzw. Videos der Batterie aufzunehmen. Die Trübung im Hafengebiet des Handelshafen ist jedoch so immens, dass die Bilder trotz mehrmaliger Versuche keine aussagekräftigen Daten lieferten. Ein anderer Platz für die Auslagerung, konnte aus logistischen Gründen ebenfalls nicht in Anspruch genommen werden. Es kann an dieser Stelle also nur spekuliert werden,

dass die Anodenfläche nicht ausreichend im Sediment vergraben war, obwohl eine Prüfung des Standortes eindeutig einen Sedimentuntergrund ergab. Auszuschließen ist hingegen, dass die Batterie bis zur Kathode im Sediment versackt war. Dies konnte anhand der Daten der Sauerstoff-Optode sowie der Temperaturlanze nachvollzogen werden, die stets logische Messdaten lieferten. Aufgrund des unbekanntes Strömungsregimes im Hafengebiet kann es möglich sein, dass sich Teile der Anodenfläche stets frei gespült haben, vergleichbar mit einem Kolk-Effekt. Eine weitere Möglichkeit ist eine deutlich verlängerte Anlaufphase, da die Besiedlungsflächen der Elektroden um ein Vielfaches größer sind als im Laborversuch. Aufgrund der geschilderten Erfahrungen sollte für zukünftige Überlegungen in Betracht gezogen werden, dass die Batterie einer langen Einlaufphase (>5 Monaten) unterliegt, bevor sie beständig und autark zu einer Stromerzeugung im Stande ist. Ein funktionsfähiges Batteriedesign, passende Sensoren sowie ein funktionsfähiges Energie-Management-System für eine Feldapplikation mit einer Anodenfläche von 1m<sup>2</sup> liegen jedoch mit Projektende vor. Hinsichtlich der Stromerzeugung wäre es ratsam einen geeigneteren Standort zu evaluieren und die Einlaufphase unter realen Umweltbedingungen näher zu untersuchen. Ferner sollte eine hydrodynamische Betrachtung stattfinden, wie die Batteriearchitektur von der Strömung beeinflusst wird. Möglicherweise bedingen bauliche Gegebenheiten, dass die Anode der Batterie nicht gänzlich ins anoxische Sediment eindringen bzw. sich eingraben kann. Sollte dies der Fall sein, wäre eine bauliche Adaption notwendig. Diese lassen sich jedoch auf Grundlage der aus diesem Projekt hervorgegangenen Erkenntnisse, Baupläne, Schaltpläne, Systemkomponenten und binnen kürzester Zeit realisieren.

## Literaturverzeichnis

- [Ael06] AELTERMAN, P. RABAEY, K. PHAM, H. T. BOON, N. VERSTRAETE, W. *Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells*. Environ. Sci. Technol. Vol.: 40:3388-3394. 2006.
- [Don08] DONOVAN, C. DEWAN, A. HEO, D. BEYENAL, H. *Batteryless, wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell*. Environ. Sci. Technol. Vol.: 42:8591-8596. 2008.
- [Dum07] DUMAS, C. MOLLICA, A. FERON, D. BASSEGUY, R. ETCHEVERRY, L. BERGEL, A. *Marine microbial fuel cell: use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials*. Electrochim Acta Vol.: 53:468-473. 2007.
- [Hon08] HONG, S. W. KIM, H. J. CHOI, Y. S. CHUNG, T. H. *Field experiments on bioelectricity production from lake sediment using microbial fuel cell technology*. Bull. Korean Chem. Soc. Vol.: 29:2189-2194. 2008.
- [Low06] LOWY, D. A. TENDER, L. M. ZEIKUS, J. G. PARK, D. H. LOVLEY, D. R. *Harvesting energy from the marine sediment–water interface II Kinetic activity of anode materials*. Biosens Bioelectron Vol.: 21:2058-2063. 2006.
- [Nie07] NIELSEN, M. E. REIMERS, C. E. STECHER, H. A. (2007) *Enhanced power from chambered benthic microbial fuel cells*. Environ Sci Technol. 41:7895-7900. 2007.
- [Nie08] NIELSEN, M. REIMERS, C. E. WHITE, H. K. SHARMA, S. GIRGUIS, P. R. *Sustainable energy from deep cold seeps*. Energy Environ Sci Vol.: 1:584-593. 2008.

- [Ryc05] RYCKELYNCK, N. STECHER, H. A., REIMERS, C. E. *Understanding the anodic mechanism of a seafloor fuel cell: Interactions between geochemistry and microbial activity*. Biogeochem Vol.: 76: 113-139. 2005.
- [Sch07] SCHRÖDER, U. *Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency*. Phys Chem Vol.: 9:2619-2629. 2007.
- [Sco08] SCOTT, K. COTLARCIUC, I. HALL, D. LAKEMAN, J. B. BROWNING, D. *Power from marine sediment fuel cell: the influence of anode material*. J Appl Electrochem Vol.: 38:1313-1319. 2008.
- [Shi06] SHIN, S. H. CHOI, Y. J. NA, S. H. JUNG, S. H. KIM, S. *Development of bipolar plate stack type microbial fuel cells*. Bull. Korean Chem. Soc. Vol.: 27:281:285. 2006.
- [Ten02] TENDER, L. M. REIMERS, C. E. STECHER. H. A. HOLMES, D.E. BOND, D. R. LOWY , D. A. PILOBELLO, K. FERTIG, S. LOVLEY. D. R. *Harnessing microbially generated power on the seafloor*. Nature Biotechnol Vol.: 20:821-825. 2002.

## Danksagung

Herr Tobias Mangels, Herr Philipp Witzel, Herr Jannis Klar, Herr Robert Strakow und Herr Dennis Grimm unterstützten das Projekt als studentische Hilfskräfte. Herr Mirko Bögner unterstützte das Projekt als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Herr Peter Rhode brachte seine Expertise bei der planerischen Konstruktion von Bauteilen ein. Bremenports unterstützte das Projekt bei der Auswahl eines geeigneten Auslagerungsstandortes für das Feldsystem im Handelshafen von Bremerhaven. Ihnen allen gilt der Dank für die Durchführung dieses Projektes.