

Sachbericht zur Erfolgskontrolle

ZE: Robert Boyle Institut e.V. (RBI)	Förderkennzeichen: 031B1435
Vorhabenbezeichnung: IBÖ-10: RDBFuelCells - Redefined Bio Fuel Cells	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2023 – 30.09.2024	
Berichtszeitraum: 03/24 – 09/24	

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Hervorhebung der noch ausstehenden Aspekte und Arbeiten

AP 1: Entwicklung einer effizienten mikrobiellen Co-Kultur-Plattform

Ziel des Arbeitspaketes 1 war die Entwicklung einer effizienten mikrobiellen Co-Kultur-Plattform für die RDB-Brennstoffzellen. Diese Co-Kultur sollte in der Lage sein, Cellulose oder andere pflanzliche Abfallprodukte abzubauen und das organische Säureprodukt dieses Abbaus in Strom umzuwandeln. Hierzu waren seit dem letzten Zwischenbericht noch folgende Arbeiten ausstehend:

- Optimierung der Bakterienauswahl: weitere Tests mit unterschiedlichen Mikroben zur Verbesserung der Effizienz des Celluloseabbaus und der Stromerzeugung mit Fokus auf Substratunabhängigkeit und variable Einsatzmöglichkeiten
- Analyse der Fermentationsprodukte: vollständige Säureanalyse der Produkte, insbesondere von *C. cellulovorans*, um die Nutzungspotenziale zu bewerten.
- Langzeittests: Untersuchung der Haltbarkeit und Stabilität der Mikroben im RDB - Prototypen
- Bioaugmentation: Erforschung der Möglichkeit, Mischkulturen einzusetzen, um steriles Arbeiten zu vermeiden und die Effizienz zu steigern
- Isolation von Cellulose aus Bioabfällen

Zur besseren Übersicht sind nachfolgend nochmals die Ergebnisse aus dem Zwischenbericht zusammengefasst (Tab. 1).

Tab. 1: Ergebnisse aus dem Zwischenbericht.

Arbeitspakete	Ergebnis
1.1 Entwicklung mikrobieller Co-Kulturen	Zwei Gruppen von Bakterien wurden erfolgreich identifiziert. Für die erste Gruppe (<i>Cellulomonas uda</i> und <i>Clostridium cellulovorans</i>) konnte erfolgreich gezeigt werden, dass diese in der Lage ist, Cellulose abzubauen und dabei ausreichend organische Säuren zu produzieren, die für das Wachstum der zweiten Gruppe von Bakterien erforderlich sind. Bei der zweiten Gruppe von Bakterien handelt es sich um Bakterien, die organische Säuren verwerten und Strom erzeugen, von denen zwei

Arbeitspakete	Ergebnis
	ausgewählt wurden (<i>Geobacter sulfurreducens</i> und <i>G. metallireducens</i>). Ein Co-Kultur-Experiment zeigt ein robustes Wachstum der beiden Bakteriengruppen unter Verwendung von Cellulose als einziger zusätzlicher Kohlenstoff- und Elektronenquelle.
1.2 Elektrochemische Experimente	Die Experimente zur Stromerzeugung konnten zeigen, dass die gemeinsame Kultivierung der beiden Bakteriengruppen unter Verwendung von Cellulose als Elektronendonator und einer Kohlenstoffquelle sowie einer Elektrode als Elektronenakzeptor eine höhere maximale Leistungsdichte ergibt, als wenn nur eine Gruppe (die stromerzeugenden Bakterien) gezüchtet wird.

Der Erfolg der RDB-Brennstoffzellen wird in hohem Maße davon abhängen, die beste Kombination aus zwei Gruppen von Bakterien zu finden: eine Gruppe ist in der Lage, Cellulose abzubauen und die organischen Säuren zu produzieren, die die zweite Gruppe zur Stromerzeugung benötigt. Da es in der kurzen Zeit dieses Projekts nicht möglich war, so viele Bakterien als auch die geplante Bioaugmentation, welche den Einsatz eines sterilen Arbeitens aufhebt, zu testen, wurde anhand der durchgeführten Literaturrecherche die Auswahl der darauf begrenzt, dass das Cellulose abbauende Bakterium in der Lage ist, Cellulose effizient abzubauen und dabei Produkte erzeugt, die elektroaktive Bakterien verstoffwechseln können. Die ausgewählten Bakteriengruppen sind in Tab. 2 und Tab. 3 aufgelistet.

Tab. 2: Die ausgewählten cellulolytischen Bakterien und ihre Produkte der Cellulosefermentation.

Nr.	Zellulolytische Bakterien	Elektronendonatoren	Produkte
1	<i>Cellulomonas uda</i>	Cellulose, Arabinose, Cellobiose, Fructose, Glucose und Xylose	Acetat, Laktat, Ethanol, CO ₂ und H ₂ .
2	<i>C. cellulovorans</i>	Cellulose, Xylan, Pektin, Cellobiose, Glucose, Maltose, Galactose, Saccharose, Lactose und Mannose	H ₂ , CO ₂ , Acetat, Butyrat, Formiat und Laktat

Tab. 3: Die ausgewählten elektrogenen Bakterien und ihre Elektronendonatoren.

Nr.	Elektroaktive Bakterien	Elektronendonatoren
1	<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Acetat, H ₂ , Formiat, Laktat
2	<i>G. metallireducens</i>	Acetat, Butanol, Butyrat, Ethanol

Ausstehende Säureanalyse der Einzelkulturen von *C. cellulovorans*

Im Zwischenbericht wurde festgestellt, dass *C. cellulovorans* erfolgreich auf Cellulose im PX+Y - Medium wächst. Dieses Wachstum qualifiziert den Organismus als einen potenziellen Partner für den Celluloseabbau in der Weiterentwicklung der RDB Fuel Cells. Um die Eignung weiter zu bewerten, wurde die noch ausstehende Analyse der bei der Celluloseverwertung entstehenden organischen Säuren durchgeführt. Ziel war es, die Hauptmetabolite zu identifizieren, die entweder selbst zur Stromproduktion genutzt werden können oder die elektrochemische Umgebung im Reaktor beeinflussen. Die Daten zeigen (Abb. 1), dass

C. cellulovorans bei der Fermentation von Cellulose im PX + Y-Medium eine signifikante Menge an Acetat und Butyrat produziert. Acetat stellt einen effizienten Elektronendonator für *Geobacter sulfurreducens* dar, wodurch dieser Metabolit besonders relevant für die Stromproduktion in der RDB Fuel Cell ist. Die Bildung von Butyrat deutet auf einen typischen fermentativen Stoffwechselweg von Clostridien hin. Butyrat kann, wenn auch weniger effizient, ebenfalls von bestimmten *Geobacter*-Spezies verwertet werden. Laktat und Formiat treten in geringeren Mengen auf, könnten aber die mikrobielle Gemeinschaft ergänzen und zur Diversität der Elektronendonore beitragen. Der geringe Anteil an Succinylsäure weist auf Nebenwege der Cellulosefermentation hin.

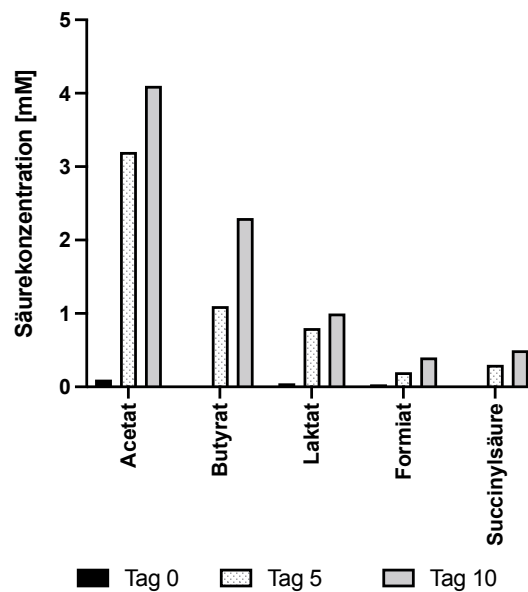


Abb. 1: Säureanalyse der Einzelkulturen von *C. cellulovorans*.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass *C. cellulovorans* nicht nur fähig ist, Cellulose in PX+Y-Medien zu fermentieren, sondern auch eine breite Palette verwertbarer organischer Säuren erzeugt. Die Bildung von Acetat und Butyrat macht ihn zu einem geeigneten Fermenter für die Kombination mit elektroaktiven Mikroorganismen in bioelektrischen Systemen.

Wie bereits im Zwischenbericht erläutert, wurde eine Nachfüllfunktion für die RDB vorgeschlagen, so dass die Cellulose in Form einer Kassette nachgefüllt werden könnte, was eine kontinuierliche Nutzung der RDB ermöglicht und Recyclingprobleme minimiert. Zwar wurde festgestellt, dass dies evtl. nicht mehr möglich ist. Um jedoch das Potenzial einer alternativen Substratform zu prüfen und die Frage der Nachfüllfunktion praxisnah zu untersuchen, wurde ein Vor-Experiment zur Kultivierung der *Geobacter*-Stämme über 14 Tage in einem cellulosebasierten Hydrogel durchgeführt. Dieses Hydrogel simuliert eine stationäre, strukturierte Cellulosequelle, wie sie in einer Kassette vorkommen könnte. Nach 4 Tagen zeigten beide *Geobacter*-Stämme ein langsames, aber stetiges Wachstum. Die OD_{600} stieg bei *G. sulfurreducens* auf 0,23 und bei *G. metallireducens* auf 0,19. Visuell war eine erste Biofilmbildung auf der Hydrogeloberfläche erkennbar. Der Acetatspiegel blieb über die gesamte Dauer konstant oder nahm sogar leicht zu (von 0,8 mM auf 1,1 mM). Das cellulosehaltige Hydrogel stellt eine stabile und langzeitverfügbare Elektronenquelle dar. Beide *Geobacter*-Stämme waren in der Lage, in diesem Substratumfeld zu überleben und metabolisch aktiv zu bleiben. Die gleichzeitige Beobachtung eines nicht sinkenden

Acetatspiegels spricht für eine unvollständige Umsetzung des cellulosehaltigen Hydrogels. Dieses legt nahe, dass eine kontinuierliche Cellulose-Nachfüllung unter diesen Bedingungen nicht zwingend erforderlich ist, solange das Hydrogel ausreichend Cellulose als Reservequelle enthält. In Bezug auf die Stromdichte wurden hier keine Analysen durchgeführt.

Fortführung des Experimentes zur Strom- / Energieerzeugung

Wie bereits dargestellt, wurde ein erster erfolgreicher Nachweis der Stromproduktion mit einer Co-Kultur bestehend aus *Cellulomonas uda* und *Geobacter sulfurreducens* erzielt. Die Versuche mit einem funktionalen MBZ-Reaktor zeigten eine maximale Stromdichte von $7,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Es konnten Acetat und Laktat als Hauptfermentationsprodukte nachgewiesen werden, was auf eine funktionierende Verbindung von Fermentation und Elektronenübertragung hinweist.

Um die langfristige Leistungsfähigkeit und Stabilität des Systems zu untersuchen, wurde ein weiterführender Versuch angesetzt. Ziel war es, die Energieausbeute, die Stabilität der Kultur sowie die Entwicklung der Säureproduktion unter Substratnachfütterung über einen Zeitraum von 30 Tagen zu beobachten. Die Co-Kultur wurde in einem zweikammerigen Reaktor kultiviert und über 30 Tage mit Cellulose (10 g/L) versorgt. Alle fünf Tage erfolgte eine Substratnachfüllung. Die Stromdichte wurde alle 4 Stunden gemessen, der pH-Wert beobachtet und die Konzentration organischer Säuren zum Tag 0 (Versuchsstart), Tag 10 und Tag 30 (Versuchsende) analysiert.

Der Stromdichteverlauf zeigt eine kontinuierliche Zunahme bis zum Tag 10 mit einem Maximum von $9,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Danach stabilisierte sich die Leistung auf einem konstanten Niveau um ca. $8,1\text{--}8,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Abb. 2). Dies deutet auf eine erfolgreiche Etablierung der Co-Kultur und eine gleichmäßige Elektronenübertragung hin.

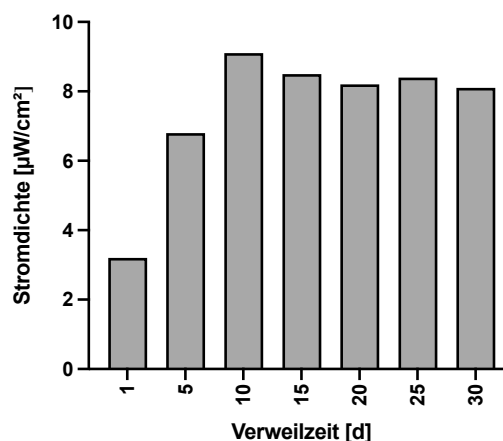


Abb. 2: Langzeitverlauf der Stromdichte.

Im Verlauf des 30-tägigen Experiments zur mikrobiellen Stromerzeugung mit der Co-Kultur *Cellulomonas uda* und *Geobacter sulfurreducens* wurde die Entwicklung zentraler Fermentationsprodukte regelmäßig analysiert (Abb. 3). Die Konzentrationen der organischen Säuren Acetat, Laktat, Succinylsäure und Formiat geben Aufschluss über die Stoffwechselaktivität der beteiligten Mikroorganismen und deren Beitrag zur Stromproduktion. Zu Beginn des Experiments (Tag 0) lag die Acetatkonzentration bei lediglich $0,2 \text{ mM}$, was auf geringe Restmengen im Medium zurückzuführen ist. Bis zum zehnten Tag stieg der Acetatwert

deutlich auf 4,5 mM an, was die intensive Fermentationsaktivität von *C. uda* beim Abbau von Cellulose widerspiegelt. Zwischen Tag 10 und Tag 30 sank die Acetatkonzentration leicht auf 3,8 mM, was darauf hindeutet, dass *Geobacter sulfurreducens* Acetat als Elektronendonator aktiv zur Stromproduktion nutzt.

Auch Laktat zeigte einen typischen Verlauf: Die Konzentration erhöhte sich bis Tag 10 auf 1,6 mM und nahm bis Tag 30 wieder leicht auf 1,2 mM ab. Dies spricht für eine gemischte Fermentation durch *C. uda*, während Laktat möglicherweise nur in begrenztem Umfang von *Geobacter* metabolisiert wurde. Die Konzentrationen von Succinylsäure und Formiat stiegen im gleichen Zeitraum moderat an (Tag 10: 0,9 mM bzw. 0,4 mM) und gingen anschließend ebenfalls leicht zurück (Tag 30: 0,7 mM bzw. 0,3 mM). Diese Substanzen spielen vermutlich eine ergänzende Rolle im System, entweder als Puffersubstanzen oder als zusätzliche, wenngleich weniger effiziente, Elektronendonoren.

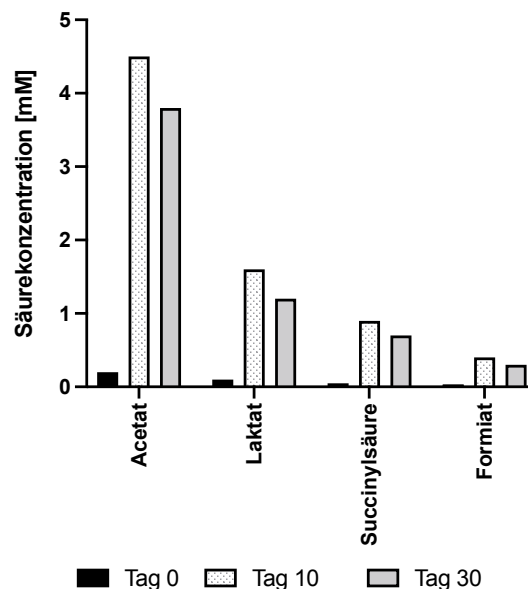


Abb. 3: Langzeitverlauf der Säurekonzentration.

Die insgesamt beobachtete Dynamik der Säureproduktion und -verwertung spiegelt einen typischen mikrobiellen Fermentationsverlauf wider, bei dem in einer ersten Phase vor allem Energie durch Substratabbau gewonnen wird, während in der zweiten Phase vermehrt Elektronendonoren für elektrochemische Prozesse genutzt werden. Besonders der Rückgang der Acetatkonzentration zwischen Tag 10 und 30 lässt sich mit der gleichzeitig beobachteten stabilen Stromproduktion von etwa 8,1 - 8,5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ korrelieren, was auf eine funktionierende Umwandlung organischer Substrate in elektrische Energie durch *Geobacter sulfurreducens* hindeutet.

Die Fortsetzung des Experimentes hat die im Zwischenbericht beobachteten Ergebnisse bestätigt und erweitert. Die Kombination aus Substratnachfütterung, säureproduzierender Fermentation und Elektronenübertragung an der Anode ist robust und vielversprechend für den Einsatz in autarken Bioenergie-Systemen. Insgesamt zeigt das System eine stabile Kopplung von Fermentation und bioelektrischer Nutzung der Stoffwechselprodukte. Dies unterstreicht das Potenzial der Co-Kultur für den Einsatz in bioelektrischen Systemen,

insbesondere dort, wo eine kontinuierliche und umweltfreundliche Stromproduktion aus organischen Reststoffen gefordert ist.

Testung der Möglichkeit einer Bioaugmentation

Mit Blick auf die nächste Entwicklungsstufe der RDB Fuel Cells wurde in AP1 angestrebt, die Prozessführung zu vereinfachen und zu robusteren Kulturbedingungen überzugehen. Es wurde die Möglichkeit geprüft, *Cellulomonas uda* und *Geobacter sulfurreducens* in einem System zu etablieren, das nicht unter sterilen Bedingungen betrieben werden muss. Ziel war es, ein robustes, praxisnahes Milieu zu schaffen, das dennoch eine stabile Stromproduktion ermöglicht. Hierzu wurde getestet, ob eine Bioaugmentation mit kommunalem Klärschlamm als Inokulum ein geeignetes Mikrobiom liefern kann, das das System gegenüber Kontaminationen toleranter macht, ohne die elektroaktive Leistung wesentlich zu beeinträchtigen. Aufgrund der natürlichen Trübung und Komplexität des Mediums konnte die mikrobielle Aktivität nicht über optische Dichte (OD) erfasst werden. Stattdessen wurde die elektrochemische Leistung (Stromdichte) als primärer Indikator für die Etablierung der Kultur verwendet.

In der sterilen Kontrollkultur wurde eine maximale Stromdichte von $8,7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ erreicht. Die bioaugmentierte Variante mit Klärschlamm und regelmäßiger Reinkulturzugabe entwickelte eine vergleichbare Stromdichte von $8,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, wobei der Aufbau langsamer erfolgte (Peak ab Tag 7). Die Stromkurve zeigte nach jeder Inokulation einen deutlichen Anstieg (ca. $+1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ innerhalb von 24 Stunden), was die erfolgreiche Etablierung und Aktivität der elektroaktiven Organismen belegt. Die Kontrollprobe (Klärschlamm ohne Reinkultur) erzeugte keine messbare Stromproduktion ($<0,3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), was bestätigte, dass keine elektroaktiven Spezies im Originalsubstrat dominieren. Der pH-Wert blieb in der bioaugmentierten Variante stabil zwischen 6,7 und 6,9.

Ein zentrales Problem bestand darin, dass die elektroaktive Kultur nicht dauerhaft im komplexen Mikrobiom des Schlamms bestehen blieb. Ohne regelmäßige Nachinokulation nahm die Stromproduktion ab. Erst durch die wiederholte Zugabe der Reinkultur konnte eine kontinuierliche elektrochemische Leistung aufrechterhalten werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bioaugmentation mit kommunalem Klärschlamm grundsätzlich praktikabel ist. Es erfordert jedoch eine aktive Reinkulturführung, um elektroaktive Organismen langfristig im System zu erhalten. Die Stromdichte erwies sich als geeigneter indirekter Marker für die Etablierung elektroaktiver Biofilme. Für weiterführende Untersuchungen ist zu empfehlen, die Zusammensetzung des Schlamminokulums gezielter zu modulieren (z. B. Vorbehandlung, selektive Vorinkubation), um eine nachhaltige mikrobielle Funktion ohne regelmäßige Nachimpfung zu ermöglichen.

Isolation von Cellulose aus Bioabfällen

Ebenso ist für den Gebrauch der RDB-Brennstoffzelle von Bedeutung, dass für den Einsatz nicht reine Cellulose verwendet wird, sondern z.B. Cellulose, gewonnen aus Bioabfällen. Grasschnitt, der in großen Mengen als kommunaler Bioabfall anfällt, stellt eine wertvolle und bislang wenig genutzte Ressource für die Cellulosegewinnung dar. Die Nutzung solcher Bioabfälle unterstützt die Prinzipien der Nachhaltigkeit und der Kreislaufwirtschaft, da ein regelmäßig anfallendes Abfallprodukt in einen hochwertigen Rohstoff umgewandelt werden kann. Die Gewinnung aus Grasschnitt kann kostengünstiger sein als aus traditionellen Quellen wie Holz oder Baumwolle. Zudem kann die Nutzung von Grasschnitt zur Cellulosegewinnung

als Lösung für das stetig wachsende Abfallproblem in Städten dienen, in denen Grünabfälle oft nur unzureichend verwertet werden. Insgesamt bietet die Cellulosegewinnung aus Grasschnitt eine ökologisch wie ökonomisch sinnvolle Perspektive, um Bioabfälle effizient zu nutzen und gleichzeitig den Bedarf an nachhaltigen Materialien zu decken.

Um zu überprüfen, ob Bioabfälle (speziell Grasschnitt) zur Gewinnung von Cellulose geeignet sind, wurden erste Versuche durchgeführt. Für die Extraktion von Cellulosefasern wurde nachfolgenden Protokoll gearbeitet.

Schritt 1: Vorbehandlung

25 g Grasschnitt werden in 500 mL destilliertem Wasser eine Stunde lang gekocht. Danach wurde die Probe filtriert, mit einem Mixer zerkleinert und erneut in 500 mL destilliertem Wasser eine weitere Stunde gekocht. Anschließend erneut filtrieren und mehrfach mit destilliertem Wasser spülen. Die vorbehandelte Probe wird im Ofen bei 80 °C für 90 min vollständig getrocknet.

Schritt 2: Alkalibehandlung

Die vorbehandelte Probe wurde mit 4 Gew.-% NaOH unter für 90 min gekocht. Danach filtrieren und mit destilliertem Wasser gewaschen. Die alkali-behandelte Probe wurde anschließend im Ofen bei 80 °C für 90 min vollständig getrocknet.

Schritt 3: Bleichbehandlung

Im Anschluss an die Trocknung wurde die Probe mit 5 % H₂O₂ (v/v), 1,3 % NaOH (m/v) und 0,7 % NaClO₂ (w/v) bei 80 °C für 90 min gebleicht. Bis zur Erreichung eines neutralen pH-Wertes wurde die gebleichte Probe filtriert und gewaschen. Danach schloss sich eine nochmalige Bleichbehandlung für weitere 60 min an. Danach erneut filtrieren, waschen und bei 80 °C für 90 min trocknen.

Schritt 4: Isolation von Cellulose-Nanokristallen

5 g der gebleichten Probe wurden in 10 mL destilliertem Wasser suspendiert und mit 64 %iger Schwefelsäure im Verhältnis 3:8 (w/v) unter kräftigem Rühren für 60 min bei 45 °C behandelt. Danach mit destilliertem Wasser (10-faches Volumen) verdünnt und zentrifugiert (5300 U/min, 10 min) und mit destilliertem Wasser dialysiert bis ein konstanter pH-Wert erreicht ist.

In der folgenden Darstellung ist die Ausbeute von Cellulosemasse bei der Extraktion aus kommunalem Grasschnitt dargestellt (Abb. 4). Die Extraktion erfolgt in mehreren chemischen und thermischen Schritten, wobei unerwünschte Bestandteile wie Lignin, HemiCellulose und andere organische Substanzen entfernt werden.

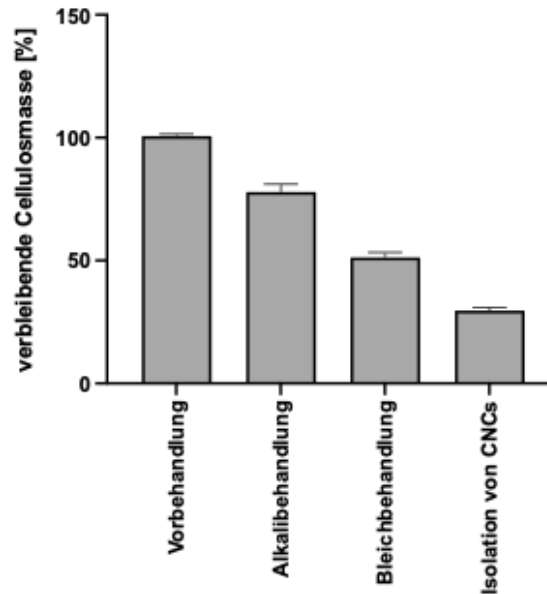


Abb. 4: Ausbeuteverringerng (%) der Cellulosemasse bei jedem Extraktionsschritt.

Es gelang, aus Grasschnitt Cellulose zu extrahieren. Jedoch war diese Extraktion mit einem hohen Materialverlust verbunden (Abb. 1). Mit der Optimierung wurde begonnen, jedoch können die daraus resultierenden Daten hier nicht dargestellt werden. Die im Rahmen dieser Optimierungsversuche erhobenen Daten wurden uns leider nicht herausgegeben und stehen nicht für den Abschlussbericht zur Verfügung.

AP 2: Suche nach Partnern für die Durchführbarkeitsphase

Ziel dieses Arbeitspakets war es, geeignete Partner zu finden, die bei der Durchführung der verschiedenen Aufgaben helfen, um am Ende der Machbarkeitsphase einen Prototyp des RDB zu erhalten. Nach einer sorgfältigen Suche und mehreren Treffen wurden die folgenden Institutionen und Personen ausgewählt, die sich auch bereit erklärt haben, in der Durchführbarkeitsphase dieses Projekts mitzuwirken:

Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung Rudolstadt e.V. (TITK)
Breitscheidstraße 97 07407 Rudolstadt

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Angewandte Elektrochemie.
Institut für Technische Chemie und Umweltchemie/Zentrum für Energie- und Umweltchemie
Jena (CEEC Jena), Philosophenweg 7a 07743 Jena.

ABATEC Mikrosysteme GmbH
MAX-HELLERMANN-STRASSE 8 07629 HERMSDORF

Move technology GmbH.
Technologie-Campus 1, 09126 Chemnitz

AP 3: Durchführung einer ersten Marktstudie mit einer Online-Recherche und einer Umfrage

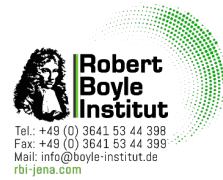
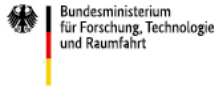
Ziel der Marktanalyse war es, einen potenziellen Kundenstamm und die Endanwendung der RDB-Technologie zu definieren. Die Ergebnisse sollten die Grundlage für die Ausgründung eines Start-ups bilden, das die RDB produziert. Ursprünglich war die RDB-Technologie für mobile Stromversorgung gedacht, bietet jedoch weitaus mehr Potential. Die RDB-Technologie kann im Zuge einer nachhaltigen und kosteneffizienten Alternative für autarke Energieerzeugung z.B. in drahtlosen Sensorsystemen verwendet werden. Darauf basierend wurde die Marktanalyse erweitert und die noch offenen Punkte betrachtet. Im folgenden sind die ausstehenden Arbeiten seit dem Zwischenbericht dargestellt.

1. Marktanalyse für spezifische Anwendungen: Erweiterung der Marktanalyse auf neue Segmente wie autonome Sensorik in der Landwirtschaft oder Überwachungssysteme für erneuerbare Energien

Zielmarkt	Ergebnis
Drahtlose Sensorsysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Marktgröße Deutschland (2024): 1,09 Milliarden USD • Prognose bis 2030: CAGR von 13,74 %, erwartete Marktgröße 2,36 Milliarden USD • Globaler Marktwert: 17,79 Milliarden USD (2024), 39,12 Milliarden USD (2030) • Kostenpotenzial der RDB: <ul style="list-style-type: none"> – Batterieersparnis: Austauschkosten pro Batterie 80 EUR. – Beispielrechnung: 50.000 batteriebetriebene Sensoren, Austausch alle 2 Jahre. Einsparung über 10 Jahre: 50.000 × 5 Austauschzyklen × 80 EUR = 20 Mio. EUR – Umweltpotenzial: Einsparung von 250.000 Batterien (bei 50.000 Sensoren über 10 Jahre)
Mobile Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Marktpotenzial: Wachsende Nachfrage in tragbaren Geräten und Robotik. • Marktgröße tragbarer Sensoren: <ul style="list-style-type: none"> – Prognostizierte CAGR: 15,3 % (2024–2030) – Marktwert 2024: 6,8 Milliarden USD; 2030: 15,8 Milliarden USD • Einsparungen durch RDB: <ul style="list-style-type: none"> – Keine regelmäßigen Batteriewechsel nötig, erhöhte Geräteautonomie – Beispiel: Ein tragbares Gerät mit RDB reduziert die Wartungskosten um 50 %
Land- und Abfallwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Biomüll in Deutschland: 14,4 Millionen Tonnen pro Jahr (2022) • Potenzial der Nebenprodukte: <ul style="list-style-type: none"> – Aktivkohle: Marktgröße 2023: 5,26 Milliarden USD, CAGR: 9,4% (bis 2030) – Polymilchsäure (PLA): Marktgröße 2023: 713 Millionen USD, CAGR: 12,4 % (bis 2030) • Anwendung: Nutzung von Agrarabfällen zur Herstellung von

Zielmarkt	Ergebnis
	<p>Cellulose, Aktivkohle und PLA</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwendung der Cellulose als Substrat für die RDB-Technologie
autonome Sensorik in der Landwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Globaler Marktwert (2024): 6,2 Milliarden USD • Prognose bis 2030: CAGR von 12,3 %, erwarteter Marktwert 12,6 Milliarden USD • Markttreiber: <ul style="list-style-type: none"> – Bedarf an Präzisionslandwirtschaft – Reduktion von Wasser- und Düngemittelverbrauch durch präzise Überwachung – Steigende Nachfrage nach energieautarken Lösungen in abgelegenen Gebieten • Potenzielle Anwendungen der RDB-Technologie <ol style="list-style-type: none"> 1. Bodenfeuchtigkeits- und Temperatursensoren: <ul style="list-style-type: none"> – Energieautarke Sensorik zur kontinuierlichen Überwachung. – Vorteil: Batterielose Betriebsmöglichkeiten reduzieren Wartungskosten um bis zu 50 % 2. Ertragsüberwachung: <ul style="list-style-type: none"> – Echtzeit-Überwachung der Pflanzenentwicklung und Erntezeitpunkte – Integration in autonome Systeme (z. B. Drohnen) 3. Tierüberwachung: <ul style="list-style-type: none"> – Einsatz in Wearables für Nutztiere, um Gesundheitszustände zu tracken
Sicherheits- und Verteidigungsindustrie	<ul style="list-style-type: none"> • Marktgröße für drahtlose Überwachungssysteme: 8,9 Milliarden USD (2024), CAGR: 7,8 %
Maritime Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Energieautarke Systeme für Offshore-Windparks (Weltmarkt für Offshore-Windenergie: 30,5 Milliarden USD, CAGR: 9,8 %)
Überwachungssysteme für erneuerbare Energien	<ul style="list-style-type: none"> • Marktgröße für Überwachungssysteme (2024): 2,7 Milliarden USD • Prognose bis 2030: CAGR von 10,8 %, erwarteter Marktwert 5,7 Milliarden USD • Markttreiber: <ul style="list-style-type: none"> – Bedarf an robusten, energieautarken Überwachungssystemen für Offshore-Windparks und Solarparks. – Steigende Investitionen in erneuerbare Energien (geschätzte 500 Milliarden USD weltweit im Jahr 2025) • Potenzielle Anwendungen der RDB-Technologie <ol style="list-style-type: none"> 1. Offshore-Windparks: <ul style="list-style-type: none"> – Autonome Sensoren zur Überwachung von Turbinen, Vibrationen und Korrosion. – Vorteil: Wartungsfreie Sensoren reduzieren hohe Wartungskosten auf See. 2. Solarparks: <ul style="list-style-type: none"> – Einsatz in Sensornetzwerken zur Überwachung von Energieausbeute, Modulen und Umrichtern.

Gefördert durch:



Zielmarkt	Ergebnis
	<ul style="list-style-type: none">- Beispiel: Energieautarke Sensoren zur Überwachung der Temperatur und Leistung einzelner Solarmodule. <p>3. Speichertechnologien:</p> <ul style="list-style-type: none">- Integration in Batteriesysteme zur Überwachung des Ladezustands und zur Früherkennung von Fehlern.

2. Konkurrenzanalyse: Vergleich der RDB mit bestehenden Lösungen, insbesondere hinsichtlich ihrer Funktionalität, Nachhaltigkeit und Kosten

Kriterium	RDB-Technologie	Batteriebasierte Lösungen	Kabelgebundene Systeme	Konkurrenztechnologien (z.B. Solarsensoren)
Funktionalität	<ul style="list-style-type: none"> • Autarke Stromversorgung • Einsatz in abgelegenen Orten möglich • Keine Abhängigkeit von Licht- oder Kabelverbindung • Geeignet für vielfältige Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzte Lebensdauer der Batterien (z. B. 2 - 3 Jahre) • Wartung notwendig • unzugänglichen Standorte: Austausch schwierig 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Energieeffizienz durch direkte Verbindung • Eingeschränkte Mobilität • Installationsaufwand groß 	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von Sonnenlicht. • wetterabhängig • Einsatz in Innenräumen schwierig
Nachhaltigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung biologischer Materialien • Geringer CO₂-Fußabdruck • Kein Lithium oder Kobalt • Abfälle recyclingfähig • Kein Batteriemüll 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher CO₂-Ausstoß bei der Batterieproduktion • Verwendung von Lithium und Kobalt mit hohen Umwelt- und Sozialkosten • Hohe Müllbelastung durch Altbatterien 	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenschonend während der Nutzung • Eingeschränkte Flexibilität in der Installation 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung erneuerbarer Energiequellen (Licht). • Rohstoffverbrauch für Solarpanels hoch (Silizium) • Recyclingaufwand
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Betriebskosten • Reduktion langfristiger Kosten durch Einsatz nachhaltiger • Anschaffungskosten abhängig von Skalierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Anschaffungskosten • Hohe Wartungskosten durch Batteriewechsel • Lebenszykluskosten steigen mit der Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Installationskosten • Keine laufenden Kosten nach Installation 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelmäßige Anschaffungskosten • Wartungsarm, aber abhängig von Sonneneinstrahlung
Wettbewerbsvorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Batterieabhängigkeit • Geringer Wartungsaufwand. • Nachhaltige Ressourcennutzung • Flexibler Einsatz in Innen- und Außenbereichen • Möglichkeit zur Integration in Kreislaufwirtschaft 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit und einfache Nutzung • Breite Akzeptanz • Hohe Energieverfügbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Langfristig geringe Betriebskosten • Verlässlichkeit in stationären Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltfreundlich unter bestimmten Bedingungen • Geringe Betriebskosten in sonnenreichen Regionen

3. Kundengespräche: Durchführung von Workshops und Umfragen, um spezifische Anforderungen der Zielgruppen besser zu verstehen

identifizierte Anforderungen	Ergebnis
Technische Anforderungen	Autonomie: RDB-Systeme müssen 10 Jahre wartungsfrei betrieben werden können. Flexibilität: Betrieb mit Cellulose, Abfallstoffen und anderen Substraten. Robustheit: Funktion in verschiedenen Temperaturbereichen
Wirtschaftl. Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Amortisationszeit: 5 Jahre • Wettbewerbsvorteil: Halbierung der Betriebskosten bei drahtlosen Sensoren • Energieeffizienz: Stromerzeugungskapazität von bis zu 10 W pro m² Reaktorfläche
Nachhaltigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffe: Verwendung von Abfällen als Substrat reduziert Umweltbelastung • Energieverbrauch: 15 % geringere Energiekosten bei der Produktion im Vergleich zu konventionellen Brennstoffzellen

Basierend auf der durchgeführten Analyse konnte gezeigt werden, dass die RDB sich in Nischenmärkten mit hohem Bedarf an Nachhaltigkeit und geringer Wartung etablieren kann. Durch die RDB-Technologie können Einsparungen von 10 % im Bereich der Produktionskosten im Vergleich zu herkömmlichen mikrobiellen Brennstoffzellen (MBZ) und von 50 % im Bereich der Wartungskosten im Vergleich zu batteriebasierten Systemen aufgezeigt werden. Ebenso zeigt die detaillierte Analyse, dass die RDB-Technologie ein erhebliches Marktpotential besitzt, insbesondere in Märkten mit hohen Anforderungen und niedrigen Wartungskosten. Die Erweiterung auf neue Segmente wie autonome Sensorik in der Landwirtschaft und Überwachungssysteme für erneuerbare Energien bietet erhebliche Wachstumschancen für die RDB-Technologie. Mit einem kombinierten Marktpotenzial von über 20 Milliarden USD bis 2030 und klaren Kostenvorteilen hat die RDB-Technologie das Potenzial, in diesen Segmenten eine Schlüsselrolle zu spielen.

Letztlich bietet die Kombination aus Kosteneffizienz, Ressourcenschonung und technologischer Flexibilität einen klaren Wettbewerbsvorteil. Gleichzeitig zeigt die durchgeführte SWOT-Analyse, dass die RDB-Technologie ein erhebliches Potenzial besitzt, sich in wachsenden Märkten wie der autonomen Sensorik und den Überwachungssystemen für erneuerbare Energien zu etablieren, indem sie Nachhaltigkeit, Energieautarkie und Kosteneffizienz mit innovativen Lösungsansätzen verbindet, während sie gleichzeitig Entwicklungs- und Marktzugangsrisiken berücksichtigt.

SWOT-Analyse:

Stärken	Schwächen
Nachhaltigkeit und Kostenreduktion	Hoher Forschungs- und Entwicklungsaufwand
Substratunabhängigkeit	Abhängigkeit von Partnernetzwerken
geringer Wartungsaufwand	Technologie nicht vollständig entwickelt
Autarkie, Vielseitigkeit und Flexibilität	

Chancen	Risiken
Wachstum des Sensorikmarktes	Wettbewerb durch Batterie-Innovationen
Verwertung von Agrarabfällen	Wettbewerb durch etablierte Technologien
Erweiterte Anwendungen	Markteintrittsbarrieren
Hoher Bedarf in erneuerbaren Energien	Zertifizierungsanforderungen

AP 4: Durchführung einer ersten Patentrecherche

Ziel dieses Arbeitspakets war es, bereits registrierte Patente zu finden, die in den Bereich der RDB fallen, um sicherzustellen, dass keine Interessenkonflikte zu möglichen rechtlichen Problemen in der Zukunft führen. Ein weiteres Ziel dieses Arbeitspakets war es, Bereiche zu definieren, in denen neue Patente für die RDB angemeldet werden können.

Auf der Grundlage der bisher durchgeführten Patentrecherche könnten die Neuheiten der RDB die folgenden separaten oder kombinierten Merkmale umfassen:

- kompakte/unabhängige Beschaffenheit
- ein gefaltetes Anodensystem, das mit einer Superkapazitätsfunktion gekoppelt ist
- die Fähigkeit, Cellulose allein und zusätzlich als Hydrogel für die Herstellung von organischen Säuren zu verwenden, die für die Stromerzeugung benötigt werden
- die Fähigkeit, ohne pH-Einstellung auszukommen
- die Verwendung von Cellulose und Elektroden aus Abfall oder nachhaltigen Materialien
- die Fähigkeit, mit einer Nachfüllfunktion unter Verwendung einer Cellulose-Hydrogel-Kassette mit wenig oder keiner weiteren Zugabe von Substrat zu arbeiten (siehe AP1).

Tab. 4: Ausgewählte Patente mit gewissen Ähnlichkeiten zur RDB.

	Patent	Jahr	Bemerkungen
1	Electrochemical biological electrode and biological 3D printing method and application thereof	2023	In dieser neueren Arbeit wurde zwar der 3D-Druck zum Drucken von Bakteriananoden eingesetzt, aber Cellulose wurde nur als Bestandteil des 3D-Drucks und nicht als Substrat verwendet. Die RDB verwendet Cellulose als Substrat für die Mikroben und beschränkt sich nicht nur auf die Verwendung des 3D-Drucks für die Elektroden, sondern beabsichtigt auch, die Elektrodenentwicklung mit anderen Mitteln fortzusetzen. Außerdem wird auch nicht beabsichtigt, einen Mediator zu verwenden.
2	Method for generating electricity by directly utilizing lignocellulose and application	2022	Während sich dieses Patent auf die Vorbehandlung von LignoCellulose zur Energiegewinnung konzentriert, konzentriert sich die RDB auf die Gewinnung von Cellulose zur Energiegewinnung in MBZs. Während dieses Patent Thermocellum verwendet, soll für die RDB mesophile Mikroben eingesetzt werden, die einen

	Patent	Jahr	Bemerkungen
			Betrieb bei Raumtemperatur ermöglichen. Darüber hinaus sind viele Komponenten der RDB, wie z.B. die Reaktorkonstruktion, der 3D-Druck und die Nachfüllfunktion, nicht in diesem Patent enthalten.
3	Novel electromicrobial <i>Shewanella marisflavi</i> strain capable of using various carbon sources and method of using same	2022	Obwohl günstige Substrate wie z.B. Gerste verwendet werden, lag der Schwerpunkt hier auf <i>Shewanella</i> , was sich völlig von dem jetzigen Schwerpunkt auf <i>Geobacter</i> sp. unterscheidet.
4	Garden waste anaerobic fermentation coupling microbial fuel cell power generation lighting device	2021	Dieser Versuch ist der großtechnischen Anwendung der RDB insofern ähnlich, weil die Cellulose-Rohsubstrate in einer separaten Kammer von Mikroben verarbeitet werden können, die nur die benötigten organischen Säuren an die Brennstoffzellenkammer liefern. Es wird jedoch beabsichtigt, die großtechnische Anwendung durch eine Reihe von kleinen RDBs zu realisieren, was bereits von der hier genannten Arbeit abweicht. Darüber hinaus unterscheidet sich die RDB durch ihre Konfiguration sowohl in der Mikrobiologie als auch in der Elektrochemie von der? hier genannten Arbeiten.
5	Air cathode of cellulose-based single chamber microbial fuel cell and preparation method thereof	2017	Der Schwerpunkt dieses Patents liegt auf Luftkathoden, die mit natürlicher Nano-Cellulose hergestellt werden. Darüber hinaus wurde in dieser Arbeit ein Platinkatalysator verwendet, während hier umweltfreundliche und kostengünstige Katalysatoren mit speziellen Anoden- und Kathodenkonfigurationen verwenden werden sollen.
6	Self-supplied electrolyte microbial fuel cell hydrogel	2017	In diesem Patent geht es darum, einen Organismus sowohl für den Celluloseabbau als auch für die Stromerzeugung einzusetzen.
7	Microbial battery and fuel cell comprising <i>Geobacter sulfurreducens</i> und <i>clostridium pasteurianum</i>	2018	Hier wird mit dem Mikroorganismus <i>C. pasteurianum</i> gearbeitet. Außerdem wurde in der hier genannten Arbeit keine Cellulose erwähnt.
8	Microbial electrochemical cells and methods for producing electricity and bioproducts therein	2015	Die hier beschriebene Arbeit untersuchte die Verwendung verschiedener Organismen für die Stromerzeugung in einer MBZ, die durch einen Potentiostat gesteuert

	Patent	Jahr	Bemerkungen
			wird, was bei der RDB nicht der Fall ist. Außerdem ist die Konfiguration des Reaktors völlig anders als bei der RDB.
9	Nano cellulose film used as fuel cell and electrolyte film		Hier wurde Nano-Cellulose Film als Elektrolyt verwendet, wobei die RDB mit hydro-, halbfesten oder festen Elektrolyte betrieben werden soll. Die Cellulose selbst wird nicht dieses Elektrolyt sein, da ein funktionelles Medium für die Co-Kultur bereits etabliert wurde (siehe AP1). Darüber hinaus hat die RDB eine völlig andere Konfiguration und ein anderes Ziel als dieses Patent.
10	Method and apparatus for electricity production by stalk cellulose microbial degradation	2009	Diese Arbeit hat einige gleiche Komponenten wie die RDB für die großtechnische Anwendung. Sie verwendet Cellulose aus Stroh, unterscheidet sich aber in vielen Aspekten, wie z.B. der Verwendung von undefinierten Mischkulturen, einer anderen Konfiguration in der Materialwissenschaft und der angestrebten Betriebsweise
11	Method for generating electricity by directly utilizing lignocellulose and application	2022	Abgesehen von den vielen Unterschieden zwischen diesem Patent und dem angestrebten RDB-Patent, wird in dieser Arbeit <i>V. thermocellum</i> verwendet.
12	Experiment system employing microbial fuel cell (MBZ) to process waste rice hull	2018	Das Interesse gilt hier den Reisabfällen. Außerdem wurde ein Ansatz mit einer Silbersulfatlösung verfolgt, was nicht vorgesehen ist.
13	Method for preparing proton exchange fuel cell membrane electrode adopting bacteria cellulose	2008	Die Entwicklung von PEM mit bakterieller Cellulose wird nicht in der RDB eingesetzt.
14	Electronic device, microbial fuel cell, electronic equipment, and biosensor	2015	Das Patent beschreibt zwar die Verwendung von zwei Organismen, aber es geht um den Abbau organischer Stoffe und um Elektrizität. Außerdem zeigen Patentdiagramme die Verwendung von <i>E. coli</i> und Ferricyanid, die RDB nicht zu verfolgen beabsichtigt
15	Method for extracting cellulose from agricultural straw wastes	2019	Die einzige Ähnlichkeit besteht darin, dass die hier genannte Methode zur Celluloseextraktion derjenigen gleicht, die bisher hier verwendet wurde. Diese Methode ist jedoch seit vielen Jahren als Standard etabliert.
16	Charge-storing fuel cell	2013	Dieses Patent ähnelt der RDB nur in der Stromspeicherung mittels EDLC,

	Patent	Jahr	Bemerkungen
			unterscheidet sich aber in vielen anderen Aspekten, z.B. mikrobielle Anode, definiertes Substrat (Cellulose) und der Reaktorkonfigurationen.

Im Zuge des Projektes wurden noch folgende zusätzliche Arbeitsschritte identifiziert:

- Vertiefung der Recherche in angrenzenden Technologiebereichen (z. B. Superkondensatoren, Hybrid-Systeme, Sensorsysteme)
- Definition und Beschreibung technischer Merkmale, die als patentierbar gelten könnten (Moduldesign, Materialkombinationen, Zellarchitektur)
- Vorbereitung erster Schutzrechtsanmeldungen und Aufbau eines Schutzrechtskatasters mit Priorisierung von Erfindungen
- Systematische Auswertung internationaler Patentdatenbanken (EPO, USPTO, WIPO)
- Zusammenarbeit mit Patentanwälten zur Bewertung der Schutzfähigkeit einzelner Module
- Verwertungsschritte vorbereiten (u. a. PCT-Anmeldung, Partnerrechte, Lizenzstrategie)