

Labor für Wasser und Umwelt der Technischen Hochschule Köln

Labor für Regelungstechnik, SPS und Prozessleittechnik der Technischen Hochschule Köln

SedimentWorks GmbH

# Entwicklung einer innovativen autonomen Anlage zum nachhaltigen Sedimentmanagement an Stauanlagen mit integrierter Minderung von Treibhausgasemissionen - MinGAS

**Abschlussbericht des Gesamtvorhabens**

**Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt – AZ: 37831/02-23**

Prof. Dr.-Ing. Christian Jokiel (Technische Hochschule Köln)

Corina Lied, M.Sc. (Technische Hochschule Köln)

Prof. Dr.-Ing. Norbert Große (Technische Hochschule Köln)

Andreas Berenz, B.Sc. (Technische Hochschule Köln)

Dr.-Ing. Michael Detering (SedimentWorks GmbH)

Julia Außem, M.Sc. (SedimentWorks GmbH)

Jessy-Aileen Schubert, M.Sc. (SedimentWorks GmbH)

Köln, Juni 2024

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



# Inhalt

<b>Inhalt</b>	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>8</b>
2.1 Ausgangssituation	8
2.2 Zielsetzung	9
2.3 Arbeitspakete und Zeitplan	9
<b>3 Arbeiten im Projekt</b>	<b>11</b>
3.1 Untersuchungsraum	11
3.2 AP1: Automatisierung der Anlage	13
3.3 AP2: Automatisierte Gasspeicherung	15
3.4 AP3: Energiemanagement	18
3.5 AP4: Energieautarkie	22
3.5.1 4a: Nutzung eigener Energiequellen	22
3.5.2 4b: Energiespeicherung	29
3.6 AP5: Grundkonzept Modularisierung	30
3.6.1 Vorgehen der Modularisierung	30
3.6.2 Motivation für die Modularisierung	31
3.7 AP6: Praxistest der Anlage	35
3.7.1 Praxistest	35
3.7.2 Umbaumaßnahmen	35
3.7.3 Messungen	38
3.8 AP7: Synthese/Veröffentlichung	42
3.8.1 Präsentationen	42
3.8.2 Sonstiges	42
<b>4 Fazit und Ausblick</b>	<b>43</b>
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>45</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Digitales Orthophoto der Wupper-Vorsperre in Hückeswagen, Deutschland (Esri Deutschland GmbH, 2022). .....	12
Abbildung 2: Platzierung Solarmodule.....	23
Abbildung 3: Neigungswinkel und Ausrichtung (Fonseca, 2024).....	24
Abbildung 4: Skizze Ausrichtung der Plattform Richtung Süden (nicht maßstabsgetreu) ....	25
Abbildung 5: Solardaten Dezember.....	26
Abbildung 6: Solardaten Januar.....	26
Abbildung 7: Solardaten Februar.....	27
Abbildung 8: Solardaten März.....	27
Abbildung 9: Module Gasverwertung, Gasmessung, Gas-Sediment-Aufnahme .....	32
Abbildung 10: Module Gasmessung, Gasabscheiden.....	33
Abbildung 11: Module Positionierung, Gas-Sediment-Aufnahme .....	34
Abbildung 12: Uferstation.....	36
Abbildung 13: Plattform auf dem Wasser mit Solarmodulen.....	37
Abbildung 14: Das Innere des Gasabscheiders vor und nach der Umstellung des Rohres.	38
Abbildung 15: Gaszusammensetzung Praxistest 2023 .....	39

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung der Inhalte, Dauer und Federführung der sieben geplanten Arbeitspakete (AP1-AP7). .....	10
Tabelle 2: Zeitplan des Projekts. Grün markierte Felder zeigen die Arbeiten, die im Projekt durchgeführt wurden. Hellgrün markierte Felder zeigen Vorbereitungen. Rote Striche sind die Meilensteine .....	11
Tabelle 3: Meilensteine des Projektes .....	11
Tabelle 4: Vergleich Positionserfassung .....	15
Tabelle 5: Gasbag Testung .....	17
Tabelle 6: Leistungsverbrauch Zustände .....	21
Tabelle 7: Berechnung Energieverbrauch der Anlage bei 24 h Betrieb .....	28
Tabelle 8: Ergebnisse Praxistest 2023 .....	39
Tabelle 9: Ermittelte Gas- und Methanmenge .....	40
Tabelle 10: Vergleich Praxistests .....	41

# Abkürzungsverzeichnis

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
bar (a)	Absolutdruck
bar (g)	Relativdruck
C	Kohlenstoff
CCF	Cash Conversion Cycle
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DGM	Digitales Geländemodell
DO	Dissolved Oxygen (Gelöster Sauerstoff)
FEAs	Functional Equipment Assembly, modulare Funktionseinheit
GHG	Greenhouse Gas (Treibhausgas)
GNSS	Globale Navigationssatellitensysteme
GPS	Global Positioning System
IHA	International Hydropower Association
H	Wasserstoff
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
kWh	Kilowattstunde
LWU	Labor für Wasser und Umwelt
ls	Liter Standard, Standardbedingungen, 20 °C und 1013,25 mbar (a)
ln	Liter Norm, Normbedingungen von 0°C und 1013,25 mbar (a)
MFM	Mass flow meter (Massendurchflussmesser)
N	Stickstoff
PLT	Labor für Regelungstechnik, SPS und Prozessleittechnik
POL	Process Orchestration Layer, Prozessführungsebene
RTK	Real Time Kinematik

# 1 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „Entwicklung einer innovativen autonomen Anlage zum nachhaltigen Sedimentmanagement an Stauanlagen mit integrierter Minderung von Treibhausgasemissionen - MinGAS“ (AZ: 37831/02-23) ist eine Kooperation der SedimentWorks GmbH und der Technischen Hochschule Köln. Das Forschungsvorhaben ist die Nachfolge des ebenfalls durch die DBU geförderten Vorgängerprojekts „Analyse des Emissionsminderungspotenzials des modifizierten ‚RemoGas‘-Verfahrens zur Methanernte während der Sedimentremobilisierung in wasserwirtschaftlichen Stauräumen“ (AZ: 37831/01-23). Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden die Arbeiten des Vorgängerprojekts fortgeführt und vertieft.

Der entwickelte Prototyp kombiniert automatisierte Sedimentabtragungsmethoden mit der Ernte von Methangas während des Sedimenttransfers. Zielsetzung war, neben der Sediment- und Methangasernte, vor allem die Automatisierung und energetische Optimierung des Systems, um einen möglichst autarken Betrieb zu gewährleisten. Dazu wurden die Ansteuerungsmodalitäten der Frequenzumrichter auf das Modbus-Protokoll umgestellt. Auch die Gasspeicherung wurde durch den Einbau eines direkt elektrisch ansteuerbaren und explosions sicheren Drei-Wege-Ventils automatisiert und durch die Beschaffung dichter und stabiler Gasbags verbessert. Durch den Einsatz erneuerbarer Energietechnologien, hier Photovoltaikanlagen, und einen intelligenten Energie- und Betriebsmanagementansatz, wurde der externe Energiebedarf minimiert. Außerdem wurde eine Batterie beschafft, die das Speichern von überschüssiger Energie ermöglicht und für eine spätere Benutzung zur Verfügung stellt.

Weiterhin wurde ein Modularisierungskonzept ausgearbeitet, um eine flexible Anpassung an unterschiedliche Einsatzbedingungen und eine breite Anwendbarkeit sicherzustellen.

Während des Praxistests im August 2023 wurde die Anlage mit den zuvor durchgeführten Umbauarbeiten auf der Wupper-Vorsperre erfolgreich getestet. Die Pilotanlage kann im Handbetrieb über das beschaffte Panel betrieben werden. Auch der automatische Betrieb der Sediment-Methan-Aufnahmeeinheit wurde erfolgreich getestet. Jedoch wurde festgestellt, dass die Positionierung über die vorhandenen Winkelmesser nicht ausreichend präzise ist. Deshalb wurden weitere Möglichkeiten zur Positionierung, auch aus anderen Fachbereichen, recherchiert, die in zukünftigen Projekten getestet werden müssen.

## 2 Einleitung

### 2.1 Ausgangssituation

Stauräume sind von entscheidender Bedeutung für die Erhaltung unserer Wasser- und Kulturlandschaften sowie für die Sicherstellung der Trink- und Brauchwasserversorgung. Sie spielen eine wichtige Rolle beim Hochwasserschutz, der Energieerzeugung und als Lebensraum für verschiedene Arten.

Jedoch führt das Anstauen von Flüssen durch Stauanlagen dazu, dass der natürliche Transport von Sedimenten unterbunden wird. Dies führt zu Ablagerungen vor den Absperrbauwerken, was zu einer Verringerung des Stauvolumens und Einschränkungen in der Funktionsfähigkeit des Stauraums führt. Gleichzeitig fehlt das Sediment im Unterstrom, was zu Sohlerosion führen kann.

Zudem entstehen Treibhausgase aus den Stauseen aufgrund des anaeroben Abbaus von organischem Material im Sediment, insbesondere Methan, welches ein 80-fach höheres Treibhausgaspotenzial als Kohlenstoffdioxid (bezogen auf einen Wirkungszeitraum von 20 Jahren) aufweist (IPCC, 2022).

Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wurde im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte ein Prototyp zur Methangasernte während des Sedimentmanagements entwickelt. Das Verfahren sieht vor, dass Sedimente kontinuierlich vom Gewässergrund abgetragen und dem Unterstrom zugeführt werden. Während der Abtragung des Sedimentes wird freiwerdendes Gas aufgesammelt und im Sediment-Wasser-Gemisch befindliches Gas über einen Gasabscheider abgetrennt. Das Gas, in dem Methan enthalten ist, wird für eine spätere Verwertung gespeichert. Gasmenge, Methangehalt und Sediment-Wasser-Masse werden von verschiedenen Messgeräten aufgezeichnet.

Weiterhin wurden für die Automatisierung der Anlage Sicherheits- und Explosionsschutzkonzepte ausgearbeitet.

Durch Praxistests am Modellgewässer Wupper-Vorsperre konnte die Funktionsfähigkeit des Prototyps gezeigt und Optimierungspotenziale identifiziert werden. Zudem war der IST-Zustand des Gewässers ermittelt und ein Langzeitmonitoring etabliert worden, um kontinuierlich Messdaten zur Gewässergüte und zu den Methanemissionen aus dem Gewässer zu erheben und zu analysieren. Basierend auf diesen Daten wurde eine Emissionsbilanz für das Modellgewässer erstellt.



## 2.2 Zielsetzung

Die Vorgängerprojekte haben gezeigt, dass eine Methanernte während des kontinuierlichen Sedimenttransfers möglich ist. Damit wurde ein Ansatz gegen die Verlandung von Stauseen mit einer gleichzeitigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen geschaffen.

Ziel in diesem Projekt ist eine soweit wie möglich realisierbare Automatisierung und energetische Optimierung der Anlage. Außerdem werden für eine zukünftige Modularisierung der Anlage Grundlagen geschaffen.

Das Ziel der Automatisierung ist wichtig, um einen kontinuierlichen und langfristigen Betrieb zu gewährleisten. Denn dadurch kann der Personaleinsatz reduziert werden. Dies ist von entscheidender Bedeutung, sowohl aus wirtschaftlicher Sicht als auch im Hinblick auf Arbeitsrecht und Arbeitssicherheit, insbesondere bei Arbeiten auf dem Wasser.

Durch die Auswahl energiesparender Geräte und die Optimierung ihrer Steuerungszeiten soll der Strombedarf der Anlage gesenkt und das Energiemanagement der Anlage klimabewusst weiterentwickelt werden. Zudem soll die Anlage möglichst autark arbeiten, indem erneuerbare Energien wie eine Photovoltaikanlage zur Stromversorgung des Gesamtsystems eingesetzt werden. Dadurch kann die Leistung der zurzeit genutzten Generatoren deutlich reduziert oder im Idealfall komplett ersetzt werden. Somit wird nicht nur klimabewusstes Arbeiten gefördert, sondern auch die entstehenden Treibhausgasemissionen durch die Energieversorgung der Anlage deutlich reduziert.

Ein weiteres Ziel war das Aufstellen eines Konzeptes für eine zukünftigen Modularisierung der Anlage. Dieses soll ermöglichen, dass die Anlage schnell und flexibel an unterschiedliche Randbedingungen angepasst werden kann. Dazu wird eine Grundstruktur der Anlage entwickelt und einzelne Module, die entsprechend eines "Plug and Produce" Ansatzes ergänzt werden. Dies bietet Vorteile in Bezug auf Zeit- und Ressourceneinsparung sowie eine größere Flexibilität bei der Anpassung an stauraumspezifische Gegebenheiten. Die modulare Automation von Anlagen bietet viele Vorteile, wie geringeren Engineering-Aufwand, herstellerunabhängige Automatisierungskomponenten und eine Erweiterung des potenziellen Einsatzgebiets des Verfahrens.

## 2.3 Arbeitspakete und Zeitplan

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Inhalte, Dauer und Federführung der sieben geplanten Arbeitspakete (AP1-AP7).

Arbeitspakete	Dauer/ Federführer
<u>AP1: Automatisierung der Anlage</u> Automatisierung von Einzelkomponenten sowie des Gesamtsystems, Integration des erarbeiteten Energiemanagements in die Steuerung.	10 Monate PLT
<u>AP2: Automatisierte Gasspeicherung</u> Entwicklung und Integration einer optimierten Gasspeicherung in die Anlage inkl. Automatisierung der Gasspeicherung.	5 Monate PLT, D-Sed
<u>AP3: Energiemanagement</u> Entwicklung von Strategien zur Optimierung der Energieverbräuche (z B. Verbrauchermanagement, Optimierung der Befahrung, etc.)	8 Monate LWU, PLT
<u>AP4: Energieautarkie</u> <u>4a: Nutzung eigener Energiequellen:</u> Erforschung und Auswahl von Quellen zur Erzeugung erneuerbarer Energie zur Nutzung durch die Modellanlage. <u>4b: Energiespeicherung:</u> Entwicklung und Integration eines geeigneten Speicherkonzepts.	8 Monate D-Sed
<u>AP5: Grundkonzept Modularisierung</u> Entwicklung eines Konzepts einer geplanten Modularisierung	6 Monate D-Sed, LWU, PLT
<u>AP6: Praxistest der Anlage</u> Test der erweiterten Automatisierung sowie der Energieoptimierung auf einem zuvor ausgewählten Modellgewässer.	2 Monate LWU, D-Sed
<u>AP7: Synthese/Veröffentlichung:</u> Wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse, Vorstellung auf Tagungen/ bei relevanten Stakeholdern (Betreiberverbände, IHA, Umweltämter des Bundes und der Länder); Konzeption weiterführender Projekte und Anwendungen.	3 Monate LWU, PLT

Der zeitliche Ablauf des Projekts ist in Tabelle 2 dargestellt. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Meilensteine.

Tabelle 2: Zeitplan des Projekts. Grün markierte Felder zeigen die Arbeiten, die im Projekt durchgeführt wurden. Hellgrün markierte Felder zeigen Vorbereitungen. Rote Striche sind die Meilensteine

	2023										2024		
	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
AP1 Automatisierung der Anlage	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
AP2 Automatisierte Gasspeicherung	■	■	■	■	■								
AP3 Energiemanagement	■	■	■	■	■	■	■						
AP4 Energieautarkie	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
AP5 Grundkonzept Modularisierung							■	■	■	■	■	■	
AP6 Praxistest der Anlage	■	■			■	■	■						
AP7 Synthese										■	■	■	

MS1
MS2
MS3

Tabelle 3: Meilensteine des Projektes

Meilenstein 1:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modellgewässer wurde ausgewählt</li> <li>• Gasspeicherung wurde erfolgreich automatisiert</li> <li>• Technologie zur Erzeugung erneuerbarer Energie wurde ausgewählt</li> </ul>
Meilenstein 2:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energiemanagement wurde erfolgreich integriert und getestet</li> <li>• Anlage zur Erzeugung erneuerbarer Energien wurde erfolgreich integriert und getestet</li> <li>• Gesamtanlage wurde erfolgreich getestet</li> </ul>
Meilenstein 3:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle Arbeitspakete wurden erfolgreich abgeschlossen</li> <li>• Die Projektergebnisse wurden publiziert und präsentiert</li> </ul>

## 3 Arbeiten im Projekt

### 3.1 Untersuchungsraum

Die in diesem Projekt durchgeführten Felduntersuchungen schließen an die Arbeiten im Vorgängerprojekt an der Wupper-Vorsperre in Hückeswagen bei Wuppertal an (Abbildung 1). Die Wupper-Vorsperre ist eine Vorsperre der Wuppertalsperre und staut den Hauptzufluss Wupper. Der mittlere Zufluss (MQ) der Wupper zur Vorsperre beträgt 4,05 m<sup>3</sup>/s. Die Wupper-Vorsperre wurde 1974-76 errichtet und hat ein Einzugsgebiet von ca. 174 km<sup>2</sup>. Die voll eingestaute Fläche umfasst

ca. 150.000 m<sup>2</sup> bei einem ursprünglichen maximalen Stauraumvolumen von 366.000 m<sup>3</sup>. Die Wassertiefe variiert von weniger als 0,5 m im Bereich unterhalb der Stauwurzel bis maximal ca. 5,5 m im Bereich des Absperrbauwerks.



Abbildung 1: Digitales Orthophoto der Wupper-Vorsperre in Hückeswagen, Deutschland (Esri Deutschland GmbH, 2022).

Mehrere Gründe führten zur Auswahl der Wupper-Vorsperre als geeigneten Untersuchungsraum. Zum einen zeigte der Wupperverband bei unserer Anfrage großes Interesse und sicherte Unterstützung bei der Durchführung der Arbeiten zu. Zudem gestaltete sich die Zusammenarbeit in früheren Projekten äußerst erfolgreich. Nutzungsbedingte Einschränkungen (z. B. durch Trinkwassernutzung) gab es an dem Stauraum nicht zu beachten und Einschränkungen durch Freizeitnutzung waren auch nicht vorhanden, da die Wasserfläche der Vorsperre zum Zeitpunkt der Praxistests für die Freizeitnutzung gesperrt war. Sedimentation war im Vorfeld der Arbeiten bereits ein bekanntest Problem an der Wupper-Vorsperre. Da die Methanemissionen durch den Abbau der Organik im Sediment bedingt sind und eine positive Korrelation zwischen Sedimentation und Methanproduktion besteht, wurde dieser Umstand als ebenfalls positiv für die Untersuchungen gewertet. Zur globalen Abschätzung der Relevanz der Methanemissionen aus Staugewässern bestehen weiterhin große Datenlücken die insbesondere kleine Stauseen (<1 km<sup>2</sup>) betreffen (Rosentreter, et al., 2021). Die Wupper-Vorsperre fällt in diese Kategorie wodurch hier gewonnene Daten auch einen Beitrag zur globalen Bewertung der Klimabilanz von Stauräumen leisten.

## 3.2 AP1: Automatisierung der Anlage

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein innovatives Verfahren zur Sedimentabtragung konzipiert und entwickelt. Um die vielfältigen Anforderungen an dieses Verfahren erfüllen zu können, war es notwendig, einen Prototyp zu entwickeln und zu erproben. Dieser Prozess beinhaltete die Weiterentwicklung bestehender Technologien und Methoden sowie die Erprobung neuer Ansätze.

Die konzipierte Anlage wurde aus Perspektive der Automatisierungstechnik in vier primäre Komponenten unterteilt:

1. Positionierung: Diese Komponente gewährleistet die präzise Platzierung der Anlage an dem vorgesehenen Ort der Sedimentabtragung, indem sie eine exakte Lokalisierung sicherstellt.
2. Sediment-/Methanaufnahmeeinheit: Diese Einheit ist für die eigentliche Abtragung des Sediments und die Aufnahme von Methan verantwortlich.
3. Messtechnik: Durch fortlaufende Überwachung und Dokumentation des Abtragungsprozesses liefert die Messtechnik Daten, die zur Feinabstimmung und Optimierung des Prozesses beitragen.
4. Koordinationssteuerung: Diese übergeordnete Steuerungseinheit überwacht und regelt die Operationen der Gesamtanlage, indem sie die Integration und Effizienz der einzelnen Komponenten fördert und somit den gesamten Ablauf optimiert.

Im Arbeitspaket 3 (AP 3) wurden Methoden zur Realisierung einer energieoptimierten Betriebsweise ausgearbeitet. Die Implementierung dieser Methoden erforderte signifikante Anpassungen der Koordinationssteuerung, was die Anlage befähigt, unterschiedliche Betriebsmodi einzunehmen und den Energiebedarf über eine erweiterte Zeitspanne effizient zu verteilen. Diese Modifikation war ein Fortschritt zur Verbesserung der Energieeffizienz der Anlage.

Parallel dazu war eine Modifizierung der Software-Schnittstellen notwendig, um die neuen Anforderungen zu erfüllen. Obwohl diese Anpassungen realisiert wurden, konnte ihre Funktionalität im Rahmen der Prototypentests nicht vollständig validiert werden (s.3.7).

Ein zentraler Aspekt innerhalb des Arbeitspakets war die Umstellung der Ansteuerungsmodalität der Frequenzumrichter von bisherigen analogen Ein- und Ausgängen auf das Modbus-Protokoll. Diese Änderung ermöglichte die direkte Erhebung von Leistungsdaten aus den Frequenzumrichtern, die die Antriebe steuern, was

einen signifikanten Schritt hin zu einer effizienteren und transparenteren Systemsteuerung darstellt.

Zusätzlich wurden Erkenntnisse aus dem durchgeführten Gewässertest direkt in die Automatisierungstechnologie integriert. Des Weiteren führte eine Überarbeitung der Positionierungskomponente zu der Erkenntnis, dass die vorhandenen Winkelmesser nicht die erforderliche Präzision bieten. Dies führte zu einer Überarbeitung des Konzeptes, um die Genauigkeit und Effektivität des Verfahrens zu steigern.

Um ein geeignetes Verfahren für diesen speziellen Anwendungsfall zu finden, wurden Verfahren aus anderen Fachbereichen in Betracht gezogen. Dieser interdisziplinäre Ansatz ermöglichte es, die besten Praktiken und Techniken aus verschiedenen Bereichen zu nutzen und so ein optimiertes und effizientes Verfahren zu entwickeln. Die relevanten Eigenschaften der betrachteten Verfahren werden im Folgenden dargestellt.

Für eine genaue Positionsbestimmung bietet sich ein globaler Navigationssatellitensystem-Empfänger (GNSS-Empfänger) an. Dieser kann mit RTK (Real Time Kinematik) die aktuelle Position bis in den cm-Bereich bestimmen. Außerdem ist dieser mit 2 Antennen ausgestattet, welche an den gegenüberliegenden Enden der Plattform montiert werden können. Dafür wird deren Abstand und Höhe ausgemessen und der Empfänger mit diesen Parametern initialisiert. Über diese beiden Antennen kann der Drehwinkel zwischen der Plattform und der Y-Achse gemessen und korrigiert werden. Als Schnittstelle können über das Remote IO im Schaltschrank per Ethernet TCP/IP verwendet werden. Eine zusätzliche Möglichkeit ist das CAN-Bus Modul der SPS, an welchem das Echolot angeschlossen ist und über das NMEA2000 mit der SPS kommuniziert. In der Tabelle 4 werden mögliche GNSS-Empfänger gegenübergestellt. Nach der Gegenüberstellung erwies sich das 30xx GNSS als beste Option. Grund hierfür ist die ausreichend hohe Genauigkeit sowie die integrierte Ethernet Schnittstelle. Bei den übrigen Lösungen müssten noch zusätzliche Converter beschafft werden, um die Daten an die Steuerungsplattform zu übertragen. Weiterhin ist das System mit 4.900,00 € das Günstigste.

Tabelle 4: Vergleich Positionserfassung

<b>Modul</b>	<b>Genauigkeit</b>	<b>Heading</b>	<b>Anschluss</b>
völkel GNB	2-3 cm	ja	CAN (NMEA2000)
FIXPOSITION VISION RTK	2-3 cm	ja (<0,4°)	Ethernet
<b>30xx GNSS</b>	<b>3-5 cm</b>	<b>ja</b>	<b>Ethernet(TCP/IP)</b>
xNAV650	2cm	ja (ca. 0,1°)	RS-232 (NMEA0183)
AV200	5cm	ja (ca. 0,2°)	CAN (NMEA2000)
SBG Eclipse D	1 cm	ja (ca.0,1°)	RS232 (Binary eCom, NMEA, ASCII, TSS)
VN-300 GNSS INS	1m horizontal/ 1,5m vertikal	ja	RS-232 (NMEA0183)

### 3.3 AP2: Automatisierte Gasspeicherung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde das Konzept für die Gasspeicherung überarbeitet. Dieses umfasst die differenzierte Einleitung des Gases, abhängig vom Methangehalt, in spezifische Speicherbehältnisse, in diesem Projekt Gasbags. Diese Speicherstrategie ermöglicht eine optimierte Nachnutzung des gesammelten Gases.

Im Rahmen der technischen Umsetzung dieses Konzepts erfolgte eine eingehende Evaluation diverser Sensoren und Aktoren von unterschiedlichen Produzenten, mit dem Ziel, ihre Eignung für diesen speziellen Einsatzbereich zu analysieren. Eine zentrale Herausforderung bildete dabei die Handhabung der niedrigen sowie dynamisch variierenden Gasflüsse, was eine sorgfältige Auswahl der Mess- und Steuerelemente bedingte, um eine präzise Erfassung sowie Kontrolle der Gasmenngen zu gewährleisten.

Für die Aufteilung des Gasstromes in die vorgesehenen Gasbags wurde ein direkt elektrisch ansteuerbares und explosionsssicheres Drei-Wege-Ventil der Firma Norgren implementiert. Dieses Ventil, positioniert hinter der Gasmessstrecke und vor den Gasbags, leitet das Gas entsprechend des vordefinierten Methangehalts entweder in den ersten Gasbag für eine später vorgesehene Energiegewinnung oder, bei Unterschreitung dieses Wertes, in einen alternativen Gasbag, dessen Inhalt aufgrund ungenügender Methankonzentration geplant verbrannt wird. Diese Verbrennung zielt darauf ab, Methan in das weniger klimaschädliche Kohlenstoffdioxid umzuwandeln und freizusetzen.

Darüber hinaus wurden die Ventile an die Steuerung angebunden und im Automatisierungskonzept berücksichtigt und implementiert. Dies ermöglichte eine nahtlose Integration der Ventile in das Gesamtsystem und eine effiziente Steuerung des

Gasspeicherungsprozesses. Die Funktionalität dieser Systemanbindung wurde abschließend mittels Labortests verifiziert.

Des Weiteren fand zu Beginn des Projektes eine Evaluierung von Lösungen für eine drucklose Gasspeicherung statt, nachdem festgestellt wurde, dass die bisher verwendeten Gasbags weder ausreichende Stabilität noch Dichtigkeit aufwiesen. Es wurden erneut Gasbags ausgewählt, diesmal unter Berücksichtigung der Kriterien Flexibilität, Leichtigkeit und Lagerfähigkeit in den Gasbunkern der Technischen Hochschule Köln. In die engere Auswahl fielen MyAquamina® XXL Luftkissen, Monzana Luftkissen sowie ein Gasspeicherballon von Ballonbau Wörner. Diese wurden einer Funktions- und Dichtigkeitsüberprüfung unterzogen, indem sie mit einem Gasgemisch befüllt wurden, dessen Zusammensetzung vergleichbar mit den in Vorprojekten ermittelten Werten war. Die bestellte Zusammensetzung war 2,35 vol. % Kohlendioxid, 47,65 Vol. % Stickstoff, 50,0 Vol. % Methan. Der Gasballon von Ballonbau Wörner zeigte über einen Zeitraum von vier Wochen den geringsten Methanverlust, weshalb er für den Praxistest ausgewählt wurde. Aufgrund der langen Lieferzeit der Gasballons wurden zusätzlich Monzana Luftkissen als Reserveoption genutzt, während die MyAquamina Luftkissen wegen ihrer zu großen Größe als ungeeignet für den momentanen Einsatz ausgeschlossen wurden, trotz ihrer überlegenen Gashaltungseigenschaften. Für kommende Versuche ist die Verwendung der Gasspeicherballons von Ballonbau Wörner beabsichtigt, um eine maximale Gas- bzw. Methanspeicherung sicherzustellen. Die detaillierten Messergebnisse und Analysen sind in der nachstehenden Tabelle 5 dokumentiert.



Tabelle 5: Gasbag Testung

Gasbag	Datum	Messung	Methan [%]	Stickstoff [%]	Kohlenstoffdioxid [%]	O2 [%]	Methan-Abweichung von Gasflasche [%]
Ballon- bau Wör- ner	11.07.2023	Gasflasche	36,10	58,4	1,90	3,2	
	26.07.2023	Messung 1	35,5	56,1	1,6	6,8	0,6
		Messung 2	34,5	60,5	1,2	3,8	1,6
		Messung 3	35,5	59,6	1,6	3,2	0,6
	02.08.2023	Messung 1	35,6	58,6	1,5	4,3	0,5
		Messung 2	35,7	59	1,5	3,8	0,4
		Messung 3	35,7	59,1	1,6	3,6	0,4
	04.08.2023	Messung 1	35,5	59	1,5	4	0,6
		Messung 2	35,6	59,4	1,5	3,5	0,5
08.08.2023	Langzeitmessung	35,8	59,2	1,5	3,4	0,3	
Monzana	11.07.2023	Gasflasche	36,1	58,4	1,9	3,2	
	26.07.2023	Messung 1	34,4	60,1	1,2	3,8	1,7
		Messung 2	32,1	62	0,5	5,4	4
		Messung 3	32,1	62	0,5	5,4	4
	02.08.2023	Messung 1	30,3	63	0,3	6,5	5,8
		Messung 2	--	--	--	--	-
		Messung 3	30,3	63	0,3	6,5	5,8
	04.08.2023	Messung 1	29,9	63,1	0,3	6,8	6,2
		Messung 2	30	63	0,3	6,8	6,1
Langzeitmessung		29,3	63,1	0,2	5	6,8	
Gasflasche		36,1	58,4	1,9	3,2		
MyAqua- mina XXL	11.07.2023	Messung 1	35,1	59,9	1,6	3,4	1
	26.07.2023	Messung 2	34,7	60,3	1,2	3,8	1,4
		Messung 3	34,7	60,3	1,2	3,8	1,4
		Messung 1	33,9	61	1,3	3,9	2,2
	02.08.2023	Messung 2	34	60,6	1,1	4,3	2,1
		Messung 3	34	60,6	1	4,3	2,1
		Messung 1	33,9	60,7	1	4,4	2,2
	08.08.2023	Langzeitmessung	33,5	60,7	0,8	5	2,6

### 3.4 AP3: Energiemanagement

Gemäß der DIN EN ISO 50001 bezieht sich das Konzept des Energiemanagements auf die sorgfältige Überwachung sowie Regelung des Energiekonsums innerhalb von Betrieben, Organisationen oder Haushalten. Das primäre Ziel besteht darin, den Energieverbrauch effizient zu optimieren und zu reduzieren, was sich in einer Reduktion der Energiekosten niederschlägt, die Umweltbelastung minimiert und die Energieeffizienz verbessert. Ein wirksames Energiemanagementsystem umfasst diverse Maßnahmen, darunter die Erfassung und Analyse von Energieverbrauchsdaten, die Identifizierung von Möglichkeiten zur Energieeinsparung, die Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs, die Überwachung und Messung der Ergebnisse, sowie die kontinuierliche Verbesserung des Energiemanagementsystems. Die Durchführung eines Energiemanagements kann auf verschiedene Weise erfolgen, einschließlich der Implementierung von energieeffizienten Technologien, der Einbindung sowie Schulung der Belegschaft, der konstanten Überwachung energetischer Daten, die Einhaltung von Energieeffizienzstandards und das Einbinden von Energieeffizienz in die Unternehmensstrategie.

Im Kontext des MinGAS-Projekts wurde zunächst eine Ist-Analyse durchgeführt, um Bereiche mit Optimierungspotenzial zu identifizieren. Insbesondere wurden die Hauptenergieverbraucher des Projekts ermittelt und der resultierende Leistungsbedarf, welcher bei simultanem Betrieb dieser Verbraucher bei ca. 4 kW liegt. In der Tabelle 6 wurden die unterschiedlichen Zustände der automatisierten Fahrt mit der jeweils benötigten Energie dargestellt. Diese Datenerhebung bildete die Grundlage für Maßnahmen zur Reduktion des Gesamtenergiebedarfs. Dafür wurden die Verbraucher identifiziert, welche Einsparpotentiale aufweisen, diese sind die Hauptseilwinde und die Positionierungsmotoren. Deshalb wurde eine energiesparendere Hauptseilwinde beschafft und ein Stirnradgetriebemotor eingesetzt, der die nötige Betriebsleistung signifikant senkt, indem er die hohe Drehzahl des Motors effizient reduziert und so einen Motor mit niedrigerer Leistungsaufnahme ermöglicht. Dieser neue Motor verbraucht nur ein Viertel der Energie im Vergleich zur vorherigen Hauptseilwinde und trägt damit wesentlich zur Reduzierung des Energiebedarfs bei. Außerdem wurden neue Getriebemotoren für die Positionierung beschafft, die über eine geringere, aber dennoch ausreichende Leistung verfügen. Geplante Feldtests zur Überprüfung dieser Anpassungen konnten allerdings nicht realisiert werden, da die erforderlichen Seiltrommeln nicht beschafft werden konnten.

Da ein automatisierter Betrieb der Plattform vorgesehen ist, muss neben der Schulung der Mitarbeiter in Bezug auf einen energieoptimierten Betrieb auch die Automatisierung dieses Betriebs vorgesehen werden. Für die Wirtschaftlichkeit der Plattform ist es notwendig, dass die Plattform den Stausee in möglichst kurzer Zeit von dem überflüssigen Sediment befreit. Deshalb wurde die Überlegung verworfen, die Steuerung der Anlage anhand der erzeugten Energie auszurichten. Somit bestand lediglich die Möglichkeit, über unterschiedliche Arten der Abtragungsfahrten die verbrauchte Energie zu optimieren. Die Abtragungsfahrten werden in einen „Stempelbetrieb“, in welchem die Sediment-/Methan-Aufnahmeeinheit zum Absaugen abgelassen wird und die Plattform erst nach des Absaugvorgangs wieder weiterfährt und den kontinuierlichen Absaugvorgang, in welchem die Sediment-/Methan-Aufnahmeeinheit von der Plattform über den Boden gezogen wird und kontinuierlich Sediment sammelt, unterschieden. Der Vorteil des „Stempelbetriebs“ liegt in dem geringen Energieverbrauch während des Absaugvorgangs, da lediglich die Pumpen und Wirbeldüsen aktiv sein müssen.

Außerdem ermöglicht dieser Betriebsmodus eine präzisere Abtragung des Sediments und der Fokus kann einfacher auf die Stellen gelegt werden, welche eine erhöhte Ansammlung von Sediment aufweisen. Um den Energieverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren, muss der Fokus auf die Stellen gelegt werden, welche ein erhöhtes Sedimentvorkommen aufweisen. Das implementierte Echolot identifiziert diese Areale innerhalb des Stausees präzise und trägt zu einer fokussierten Sedimentabtragung bei. Über die Echolotmessungen hinaus konnten Orte verstärkter Sedimentation durch Erfahrungswerte und gezielte Recherche ermittelt werden.

Anhand der Sedimentverteilung, die in einer Recherche zu den Ablagerungen des Sedimentes in der Wupper-Vorsperre durchgeführt wurde, wurde eine Verfahrensweise der Anlage erarbeitet. An Stellen, an denen sich verstärkt Sediment ansammelt, wird eine häufigere Überfahrt bzw. eine verlängerte Verweilzeit erfolgen. Für die Analyse der Sedimentverteilung wurden zwei Ansätze verfolgt. Zunächst wurde die typische Sedimentation in Fließgewässern betrachtet, wie sie bei mäandrierenden Flüssen mit geringer Fließgeschwindigkeit auftritt. Anschließend wurden die Besonderheiten bei Staugewässern untersucht, da in der Wupper-Vorsperre beide Sedimentationsprozesse vorliegen. Zur Analyse wurden Karten des Sedimentationsaufmaßes des Wupperverbands verwendet.

Die Ergebnisse zeigten, dass es zu einer Verlandung des Gleitufers und Erodierung des Prallufers kommt. Dies konnte während des Praxistests bestätigt werden. Die in Vorgängerprojekten erstellten Bathymetrien zeigen deutlich, dass sich kurz nach der Stauwurzel „Sandbänke“ eines Deltas bilden, jedoch keine Verlandung kurz vor dem Sperrbauwerk, was typisch für Ablagerungsprozesse bei Stauwerken wäre.

Basierend auf der ermittelten Sedimentverteilung kann der Fahrweg der Anlage geplant werden. Der Fokus der Verfahrung wird auf die Stauwurzel, sowie die Gleitufer gelegt. Während des Praxistests wurde ein Bereich an der Wupper-Vorsperre befahren, der sowohl ein Prallufer an der linken Seite als auch ein Gleitufer an der rechten Seite aufweist. Es wurde beobachtet, dass am rechten Ufer deutlich mehr Methan aufgewirbelt und aufgefangen werden konnte. An dieser Stelle wurde die Anlage verlangsamt, um möglichst viel Gas aufzufangen.

Eine weitere Möglichkeit des Energiemanagements wird durch eine etwaige Nutzung der Plattform über das gesamte Jahr eröffnet. Dann können Absaugfahrten in Zeiträume gelegt werden, in denen solar erzeugte Energie für die Solarmodule aufgrund der Wetterlage optimal verfügbar ist. Dies erfordert eine kontinuierliche Überwachung der Wetterdaten, um geeignete Betriebszeiten für einen möglichst autarken Solarenergiebetrieb zu identifizieren, obgleich bei den gegebenen Verbrauchsparametern und verfügbarer Installationsfläche für PV-Module ein vollständig solarenergetischer Betrieb derzeit nicht realisierbar ist (s. 3.5.1).

Tabelle 6: Leistungsverbrauch Zustände

	Betriebsmittel		Fehler		Initialisierung		Grundstellung		Positionierfahrt		Absaugfahrt		Stationär absaugen		Rückwärts und Ausweichen		Nächste Reihe anfahren	
	Anzahl	Leistung je Stk. [W]	Anzahl aktiv	Leistung real	Anzahl aktiv	Leistung real	Anzahl aktiv	Leistung real	Anzahl aktiv	Leistung real	Anzahl aktiv	Leistung real	Anzahl aktiv	Leistung real	Anzahl aktiv	Leistung real	Anzahl aktiv	Leistung real
<b>1</b>	4	120		0		0	4	0	4	0	4	480	4	480	4	480	4	0
<b>2</b>	1	1000		0		0	1	0	1	1000	1	1000	1	0	1	1000	1	0
<b>3</b>	1	1500		0		0		0	1	0	1	1500		1	1500			0
<b>4</b>	4	550		0		0	3	0	3	1650	3	0	3	0	3	1650	3	1650
<b>5</b>	1	1500		0		0		0	1	0	1	1500		1	1500			0
<b>6</b>	1	500	1	500	1	500	1	500	1	500	1	500	1	500	1	500	1	500
			ges	500	ges	500	ges	500	ges	2150	ges	1980	ges	3980	ges	3630	ges	2150

## 3.5 AP4: Energieautarkie

Für den Sedimenttransport, die Verfahrnung, sowie die verschiedenen Messungen benötigt die Plattform Energie. Diese wird im Projekt mit Hilfe eines Dieselgenerators erzeugt. Um die Emissionen zu mindern, wurde die benötigte Energie reduziert. Weiterhin wurde eine Solaranlage beschafft, um erneuerbare Energie zu erzeugen. Das Ziel ist, die Plattform mit einem möglichst hohen Autarkiegrad zu betreiben. Auf Grund der benötigten Energiemenge, wird in diesem Projekt eine Teilautarkie angestrebt. Hierzu wurden unterschiedliche Methoden zur Erzeugung erneuerbarer Energien recherchiert und die Sonnenenergie als geeignete Methode für die Wupper-Vorsperre ausgewählt.

### 3.5.1 4a: Nutzung eigener Energiequellen

Erneuerbare Energien spielen eine immer wichtigere Rolle, da die Notwendigkeit einer nachhaltigen Energieversorgung zunimmt. Außerdem wird durch diese eine Abhängigkeit von Energieerzeugern minimiert, da die Energie selber produziert wird. Energiequellen, die aus natürlichen Prozessen stammen und sich kontinuierlich erneuern bieten eine vielversprechende Alternative zu fossilen Brennstoffen und tragen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei. Einige der wichtigsten erneuerbaren Energien sind:

- Sonnenenergie
- Wasserkraft
- Windkraft
- Geothermie und Umgebungswärme
- Bioenergie
- Meeresenergie

(Umweltbundesamt, 2024)

Jeder erneuerbare Energieträger kann je nach geografischer Lage, Ressourcenverfügbarkeit und technologischer Entwicklung unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Es ist wichtig, die spezifischen Umstände bei der Auswahl und Implementierung dieser Energien zu berücksichtigen. Die Auswahl der passenden erneuerbaren Energiequelle hängt von verschiedenen Faktoren wie geografischen Gegebenheiten, Ressourcenverfügbarkeit, Energiebedarf und Kosten ab.

Nach Vergleich der unterschiedlichen Energieträger wurde die Nutzung der Sonnenenergie mit Hilfe einer Photovoltaikanlage gewählt. In einer Photovoltaikanlage wird die Sonnenstrahlung in Strom umgewandelt. Dies geschieht mit Hilfe von Solarzellen. Diese bestehen meist aus dem Halbleiter Silizium.

Nach der Anfrage bei verschiedenen Anbietern wurde sich für eine Inselanlage entschieden, da diese unabhängig vom Stromnetz betrieben werden kann. Die ausgewählte Solaranlage ist von greenakku eine storePV 3400Wp 48V. Dies ist eine Komplettanlage als Inselanlage mit Lithium LiFePO4 Speicher inkl. Solarmodulen, Victron MPPT Solarladeregler, Victron Wechselrichter / Ladegerät. Ein Vorteil der Photovoltaikanlage gegenüber den anderen erneuerbaren Energien ist, dass an der Wupper-Vorsperre keine Verschattungen auf dem Wasser sind, so dass eine optimale Bestrahlung der Photovoltaikanlage möglich ist. Außerdem wurde die Solaranlage auf die schwimmende Plattform gebaut, da so die bereits durch die Anlage genutzte Fläche optimal ausgenutzt und keine neue Fläche benötigt wurde. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Photovoltaikanlage mit idealer Ausrichtung ohne große Änderungen am Grundgerüst der Pilotanlage in das bestehende System integriert werden kann. Die Anlage wird mithilfe von Gerüstschellen an Stangen befestigt, die zur Befestigung der Solarmodule der Pilotanlage hinzugefügt wurden. Die Befestigung wird in Abbildung 2 dargestellt. Ein Foto der Anlage mit montierten Solarmodulen ist in Abbildung 13 gegeben.

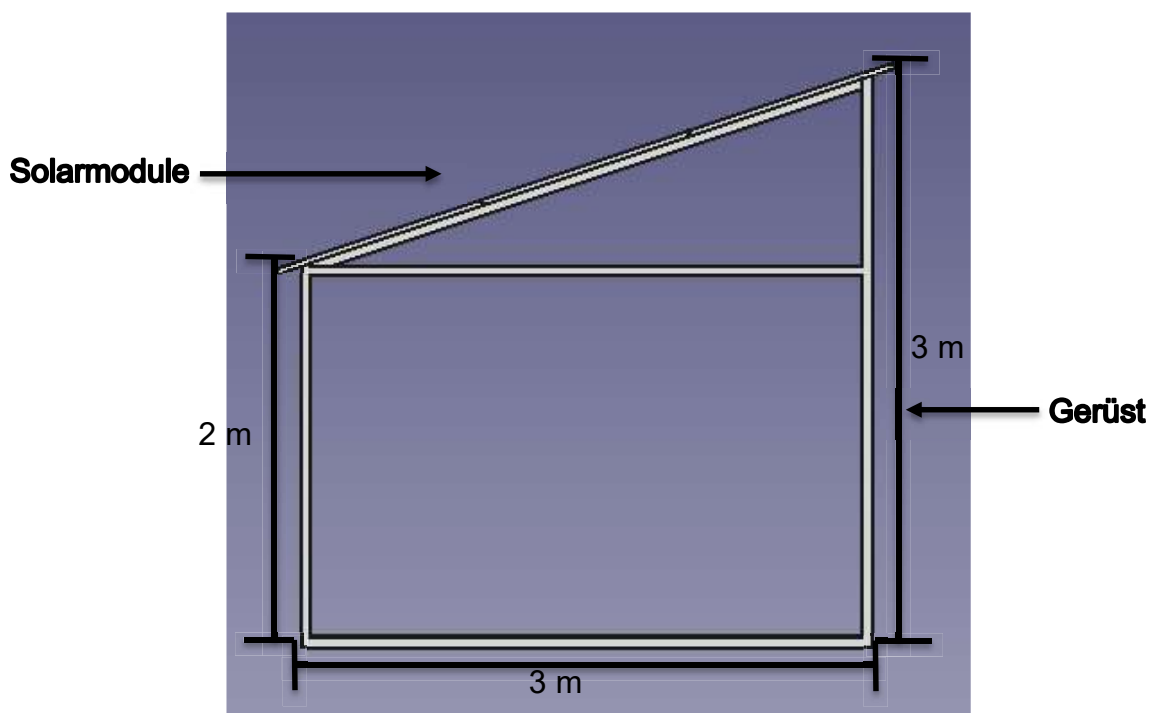


Abbildung 2: Platzierung Solarmodule

Das Gerüst der Pilotanlage besteht aus Layher Gerüstbauteilen. An den vertikalen Gerüststangen, mit Lochscheiben alle 50 cm, können Querstangen eingehangen werden. Die dadurch gewährleistete Zugänglichkeit auf der Plattform ist von großer Bedeutung, da die Anlage momentan noch einige Eingriffe benötigt.

Unabhängig von der Befestigung der Solarpaneele auf der Plattform, ist die Ausrichtung dieser für den Wirkungsgrad von enormer Bedeutung. Die Ausrichtung

beeinflusst die Effizienz der Energieerzeugung der Photovoltaikanlage. Idealerweise ist eine Photovoltaikanlage so ausgerichtet, dass möglichst viel Sonnenlicht eingetragen wird. Dazu wird die Anlage nach Süden ausgerichtet. Die optimale Ausrichtung hängt weiterhin von verschiedenen Faktoren ab:

- **Ausrichtung:** Eine Ausrichtung nach Süden, um die meiste Sonneneinstrahlung über den Tag zu erhalten. Eine Ausrichtung der Anlage in Süd-Ost und Süd-Westrichtung, führt zum Beispiel zu einem Verlust des Ertrags von bis zu 5 %. Eine Ausrichtung in Richtung Ost-West führt zu einem Verlust von 10-20 %.
- **Neigungswinkel:** Der Neigungswinkel der Module wird entsprechend dem Breitengrad des Standorts eingestellt. In Deutschland liegt der optimale Neigungswinkel beispielsweise zwischen 30° und 40°. Aufgrund der Bewegung der Sonne über den Tag hinweg, ändert sich der Einstrahlungswinkel jedoch fortlaufen. Die Abbildung 3 stellt den Bezug zwischen Ausrichtung, Neigung und Wirkungsgrad dar:

		Dachausrichtung																		
		Süd			Südost Südwest						Ost West			Nordost Nordwest						Nord
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Dachneigung	0°	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	
	10°	93%	93%	93%	92%	92%	91%	90%	89%	88%	86%	85%	84%	83%	81%	81%	80%	79%	79%	79%
	20°	97%	97%	97%	96%	95%	93%	91%	89%	87%	85%	82%	80%	77%	75%	72%	71%	70%	70%	70%
	30°	100%	99%	99%	97%	96%	94%	91%	88%	85%	82%	79%	75%	72%	69%	66%	64%	62%	61%	61%
	40°	100%	99%	99%	97%	95%	93%	90%	86%	83%	79%	75%	71%	67%	63%	59%	56%	54%	52%	52%
	50°	98%	97%	96%	95%	93%	90%	87%	83%	79%	75%	70%	66%	61%	56%	52%	48%	45%	44%	43%
	60°	94%	93%	92%	91%	88%	85%	82%	78%	74%	70%	65%	60%	55%	50%	46%	41%	38%	36%	35%
	70°	88%	87%	86%	85%	82%	79%	76%	72%	68%	63%	58%	54%	49%	44%	39%	35%	32%	29%	28%
	80°	80%	79%	78%	77%	75%	72%	68%	65%	61%	56%	51%	47%	42%	37%	33%	29%	26%	24%	23%
	90°	69%	69%	69%	67%	65%	63%	60%	56%	53%	48%	44%	40%	35%	31%	27%	24%	21%	19%	18%

Abbildung 3: Neigungswinkel und Ausrichtung (Fonseca, 2024)

- **Verschattung:** Verschattung ist zu vermeiden. Selbst geringfügige Verschattung führt zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Leistung. An der Tal Sperre entstehen diese durch Bäume am Ufer. Da die Pilotanlage sich jedoch bewegt, wodurch sie kontinuierlich ihre Position ändert und somit nicht in den Schatten der Bäume am Ufer verweilt, ist dieses Problem vernachlässigbar. Es kann darauf geachtet werden, dass die Anlage sich morgens auf der Uferseite befindet, an welcher die Bäume keinen Schatten werfen und bei Sonnenuntergang auf der entgegengesetzten.

In der folgenden Abbildung 4 wird die Position der Pilotanlage auf der Wuppervorsperre, während des Prototypentests, dargestellt. Die Plattform inklusive Module befindet sich auf dem Gewässer und wird über Seile an allen vier Seiten der Plattform auf diesem positioniert. Die Solarmodule auf der Plattform sind Richtung Süden ausgerichtet.



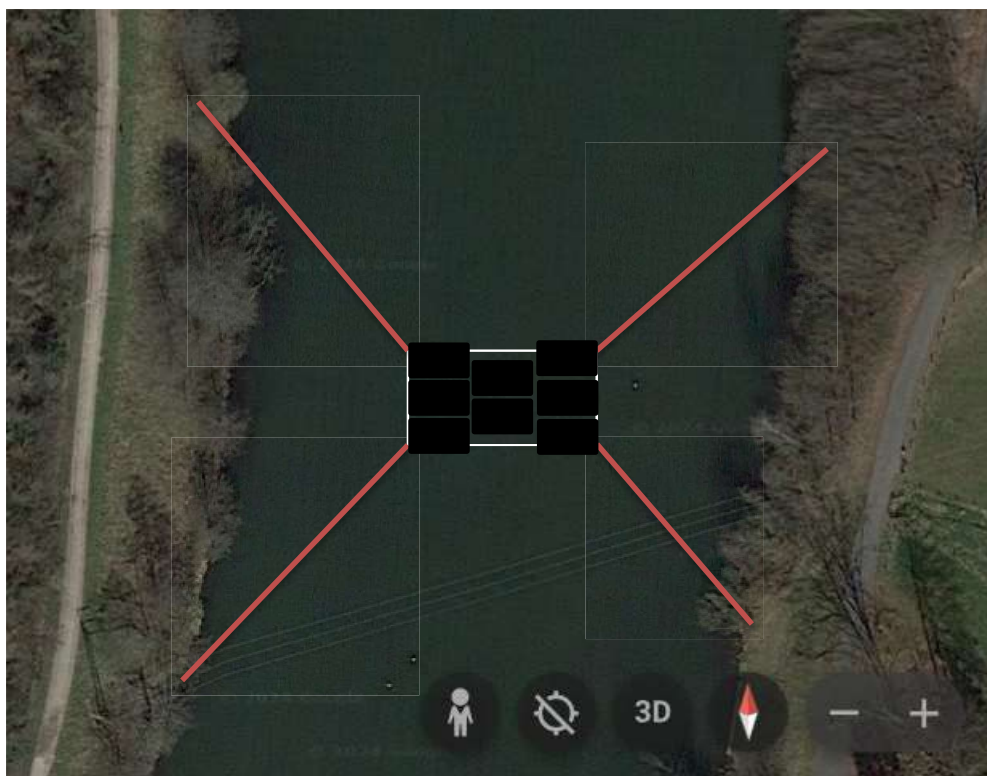


Abbildung 4: Skizze Ausrichtung der Plattform Richtung Süden (nicht maßstabsgetreu)

Um den Energieertrag optimal zu halten, werden die Solarpaneele mit einem Winkel von 18,4 Grad auf der Plattform befestigt. Der Winkel ergibt sich aus der Breite der Plattform und dem vom Gerüst vorgegebenen Höhenunterschied von einem Meter.

Der Betrieb der Anlagen im kommerziellen Bereich ist meist vom Wasserstand abhängig. Außerdem arbeiten die Anlage hauptsächlich im Winter, da im Sommer z.B. Freizeitbetrieb auf dem Staugewässer stattfindet. Mögliche Betriebszeiten für die Anlage hängen somit von der Stauraumnutzung und Stauraumregelungen ab und werden in der Regel vom Betreiber vorgegeben. Zur Ermittlung der Energieausbeute zu Zeiten, die dem Betriebszeitraum der Anlage entsprechen wurde die Photovoltaikanlage über den Winter aufgestellt und die Leistung erfasst. Die Ausrichtung und der Neigungswinkel der Anlage wurden hierbei auf den Aufbau während des Tests der Pilotanlage abgestimmt. Im Folgenden werden die in den Monaten Dezember bis März gesammeltem Daten dargestellt:

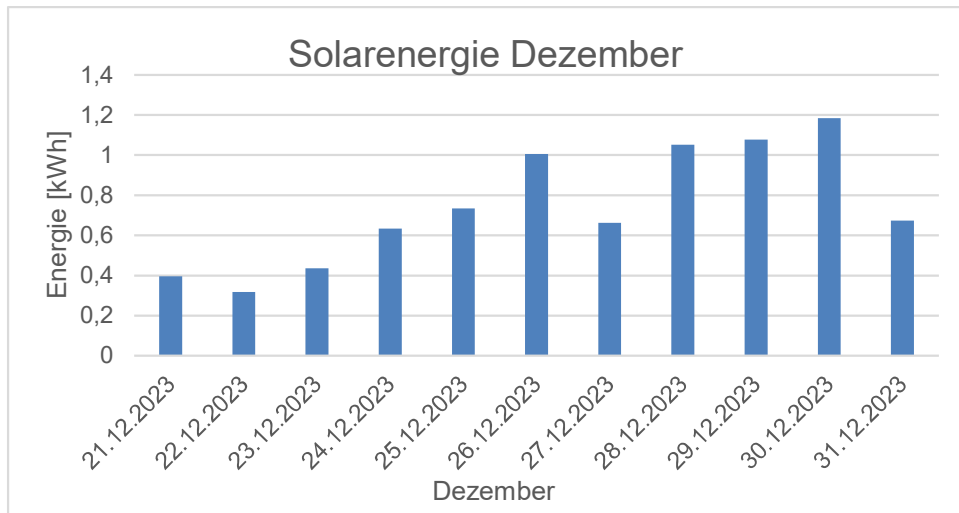


Abbildung 5: Solardaten Dezember

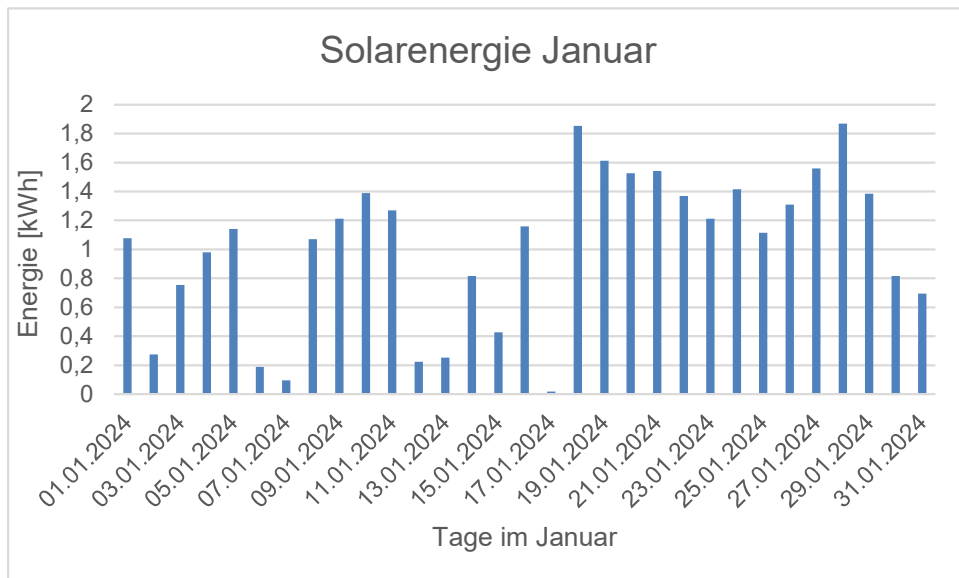


Abbildung 6: Solardaten Januar

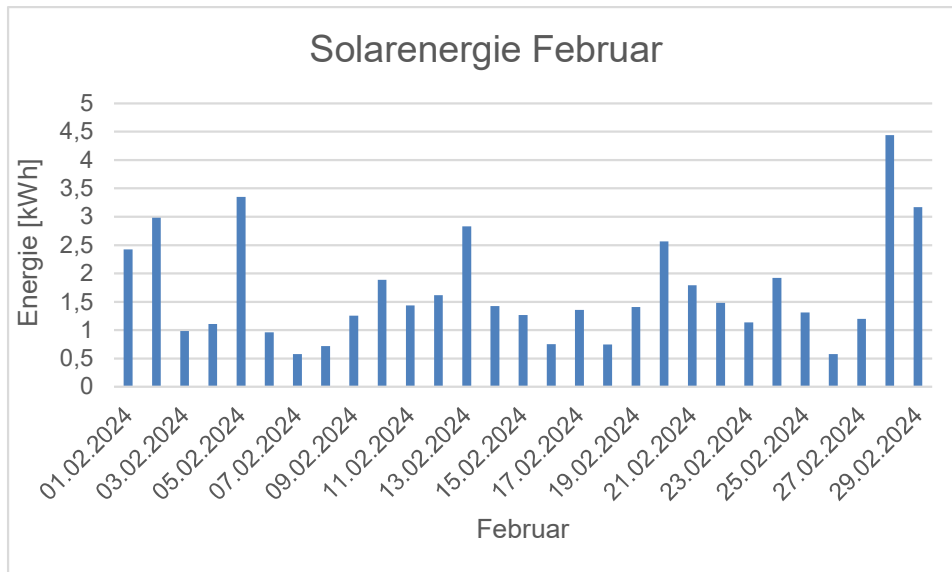


Abbildung 7: Solardaten Februar

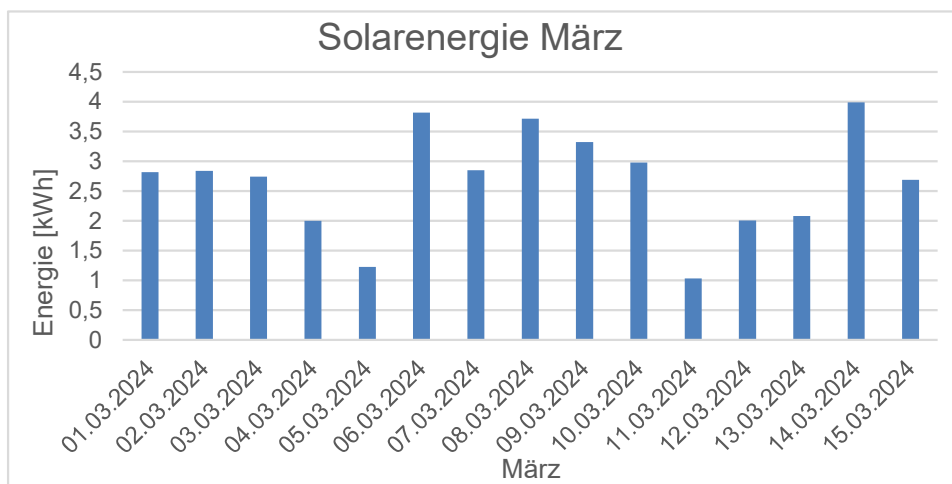


Abbildung 8: Solardaten März

Abbildung 5 zeigt die im Dezember 2023 akkumulierten Ertragsdaten der Solaranlage, wobei der maximale Ertrag am 30. Dezember mit 1,18 Kilowattstunden (kWh) verzeichnet wurde, während der minimale Ertrag am 22. Dezember mit 0,3 kWh gemessen wurde. Im Januar überstieg der durchschnittliche tägliche Energieertrag den des Vormonats um 1,02 kWh, mit einem Höchstertag von 1,87 kWh. Diese Daten für Januar 2024 werden in Abbildung 6 visualisiert. Weiterhin zeigt Abbildung 7 den Energieertrag im Februar, mit einem durchschnittlichen Tagesertrag von 1,68 kWh und einem Spitzenwert von 4,4 kWh, dies ist eine Steigerung im Vergleich zum Januar. Der Energieertrag im März, dargestellt in Abbildung 8, weist bis zum 15. März einen vorläufigen durchschnittlichen Tagesertrag von 2,68 kWh auf. Unter Berücksichtigung dieser vorläufigen Daten wird für März ein erhöhter Gesamtertrag prognostiziert, indem der durchschnittliche Tagesertrag auf den gesamten Monat hochgerechnet wird, was auf den höchsten Ertrag im Vergleich hinweist.

Zusammenfassend beläuft sich der kumulierte Energieertrag der Photovoltaikanlage für den beobachteten Zeitraum von Mitte Dezember 2023 bis Mitte März 2024 auf 128,62 kWh.

Zur Berechnung der benötigten Gesamtleistung der Anlage werden folgende Annahmen getroffen:

- 24 h pro Tag in Betrieb
- Benötigte Zeit für einen Zyklus der Absaugung bestehend aus Positionierfahrt (2 Minuten) → Absaugfahrt (10 Minuten) → Stationär absaugen (1 Minute) → Rückwärts und Ausweichen oder Nächste Reihe anfahren (2 Minuten) sind 15 Minuten
- Anzahl der Zyklen pro Tag:  $1440 \text{ Minuten} / 15 \text{ Minuten} \approx 96 \text{ Zyklen}$

Daraus ergeben sich die in Tabelle 7 dargestellten Berechnungen:

Tabelle 7: Berechnung Energieverbrauch der Anlage bei 24 h Betrieb

Zustand	Dauer pro Zyklus (Minuten)	Leistung (W)	Energie pro Zyklus (Wh)
Positionierfahrt	2	2150	107.5
Absaugfahrt	8	1980	264
Stationär absaugen	2	3980	132.67
Rückwärts und Ausweichen oder Nächste Reihe anfahren	2	2150	71.67
Gesamt	15		575.84
Gesamtleistung pro Tag	96 Zyklen $\times$ 575,84 Wh = 55280,64 Wh $\approx$ 55,3 kWh		

Somit verbraucht die Anlage an einem Tag 55,3 kWh. Der bisherige Spitzenwert der erzeugten Solarenergie pro Tag liegt bei 4,4 kWh im Februar, dies entspricht 7,96 % der benötigten Energie für die Anlage. Dabei ist zu beachten, dass im Sommer mit einem deutlich höheren Energieertrag zu rechnen ist. Weiterhin wurde bei diesem ersten Praxistest nur eine sehr begrenzte Fläche, die bereits genutzte Flä-

che der Plattform, verwendet, um keine weiteren Flächen zu beanspruchen. Technisch ist eine Vergrößerung der Solaranlage und somit eine Vervielfachung der Energieausbeute problemlos möglich. Eine Abwägung von Flächennutzung und Energieerzeugung muss an jedem Standort neu bewertet werden.

### 3.5.2 4b: Energiespeicherung

Die Speicherung von Solarstrom ist ein entscheidender Aspekt für die Effizienz und Zuverlässigkeit einer Photovoltaikanlage. Da Solarenergie nur tagsüber erzeugt wird und die Pilotanlage im kommerziellen Bereich 24 Stunden betrieben werden soll, ist die Speicherung von Solarstrom wichtig. Außerdem gibt es einzelne Zustände der Anlage, in denen weniger Energie verbraucht als durch die Solaranlage erzeugt wird (s. 3.5.1). Dadurch entsteht ein Energieüberschuss, der gespeichert werden muss.

Im Folgenden sind einige Möglichkeiten der Stromspeicherung aufgeführt:

1. Batteriespeicher: Eine Möglichkeit besteht darin, einen kleinen Batteriespeicher zu verwenden, der überschüssigen PV-Strom während des Tages speichert und diesen abgibt, wenn keine Sonne vorhanden oder die Stromnachfrage höher ist. Es gibt kompakte Lithium-Ionen-Batteriesysteme, die speziell für den Einsatz in Verbindung mit kleinen PV-Anlagen entwickelt wurden.
2. Netzgekoppeltes System mit Einspeisung: Wenn die PV-Anlage an das Stromnetz angeschlossen ist, kann überschüssige Energie ins Netz eingespeist werden. Dies ist keine direkte Speicherung, ermöglicht aber die Nutzung des Stromnetzes als "virtuellen Speicher".
3. Sonnenwasserstoff: Eine weitere Option ist die Verwendung von PV-Strom, um Wasser elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Der produzierte Wasserstoff kann gespeichert und später zur Stromerzeugung durch eine Brennstoffzelle genutzt werden. Diese Methode erfordert mehr Platz und Infrastruktur für die Speicherung des Wasserstoffs. (Hochwarth, 2023)
4. Kleine thermische Speicherlösungen: PV-Strom kann auch verwendet werden, um Wärme zu erzeugen, die in einem kleinen thermischen Speicher gespeichert wird. Diese Wärme kann zur Warmwasserbereitung oder Raumheizung genutzt werden. Dies erfordert jedoch eine entsprechende Infrastruktur für die Wärmespeicherung.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Auswahl der geeigneten Speicherlösung von verschiedenen Faktoren abhängt, darunter die Größe der PV-Anlage, die verfügbare Fläche, örtliche Vorschriften und Sicherheitsaspekte. Eine gründliche Analyse

der Anforderungen und Möglichkeiten kann dazu beitragen, die beste Lösung für die Stromspeicherung zu finden.

Während des Tests der Pilotanlage befinden sich die Solarmodule auf dem Wasser auf der Pilotanlage. Aufgrund des Gewichts und der Gefahr, dass die Geräte mit Wasser in Kontakt kommen, werden alle zur Photovoltaikanlage gehörenden Elemente, abgesehen von den Solarmodulen, in einer Landstation gelagert. Da der Platz in der Landstation begrenzt ist, wurde für die Speicherung der Energie nach einer kompakten Lösung gesucht. Daher wurde sich für eine Speicherung des Stroms mit einer Lithium-Ionen-Batterie von Liontron entschieden. Diese benötigt im Vergleich zu den anderen Varianten nur wenig Platz und konnte bei Kauf der Photovoltaikanlage als Paket in passender Größe hinzugefügt werden.

### 3.6 AP5: Grundkonzept Modularisierung

Im Rahmen des Projekts wurde ein Konzept zur Modularisierung der Anlage erarbeitet welches nachfolgend beschrieben ist. Die wesentlichen Schritte der Anlage in diesem Projekt lassen sich in sieben Hauptfunktionen aufteilen:

- Gas-Sediment-Aufnahme
- Positionierung
- Gasverwertung
- Gasmessung
- Gasabscheidung
- Erneuerbare Energieversorgung
- Grundgerüst

#### 3.6.1 Vorgehen der Modularisierung

Die Modularisierung wurde nach dem Schema der VDI 2776-1 umgesetzt. Zunächst wurden die verschiedenen möglichen Anforderungen, welchen die Anlage ausgesetzt wird, aufgelistet. Anschließend wurde das vorhandene Grundfließbild auf eine Kapselung möglicher FEAs (Functional Equipment Assembly, modulare Funktionseinheit = Module) untersucht, mit dem Ziel die generelle Funktion, welche die FEAs erfüllen zu definieren. Die genauen Funktionen für die Steuerung, welche später in einer POL (Process Orchestration Layer, Prozessführungsebene) sichtbar wären, wurden nicht festgelegt, um eine Implementation der Steuerung dem Detailengineering der Module nicht vorwegzunehmen. Eine POL ist ein übergeordnetes Steuerungs- und Managementsystem einer modularen Anlage. Die Funktion dieser ähnelt einem Prozessleitsystem.

Die sieben FEAs bzw. Module wurden festgelegt und die Komponenten der aktuellen Version der Anlage den FEAs zugeordnet.

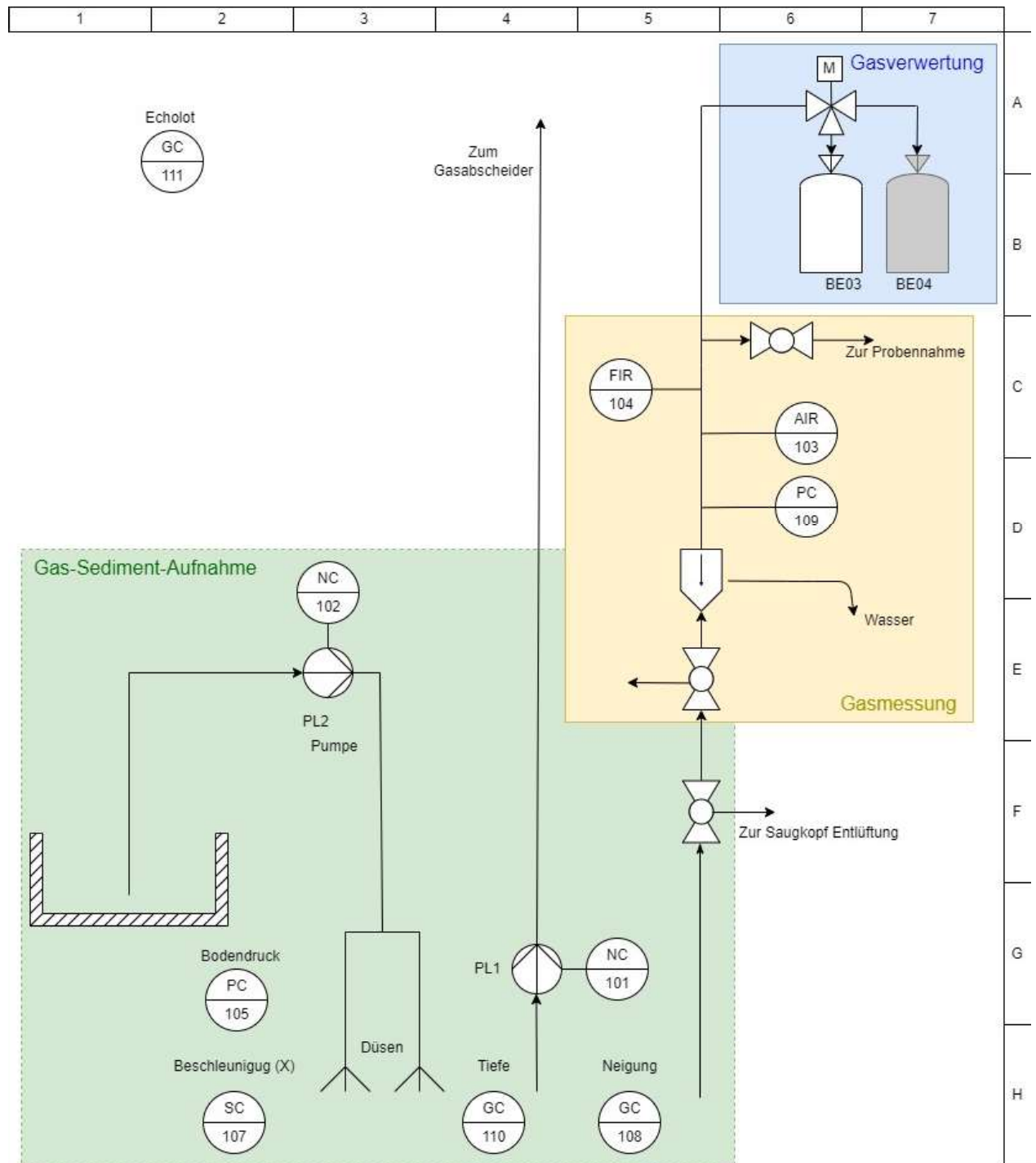
### 3.6.2 Motivation für die Modularisierung

Es besteht ein wachsender Bedarf an Weiterentwicklungen verfahrenstechnischer Systeme. Der modulare Aufbau einer Anlage verkürzt die Planungszeiten für Neuinstallationen oder die Sanierung bestehender Anlagen. Erreicht wird dies durch das "Plug and Produce"-Prinzip, das die Montage von Neuanlagen durch die Integration verschiedener modularer Komponenten ermöglicht und somit auf herkömmliche Planungsmethoden verzichtet. Die daraus resultierenden Vorteile umfassen eine kurze Time-To-Market, eine schnelle Time-To-Repair und eine individuelle Produktion kleinerer Chargen. Die schnelle Time-To-Repair ist auf die Austauschbarkeit von Modulen bei wartungsintensiven Schäden durch Austausch mit äquivalenten Modulen zurückzuführen. (VDI/VDE/NAMUR 2658-1, 2022)

Die Fähigkeit, ein System aus verschiedenen Modulen zusammenzubauen, erfordert eine erhöhte Investitionsbereitschaft, insbesondere aufgrund der begrenzten Marktprävalenz dieses Ansatzes. Neben Automatisierungslösungen sind neuartige Konzepte erforderlich, um die modulare Beschaffenheit der Anlage zu gewährleisten. Trotz der damit verbundenen erhöhten Investitionskosten wird aufgrund der verkürzten Entwicklungszeit ein schnellerer positiver Cash Conversion Cycle (CCF) erwartet. Diese Kennzahl gibt eine Zeitdauer an, bis die Investition in einen Eingang von Kundenzahlungen umgewandelt wurde. (NAMUR Empfehlung NE 148, 2023)

Neben den allgemeinen Vorteilen der Modularisierung stellen aquatische Umgebungen vielfältige Anforderungen an die Plattform und das System. Dies ist vor allem auf die notwendige Anpassung des Systems an die vorherrschenden Umweltbedingungen zurückzuführen. Darüber hinaus wird die Leistungsfähigkeit der Anlage anpassbar, um z. B. eine größere Fläche zu bearbeiten oder mehr Sediment zu fördern.

Im Folgenden werden farblich markiert die sieben Module dargestellt. Das Modul Grundgerüst ist nicht dargestellt, da dieses keine Rohrleitungen oder Instrumente beinhaltet.




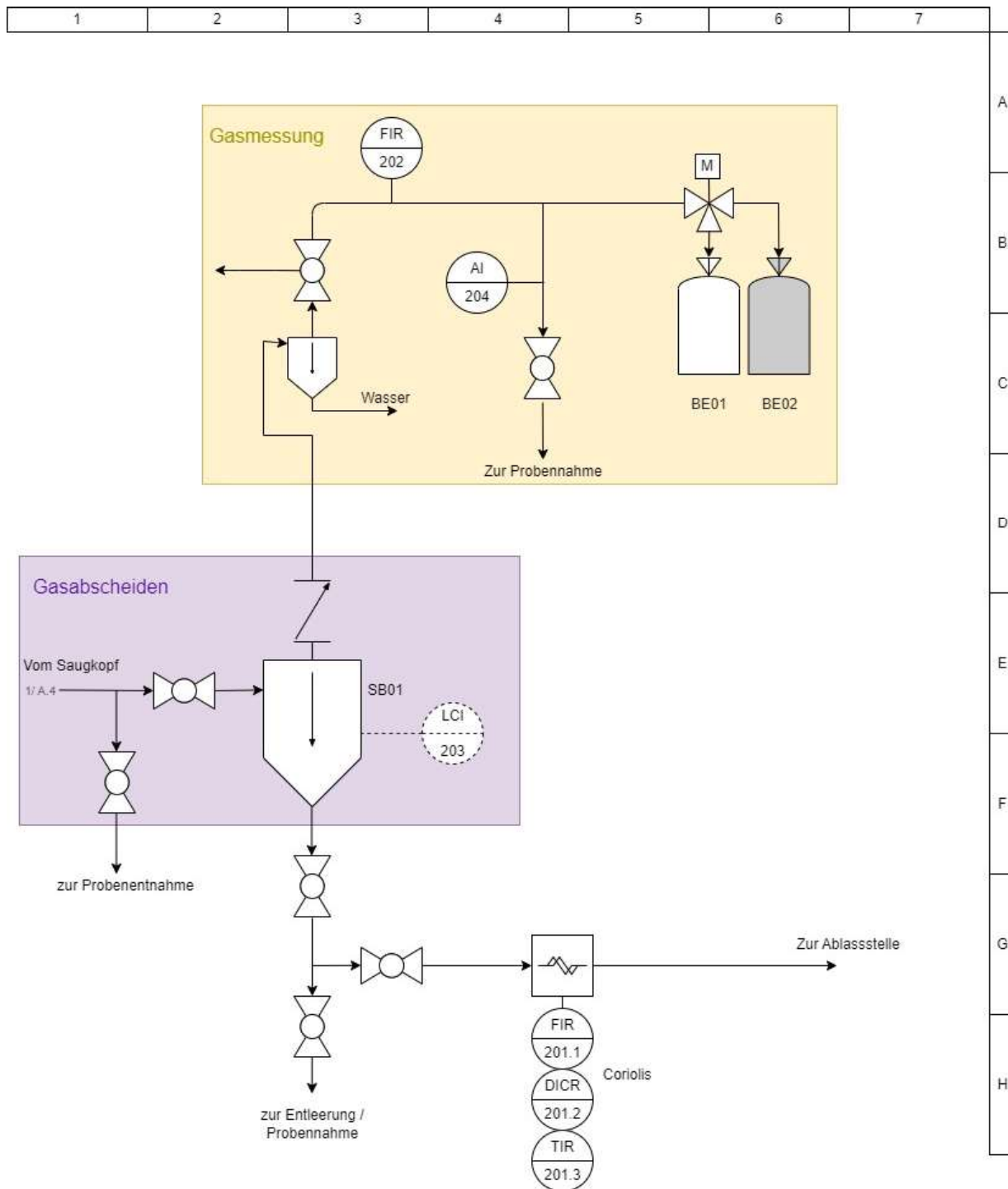
Anlage:	MinGAS-Projekt	18.01.2024
Teilanlage:	Plattform	
	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema	Autor: Vigneswaran
	Sachnummer:	Seite: 1 von 3
		Version 1.0

Abbildung 9: Module Gasverwertung, Gasmessung, Gas-Sediment-Aufnahme






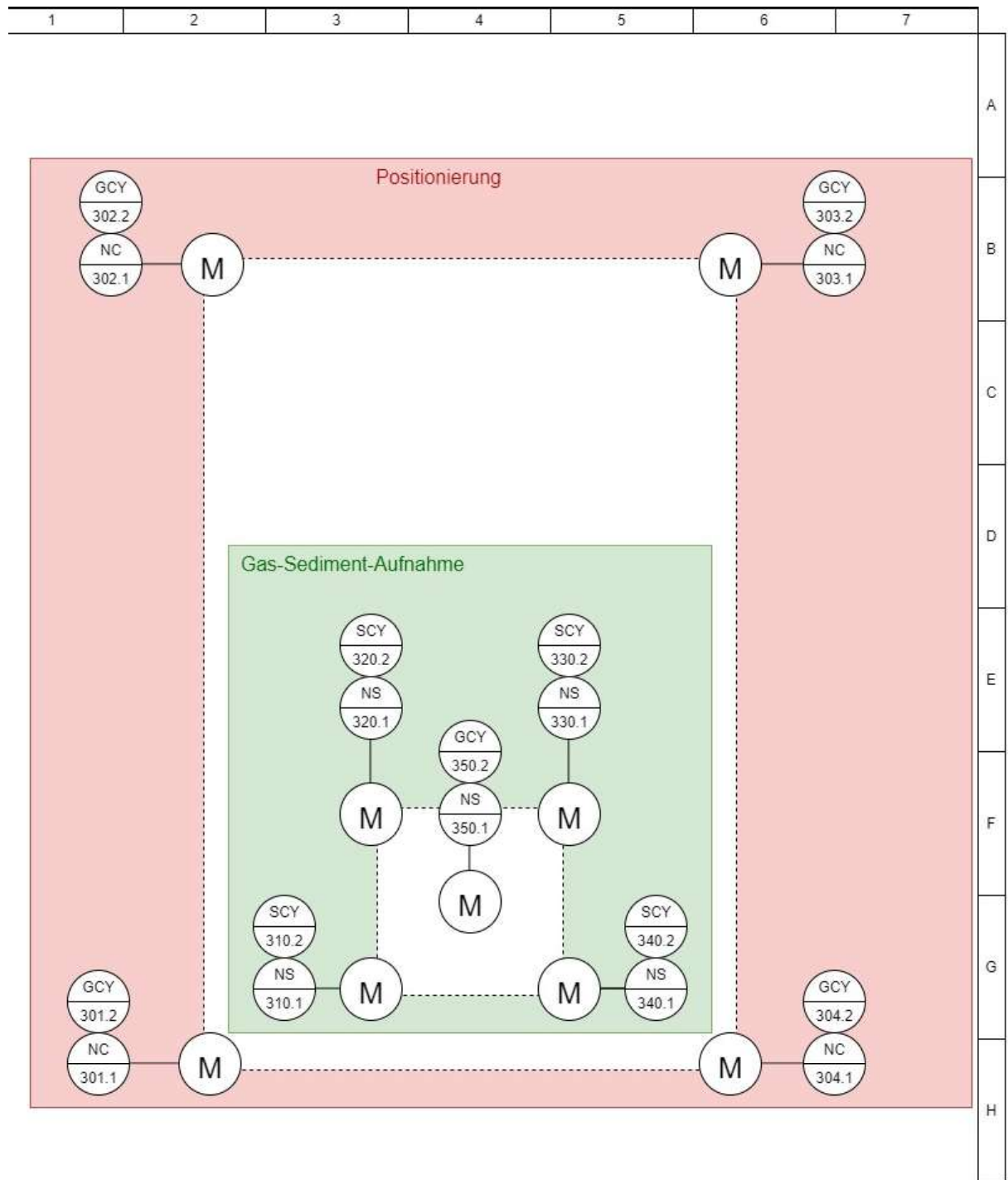
Anlage:	MinGAS-Projekt	18.01.2024
Teilanlage:	Uferstation	Prüfer:
	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema	Autor: Vigneswaran
	Sachnummer:	Seite: 2 von 3
		Version 1.0

Abbildung 10: Module Gasmessung, Gasabscheiden




Anlage:	MinGAS-Projekt	18.01.2024
Teilanlage:	Seilwinden	Prüfer:
 Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema Sachnummer:	Autor: Vigneswaran	Seite: 3 von 3
	Version 1.0	

Abbildung 11: Module Positionierung, Gas-Sediment-Aufnahme

## 3.7 AP6: Praxistest der Anlage

### 3.7.1 Praxistest

Im Zeitraum vom 04.09-26.09.2023 wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts ein Praxistest an der Wupper-Vorsperre durchgeführt. Während dieses Praxistests wurde die in vorangegangenen Projekten weiterentwickelte Anlage in ihrer neuen Form erstmals aufgebaut. Zu den neuen Komponenten zählen eine Uferstation, Solarmodule, Saugkopfpositionierung und weitere automatisierungstechnische Anlagenkomponenten.

Der Aufbau der neuen Plattform und Uferstation mit den neuen Komponenten sowie die Testung dieser im Handbetrieb beanspruchten viel Zeit. Daher wurde an vier Tagen (18.09.-21.09.2023) mit der Plattform verfahren. Am 18.09.2023 war ein Filmteam von Servus TV vor Ort, zur Aufzeichnung eines Filmbeitrags im deutschen und österreichischen Fernsehen (s. 4.2). An den anderen drei Tagen wurden insgesamt 9 Fahrten mit der Plattform unternommen. Das Wetter während der vier Tage war bewölkt bei ca. 20°C, der Wasserstand am Pegel Hückeswagen lag bei ca. 25 cm, was einem erhöhten mittleren Niedrigwasser entspricht. Das letzte große Regenereignis war Mitte Juli 2021, bei dem auch die Wuppertalsperre voll eingestaut wurde. Danach wurde Mitte Januar 2023 der Pegel kurzzeitig für ein mittleres Hochwasser überschritten. Somit gab es zwischen den letzten Praxistests 2021 und diesem Praxistest keine größeren Hochwasserereignisse.

### 3.7.2 Umbaumaßnahmen

Die Anlage wurde in eine Plattform und eine Uferstation aufgeteilt, um das Gewicht auf der Plattform zu reduzieren und im Falle einer Beschädigung den wirtschaftlichen Verlust zu minimieren. Die Uferstation bietet den zusätzlichen Vorteil, dass schwere Komponenten wie das Coriolis Messgerät, sowie der Gasabscheider nicht auf die Plattform gehoben werden müssen, was den Einsatz eines Krans nicht mehr notwendig macht und den Aufbau erleichtert. Des Weiteren ist die Uferstation von einem Layher-Schutzgerüst umgeben, was eine sichere Lagerung der Anlagenkomponenten wie die neue Solaranlage, Werkzeug und das Schlauchboot ermöglicht. Außerdem wird die Arbeitssicherheit erhöht, da eine Präsenz auf der Plattform nicht mehr notwendig ist. Die Abbildung 12 zeigt die neue Uferstation.



Abbildung 12: Uferstation

Durch die Segmentierung der Anlage in zwei Bereiche wurde eine zusätzliche Gasmessstrecke erforderlich. Eine Messstrecke diente der Erfassung des Gases aus dem Sediment-Methan-Aufnahmeeinheit, während die andere für das Gas aus dem Gasabscheider genutzt wurde. Beide Messstrecken waren ähnlich aufgebaut, bestehend aus einem Wasserabscheider, einem Durchflussmessgerät (das aufgrund langer Lieferzeiten nicht getestet werden konnte) und einem Gerät zur Analyse der Gaszusammensetzung.

Zur präzisen Positionierung der Modellanlage auf dem Gewässer wurden vier Seilwinden und Winkelmesser installiert. Die Seilwinden verhindern eine unkontrollierte Verschiebung im stromlosen Zustand und erweitern den abgedeckten Fahrbereich auf dem Staukörper erheblich im Vergleich zu einer Seilwinde, die in den Vorgängerprojekten eingesetzt wurden. Dabei fand die Verfahrnung in Transekten, statt. Nachdem ein Transekt abgefahren war, mussten die Seilwinden, welche an Bäumen verspannt waren, umgespannt werden, um das nächste Transekt zu befahren. Dieser Arbeitsschritt ist nach der Installation der vier Seilwinden nicht mehr notwendig. Außerdem wird das Staugewässer flächenhaft befahren und die Redundanz erhöht, was im Falle eines Motorsausfalls eine sichere Rückkehr in die Grundstellung ermöglicht. Die Stirnradgetriebemotoren der Firma Getriebebau Nord können vorwärts und rückwärts betrieben werden und erreichen eine Motordrehzahl von 1.370/min bei einer Leistung von 0,12 kW pro Motor. Die Seiltrommeln bestehen aus Edelstahl und sind somit für den Einsatz im Freien geeignet.

Die Winkelmesser werden zur Bestimmung der Winkel des Seils relativ zur Plattform verwendet. Dazu müssen vor Beginn der Verfahrung die Ankerpunkte der Seile eingemessen werden. Danach wird die Position der vier Ankerpunkte für das Vorgehen als bekannt vorausgesetzt. Zum Anfahren eines Zielpunkts wird am Human-Machine-Interface (HMI), welches in diesem Fall durch ein Bedienpanel realisiert wurde, eine Zielkoordinate eingegeben. Die Software berechnet das benötigte Drehzahlverhältnis der Motoren und steuert diese an, wodurch die Zielkoordinate angefahren wird. Diese Verfahweise ermöglicht eine genaue und sichere Positionierung auf dem Stausee.

Während des Praxistests wurde die Verfahweise getestet, jedoch konnten die Winkel durch die Winkelmesser nicht ausreichend präzise gemessen werden. Eine automatisierte Verfahrung war nicht möglich. Für zukünftige Projekte wurde deshalb eine alternative Möglichkeit zur Positionierung der Plattform recherchiert und ein vielversprechender Lösungsweg identifiziert (s. 3.2).

Die neu beschafften Solarmodule wurden erstmals mit der Anlage aufgebaut, siehe Abbildung 13. Sie wurden auf der Plattform platziert, um Verschattungen zu minimieren und mehr Fläche für die Anlage zu gewinnen. Die Ausrichtung der Solarmodule erfolgte nach Süden ( $0^\circ$  Azimutwinkel) mit einem Neigungswinkel von 20 Grad, was als optimale Ausrichtung in Deutschland betrachtet wird. Batterie und Wechselrichter wurden witterungsgeschützt in der Uferstation gelagert.

Während des Praxistests konnten keine Solardaten gesammelt werden, da einer der Steckverbinder am Solarkabel defekt war, jedoch wurde die Solaranlage nach Abschluss des Praxistests auf einer Freifläche installiert, um Daten für zukünftige Projekte zu sammeln.



Abbildung 13: Plattform auf dem Wasser mit Solarmodulen

Ein Problem, das während der letzten Praxistests auftrat war, dass ein Sieb, welches zwischen Gasabscheider und Ventil eingebaut ist, nach jedem befahrenen Transekt verstopft war. Um eine Möglichkeit zur Verminderung der Verstopfung zu erlangen wurden Laborversuche durchgeführt. Dabei wurde mittels Farbtracern der Strömungsverlauf analysiert. Das Wasser-Sediment-Gas-Gemisch strömte in den Vorgängerprojekten durch ein nach oben Richtung Sieb gerichtetes Rohr in den Gasabscheider. Im dem Gasabscheider wird durch den Dichteunterschied das Gas abgetrennt. Dieses steigt auf und wird durch ein Ventil in die Gasmesstrecke geleitet. Das Sediment wird durch die nach oben gerichtete Strömung des Wassers gegen das Sieb gedrückt, welches verstopft. Während der Versuche wurde das Rohr um 60° im Uhrzeigersinn gedreht, sodass das Wasser mit dem Sediment seitlich eingeleitet wird und die Strömung des Wassers das Sediment nicht mehr gegen das Sieb drückt. Hierdurch konnte die Situation deutlich verbessert werden. Ein Verstopfen trat deutlich seltener auf, konnte aber nicht vollständig vermieden werden. Für eine Lösung des Problems müssen weitere Laborversuche durchgeführt werden. Die Abbildung 14 zeigt den Strömungsverlauf des Wasser-Sediment-Gemisches im Gasabscheider vor und nach der Umstellung des Rohres.

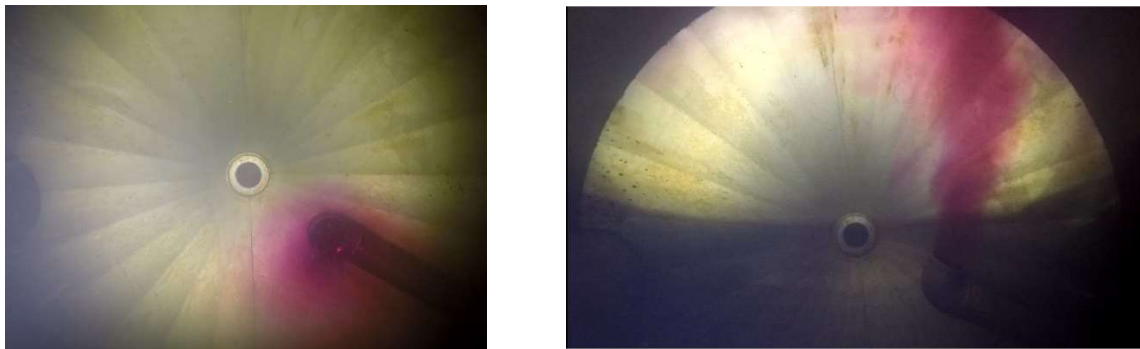


Abbildung 14: Das Innere des Gasabscheiders vor und nach der Umstellung des Rohres

### 3.7.3 Messungen

Kontinuierlich gemessen wurden während des Praxistests an zwei Tagen (20./21.09.2023) die verlagerte Sedimentmenge und das Sedimentvolumen mit Hilfe des Massendurchfluss-Messgerätes OPTIMASS 7400 der Firma Krohne. Nach Abschluss des Praxistests wurde weiterhin die Menge des gesammelten Gases, anhand eines thermischen Direktstrom Massendurchflussmessers (MFM) D6360 der Firma Bronkhorst ermittelt, sowie der Methangehalt mit einem Bio-gas5000-Messgerät der Firma Geotech gemessen.

Die Dichte des Sedimentes mehrerer Proben aus der Wupper-Vorsperre wurde bereits in einem früheren Projekt (MELINU: Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Elimination und energetischen Nutzung von Methangas aus Stauräumen) mittels Pyknometer-Messer bestimmt. Der Mittelwert aller Ergebnisse ergab eine

Rohdichte der Feststoffe (inkl. Organik) von  $2.039 \text{ kg/m}^3$ . Für die Bestimmung der verlagerten Sedimentmasse und -volumina aus den Messdaten des Coriolis Massendurchflussmessers, wird diese Dichte herangezogen.

Während der beiden aufgezeichneten Datenerfassungstage, die eine aggregierte reine Fahrtzeit von insgesamt 10 Stunden umfassten, wurden die in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse konsolidiert und dokumentiert.

Tabelle 8: Ergebnisse Praxistest 2023

	Einheit	Praxistest 2023
Geförderte Wasser-Sedimentmasse	[t]	100
Gefördertes Wasser-Sedimentvolumen	[m <sup>3</sup> ]	84,36
Verlagerte Feststoffmasse	[kg]	433
durchschnittlicher Sediment-Massendurchfluss	[kg/h]	47,71
gefördertes Sedimentvolumen	[m <sup>3</sup> /h]	0,02

Das Gas wurde während des Praxistests nicht nach Gasgehalten getrennt gesammelt, da die bestellten Ventile, erst nach den Praxistest eingetroffen sind. Ein erfolgreicher Test der Ventile konnte aber im Anschluss des Praxistests im Labor durchgeführt werden (s. 3.3). Das während dem Praxistest gesammelte Gas im Gasbag hatte die in Abbildung 15 dargestellte Zusammensetzung:

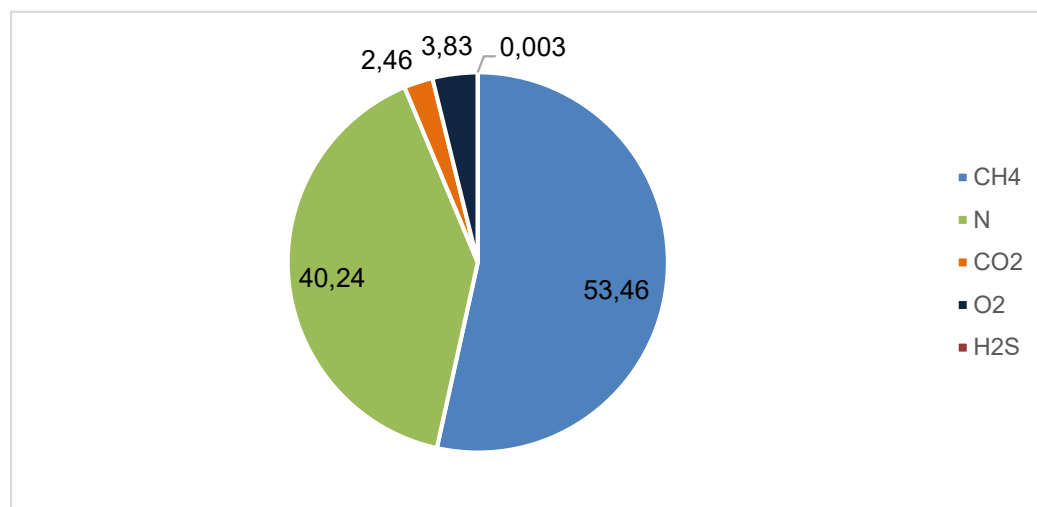


Abbildung 15: Gaszusammensetzung Praxistest 2023

Das Volumenstrommessgerät, das zur Erfassung des Gasvolumenstroms verwendet wurde, verfügt über eine Genauigkeit von  $\pm 1,5$  % des maximalen Volumenstroms. Die Messungen werden entsprechend des in der Kalibrierung festgelegten Gases oder Gasgemisches umgerechnet. Während der Labormessungen erfolgte die Kalibrierung des Messgeräts auf ein Gasgemisch bestehend aus 55 Vol-% CH<sub>4</sub>, 40 Vol-% N<sub>2</sub> und 5-Vol % O<sub>2</sub>, bei einem Volumenstrom von 70 l<sub>s</sub>/min, einer Temperatur von 20,0°C und einem relativen Druck von 0,0 bar (g). Da die erfassten Messwerte im Bereich von 50-55 % lagen, wurden keine Korrekturfaktoren in der Auswertung angewendet. Die ermittelten Gas- und Methanmengen, die während des Praxistests gesammelt wurden, sind in der folgenden Tabelle 9 aufgeführt:

Tabelle 9: Ermittelte Gas- und Methanmenge

	<b>Menge nach Mittelwert Methangehalt [l<sub>s</sub>]</b>
Gas	476,49
Methan	254,73

Die erzielten Gesamtmengen und -volumina, dargestellt in Tabelle 10, können unmittelbar verglichen werden, da die Verlagerung im gleichen Gewässerabschnitt erfolgte. In den Praxistests der Jahre 2020 und 2021 wurden zwischen 107-149 kg/h Feststoff verlagert. Während dieses Praxistests wurden 43 kg/h verlagert. Dies ist deutlich weniger als in den Vorgängerprojekten. Auch wurde weniger Gasvolumen gesammelt. In den Vorjahren lag das gesammelte Gasvolumen bei 41-96 l/h, während es in diesem Praxistest bei 34 l/h lag. Zusammenfassend wurde während dieses Praxistests sowohl insgesamt als auch pro Betriebsstunde eine geringere Menge an Feststoffen und Gasen verlagert bzw. gesammelt. Hauptursache hierfür ist, dass das Hauptaugenmerk während dieses Feldtests auf der Automatisierung der Anlage, nicht jedoch auf der Effektivität der Sammlung lag.

Ein Vergleich mit Praxistests aus früheren Projekten zeigt, dass der Methangehalt im Gas von 51,56 % im Jahr 2021 auf 53,46 % im Jahr 2023 angestiegen ist. Dies kann auf eine längere Pause zwischen den Versuchen und auf die natürliche Variabilität des Gasgehalts zurückgeführt werden. Die Praxistests der Jahre 2020 bis 2023 sind in Tabelle 10 zusammengefasst.



Tabelle 10: Vergleich Praxistests

	<b>Ein- heit</b>	<b>Praxis- test 2020</b>	<b>1.Praxis- test 2021</b>	<b>2.Praxis- test 2021</b>	<b>Praxistest 2023</b>
Anzahl Befahrungen der Transekte		7	12	19	6/9
Betriebszeit	[h]	8,87	23,73	32,40	10,10/14,18
Zeit pro Transekte	[h]	1,27	1,98	1,71	1,68/1,58
Feststoffmasse/Be- triebszeit	[kg/h]	123,0	148,6	107,3	42,90
Gasvolumen/Betriebs- zeit	[l/h]	41,49	96,08	72,62	33,9
Mittlerer Methangehalt	[%]	63,41	55,72	51,56	53,46
Methanvolumen/Be- triebszeit	[l/h]	26,27	53,52	37,4	18,28
Gasvolumen pro Tran- sekte	[l]	123	760	471	53
Gasvolumen pro Be- fahrung	[l]	53	190	124	53

Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass am rechten Ufer deutlich mehr aufsteigende Gasblasen mit bloßem Auge erkennbar waren als am linken Ufer. Diese Beobachtung ist konsistent mit den Daten aus früheren Projekten, in denen der Gasvolumenstrom am rechten Ufer signifikant höher war als am linken Ufer. Auch das Gasmonitoring, bei dem der Gasgehalt im Sediment gemessen wurde, zeigt einen größeren Gasgehalt am rechten Ufer.

## 3.8 AP7: Synthese/Veröffentlichung

### 3.8.1 Präsentationen

- Präsentation der Projektergebnisse bei dem Wupperverband (11.03.2024)
- Poster-Präsentation auf der LET2024: 19th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies (24.06 - 28.06.2024)

### 3.8.2 Sonstiges

- Zeitungsbericht: Welt am Sonntag, 19.11.2023: Fasel, A.: Von Grund auf erneuern
- Fachzeitschriftartikel: Brand eins, November 2023: Dahmann, F.: Der Seesauger, S.125
- Fernsehbeitrag: Servus TV P.M. Wissen Beitrag vom 02.11.2023: Was können wir gegen Methan in Stauseen tun?
- Abschlussarbeit: Phung, Q.V. (2023) Entwicklung des Planungsprozesses für funktionale Sicherheit und Explosionsschutz einer Anlage. Köln
- Abschlussarbeit: Kühl, F. (2023) Entwicklung einer modularen Automatisierungsstruktur für eine mobile Anlage und NOA konforme Bereitstellung von Prozessdaten. Köln
- Praxisprojekt: Kühl, F. (2022) NOA konforme Ankopplung verteilter Automatisierungssysteme an Übergeordnete Informationsplattformen. Köln
- Abschlussarbeit: Weber, L.J. (2023) Konzeptentwicklung für die Modularisierung einer verfahrenstechnischen Anlage. Köln
- Wissenschaftliches Projekt: Kaufhold, L.M. (2024) Konzeption eines Messaufbaus zur Bestimmung des Gasgehalts in Sedimenten. Köln

## 4 Fazit und Ausblick

Das Projektvorhaben verfolgte das Ziel, der Problematik der Sedimentation in Stauräumen durch die Entwicklung eines modularen, energieautarken Systems entgegenzuwirken.

Durch die Automatisierung einzelner Module, wie der Sediment-Methan-Aufnahmeeinheit, der Gasmessstrecke, sowie der Gasspeicherung und dem Einsatz neuer Messtechnik wurde sowohl eine kontinuierliche Sedimententfernung als auch eine Erfassung und Separierung des freigesetzten Methans ermöglicht. Eine Kopplung der Automatisierung an die Messdaten war nicht möglich, dies bedarf in Zukunft einer weiteren Ausarbeitung. Weiterhin konnte der Personalaufwand, zum Betrieb der Pilotanlage, deutlich reduziert werden. Die Automatisierung ermöglicht ein teilweise autonomes Verfahren, das nicht nur effizient ist, sondern auch die Betriebssicherheit erhöht.

Die bereits im Vorgänger Projekt entwickelte Aufteilung der Anlage in eine Uferstation und der Plattform auf dem Gewässer, konnte in diesem Projekt erfolgreich getestet und verbessert werden. Außerdem können witterungs-, sowie wasserempfindliche Anlagenkomponenten sicher in der Uferstation gelagert werden. Auf der Plattform selbst wird, durch die Verringerung einzelner Anlagenkomponenten, das Gewicht reduziert, was zusätzlichen Spielraum für die Implementierung weiterer Automatisierungskomponenten schafft. Zusätzlich wird durch die Aufteilung die Arbeitssicherheit erhöht, da das Personal nicht präsent sein muss auf der Plattform.

Durch den Umbau der Verfahrung von einer Winde auf vier Seilwinden ist ein Umspinnen der Seile nicht mehr notwendig, wodurch Zeit und Personal gespart wird. Weiterhin kann ein größerer Bereich des Staugewässers bearbeitet werden.

Der Einsatz von Solarmodulen ermöglicht zusammen mit dem Potential, das aufgefangene Gas zu nutzen, einen Strommix aus erneuerbaren und fossilen Energien, wodurch die Anlage im Hinblick auf die Energieversorgung zunehmend autonomer wird. Der gezielte Ausbau der Kapazitäten für erneuerbare Energien trägt darüber hinaus zur Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen bei und steigert den Autarkiegrad der Anlage. In Zukunft sind eine größere Solaranlage, sowie weitere erneuerbare Energiequellen denkbar, um eine vollständige Autarkie der Anlage zu erreichen.

Die Integration von energieoptimierten Betriebsweisen führt zu einer gesteigerten Energieeffizienz. Dies wird u.a. durch den Einsatz von drehzahlveränderlichen Antrieben erreicht, wodurch der Arbeitspunkt der angetriebenen Maschine in energieeffizientere Bereiche verschoben werden kann. Weiterhin markiert die Implementierung des Modbus-Protokolls zur Ansteuerung der Frequenzumrichter einen wesentlichen Schritt hin zu einer verbesserten Systemsteuerung und Transparenz.

Eine Quantifizierung dieser ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Durch Anpassungen in der Koordinationssteuerung konnten unterschiedliche Betriebsmodi realisiert werden, die eine effiziente Verteilung des Energiebedarfs ermöglichen.

Des Weiteren hat die Anpassung der Software-Schnittstellen und die Integration von Gewässertestdaten in die Automatisierungstechnologie wichtige Erkenntnisse geliefert, die direkt in die Konzeption und Umsetzung der Anlage einfließen. Die Erkenntnis, dass die Positionierung mit den bestehenden Winkelmessern nicht ausreichend präzise ist, führte zu einer Recherche alternativer Verfahren mit dem Ergebnis, dass ein GNSS-System am geeignetsten ist. Zukünftig muss dieses in Verbindung mit der Positionierung der Plattform getestet werden.

Das erarbeitete Konzept der Modularisierung bietet erhebliche Vorteile in Bezug auf die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Anlage an unterschiedliche Einsatzbedingungen und ermöglicht eine effiziente Durchführung der Sedimentabtragung. Dieses Konzept soll in weiteren Forschungsprojekten angepasst und in der Praxis getestet werden.

Zusammenfassend hat das Forschungsprojekt wichtige Erkenntnisse und Entwicklungen in der automatisierten Sedimentabtragung und Gasaufnahme erbracht. Durch die Analyse und Weiterentwicklung der verschiedenen Komponenten sowie durch die Implementierung innovativer Ansätze in der Energieeffizienz und Automatisierungstechnik wurde ein bedeutender Beitrag zur Forschung in diesem Bereich geleistet. Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind jedoch erforderlich, um die Technologie zur Marktreife zu führen und ihre breite Anwendbarkeit zu gewährleisten. Dazu zählen im Wesentlichen, neben der Umsetzung des entwickelten Modularisierungskonzeptes, die Kopplung der Automatisierung an die Messdaten zur Optimierung des Gesamtanlagenbetriebes, der weitere Ausbau eines regenerativen Energiemixes zur zukünftigen Energieautarkie, sowie die Optimierung des Positionierungsverfahrens mittels GNSS-Empfänger.

## 5 Literaturverzeichnis

- Esri Deutschland GmbH. (2022). *ArcGis*. Von <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html> abgerufen
- Fonseca, S. (2024). *Wie viel Strom erzeugt eine Solaranlage?* Von Gruenes Haus: <https://gruenes.haus/wie-viel-strom-erzeugt-eine-solaranlage/#:~:text=Die%20Jahreszeit,15%2D40%20kWh%20pro%20kWp> abgerufen
- Hochwarth, D. (24. Juli 2023). *Wasserstoff aus Sonnenlicht: US-Forschende stellen Rekord auf*. Von Ingenieure.de: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/wasserstoff-aus-sonnenlicht-us-forschende-stellen-rekord-auf/> abgerufen
- IPCC, H. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK und New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- NAMUR Empfehlung NE 148. (Oktober 2023). Anforderung an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen. NAMUR.
- Rosentreter, J., Borges, A., Deemer, B., Holgerson, M., Liu, S., Song, C., . . . Eyre, B. (2021). *Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources*. Von Nature Geoscience, 14(4), 225-230. ISSN 1752-0894: doi:10.1038/s41561-021-00715-2 (Zugriff am 15.04.2024) abgerufen
- Umweltbundesamt. (2024). *Erneuerbare Energie*. Von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie> abgerufen
- VDI/VDE/NAMUR 2658-1. (Januar 2022). *Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Technische Hochschule Köln  
Gustav-Heinemann-Ufer 54  
50968 Köln  
[www.th-koeln.de](http://www.th-koeln.de)

**Technology**  
**Arts Sciences**  
**TH Köln**

Sediment Works GmbH  
Weberstraße 10  
59368 Werne  
[www.sedimentworks.de](http://www.sedimentworks.de)

**SedimentWorks**

Gefördert durch:

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)