



FG Siedlungswasserwirtschaft

Abschlussbericht



Potenzialanalyse zur klima- und umweltverträglichen, autarken Ver- und Entsorgung (Energie - Wasser - Abfall) kleiner Ostsee-Inseln am Beispiel der Insel Ruden

Autoren:

**Dipl.-Ing. S. Rettig
Prof. Dr.-Ing. M. Barjenbruch
Prof. Dr. M. Bierhoff**

**Unter Mitwirkung von
R. Behn, R. Schweizer, J. Steffens, M. Hayduk**

Gefördert von DBU

Aktenzeichen: 31745/01

Berlin, September 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Historie und gegenwärtige Nutzung der Insel, zukünftiges Potential.....	6
1.2	Projektziele	6
2	Grundlagenermittlung.....	9
2.1	Wasserbedarfsermittlung	9
2.2	Trinkwassergewinnung.....	11
2.3	Abwasserbehandlung.....	13
2.4	Sanitäranlagen	15
2.5	Pumpen.....	16
2.6	Energiebedarf.....	17
2.7	Möglichkeiten der Versorgung mit elektrischer Energie	18
3	Methodik.....	22
3.1	Definition der Szenarien der Wasserversorgung und Abwasserverwertung.....	23
3.1.1	Szenario 1-Konventionell	23
3.1.2	Szenario 2 -Stoffstromtrennung.....	25
3.1.3	Szenario 3 -Rezirkulation der Wasserströme	28
3.2	Beschreibung zur Modellierung der Energieszenarien.....	32
3.2.1	Notwendige Datengrundlage Modellierung.....	34
3.2.2	Photovoltaik	34
3.2.3	Windkraftanlage	37
3.2.4	Energieverbrauch.....	39
3.2.5	Warmwasserverbrauch	42
3.2.6	Energiespeicher	43
3.2.7	Vorversuche mit Kleinwindkraftanlagen.....	44
3.2.8	Planung und Umsetzung des Messsystems	46
3.3	Auswahl der Komponenten für Feldversuche	49
3.3.1	Windkraftanlage (WKA).....	49
3.3.2	Photovoltaik (PV)	50
3.3.3	Akkuspeicher	50
3.3.4	Steuerung & Last	50
3.3.5	Materialübersicht.....	51

3.4	Konstruktion und Montage des Energiemesssystems	52
3.4.1	Auswahl Aufstellort Energiemesssystem	52
3.4.2	Konstruktion Mastsystem WKA	53
3.4.3	Montage & Aufbau des Energiemesssystems	55
4	Ergebnisse	56
4.1	Auswertung der Szenarien	56
4.1.1	Ergebnisse der Wasserszenarien	56
4.1.2	Ergebnisse der Energieversorgung	60
5	Zusammenfassung	63
6	Literaturverzeichnis	65
Anhang68		

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Täglicher Wasserbedarf	10
Tabelle 2: Übersicht der Stromverbraucher nach Tagesgang (Abweichungen je nach Jahreszeit und Personenbelegung)	18
Tabelle 3: Maximaler Trinkwasserbedarf - Szenario 1	23
Tabelle 4: Gesamtenergiebedarf - Szenario 1	24
Tabelle 5: Kostenschätzung - Szenario 1	25
Tabelle 6: Wasserbedarf - Szenario 2 (eigene Darstellung).....	26
Tabelle 7: Gesamtenergiebedarf - Szenario 2 (eigene Darstellung)	27
Tabelle 8: Kostenschätzung - Szenario 2 (eigene Darstellung).....	28
Tabelle 9: Wasserbedarf - Szenario 3 (eigene Darstellung).....	29
Tabelle 10: Gesamtenergiebedarf - Szenario 3 (eigene Darstellung).....	31
Tabelle 11: Kostenschätzung - Szenario 3 (eigene Darstellung).....	32
Tabelle 12: Kostenaufstellung Energiemesssystem.....	51
Tabelle 13: Gegenüberstellung der täglichen Wassernutzung der Szenarien	56
Tabelle 14: Gegenüberstellung der Stromverbräuche der Szenarien.....	56
Tabelle 15: Gegenüberstellung der Anschaffungskosten der Szenarien.....	56
Tabelle 16: Gegenüberstellung der Speichergrößen der Szenarien.....	57
Tabelle 17: Maximaler täglicher Wasserbedarf - Szenario Entwurf (eigene Darstellung)	58
Tabelle 18: Kostenschätzung Szenario Entwurf (eigene Darstellung).....	59
Tabelle 19: Investitionskosten für Szenario 1 (ohne WKA, größerer Speicher)	62
Tabelle 20: Investitionskosten für Szenario 2 (mit WKA, verkleinerter Speicher)	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Jährlicher Wasserbedarf	11
Abbildung 2: UO-Anlage der Firma Lippmann	12
Abbildung 3: Handbetriebene UO-Anlage der Firma Katadyn.....	12
Abbildung 4: Bewachsener Bodenfilter im Projekt "Lichte Weiten", Berlin (eigene Aufnahme)	13
Abbildung 5: SBR-Anlage der Firma Graf.....	14
Abbildung 6: Trenntoilette Einsatz (links), Kompakte TTT (rechts) (www.trobolo.com)	15
Abbildung 7: Verbrennungstoilette der Firma Cinderella (https://carbonzorro.com/de)	16
Abbildung 10: Wärmetauscher-Einheit für Brauch- und Heizungswasser	21
Abbildung 11: Komplettschaltung mit Pufferspeicher	22
Abbildung 12: Schematische Skizze Szenario 1	23
Abbildung 13: Schematische Skizze Szenario 2	25
Abbildung 14: Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario 2 (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 15: Dauer der Trockenperiode in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario 2 (eigene Darstellung)	27
Abbildung 16: Schematische Skizze Szenario 3	28
Abbildung 17: Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario 3 (eigene Darstellung).....	30
Abbildung 19: Globalstrahlung in Watt pro m ² im Verlauf eines Jahres am Messstandort Stralsund.....	32
Abbildung 20: Globalstrahlung in Watt pro m ² im Verlauf eines Tages am Messstandort Stralsund.....	32
Abbildung 21: Windgeschwindigkeit Stralsund. Messhöhe: 10 m über Grund.....	33
Abbildung 22: PV spezifische Variablen im Solarmodell	34
Abbildung 23 Simulationsmodell Photovoltaik, erstellt mit MatLab Simulink	35
Abbildung 24: Globalstrahlung, PV-Leistung und Jahressumme je nach spezifischen Angaben. Werte beziehen sich auf die Variablenwerte aus Abbildung 6.....	36
Abbildung 25: Alle Variablen des WKA-Simulationsmodells sind in einem MatLab-Skript hinterlegt	38
Abbildung 26: Simulink-Modell der WKA	39
Abbildung 27: Windgeschwindigkeit, WKA-Leistung und Jahressumme je nach spezifischen Angaben. Werte beziehen sich auf die Variablenwerte aus Abbildung 7	39

Abbildung 28: Skript zur Erstellung eines Daten-Arrays, welcher ein Jahr in 5-Min-Schritte unterteilt	40
Abbildung 29: Energieverbrauch pro Woche (Sommer).....	40
Abbildung 30: Energieverbrauch pro Woche (Winter)	41
Abbildung 31: Energieverbrauch pro Jahr mit Personenanzahl	41
Abbildung 32: Warmwasserverbrauch pro Woche	42
Abbildung 33: Simulink-Modell des Warmwasserspeichers	43
Abbildung 34: Simulink-Modell des Energiespeichers	43
Abbildung 35: Windkanal der Hochschule Stralsund	44
Abbildung 36: Leistungsbeiwerte über Schnelllaufzahl 3-Blatt-Rotor horizontal.....	45
Abbildung 37: Horizontalrotor in 6-Blatt-Konfiguration	45
Abbildung 38: Leistung 3-Blatt-Rotor horizontal (0,55682 m ² Rotorfläche)	46
Abbildung 39: Übersicht E-Messsystem PV & Wind	47
Abbildung 40: Detailplan Messsystem	48
Abbildung 41: Hausdach Institut für Regenerative EnergieSysteme (IRES).....	52
Abbildung 42: Mastsystem WKA (Betrachtung aus Richtung Nord-West).....	53
Abbildung 43: Abspannung Rohr Mast WKA	54
Abbildung 44: Zapfen im Rohr Mast bei auf- und abgeklappter WKA	54
Abbildung 45: Mast Fuß mit Sicherungsschelle	55
Abbildung 46: Schematische Skizze Vorzugsvariante	57
Abbildung 47: Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit des Speichervolumens – Szenario Entwurf (eigene Darstellung)	58
Abbildung 48: Dauer der Trockenperiode in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario Entwurf (eigene Darstellung)	59
Abbildung 49: State of Charge des Energiespeichers (Szenario 1)	60
Abbildung 50: State of Charge des Energiespeichers (Szenario 2)	61

1 Einleitung

1.1 Historie und gegenwärtige Nutzung der Insel, zukünftiges Potential

Der Ruden ist eine 24 ha große Insel, die seit 1993 zum Naturschutzgebiet „Peenemünder Haken, Struck und Ruden“ gehört und Rückzugsgebiet für seltene Tier- und Pflanzenarten, sowie Rast- und Überwinterungsgebiet vieler Wasservögel ist.¹ Der Ruden wurde seit 1648 als Lotseninsel und zu DDR-Zeiten als Zollstation genutzt. Diverse, teilweise unter Denkmalschutz gestellte Bauwerke, wie der „Lootsenwart Turm“, Backsteinhäuser und eine Kaserne, sind noch vorhanden. Die Lotsenstation wurde 1972 geschlossen und die Insel seit 1990 nur von einer Person bewohnt.² Um den Naturschutz gewährleisten zu können, ist eine ständige Besetzung der Insel notwendig. Zukünftig soll der Ruden für geführte, touristische Zwecke erschlossen werden, um den Besuchern die Relevanz des Naturschutzes zu verdeutlichen und ggf. auch Möglichkeiten für Seminare mit Übernachtung bieten. Zum jetzigen Zeitpunkt verfügt die Insel über keinen Anschluss an die kommunale Infrastruktur. Strom wird partiell über einen Dieselgenerator erzeugt. Eine Wiederinstandsetzung des ehemaligen Seekabels mit vertretbaren Kosten wird ausgeschlossen.

Die Trinkwasserversorgung muss in kurzen Abständen über Kanister vom Festland sichergestellt werden. Abwasser wird in Absetzgruben und später in die Ostsee geleitet. Abfall kann nur in großen zeitlichen Abständen an Land gebracht und die Versorgung der Inselbewohner muss über das Festland sichergestellt werden.

1.2 Projektziele

Mit der Potenzialanalyse soll gezeigt werden, dass es möglich ist, an einem abgelegenen Inselstandort ohne Grundwasserressource und nur mit erneuerbaren Energien eine ganzjährige menschliche Nutzung für vogel- und naturschutzfachliche Belange zu ermöglichen.

Wasserversorgung und Abwasserentsorgung

Ziel des Projektes „autarker Ruden“ soll die umfängliche Erschließung der Insel mit Wasser, Abwasser und Strom sein. Dabei stehen nachhaltige und autarke Systeme im Vordergrund, die zum einen im Sinne der Kreislaufwirtschaft Synergien für die exponierte Lage darstellen, als auch im Einklang mit Natur- und Denkmalschutz gebracht werden können. Neben- und Endprodukte der Technologien und des täglichen Lebens sollen sinnvoll in die Stoffströme integriert werden. Zur Entwicklung der optimalen Ver- und Entsorgungsstrategie sind Szenarien zu diversen Technologien und deren Kombinationsmöglichkeiten zu erarbeiten und eine breite Literaturrecherche zu vergleichbaren Projekten durchzuführen. Neben der technischen Bewertung werden auch Handhabbarkeit, Transport und Aufbau auf der Insel, sowie Investitions- und Betriebskosten betrachtet, weitere Punkte sind mit dem betreuenden Verein abzustimmen (Bewertungskriterien). Grundlage der Planung ist eine umfassende Bedarfsanalyse inkl. Substitutionspotenzial unter Berücksichtigung der angestrebten

¹ <https://www.jordsand.eu/schutzgebiete/inssel-ruden/>, zuletzt geprüft am 15.06.2021

² <https://www.meer-usedom.de/inssel-ruden>, zuletzt geprüft am 15.06.2021

Inselnutzung, sowie daraus resultierenden saisonalen Schwankungen, sowie der Vorbildcharakter für in Teilen vergleichbare Anwendungsfälle.

Aufgrund der exponierten Lage und der außergewöhnlichen Randbedingungen (Natur- und Denkmalschutz, Insellage, eingeschränkte Ressourcenverfügbarkeit) können die einzelnen Lösungskomponenten als Vorbild für vergleichbare „Insellösungen“ herangezogen werden. Ebenso können die eingesetzten Technologien in Bezug auf Nachhaltigkeit, Kreislaufschließung und Ressourcenschonung als positives Beispiel für neue Baufelderschließungen und Umgang mit den Folgen des Klimawandels in der Öffentlichkeit genutzt werden. Dieses Potenzial kann besonders durch die regelmäßigen Inselbesucher ausgeschöpft werden, da auch die Versorgungsstrategie der Insel Teil der zukünftigen Führungen sein sollen. Der kleine Maßstab eignet sich auch für den Transfer auf private Haushalte.

Energieversorgung

Ziel ist die Versorgung der Inselbewohner mit elektrischer Energie weitestgehend über regenerative Energiewandler sicherzustellen. Dabei sind nicht zuletzt die hohen Anforderungen durch Umwelt- und Denkmalschutz für diesen Standort von Bedeutung. Zur Energieerzeugung wird eine Kombination aus Wind- und Solarenergie angestrebt. In den Fallstudien sind unterschiedliche Errichtungsorte, Technologien und Dimensionen der Einzelanlagen zu untersuchen. Grundlage dafür ist eine umfassende Recherche zu notwendigen Wetterdaten, vergleichbaren Projekten, neuartigen technischen Lösungen und die Bedarfsermittlung in Abstimmung mit den weiteren Arbeitspaketen. Als Errichtungsorte kommen für die Photovoltaik Teile der Dachflächen in Frage, welches eng mit der Denkmalschutzbehörde abzustimmen ist. Um den Schutz der seltenen Wasservögel zu wahren und das Bild der Insel nicht zu dominieren kommen nur Kleinwindanlagen in Betracht, die ggf. auch an bestehenden Gebäuden installiert werden können. Kleinwindanlagen als Horizontal- oder Vertikalläufer werden im Rahmen dieser ersten Projektphase pilothaft auf ihren Wirkungsgrad hin getestet. Zur Speicherung der schwankenden Energieerzeugung und der diskontinuierlichen Abnahme werden Batteriespeicher benötigt. Zur Auslegung und optimierten Abstimmung dieser drei Systemkomponenten ist eine Simulation durchzuführen, die am Ende die kompatibelste Lösung unter den genannten Randbedingungen hervorbringt. Im Anschluss an dieses Projekt beginnt die Realisierungsphase in der parallel eine Automatisierungstechnik für ein optimiertes Energiemanagement zu entwickeln ist. Erste Konzepte dafür können bereits in den Fallstudien miterarbeitet werden.

Die Konzeptionierung der elektrischen Energieversorgung wird durch die Hochschule Stralsund am Institut für Regenerative EnergieSysteme (IRES) durchgeführt.

Trink- und Brauchwasser

Die Versorgung für Trink- und Brauchwasser soll aus den lokalen Quellen sichergestellt werden. Historischen Quellen zufolge wurde auf der Insel an verschiedenen Orten nach einer nutzbaren Süßwasserblase gebohrt, allerdings ohne Erfolg. Auf dem Gelände ist ein vermutlich von der NVA erbauter, unterirdischer Wasserspeicher vorhanden, der über ein Versorgungsschiff mit Trinkwasser beschickt worden sein könnte. Des Weiteren besteht ein

Regenwasserauffangbecken, mit einer Fläche von rund 1.000 m², das voraussichtlich durch eine drainierte, natürliche Regenwasserversickerung gespeist wurde. Die Funktionalität scheint durch den eher schlechten Zustand eingeschränkt und möglicherweise durch den aktuell starken Bewuchs durch Wurzeln und Verwitterung beschädigt zu sein. Zur Abwasserbehandlung wurde ein Kanalnetz mit einem Fettabscheider und einem Absetzbecken (vermutlich als Zwei-Kammer-System ausgebildet) ausfindig gemacht. Nach erster Überprüfung konnte die Funktionalität nicht sichergestellt werden und wurde als nicht nutzbar eingestuft.

Als zukünftige Trinkwasserquellen werden im beantragten Projekt Meerwasser der umliegenden Ostsee und eine Grauwasseraufbereitung mit Regenwassernachspeisung in Betracht gezogen. Im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels stellt Meerwasser eine stabile Rohwasserquelle dar, zudem liegen für die dann zum Einsatz kommenden Entsalzungsanlagen nur wenig Erkenntnisse zum Betrieb unter niedrigen Außentemperaturen vor, was in einer späteren Realisierungsphase Untersuchungsgegenstand sein kann. Das Trinkwasser im Kreislauf aus Grauwasser aufzubereiten und wieder zu nutzen wäre hierbei ein gänzlich neuer Ansatz. Neben der Trinkwasserversorgung ist unter dem Nachhaltigkeitsaspekt auch die Brauchwasserbereitstellung zu untersuchen. Hierzu zählen Regenwassernutzung, Abwasserwiederverwendung und der Einbau neuartiger Sanitärsysteme mit denen der resultierende Trinkwasserbedarf um bis zu 40 % reduziert werden kann. Die Fallstudien geben Aufschluss über die Anwendbarkeit und die sinnvolle Integration dieser Konzepte auf der Insel Ruden.

Abwasserentsorgung und Abfallmanagement

Mit steigendem Anschlussgrad an die Trink- und Brauchwasserversorgung ist auch mit einem erhöhten Abwasseraufkommen zu rechnen. In einem ersten Schritt des Projektes wird vor Ort eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Entsorgungsinfrastruktur vorgenommen, um dessen Nutzungspotenzial bewerten zu können. Zu diesen zählen Absetzschächte, Kanalisation und eine Mehrkammerabsetzgrube. In Abhängigkeit der Bestandsqualität und des Abwasseraufkommens werden auch für diesen Aspekt Fallstudien durchgeführt, wobei sowohl technische als auch naturnahe Verfahren auf ihre Einsatzmöglichkeiten hin untersucht werden. Neben der Aufbereitung des Abwassers ist der Einsatz von ressourcenorientierten Sanitärsystemen zu bewerten, dieses umfasst sowohl die Trennung von Stoffströmen (Trenntoiletten und Komposttoiletten) mit dem Ziel des ressourcenschonenden Recyclings als auch der Möglichkeiten zur Trinkwassereinsparung, Energierückgewinnung und Biomassegewinnung. Letzteres kann in einer Co-Verwertung mit biologischen Abfällen zu wertvollem Humus aufgewertet werden. Da durch die Bodenbeschaffenheit auf dem Ruden eine Selbstversorgung mit Obst und Gemüse nur sehr schwer umsetzbar ist, wird hier ein Synergieeffekt angestrebt. Auch der Aspekt der Wärmerückgewinnung aus Abwasser könnte einen Mehrwert darstellen.

Die Konzeptionierung wasserwirtschaftlicher Belange obliegt dem Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der TU Berlin.

2 Grundlagenermittlung

2.1 Wasserbedarfsermittlung

Zur Ermittlung der anfallenden Stoffströme wird zunächst eine Wasserbedarfsermittlung erstellt. Der Trinkwasserbedarf setzt sich aus dem Bedarf der Bewohner*innen, den Tieren, den Besucher*innen und der Bewässerung zusammen.

Je nach Bundesland kann der mittlere tägliche Wasserbedarf einer Person stark variieren. In Mecklenburg-Vorpommern sind es im Schnitt 108 l/d (STATISTA, 2016). Die Versorgung der Bewohner*innen soll diesem Verbrauch gerecht werden. Die prozentuale Verteilung der Trinkwasserverwendung im Haushalt ist nach Nutzung statistisch erfasst und nach BDEW (2021) in Tabelle 12 aufgeführt. Da die Bewohner*innen auch Kunstwerke erstellen, die sie auf der Insel zum Verkauf anbieten, handwerklich und im Garten aktiv sind, wird der Bedarf für Kleingewerbe mitberücksichtigt.

Der Tränkwasserbedarf der Tiere ist sowohl von der Außentemperatur als auch vom Wassergehalt des Futters abhängig und wird hier vereinfacht konstant über das gesamte Jahr angenommen. Bei Schafen liegt der durchschnittliche Verbrauch bei 2 – 4 l/d, wird im Folgenden mit 4 l/d angenommen und summiert sich bei 20 Tieren auf 80 l/d. (LANDESBEIRAT FÜR TIERSCHUTZ VON BADEN-WÜRTTEMBERG, 2008) Der Wasserbedarf von Hühnern fällt sehr gering aus und wird hier vereinfacht mit 0,25 l/d angenommen und summiert sich bei 20 Hühnern auf 5 l/d. Der Gesamtbedarf der Tiere liegt somit bei 85 l/d.

Der neben dem Niederschlag notwendige Zusatzberechnungsbedarf für die Gartenflächen kann je nach Boden- und Gemüseart variieren und bewegt sich grob zwischen 150 und 200 mm/a. (ZINKERNAGEL ET AL., 2017) Für die weitere Betrachtung werden 200 mm/a angesetzt. Der Zeitraum der zusätzlichen Berechnung wird von April bis einschließlich September festgelegt. Resultierend aus den monatlichen Mittelwerten der Lufttemperatur in Greifswald wird ein erhöhter Bewässerungsbedarf von 7.950 l (entspricht 265 l/d) in den Monaten Juni bis August angenommen. Für die Monate April, Mai und September wird der Bedarf auf 2.650 l (entspricht 88 l/d) reduziert. Der in DIN EN 1989-100 angesetzte Betriebswasserbedarf für Grünland von 100 – 200 l/m² für die Monate April bis September deckt sich mit der zuvor aufgeführten Annahme.

Die jeweiligen Bedarfe wurden wie zuvor aufgeführt ermittelt und sind in

Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Täglicher Wasserbedarf

Täglicher Bedarf je Bewohner*in	Nutzung	Anteil (BDEW, 2021)	Menge [l/d]	Menge [m³/d]
	Körperpflege	36%	38,88	0,04
	Essen + Trinken	4%	4,32	0,00
	Geschirrspülen	6%	6,48	0,01
	Toilettenspülung	27%	29,16	0,03
	Raumreinigung /Garten	6%	6,48	0,01
	Wäschewaschen	12%	12,96	0,01
	Kleingewerbe	9%	9,72	0,01
	Summe (inkl. WC-Spülung)	100%	108,00	0,11
	Summe (exkl. WC-Spülung)	73%	78,84	0,08
	Nicht-Trinkwasser (inkl. WC-S)	54%	58,32	0,06
Nicht-Trinkwasser (exkl. WC-S)	27%	29,16	0,03	

Tiere	Art	l/d	Anzahl	l/d
	Schafe	4	20	80
	Hühner	0,25	20	5
	Summe	4,25	40	85

Besucher*innen	Zeitraum	Personen	l/Person	l/d
	April - September	70	1	70

Garten	Fläche	Fläche [m²]	zusätzliche Berechnung [m³/a]	zusätzliche Berechnung [l/d]
	Garten 1	32	6,40	35,56
	Garten 2	19	3,80	21,11
	Garten 3	54	10,80	60,00
	Garten 4	44	8,80	48,89
	Topfpflanzen	10	2,00	11,11
	Summe	159	47,70	176,67

Der Trinkwasserbedarf variiert sowohl durch die Belegung als auch durch die Jahreszeiten. Der jährliche Verlauf ist in Abbildung 1 dargestellt. Der größte Teil wird durch den Verbrauch der Bewohner dargestellt. In der Wachstumsperiode ist auch der Wasserbedarf für die Nutzpflanzen relevant.

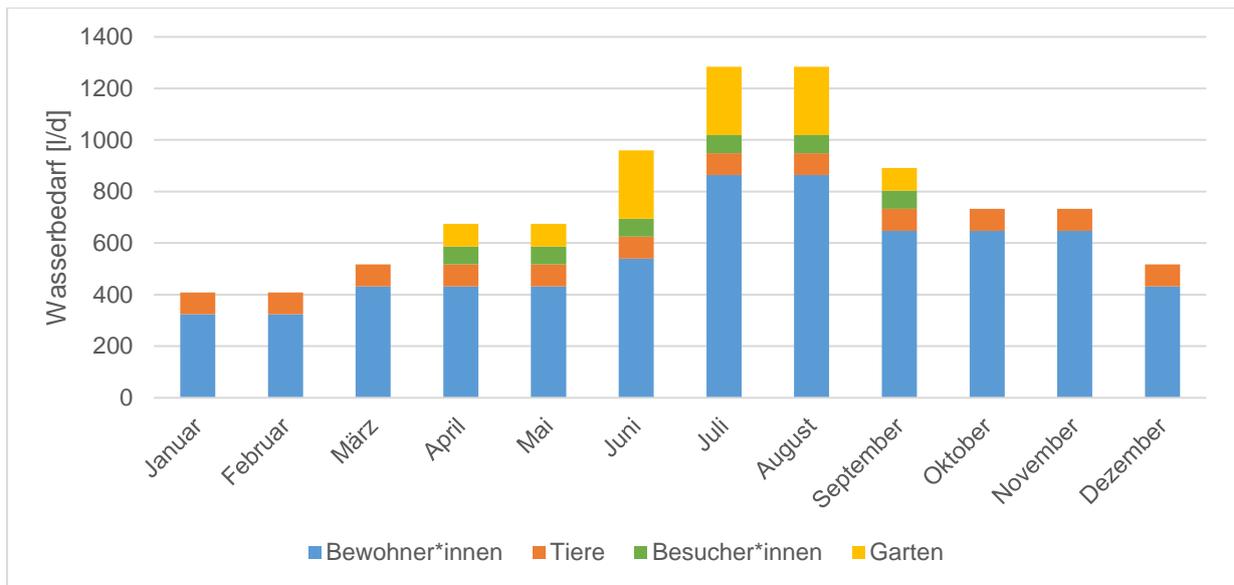


Abbildung 1: Jährlicher Wasserbedarf

2.2 Trinkwassergewinnung

Für die Trinkwasserbereitstellung können verschiedene Varianten betrachtet werden. Als einfacher Ansatz wäre eine professionalisierte Variante der derzeitigen Versorgung mit Kanistern durch einen schwimmenden Trinkwassertank denkbar. Diese Variante entspricht nicht dem Autarkiegedanken und wird daher nicht weiter betrachtet.

Aus historischer Betrachtung und nach vorliegendem Kenntnisstand ist auf der Insel keine Versorgung mit Grundwasser möglich.

Demzufolge bleiben als Rohwasserquellen das Brackwasser der Ostsee und das Regenwasser, das von den Dächern der Inselgebäude aufgefangen werden kann. Beide Ressourcen müssen angepasst aufbereitet werden.

Zur Entwicklung eines nachhaltigen Konzeptes wurden drei Szenarien (Kap. 3.13.1) entworfen, miteinander verglichen und daraus eine Vorzugsvariante entwickelt. Die Trinkwassergewinnung wird dabei entweder durch die Aufbereitung des Brackwassers mittels einer Umkehrosmose (UO) Anlage oder durch das Aufbereiten von Regenwasser, ebenfalls mittels UO Anlage, sichergestellt. Zunächst sollen einzelne Anlagenkomponenten vorgestellt werden, die bei den einzelnen Szenarien zum Einsatz kommen.

Die **Umkehrosmose** zählt zu den filtrierenden Membranverfahren und gehört zu den meistverwendeten Entsalzungstechnologien (HOPP, 2016). Das aufzubereitende Wasser unterläuft zunächst einer Vorbehandlung, beispielsweise durch Tiefenfiltration, und wird anschließend durch die semipermeable Membran gedrückt, wobei für Brackwasser je nach Salzgehalt rund 5 bar und für Meerwasser 60 – 85 bar benötigt werden. (SANNA ET AL., 2019) Das Permeat wird in der Nachbehandlung mit Mineralien wie Calcium und Magnesium angereichert. Das aufkonzentrierte Filtrat wird abgeschieden. Die notwendige Menge an Zulaufwasser ist nach der Ausbeute der Anlage zu ermitteln. Je geringer die Ausbeute, desto höher die benötigte Zulaufmenge. Umkehrosmoseanlagen werden nach der Qualität des Rohwassers und der notwendigen Beschaffenheit des Permeats ausgelegt. Die Membran

kann durch sogenanntes Fouling und Scaling verstopfen. Dies kann durch eine Vorbehandlung und Reinigung der Membran reduziert werden.



Abbildung 2: UO-Anlage der Firma Lippmann

Kleinere Umkehrosmoseanlagen sind auch im Pedal- oder Handbetrieb, also ohne Strom und angetrieben von Muskelkraft, erhältlich (vgl. Abbildung 2). Am Markt befindliche pedalbetriebene Systeme, mit einem Kostenpunkt der Anlage von rund 500 €, ermöglichen es einer Person binnen 8 Minuten rund 2 Liter Trinkwasser zu erzeugen. (STOCKINGER, 2020)



Abbildung 3: Handbetriebene UO-Anlage der Firma Katadyn

Auf dem Markt bieten verschiedene Firmen Umkehrosmoseanlagen an. Bei der Auswahl ist die Beschaffenheit des zu reinigenden Wassers maßgebend. Diese ist für die Auslegung genauer zu untersuchen. Im Folgenden sind einige Anbieter aufgelistet:

- Lippmann (<https://www.purewater-hartmann.de/de/umkehrosmoseanlage.html>)
- Lenntech (<https://www.lenntech.de/systeme/umkehrosmose/mittel-bwro/ro-medium-de.htm>)
- Katadyn – handbetriebene UO-Anlagen (<https://www.katadyngroup.com/ch/de/brands/Katadyn~b4906/overview>)

2.3 Abwasserbehandlung

Für die Einleitung des Abwassers ist die Abwasserverordnung zu beachten. Hier gilt die Größenklasse I. Demnach ist für den Einsatz eine Kleinkläranlage als Mindestanforderung der Abflussklasse C zu gewährleisten. Für die Aufbereitung des Abwassers wurden die Kleinkläranlagentypen *Bewachsener Bodenfilter* und *Biofilter* als Verfahrensmöglichkeiten ausgewählt, da beide Verfahren lediglich für die Beschickung Energie benötigen

Bewachsene Bodenfilter (BBF) sind naturnahe Abwasserreinigungssysteme, die in Deutschland seit den 1960er Jahren im Einsatz sind und sich besonders für die Reinigung von Abwasser mit geringer Konzentration an organischen Stoffen eignen. (VYMAZAL, 2009) Dabei handelt es sich um mit Röhrichtpflanzen bewachsene sandige/kiesige Bodenkörper, die durch dort angesiedelte Mikroorganismen zugeführtes Abwasser reinigen. Der für aerobe Prozesse notwendige Sauerstoff kann durch die Art der Beschickung reguliert werden und wird ebenfalls durch den Rhizomraum der Pflanzen gefördert. Eine Vorbehandlung des Abwassers (bspw. in Form eines Absetzbeckens) wird empfohlen und erhöht die Qualität des Filtrats. (OTENGPEPRAH, 2018) Unterschieden werden BBF durch die Fließrichtung in horizontale durchströmte bewachsene Bodenfilter (HBBF) und vertikal durchströmte bewachsene Bodenfilter (VBBF) und hybride Bodenfilter mit einer Kombination aus beidem. Sie unterscheiden sich bspw. nach Platzbedarf, Sauerstoffversorgung und Entfernungsrates der jeweiligen Abwasserinhaltsstoffe und sind somit je nach Hauptziel zu wählen. (LUEDERITZ ET AL., 2001) Je nach Ausführung bedarf es einer Pumpe zur Beschickung des Filters, weitere technische Ausrüstung ist nicht notwendig. Für die Dimensionierung sind pauschal mindestens 5 m²/EW für HBBF, die allerdings nach DWA A 262 nicht mehr empfohlen werden und mindestens 2,5 m²/EW für VBBF anzusetzen. (DWA, 2017)



Abbildung 4: Bewachsener Bodenfilter im Projekt "Lichte Weiten", Berlin (eigene Aufnahme)

Biofilter sind ebenfalls dem Biofilmverfahren zuzuordnen und zeichnen sich über das Aufwuchsmaterial der Mikroorganismen aus. Zum Einsatz kommen neben synthetischen Stoffen auch natürliche Stoffe wie Torf, Baumrinde, Steinwolle oder Kokosfasern. Die Reinigung des Filtermaterials erfolgt über eine Klarwasserspülung. Das Abwasser wird zunächst in die Vorklärung eingeleitet, von dort gelangt es im Freigefälle in den Bioreaktor und auf das Aufwuchsmaterial. Anders als beim Festbettverfahren ist das Aufwuchsmaterial nicht

eingestaut, sondern wird durchflossen. Dadurch ist eine Unterteilung des Bioreaktors in eine belüftete und eine unbelüftete Zone möglich, wodurch sowohl aerobe als auch anaerobe Abbauprozesse entstehen. Die Belüftung erfolgt über Belüftungsrohre mittels Kamineffekt und kommt somit ohne Strom aus.

Das **Sequencing Batch Reactor (SBR)** Verfahren ist an das herkömmliche Belebungsverfahren angelehnt. Die Verfahrensschritte laufen beim SBR-Verfahren zeitlich versetzt in einem Behälter ab – im Gegensatz zum räumlich versetzten BBF-Verfahren. Der Ablauf besteht aus den vier Zyklen: Beschickung, Belüftung und Umwälzung, Sedimentation, Klarwasser- und Schlammabzug. Die Mikroorganismen bewegen sich dabei frei im Reaktor. Die Zyklusdauer variiert typischerweise von 6 – 12 Stunden bei einer Anzahl von zwei bis vier Zyklen pro Tag. (FLASCHE, 2002) Anders als bei anderen Verfahren ist durch den diskontinuierlichen Betrieb das zufließende Abwasser zunächst zu speichern. Bei kleinen, kompakten Anlagen ist die Speicherung schon in den Behälter integriert und dient zusätzlich als mechanische Vorreinigung. Auf Belastungsschwankungen, durch das Variieren der Anzahl der Nutzer*innen, kann mit Mess- und Regelungstechnik eingegangen werden. So kann beispielsweise bei Unterbelastung das Reaktorvolumen durch die Höhenverstellung von Pumpen verändert werden. (DWA, 2022)



Abbildung 5: SBR-Anlage der Firma Graf

Für die Umsetzung der Abwasserbehandlung kann sich beispielsweise an folgenden Firmen orientiert werden:

- Subterra GmbH – bekannt aus weiteren DBU-Projekten
 (http://www.subterra.de/Subterra_Private_Haushalte.cfm)
- Graf (<https://www.graf-online.de/abwasser/kleinklaeranlagen.html>)

2.4 Sanitäranlagen

Spültoilette

Die wohl bekannteste Variante der Sanitäranlagen in Deutschland sind die Spültoiletten. Die Exkrememente werden mit Wasser vermischt und so abtransportiert. Der Trinkwasserbedarf liegt dabei im Schnitt bei 27 % des täglichen Bedarfs. (STATISTA, 2020) Spültoiletten gibt es in verschiedenen Ausführungen, bei denen der Spülwasserverbrauch stark variieren kann. Während ältere Modelle bis zu 10 l pro Spülung verbrauchen, liegt der Bedarf bei neueren Modellen mit 3-4 l pro Spülung deutlich geringer.

Trockentoilette

Trockentoiletten (TT) unterscheiden sich von herkömmlichen Toiletten, indem sie ohne Spülwasser auskommen. Eine weitere Form der TT sind die Trockentrenntoiletten (TTT), wobei ein spezieller Einsatz für das separate Auffangen des Urins und der Fäzes sorgt. Ferner unterscheiden sich diese in Varianten mit interner und externer Kompostierung. Bei interner Kompostierung wird zwischen Einkammer-, Mehrkammer- und Wechselkammersystemen unterschieden.

Die Anforderungen und Produktmerkmale für Sanitärsysteme ohne Anschluss an Wasserversorgung und Kanalisation sind in DIN 30762 festgehalten.

TTT kommen in vielen verschiedenen Ausführungen zum Einsatz. Neben Trenneinsetzen für den Selbstbau stehen auch fertige Kompaktsysteme auf dem Markt zur Verfügung (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 6: Trenntoilette Einsatz (links), Kompakte TTT (rechts) (www.trobolo.com)

Verbrennungstoilette

Eine Alternative zu TT sind Verbrennungstoiletten (VT), die sowohl mit elektrischer Energie als auch als gasbetriebene Variante hergestellt werden (siehe Abbildung 4). Die ausgeschiedenen Exkrememente werden in einer zuvor in der VT platzierten, speziellen Papiertüte aufgefangen und werden nach manuellem Starten des Vorgangs verbrannt und so in Asche umgewandelt. Laut Herstellerangaben der Firma Cinderella entsteht pro Verbrennung ein Energiebedarf von 1-2 kWh oder ein Gasbedarf von rund 180 g. (CINDERELLA, 2022)



Abbildung 7: Verbrennungstoilette der Firma Cinderella (<https://carbonzorro.com/de>)

2.5 Pumpen

Für den Transport von Trink- und Abwasser kommen Pumpen zum Einsatz. Der Leistungsbedarf ist von der zu überbrückenden Höhe, den anfallenden Reibungsverlusten und dem gewünschten Betriebsdruck abhängig. Zur weiteren Planung können folgende Anbieter in Betracht genommen werden:

- Wilo (<https://wilo.com/de>)
- KSB-Pumpen
- Jung Pumpen (<https://www.jung-pumpen.de/produkte/abwassertechnik/abwasserpumpen.html>)

2.6 Energiebedarf

Elektrische Energie wird für die Zwecke des Naturschutzes und der Bewohner benötigt, aber auch als Energiequelle für die Wasseraufbereitung, -verteilung und die weitere Behandlung der Stoffströme.

Da es keine genauen Werte zum Energieverbrauch auf dem Ruden gibt, wurde eine Annahmen für den Bedarf getroffen. Für die Bedarfsermittlung wurde ein monatsabhängiger Jahresgang der Personenbelegung auf der Insel Ruden als Grundlage genommen. Hierfür wurde der Mittelwert von einer minimalen und einer maximalen Bewohneranzahl verwendet.

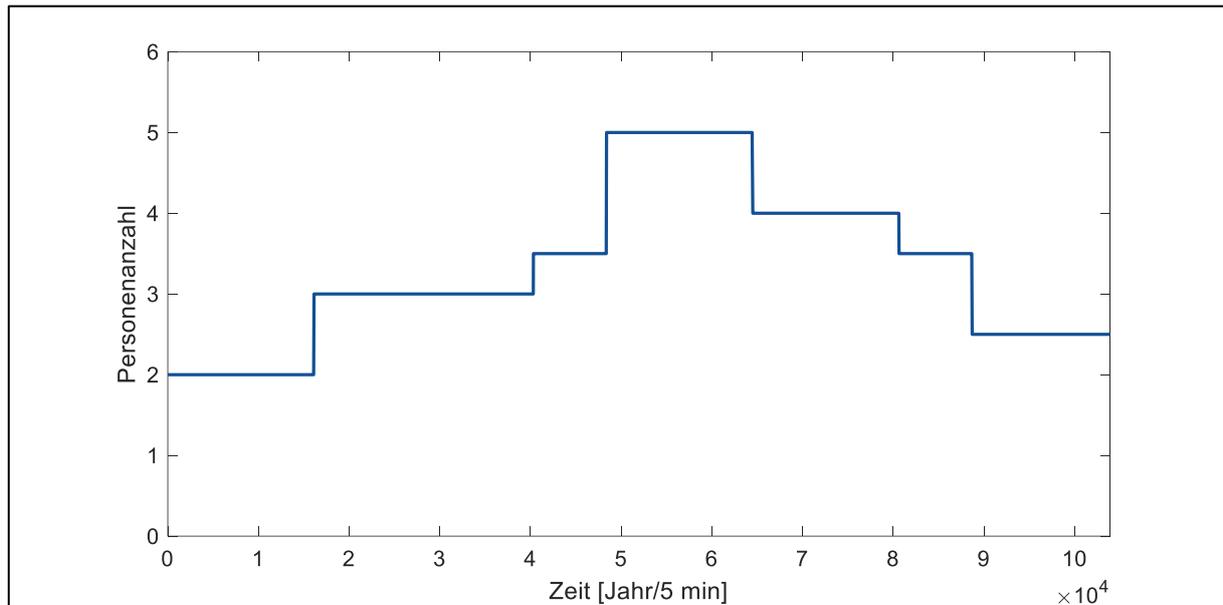


Abbildung 8: Durchschnittliche Personenanzahl pro Jahr

Der Personenanzahl entsprechend wurde der Bedarf auf Tagesebene hinterlegt. Für einen Tagesablauf wurden alle nötigen Verbraucher bestimmt und festgelegt, zu welcher Uhrzeit und für wie lange sie die ihnen zugewiesene Energie benötigen. Aus Abbildung 9 sind alle Verbraucher zu entnehmen. Die Liste wurde mit Herr Behn von der Naturschutzgesellschaft Küstenregion Vorpommern abgestimmt und bildet einen Tagesablauf auf der Insel Ruden ab. Die Anzahl der jeweils betriebenen Verbraucher hängt von der Jahreszeit und der entsprechenden Personenanzahl ab. Kühltruhe und Kühlschrank, sowie Router mit Telefon müssen permanent betrieben werden und mit Strom versorgt werden. Zu der Tagesroutine gehören Nahrungsversorgung und Geschirrrreinigung, Hygiene (Händewaschen und Duschen), Licht, Arbeiten an Laptops, sowie das gelegentliche Wäsche waschen und Putzen.

Tabelle 2: Übersicht der Stromverbraucher nach Tagesgang (Abweichungen je nach Jahreszeit und Personenbelegung)

Verbraucher	Anzahl	Leistung [kW]	Nutzungsdauer [h/d]	Summe Leistung [kWh/d]
Umkehrosmose-Anlage	1	2,2	2	4,4
UV-Filter-Anlage	1	0,01	1	0,01
Grauwasser-Aufbereitung	1	-	-	1,72
Pumpen	6	0,6	nach Bedarf	~ 3,5
Pelletheizung (Zündung)	1	0,3	1	0,3
Tiefkühltruhen	2	0,017	24	0,8
Kühlschränke	4	0,012	24	1,15
Waschmaschine	2	1,7	1x pro Woche	1,43
Laptops	8	0,1	5	4
Router	3	0,008	24	0,58
Lampen	20	0,004	7	0,56
Wasserkocher	3	1,4	0,25	1,05
Kaffeemaschine	1	1	1	1
Warmwasserspeicher	1	2	nach Bedarf	~ 10

Tabelle 3: Übersicht der Stromverbraucher nach Tagesgang (Abweichungen je nach Jahreszeit und Personenbelegung)

Verbraucher	Anzahl	Leistung [kW]	Nutzungsdauer [h]	Summe Leistung [kWh/d]
Umkehrosmose-Anlage	1	2,2	2	4,4
UV-Filter-Anlage	1	0,01	1	0,01
Grauwasser-Aufbereitung	1	-	-	1,72
Pumpen	6	0,6	nach Bedarf	~ 3,5
Pelletheizung (Zündung)	1	0,3	1	0,3
Tiefkühltruhen	2	0,017	24	0,8
Kühlschränke	4	0,012	24	1,15
Waschmaschine	2	1,7	3	10
Laptops	8	0,1	5	4
Router	3	0,008	24	0,58
Lampen	20	0,004	7	0,56
Wasserkocher	3	1,4	0,25	1,05
Kaffeemaschine	1	1	1	1
Warmwasserspeicher	1	2	nach Bedarf	~ 10

2.7 Möglichkeiten der Versorgung mit elektrischer Energie

„Die Insel Ruden ist ein Naturschutzgebiet und unterliegt damit strengen Bauauflagen. Weitere Auflagen zur baulichen Veränderung der Gebäude sind durch den Denkmalschutz reglementiert. Zudem soll der Blick bei der Anfahrt zur Insel nach Möglichkeit wenig bis gar nicht verändert werden.“

Zur Realisierung eines autarken Inselbetriebes stehen Photovoltaik (PV) und Windkraft im Vordergrund. Diese Energieerzeugungsarten müssen den elektrischen Bedarf ununterbrochen decken und dürfen dabei keine Umwelt- oder Denkmalschutzauflagen verletzen. Eine Gefährdung der Tierwelt, bspw. Vögel durch Windräder, ist zu minimieren oder im besten Fall auszuschließen. Zur Abdeckung von Lastspitzen oder Erzeugungslücken ist die Einrichtung eines Energiespeichers unausweichlich. Bei der Installation der Energieerzeugung ist darauf zu achten, dass diese den gewohnten Blick auf die Insel nur unwesentlich verändern. Eine Sonnenreflektion von Solarmodulen sowie die Errichtung großer Windkraftanlagen (WKA) soll vermieden werden. Die Anfahrt der Insel erfolgt aus Richtung Süden. Da die PV Anlagen für die beste Effizienz ebenfalls nach Süden ausgerichtet werden müssen, ergibt sich hier bereits die erste Herausforderung in Bezug auf die Platzierung der Anlagen.“ (Franzen, 2022)

Auf dem Ruden stehen verschiedene Flächen zur Nutzung von PV-Anlagen zur Verfügung. Aufgrund von erhöhtem Wartungsaufwand bei Freiflächen, sowie Denkmalschutz der Schrägdächer wurden diese Flächen nicht weiter in der Planung berücksichtigt. Zur Nutzung der PV-Anlagen ist das Flachdach der Kaserne vorgesehen, da dieses Gebäude nicht unter Denkmalschutz steht. Das Kasernendach hat eine nutzbare Fläche von 770 m². Aktuell können davon effektiv rund 600 m² genutzt werden, da ein geringer Teil noch durch Bäume verschattet wird. Diese Bäume sollen voraussichtlich gefällt werden. Bei Nutzung der gesamten Dachfläche ist mit einer Peak-Leistung von 70 kW zu rechnen. Bei Teilnutzung der Fläche mit 600 m² hingegen ist eine Peak-Leistung von 55 kW zu erwarten. „Die Kaserne befindet sich in direkter Nähe zu den Wohngebäuden, wodurch nur kurze Strecken durch Leitungen verbunden werden müssen. Zudem bietet sich die Einrichtung eines trockenen Raumes für den Energiespeicher und Konverter an. Die restlichen Räume des Gebäudes können aufbereitet werden, um Vögeln und anderen Tieren Unterschlupf zu bieten.“ (Franzen, 2022)

„Die Auswahl der richtigen Windkraftanlage ist hauptsächlich vom erwartbaren Energiebedarf abhängig, wird jedoch durch Naturschutzauflagen massiv beeinflusst. WKA stehen besonders oft wegen Vogelschlag in der Kritik. Realistische Studien zum Thema Vogelschlag durch Windenergieanlagen (WEA) kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass die Effekte gering ausfallen (Traxler, 2004) (Feige, 2004). So wurden in großen Windparks in verschiedenen Regionen Untersuchungen vorgenommen. Dabei handelte es sich um Gebiete mit durchschnittlicher oder überdurchschnittlicher Vogel- und Fledermausaktivität, sowie Korridoren von Zugvögeln. Die Ergebnisse variieren, liefern jedoch allgemein Werte von (weit) unter 10 toten Tieren pro WEA pro Jahr. Höhere Todesfunde ergeben sich aus Studien, die das Gefahrenpotential von Gebäuden und transparenten Bushaltestellen im Inland untersuchten (Elle, 2013). Beobachtbar ist jedoch die Verhaltensänderung von ansässigen Vogelarten in der Nähe von Windparks. So werden diese von Zugvögeln häufig weiträumig umflogen und Nistplätze in größere Entfernungen verlegt. Eine sofortige Nestaufgabe erfolgt meist nur, wenn WKAs in direkter Richtung der Nahrungsquellen errichtet werden.“ (Franzen, 2022)

Realistisch wären hier Kleinwindkraftanlagen mit einem Rotor-Durchmesser von rund 2,5 Meter, welche seitlich am Kasernendach montiert werden.

„Im Sommer übersteigt die Energieproduktion der Photovoltaikanlage in Kombination mit der WKA den Energieverbrauch. Dieser bleibt ohne Speicher ungenutzt. Zudem kann es in Folge von ungünstigen Wetterverhältnissen zu Unterbrechungen im autarken Stromnetz kommen. Dies ist der Fall, wenn keine Sonne scheint und gleichzeitig kein Wind weht. Diese ungünstigen Bedingungen treten vor allem von November bis Februar auf, da in dieser Zeit kaum Sonne scheint.

Durch einen Energiespeicher kann dieser Zustand abgepuffert werden, wenn zuvor mehr produziert als verbraucht wurde. Zur Speicherung bietet sich je nach Maßstab eine elektrische oder chemische Speicherung an. Bei einer chemischen Speicherung der Energie in Form von Wasserstoff ist im kleinen Maßstab mit sehr hohen Verlusten zu rechnen. Zudem müssen saisonal große Wasserstoffvolumen gespeichert werden. Ein Kompressor und Druckflaschenbündel werden zurzeit als unwirtschaftlich angesehen und daher im aktuellen Projektstadium nicht betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit der Energiespeicherung des Sommers ist durch die Herstellung und Trocknung von Holzhackschnitzeln möglich. Durch mangelhafte Isolierung der Gebäude ist eine Beheizung durch Feueröfen im Winter unumgänglich. Durch die Aufbereitung des auf der Insel nachwachsenden Feuerholzes kann der Heizwert gesteigert werden. Der im Sommer im Überschuss vorhandene Strom kann zur Trocknung des Holzes oder zur Produktion von Holzhackschnitzeln oder Holzpellets genutzt werden. Für die Herstellung von Pellets sind feine Holzspäne nötig. Zudem müssen unter anderem Bindemittel hinzugegeben werden, bevor diese in einer Pelletpresse verarbeitet werden können. Dieser Vorgang ist technisch aufwendig und muss überwacht werden. Er ist daher als unpraktisch einzustufen. Eine Alternative ist die Herstellung von Holzchips. Diese können durch einen großen Häcksler produziert werden und danach in einem Raum der Kaserne getrocknet und saisonal gelagert werden. In der Praxis wird jedoch das Brenngut händisch zu den Öfen der Häuser verteilt werden müssen. Eine automatische Fütterung der Öfen über Druckluft ist energetisch zu aufwendig und logistisch schwierig. Aus diesen Gründen wurde im Modell vorerst nur eine elektrische Speicherung durch Blei-Akkumulatoren betrachtet.“ (Franzen, 2022)

Wärmeversorgung

Auf der Insel Ruden ist die Heizung ein herausforderndes Thema, nicht zuletzt ebenfalls durch die Insellage.

Oberstes Ziel ist die möglichst autarke Versorgung der gesamten Insel. Der einzige Brennstoff, den die Insel selbst reproduziert, ist Holz. Überlegungen, die Wärmeversorgung ebenfalls durch Photovoltaik, Solarthermie oder Windkraft zu erzeugen, ist laut Berechnungen dieser Studie höchst ineffizient und im Winter nahezu unmöglich, da zwar im Sommer überschüssige Energie zur Verfügung steht, aber nicht für den Winter effektiv gespeichert werden kann. Ohnehin ist es in der kalten Jahreszeit bereits schwierig, die anderen Verbraucher elektrisch zu versorgen. Die Insel selbst speichert jedoch die Energie in Form von Holz.

Zurzeit wird an mehreren Feuerstellen mit je einem dazugehörigen Raum geheizt. Diese punktuelle Wärmeerzeugung führt zu Kältebrücken, Schmutz und Rauchbelastung innerhalb der Räume. Zudem sind die zu entwickelnden Wohnungen im Lotsenhaus mit unzureichenden Schornsteinen ausgestattet. Will man alle drei Wohnungen des Lotsenhauses mit Öfen

ausstatten, sodass jeder Raum adäquat beheizt werden kann, müssten zwei neue Schornsteine und mindestens 6 neue Feuerstellen installiert werden. Die Materialkosten dürften sich dabei auf etwa 14.000€ belaufen. Die Verbrennung kann dann aber nur höchst ineffektiv erfolgen und ohne jedwede Speichermöglichkeit.

Die effektivste und kostengünstigste Methode ist die Energieerzeugung per Kombi Holzvergaser mit angeschlossener Heizungs- und Warmwasseranlage. In einem solchen Vergaser können Scheitholz, Hackschnitzel, Gartenabfälle und auch Pellets verheizt werden, sollte es Notsituationen geben, in denen inseleigenes Holz nicht zur Verfügung steht.

Im Nebenglass installiert, ist eine solche zentrale Feuerstelle in der Lage, rund 60kW zu liefern und damit einen Heiz- und einen Warmbrauchwasserkreislauf für drei Wohnungen zu versorgen und hält dabei Schmutz-, Feinstaub- und Geruchsbelastung aus den Wohnräumen fern.

Die Wärmeerzeugung in den Räumen findet über Heizkörper statt, die es ermöglichen, jeden Raum mit gleichbleibender Temperatur zu beheizen. Einziger Strombedarf fällt für die Umwälzpumpen und Gebläse im Brennraum an.

Die Materialkosten für eine solche Anlage belaufen sich ebenfalls auf etwa 20.000€.

- Holzvergaserkessel ca. 10.000€
- Zwischenspeicher ca. 3.000€
- Heizkörper ca. 20 Stck. à 100€ ca. 2000€
- Rohrleitungen pvc ca. 3000€
- Pumpen ca. 1000€
- Schornstein Nebenglass ca. 1000€

Da es sich um den Einbau in Altbauten handelt, können bis zu 50% Förderung der BAFA in Anspruch genommen werden.

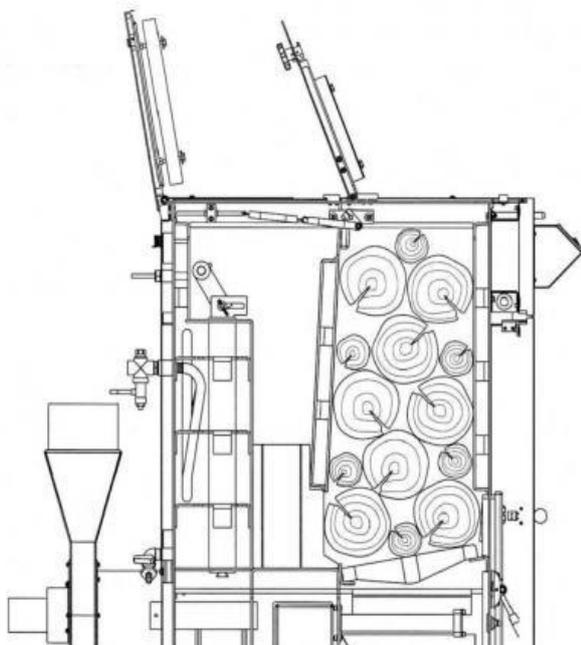


Abbildung 9: Skizze Kombivergaserkessel



Abbildung 10: Wärmetauscher-Einheit für Brauch- und Heizungswasser

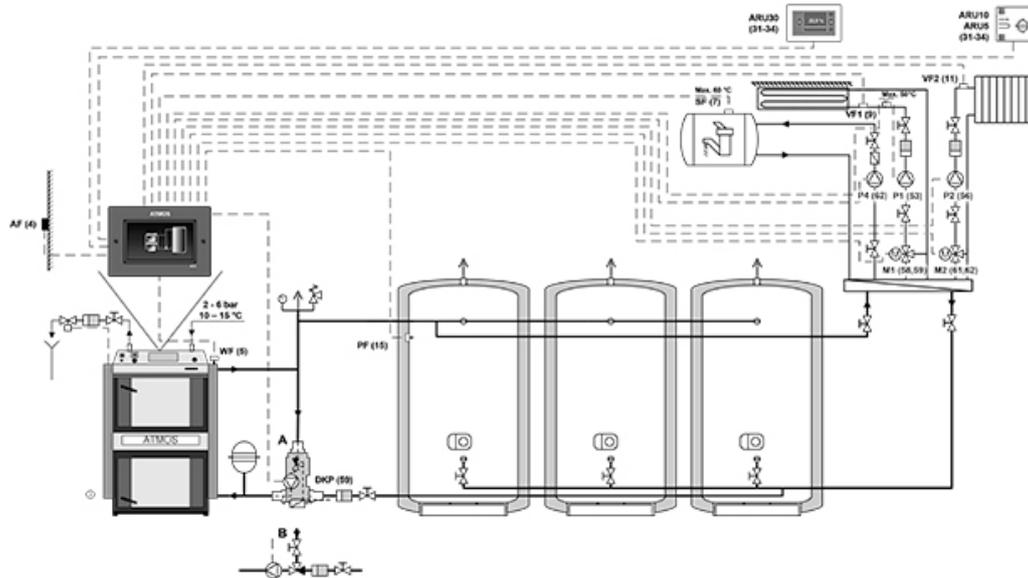


Abbildung 8: Komplettschaltung mit Pufferspeicher

3 Methodik

Für die genaue Verfahrenswahl der Wasserversorgung und Abwasserbehandlung der Insel stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Zur Ermittlung der besten Variante werden im Folgenden drei Szenarien mit unterschiedlichen Schwerpunkten vorgestellt und anschließend durch eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile miteinander verglichen. Dazu wird der Fokus auf Einfachheit, Stoffstromtrennung und Wasserkreislaufschließung gelegt. Die Auswahl der Szenarien berücksichtigt die örtlichen Begebenheiten und Konzeptionsvorgaben.

Die soziale Akzeptanz spielt eine wichtige Rolle bei der nachhaltigen Implementierung eines Versorgungskonzeptes. Anders als bei der herkömmlichen Planung ermöglicht der enge Kontakt zu den Bewohner*innen und deren Bewusstsein für naturnahe Lösungen die Implementierung unkonventioneller Nutzung von Stoffströmen. Da beispielsweise bei der Gewinnung von Dünger und Humus wichtig ist welche Stoffe (bspw. Medikamentenrückstände) eingetragen werden, wirkt sich das Verhalten der Nutzer*innen stark auf das Endprodukt aus und ist somit nicht überall problemlos umsetzbar. Stellenweise setzt auch der Betrieb der Anlage die Einbeziehung der Nutzer*innen voraus.

Wie die Auswertung der Nachhaltigkeitsbetrachtung in Kapitel 2.5.4 zeigt, verfügen die Anlagentypen Biofilter, BBF und SBR über die höchste Ökoeffizienz. Während der Biofilter und die SBR Anlage über sehr kompakte (Erd-) Bauweisen verfügen, lässt sich der BBF gut in das landschaftliche Bild integrieren. Aufgrund des erschwerten Zugangs der Insel über den Seeweg ist je nach Verfahrenswahl der Einsatz von PE-Behältern vorzuziehen.

3.1 Definition der Szenarien der Wasserversorgung und Abwasserverwertung

3.1.1 Szenario 1-Konventionell

Das Szenario „Konventionell“ stellt eine möglichst simple, konventionelle Konzeption dar und orientiert sich an einem herkömmlichen System (1-Stoffstromsystem) (Abbildung 9). Das Trinkwasser wird mittels Umkehrosmose aus dem Brackwasser gewonnen und sowohl für den Haushalt, die Tiere und den Garten bereitgestellt. Die Toiletten verfügen über eine Spülvorrichtung. Das Schmutzwasser wird gemeinsam mit dem Grauwasser in einer Behandlungsanlage gereinigt und anschließend in das Gewässer (Ostsee) eingeleitet. Der Schlamm aus der Behandlungsanlage wird gesammelt und auf das Festland transportiert. Es werden keine Wasserströme innerhalb des Systems rezirkuliert.

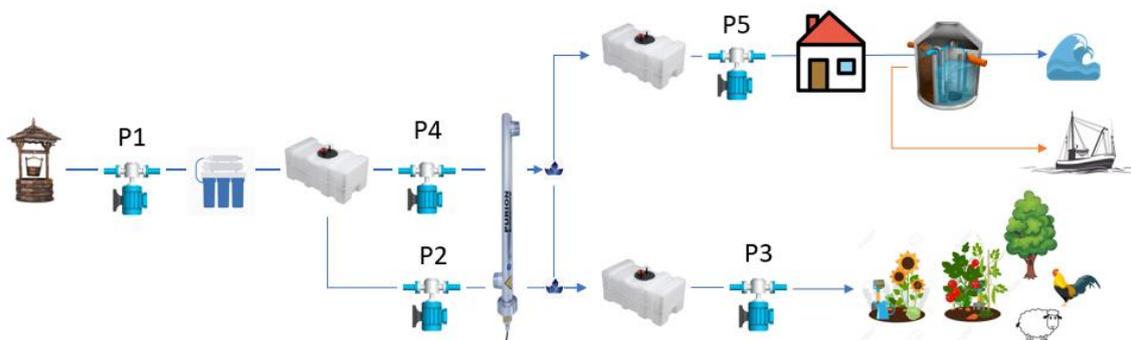


Abbildung 9: Schematische Skizze Szenario 1

Der notwendige Wasserbedarf für Szenario 1 richtet sich nach dem maximalen täglichen Verbrauch. Dieser liegt bei der Belegung von acht Personen und der maximalen Bewässerungsmenge im Juli und August vor. Daraus ergibt sich ein täglicher Trinkwasserbedarf von 1.284 l/d. Die Verteilung nach Nutzung ist Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Maximaler Trinkwasserbedarf - Szenario 1

Szenario 1	l/d
Bewohner*innen	864,0
Tiere	85,0
Besucher*innen	70,0
Garten	265,0
Summe	1.284,0

Das gesamte Trinkwasser wird über eine Umkehrosmoseanlage aufbereitet. Für die Entnahme des zulaufenden Brackwassers bestehen zwei Möglichkeiten, die direkte Entnahme aus dem Meer oder die Brunnenentnahme (Uferfiltrat). Die Entnahme aus dem Brunnen hat den Vorteil, dass das Wasser durch die zwischen der Ostsee und der Entnahme liegenden Bodenschichten gefiltert wird und sich somit die Vorreinigungsaufwand für die Umkehrosmose

reduziert. Es ist zu vermuten, dass sich auch der Salzgehalt verringert. Um dies zu belegen, ist eine Probenahme an einem möglichen Brunnenstandort durchzuführen und die entsprechende Wirkung zu untersuchen. Der Zulauf zur Umkehrosmoseanlage ist mit einer Vorbehandlung (Filtration) zu versehen, da die Membran sonst einer erhöhten Gefahr der Verstopfung ausgesetzt ist (vgl. Kapitel 2.4.2).

Die Umkehrosmoseanlage ist sowohl nach dem Wasserbedarf als auch nach der Rohwasserqualität auszulegen. Aufgrund des Salzgehaltes des Brackwassers (0,8 %) ist im Fall des Rudens besonders die Qualität maßgeblich. Ein kontinuierlicher Betrieb ist laut Hersteller ratsam in Anbetracht der Langlebigkeit und Verstopfungsgefahr der Membran. (HEMME WASSER, 2022) Da zum Zeitpunkt der Bearbeitung noch keine umfassende Wasseranalyse vorliegt, wird annäherungsweise an den ermittelten Salzgehalt eine Anlage zur Aufbereitung von Brackwasser ausgewählt. Als mögliche Ausführung kommt die UO 250 BW Standanlage der Firma Lippmann in Betracht. Die Anlage verfügt über eine Permeatleistung von bis zu 250 l/h bei einer Leistung von 2,2 kW, einer Ausbeute von 50 % und einem Betriebsdruck von 15 bar. (LIPPMANN, 2022) Durch den Bedarf von 1.284 l/d entsteht bei voller Leistung eine Laufzeit von 5,14 h pro Tag. Der tägliche Energiebedarf beträgt 11,3 kWh. Das aus der UO in den Speicher geleitete Permeat ist drucklos. Eine Nachbehandlung zur Anreicherung des Süßwassers sowie die Einstellung des pH-Wertes ist vorzusehen. Das Konzentrat wird dem Brackwasser wieder zugeführt.

Die UO-Anlage ist über eine Pegelmessung mit den dahinter angeordneten Speichern verbunden. Sobald der Wasserstand einen kritischen Füllstand erreicht, springt diese an und füllt den Tank. Da der zur Verfügung stehende Strom über eine PV-Anlage generiert wird, ist dies vorzugsweise tagsüber und während Sonnenscheins durchzuführen. Eine entsprechend intelligente Steuerungstechnik könnte zur Optimierung eingesetzt werden.

Zusätzlich ist das Wasser zu desinfizieren. Gewählt wird eine UV-Bestrahlung, die nach Arbeitsblatt W 293 des DVGW-Regelwerks auszulegen ist.

Der gesamte Energiebedarf in Szenario 1 setzt sich aus den Pumpen, der Umkehrosmoseanlage, der UV-Anlage und der SW-Aufbereitung zusammen. Die einzelnen Verbräuche sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Der maximale Gesamtbedarf summiert sich auf 14,5 kWh/d. Der Bedarf der Pumpen macht davon lediglich 1,14 kWh/d aus. Den größten Anteil trägt die Umkehrosmose mit 11,30 kWh/d.

Tabelle 5: Gesamtenergiebedarf - Szenario 1

Verfahren	Fördermenge Q [l/d]	Leistung [kW]	Laufzeit [h]	[kWh/d]	kWh/a
Pumpe 1	2.568	0,5	1,28	0,58	211
Pumpe 2	335	0,5	0,17	0,08	28
Pumpe 3	335	0,5	0,17	0,08	28
Pumpe 4	934	0,5	0,47	0,21	77
Pumpe 5	934	0,6	0,33	0,20	73
Umkehrosmose	1.284	2,2	5,14	11,30	4124
UV-Anlage	1.284	0,01	2,57	0,03	9
SW-Aufbereitung	700	-	-	2,04	744
Summe Gesamt				14,50	5293
Summe Pumpen				1,14	416

Zur Vergleichbarkeit der Szenarien wurde eine Schätzung der Kosten gemäß Herstellerangaben aufgestellt. Dabei handelt es sich lediglich um die Anschaffungskosten, ohne die aufwändigeren Preis für Transport und die Installation der Anlage zu berücksichtigen. Weiterhin werden nur die großen Anlagenbestandteile angesetzt. Leitungen, Verbindungen und auch weiterführende Arbeiten wie Erdarbeiten wurden nicht berücksichtigt. Die Gesamtkosten sind in Tabelle 6 aufgeführt. Sie belaufen sich auf 31.500 €.

Tabelle 6: Kostenschätzung - Szenario 1

Szenario 1			
Position	Anzahl	Kosten	Gesamt
Umkehrosmose BW	1	15.000,00 €	15.000,00 €
UV-Anlage	1	1.000,00 €	1.000,00 €
SW-Aufbereitung	1	5.000,00 €	6.000,00 €
Pumpen	5	1.000,00 €	5.000,00 €
Wasserspeicher	3	1.500,00 €	4.500,00 €
Summe			<u>31.500,00 €</u>

3.1.2 Szenario 2 -Stoffstromtrennung

Im zweiten Szenario liegt der Fokus auf der Stoffstromtrennung. Das Trinkwasser wird ebenfalls mittels Umkehrosmose gewonnen. Die Toilette wird als Trockentrenntoilette ausgeführt. Fäzes und Urin werden aufbereitet und können als Dünger und Humus eingesetzt werden. Das Grauwasser wird aufbereitet und zur Gartengestaltung eingeleitet oder genutzt. Regenwasser wird von den Dächern der Häuser aufgefangen, aufbereitet, in einem unterirdischen Tank gespeichert und für die Bewässerung der Gartenflächen und als Tränkwasser für die Tiere eingesetzt. Die Betrachtung wird ebenfalls unter Einbeziehung des Kasernendachs ausgeführt. Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau des zweiten Szenarios.

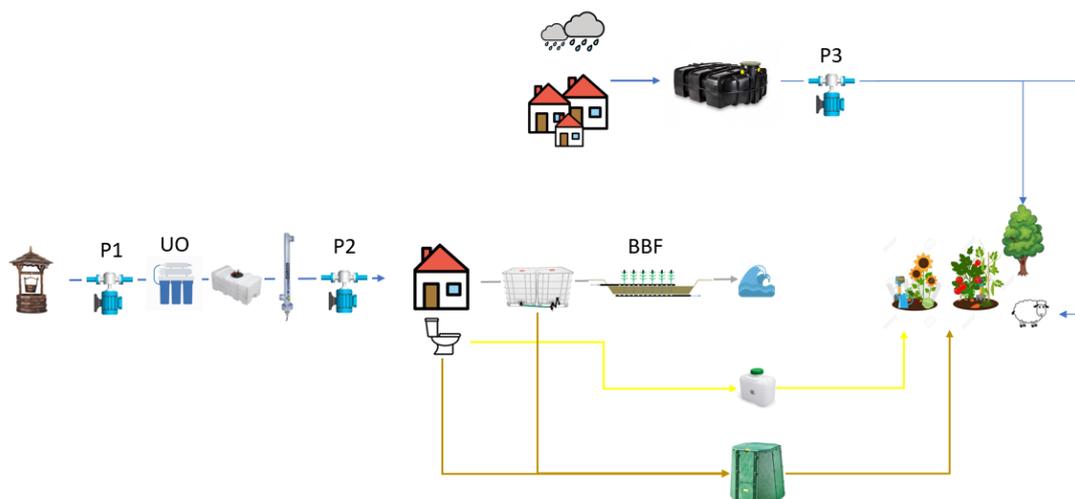


Abbildung 10: Schematische Skizze Szenario 2

Der Gesamtwasserbedarf für das zweite Szenario, bestehend aus TW und RW, ist in Tabelle 7 aufgeführt. Durch den Einsatz von TTT verringert sich dieser im Vergleich zu Szenario 1.

Tabelle 7: Wasserbedarf - Szenario 2 (eigene Darstellung)

Szenario 2	TW [l/d]	RW [l/d]	Summe [l/d]
Bewohner*innen	630,7	0,0	630,7
Tiere	0,0	85,0	85,0
Besucher*innen	70,0	0,0	70,0
Garten	0,0	265,0	265,0
Summe	700,7	350,0	1.050,7

Für das Szenario „Stoffstromtrennung“ sind zwei Speicher vorgesehen. Ein TW-Speicher und ein RW-Speicher. Während die Dimensionierung des TW-Speichers sich nach dem Bedarf für die Versorgung des Hauses richtet (vgl. Szenario 1), bedarf die Auslegung des RW-Speichers der Auswertung der Niederschlagsdaten. Das Volumen des TW-Speichers wird bei einem Bedarf von rund 700 l/d mit 1.000 l gewählt.

Entscheidend bei der Ermittlung des RW-Speichers ist die Größe der angeschlossenen Dachfläche, über die das RW gesammelt wird. Dazu wird im Folgenden zwischen den Varianten „Häuser“ (Dachflächen des Lotsenhauses und des Oberlotsenhauses) und „Kaserne“ (zuzüglich der Kasernendachfläche) unterschieden. Abbildung 11 zeigt die Kurven des Ausnutzungsgrades je nach Speichervolumen für die beiden Varianten. Für die Deckung von 90 % des Bedarfs über den 30-jährigen Betrachtungszeitraum gesehen, sind je nach Variante zwischen 1.200 l und 1.800 l Speichervolumen notwendig. Die vollständige Bedarfsabdeckung ist für Variante „Häuser“ bei 8.000 l und für Variante „Kaserne“ bei 6.000 l Speichervolumen erreicht.

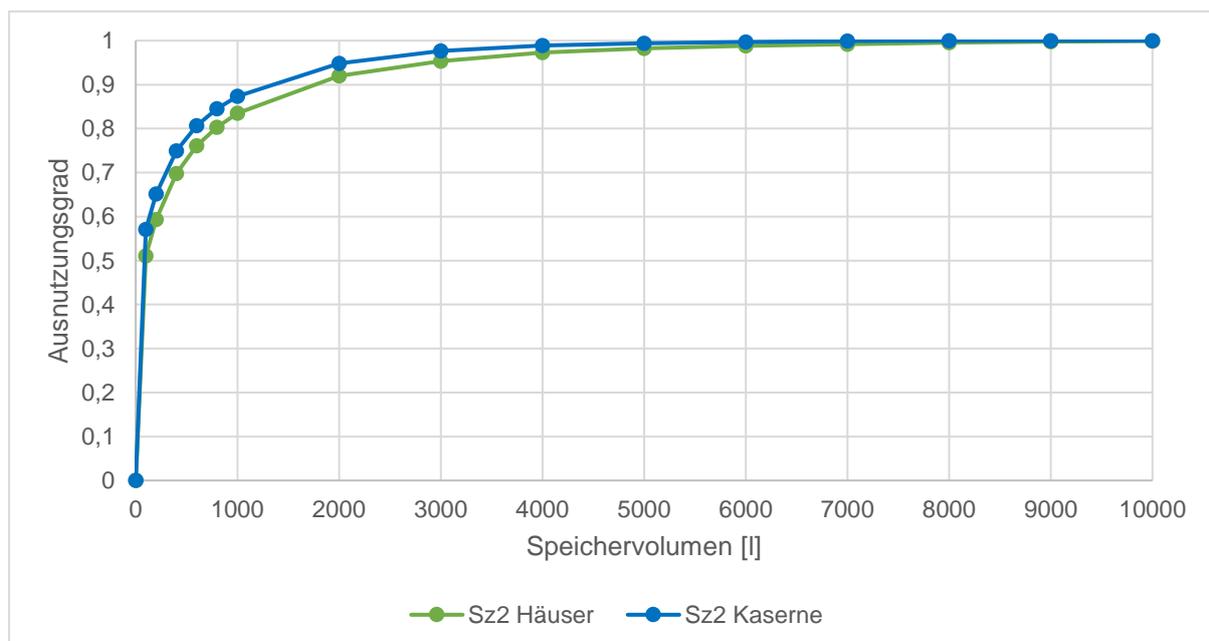


Abbildung 11: Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario 2 (eigene Darstellung)

Für die Betrachtung der Speicherdimensionierung ist auch die damit verbundene Periode der aufeinanderfolgenden Tage ohne Wasser im Speicher hilfreich. Abbildung 12 zeigt die maximalen Trockenperioden in Abhängigkeit des Speichervolumens. Bei dem zuvor aufgeführten Speichervolumen für einen Abdeckungsgrad von 90 % liegt die maximale Trockenperiode für die Variante „Häuser“ bei 22 Tagen und für die Variante „Kaserne“ bei 18 Tagen. Ab einem Speichervolumen von 8.000 l ist die durchgehende Versorgung für die Variante „Kaserne“ abgedeckt.

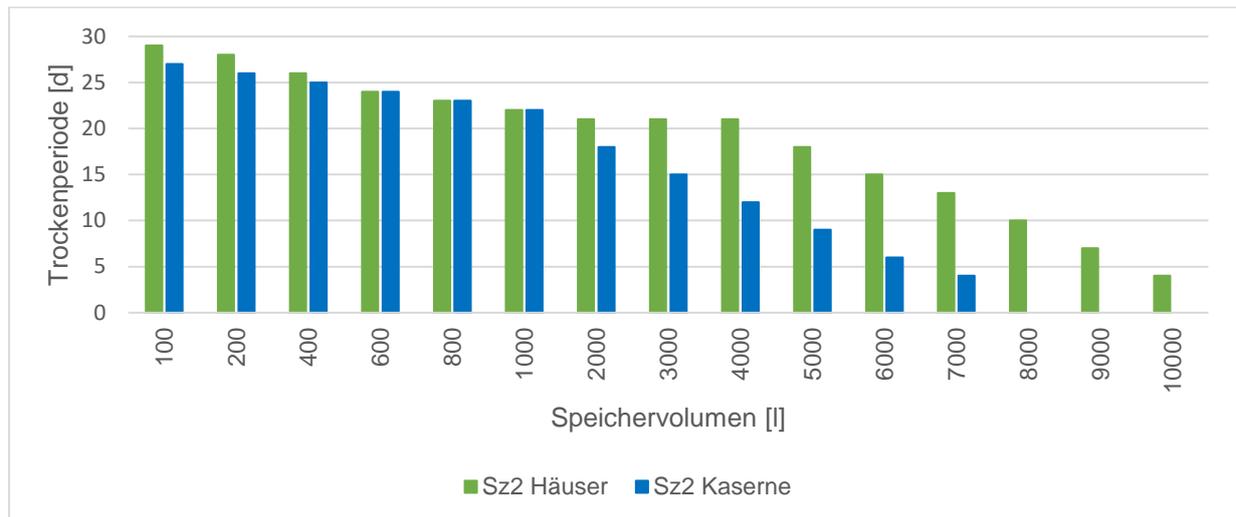


Abbildung 12: Dauer der Trockenperiode in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario 2 (eigene Darstellung)

Der gesamte Energiebedarf des zweiten Szenarios setzt sich aus den Pumpen, der Umkehrosmoseanlage, der UV-Anlage und der GW-Aufbereitung zu 6,8 kWh/d zusammen (vgl. Tabelle 8). Die Pumpen machen 0,51 kWh/d davon aus. Die Umkehrosmoseanlage hat mit 6,17 kWh/d den höchsten Energiebedarf.

Tabelle 8: Gesamtenergiebedarf - Szenario 2 (eigene Darstellung)

Verfahren	Fördermenge Q [l/d]	Leistung [kW]	Laufzeit [h]	[kWh/d]	kWh/a
Pumpe 1	1.401	0,5	0,70	0,32	115
Pumpe 2	701	0,5	0,25	0,11	41,1
Pumpe 3	350	0,5	0,18	0,08	29
Umkehrosmose	701	2,2	2,80	6,17	2251
UV-Anlage	701	0,01	1,40	0,01	5
GW-Aufbereitung	467	-	-	0,11	41,1
Summe Gesamt				6,80	2.482
Summe Pumpen				0,51	185

Die Kostenschätzung erfolgt analog zu den unter Szenario 1 aufgeführten Bedingungen. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 29.500 € (vgl.



Tabelle 9).

Der gesamte Wasserbedarf wird lediglich aus dem RW bezogen und ist Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Wasserbedarf - Szenario 3 (eigene Darstellung)

Szenario 3	RW [l/d]
Bewohner*innen	630,7
Tiere	85,0
Besucher*innen	70,0
Garten	265,0
Summe	1.050,7

Für das Szenario 3 sind drei Wasserspeicher vorzusehen. Ein TW-Tank, ein RW-Tank und ein Brauchwassertank. Die Dimensionierung des TW-Tanks erfolgt analog zu Szenario 1 und 2 und wird bei einem Bedarf von rund 700 l/d mit 1.000 l gewählt. Der Brauchwassertank sollte mindestens das täglich anfallende GW von 58 l/(E*d) speichern können (entspricht bei voller Belegung 464 l/d). Je größer der Brauchwasserspeicher, desto mehr GW kann für die Bewässerung des Gartens zurückgehalten werden. Die Auswahl der Speichergröße ist demnach von ökonomischen Faktoren abhängig.

Die Bemessung des RW-Tanks erfolgt vergleichbar zu Szenario 2. Abbildung 14 zeigt die Kurven des Ausnutzungsgrades in Abhängigkeit des Speichervolumens. Ein Ausnutzungsgrad von 90 % ist für die Variante „Häuser“ etwa bei 15.000 l erreicht. Für die Variante „Kaserne“ bereits bei rund 6.000 l. Um den gesamten täglichen Wasserbedarf mittels RW zu decken, bedarf es eines Speichervolumens von mehr als 18.000 l für die Variante „Kaserne“.

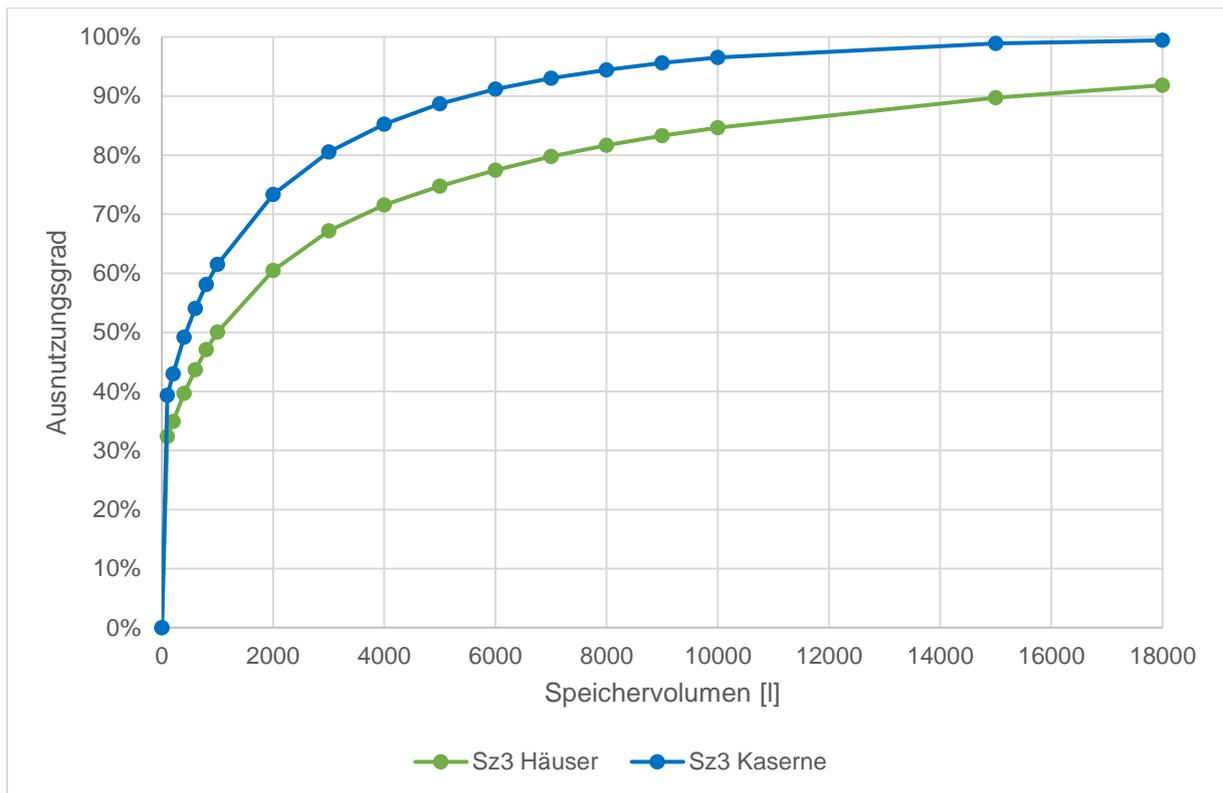


Abbildung 14: Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario 3 (eigene Darstellung)

Auch für Szenario 3 wird die Betrachtung der Trockenperioden herangezogen. Abbildung zeigt, dass bei einem Ausnutzungsgrad von 90 % von einer maximalen Trockenperiode von 29 Tagen für die Variante „Häuser“ und 22 Tagen für die Variante „Kaserne“ auszugehen ist.

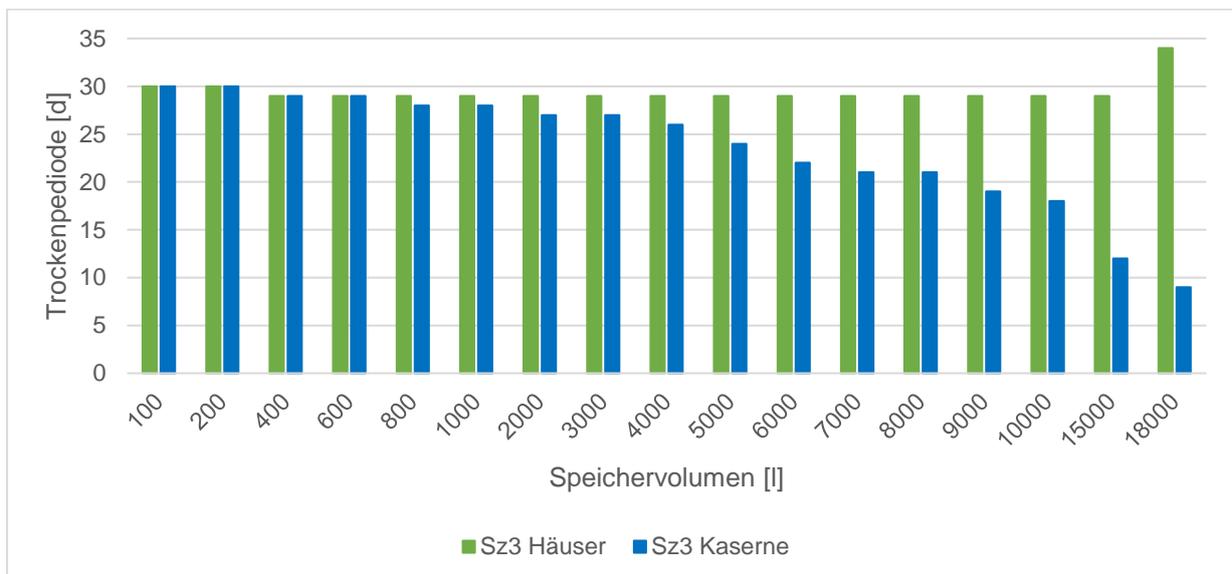


Abbildung 15: Dauer der Trockenperiode in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario 3 (eigene Darstellung)

Zur Aufbereitung des RW gibt es diverse Möglichkeiten. Für die Aufbereitung des RWs kann bspw. die UO LC-Standanlage der Firma Hemme Wasser, mit einer Leistung von 50-500 l/h eingesetzt werden. Die Ausbeute dieser Anlage liegt bei 75 % bei einem Energiebedarf von 0,75 kW.

Das durch den Zulauffilter vorgereinigte Regenwasser kann alternativ mittels einer Membranfiltration aufbereitet werden. Die Firma Intewa hat das Aqualoop-Verfahren für diese Anwendung konzipiert. Ultrafiltrationsmembranen mit einer Porengröße von 0,02 µm sorgen laut Angaben der Firma für die Entfernung von 99,9 % der Bakterien und 99,7 % der Viren. (INTEWA GMBH, 2022) Das Permeat muss nach der Behandlung den Anforderungen der TrinkwV genügen. Das Modul verbraucht nach Herstellerangaben 0,4 kWh/m³.

Da beim Einsatz der UO-Anlage von einem höheren Stromverbrauch auszugehen ist, wird diese in der weiteren Betrachtung angenommen. Die Wahl zum Aqualoop würde sich positiv auf die Energiebilanz auswirken.

Als Low-tech-Variante bietet sich eine hand- oder pedalbetriebene Osmoseanlage an. Diese ließe sich auch von den Besucher*innen im Sinne des Lehrauftrags zu Veranschaulichungszwecken bedienen.

In der zu den Abnahmestellen führenden Druckleitung wird eine UV-Anlage installiert, welche der Verunreinigung des Wassers durch eine potenzielle Nachverkeimung des Klarwassers vorbeugt.

Der gesamte Energiebedarf des zweiten Szenarios setzt sich aus den Pumpen, der Umkehrosmoseanlage, der UV-Anlage und der GW-Aufbereitung zu 4,29 kWh/d zusammen (vgl. Tabelle 11). Der Energiebedarf der Pumpen liegt bei 0,45 kWh/d.

Tabelle 11: Gesamtenergiebedarf - Szenario 3 (eigene Darstellung)

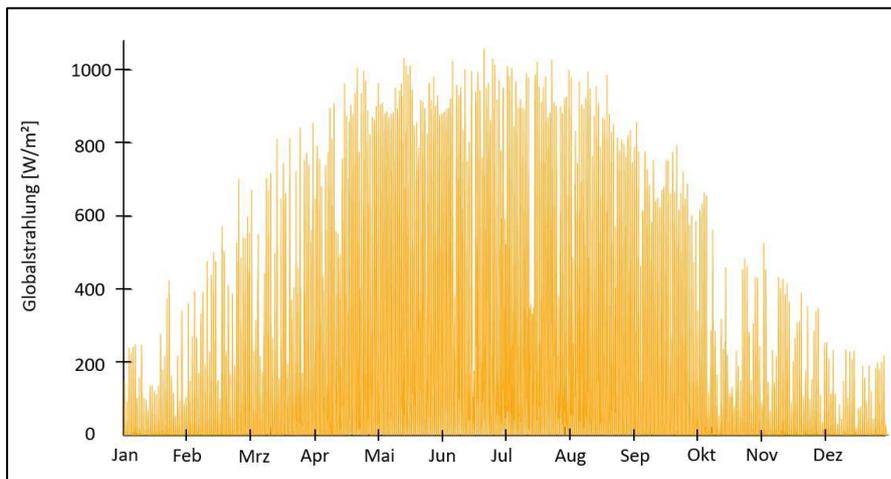
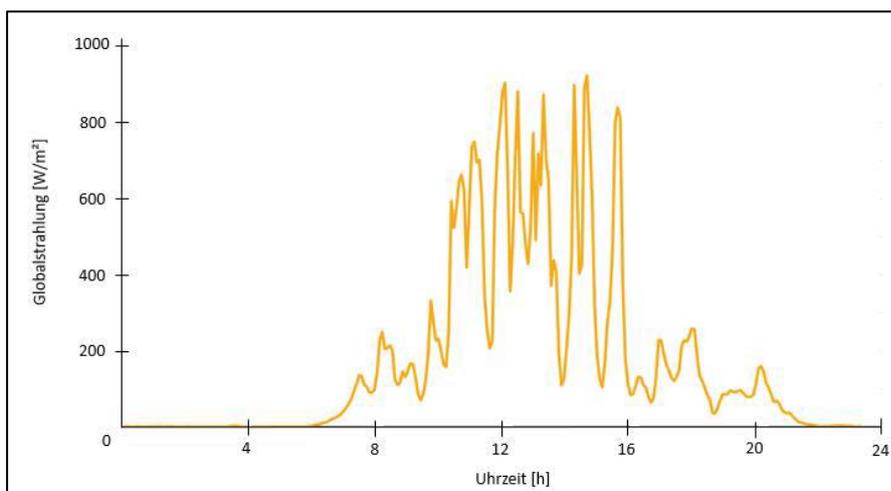
Verfahren	Q [l/d]	Leistung [kW]	Laufzeit [h]	[kWh/d]	kWh/a
Pumpe 1	701	0,5	0,25	0,11	41
Pumpe 2	467	0,5	0,23	0,10	38
Pumpe 3	701	0,5	0,35	0,16	58
Pumpe 4	350	0,5	0,18	0,08	29
UV-Anlage	701	0,01	1,40	0,01	5
Umkehrosmose	701	0,75	2,80	2,10	767
GW-Aufbereitung	467	-	-	0,10	38
Summe Gesamt				2,68	976
Summe Pumpen				0,45	166

Die Kostenschätzung erfolgt analog zu den unter Szenario 1 und 2 aufgeführten Bedingungen. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 27.500 € (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Kostenschätzung - Szenario 3 (eigene Darstellung)

Szenario 3			
Position	Anzahl	Kosten	Gesamt
Umkehrosmose BW	1	500,00 €	500,00 €
Umkehrosmose RW	1	5.000,00 €	5.000,00 €
UV-Anlage	1	1.000,00 €	1.000,00 €
SW Aufbereitung	1	5.000,00 €	6.000,00 €
Pumpen	4	1.000,00 €	4.000,00 €
Regenwasserspeicher	1	5.000,00 €	8.000,00 €
Wasserspeicher	2	1.500,00 €	3.000,00 €
Summe			27.500,00 €

3.2 Beschreibung zur Modellierung der Energieszenarien


Abbildung 16: Globalstrahlung in Watt pro m² im Verlauf eines Jahres am Messstandort Stralsund

Abbildung 17: Globalstrahlung in Watt pro m² im Verlauf eines Tages am Messstandort Stralsund

„Zur Auslegung der erforderlichen WKA und PV-Leistung wurde ein Simulationsmodell mit MatLab Simulink erstellt. Dieses beinhaltet Windkraftanlagen, Photovoltaikanlagen, einen Energiespeicher und [den Energieverbrauch nach saisonalem Bedarf]. Die Energieerzeuger (WKA und PV) werden so dimensioniert, dass mit Hilfe des Batteriespeichers jeder Zeit der Verbrauch abgedeckt ist. Der Energiespeicher ist in jedem Fall nötig, da wind- und sonnenfreie Zeitbereiche nicht ausgeschlossen werden können. Die Basis der Energieversorgung sollen Photovoltaikmodule bilden. Da diese in Abhängigkeit von Sonnenstand und Globalstrahlung Energie erzeugen, ergeben sich leistungsfreie Zeitbereiche (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). Neben den starken Strahlungsschwankungen im Tagesverlauf, ist vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang keine Strahlung vorhanden. Ebenso sind die Wintermonate durch besonders wenig Strahlung geprägt. Einzelne wetterbedingt strahlungsschwache Tage sind vereinzelt über das ganze Jahr zu verzeichnen.

Sinnvoll ist die Abfederung von Leistungsengpässen im Winter und nachts durch Windenergie. In Abbildung 21 ist erkennbar, dass die Windgeschwindigkeit im Jahresverlauf konstanter ausfällt als die Globalstrahlung. Die vorliegenden Windgeschwindigkeitsdaten stammen aus Stralsund und fallen folglich ggf. für die Insel Rügen stärker aus. Sie wurden in 10 m Höhe aufgezeichnet.“ (Franzen, 2022)

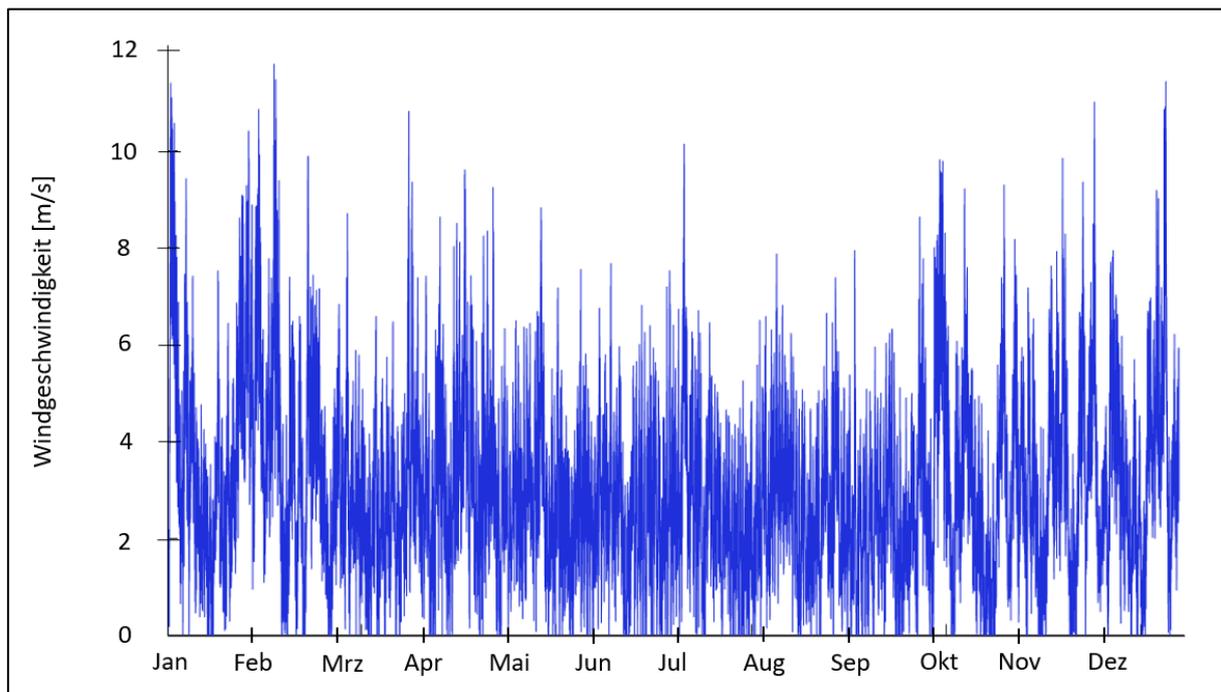


Abbildung 18: Windgeschwindigkeit Stralsund. Messhöhe: 10 m über Grund.

Da der Hauptbestandteil der Energieversorgung aus Photovoltaik gedeckt werden soll, wurde die maximal mögliche Anzahl der Module auf dem Kasernendach ermittelt und für die Simulations-Szenarien auf 180 Module festgelegt. Das erste Szenario stellt eine Energieversorgung ohne WKA, dafür aber mit einem erhöhten Energiespeicher dar. Für das zweite Szenario sind zwei Kleinwindkraftanlagen und ein kleinerer Energiespeicher simuliert worden. Es wurden jeweils das in Abbildung 8 dargestellte Personenszenario angewendet.

3.2.1 Notwendige Datengrundlage Modellierung

Wie im Kapitel Beschreibung zur Modellierung der Energieszenarien beschrieben, wurde das Simulationsmodell mit MatLab Simulink erstellt. Hierfür wurden mehrere Skripts geschrieben, die die Stromerzeugung mittels PV und Windkraft, sowie den Verbrauch abbilden und in Variablen speichern. Um diese für die Simulation zu verwenden und auswerten zu können, werden die Variablen in Simulink übertragen, wo die eigentliche Modellierung des Systems stattfindet. Die Berechnung findet in 5 Minuten Schritten für ein gesamtes Jahr statt. Die Einteilung in 5 Minuten Schritte wurde festgelegt, da die Globalstrahlungsdaten und Winddaten in diesem Format zur Verfügung standen.

3.2.2 Photovoltaik

„In das Simulationsmodell der Photovoltaikanlagen fließen zunächst die Globalstrahlungsdaten über ein Jahr ein. Diese bestehen, wie bereits erwähnt, aus je einem Wert pro 5 Minuten Messzeit. Für einen vollständigen Jahresgang werden 104.000 Messpunkte eingelesen. Das korrekte Einlesen wird mit einem „Simulink-Scope“ überprüft. Vor der Implementierung der PV-Module werden zunächst allgemeine Verluste durch Staub und Dreck auf den Moduloberflächen berücksichtigt. Die restliche Globalstrahlung wird nun mit den vorhandenen PV-Modulen verrechnet. Diese werden durch Höhe und Breite, Anzahl und einer Wirkungsgradangabe des Herstellers implementiert. Daraus ergibt sich die jeweilige Momentanleistung der installierten Solarmodule. In einem dritten Schritt werden die einzelnen 5-Min-Werte zu einem Jahresertrag aufsummiert (Abbildung 20). Alle Variablen sind im Simulink-Modell allgemein hinterlegt. In einem dazugehörigen Skript können alle Werte einzeln verändert werden. (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

```
9
10   %Solarmodell
11   %188
12 -   L_M = 1.721; %Modullänge
13 -   B_M = 1.113; %Modulbreite
14 -   A_M = 180; %Modulanzahl
15 -   W_M = 0.18; %Wirkungsgrad Modul
16 -   V_M = 0.01; %Verluste durch Staub am Modul
17
```

Abbildung 19: PV spezifische Variablen im Solarmodell

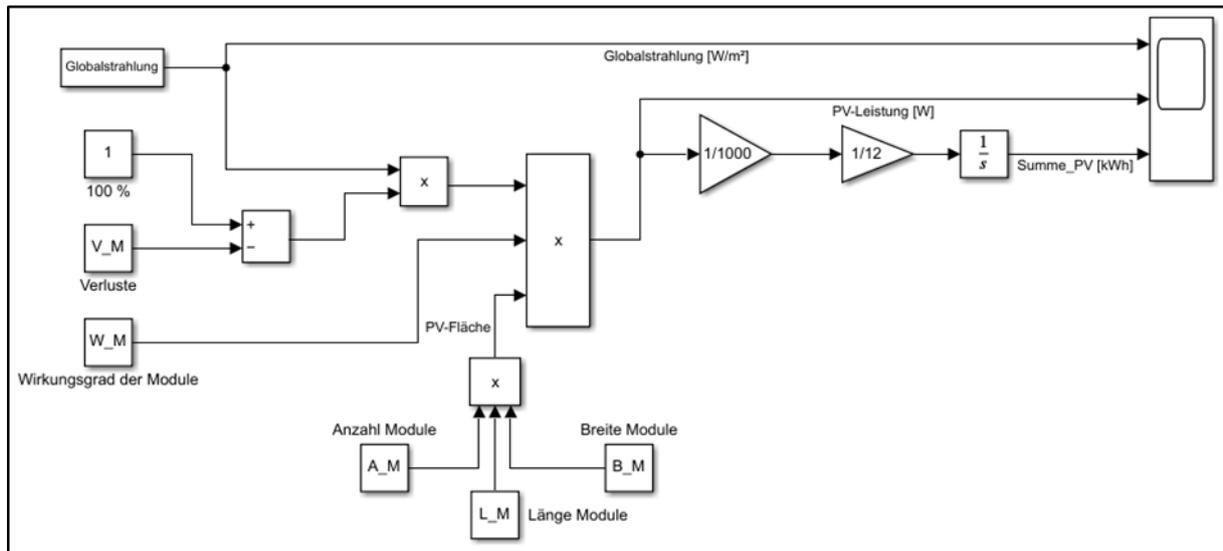


Abbildung 20 Simulationsmodell Photovoltaik, erstellt mit MatLab Simulink

Alle drei Messgrößen können für den gesamten Jahresverlauf ausgelesen werden (Abbildung 21). Die Globalstrahlung als Ausgangsgröße ist ganz oben in Gelb dargestellt. Die Leistung der installierten PV-Module wird in der Mitte in Blau dargestellt. Bei 180 Modulen mit den Maßen 1,7 m x 1,0 m und einem Wirkungsgrad von 18%, ergeben sich Spitzenwerte von bis zu 65.000 W. Werden die Einzelleistungen über ein Jahr aufsummiert, ergibt sich eine Jahresleistung von ca. 70 MWh (unten in grün dargestellt). Jeweils in den ersten und letzten Monaten des Jahres ist die Globalstrahlung gering. Dadurch steht wenig PV-Leistung zur Verfügung und der Anstieg der Summationskurve ist gering.“ (Franzen, 2022)

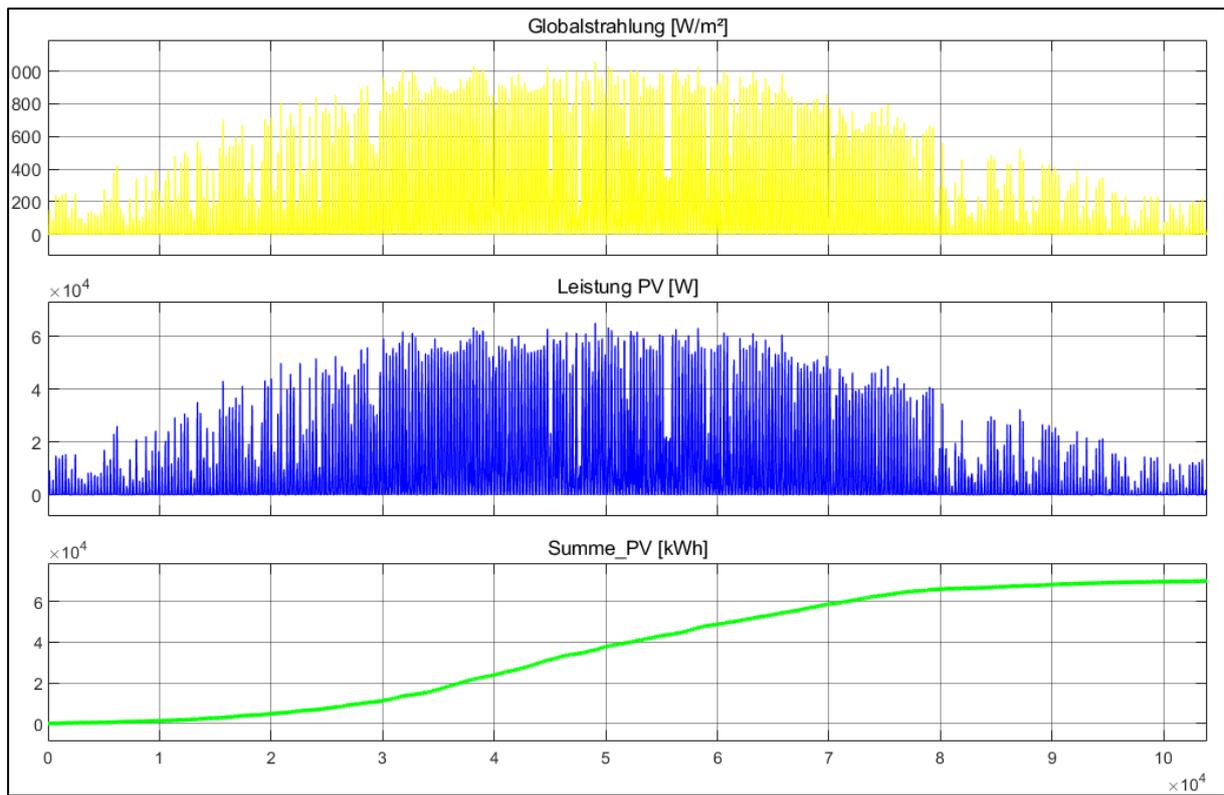


Abbildung 21: Globalstrahlung, PV-Leistung und Jahressumme je nach spezifischen Angaben. Werte beziehen sich auf die Variablenwerte aus Abbildung 6

3.2.3 Windkraftanlage

„Die Leistung der Windkraftanlage wird anhand der vorhandenen Winddaten und der spezifischen Parameter der Windkraftanlage berechnet. Die Anzahl der Datenpunkte der Windgeschwindigkeit beträgt wie die Globalstrahlungsdaten 104.000. Das korrekte Einlesen der Daten wird direkt in einem Scope überprüft. Da der vorhandene Datensatz in 10 m Höhe aufgezeichnet wurde, müssen die Messdaten an die tatsächliche Nabenhöhe der Windkraftanlagen durch die Berechnung der Windscherung angepasst werden. Die Windscherung berechnet sich nach Formel 1. Alle Parameter sind extern in einem MatLab-Skript hinterlegt (Abbildung 22).

$$V_{korr} = U * \frac{\ln\left(\frac{H_{Nabe}}{Rau}\right)}{\ln\left(\frac{H_{Mess}}{Rau}\right)}$$

- V_{korr} = korrigierte Windgeschwindigkeit
- U = Ausgangsdaten (gemessene Windgeschwindigkeit)
- H_{Nabe} = Nabenhöhe
- H_{mess} = Höhe der Windmessung
- Rau = Rauigkeitswert (0,0002 Offshore & 0,005 für Wattgebiete)

Die erhobenen Winddaten stammen vom Standort der Hochschule Stralsund. Dort liegen nach dem Global Wind Atlas (<https://globalwindatlas.info/>) die Durchschnittsgeschwindigkeiten bei etwa 5 m/s in 10 m Höhe. Auf dem Ruten ist eine höhere Geschwindigkeit von etwa 7,5 m/s anzunehmen. Daher wird jeder Wert im Model um 2 m/s erhöht. Der entsprechende Simulink-Ausschnitt ist in Abbildung 23 dargestellt.

Nach der Berechnung der korrigierten Windgeschwindigkeit tritt eine Fallunterscheidung ein. Diese ist nötig, da eine WKA erst bei einer spezifischen Mindestgeschwindigkeit anläuft. Unterhalb dieser Mindestgeschwindigkeit erzeugt die WKA keine Leistung. Der zweite zu implementierende Fall ist die Sturmabschaltung. Dies ist nötig, um die Anlage vor Schäden zu bewahren. Oberhalb dieser Maximalgeschwindigkeit wird keine Leistung mehr erzeugt. Dazwischen ergeben sich aus Kennwerten der Anlage spezifische Leistungen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit.“ (Franzen, 2022) Für die Windkraftanlage ist eine Schwachwindabschaltung von 3 m/s und eine Starkwindabschaltung von 13 m/s angegeben. Mit folgender Formel werden die Leistungswerte aus den Winddaten errechnet.

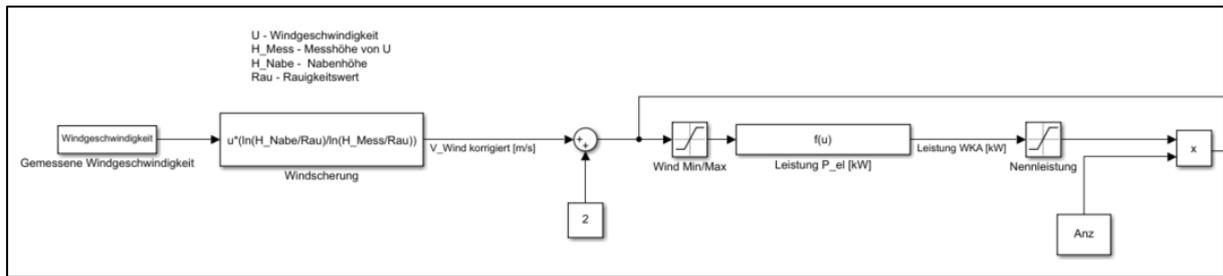
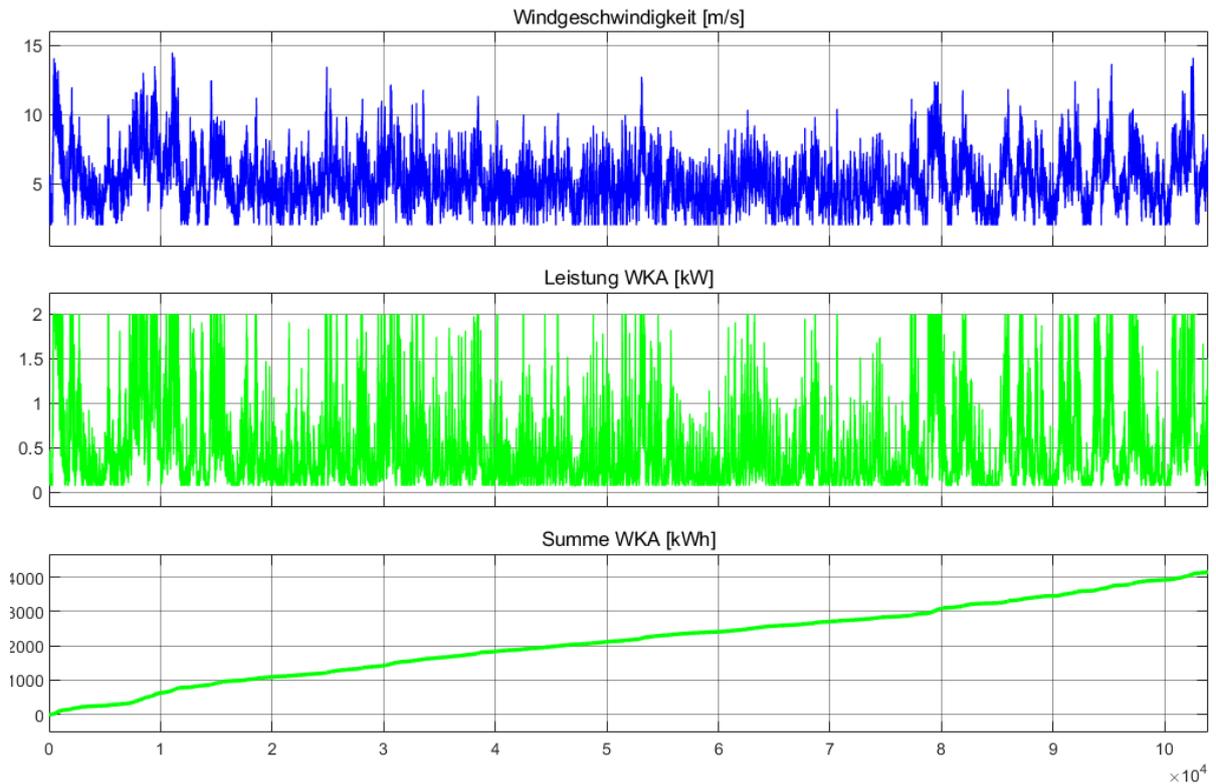
$$P = U^3 * \frac{1}{2} * Phi * \frac{\pi}{4} * D_{Rotor}^2 * W_{Bei}$$

- P = korrigierte Windgeschwindigkeit
- U = Ausgangsdaten (korrigierte Windgeschwindigkeit)
- Phi = Luftdichte
- D_{Rotor} = Durchmesser des Rotors
- W_{Bei} = Leistungsbeiwert

„Schließlich werden die einzelnen Leistungswerte pro 5 Minuten aufsummiert. Daraus ergibt sich der Jahresertrag der Windkraftanlage. Windgeschwindigkeit, Momentane Leistung und aufsummierte Leistung werden in einem Scope ausgegeben (Abbildung 27).“ (Franzen, 2022) Durch die im Mittelwert übers Jahr gesehen relativ konstante Windgeschwindigkeit ergibt sich eine konstante Leistung, die durch die WKA erzeugt wird. Das wird durch den linearen Anstieg in Diagramm 3 dargestellt.

```
18
19   %Windkraftanlage
20 -   Anz = 2; %Anzahl der Wind-Turbinen
21 -   H_Mess = 10; %Messhöhe der Windgeschwindigkeitsdaten
22 -   H_Nabe = 18.5; %Nabenhöhe der installierten WKA
23 -   W_Nenn = 1; %Nennleistung
24 -   V_Nenn = 9; %Windgeschwindigkeit bei Nennleistung
25 -   W_Schwach = 3; %Schwachwindabschaltung
26 -   W_Sturm = 13; %Windgeschwindigkeit Sturmabschaltung
27 -   Rau = 0.0002; %Rauigkeitswert 0.0002 = Offshore // 0.005 = Wattgebiet
28 -   Phi_L = 1.225; %Dichte der Luft
29 -   D_Rot = 3.08; %Durchmesser Rotor
30 -   W_Bei = 0.29; %Leistungsbeiwert
31
```

Abbildung 22: Alle Variablen des WKA-Simulationsmodells sind in einem MatLab-Skript hinterlegt


Abbildung 23: Simulink-Modell der WKA

Abbildung 24: Windgeschwindigkeit, WKA-Leistung und Jahressumme je nach spezifischen Angaben. Werte beziehen sich auf die Variablenwerte aus Abbildung 7

3.2.4 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch wird äquivalent zu Solar- und Windwerten in 5-Minuten Schritte eingeteilt, um die Werte der produzierten Leistung mit den benötigten Leistungswerten zu vergleichen. Anhand der Bedarfsermittlung wurde ein Array erstellt, das die 104.000 Messpunkte eines Jahres speichert. Dazu wurde der benötigte Strom je 5 Minuten aller einzelnen Verbraucher den entsprechenden Zeiten am Tag zugeordnet und aufsummiert. Aus der tageszeitgenauen Zuweisung der jeweiligen Verbraucherlast ergibt sich somit für die Personenauslastung eine Wochenroutine für den Verbrauch. In Abbildung 26 ist ein Wochenablauf im Sommer, bezogen auf den Energieverbrauch zu sehen. Hier sind insbesondere die Lastspitzen der Waschmaschine und der Wasserkocher zu erkennen. Die Grundlast setzt sich u.a. aus der Nutzung von Laptops, der Kühlschränke und Pumpen zusammen. Verglichen zu Abbildung 27 ist im Sommer noch ein konstanter Verbrauch für die

Gartenbewässerung eingeplant, wohingegen im Winter der Zündvorgang einer Pelletheizung mitberücksichtigt wird.

```

27
28     % Erstellung Lastprofil
29     i = 0;
30     for Mon = 1:13           % Monate (13 kommt mit 364 Tagen gut hin)
31         for w = 1:4         % Wochen
32             for tag = 1:7   % Tage
33                 for h = 1:24 % Stunden
34                     for min = 1:12 % 5 min
35                         i = i+1;
36                     Time (Mon,w,tag,h,min) = i; %Zeitvariable läuft hoch
    
```

Abbildung 25: Skript zur Erstellung eines Daten-Arrays, welcher ein Jahr in 5-Min-Schritte unterteilt

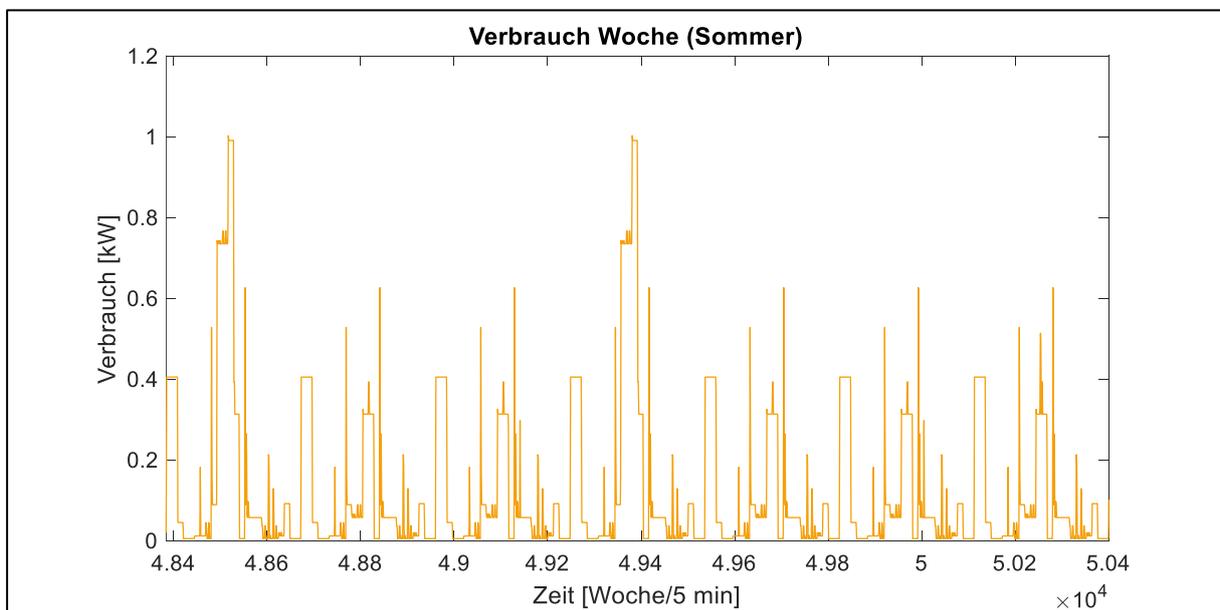


Abbildung 26: Energieverbrauch pro Woche (Sommer)

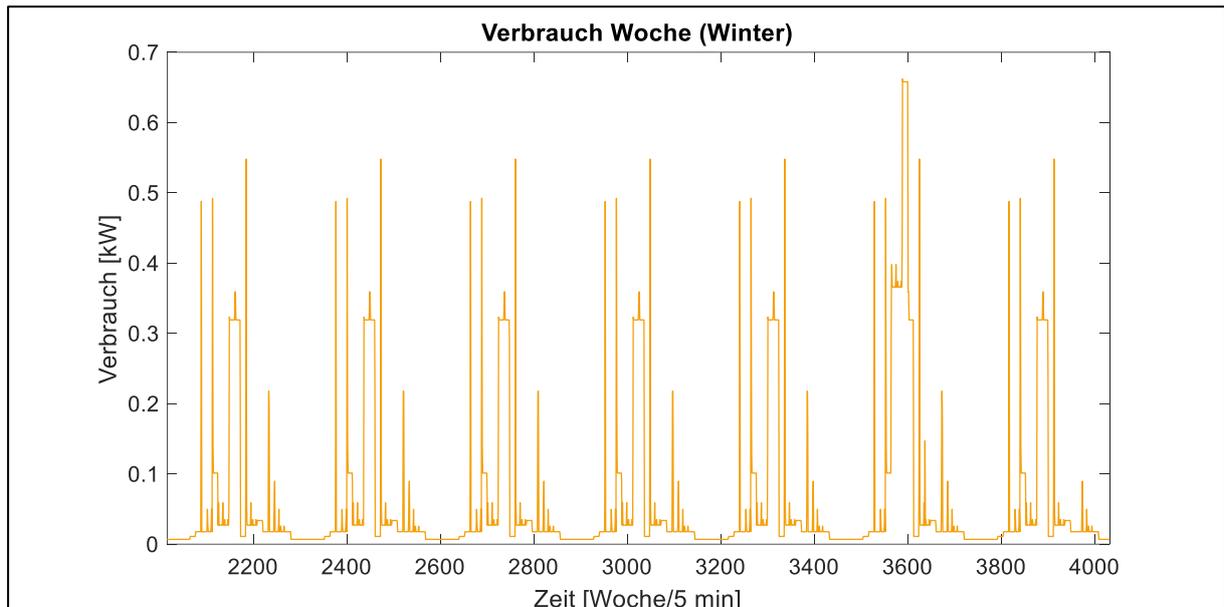


Abbildung 27: Energieverbrauch pro Woche (Winter)

Abbildung 28 zeigt den Gesamtverbrauch pro Jahr in 5 Minuten Schritten. Auf der Sekundärachse ist zusätzlich die Personenanzahl aufgezeigt, um die Abhängigkeit des Energieverbrauchs nach Personen zu verbildlichen. Kumuliert ergibt dieser Verbrauch rund 10 MWh über das Jahr.

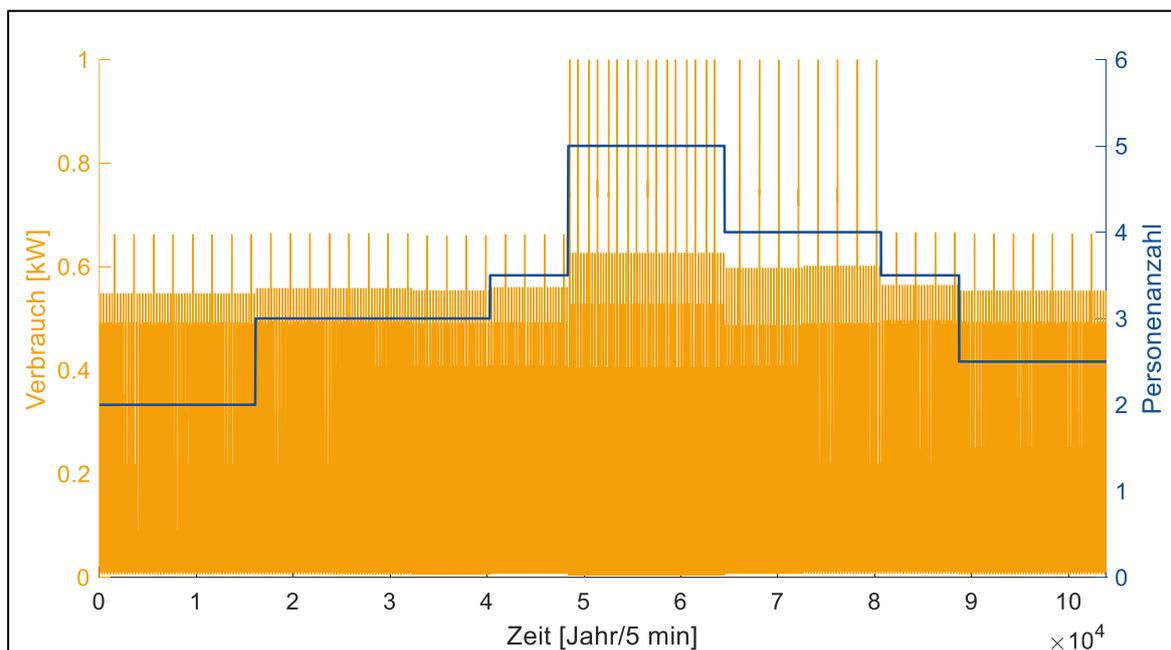


Abbildung 28: Energieverbrauch pro Jahr mit Personenanzahl

Es gilt zu bedenken, dass für jede Verwendung von Wasser auf dem Ruden Energie notwendig ist, da zumindest eine Wasserpumpe betrieben werden muss. Der Wasserbedarf, sowie die notwendige Infrastruktur, um das nötige Trinkwasser bereitzustellen, wurden von der TU Berlin ermittelt.

3.2.5 Warmwasserverbrauch

Anfangs wurde in der Simulation Warmwasser mittels Durchlauferhitzer produziert. Die Verwendung eines Durchlauferhitzers führt allerdings zu erheblichen Lastspitzen im Energieverbrauch. Daher wurde ein Warmwasserspeicher simuliert und anstelle eines Durchlauferhitzers verwendet. Der Boiler wurde so simuliert, dass dieser ausschließlich überschüssigen Strom zum Heizen verbraucht. Das Volumen des Boilers wurde auf 200 Liter bestimmt, damit bei Bedarf vier Personen nacheinander mit einer Tankfüllung, bei einem Verbrauch von 50 Litern pro Duschgang, duschen können. Aufgrund der Beschränkung der Heizleistung auf überschüssigen Strom (gesamter produzierter Strom, sobald Energiespeicher voll ist) wurden im Skript die Duschzeiten pro Person zeitlich auf den Nachmittag gelegt. Der Warmwasserspeicher liefert das Wasser für die Dusche, zum Hände waschen, zum Geschirr spülen, sowie zum Putzen. Das Skript zur Entnahme des Warmwassers ist äquivalent zum Energieverbrauch aufgebaut. Hier wird allerdings das zu entnehmende Wasservolumen in einer Variable gespeichert. In Summe ergibt sich ein jährlicher Warmwasserbedarf von rund 120.000 Litern.

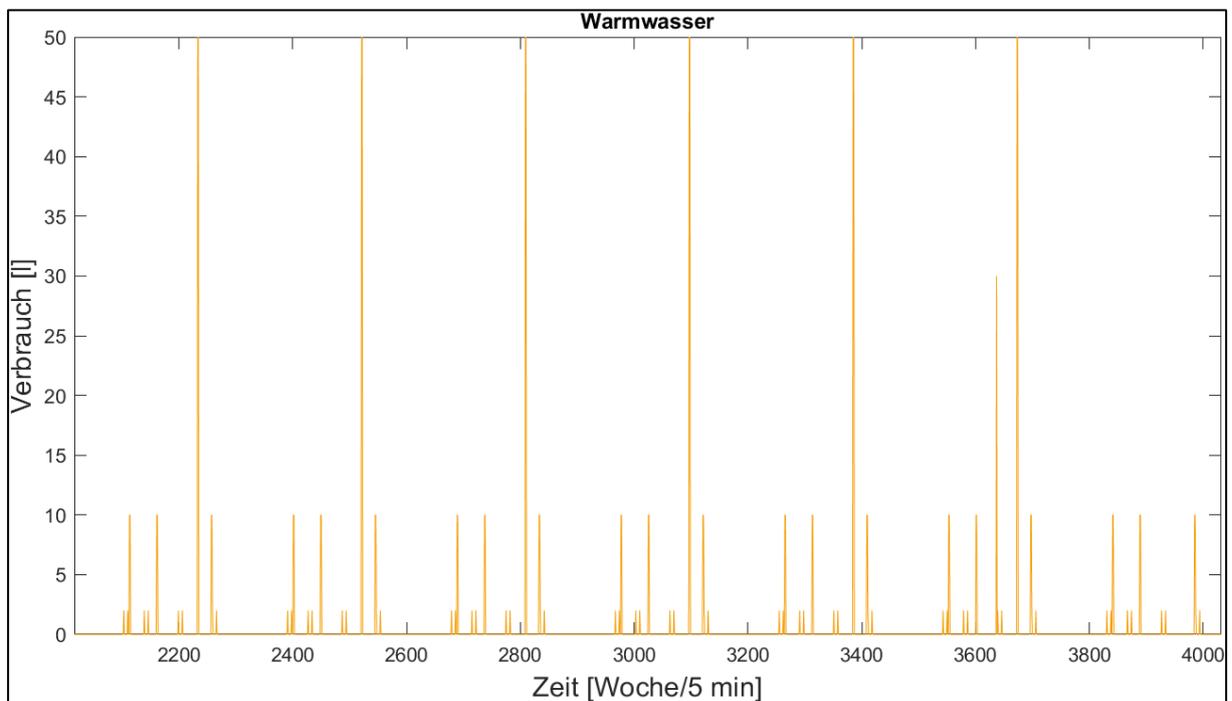


Abbildung 29: Warmwasserverbrauch pro Woche

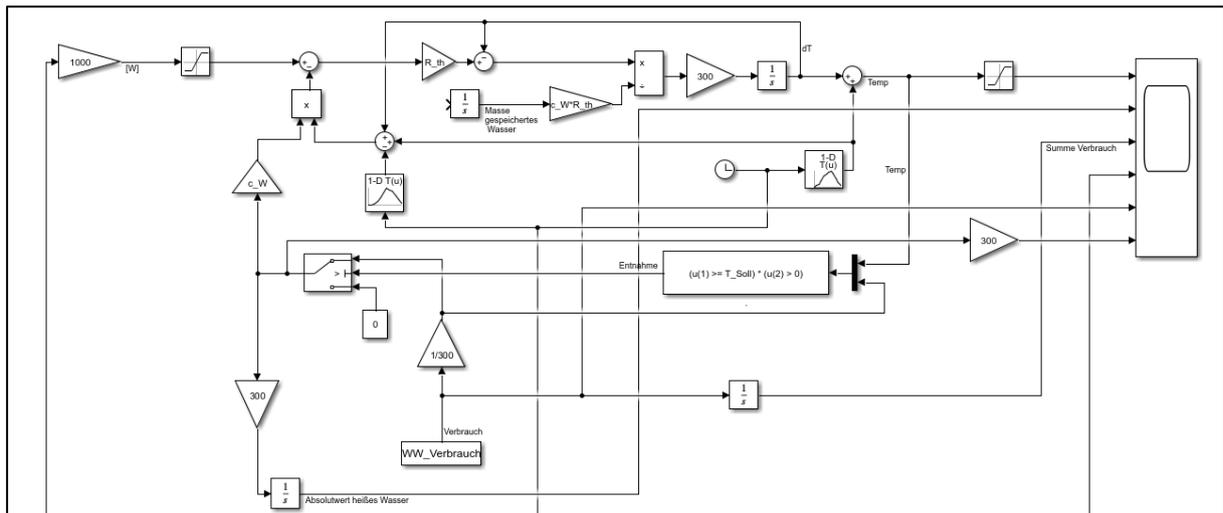


Abbildung 30: Simulink-Modell des Warmwasserspeichers

3.2.6 Energiespeicher

„Im Modell wird der Energiespeicher durch seine Kapazität und seine eigene bzw. die Nennleistung des entsprechenden Umrichters (Stellgliedes) bestimmt. Verrechnet werden der aktuelle Ertrag von PV-Anlage und WKA mit dem Verbrauch. Ergibt sich darauf ein negativer Wert, wird der Energiespeicher entladen. Ist der resultierende Wert positiv, wird der Energiespeicher geladen, bis seine Kapazitätsgrenze erreicht wird. Oberhalb dieser Grenze geht zu viel produzierte Energie in den Warmwasserspeicher. Die Einspeiseleistung wird durch die Nennleistung des Umrichters limitiert. Der Speicher selbst wird im Modell durch einen Integrator realisiert (Abbildung 31). Die Leistung des Umrichters und die Speicherkapazität sind als Variablen in einem externen Skript hinterlegt.

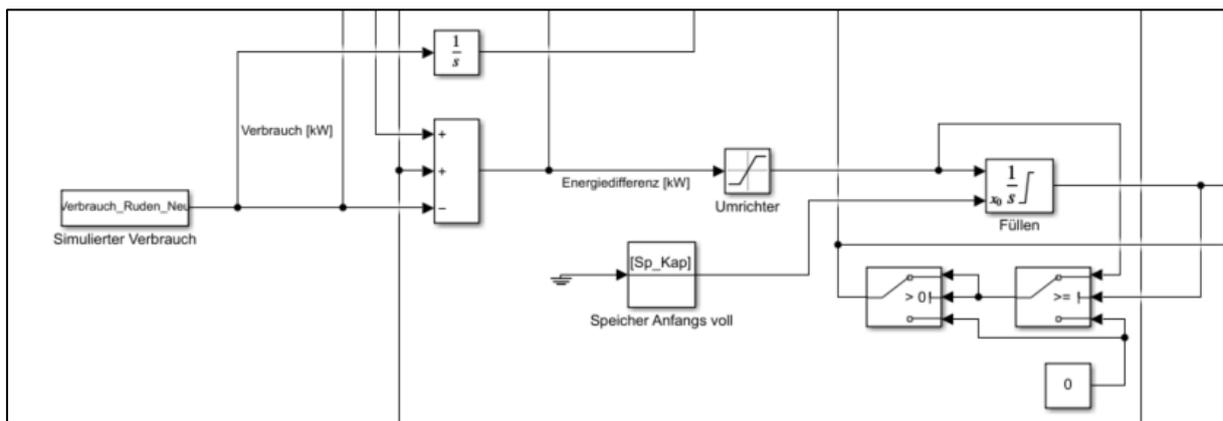


Abbildung 31: Simulink-Modell des Energiespeichers

Die Auslegung des Energiespeichers ergibt sich hauptsächlich aus der Speichergröße in kWh. Die Größe muss in allen kritischen Momenten ausreichen, um die Netzstabilität zu gewährleisten. Wird der Energiespeicher zu groß ausgelegt, lohnt er sich wirtschaftlich nicht. Ist die Kapazität zu gering, kommt es im Winter aufgrund der geringen Sonnenstunden und -intensität, sowie in den Sommermonaten durch den erhöhten Bedarf aufgrund zusätzlicher Personenauslastung und Verbraucher, zu Stromunterbrechungen. Dieser Zustand kann durch eine Erhöhung der Kapazität vermeiden werden.“ (Franzen, 2022)

3.2.7 Vorversuche mit Kleinwindkraftanlagen

Da sich die derzeitige Marktsituation im Bereich der Kleinwindkraft als sehr unübersichtlich herausgestellt hat, wurden im Vorfeld Messreihen und Versuche mit verschiedenen Rotor-Geometrien im hochschuleigenen Windkanal durchgeführt. Mit Hilfe des Windkanals der „Göttinger Bauart“ können Horizontale wie vertikale Rotoren in einem Bereich zwischen 6 und 30 m/s untersucht und deren Leistungsbereiche vermessen werden.

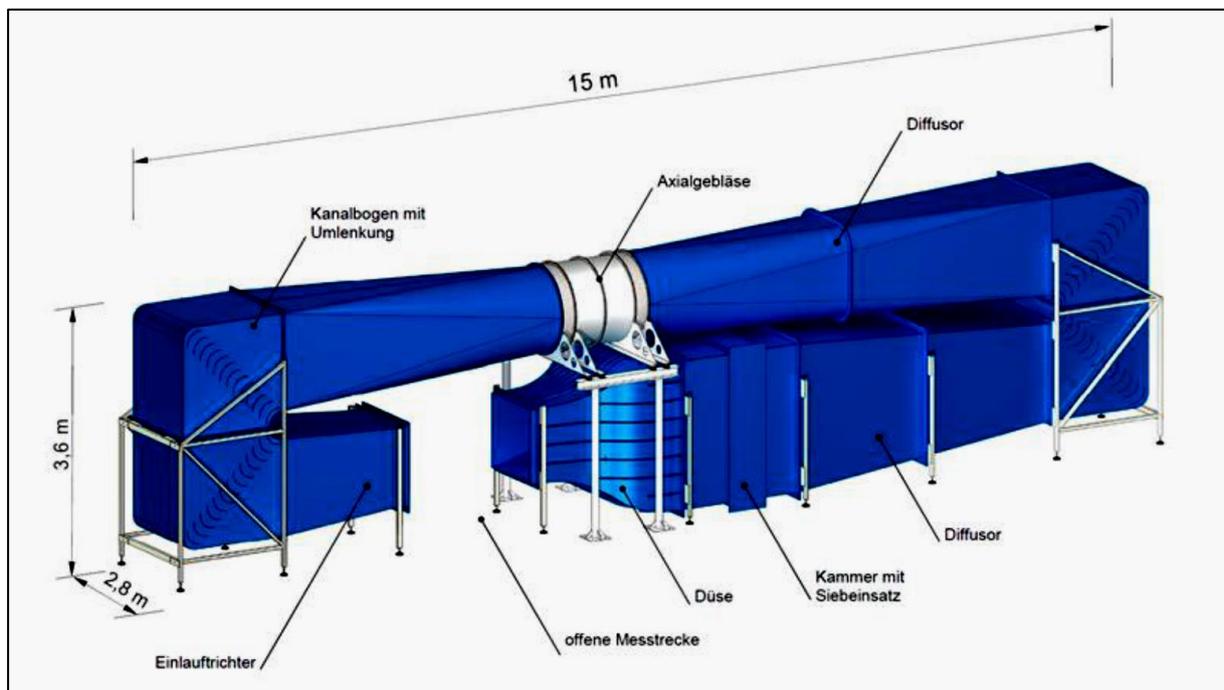


Abbildung 32: Windkanal der Hochschule Stralsund

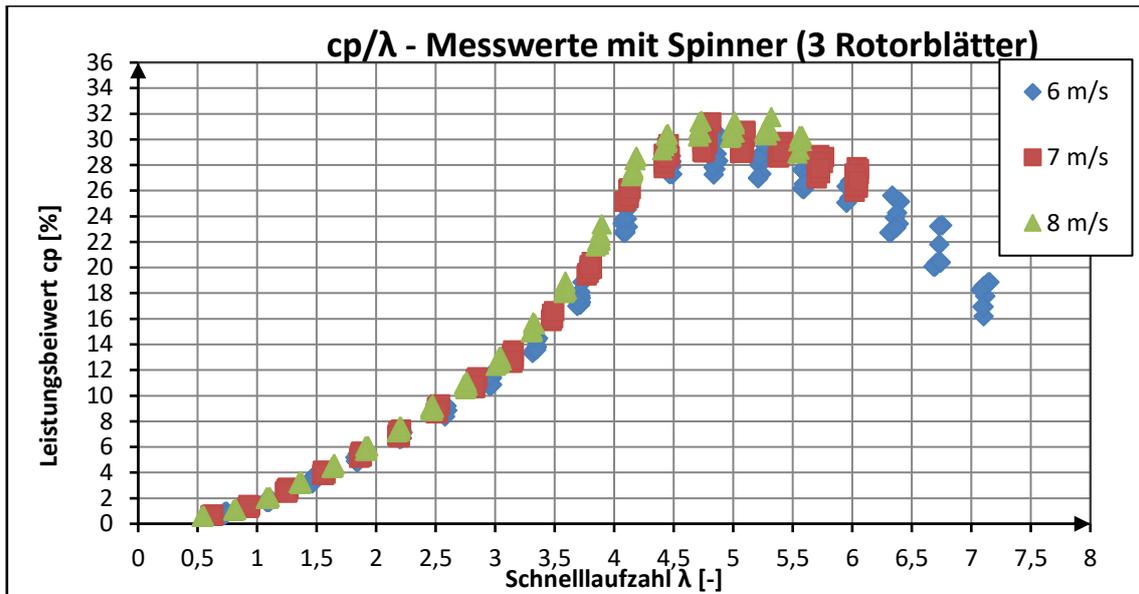


Abbildung 33: Leistungsbeiwerte über Schnelllaufzahl 3-Blatt-Rotor horizontal

Abbildung 36 stellt exemplarisch den Leistungsbeiwert eines Horizontalrotors in 3-Blatt-Konfiguration über die Schnelllaufzahl dar. In diesem Fall liegt der optimale Lambda-Wert, dass optimale Verhältnis von Umlauf – zur Windgeschwindigkeit, bei 5,13. In diesem Bereich kann der Rotor seinen maximalen Leistungsbeiwert, also den Bereich der höchstmöglichen Effizienz, erreichen.

Zum Vergleich kann der Rotor mit wahlweise 2, 3 oder 6 Blättern betrieben werden.

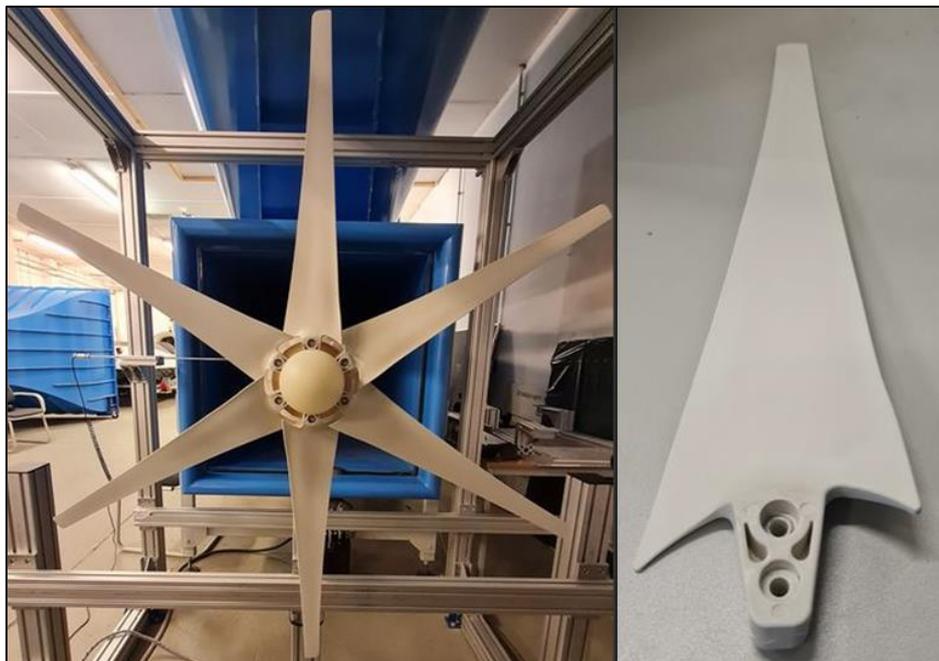


Abbildung 34: Horizontalrotor in 6-Blatt-Konfiguration

Mit den Erkenntnissen aus den zuvor durchgeführten Versuchsreihen kann anschließend eine Leistungsmessung mit optimaler Schnelllaufzahl durchgeführt werden.

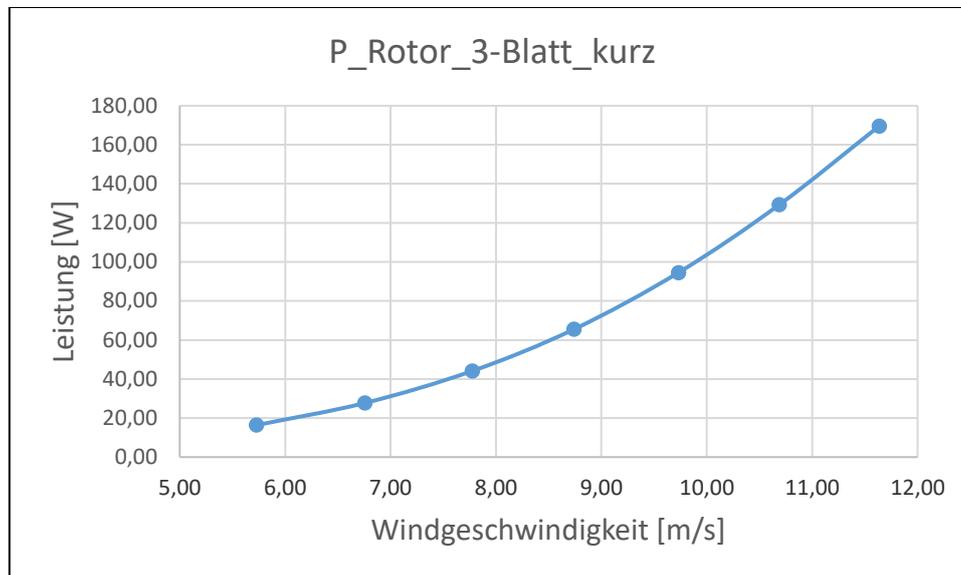


Abbildung 35: Leistung 3-Blatt-Rotor horizontal (0,55682 m² Rotorfläche)

In Abbildung 38 wird die Leistung des entsprechenden Rotors über die Windgeschwindigkeit dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass sich die Ausgangsleistung des Rotors bei einer Verdopplung der Windgeschwindigkeit um das 8-Fache vergrößert. Im Mittel kann am Standort eine Windgeschwindigkeit zwischen 5,5 und 6,0 m/s erreicht werden. Mit diesen Erkenntnissen lassen sich Rückschlüsse über die möglichen Energieerträge einer Kleinwindenergieanlage ziehen. So würde der oben genannte Rotor bei einer mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit von 5,5 m/s, einer Rotorfläche von 0,557 m² und einem Leistungsbeiwert von 32 % ca. 300 kWh/a generieren. Mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 3.000 kWh/a müssten demzufolge 10 Anlagen installiert werden. Da im Windkanal ideale Strömungsverhältnisse vorherrschen, soll in Feldversuchen eine Mikrowindenergieanlage unter Realbedingungen vermessen und die tatsächlichen Energieerträge erfasst werden. Weiterhin wird eine Messeinheit am Standort installiert, um das tatsächliche Winddargebot vor Ort zu erfassen und die Standorteignung für eine Kleinwindenergieanlage zu bestätigen. Dies geschieht mit entsprechender Sensorik sowie einem Datalogger zur Speicherung und späteren Auswertung der Daten. Als Standort für die Windmesseinrichtung (Datenlogger) soll das Kasernendach genutzt werden, da dieses bereits über entsprechende Montagemöglichkeiten verfügt.

3.2.8 Planung und Umsetzung des Messsystems

Um die Werte aus der theoretischen Simulation unter Realbedingungen validieren zu können, wurde ein entsprechendes Energieerfassungs- und Messsystem am Institut für Regenerative Energiesysteme entwickelt. Erfasst werden die möglichen Energieerträge aus solarer Strahlung (Sonne) und kinetischer Energie (Wind). Dazu wurde ein kompaktes System konzipiert, welches in der Lage ist, entsprechende Energiemengen aus PV und Wind zu erfassen und über eine elektronische Leistungsregelung dem Nutzer bereitzustellen.

Bestandteile des genannten Systems sind u.a. 4 PV-Module mit einer Gesamtleistung von 400 W_p, eine Microwindenergieanlage mit einer Leistung von 600 W, einem Energiespeicher mit einer Kapazität von 2,8 kWh, einer Zentralsteuerung mit integriertem Datenlogger sowie einer elektronischen Last.

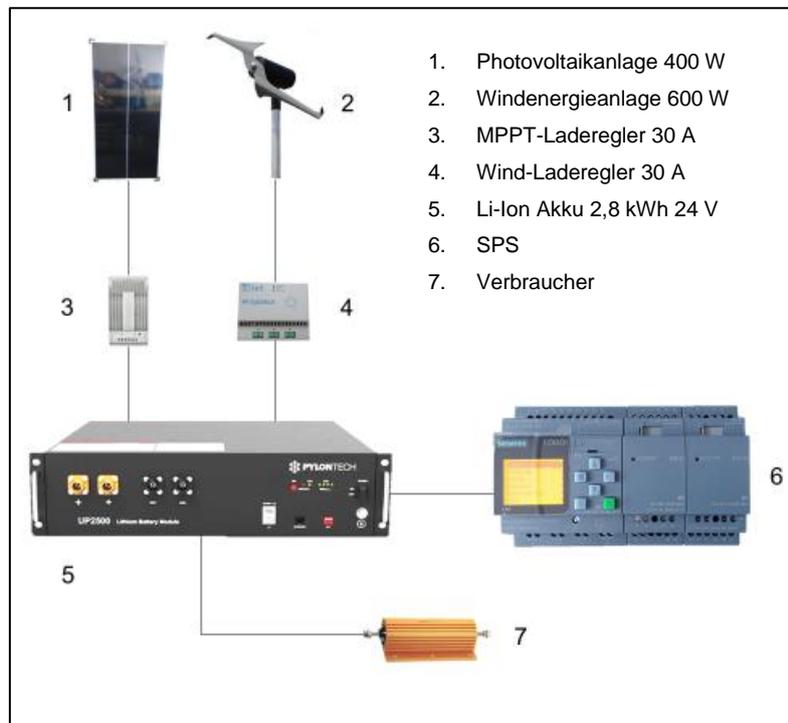


Abbildung 36: Übersicht E-Messsystem PV & Wind

Im Folgenden ist der Aufbau des Energiemesssystems dargestellt. Zum Einsatz kommen 4 PV-Module mit einer Gesamtleistung von 400 Wp. Als weitere Energiequelle wird ein Windenergiegenerator mit einer Leistung von bis zu 600 W ins System integriert. Beide Erzeuger speisen über entsprechende Laderegler einen 24V Lithium-Eisenphosphat (LiFePO₄) - Akkumulator. Dabei werden die Energieflüsse über die Erfassung von Strom und Spannung an den jeweiligen Ein- und Ausgängen von der Zentralsteuerung gemessen und bilanziert. Um einen Vergleich der Erträge aus Sonne und Wind mit dem realen Energiedargebot vergleichen zu können, werden die Globalstrahlung sowie die Windgeschwindigkeit am Standort ebenfalls erfasst und geloggt.

Das System ist so konzipiert, dass die Überschüssige Energie aus dem Akku über eine elektronische Laststeuerung entsprechend der Eingangsleistung umgewandelt wird.

Zur optischen Überwachung der Anlage wird ein Kamerasystem am Aufstellungsort mit eingebunden. Die Zentralsteuerung kann über das hochschuleigene Intranet angewählt und die Messwerte übertragen werden.

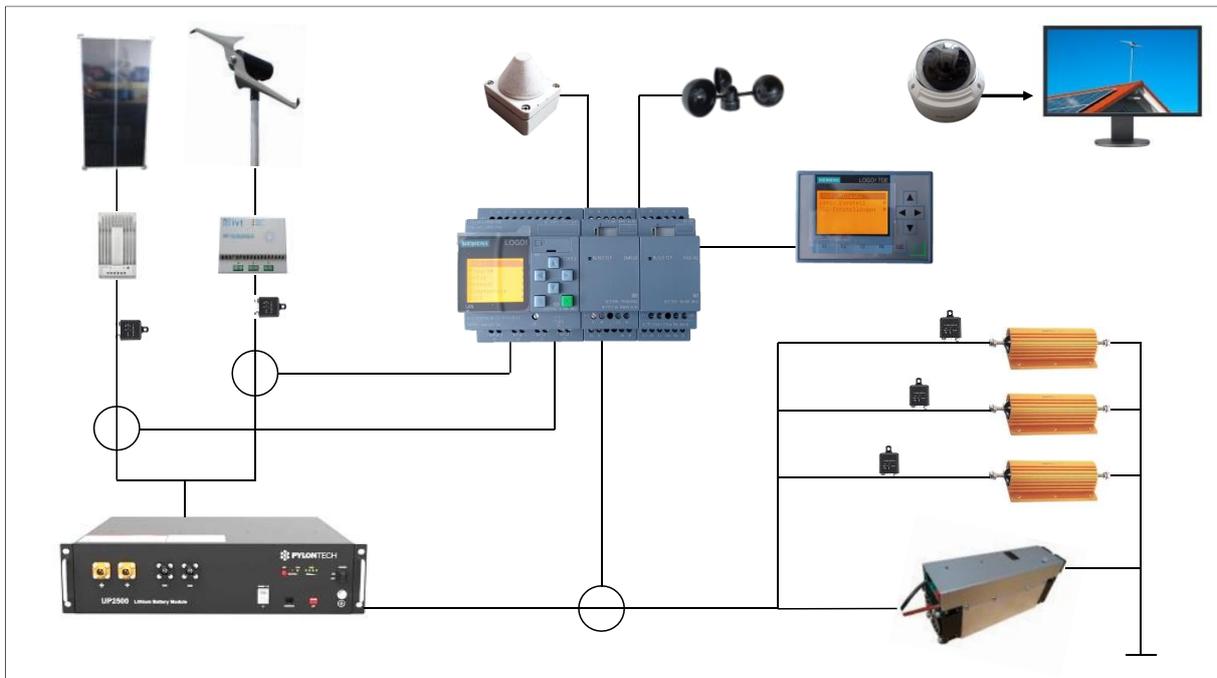


Abbildung 37: Detailplan Messsystem

Das in Abbildung 40 dargestellte Messsystem soll Erkenntnisse über die Energieerträge aus Sonne und Wind unter Realbedingungen liefern und im Anschluss an die Messreihen eine Abschätzung ermöglichen, ob entsprechende Systeme für den Ruden geeignet sind.

3.3 Auswahl der Komponenten für Feldversuche

Aufgrund der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Mittel, musste die Dimensionierung der Komponenten für das Energiemesssystem sehr kompakt ausfallen. So war der Windenergiewandler eine der zentralen und teuersten Anschaffungen im Messsystem.

3.3.1 Windkraftanlage (WKA)

Nach einer Marktrecherche im Bereich der Kleinwindkraftanlagen konnten nur sehr wenige Hersteller mit entsprechenden Turbinengrößen und Preisangaben ermittelt werden. Nach entsprechenden Herstelleranfragen wurde die Microwindenergieanlage der Fa. SkyWind als geeignet für das Feldmesssystem angesehen.

Bei der verwendeten Windkraftanlage handelt es sich um die „SkyWind NG“. Sie besitzt eine Nennleistung von 600W bei einer Windgeschwindigkeit von 14 m/s. Die Anlage ist als Leeläufer ausgelegt und benötigt keine Windfahne. Bei einem Leeläufer sitzen die Rotorblätter auf der Wind-abgewandten Seite der Gondel. Dadurch sind die Rotorblätter ständig den Verwirbelungen des Mastes ausgesetzt. In Kombination mit einem Zweiblatt-Rotor birgt diese Bauform selbst bei laminarer Strömung ein hohes Risiko für Schwingungen. Daher soll im Feldtest auch das Schwingungsverhalten bei entsprechenden Rotordrehzahlen mit ausgewertet werden. Die Rotorblätter bestehen aus gebogenem Aluminiumblech und weisen kein Tragflächenprofil auf. Sie sind dennoch in der Lage, wie Tragflächen eines Flugzeugs, dynamischen Auftrieb durch unterschiedliche Windgeschwindigkeiten auf Luv- und Leeseite zu erzeugen. Bei diesem Rotor ergibt sich rechnerisch eine Schnelllaufzahl von $\lambda=8,5$.

Durch die Eigenschaft des dynamischen Auftriebs verfügt die Anlage über eine Stall-Regelung. Eine unregelmäßige Windkraftanlage würde bei zu starkem Wind Schaden nehmen. Die Stall-Regelung ermöglicht der Windkraftanlage konstruktiv bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit, dem Wind keine Leistung mehr zu entziehen, da an der Tragfläche die Strömung abreißt. Laut Datenblatt ist die WKA bis zu einer Windgeschwindigkeit von 40 m/s sturmsicher und kann damit selbst Orkanen standhalten.

3.3.2 Photovoltaik (PV)

Die Marktsituation hat sich leider auch im Bereich der Photovoltaik zum Zeitpunkt der Planung des Systems, aufgrund hoher Nachfrage und schlechter Verfügbarkeit als schwierig herausgestellt. So musste auf kompaktere PV-Module zurückgegriffen werden als ursprünglich eingeplant. Zum Einsatz kommen insgesamt vier monokristalline PV-Module mit einer Leistung von bis zu 100 W bei einem Wirkungsgrad von 18,7 %.

3.3.3 Akkuspeicher

Der Akkuspeicher dient als Energiespeicher und versorgt gleichzeitig die angebundene Steuerung. Die Systemspannung wurde systembedingt auf 24V festgelegt. Da sich die Steuerung über einen DC/DC-Wandler aus dem Akkuspeicher mit Energie versorgt, muss gewährleistet sein, dass auch bei einer „Dunkelflaute“ über mehrere Tage hinweg, genügend Ladung im Speicher vorhanden ist, um die Steuerung zu versorgen. Mit bis zu 2,84 kWh verfügt der Akkuspeicher über genügend Kapazität für diese Anforderung.

3.3.4 Steuerung & Last

Als Steuerung wird eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) des Typs Siemens Logo!8 eingesetzt. Diese Kleinststeuerung verfügt über ausreichend Ein- und Ausgänge für entsprechende Steuer- und Regelanforderungen. Zudem kann das System die Messwerte in hoher zeitlicher Auflösung und einem langen Zeitbereich hinweg aufzeichnen. Die Steuerung erfüllt im Gesamtsystem gleich mehrere Aufgaben: Einerseits überwacht und steuert sie das Ladeverhalten des Akkuspeichers. Weiterhin übernimmt sie die Bilanzierung der Energiemengen aus PV- und Windenergie sowie des Akkuspeichers. Bei Bedarf wird eine elektronische Last angesteuert, welche die überschüssige Energie in Wärme umsetzt. Ist die Leistung aus Sonne und Wind zu groß, werden weitere Lasten in Form von Lastwiderständen zugeschaltet. Dies ermöglicht eine größtmögliche Sicherheit. Neben den Messwerten der Erzeuger und des Speichers werden auch Daten wie Windgeschwindigkeit und Strahlungsstärke aufgezeichnet. Leider kam es auch bei der Beschaffung der Komponenten für die Steuerung zu großen Verzögerungen und es mussten lange Wartezeiten in Kauf genommen werden. Der Systemaufbau hat sich somit deutlich verzögert.

3.3.5 Materialübersicht

In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Komponenten des Feldmesssystems im Detail aufgeführt.

Tabelle 13: Kostenaufstellung Energiemesssystem

LfdNr	Händler	Auftr.Nr	Bezeichnung	Gesamtpreis [€] Brutto
1	SkyWind	014022	SkyWind NG 12&24 V / 30 A	2.722,69
2	Reichelt	022922	Material el. Last & Zubehör	293,91
3	Conrad	023022	Material Testsystem & Zubehör	265,80
4	Hartmann	036222	Windlogger	499,00
5	inutec	025522	Pylontech 24V UP2500 (2,84 kWh) LiPO4-Akku	1.200,12
6	Galaxus	058722	IP-Kamera + SD-Speicherkarten	342,95
7	Offgridtec	029822	Kommunikationskabel	79,38
8	SolarV	036122	PV-Laderegler	163,95
9	ENS Handel	025722	Schaltschrank, SPS, HMI, Module	1.297,67
10	Campergold	043522	4x PV-Modul 100 W Aluframe hell	279,80
11	Conrad	043322	Material el. Last & Zubehör	233,88
12	Reichelt	043422	Elektronikkomponenten	246,28
				<u>7.625,43</u>

3.4 Konstruktion und Montage des Energiemesssystems

Um den Zugang zum Messsystem für den Aufbau und künftige Modifikationen so einfach wie möglich zu halten, wurde als Standort das Hausdach des Instituts für Regenerative EnergieSysteme (IRES) als Aufstellungsort ausgewählt. Da jedoch bereits Antennen- und Messsysteme auf dem Dach montiert sind, muss das System möglichst platzsparend aufgestellt und montiert werden.

3.4.1 Auswahl Aufstellort Energiemesssystem



Abbildung 38: Hausdach Institut für Regenerative EnergieSysteme (IRES)

Die Konstruktion der Halterung der Windkraftanlage für das Energiemesssystem stellte dabei eine besondere Herausforderung dar. Für die Fixierung der Windkraftanlage musste eine möglichst simple und stabile Konstruktion entworfen werden, welche später in der Metallbauwerkstatt der Hochschule gefertigt werden konnte. Eine detaillierte CAD-Zeichnung war hier unabdingbar. Bedingt durch die umliegende Bebauung ist davon auszugehen, dass die Anlage häufig mit turbulenten Luftströmungen betrieben wird. Durch diese unregelmäßige Strömung kann die Anlage in Schwingung versetzt und die Komponenten stark strapaziert werden. Um möglichen Resonanzschwingungen vorzubeugen, war ein entsprechend stabil konstruiertes Mastsystem Bedingung für einen sicheren Betrieb der Anlage.

Zunächst wurde die Plattform auf dem Hausdach vermessen und im Anschluss die entsprechenden Skizzen der zu entwerfenden Bauteile gezeichnet. Aus den Skizzen konnten anschließend mit entsprechender CAD-Software die Bauteile konstruiert werden.

Die WKA soll auf dem westlichen Rand der Ebene der Nachrichtentechnik errichtet werden (rechte Seite Abbildung 41). Die Position direkt über dem Dachrandabschluss besitzt den Vorteil, dass die Anlage sich über den Verwirbelungen des Daches befindet und bei Bedarf über die gesamte Breite der Plattform abgeklappt werden kann. Der Nachteil ist das der Mast nicht über drei, um 120° um den Mast angeordnete Stahlseile abgespannt werden kann. Auf der Plattform befinden sich bereits zwei Antennen und eine Wetterstation, welche die Positionierung der Windkraftanlage erschweren.

3.4.2 Konstruktion Mastsystem WKA

Das Mastsystem der WKA besteht aus einem 5 m langen Aluminiumrohr mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Wandstärke von 5 mm.

Der Mast muss die Schwingungen und Vibrationen, welche durch den Betrieb der Anlage auftreten können, aufnehmen, darf dabei jedoch nicht in Resonanz geraten. Er darf seine kritische Eigenfrequenz nicht erreichen, da der Werkstoff im schlimmsten Fall den elastischen Bereich verlässt und sich plastisch verformt. In diesem Fall würde der Mast brechen.

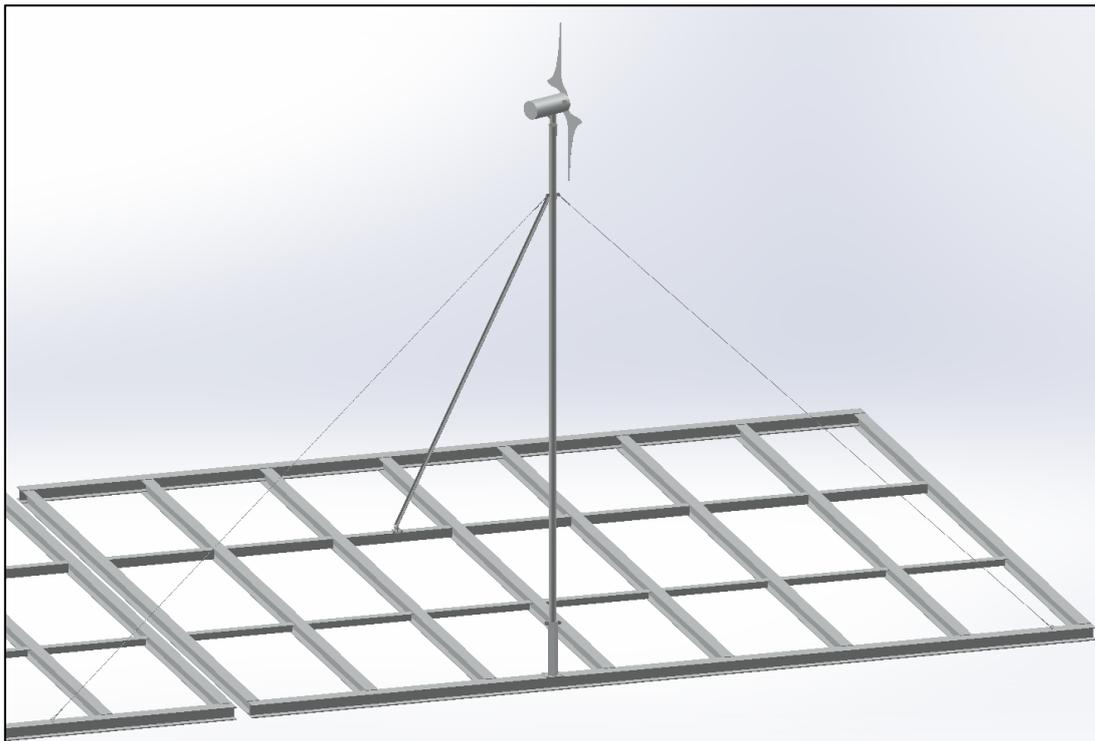


Abbildung 39: Mastsystem WKA (Betrachtung aus Richtung Nord-West)

In Abbildung 42 ist das Mastsystem der WKA dargestellt. Die Anlage wird durch zwei auf Zug belastete Stahlseile entlang der Dachkante nach Norden und Süden abgespannt. Ein Stützprofil auf der Ostseite spannt einerseits den Mast nach Westen auf Zug ab und sichert ihn auf Druck in Richtung Osten. Dieses Stützprofil wird gleichzeitig als Aufstellhilfe für die WKA genutzt.

Die Abspannung des Rohrmastes erfolgt über zwei am oberen Mast teil befestigte Schellen. Dabei ist die untere Schelle, welche das Stützprofil trägt, besonders beim Aufstellen der Anlage auf Druck belastet und bestrebt nach oben hin wegzurutschen. Auch im Betrieb nimmt diese Schelle unter anderem die Druckkräfte des Stützprofils auf. Die zweite Schelle darüber, welche die Kabel zur seitlichen Abspannung trägt, ist auf Zug belastet und bestrebt nach unten zu rutschen. Beide Schellen werden direkt übereinander angeordnet, wodurch die Kräfte ausgeglichen werden.



Abbildung 40: Abspannung Rohr Mast WKA

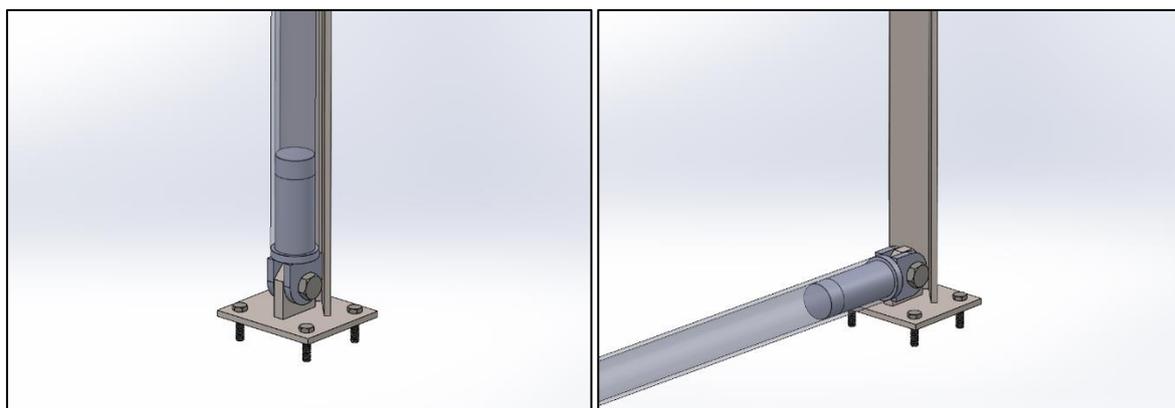


Abbildung 41: Zapfen im Rohr Mast bei auf- und abgeklappter WKA

Der Mast sitzt auf einem Zapfen, welcher durch ein einfaches Scharniergelenk mit dem Fuß verbunden ist, sodass die Anlage zur erleichterten Aufstellung und zu Wartungszwecken abgeklappt werden kann.

Der Fuß der Anlage besteht aus einer Grundplatte, welche auf dem Doppel-T-Träger der Plattform verankert ist. Auf diese Grundplatte wird die Halterung für das Zapfen-Scharnier und ein L-Profil vertikal aufgeschweißt. Am oberen Ende des L-Profiles sitzt eine Schelle auf zwei Schrauben, welche den Mast zusätzlich fixiert, und durch das Gewinde eine Anpassung der Lotrechten zulässt.

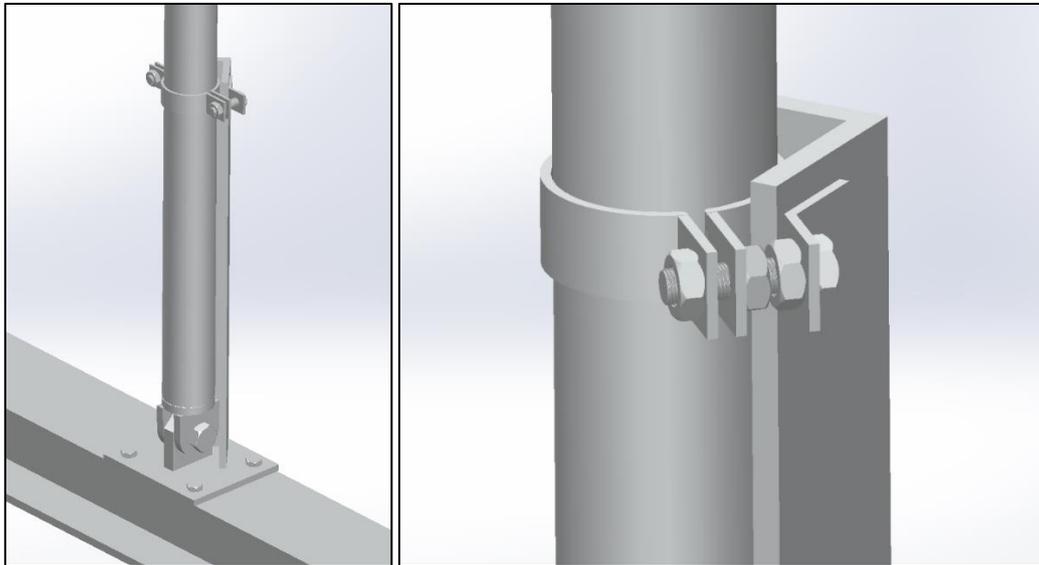


Abbildung 42: Mast Fuß mit Sicherungsschelle

Die Schelle auf der Innenseite des L-Profiles des Fußes dient nicht nur der zusätzlichen Fixierung der Anlage, sondern limitiert auch die Neigung der Anlage über den zulässigen Bereich zur Dachkante hin. Diese Begrenzung des Aufstellwinkels nach Westen, sorgt für ein sicheres Aufstellen der WKA.

3.4.3 Montage & Aufbau des Energiemesssystems

Da sich der Aufbau aufgrund von Lieferengpässen stark verzögert hat, erfolgt die Montage voraussichtlich erst ab September. Eine detaillierte Dokumentation kann bei Bedarf nach Fertigstellung des Systems nachgereicht werden.

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung der Szenarien

4.1.1 Ergebnisse der Wasserszenarien

Die Szenarien unterscheiden sich durch die Wasserquellen, das Recycling von Stoffströmen und die Behandlungsart. Daraus resultieren sowohl unterschiedliche Betriebskosten, Anschaffungskosten und Energiebedarfe als auch verschiedener Planungs- und Ausführungsaufwand.

Die Gegenüberstellung in Tabelle 14 zeigt neben dem täglichen Gesamtbedarf die Nutzung der verschiedenen Wasserquellen auf. Der tägliche Wasserbedarf liegt aufgrund der Nutzung von Spültoiletten bei Szenario 1 rund 233 l höher im Vergleich zu Szenario 2 und 3. Während in Szenario 1 der gesamte Bedarf über die UO-Anlage gedeckt wird, reduziert sich die Menge für Szenario 2 auf rund 50 %. Die Regenwassernutzung des zweiten Szenarios deckt etwa 30 % des täglichen Bedarfs und liegt somit zwischen Szenario 1 (0 %) und Szenario 3 (100 %).

Tabelle 14: Gegenüberstellung der täglichen Wassernutzung der Szenarien

Position	Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Wasserbedarf gesamt	l/d	1.284,0	1.050,7	1.050,7
UO-Wassernutzung	l/d	1.284,0	700,7	0,0
RW-Nutzung	l/d	0,0	350,0	1.050,7

Der Energiebedarf der drei Szenarien weist große Unterschiede auf (vgl. Tabelle 15). Während der Stromverbrauch des zweiten Szenarios etwa 47 % des ersten Szenarios ausmacht, liegt der Anteil des dritten Szenarios bei rund 25 %.

Tabelle 15: Gegenüberstellung der Stromverbräuche der Szenarien

Position	Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
täglicher Bedarf	kWh/d	14,50	6,80	3,55

Die Anschaffungskosten der Szenarien weisen mit einer maximalen Abweichung von etwa 13 % keine sonderlich großen Unterschiede auf (vgl. Tabelle 16). Die Kosten nehmen der Aufzählung der Szenarien folgend jeweils um 2.000 € ab. Zusätzlich sind jeweils die Kosten für Rohrleitungen, Armaturen Installation und Lieferung zu berücksichtigen.

Tabelle 16: Gegenüberstellung der Anschaffungskosten der Szenarien

Position	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Anschaffungskosten	31.500,00 €	29.500,00 €	27.500,00 €

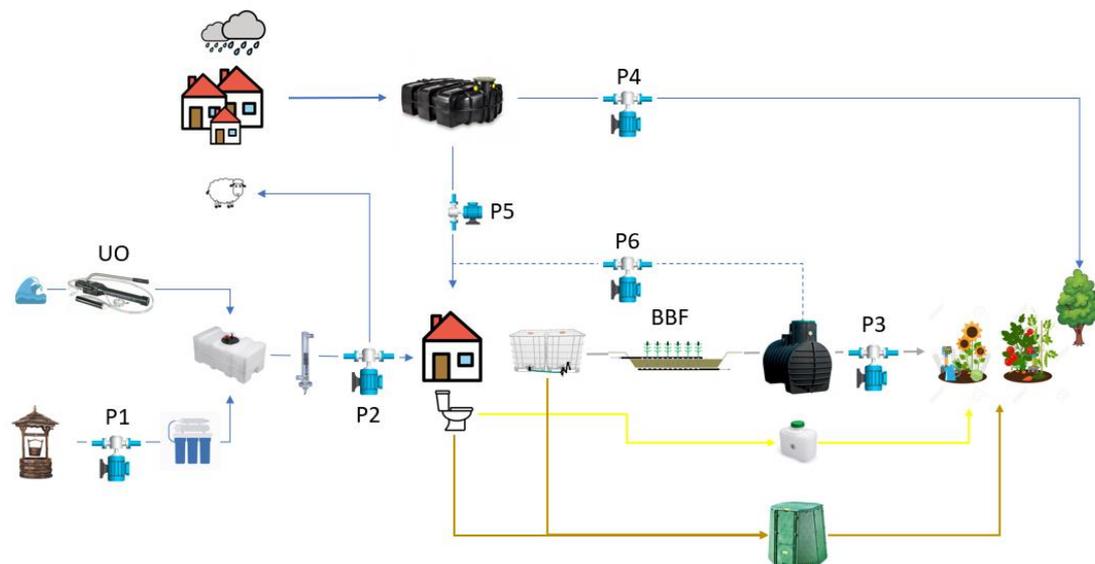
Die notwendigen Speichervolumina variieren je nach Szenario und sind für Szenario 2 und 3 zusätzlich von der angeschlossenen Dachfläche abhängig. Tabelle 17 zeigt die Speichergößen der jeweiligen Szenarien für die Variante „Kaserne“ und möglichst geringe Trockenperioden. Szenario 1 kommt mit den geringsten Speichergößen aus.

Tabelle 17: Gegenüberstellung der Speichergrößen der Szenarien

Position	Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Rohwassertank	m ³	1,5	-	-
TW-Speicher	m ³	1,2	1	1
Gartenbewässerungs-/RW-Tank	m ³	0,5	8	18
(gereinigtes) GW-Speicher	m ³	-	-	>0,5

Vorzugsvariante

Resultierend aus den Auswertungen der drei Szenarien wurde eine Vorzugsvariante entwickelt. Um ein möglichst nachhaltiges Verfahren umzusetzen, bietet sich die Kombination der Szenarien 2 und 3 an. Da die vollständige TW-Versorgung mittels RW (Szenario 3) nicht mit einer ökonomisch sinnvollen Tankgröße umsetzbar ist, muss diese auf einem anderen Weg sichergestellt werden. Dazu eignet sich die UO-Anlage zur Aufbereitung des Brackwassers. Während das Nicht-TW für den häuslichen Gebrauch aus RW gewonnen wird, stellt den restlichen TW-Bedarf sowohl eine pedalbetriebene, als auch die strombetriebene, UO-Anlage zur Verfügung. Das aufbereitete GW wird in den Sommermonaten zur Bewässerung des Gartens eingesetzt. Zur weiteren Substitution des TW-Bedarfs kann das aufbereitete GW bei nicht ausreichendem Regen auch zur Deckung des nicht-TW Bedarfes des Hauses eingesetzt werden. Abbildung 43 zeigt die schematische Darstellung des Entwurfsszenarios.

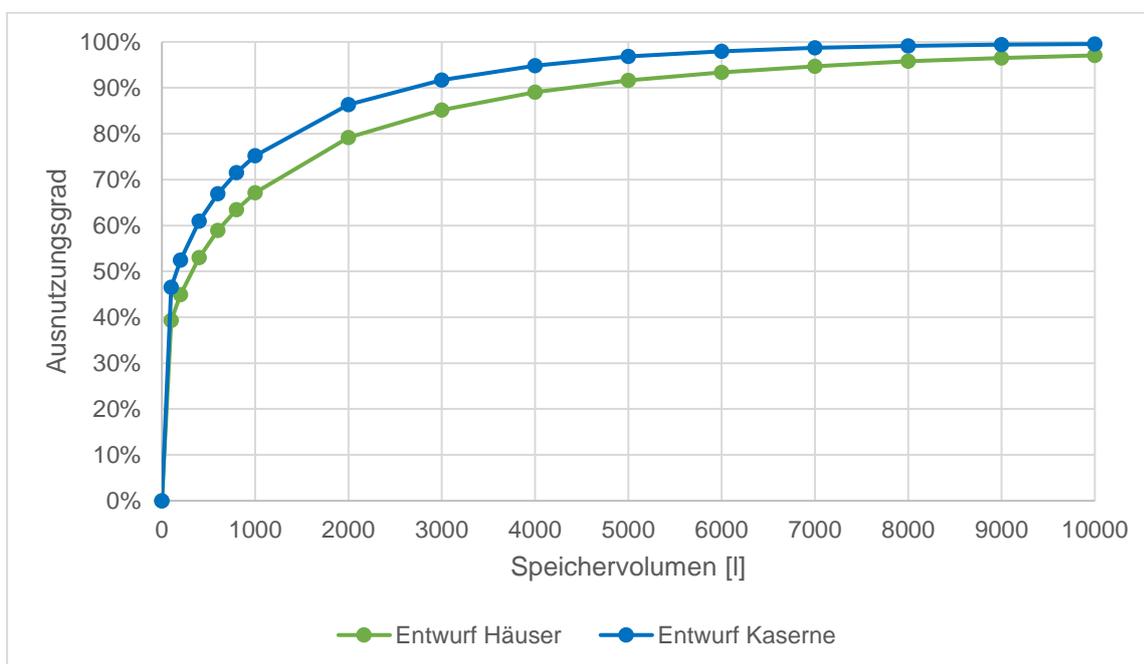

Abbildung 43: Schematische Skizze Vorzugsvariante

Der tägliche Wasserbedarf der verschiedenen Wasserquellen ist Tabelle 18 zu entnehmen. Es wird empfohlen zusätzlich zu den Hausdächern auch das Dach der Kaserne zum Auffangen von Regenwasser zu nutzen.

Tabelle 18: Maximaler täglicher Wasserbedarf - Szenario Entwurf (eigene Darstellung)

Szenario Entwurf	TW [l/d]	RW [l/d]	Gesamt [l/d]
Bewohner*innen	397,4	233,3	630,7
Tiere	85,0	0,0	85,0
Besucher*innen	70,0	0,0	70,0
Garten	0,0	265,0	265,0
Summe	552,4	498,3	1.050,7

Laut der Kurve des Ausnutzungsgrades in Abhängigkeit des Speichervolumens (Abbildung 44) ist für die Variante „Kaserne“ bereits bei einer Speichergröße von rund 2.500 l ein Ausnutzungsgrad von 90 % erreicht. Es ist abzustimmen, welche Speichergröße ökonomisch sinnvoll einsetzbar ist.


Abbildung 44: Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit des Speichervolumens – Szenario Entwurf (eigene Darstellung)

Bei einem Ausnutzungsgrad von 90 % liegt die längste Trockenperiode bei 17 – 18 Tagen (vgl. Abbildung 45). Je größer der Speicher gewählt wird, desto geringer fällt die Trockenperiode aus. Das in den Trockenperioden fehlende Wasser ist neben dem TW-Bedarf durch die UO-Anlagen aufzubereiten.

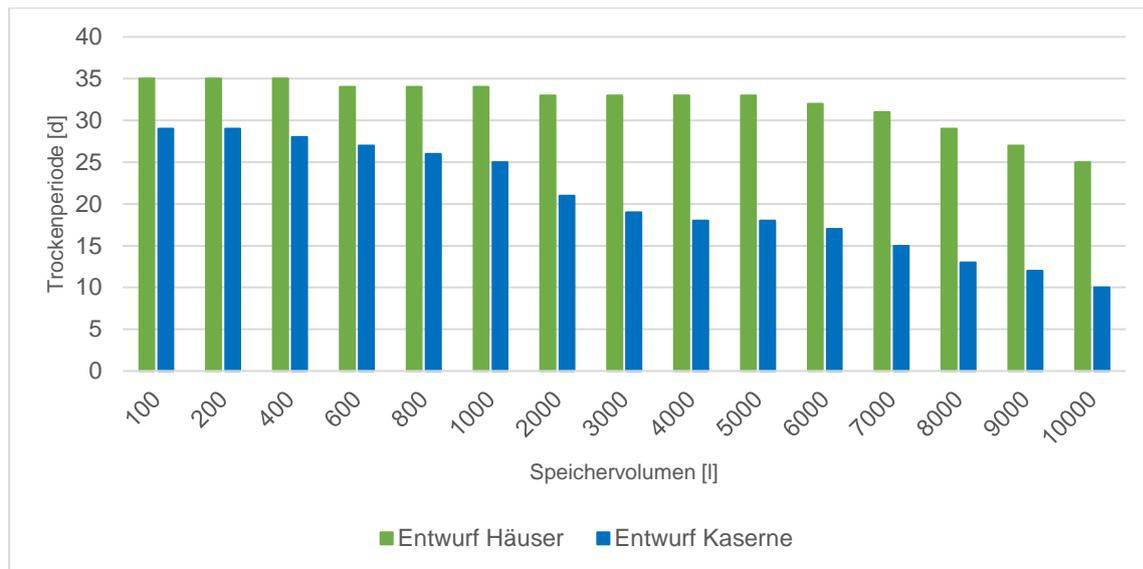


Abbildung 45: Dauer der Trockenperiode in Abhängigkeit des Speichervolumens - Szenario Entwurf (eigene Darstellung)

Der tatsächliche Gesamtenergiebedarf ist von der Dimensionierung der Speicher abhängig. Je größer der RW-Speicher, desto weniger Energiebedarf entsteht für die UO-Anlage. Der maximale Stromverbrauch entsteht jedoch bei vollständiger Versorgung des häuslichen Bedarfs durch die UO-Anlage. Es wird also der Energiebedarf aus Szenario 2 angesetzt (vgl. Tabelle 8). Der tatsächliche Energiebedarf dürfte geringer ausfallen.

Die Anschaffungskosten für das Entwurfsszenario sind Tabelle 19 zu entnehmen und summieren sich zu 44.500 € auf. Auch hier sind jeweils die Kosten für Rohrleitungen, Armaturen, Installation und Lieferung zusätzlich zu berücksichtigen.

Tabelle 19: Kostenschätzung Szenario Entwurf (eigene Darstellung)

Szenario Entwurf			
Position	Anzahl	Kosten	Gesamt
Umkehrosmose BW-händisch	1	500,00 €	500,00 €
Umkehrosmose BW-elektrisch	1	15.000,00 €	15.000,00 €
Umkehrosmose RW	1	5.000,00 €	5.000,00 €
UV-Anlage	1	1.000,00 €	1.000,00 €
SW Aufbereitung	1	5.000,00 €	6.000,00 €
Pumpen	6	1.000,00 €	6.000,00 €
Regenwasserspeicher	1	3.000,00 €	8.000,00 €
Wasserspeicher	2	1.500,00 €	3.000,00 €
Summe			<u>44.500,00 €</u>

4.1.2 Ergebnisse der Energieversorgung

Produktion

Betrachten wir zunächst das Szenario, den Energieverbrauch nur mit PV und einem Energiespeicher zu decken. Bei 180 PV-Modulen werden rund 70 MWh Strom übers Jahr erzeugt. Der angenommene Stromverbrauch auf dem Ruden pro Jahr liegt bei rund 8,6 MWh. Um einen Blackout, also keine Stromproduktion und einen entladenen Energiespeicher, zu vermeiden, ist bei dem hier angenommenem Nutzungs- bzw. Lastprofil ein Energiespeicher mit 40 kWh auszulegen. In Abbildung 46 ist der dazugehörige State-of-Charge des Energiespeichers zu sehen. Hier ist zu erkennen, dass aufgrund schlechter Wetterbedingungen im Winter auch bei geringer Personenanzahl der Speicher kurzzeitig fast Entladen ist.

Für das zweite Szenario nehmen wir Windkraftanlagen hinzu. Bei zwei kleinen WKA wird recht konstant über ein Jahr 4 MWh Strom generiert. Bei gleichem Verbrauch und gleicher Produktion der PV-Module wie in eben beschriebenem Szenario, wird noch ein Energiespeicher mit 26 kWh benötigt, um Blackouts zu vermeiden. Abbildung 47 zeigt den dazugehörigen State-of-Charge des Energiespeichers.

Da in der Simulation der Warmwasserspeicher ausschließlich mit überschüssigem Strom beheizt wird, gilt zu beachten, dass nicht der gesamte Warmwasserbedarf gedeckt werden kann. Von den benötigten 120.000 Litern kann so allerdings noch die Hälfte, also 60.000 Liter Warmwasser geliefert werden. Somit ist eine separate Energiezufuhr, speziell zum Duschen im Winter nötig.

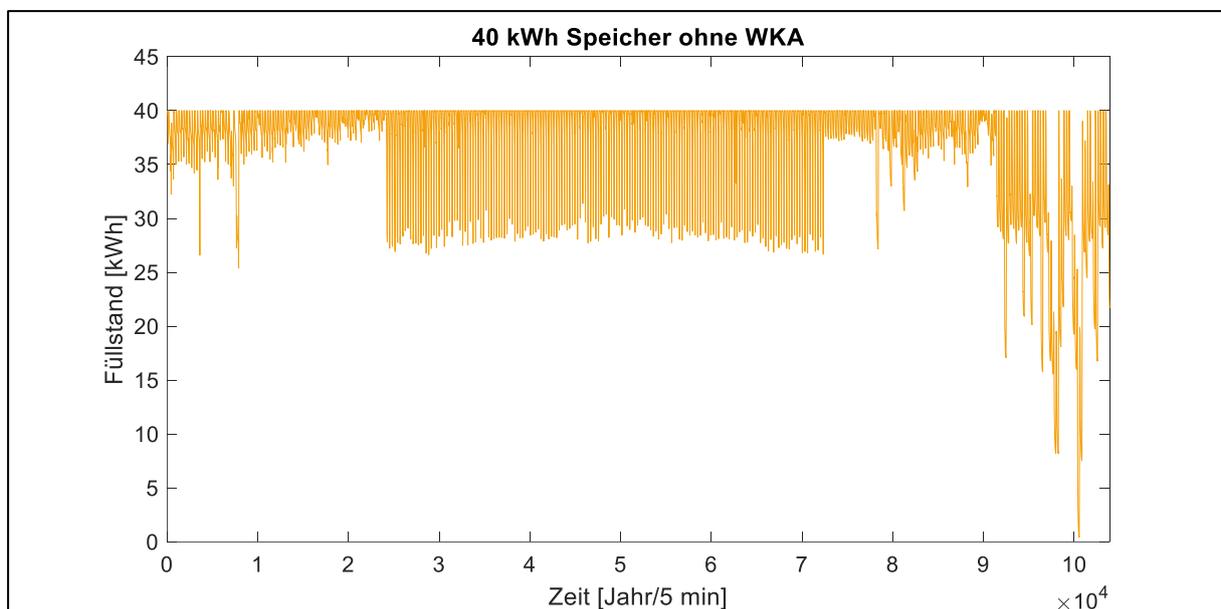


Abbildung 46: State of Charge des Energiespeichers (Szenario 1)

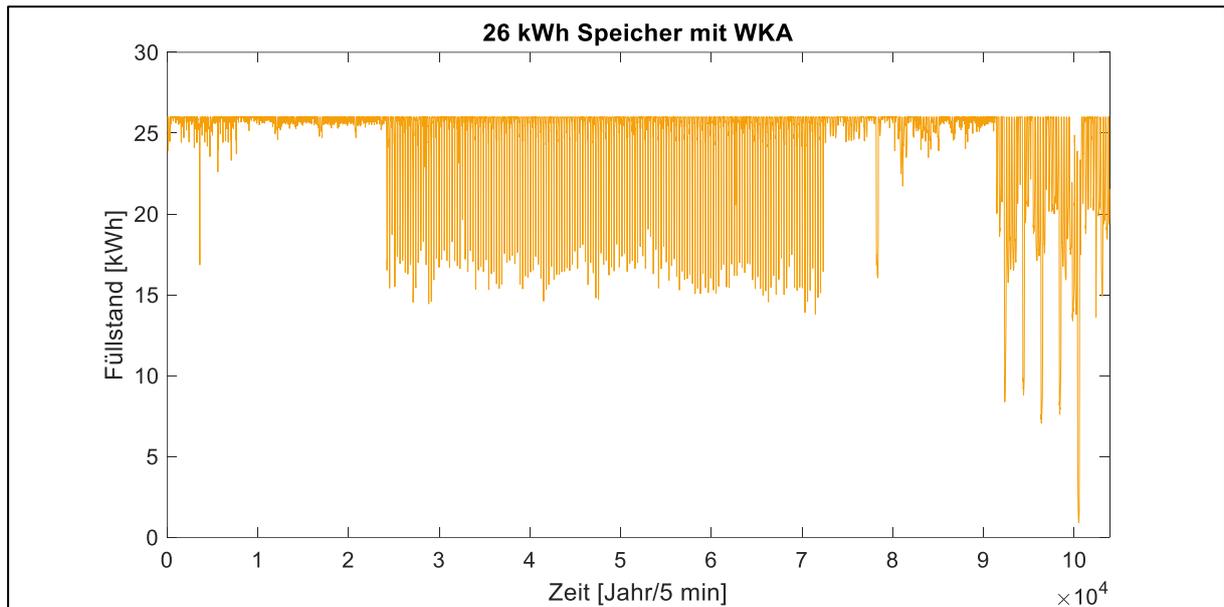


Abbildung 47: State of Charge des Energiespeichers (Szenario 2)

Kosten

Die hier aufgeführten Investitionskosten sind Annahmen basierend auf aktuellen Installationspreisen. Folgende Werte sind die Grundlage der Kalkulation:

- Photovoltaik: 1.500 € pro kWp
- Windkraft: 10.000 pro kW
- Energiespeicher: 1.300 € pro kWh

Da mit Photovoltaik, dem Haupterzeuger elektrischen Stroms, die gesamte Dachfläche der Kaserne ausgenutzt werden soll, wird immer von 180 PV-Modulen ausgegangen. Die aufgeführten Kosten für PV und Speicher beziehen sich auf die produzierte Energie in kWh, bzw. die Speicherkapazität in kWh. Bei 70 kWh erzeugter Energie kostet die PV-Investition 105.000 €. Mit entsprechender Speicherauslegung von 40 kWh aus Szenario 1 kommen noch 52.000 € hinzu. Somit ergibt sich bei Szenario 1 eine Gesamtsumme von 157.000 € Investitionskosten.

Tabelle 20: Investitionskosten für Szenario 1 (ohne WKA, größerer Speicher)

Szenario 1	Menge	Kosten/Menge	Gesamtkosten
PV	70 kWp	1.500	105.000
WKA	-	10.000	-
Energiespeicher	40 kWh	1.300	52.000
<i>Summe</i>			157.000

Tabelle 21 stellt Szenario 2 also die Kosten mit WKA dar. Hier kann der Speicher kleiner ausgelegt werden, sodass bei 26 kWh Kosten von 33.800 € für den Speicher anfallen. Für zwei kleine WKA fallen Kosten in Höhe von 20.000 € an. Somit ergibt sich bei Szenario 2 eine Gesamtsumme von 158.800 €.

Tabelle 21: Investitionskosten für Szenario 2 (mit WKA, verkleinerter Speicher)

Szenario 2	Menge	Kosten/Menge	Gesamtkosten
PV	70 kWp	1.500	105.000
WKA	2 kW	10.000	20.000
Energiespeicher	26 kWh	1.300	33.800
<i>Summe</i>			158.800

5 Zusammenfassung

Der Ruden ist eine 24 ha große Insel, die seit 1993 zum Naturschutzgebiet „Peenemünder Haken, Struck und Ruden“ gehört und Rückzugsgebiet für seltene Tier- und Pflanzenarten, sowie Rast- und Überwinterungsgebiet vieler Wasservögel ist. Derzeit verfügt die Insel über keinen Anschluss an die kommunale Infrastruktur.

Mit dieser Potenzialanalyse soll gezeigt werden, dass es möglich ist, an einem abgelegenen Inselstandort ohne Grundwasserressource und nur mit erneuerbaren Energien eine ganzjährige menschliche Nutzung für vogel- und naturschutzfachliche Belange zu ermöglichen.

Wasserkreislauf:

Die Erkenntnisse der Untersuchung legen dar, dass ein autarkes Konzept für den Ruden in Bezug auf die Trink- und Abwasserversorgung möglich ist. Die Auswertungen zeigen, dass jedes der Szenarien unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich bringt. Das entwickelte Entwurfsszenario - UO-Anlage zur Aufbereitung des Brackwassers, Nicht-TW für den häuslichen Gebrauch aus RW und Grauwasserbehandlung - kombiniert die Vorteile der Konzepte und wird als Orientierung für die weitergehende Planung der Inselversorgung empfohlen.

Einige der getroffenen Annahmen sind für die weitere Planungsausführung tiefergehend zu untersuchen. So basiert die Ermittlung der RW-Speichervolumina lediglich auf historischen Niederschlagsdaten und bezieht keine Prognosen mit ein. Zur genaueren Auslegung des Speichers sollte dies, besonders in Anbetracht des zunehmenden Klimawandels und der damit verbundenen Niederschlagsänderungen (IPCC, 2022), mithilfe einer Langzeitsimulation und Zukunftsprognosen detaillierter ausgeführt werden. Das entwickelte Excel-Tool eignet sich zur Ermittlung des Speichervolumens in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades und der möglichen Trockenperiode. Es ist für die weitere Betrachtung durch die oben erwähnten Prognosedaten erweiterbar und kann somit für die detailliertere Auslegung eingesetzt werden. Da die Anschaffungskosten keine große Differenz aufweisen, entsteht die Schlussfolgerung, diese bei der Verfahrenswahl unberücksichtigt zu belassen. Weil in dieser Betrachtung nur die Kosten der großen Anlagenteile berücksichtigt werden, sind sie bei einer detaillierteren Planung genauer zu beurteilen.

Energie

Die theoretischen Simulationsergebnisse des Energiebilanzierungsmodells haben gezeigt, dass mittels PV- und Windenergieerzeugung in Verbindung mit einem entsprechend dimensionierten Speichersystem, eine ausreichende Versorgung der Insel Ruden möglich ist. Für eine genauere Prognose der möglichen Energieerträge am Standort ist die Auswertung der Messwerte eines Dataloggers unabdingbar. Parallel dazu werden am Institut eigene Realwerte von Kleinwindenergieanlagen aufgezeichnet und ausgewertet. Nach einem Messzeitraum von mindestens 6 Monaten kann eine praxisnahe Aussage darüber getroffen werden, ob und in welcher Dimensionierung die Nutzung von PV- und Windenergie am Standort Eignung finden könnten. Dies muss jedoch in enger Abstimmung mit dem Natur- und Denkmalschutz erfolgen.

Ausblick – Realisierungsphase und Begleitforschung

Als weitergehender Schritt ist in Abstimmung mit dem Mittelgeber DBU, dem betreuenden Verein „Naturschutzgesellschaft Vorpommern e.V.“, dem zuständigen Landesamt für Kultur und Denkmalpflege und der Naturschutzbehörde die einzusetzenden Technologien anhand der Bewertungskriterien zu identifizieren. In einem Folgeprojekt wird dieses praktisch umgesetzt, wobei auch angestrebt wird, Teilergebnisse der Fallstudien während der ersten Förderperiode in die Umsetzung zu bringen, wenn es eindeutige Ergebnisse zulassen. Für die zweite Förderperiode sollen auch andere Fördermittelgeber angesprochen werden. Für die Forschung relevante Untersuchungsschwerpunkte und das Weitervermarktungspotenzial der eingesetzten Technologien der zweiten Phase sollen bereits in den Fallstudien identifiziert werden. Mögliche Projektpartner der genannten Fachrichtungen sind im Anhang aufgelistet.



Prof. Dr.-Ing. M. Barjenbruch



Prof. Dr.-Ing. M. Bierhoff

6 Literaturverzeichnis

BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (BDEW), 2021: Trinkwasserverwendung im Haushalt, <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/trinkwasserverwendung-im-haushalt>, zuletzt geprüft: 06.04.2022

DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL (DWA) 2006 Arbeitsblatt DWA-A 262 – Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers. Hennef, 2006

DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V. (DWA), 2022: Belastungsschwankungen bei SBR-Kleinkläranlagen unter den Gesichtspunkten Planung, Biologie, Wartung

FLASCHE, 2002: Einsatzmöglichkeiten und Leistungsfähigkeit von Kleinkläranlagen, Universität Hannover

HEMME WASSER, 2022: Angebot Umkehrosmoseanlage, Telefonat, 12.01.2022

HOPP, 2016: Wasser und Energie. Ihre Zukünftigen Krisen, 2nd ed., Springer, Berlin, Heidelberg

IPCC, 2022: Climate Change 2022. Summary for Policymakers

LANDESBEIRAT FÜR TIERSCHUTZ VON BADEN-WÜRTTEMBERG, 2008: Empfehlungen für Koppelschafhaltung

LIPPMANN, 2022: Datenblatt Umkehrosmoseanlage UO 250 BW. Umkehrosmose zur Entsalzung von enthärtetem Brackwasser, <http://wassernutzung.eu/produkte-services/1619/375/17-umkehrosmoseanlagen-f%C3%BCr-brackwasser/umkehrosmoseanlage-uo-250-bw-detail.html>, zuletzt geprüft: 01.04.2022

LUEDERITZ ET AL., 2001: Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands, Ecological Engineering

OTENG-PEPRAH, 2018: Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review, Water Air Soil Pollut

STATISTA, 2016: Täglicher Pro-Kopf-Wasserverbrauch nach Bundesland im Jahr 2016, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/249427/umfrage/wasserverbrauch-nach-bundesland>, zuletzt geprüft: 23.03.2022

VYMAZAL, 2009: The use of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater, Elsevier BV, Ecological Engineering

ZINKERNAGEL ET AL., 2017: Wasserbedarf von Freilandgemüsekulturen

HOST

Püschel, L. (2022). *Konzeptionierung der Windkraftanlage für das „Projekt Ruden“*.

- Benzinger, S., Dammann, E., & Wichmann, K. (September 1996). Kommunale Abwasserbehandlung - Nutzung von Eisenhydroxidschlamm aus der Grundwasseraufbereitung in kommunalen Abwasseranlagen. *Korrespondenz Abwasser*.
- Dammann, D.-I. E. (Juni 2011). Nachhaltige Lösungsansätze für Rückstände und Nebenprodukte aus Wasseraufbereitungsanlagen. *energie | wasser-praxis*, S. 32-35.
- Dammann, E., Benzinger, S., & Holst, H.-J. (September 2000). Mit Eisenschlamm gegen Geruch aus dem Abwasserkanal. *EP*, S. 46-48.
- Dammann, E., Schneider, S., Such, W., & Wichmann, K. (September 1996). *Wasserwerksrückstände*. (E. S. Verlag, Hrsg.) Abgerufen am 27. 11 2012 von Müllhandbuch digital.de: <http://www.MUELLHANDBUCHdigital.de>
- DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (02.2000). *W 221-3 Rückstände und Nebenprodukte aus Wasseraufbereitungsanlagen; Teil 3: Vermeidung, Verwertung und Beseitigung*. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (03.2010). *W 222 Merkblatt: Einleiten und Einbringen von Rückständen aus Anlagen der Wasseraufbereitung in Abwasseranlagen*. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (04.2010). *W 221-1: Rückstände und Nebenprodukte aus Wasseraufbereitungsanlagen - Teil 1: Grundsätze für Planung und Betrieb*. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (04.2010). *W 221-2 Rückstände und Nebenprodukte aus Wasseraufbereitungsanlagen - Teil 2: Behandlung*. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- DVGW. (März 2013). *Ermittlung neuer Wege zur Verwertung von Wasserwerksrückständen*. Karlsruhe: DVGW.
- Elle, O. e. (2013). Vogelschlagrisiko an spiegelnden oder transparenten Glasscheiben in der Stadt: Unterschätzt, überschätzt oder unkalkulierbar? 49/50. NABU.
- Feige, K. (2004). *Die Wirkung von Windenergieanlagen auf das (Brut-)Verhalten von Großvögeln im Raum Frauenmark - Goldenbow (Landkreis Parchim)*. Matzlow: Mitteilungen der NGM, Heft 1, Sep. 04, S. 53-72.
- Franzen, L. (2022). *Elektrifizierung der Insel Ruden*.
- Häfele, K., Benzinger, S., Dammann, E., & Pretzsch, K. (März 1999). Gemeinsame Behandlung von Überschussschlamm aus der erhöhten biologischen Phosphorelimination und Eisenhydroxidschlamm. *Korrespondenz Abwasser*, S. 382-390.
- <https://globalwindatlas.info/>. (kein Datum). Abgerufen am 24. 04 2022

- Knutzen, R., Benzinger, S., & Dammann, E. (Mai 1997). Beseitigung von Sulfidproblemen in Abwasserkanälen durch Eisenhydroxidschamm. *EP*, S. 32-35.
- Leschber, P. D.-I., Loll, D.-I. U., & al., e. (1996). ATV-Handbuch. In P. D.-I. Leschber, D.-I. U. al., e. al., & A. V. Hennef (Hrsg.), *Klärschlamm* (Bd. 4. Auflage, S. 10-12, 91, 226-228). Berlin, Deutschland: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH.
- P. Koppe, A. S. (1993). Seine Inhaltsstoffe nach Herkunft, Zusammensetzung und Reaktion im Reinigungsprozess einschließlich Klärschlämme. *Kommunales Abwasser*.
- Reststoffenuie Waterleidingbedrijven B.V. - Hay Koppers. (kein Datum). Mehrertrag aus Wasser.
- Reststoffenuie Waterleidingbedrijven B.V. (2011). *Jaarbericht 2011*. Nieuwegein: Reststoffenuie Waterleidingbedrijven B.V.
- S. Benzinger, E. D. (1996). Kommunale Abwasserbehandlung - Nutzung von Eisenhydroxidschlamm aus der Grundwasseraufbereitung in kommunalen Abwasseranlagen. *Korrespondenz Abwasser*.
- S. Benzinger, E. D. (1999). Wasserwerksrückstände - in Abwasseranlagen verwertbar? *Korrespondenz Abwasser*.
- Stadtwerke Potsdam GmbH. (kein Datum). *Unternehmensprofil*. Abgerufen am 26. 02 2013 von <http://www.swp-potsdam.de/swp/de/wasser/ueber-uns-ewpw/unternehmensprofil-ewpw/unternehmensprofil.php>
- Stozek, I. A., & Koppe, P. (1997). Beschaffenheit des Abwassers. In D.-I. K.-H. Kalbskopf, & A. V. e.V. (Hrsg.), *Mechanische Abwasserreinigung* (4. Ausg., S. 40, 63). Berlin: Ernst & Sohn.
- Traxler, A. e. (2004). *Vogelschlag, Meideverhalten & Habitatnutzung an bestehenden Windkraftanlagen*. Büro für Biologie, Ökologie und Naturschutzforschung.

Anhang

Bild 1: Verlauf des Nitritstickstoffgehalts [mg/l] in der Anlage in FZA 2