



Bachelorarbeiten 2023
**Bachelor of Science in
Erneuerbare Energien
und Umwelttechnik**



Preisstifter für den Studiengang
Erneuerbare Energien und Umwelttechnik

Renercon Energie AG, Knonau

Energie Grüningen AG, Grüningen

Vorwort



Prof. Dr. Henrik Nordborg
Studiengangleiter Erneuerbare Energien
und Umwelttechnik

Sehr geehrte Damen und Herren

Wieder ist es so weit. Ein weiterer Jahrgang des Studiengangs Erneuerbare Energien und Umwelttechnik (EEU) hat das Studium erfolgreich abgeschlossen und die Bachelorarbeit als krönenden Abschluss präsentiert. Mit dieser Arbeit haben die Studierenden nicht nur ihr theoretisches und praktisches Wissen unter Beweis gestellt, sondern auch ihre Fähigkeit, ein grösseres Projekt selbstständig und termingerecht zu bearbeiten und abzuschliessen.

Bei den Arbeiten handelt es sich um Technologien, die über die Zukunft der Menschheit entscheiden werden. Es geht nicht nur um die Erzeugung erneuerbarer Energie, sondern auch um ihre Speicherung und die Einbindung in das bestehende Energienetz. Ausserdem haben sich die Studierenden mit Recycling, CO₂-Nutzung und Trinkwasseraufbereitung auseinandergesetzt.

Die Praxisrelevanz des Studiums an der OST zeigt sich daran, dass die Arbeiten in enger Zusammenarbeit mit externen Partnern durchgeführt wurden. Für die Betreuung verantwortlich waren Forschende aus dem Institut für Energietechnik (IET), dem Institut für Solartechnik (SPF), dem Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC), dem Institut für Energiesysteme (IES) und dem Institut für Wissen, Energie und Rohstoffe Zug (WERZ). Nur an Fachhochschulen haben die Studierenden die Möglichkeit, schon während des Bachelorstudiums mit Instituten der angewandten Forschung in Kontakt zu kommen.

Mein besonderer Dank gilt den Mitarbeitenden der erwähnten Institute für ihren grossartigen Einsatz.

Unsere Absolventinnen und Absolventen haben offensichtlich die richtige Wahl getroffen. Nach einer dreijährigen Ausbildung haben sie den Grundstein einer in doppelter Hinsicht nachhaltigen Karriere gelegt. Erstens können sie einen aktiven Beitrag zum Aufbau einer besseren Gesellschaft leisten und zweitens müssen sie sich keine Sorgen machen, dass ihnen die Arbeit ausgehen wird. Der Fachkräftemangel im Bereich Energie- und Umwelttechnik ist heute riesig und wird weiter zunehmen.

Nach der Annahme des Klima- und Innovationsgesetzes am 18. Juni 2023 fängt die Arbeit erst an. Im Studiengang EEU leisten wir unseren Beitrag, indem wir möglichst viele gut ausgebildete Fachkräfte zur Verfügung stellen. Leider melden sich immer noch zu wenig junge Menschen für das Studium an. Dies zu ändern, sehe ich als meine grösste Herausforderung.

Ich gratuliere den Absolventinnen und Absolventen ganz herzlich zum erfolgreichen Abschluss. Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, wünsche ich viel Begeisterung bei der Lektüre.

Rapperswil, im September 2023

Prof. Dr. Henrik Nordborg
Studiengangleiter Erneuerbare Energien
und Umwelttechnik

Überblick

Referentinnen und Referenten

- 22 Prof. Stefan Bertsch
- 9 | 12 | 15 Prof. Christof Biba
- 10 Prof. Dr. Elimar Frank
- 13 Prof. Dr. Markus Friedl
- 16 | 18 Prof. Dr. Andreas Häberle
- 17 Dr. Michel Haller
- 8 Prof. Dr. Andre Heel
- 19 Boris Meier
- 17 Florian Ruesch
- 11 Prof. Dr. Michael Schueller
- 20 | 21 Prof. Dr. Jean-Marc Stoll
- 14 Prof. Carsten Wemhöner

Überblick

Korreferentinnen und Korreferenten

- 22 Max Bartholdi
- 9 | 12 Michael Beer
- 16 Thomas Bucher
- 14 Heinz Etter
- 18 Prof. Simon Furbo
- 8 Prof. Dr. Thomas Hocker
- 15 Levi op't Land
- 11 Martin Pflugshaupt
- 19 Dr. Martin Rüdüsüli
- 10 | 13 Fabian Ruoss
- 20 | 21 Dr. Adrian Schneider
- 17 Andreas Stalder

Überblick

Themen

Biomasse und Biogas, Umwelttechnik allgemein, Energietechnik allgemein

- 8 Klimaschutz und Defossilierung

Electric Solar Technology

- 9 Intercomparison of PV module lab's test methodology in Swiss and Finnish PV labs

Electric Solar Technology, Electrical Power Engineering, General Energy Technology, Environmental Economics

- 10 Techno-economic analysis of using renewable electricity and battery containers for shipping

Electrical Power Engineering, General Energy Technology, Control Engineering

- 11 Load flow calculations of a municipal electrical energy distribution grid

Elektrische Solartechnik (PV, Wind, H₂)

- 12 «Power Slide» – Simulation und messdatenbasierte Validierung

Elektrische Solartechnik (PV, Wind, H₂), Elektrische Energietechnik

- 13 Wasserstoffkonzept Hustech AG

Elektrische Solartechnik (PV, Wind, H₂), Energietechnik allgemein, Gebäudetechnik, Bauphysik

- 14 Machbarkeit grosser PV-Anlagen

Energietechnik allgemein

- 15 Brennstoffzellensystem: Versuche zur Brennstoffzelle – Stack Effizienz

- 16 Gravitationsspeicher im Berginneren

Energietechnik allgemein, Thermische Verfahrenstechnik

- 17 Erdbeckenwärmespeicher im Kiesabbaugebiet

Thermo- and Fluid Dynamics, Building Technology, Building Physics, General Energy Technology

- 18 Investigation of cold storage using phase change material

Umweltökonomie

- 19 Kostenoptimierter Kraftwerk- und Speicherpark für eine erneuerbare Energieversorgung

Umwelttechnik allgemein

- 20 Phosphat-Elimination aus kommunalem Abwasser mittels Elektrolyse

- 21 Phosphat-Elimination aus kommunalem Abwasser mittels Elektrolyse

Wasseraufbereitung, Thermo- und Fluidynamik, Umwelttechnik allgemein

- 22 Effiziente Trinkwasseraufbereitung

Überblick

Bachelors, Diplomandinnen und Diplomanden

- 14 Ermias Alazar
- 9 Nick Bakker
- 22 Elias Carl
- 12 Lasse Halle
- 11 Yannick Heeb
- 8 Franzisca Hitz-Widmer
- 13 Gian Hofstetter
- 15 Mike Kinzler
- 17 Djordje Krupljanin
- 20 Jan Kuratli
- 21 Fabio Mazzoleni
- 16 Mattia Oehen
- 18 Emanuel Schädler
- 10 Christoph Schnyder
- 19 Julian Wüthrich

Klimaschutz und Defossilierung:

Biomethanol über ein CO₂-Upcycling

Diplomandin



Franzisca Hitz-Widmer

Einleitung: Um das Pariser Übereinkommen aus dem Jahre 2015 einzuhalten, muss der Treibhausgasausstoss, welcher für die Erderwärmung verantwortlich ist, reduziert werden. Zurzeit wird immer noch der grösste Anteil der Energie aus fossilen Ressourcen gewonnen. Wie auch das Methanol, welches als häufiges Ausgangsmaterial in der chemischen Industrie benötigt wird und zudem auch zu den sogenannten Synfuels weiterverarbeitet werden kann. Heutzutage wird das Methanol über eine Wasserdampfreformierung aus Erdgas über die Zwischenprodukte des Synthesegases unter Anwendung von hohen Temperaturen und Druck hergestellt. Der heutige Prozess ist nicht klimaneutral und daher werden nachhaltige Produktionsmöglichkeiten erforscht.

In dieser Arbeit wird eine direkte Methan-zu-Methanol-Konvertierung über verschiedene Kupfer-Zeolithe als Katalysator getestet und miteinander verglichen. Der Zeolith-Ansatz nimmt sich die enzymatische Umsetzung zum Vorbild, welche aus der Natur bekannt ist. Eine wiederholte Reduzier- und Oxidierbarkeit der Kupferionen in den Zeolithstrukturen soll ebenfalls bewiesen werden.

Vorgehen: Zwei verschiedene Zeolithstrukturen, das Mordenit und das Faujasit mit zwei verschiedenen Typen (Y und 13X), wurden für die Tests ausgewählt und es wurden jeweils Kupferionen eingelagert, wobei die Konzentrationen bei 2,5%, 5% und 9% lagen. In den Zeolithen waren Ammoniumionen als Gegenionen vorhanden, welche durch Kupferionen ausgetauscht werden mussten. Dieser Ionenaustausch wurde in einer Kupfernitratlösung anhand einer Zeolith-Suspension oder der «Incipient Wetness Impregnation»-Methode vorgenommen. Eine wiederholte Reduktions- und Oxidationsfähigkeit der Kupferionen in den Katalysatoren wurde durch eine temperaturprogrammierte Reduktion (TPR) durch Methan und eine Oxidation durch CO₂ überprüft.

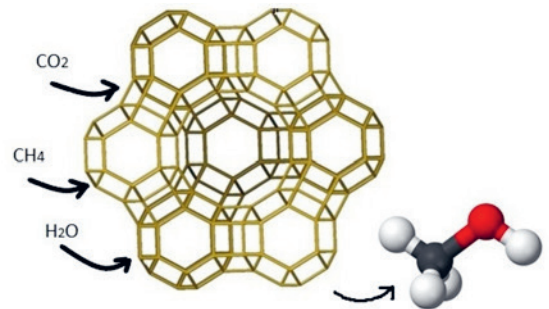
Die Methanol-Produktion wurde unter isothermen Bedingungen vorgenommen und mittels eines Massenspektrometers gemessen. Die Überprüfung der Kupfereinlagerung sowie einer möglichen Degradation des Katalysators nach der Konvertierung wurde durch Röntgendiffraktion vorgenommen. Die Überprüfung der Degradation wurde durch eine thermogravimetrische Analyse ergänzt.

Ergebnis: Durch die temperaturprogrammierte Reduktion wurde bewiesen, dass sich der folgende Zyklus, die Reduktion von Cu²⁺ zu Cu¹⁺ und die darauffolgende Oxidation, mehrfach durchführen lässt. Die höchste Methanolausbeute unter isothermen Bedingungen, welche in dieser Arbeit erzielt wurde

betrug 200 µmol/g (Zeolith). Dies mit dem mit 5% Kupferionen beladenen Mordenit bei 250°C während des ersten Zyklus, wobei die Methanolausbeute im zweiten Zyklus um ein Viertel tiefer lag. Derselbe Katalysator mit 2,5% Kupferionenanteil scheint hinsichtlich der Zyklen robuster zu sein. Bei den Faujasit-13X-Katalysatoren kann eine Anwendung von Druck mit einer höheren Ausbeute assoziiert werden. Bei den Faujasit-Y-Katalysatoren scheint eine CuO-Bildung während der Konvertierung nicht ausgeschlossen und es lässt sich vermuten, dass die angewendete Methode der Kupfereinlagerung nicht die richtige Wahl ist.

Neuer Prozess für eine direkte Methan-zu-Methanol-Konvertierung

Eigene Darstellung



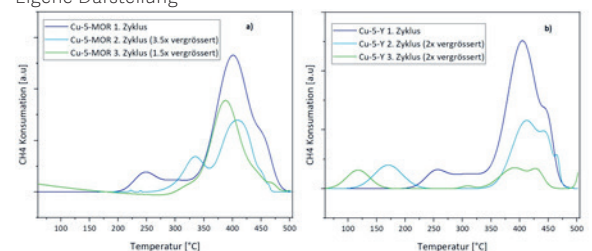
Katalysatoren: Kupfer beladene Zeolithe, welche für die Methan-zu-Methanol-Konvertierung eingesetzt wurden

Eigene Darstellung



Profil einer dreimal wiederholten TPR der kupferbeladenen Mordenit- und Faujasit-Y-Katalysatoren

Eigene Darstellung



Referent

Prof. Dr. Andre Heel

Korreferent

Prof. Dr. Thomas Hocker, ZHAW, Winterthur, ZH

Themengebiet

Biomasse und Biogas, Umwelttechnik allgemein, Energietechnik allgemein

Intercomparison of PV module lab's test methodology in Swiss and Finnish PV labs

Comparison of Solar Simulators for PV-Devices; Differences in Spectral Mismatch Factors and Uncertainties

Graduate Candidate



Nick Bakker

Introduction: Key data figure for any PV device is its IV curve to predict its performance in the destined work environment. The IV curve can be influenced by external factors like the irradiance of the incoming illumination, the operating temperature of the device, e.g., outside temperature, humidity, wind, etc. and the spectrum of the incoming illumination. This leads to the desire to design an artificial test environment where these factors can be controlled and kept at uniform levels for every measurement, to create a basis for comparison of different PV devices. This is done using solar simulators. This thesis compares three different solar simulators. Located at the New Energy Research Center Turku are a xenon long-pulse solar simulator and a LED long-pulse solar simulator and at the laboratory of the SPF Institut für Solartechnik Rapperswil is another LED long-pulse solar simulator which is evaluated.

Approach: The following goals were set in order to compare these systems:

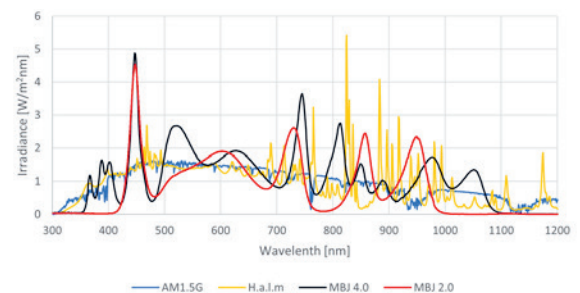
- Setup and calibration of the spectrometer
- Measurement of the spectral irradiance of the NERC xenon solar simulator and the LED solar simulator
- Comparing and interpreting the values gained from the spectral irradiance measurements. Also incorporating the irradiance spectrum values from the LED solar simulator supplied by the SPF Rapperswil.
- Calculation of the spectral mismatch correction factors and spectral mismatch-related uncertainty using the known spectral response of a number of PV modules
- Calculation of the combined uncertainty of a solar simulator
- Comparison and interpretation of the values gained from the SMM and uncertainty calculations

Result: The original goal of measuring the device-specific irradiance spectrum was not reached due to problems encountered with the digital trigger unit of the spectrometer. However, the whole process for conducting the measurement has been fully prepared, including the necessary data and parameters. The SMM values gained enable a good look at the differences between these different solar simulators and the influence an irradiance spectrum matching the reference spectrum more closely has on the SMM calculation. The comparison of an LED- and a xenon-based solar simulator shows how closely SMM results can match each other despite using completely different light sources and amounts of light sources. The uncertainty values calculated for all of the different solar simulators show the influence the irradiance spectrum uncertainty has on these combined uncertainties. Due to these uncertainty val-

ues all being estimated, the differences between the solar simulators are quite small, mostly as a result of the different total bandwidth length the light sources cover and not of the spectra. This shows that even though a class A+ solar simulator may be used for a PV module performance measurement, it may have a higher total uncertainty than a class A solar simulator, simply because of the difference in bandwidth they cover. It has been proven that the small differences between the SMM uncertainties of different PV module combinations used in a solar simulator have no influence on the total uncertainty. The average of these uncertainties can be used and doesn't need to be changed for every PV module performance measurement which is done, as long as the spectral response curve of the device under test falls somewhere in between the ones used for the SMM calculations.

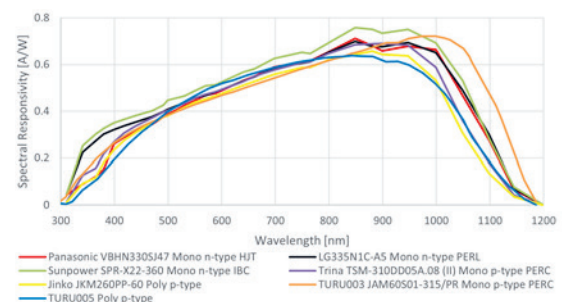
Irradiance spectra of the MBJ2.0, MBJ4.0 and H.a.l.m solar simulators and reference solar irradiance spectrum AM1.5G

Own presentation



Spectral response of PV modules used for SMM calculation

Own presentation



Excerpt of table containing calculated SMM factors and related uncertainties.

Own presentation

MBJ 4.0				
Name	SMM	u _{SMM} (k=2)	u _{SMM}	Date
PV-Device under Test				
PV-Reference				
Device under Test Irradiance				
Reference Irradiance				
PV-DUT: LG335N1C-A5 Mono n-type PERC				
PV-Ref: Panasonic VBHN3305J47 Mono n-type HJT	0.9939	1.2931%	0.6466%	20.12.2022
DUT: MBJ 4.0				
Ref: AM1.5G				
PV-DUT: Sunpower SPR-X22-360 Mono n-type IBC				
PV-Ref: Panasonic VBHN3305J47 Mono n-type HJT	0.9948	1.2931%	0.6465%	20.12.2022
DUT: MBJ 4.0				
Ref: AM1.5G				

Advisor

Prof. Christof Biba

Co-Examiner

Michael Beer,
Photovoltaik-Service
Beer, Weimar (Lahn)

Subject Area

Electric Solar
Technology

Project Partner

Mr. Samuli Ranta,
New Energy Research
Center Turku,
University of Applied
Sciences, Turku,
Finland

Techno-economic analysis of using renewable electricity and battery containers for shipping

Graduate Candidate



Christoph Schnyder

Initial Situation: The transformation of the shipping industry to fossil-free propulsion is still going on slowly. To accelerate the transformation, a large-scale retrofit of the existing fleet would be necessary. There the EU project SYNERGETICS comes in to offer a catalogue with retrofit solutions for inland water and coastal vessels with a certain type, dimension and operation profile.

Approach: In the SYNERGETICS project a possible retrofit solution is identified, where swappable battery containers in combination with an electrified propulsion system are used. In this solution, the electricity for the battery container is produced with renewable sources. In a first step the well-to-tank pathway is analysed. For the well to-tank pathway five elements are identified: energy production, energy transport, charging infrastructure, battery container and container transport onto the ship. For each element the cost and global warming potential per kWh of provided electric energy is modelled. This is done over the whole life cycle of the element with a cradle-to-gate approach. For each element different variants are identified and modelled. For the data basis of the model, a literature research is conducted, from which the relevant values are extracted. At the end, the variants of each element are combined to form multiple well-to-tank scenarios.

Result: The best well-to-tank scenario, considering an optimum with low cost and low global warming potential, is a charging network scenario with onshore wind turbines producing the electricity in Northern Germany. From there the electricity is transmitted to the charging stations at the ports along the Rhine via the existing grid. At the port the Li-ion based battery containers are then charged and loaded onto the ship with the existing logistics infrastructure from the port. This scenario provides the electric energy at a specific cost of € cent 25.0/kWh and specific GWP of 25.5 g CO₂e/kWh.

To further minimise the cost of the overall chain, the cost for handling the battery container from and onto the ship, could be subsidized by the port. Additionally, the cost could be further reduced by producing the electricity with PV in Morocco. The problem of the higher specific GWP of PV could be significantly reduced by switching to renewable electricity during the manufacturing of the cell.

Advisor
Prof. Dr. Elimar Frank

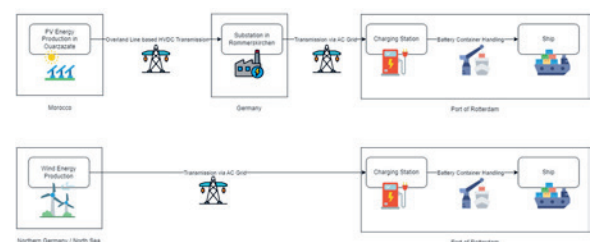
Co-Examiner
Fabian Ruoss, Stadt
Rapperswil-Jona, SG

Subject Area
Electric Solar
Technology,
Electrical Power
Engineering, General
Energy Technology,
Environmental
Economics

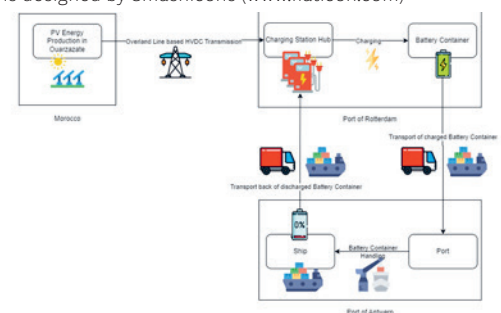
Visualization of transport volume on European waterways
Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)



Schematic visualization of the well-to-tank charging network scenario
Icons designed by Smashicons (www.flaticon.com)



Schematic visualization of the well-to-tank transport network scenario
Icons designed by Smashicons (www.flaticon.com)



Load flow calculations of a municipal electrical energy distribution grid

Simulation-based analysis of necessity and costs of conventional and alternative grid reinforcements for future loads

Graduate Candidate



Yannick Heeb

Introduction: This bachelor's thesis focuses on analysing the municipal electrical energy distribution grid of Grünigen, specifically addressing the anticipated changes in load demand. Grünigen, situated in the Zürcher Oberland region, features dispersed consumers of electric energy, typical of rural areas with integrated industry. Notably, the municipality is home to a bus-operating company (VZO) that will electrify its entire fleet until 2038, necessitating daily charging at their site. To comprehend and study the impact of increased energy demand, a load forecast incorporating diverse load profiles, funded on measurements and studies on the change of energy demand, was developed. These profiles, which were generated for general loads, the bus charging station of VZO, and the generation of PV power, were subsequently simulated using Neplan, a specialised software for electrical load flow analysis. The objective was to identify grid vulnerabilities by assessing that may face overloading in the future.

Furthermore, the thesis compares conventional grid reinforcement measures, such as additional parallel cable lines, with alternative approaches such as the integration of energy storage units (batteries and PtX). Additionally, a (n-1) redundancy simulation was conducted to evaluate grid reliability and resilience. The cost-effectiveness of these reinforcement measures was also examined.

Result: The findings demonstrate that conventional grid reinforcement measures which target specific lines, are considerably more cost-effective than incorporating energy storage units. However, the redundancy simulation revealed that such measures alone might not suffice to guarantee grid stability and reliability, as the loading of some lines still reaches critical levels. Therefore, further investigations and alternative solutions are required to address the redundancy security of the grid.

Conclusion: This thesis contributes to the understanding of grid management and the challenges presented by rising electricity demand in the context of municipal energy distribution systems. It underscores the necessity for comprehensive analysis and alternative approaches to ensure the grid's long-term sustainability and dependability. Additionally, it provides valuable insights to the grid operator regarding the precise load distribution within the grid, which is challenging to comprehend without simulation.

Advisor

Prof. Dr. Michael Schueller

Co-Examiner

Martin Pflugshaupt,
Energie Grünigen AG

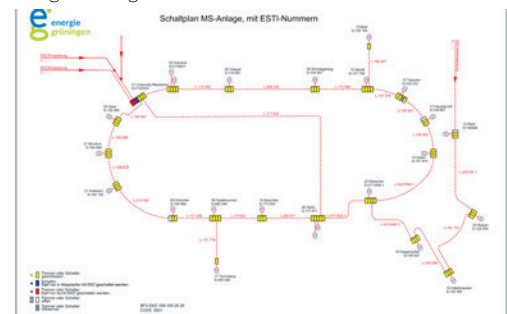
Subject Area

Electrical Power Engineering, General Energy Technology, Control Engineering

Project Partner

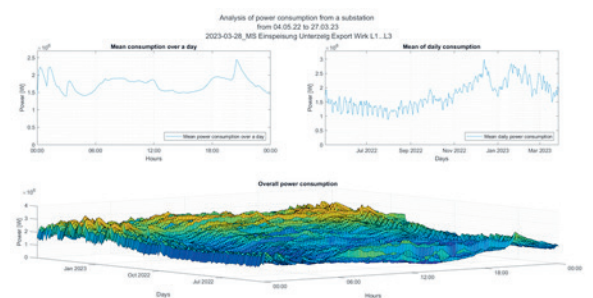
Energie Grünigen AG,
Grünigen, Zürich

Schematic of the medium voltage grid of Grünigen



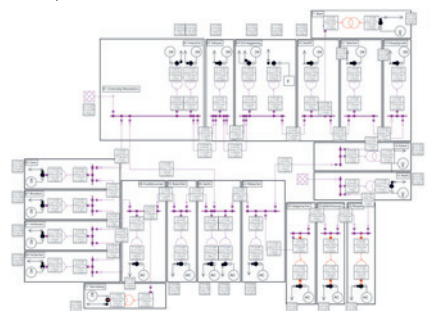
Load analysis in the grid of Grünigen

Own presentment



Simulation of a future scenario in Neplan

Own presentment



«Power Slide» - Simulation und messdatenbasierte Validierung

von unterschiedlich ausgerichteten, vertikal montierten PV-Modulen

Diplomand



Lasse Halle

Problemstellung: In der Schweiz wird die elektrische Energieerzeugung mittels PV-Verschattungslösungen nicht genutzt. In der Potentialabschätzung einer PV-belegten Raffstore, der Power Shade, konnte das Ertragspotential aufgezeigt werden. Bei der Entwicklung des Power-Shade-Prototyps traten immense technische Herausforderungen auf. Durch die gekrümmten Lamellen der Raffstore und der beweglichen Aufhängung wurde ein alternatives Konzept für die elektrische Energieerzeugung mittels Verschattungslösungen am SPF entwickelt.

Der PV-belegte Schiebeladen «Power Slide» soll als Verschattungslösung dienen und gleichzeitig Energie erzeugen. Das Konzept ist nicht ausgearbeitet und das Potenzial dieser Energieerzeugung ungeklärt.

Vorgehen/Technologien: Die Bachelorarbeit setzt sich mit der Potentialabschätzung des Power Slide auseinander. Mittels Simulationen im Programm PVsyst wurden unterschiedliche Orientierungen und Nachführungen getestet. Die Auswertung der Simulationsdatensätze erfolgte mit dem Programm MATLAB.

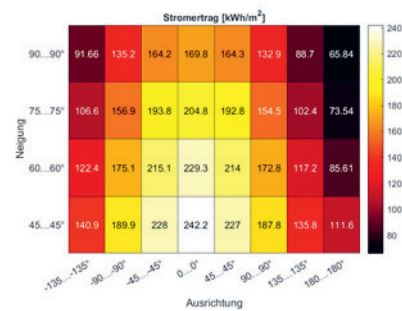
Ein erster Prototyp des Power Slide wurde entwickelt. Dazu gehörten die Planung, der Bau und die Inbetriebnahme des Prototyps. Anhand der Messdaten von diesem Prototyp wurde eine Validierung der Simulationsergebnisse durchgeführt. Die Potentialabschätzung beinhaltet eine Abschätzung über die jährlichen elektrischen Energieerträge an einem typischen Einfamilienhaus. Weiter wurde eine Potentialabschätzung für die jährliche elektrische Energieerzeugung in der gesamten Schweiz durch das Verwenden des Power Slide erstellt. Es konnten eindeutige Produkthanforderungen an einen marktfähigen Power Slide erstellt werden. Weiterführend kann anhand dieser Bachelorarbeit ein weiterer marktfähiger Prototyp des Power Slides entwickelt werden, welcher das solare Einstrahlungspotential über eine energieerzeugende Verschattungslösung bestmöglich ausschöpft.

Ergebnis: Anhand der Messwerte wurden die Simulationsergebnisse bedingt validiert. Wenn der Power Slide als Verschattungslösung bei allen Fensterflächen eines typischen Einfamilienhauses (14,2 m²) verwendet wird, kann mit den vertikalen Power Slides eine jährliche elektrische Energiemenge von 1797 kWh an der AC-Seite des Mikrowechselrichters produziert werden. Bei einer Neigungsanpassung des Power Slide von 90° auf 75° kann eine deutliche Steigerung des elektrischen Jahresenergieertrags mit 2104 kWh festgestellt werden. Mit einer Südausrichtung des um 90° geneigten Power Slide ist mit einem

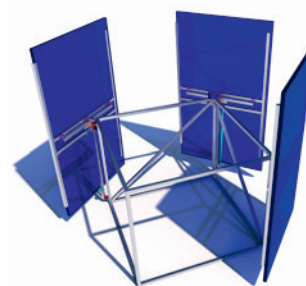
elektrischen Jahresenergieertrag an der AC-Seite von 169,8 kWh/m² am Standort Rapperswil zu rechnen.

Die jährliche Gesamteffizienz eines nach Süden gerichteten Power Slide am Standort Rapperswil mit einer Neigung von 90° beträgt 820,77 kWh/kWp. Mit einer Neigungsanpassung auf 75° erhöht sich dieser Effizienzwert um 14,4%.

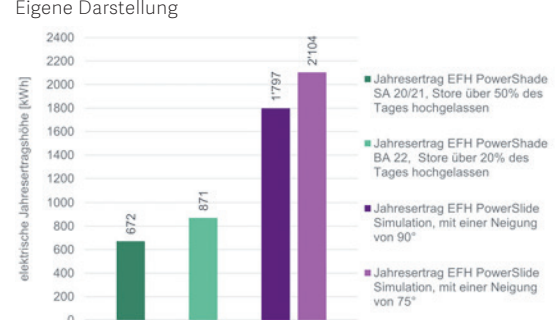
Energy Map mit flächenspezifischen Energieerträgen über das ganze Jahr von unterschiedlich fixierten Orientierungen
Eigene Darstellung



CAD-Modellansicht des Prototypenentwurfs, welcher anschliessend erstellt und in Betrieb genommen wurde
Eigene Darstellung



Elektrische Jahresertragsabschätzung von einem typischen EFH mit 5 Zimmern von den PV-Verschattungskonzepten
Eigene Darstellung



Referent

Prof. Christof Biba

Korreferent

Michael Beer,
Photovoltaik-Service
Beer, Weimar (Lahn)

Themengebiet

Elektrische
Solartechnik (PV, Wind,
H2)

Wasserstoffkonzept Hustech AG

Machbarkeitsstudie zur Produktion von grünem Wasserstoff für den Betrieb der Flottenfahrzeuge

Diplomand



Gian Hofstetter

Ausgangslage: Die Hustech Installations AG betreibt an ihrem Hauptsitz in Bubikon eine grosse fossile Fahrzeugflotte. Da die Hustech AG stark auf Innovation und Nachhaltigkeit setzt, hat sie im Jahr 2021 einen Neubau bezogen, welcher grossen Wert auf diese beiden Faktoren legt. Durch PV-Energie auf dem Dach, eine Wärmepumpe und einen energetisch optimierten Holzbau hat der Neubau einen geringen Klimaeinfluss. Die bestehende fossile Flotte passt jedoch nicht in das neue Konzept und verschlechtert die CO₂-Bilanz des Standortes erheblich.

Ziel der Arbeit: Im Zuge dieser Arbeit soll geprüft werden, ob über einen Power-to-Gas-Prozess grüne Energie gespeichert und damit eine CO₂-freie Flotte betrieben werden kann. Das Ziel ist es dabei, auf dem Gelände der Hustech AG so viel erneuerbare Energie zu gewinnen, dass die neue Fahrzeugflotte über das ganze Jahr energieautark betrieben werden kann. Dazu wird die erneuerbare Energie über einen Power-to-Gas-Prozess in Wasserstoff umgewandelt und gespeichert. Bei Bedarf wird der Wasserstoff über eine Brennstoffzelle rückverstromt und damit werden die Fahrzeuge versorgt.

Ebenfalls soll diese Arbeit aufzeigen, welchen Nutzen eine solche Anlage bezogen auf die Ökologie sowie auf die Wirtschaftlichkeit hat.

Ergebnis: Aus den Berechnungen dieser Arbeit geht hervor, dass das Konzept der eigen versorgten grünen Fahrzeugflotte sowohl technisch wie auch ökonomisch machbar ist. Durch das Betreiben der Wasserstoffspeicheranlage können die Batterie-Elektrofahrzeuge das ganze Jahr mit erneuerbarer Energie geladen und so rund 145 Tonnen CO₂ Emissionen pro Jahr verhindert werden. Dazu wird die bereits bestehende PV-Anlage um den Faktor vier vergrössert und liefert neu rund 300 000 kWh/Jahr. Die Power-to-Gas-Anlage produziert über das Jahr fast 53 000 Nm³ Wasserstoff, der in einem Drucktank eingespeichert wird. Aus den Umwandlungsprozessen werden 120 000 kWh Wärme pro Jahr freigesetzt. Diese wird an ein Nahwärmenetz abgegeben und erzeugt dort eine Vorlauftemperatur von 80°C. Die Investitionskosten für eine solche Anlage scheinen mit rund 1 225 000 Fr. sehr hoch. Dazu kommen die Unterhaltskosten von ca. CHF 5000/Jahr. Jedoch fallen durch den Betrieb der Anlage 60 000 Liter Kraftstoff pro Jahr weg, was einer Einsparung von 115 000 Fr. entspricht. Zusammen mit dem Erlös aus dem Nahwärmenetz können so pro Jahr gut CHF 125 000 eingespart werden. Dadurch amortisiert sich die Anlage mit einer garantierten Lebensdauer von 20 Jahren bereits innert 10 Jahren.

Referent

Prof. Dr. Markus Friedl

Korreferent

Fabian Ruoss, Stadt Rapperswil-Jona

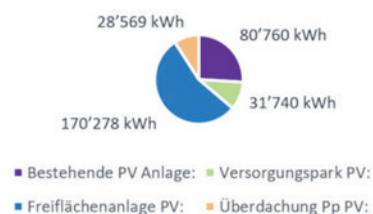
Themengebiet

Elektrische Solartechnik (PV, Wind, H₂), Elektrische Energietechnik

Grafische Auswertung der verschiedenen PV-Flächen

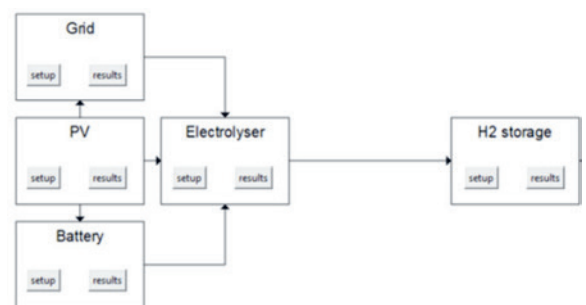
Eigene Darstellung

Total mögliche Energiegewinnung mit PV [kWh/a]



Hauptkomponenten einer Wasserstoffproduktionsanlage

Power to X Tool, IET



Wirtschaftliche Kenndaten aus der berechneten Wasserstoffanlage

Eigene Darstellung

Amortisationszeit der Anlage:	10 Jahre
Speichergestehungskosten Gesamtenergie	0.35 Fr./kWh
Speichergestehungskosten elektrische Energie	0.61 Fr./kWh
Wasserstoffpreis aus der Anlage	11.6 Fr./kg

Machbarkeit grosser PV-Anlagen

Diplomand



Ermias Alazar

Ausgangslage: Im Zuge des notwendigen schnellen und massiven Ausbaus der Photovoltaik (PV) für die Energiewende sind grosse PV-Anlagen, die auf bestehenden Bauwerken oder Strukturen errichtet werden können, sehr interessant. Die Machbarkeit einer PV-Anlage mit 450 kWp soll für den Standort Garmischeras an einer bestehenden Brücke geprüft werden, bei der sich in ca. 1 km Entfernung eine Stromversorgungsleitung befindet.

Eine weitere Anlage könnte am Standort Scharinas auf einem Gelände einer Grösse von 50 000 – 100 000 m² installiert werden, das oberhalb von Lawenverbauungen angeordnet ist.

Aufgabenstellung: In der Arbeit sollen Optionen und Potenziale für die beiden Anlagenstandorte geprüft und die Anlagen technisch und wirtschaftlich bewertet werden. Dazu sollen zunächst Vorteile und Einschränkungen der Standorte und allfällige rechtliche und konstruktive Hemmnisse geprüft werden. Daran schliessen sich die weiteren technischen und wirtschaftlichen Auswertungen an, um eine gesamthafte Beurteilung der Anlagen zu erarbeiten und auch allfällige Vergleiche mit Varianten zu betrachten. Die Ergebnisse werden als Empfehlung zusammengefasst.

Ergebnis: Bei günstigen Bedingungen kann die freistehende PV-Anlage in den Alpen im Winterhalbjahr ähnliche Energieerträge liefern wie eine Anlage im Mittelland während eines ganzen Jahres. Gründe für den höheren Winterstrom von alpinen Anlagen liegen in der höheren Solareinstrahlung durch weniger Nebel und Wolken, Reflexion von Schneebedeckung und Boden, Nutzung von bifazialen Modulen, einen

besseren Wirkungsgrad durch die tiefen Temperaturen sowie einen steileren Anstellwinkel und dadurch geringere Verluste durch Schneeabdeckung. Die bifazialen Module lieferten einen über 20% höheren Jahresertrag als die monofazialen Module. Da die Erträge je nach Randbedingungen einer PV-Anlage mit bifazialen Modulen deutlich höher sein können, erzielen diese allfällig eine kürzere Amortisationszeit als die monofazialen Module.

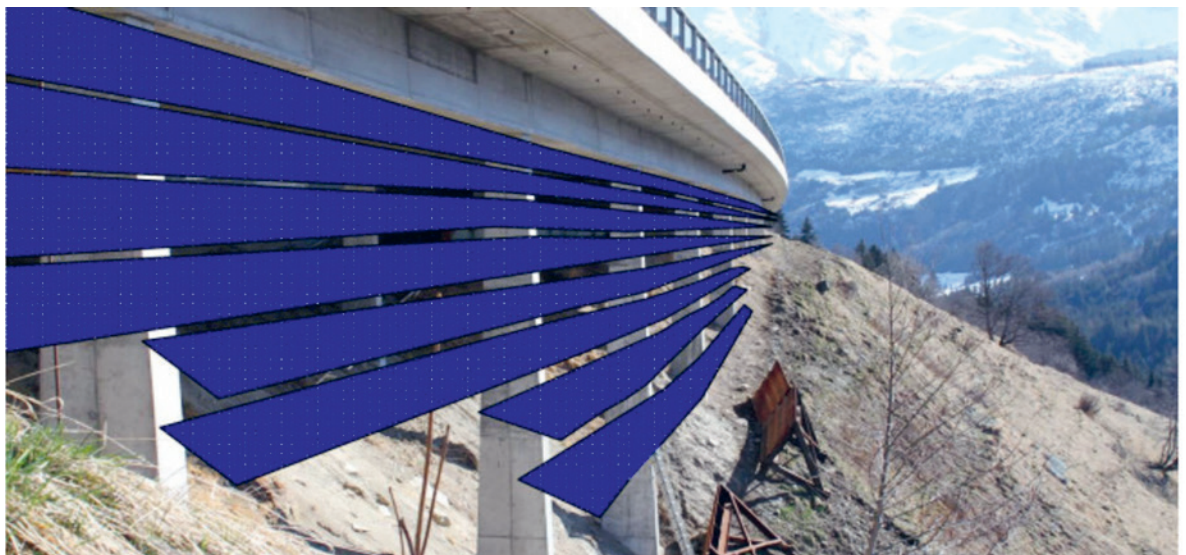
Testanlage in Davos auf 2500 m ü. M.
ZHAW



PV-Anlage in Scharinas auf einer Höhe von 2000 m ü. M.
Eigene Darstellung



PV-Anlage in Garmischeras auf einer Höhe von 1360 m ü. M.
Eigene Darstellung



Referent
Prof. Carsten
Wemhöner

Korreferent
Heinz Etter, neukom
engineering ag,
Adliswil, Zürich

Themengebiet
Elektrische
Solartechnik (PV, Wind,
H2), Energietechnik
allgemein,
Gebäudetechnik,
Bauphysik

Projektpartner
AWIAG Andy Wickart
Haustechnik AG,
Finstersee, Zug

Brennstoffzellensystem: Versuche zur Brennstoffzelle – Stack Effizienz

Diplomand



Mike Kinzler

Ausgangslage: Brennstoffzellen haben gegenüber konventioneller Energieumwandlung einen entscheidenden Unterschied: Es findet kein Verbrennungsprozess statt. Sie können für sehr viele technische Anwendungen zum Einsatz kommen, jedoch sind sie aus wirtschaftlicher Sichtweise noch nicht konkurrenzfähig. Die hier eingesetzte PEM-Brennstoffzelle kann für viele Anwendungen genutzt werden, da sie eine hohe Leistungsdichte pro Grösse aufweist und mit Niedertemperatur (65 bis 75°C) betrieben wird. Das Ziel ist es, aus einer Oxidations-Reaktion zwischen Aluminium und Wasser Wärme und Wasserstoff zu gewinnen. Dieser wird direkt dem Brennstoffzellensystem zugeführt, um elektrische Energie und nochmals Wärme für den Energiebedarf im Gebäude generieren zu können.

Ziel der Arbeit: Ein Brennstoffzellensystem konnte durch mehrere Studierendenarbeiten realisiert und in Betrieb genommen werden. In dieser Bachelorarbeit sollen Verbesserungsmaßnahmen für das System vorgenommen werden, um die Brennstoffzelle mit voller Leistung von 1,2 kW betreiben zu können. Das Ziel ist es, die Strom- und Wärmeproduktion zu quantifizieren und den optimalen Betriebspunkt zu evaluieren. Der momentane Aufbau ist als «Open-Loop-System» konzipiert, zusätzlich soll der Aufbau im «Closed Loop» studiert und dessen Entwicklungsstand im theoretischen Rahmen erfasst werden.

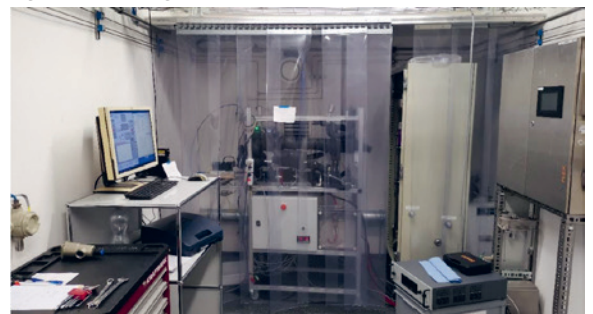
Ergebnis: Strom- und Wärmeproduktion nach quantifizierter Messmethode sind für zwei Messpunkte bestimmt worden, welche bei zwei geringen Leistungen entnommen worden sind. Bei den Versuchsdurchführungen konnte eine maximale Leistung von ca. 350 W erreicht werden. Der optimale Betriebspunkt konnte nicht evaluiert werden, da die Brennstoffzelle nicht über den gesamten Leistungsbereich getestet werden konnte. Während des Versuchs ist die Spannung der Brennstoffzelle nicht genügend angestiegen und daher konnte der Strom nicht weiter erhöht werden. Bei zu tiefer Spannung nimmt die Brennstoffzelle Schaden. Für den Betrieb im «Closed-Loop» hat sich besonders ein Anodenrezirkulationsgebläse zur bestmöglichen Effizienzsteigerung herauskristallisiert.

Referent
Prof. Christof Biba

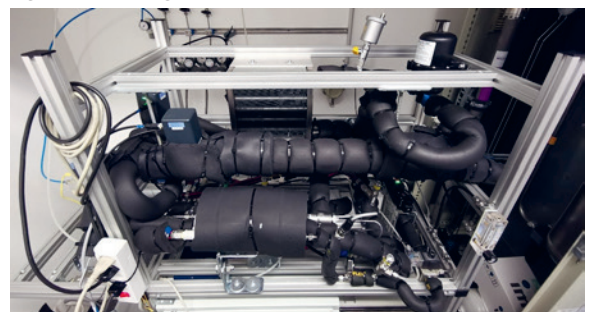
Korreferent
Levi op't Land, EH
Group Engineering AG,
Nyon, VD

Themengebiet
Energietechnik
allgemein

Arbeitsplatz mit Brennstoffzellensystem in einem Container
Eigene Darstellung



Aufbau des Brennstoffzellensystems mit Isolierung der Leitungen
Eigene Darstellung



Strom- und Wärmeproduktion
Eigene Darstellung

Daten	1. Messpunkt
Strom	21 A ± 0.578 A
Spannung	8.19 V ± 0.139 V
Elektrische Leistung	164.42 W bis 179.72 W
Wärmeleistung	203.563 W bis 507.103 W
	2. Messpunkt
	27 A ± 0.578 A
	7.3 V ± 0.139 V
	189.21 W bis 205.15 W
	228.601 W bis 558.864 W

Gravitationsspeicher im Berginneren

Diplomand



Mattia Oehen

Ausgangslage: Um die Sicherheit der Stromversorgung in der Schweiz zu garantieren, ohne auf Kernkraftwerke oder fossile Brennstoffe angewiesen zu sein, wird der Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen wie Wasser, Sonne und Wind erhöht. Aktuell liegt der Anteil der erneuerbaren Energien bei 60 %, der durch 90 % aus Wasserkraft gedeckt wird. Die Zunahme der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien garantiert aufgrund der Abhängigkeit von Wetter und Jahreszeit keine konstante Versorgung. Um dieses Problem zu lösen, betreibt die Schweiz verschiedene Stauseen, in denen bis zu 8,8 TWh Energie gespeichert werden können, wenn das Netz eine Überproduktion aufweist. Diese Kapazität kann jedoch aus Platzgründen und aufgrund der Abhängigkeit von der verfügbaren Wassermenge nicht mehr erweitert werden. Dies führt dazu, dass andere Speichertypen entwickelt werden müssen, die an die Eigenschaften der Schweiz angepasst werden können.

Einleitung: Eine Möglichkeit, Strom in der Schweiz in Form von potenzieller Energie zu speichern (GESS – Gravity Energy Storage System), ist die Nutzung des überschüssigen Stroms durch den Antrieb von Motoren, die Gewichte auf eine bestimmte Höhe heben. Wenn man diese Energie ins Netz einspeisen will, kann man die Motoren einfach als Generator verwenden, wenn die Gewichte heruntergelassen werden.

Diese Art von System wurde im Tessin von der Firma Energy Vault mit einer 60 Meter hohen Versuchsanlage getestet. Die CDU (Commercial Demonstration Unit) mit einer Kapazität von 35 MWh sollte zeigen, dass die Umwandlung von Strom in potenzielle Energie durch das Heben von Gewichten effizient und wirtschaftlich machbar ist. Das Unternehmen entwickelte das Konzept weiter und baut aktuell in China eine Anlage mit einer Speicherkapazität von 100 MWh.

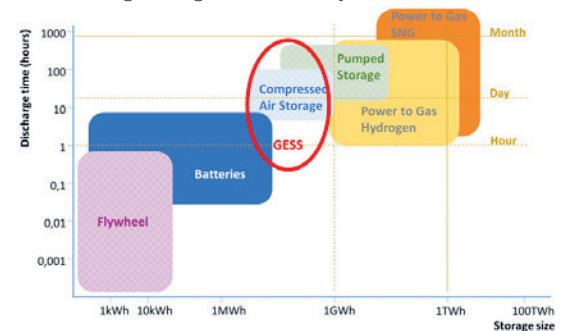
Ergebnis: In der Schweiz wäre es möglich, ein Energiespeichersystem zu entwickeln, das dem von Energy Vault verwendeten vergleichbar ist, indem unsere Berge genutzt werden. Es wäre möglich, die grossen Höhenunterschiede auszunutzen, indem man im Innern der Berge ein System zum Heben von Gewichten baut, das aus vertikalen Stollen besteht, die den Transport der Gewichte von einem unteren zu einem oberen Lagerraum ermöglichen. Die vertikalen Kanäle könnten sehr lang sein, was eine grössere Energiespeicherung für jedes verwendete Gewicht garantiert.

Dies bietet die Möglichkeit, die Kapazität bei steigender Nachfrage zu erweitern, wenn die Anzahl der ver-

wendeten Gewichte erhöht wird. Durch den Bau von mehreren Schwerkraftspeichern könnte eine grosse Menge an Regelernergie für SwissGrid zur Verfügung gestellt werden, um das schweizerische Stromnetz innerhalb von Sekunden stabilisieren zu können und damit die Stromversorgungssicherheit zu erhöhen.

Arten der Energiespeicherung

School of Engineering, RMIT University (2015)



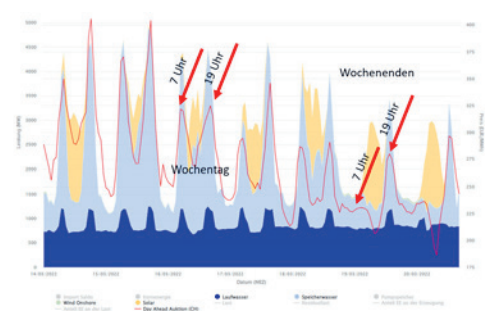
EV1 Commercial Demonstration Unit – Tessin

<https://www.energyvault.com/cdu>



Analyse der Strompreise im Verhältnis zur Stromerzeugung – KW11 Jahr 2022

<https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?>



Referent

Prof. Dr. Andreas Häberle

Korreferent

Thomas Bucher,
Bucher Innovation,
Sargans, SG

Themengebiet

Energietechnik
allgemein

Projektpartner

Energie-Genossenschaft PizSol,
Thomas Keel, Bad Ragaz, SG

Erdbeckenwärmespeicher im Kiesabbaugebiet

Grundlagen und Fallstudie Eglisau

Diplomand



Djordje Krupljanin

Ausgangslage: Die Schweiz hat sich für die Bekämpfung des Klimawandels das Ziel gesetzt, ihre CO₂-Emissionen bis 2050 auf netto null zu senken. Für das Erreichen dieses Zieles ist ein Wandel von fossilen zu erneuerbaren Energieressourcen erforderlich. Deswegen werden vermehrt Abwärmequellen aus Industrieprozessen für das Heizen mittels Fernwärme verwendet. Im Sommer ist jedoch wenig Heizwärmebedarf vorhanden und die Abwärme der Industrie bleibt zum grossen Teil ungenutzt. Eine Lösung hierfür bieten saisonale Wärmespeicher. Der Erdbeckenwärmespeicher ist heute einer der günstigsten und einfachsten Wege um Energie saisonal zu speichern. Um die Ausgrabungskosten einzusparen, besteht die Idee, einen Speicher in einem Kiesabbaugebiet respektive einer Kiesgrube zu realisieren. So können die Gesteungskosten gesenkt und die Chance auf eine Realisierung erhöht werden. Anhand einer Fallstudie in Zusammenarbeit mit Renercon sollen die konkrete Erstellung und die Einbindung eines solchen Erdbeckenwärmespeichers in das Fernwärmenetz von der Gemeinde Eglisau analysiert werden.

Ergebnis: In der Fallstudie wurden drei Einzugsgebiete (Eglisau Nord [Egl N], Eglisau Nord und Süd [Egl N+S] und Eglisau, Hüntwangen, Wil und Rafz [Egl + U]) und vier Energiesysteme mit fünf Energiequellen (Holzheizkraftwerk [HHKW], Solarthermie [ST], Abwärme des Rheins [Rh], des Rechenzentrums [RZ] und der Firma SF) betrachtet. Daraus resultierten zwölf Varianten, welche in der Fallstudie analysiert wurden. In den Darstellungen 2 und 3 sind die berechneten Speichergrössen und die Gesteungskosten der Varianten aufgezeigt. Hierbei ist hervorzuheben, dass bei der Variante Solarthermie und Abwärme der Firma SF (ST + SF) im grössten Einzugsgebiet (Egl + U) eine Fläche von gesamthaft 217 000 m² benötigt wird (Speicher- und Solarthermiefläche). Zudem benötigt die Variante mit dem Rechenzentrum (RZ + SF) erst beim grössten Gebiet einen Speicher.

Das Abbaugelände Rafzerfeld wurde bezüglich Grösse und geographischer Lage als Optimum für den Wärmespeicher evaluiert. Heute werden Kiesabbaugebiete standardmässig rekultiviert und/oder renaturiert, weshalb eine Teilnutzung der Kiesgrube als Wärmespeicher mit den bestehenden Interessen anderer Nutzungsarten abgeglichen und diskutiert werden muss. Bezüglich der Raumplanung wäre eine Umzonung des Standortes nötig, da die Landwirtschaftszone grundsätzlich Bauten ausschliesst. Die Umzonung bedarf eines Eintrags im kantonalen Richtplan und somit einer Änderung des regionalen oder kommunalen Nutzungsplans.

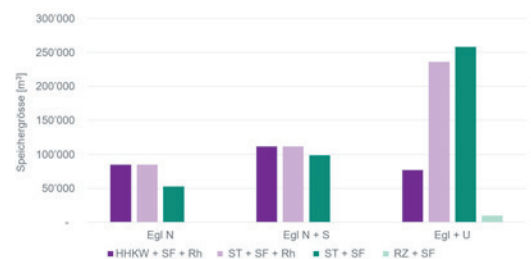
Fazit: Für weiterführende Studien ist zu empfeh-

len, die Systeme mit Programmen wie TRNSYS oder Polysun zu simulieren. Zudem lohnt sich die weitere Auseinandersetzung mit den Gesetzen der Raumplanung bezüglich der Bewilligung des Speicherbaus, da dieses Thema im Rahmen der Arbeit nicht vollends untersucht wurde. Vergleicht man die erzielten Gesteungskosten mit den Gas- (17 Rp./kWh) und Heizölpreisen (11 Rp./kWh), so sind die genannten Varianten wettbewerbsfähig. Basierend auf den Ergebnissen wird daher empfohlen, die Realisierung eines Erdbeckenwärmespeichers anzustreben. Die Studie basiert auf diversen Annahmen - und die Resultate sind daher als Richtwerte zu verstehen. Die Arbeit soll als Diskussionsgrundlage dienen und die Pionierarbeit in der Schweiz beim Bau eines saisonalen Speichers vorantreiben.

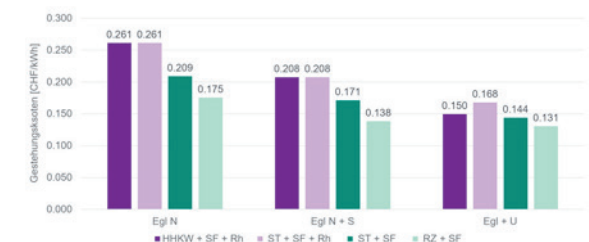
Erdbeckenwärmespeicher mit einer Solarthermieanlage in Dronninglund, Dänemark
Dronninglund Fjernvarme



Speichergrössen der 12 Varianten der Fallstudie
Eigene Darstellung



Gesteungskosten der 12 Varianten der Fallstudie
Eigene Darstellung



Referenten

Dr. Michel Haller,
Florian Ruesch

Korreferent

Andreas Stalder,
Renercon, Knonau, ZH

Themengebiet

Energietechnik
allgemein, Thermische
Verfahrenstechnik

Investigation of cold storage using phase change material

Graduate Candidate



Emanuel Schädler

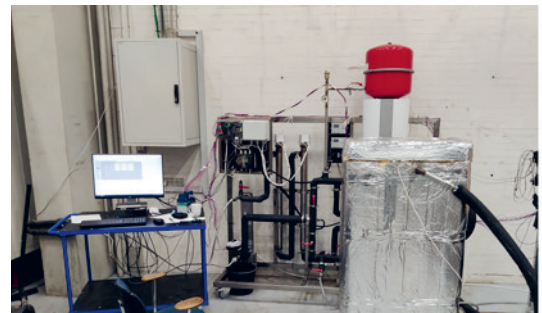
Initial Situation: Due to fluctuating and rising energy prices, the demand for storage options is increasing. Especially in Denmark the energy prices are higher during the summer than in the winter. Data centres are facing their main energy demand during summer. Due to these reasons, they are looking for solutions to store energy in a cost-efficient way. The aim of this thesis is to test a new model of a PCM cold storage which is used for cooling of data centres. For this purpose, a variable heat source and heat sink as well as a monitoring system were used. Tests were conducted and analysed regarding key performance parameters such as thermal power supply to and from the storage as well as its energy content.

Approach: First a literature study of different applications of PCM cold storages was carried out. Afterwards the test setup was prepared for the test cycles. This included testing the measurement equipment, connecting the storage with the test setup, building the insulation layer and filling the storage with the PCM. Once this was done, the test cycles began. Finally, the data were analysed.

Result: Different applications of PCM storages are already available on the market or are under development. The measured energy content of the investigated storage when heated up from 10 °C to 25 °C amounts to 15 kWh. The UA value of the heat exchanger is 450 W/K at a flow rate of 13.3 l/min. Subcooling depends on how much the PCM was heated up and if it is bigger than described in the data sheet of the PCM.

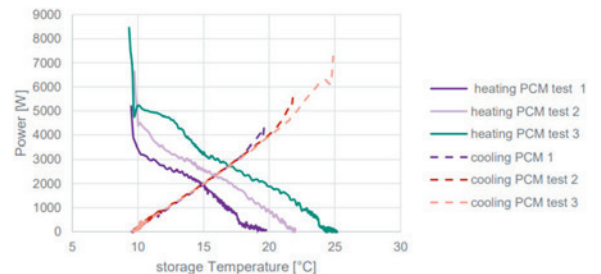
Test setup with storage

Own presentation



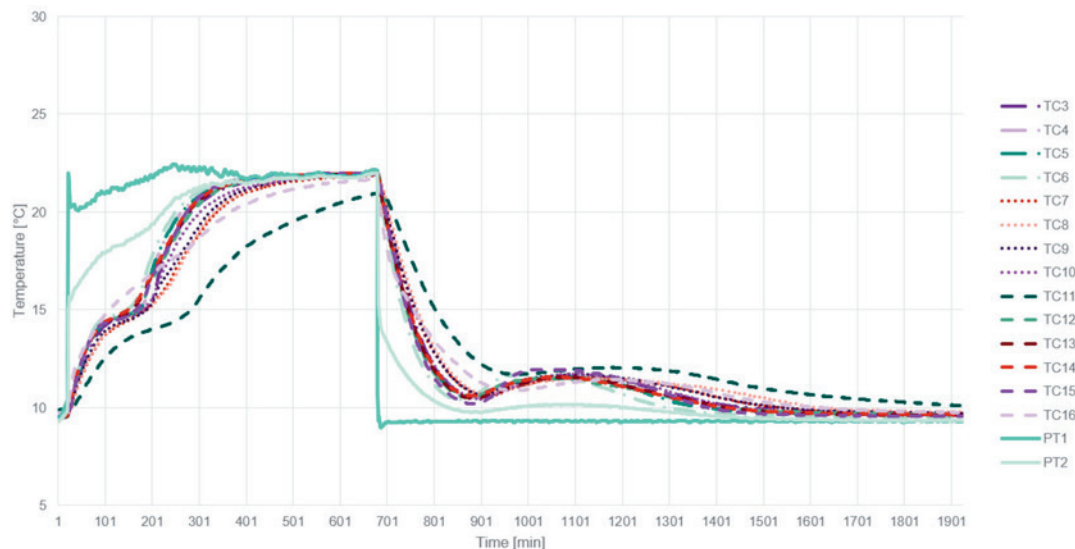
Power curves

Own presentation



Temperature curve of PCM test cycle 2

Own presentation



Advisor

Prof. Dr. Andreas Häberle

Co-Examiner

Prof. Simon Furbo, DTU Technical University of Denmark, Lyngby

Subject Area

Thermo- and Fluid Dynamics, Building Technology, Building Physics, General Energy Technology

Kostenoptimierter Kraftwerk- und Speicherpark für eine erneuerbare Energieversorgung

Potenzial von Power-to-X für die Energiezukunft Schweiz

Diplomand



Julian Wüthrich

Einleitung: Das IET hat in den letzten Jahren ein Simulationstool der Schweizer Energieversorgung erarbeitet. Auf powercheck.ch können verschiedene Szenarien durchgerechnet werden. Ausgehend von diesem Modell soll nun das Energiesystem so optimiert werden, dass die Energiegestehungskosten minimiert werden.

Dieses Modell sollte erweitert und verfeinert werden. Weitere Energiequellen und die fehlenden Konsumenten sollten integriert und die Datenbasis verbessert werden.

Vorgehen: Die Schweizer Energielandschaft wird mit einem Modell des IET abgebildet. Verbrauchs- und Erzeugerdaten aus dem Jahr 2019 wurden als Stundenwerte in das Modell integriert. Es wird vom aktuellen Bedarf ausgegangen. Zukünftige Entwicklungen werden ebenfalls berücksichtigt. Es soll der aktuelle Bedarf durch erneuerbare Energieträger gedeckt werden. Dabei wird ausschliesslich auf heute verfügbare und akzeptierte Technologien zurückgegriffen. Es werden verschiedene Szenarien durchgespielt. Wie entwickeln sich die Energiegestehungskosten, wenn die Windenergie ausgebaut wird? Was passiert, wenn die Effizienz der Wärmepumpen erhöht wird?

Ergebnis: Das Modell zeigt, dass ein Mix aus verschiedenen Massnahmen die Kosten reduzieren kann. Das äussert sich dadurch, dass es nicht nur die günstigste Energie wählt, sondern einen Mix der verschiedenen Erzeuger einsetzt. Die Speicher werden mit diesem Modell ebenfalls bewertet - sie werden nach einer selbst definierten Hierarchie zu- und weggeschaltet.

Wird der Strombedarf gezielt gesenkt, so können die Kosten je Kilowattstunde signifikant reduziert werden. Besonders die Steigerung der Effizienz der Wärmepumpen wirkt sich positiv auf die Systemkosten der Elektrizitätsbereitstellung aus. Das liegt zum einen daran, dass Wärmepumpen im Winter besonders viel Strom konsumieren. Wenn die Wärmepumpen weniger Strom konsumieren, müssen weniger Solar- und Windkraftwerke zugebaut werden. Zudem hilft eine Erhöhung der Wärmepumpeneffizienz, die jahreszeitlichen Schwankungen im Stromverbrauch zu reduzieren, was wiederum einen positiven Effekt auf den Strompreis hat.

Referent
Boris Meier

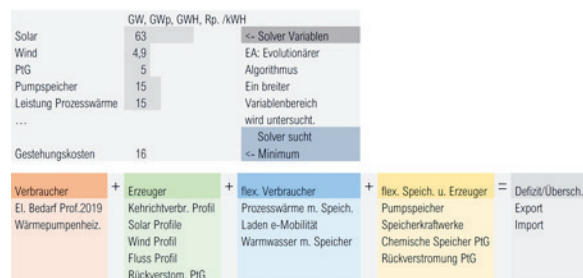
Korreferent
Dr. Martin Rüdösli,
Empa, Dübendorf, ZH

Themengebiet
Umweltökonomie

Projektpartner
IET Institut für
Energietechnik OST,
Rapperswil-Jona, SG

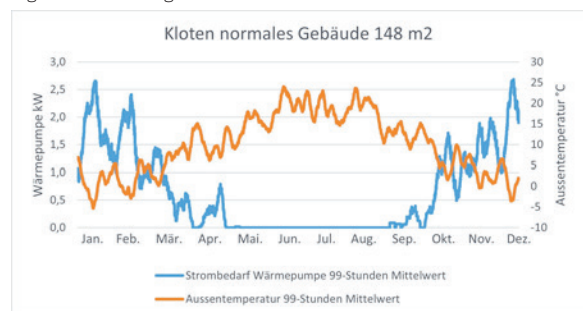
Schema des Simulationsmodells

Eigene Darstellung



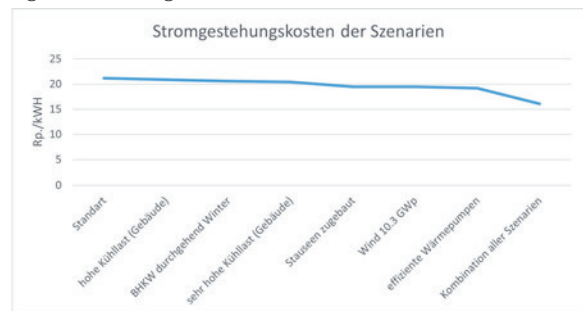
Zusammenspiel Aussentemperatur und Strombedarf Wärmepumpe

Eigene Darstellung



Auswirkung verschiedener Szenarien auf die Stromgestehungskosten

Eigene Darstellung



Phosphat-Elimination aus kommunalem Abwasser mittels Elektrolyse

Optimierung der elektrochemischen Magnesium-Dosierung

Diplomand



Jan Kuratli

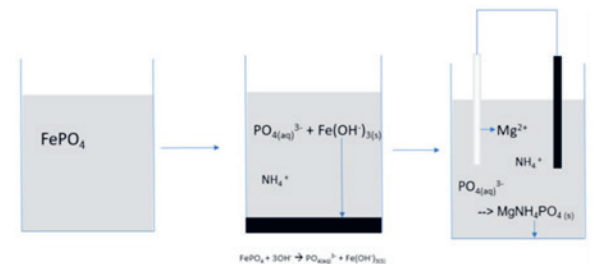
Ausgangslage: Phosphor ist ein essenzieller Nährstoff für Pflanzen, ohne den eine moderne Landwirtschaft nicht denkbar ist. Die Schweiz strebt einen geschlossenen Phosphorkreislauf an, um die Abhängigkeit vom Ausland zu minimieren und die schwindenden Primärressourcen zu schonen. Jährlich gelangt knapp die Hälfte der importierten Phosphormenge ins Siedlungsabwasser. Phosphor ist problematisch für Gewässer und wird in Kläranlagen mit Eisensalzen gefällt sowie mit dem Klärschlamm entsorgt. Dies ist zwar effizient, jedoch kann Phosphor an Eisen gebunden nicht wiederverwendet werden. Das UMTEC hat ein Verfahren entwickelt, bei dem das im Klärschlamm gebundene Eisenphosphat aufgelöst und anschliessend durch elektrochemische Magnesiumbeigabe als Struvit ausgefällt wird. Struvit ist ein schwerlösliches, gut pflanzenverfügbares Salz. Es kann Primärphosphat aus dem Bergbau als Ausgangsprodukt für die Düngerproduktion substituieren oder direkt als Dünger verwendet werden. Vorstudien zeigten, dass die elektrochemische Fällung von Struvit mit Hilfe von Magnesium-Opferanoden möglich ist, Magnesium jedoch überwiegend in Form von Brucit (Magnesiumhydroxid) ausfällt. Als problematisch gelten die Passivierung der Opferanode und der daraus folgende Einbruch der Rückgewinnung.

Vorgehen: Durch mehrere Versuchsreihen wurden die Einflüsse von Zellspannung, Zellaufbau, sowie Zusammensetzung des Elektrolyten im Labor untersucht. Die Versuche wurden mit künstlichem Abwasser durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten. Die entstandenen Feststoffe wurden rückgelöst und photometrisch auf ihre Zusammensetzung untersucht. Mit Hilfe der Röntgenbeugungsanalyse (XRD) konnten die Feststoffe auf ihre Kristallstruktur untersucht und bekannten Stoffen zugeordnet werden. Eine Phosphor Massenbilanz erlaubte die Beurteilung der Rückgewinnung.

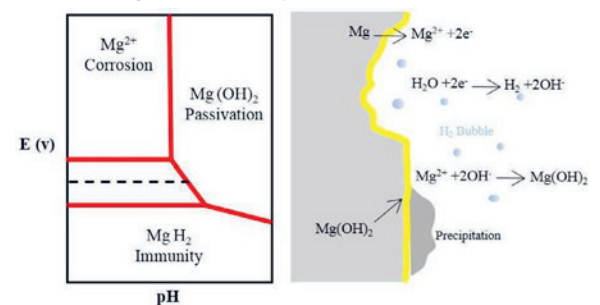
Ergebnis: Die Laborversuche bestätigten, dass die elektrochemische Beigabe von Magnesium funktioniert. Als Fällungsprodukte entstanden Struvit und Brucit. Diese bildeten sich bevorzugt nahe der Anode und lagerten sich auf deren Oberfläche ab. Es bildeten sich Schichten, wodurch der elektrische Widerstand der Zelle stark anstieg und der Strom einbrach. Die Anionen Chlorid und Sulfat beeinflussten die Dissoziation des Magnesiums und die Art des Fällungsproduktes massgeblich. Chlorid griff die Anodenoberfläche an und verursachte Lochfrass. Der Strom brach dadurch weniger stark ein. Die Fällungsprodukte enthielten tendenziell zu viel Magnesium in Form von Brucit. Sulfat begünstigte die Bildung von Struvit.

Die höchsten Phosphor-Eliminationsraten wurden bei einem pH-Wert von 10,7 festgestellt. Anhand der Farbe und Struktur der Anodendeckschicht liess sich abschätzen, welche Produkte entstehen. Nach fünf Stunden Betrieb sank die Phosphorkonzentration in der Lösung um bis zu 50%. Die Fällung wurde analysiert und als Struvit identifiziert. Als Hauptproblem wurde der Schichtaufbau an der Opferanode durch Fällungsprodukte erkannt. Die Reaktion hemmt sich dadurch selbst. Durch andere Elektrodengeometrien, starke Strömungen oder abrasive Medien könnte die Schichtbildung bekämpft werden. Hierfür sind weitere Untersuchungen nötig.

Prozess zur Gewinnung von Struvit aus Klärschlamm: pH-Wert anheben, Eisen ausfällen, mit Mg-Opferanoden Struvit ausfällen
T. Nydegger, 2022



Korrosionsverhalten von Magnesium abhängig von Spannung und pH (links), Magnesium-Korrosion in Wasser (rechts)
Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 9, Issue 1, 15.01.2021



Schichtbildung auf den Anoden (rechte Elektroden), links Brucit, rechts Struvit; Kathoden (linke Elektroden) unverändert
Eigene Darstellung



Referent

Prof. Dr. Jean-Marc Stoll

Korreferent

Dr. Adrian Schneider,
Hitachi Zosen Inova
AG, Zürich, ZH

Themengebiet
Umwelttechnik
allgemein

Phosphat-Elimination aus kommunalem Abwasser mittels Elektrolyse

Aufschluss von biologisch und chemisch gebundenem Phosphor in Klärschlamm durch Laugung

Diplomand



Fabio Mazzoleni

Ausgangslage: Phosphor ist neben Stickstoff und Kalium einer der wichtigsten Bestandteile von Körperzellen sowie Knochen. Er gilt als lebenswichtiges Element. Ebenfalls ist Phosphor essenziell für das Wachstum von Pflanzen. Bei in der Landwirtschaft eingesetzten Düngemitteln ist Phosphor deshalb ein fester Hauptbestandteil.

Die globalen Reserven an Phosphor liegen hauptsächlich in einigen wenigen Ländern, welche geopolitisch instabile Situationen vorweisen.

In der Schweiz kann der Phosphorbedarf nur mittels Importen gedeckt werden. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft und der Reduzierung der Auslandsabhängigkeit wurde gemäss der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) beschlossen, ab 2026 eine Rückgewinnungspflicht für Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammasche sowie Tier- und Knochenmehl einzuführen. Das übergeordnete Ziel besteht darin, im Minimum die gleiche Menge an Phosphor zurückzugewinnen, wie mittels Mineraldünger (4200 t) und chemischer Produkte (1200 t) importiert wird. Dies wird weiter konkretisiert, indem sich die Rückgewinnungsquote in Abwasserreinigungsanlagen auf 50% der Phosphorfracht beläuft.

Um dieses Ziel zu erreichen, hat das UMTEC ein Verfahren entwickelt, um Phosphor aus Klärschlamm mittels chemischer Laugung rückzulösen und anschliessend als Struvit auszufällen.

Das Verfahren bezieht sich dabei auf Klärschlamm aus Abwasserreinigungsanlagen, welche eine chemische Phosphorelimination mittels Eisensalzen anwenden. Dabei wird Phosphor in Form von Eisenphosphat (FePO_4) im Klärschlamm ausgetragen und bildet damit den Ausgangspunkt des vom UMTEC entwickelten Verfahrens. Das entwickelte Verfahren wurde jedoch noch nicht an realem Klärschlamm getestet.

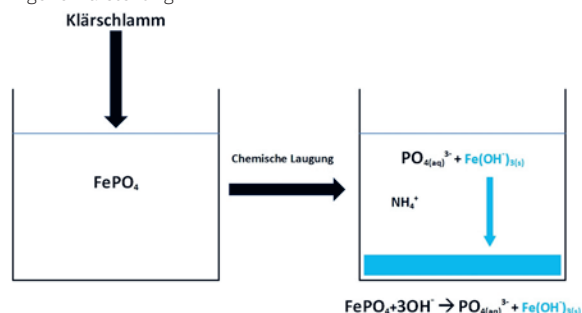
Ziel der Arbeit: Ziel dieser Arbeit war, die Anwendbarkeit und die Effizienz von chemischer Laugung bezüglich der Rücklösung von Phosphor bei realem Klärschlamm zu testen. Zusätzlich sollten unterschiedliche Ideen bezüglich der Verbesserung der Rücklösung eingebracht und getestet werden. Abschliessend sollte eine Abschätzung getroffen werden, inwieweit das Verfahren aus ökonomischer Sicht praktikabel für den Aufschluss von Phosphor aus Klärschlamm ist.

Vorgehen: Mittels Versuchen an realem Klärschlamm einer Schweizer Kläranlage wurde eruiert, inwieweit chemische Laugung bei realem Klärschlamm

anwendbar ist. Dazu wurde vorgängig der im Klärschlamm vorhandene Anteil an Phosphor einerseits mittels Königswasseraufschluss und andererseits mittels Vollaufschluss anhand Flusssäure bestimmt. Um die Rücklöseeffizienz zu erhöhen, wurden unterschiedliche Verfahrensweisen von Klärschlamm-desintegration in Folgeversuchen betrachtet. Dabei wurde unter anderem der Fokus auf die thermische, chemische (Oxidationsmittel, explizit Wasserstoffperoxid) sowie physikalische (Ultraschall) Desintegration gelegt. Anhand der Versuchsergebnisse wurde in Bezug auf das gesetzte Rückgewinnungsziel von 50% eine ökonomische Machbarkeitsanalyse durchgeführt.

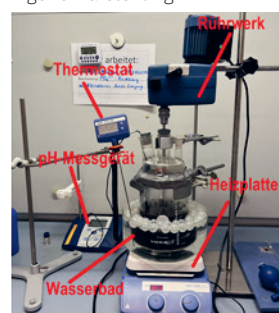
Verfahrensprinzip der Rücklösung mittels chemischer Laugung von Phosphor aus Klärschlamm

Eigene Darstellung



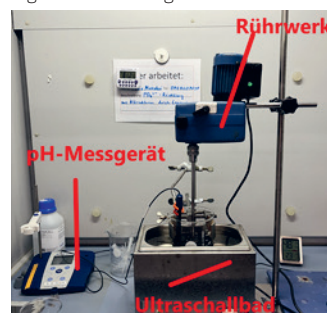
Thermische Desintegration

Eigene Darstellung



Physikalische Desintegration mittels Ultraschall

Eigene Darstellung



Referent

Prof. Dr. Jean-Marc Stoll

Korreferent

Dr. Adrian Schneider, Hitachi Zosen Inova AG, Zürich, ZH

Themengebiet Umwelttechnik allgemein

Effiziente Trinkwasseraufbereitung

Brüdenverdichtung zur dezentralen Trinkwasseraufbereitung im Kontext bestehender Desinfektionsmethoden

Diplomand



Elias Carl

Ausgangslage: Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden unterschiedliche Methoden zur dezentralen Trinkwasseraufbereitung einander gegenübergestellt und im Hinblick auf das Anwendungsziel bewertet. Ein besonderer Fokus gilt der Brüdenverdichtung (englisch: Vapour Recompression).

Das der Arbeit übergeordnete Ziel ist ein positiver Machbarkeitsnachweis für eine dezentrale Trinkwasseraufbereitungsanlage nach dem Prinzip der Brüdenverdichtung. Das Gewicht der Anlage soll 25kg nicht überschreiten, einen wartungsfreien Betrieb gewährleisten und eine Meerwasseraufbereitung ermöglichen.

Die Destillation zur Trinkwasseraufbereitung ist aufgrund des grossen Energieeinsatzes (hohe Verdampfungsenthalpie von Wasser) für eine dezentrale Anwendung unter den gegebenen Anforderungen ungeeignet. Die Brüdenverdichtung ermöglicht durch die Zwischenschaltung eines Verdichters eine Rückführung der Kondensationsenthalpie in den Verdampfer (siehe Abb. 2). Für den Bau einer Pilotanlage wird ein Verdichter benötigt, welcher den Kenndaten der Aufgabenstellung entspricht. Dem Autor ist keine dezentrale Trinkwasseraufbereitung nach dem Prinzip der Brüdenverdichtung bekannt.

Vorgehen/Technologien: Dezentrale Systeme zur Trinkwasseraufbereitung sind aufgrund der Rahmenbedingungen (Kosten, Energieeinsatz, Gewicht etc.) ein- bis zweistufig aufgebaut und verfolgen in erster Linie die Desinfektion bzw. Hygienisierung des Trinkwassers. Diese Aufbereitungsstufe gewährleistet die Hygiene des Trinkwassers bzw. verhindert die Übertragung von Krankheitserregern über das Trinkwasser.

In Bezug auf die Aufgabenstellung kommen für die Meerwasseraufbereitung entweder Umkehrosmose oder Brüdenverdichtung in Frage. Erstere hat den Vorteil, dass das Retentat in flüssiger Form vorliegt und somit durch Pumpen abgeführt werden kann. Der für die Umkehrosmose notwendige Druck ist unter Berücksichtigung der aufzuwendenden Energie verfahrenstechnisch aufwändig. Die Brüdenverdichtung ermöglicht gemäss Abb. 1 einen wirtschaftlichen Wärmeeintrag in den Verdampfer (Rückführung der Kondensationsenthalpie). Als Nachteil werden Ablagerungserscheinungen (Verkalkung und Feststoffausfällungen) und eine Siedepunkterhöhung durch eine ansteigende Konzentration gelöster Stoffe im Verdampfergefäss gewertet. Bevor das bei der Brüdenverdichtung entstehende Destillat als Trinkwasser genutzt werden kann, muss dieses remineralisiert werden. In destilliertem Wasser löst sich CO_2 bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes, was eine Senkung des pH-Wertes zur Folge hat. Dies konnte experimentell aufgezeigt werden (siehe Ver-

suchaufbau in Abb. 3). Als Remineralisierung wird deshalb eine Filtration des Kondensats über gekörnertes Filtermaterial (z. B. Calciumcarbonat) vorgeschlagen. Aufgrund der möglichen Biofilmbildung auf der Filteroberfläche ist der Remineralisierung eine UV-Desinfektion nachzuschalten (siehe Abb. 2).

Fazit: Ein passender Verdichter konnte nicht gefunden werden. Im Hinblick auf eine Pilotanlage zur Trinkwasseraufbereitung mittels Brüdenverdichtung wird empfohlen, die Herausforderungen bezüglich der Verkalkung des Verdampfergefässes und die Remineralisierung unabhängig von einem passenden Verdichter zu untersuchen.

Abbildung 1: Ideale Verdichterleistung als Funktion des Druckes p_1 (siehe Abb. 2) für verschiedene Temperaturerhöhungen
Eigene Darstellung

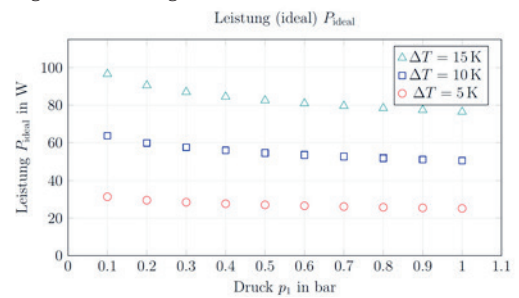


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer möglichen Brüdenverdichtung zur Trinkwasseraufbereitung
Eigene Darstellung

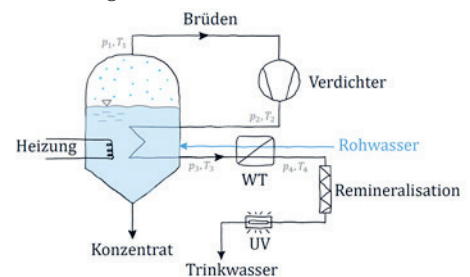
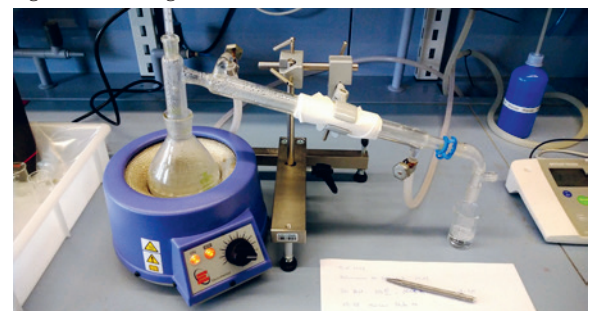


Abbildung 3: Destillationsversuch zur Untersuchung des pH-Wertes bzw. der CO_2 -Aufnahme im Destillat
Eigene Darstellung



Referent

Prof. Stefan Bertsch

Korreferent

Max Bartholdi,
Viessmann
(Schweiz) AG / GB
Grosswärmepumpen,
Worb, BE

Themengebiet

Wasseraufbereitung,
Thermo- und
Fluidynamik,
Umwelttechnik
allgemein

Unsere Institute am Campus Rapperswil-Jona

IBU | Institut für
Bau und Umwelt
IBU Institut für Bau und Umwelt
ibu@ost.ch, www.ost.ch/ibu

INS | Institut für
Netzwerke und Sicherheit
INS Institut für Netzwerke und Sicherheit
laurent.metzger@ost.ch, www.ost.ch/ins

ICOM | INSTITUT FÜR
KOMMUNIKATIONSSYSTEME
ICOM Institut für Kommunikationssysteme
icom@ost.ch, www.ost.ch/icom

IPEK | Institut für Produktdesign,
Entwicklung und Konstruktion
IPEK Institut für Produktdesign,
Entwicklung und Konstruktion
elmar.nestle@ost.ch, www.ost.ch/ipek

IET | Institut für
Energietechnik
IET Institut für Energietechnik
iet@ost.ch, www.ost.ch/iet

IRAP | Institut für
Raumentwicklung
IRAP Institut für Raumentwicklung
gunnar.heipp@ost.ch, www.irap.ch

IFS | Institut für
Software
IFS Institut für Software
stefan.keller@ost.ch, www.ost.ch/ifs

iwk | INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK
UND KUNSTSTOFFVERARBEITUNG
IWK Institut für Werkstofftechnik
und Kunststoffverarbeitung
frank.ehrig@ost.ch, www.ost.ch/iwk

ikik | Institut für Kommunikation
und interkulturelle Kompetenz
IKIK Institut für Kommunikation und
Interkulturelle Kompetenz
stefan.kammhuber@ost.ch, www.ikik.ch

SPF | INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK
SPF Institut für Solartechnik
andreas.haeberle@ost.ch, www.ost.ch/spf

ilf | INSTITUT FÜR
LANDSCHAFT UND FREIRAUM
ILF Institut für Landschaft und Freiraum
ilf@ost.ch, www.ost.ch/ilf

UMTEC | INSTITUT FÜR UMWELT- UND
VERFAHRENSTECHNIK
UMTEC Institut für Umwelt- und
Verfahrenstechnik
umtec@ost.ch, www.ost.ch/umtec

ILT | Institute for Lab Automation
and Mechatronics
ILT Institut für Laborautomation
und Mechatronik
agathe.koller@ost.ch, www.ost.ch/ilt

werz | INSTITUT FÜR WISSEN
ENERGIE UND ROHSTOFFE ZUG
WERZ Institut für Wissen,
Energie und Rohstoffe Zug
werz@ost.ch, www.ost.ch/werz

IMES | Institut für Mikroelektronik
und Embedded Systems
IMES Institut für Mikroelektronik und
Embedded Systems
imes@ost.ch, www.ost.ch/imes

OST – Ostschweizer Fachhochschule
Studiengang Erneuerbare Energien
und Umwelttechnik
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil
Switzerland

T +41 58 257 43 70
ost.ch/eeu



Rapperswil-Jona

