

Projekt 2019-08

## **Bergwelt Kandel** Energiespeicherkonzept auf Wasserstoffbasis

Abschlussbericht



Ansprechpartner:  
Herr Michael Gschwander (Projektleiter)

Erstellungsdatum:  
29. Januar 2020

# Inhalt

Abkürzungsverzeichnis.....	3
1. Hintergrund und Ziele.....	4
2. Wasserstoff als Energiespeicher: Bisherige Projekte.....	5
2.1 Augsburg.....	5
2.2 Energieautarkes Mehrfamilienhaus Brütten / CH.....	6
2.3 Neue Weststadt Esslingen.....	8
3. Energiekonzept Bergwelt Kandel.....	10
3.1 Energiekonzept.....	10
3.2 Grobauslegung Wasserstoffsystem.....	11
4. Komponenten: Hersteller und Produkte.....	13
4.1 All-in-One Geräte: Home Power Solutions.....	13
4.2 Elektrolyse-Systeme.....	15
4.2.1 Proton Onsite.....	15
4.2.2 H-TEC Systems // Ostermeier GmbH.....	16
4.3 Brennstoffzellen.....	17
4.3.1 Inhouse Engineering.....	17
4.3.2 Proton Motor.....	18
4.4 Wasserstoffspeicher.....	19
4.4.1 Reuther STC.....	20
4.4.2 Wystrach.....	21
4.4.3 Verdichtung.....	21
5. Diskussion / Bewertung der Speichersysteme.....	22
6. Literatur.....	24
7. Projektteam / Ansprechpartner.....	25
8. Anlage: Projekterkenntnisse.....	26

# Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AEL	Alkalische Elektrolyse
CH	Schweiz
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
LCOH <sub>2</sub>	Wasserstoffgestehungskosten
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PEM	PEM-Elektrolyse

# 1. Hintergrund und Ziele

Der Ausflugs- und Aussichtsberg Kandel wird mit einem neuen Gastronomie- und Freizeitkonzept belebt. Im Vorhaben „Bergwelt Kandel“ soll auf dem Fundament des ehemaligen Gebäudes ein Neubau entstehen, der diverse Bausteine in verschiedenen Ausbaustufen integriert. Dies umfasst folgende Einrichtungen:

- Eine SB-Berggaststätte mit Biergarten
- Übernachtungsmöglichkeiten in Doppel- und Mehrbettzimmern
- Ferienwohnungen
- Bergchalet-Dorf
- Veranstaltungs- und Eventgebäude
- Betreiberwohnung
- Wohnmobilstellplätze

Der Neubau soll mit einer Energieversorgung auf Basis regional erzeugter erneuerbarer Energien ausgestattet werden. Angedacht sind die Installation einer Photovoltaikanlage auf den Dächern der Gebäude sowie die Installation einer Kleinwindenergieanlage. Die Wärmeerzeugung soll zudem auf regional erzeugten Holzpellets basieren. Ein möglichst hoher Autarkiegrad ist für den Betrieb der Anlage gewünscht, wobei trotzdem möglichst geringe Investitions- und Betriebskosten angestrebt werden sollen.

In der vorliegenden Konzeptstudie soll der Einsatz von Wasserstoff als Energiespeicher näher betrachtet werden. Im Rahmen der Studie werden Projekte, in denen ebenfalls Wasserstoff als Energiespeicher verwendet wird, vorgestellt und analysiert. Des Weiteren werden Hersteller der notwendigen Komponenten recherchiert und erste Konzepte entwickelt.



Abbildung 1.1: Bergwelt Kandel (Aussenansicht) [1]

## 2. Wasserstoff als Energiespeicher: Bisherige Projekte

Im Zuge der Energiewende spielt die Speicherung von erneuerbaren Energien eine immer wichtiger werdende Rolle. Im Gebäudeenergiebereich konzentriert sich die Energiespeicherung bisweilen auf den Einsatz von Akkumulatoren (Batterien, Heimspeicher), die in der Regel den tagsüber überschüssigen Strom einer Photovoltaikanlage speichern und bei Bedarf wieder freigeben. Dadurch werden die Strombezugskosten der Betreiber reduziert und der Autarkiegrad deutlich erhöht. Ein Anschluss an das Elektrizitätsnetz ist dennoch zumindest für die sonnenarmen Wintermonate erforderlich. Heimspeicher auf Basis von Akkumulatoren sind für eine saisonale Speicherung bisher nicht geeignet. Die im Großmaßstab diskutierte Speicherung von erneuerbaren Energien in Form von Wasserstoff und synthetischem Methan kann auch im kleineren Maßstab eine Option sein. Bisher gibt es jedoch nur vereinzelt Projekte, in denen dies im Gebäudesektor realisiert wurde bzw. wird. Im Folgenden werden drei Projekte vorgestellt, in denen eine Energiespeicherung auf Basis von Wasserstoff bzw. synthetischem Erdgas erfolgt.

### 2.1 Augsburg

In Augsburg haben die „Stadtwerke Augsburg“ zusammen mit der „Wohnbaugruppe Augsburg“ eine Power-to-Gas-Anlage in einem Wohngebäude realisiert. Das Wohngebäude, Baujahr 1974, hat 70 Wohneinheiten mit einer gesamten Wohnfläche von 5.400 m<sup>2</sup>. Im Rahmen des Projekts wurde das Wohnhaus zunächst gemäß KfW100-Standard saniert und im März 2018 eine Photovoltaik-Anlage mit einer installierten Leistung von 150 kW auf dem Dach des Gebäudes installiert [2][3]. Der produzierte PV-Strom kann von den Mietern direkt verbraucht werden. Überschüssiger Strom wird der Power-to-Gas-Anlage zugeführt und in Form von synthetischem Methan gespeichert. Das Schema der Power-to-Gas-Anlage ist in Abbildung 2.1 dargestellt. In einem Elektrolyseur wird mit überschüssigem Strom aus der PV-Anlage Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Welche Elektrolysetechnologie genutzt wird, ist nicht bekannt. Auftretende Verluste bei der Reaktion in Form von Abwärme werden dem Heizkreislauf zugeführt. In einer Methanisierungsanlage reagiert der produzierte Wasserstoff anschließend mit Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zu synthetischem Methan. Nach einer Verdichtung auf einen höheren Druck wird das Methangas in einem Druckspeicher zwischengespeichert.

Wird Wärmeenergie oder elektrische Leistung benötigt, wird mit dem synthetischen Methan ein konventionelles BHKW oder eine Gastherme betrieben. Das entstehende Kohlenstoffdioxid wird aus dem Abgasstrom abgetrennt und gespeichert und steht zu einem späteren Zeitpunkt wieder für die Methanisierung bereit. Vorteilhaft erweist sich für das Konzept die Nutzung bewährter Technik bei der Rückverstromung bzw. Wärmegewinnung. Außerdem kann im Falle eines leeren Methanspeichers über einen konventionellen Hausgasanschluss die Wärme- und Stromversorgung weiterhin sichergestellt werden. Nachteilhaft erweist sich der geringere elektrische Gesamtwirkungsgrad der Anlage, bedingt durch Verluste in der Methanisierung. Zudem erhöht sich der anlagentechnische Aufwand durch die Methanisierung und dem Kohlenstoffdioxidkreislauf deutlich. Ergänzt wird die Power-to-Gas-Anlage in dem Wohngebäude durch eine Batterie sowie einer Wärmepumpe.



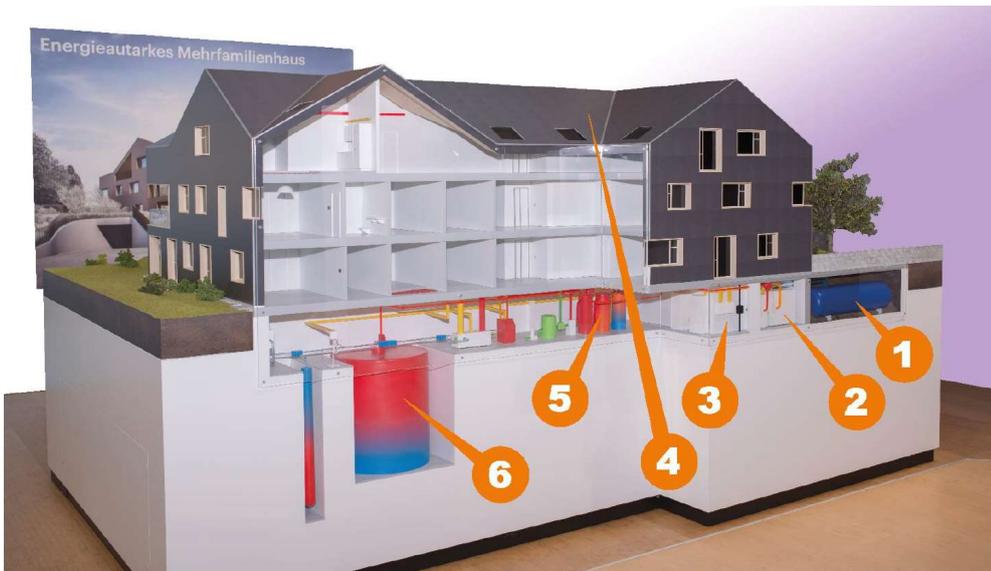


Abbildung 2.2: Konzept Energieautarkes Wohnhaus in Brütten / Schweiz [7]

Abbildung 2.2 zeigt ein schematisches Konzept des Wohnhauses mit den Bauteilen:

1. Wasserstoffspeicher
2. Elektrolyseur
3. Brennstoffzelle
4. PV-Module auf dem Dach und an der Fassade
5. Warmwasserspeicher und Heizsystem (Wärmepumpe)
6. Erdspeicher für Wärmeenergie

Für die Wasserstoffspeicherung werden zwei Druckspeicher mit einem geometrischen Volumen von jeweils  $100 \text{ m}^3$  eingesetzt (siehe Abbildung 2.3). Der Wasserstoff wird ohne zusätzliche Verdichtung bei einem Druck von 30 bar gespeichert. Dies entspricht dem maximalen Betriebsdruck der Elektrolyse [8]. In den Speichern kann somit eine Wasserstoffmenge von knapp 490 kg mit einem Energieinhalt von 16.300 kWh (bezogen auf den Heizwert) gespeichert werden.



Abbildung 2.3: Einbau der zwei Wasserstoffspeicher mit einem Volumen von jeweils  $100 \text{ m}^3$  [6]

Wenn über die PV-Anlage nicht ausreichend Leistung zur Versorgung des Gebäudes zur Verfügung steht und auch die Batterie leer ist, wird der gespeichert Wasserstoff mit einer Brennstoffzelle rückverstromt. Hierfür kommt eine PEM-Brennstoffzelle des Herstellers Proton Motors zum Einsatz. Das PM Module S8 liefert eine elektrische Leistung von maximal 6,2 kW. Die entstehenden Wärmeverluste bei der Rückverstromung können im Haus genutzt werden. [7]

## 2.3 Neue Weststadt Esslingen

Im Rahmen der Förderinitiative „Solares Bauen/ Energieeffiziente Stadt“ wird in Esslingen auf einer Fläche von 120.000 m<sup>2</sup> ein klimaneutrales Wohnquartier mit rund 600 Wohnungen, Büro- und Gewerbefläche sowie einem neuen Gebäude der Hochschule Esslingen errichtet [9]. Auf den Dächern werden Photovoltaik-Anlagen mit einer installierten Leistung von ca. 1.600 kW<sub>peak</sub> errichtet (siehe Abbildung 2.4) [10]. Die Mieter haben die Möglichkeit, den Photovoltaik-Strom selber zu nutzen. Zur Speicherung des PV-Stroms wird zusätzlich eine Batterie mit einer Kapazität von 1.500 kWh installiert.



**Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Wohnblocks mit Photovoltaik-Anlage im klimaneutralen Stadtquartier Esslingen [9]**

Das Energiekonzept (siehe Abbildung 2.5) berücksichtigt zudem eine Elektrolyse und einen Wasserstoffspeicher. Die Elektrolyse soll mit Strom aus den Photovoltaik-Anlagen sowie Netzstrom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Vorliegenden Präsentationen zu dem Projekt kann entnommen werden, dass eine Elektrolyse mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von rund 1 MW geplant ist [10]. Die Abwärme des Elektrolyseurs wird dabei zur Beheizung des Quartiers verwendet und somit die Effizienz der Elektrolyse deutlich gesteigert. Der produzierte Wasserstoff wird anschließend in einem Druckspeicher gespeichert. Wie Abbildung 2.5 entnommen werden kann, wird der Wasserstoff in der Mobilität sowie in einer KWK-Anwendung genutzt. Anhand der vorliegenden Präsentation kann davon ausgegangen werden, dass ein Wasserstoff-Motor-BHKW mit einer thermischen Leistung von 300 kW eingesetzt wird. [10]

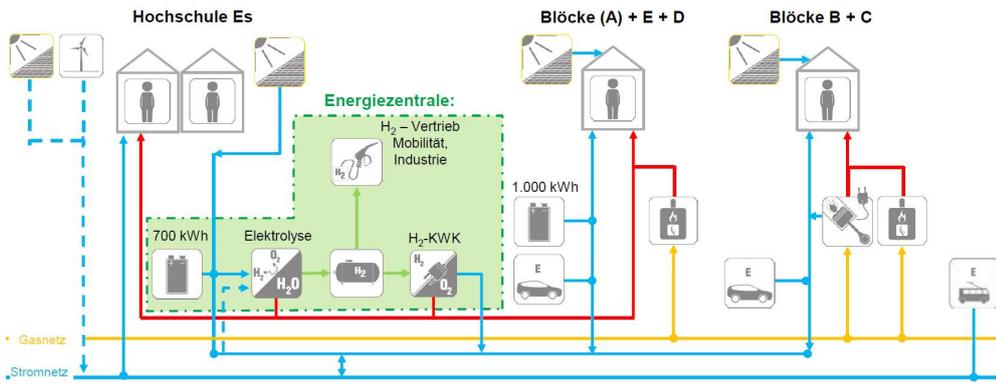


Abbildung 2.5: Energieversorgungskonzept im klimaneutralen Stadtquartier in Esslingen [10]

# 3. Energiekonzept Bergwelt Kandel

## 3.1 Energiekonzept

Das vorgestellte Energiekonzept für die Bergwelt Kandel beinhaltet eine Reihe innovativer Technologien für die Versorgung der Anlage mit Elektrizität, sowie Wärme und Warmwasser. Gleichzeitig wurde bereits kommuniziert, dass der Ausbau in mehreren Stufen erfolgt und auch nicht alle Technologien verbaut werden sollen. Das vorliegende Energiekonzept kann daher als maximaler Ausbau verstanden werden. Das vorläufige Energiekonzept ist in Abbildung 3.1 abgebildet. Das Gebäude wird an das öffentliche Stromnetz angeschlossen werden, gleichzeitig ist eine Photovoltaikanlage auf den Dächern der Gebäude vorgesehen. Aktuellem Planungsstand zufolge kann eine PV-Anlage mit einer installierten Leistung von bis zu 50 kW<sub>peak</sub> auf den Dächern errichtet werden. Des Weiteren ist zu einem späteren Zeitpunkt der Aufbau einer Kleinwindenergieanlage angedacht. Für die Speicherung von überschüssigem Strom aus der PV-Anlage wird neben der Elektrolyse auch eine Redox-Flow-Batterie in Erwägung gezogen. Die Wärmebereitstellung erfolgt maßgeblich durch zwei redundante Pelletkessel mit integrierten Stirling-Motoren, welche gleichzeitig aus der Abgasenergie der Pelletkessel noch Strom generieren können. Für die Wärmeversorgung sind des weiteren Flachkollektoren und eine Wärmepumpe geplant. Zudem ist für die Klimatisierung der Räumlichkeiten und der Kühlung der Lagerräume für Lebensmittel eine kleine Kältemaschine mit natürlichem Kältemittel (Propan R270) angedacht.

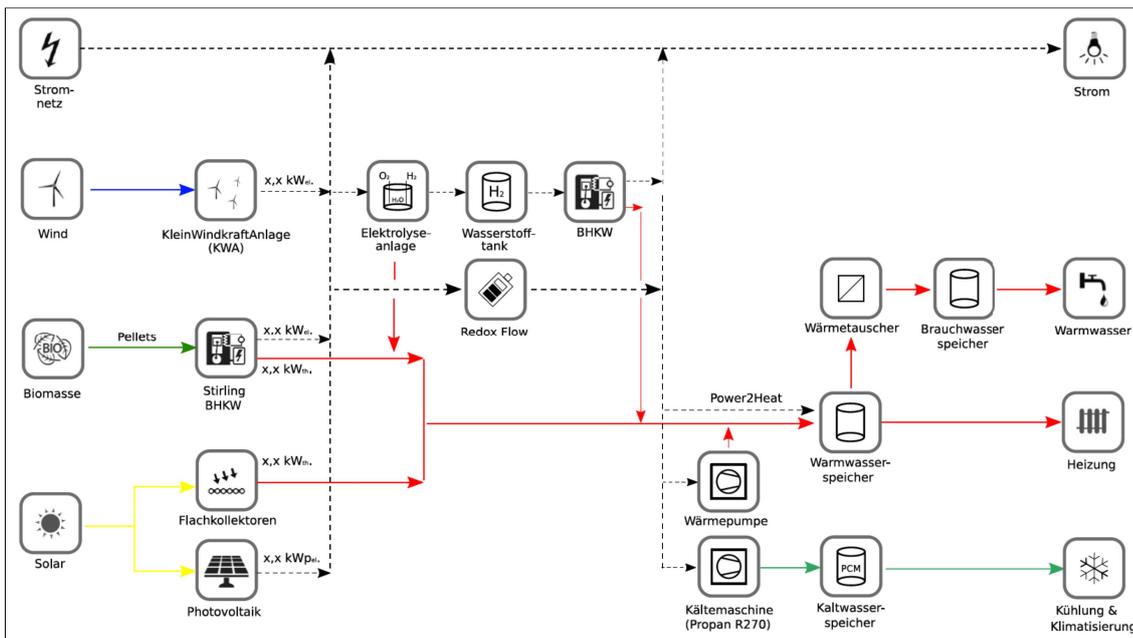


Abbildung 3.1: Vorläufiges Energiekonzept für die Bergwelt-Kandel

Für das Gebäude liegt bisher nur ein überschlägig ermittelter Lastgang der elektrischen Verbraucher vor. Dem aktuellen Planungsstand zufolge wird von einem Strombedarf von 45.000 kWh/a ausgegangen. Der durchschnittliche Strombedarf wird rund 5 kW betragen, wobei dieser nachts mit 2-3 kW und tagsüber mit 8 kW beziffert wird.

Der Wärmebedarf wurde mit 130.000 kWh/a kalkuliert. In den Wintermonaten wird mit einer thermischen Last von 30 kW gerechnet. Angaben zur thermischen Last in den Sommermonaten liegen dem Fraunhofer ISE nicht vor.

## 3.2 Grobauslegung Wasserstoffsystem

Die Auslegung des Wasserstoffsystems kann nur grob anhand der PV-Erzeugung und des Lastganges erfolgen. In Abbildung 3.2 ist eine PV-Leistungszeitreihe einer PV-Anlage in der Nähe von Freiburg abgebildet. Deutlich ist hierbei der Unterschied zwischen den Sommer- und Wintermonaten zu erkennen.

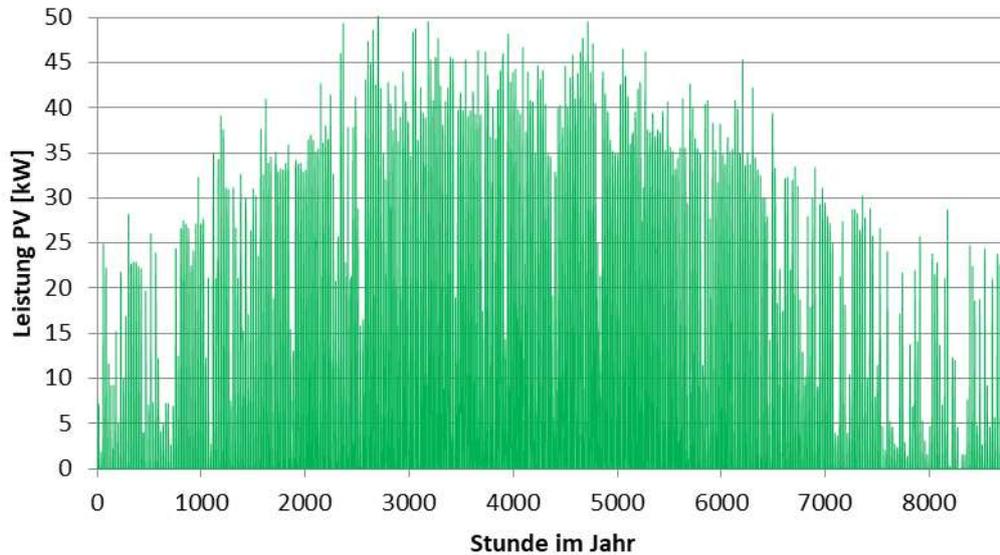


Abbildung 3.2: Leistungsverlauf einer PV-Anlage in der Region Freiburg

Anhand der PV-Leistungszeitreihe und der Verbrauchsangaben aus dem vorherigen Abschnitt kann die jährliche Wasserstoffproduktion bestimmt werden, siehe Abbildung 3.3. Bei der Berechnung wurde keine Batterie und keine minimale Teillast der Systeme berücksichtigt. Des Weiteren wurde nicht berücksichtigt, dass ein voller Speicher eine weitere Wasserstoffproduktion unterbinden kann, somit sind die Ergebnisse als ein optimistisches Szenario zu werten. Es wurde ein Wirkungsgrad der Elektrolyse von 60 % angenommen.

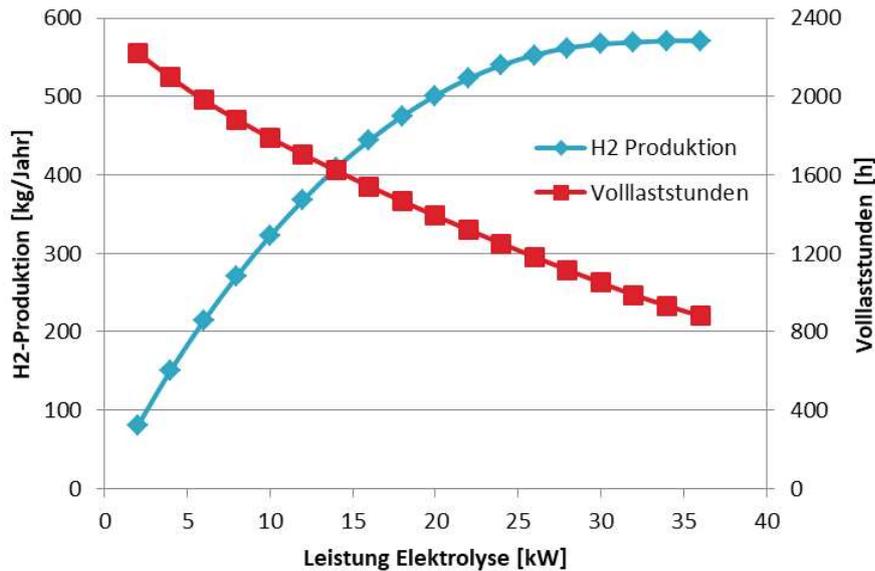


Abbildung 3.3: Überschlägig ermittelte Wasserstoffherzeugung und Volllaststunden der Elektrolyse

Mit steigender Elektrolyse-Leistung erhohert sich die Wasserstoffproduktion. Insbesondere bis zu einer Elektrolyseleistung von 15 kW ist eine konstant steigende Wasserstoffproduktion zu erkennen. Ab einer Elektrolyseleistung von 25 kW stellt sich eine Sättigung ein, eine größere Elektrolyse führt in diesem Fall zu keiner höheren Wasserstoffproduktion.

Die Volllaststunden sinken nahezu konstant mit steigender Leistung der Elektrolyse. Bei der technischen und wirtschaftlichen Auslegung von Elektrolyse-Anlagen wird eine hohe Anzahl an Volllaststunden angestrebt. Bei Anlagen im Gromastab wird darauf geachtet, dass mindestens 4.000 Volllaststunden erreicht werden. Dies ist bei der Kopplung mit einer PV-Anlage jedoch nicht zu erreichen.

In Hinblick auf die Auswertung und die aufgezählten Projekte im vorherigen Kapitel sowie die Erfahrungen des Fraunhofer ISE aus anderen Projekten wird eine Elektrolyse mit einer Leistungsaufnahme von maximal 15kW empfohlen. Für diesen Fall werden mindestens 1.500 Volllaststunden erreicht und maximal 450 kg Wasserstoff im Jahr produziert.

## 4. Komponenten: Hersteller und Produkte

### 4.1 All-in-One Geräte: Home Power Solutions

Als einziger Hersteller bietet das Berliner Unternehmen Home Power Solutions ein All-in-One Gerät an (siehe Abbildung 4.1). Dieses richtet sich in erster Linie an Ein- und Mehrfamilienhäuser mit einer eigenen PV-Anlage. Mit dem Gerät, kann die elektrische Energieversorgung eines Einfamilienhauses komplett gedeckt werden. Gleichzeitig beinhaltet das Produkt ein Lüftungsgerät, welches eine Wohnraumwärmerückgewinnung beinhaltet und die Nutzung der Abwärme des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle erlaubt.

Für die Versorgung von Lastspitzen sind kostengünstige Bleibatterien in das Gerät integriert. Wenn diese mit PV-Strom vollständig geladen sind, produziert ein Elektrolyseur Wasserstoff mit einer maximalen Eingangsleistung von 2,5 kW. Dieser wird außerhalb des Geräts in einem oder mehreren Druckgasflaschenbündeln bei einem Druck von bis zu 300 bar gespeichert. Über ein Brennstoffzellenmodul kann der Wasserstoff bei Bedarf rückverstromt werden. Das Brennstoffzellenmodul hat eine Leistung von 1,5 kW.



Abbildung 4.1: Aufbau des Energiespeichers Picea von Home Power Solutions



Abbildung 4.2: Wasserstoffspeichereinheit des Picea Speichersystems [11]

In Tabelle 4.1 sind die wesentlichen Spezifikationen zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Wesentliche Spezifikationen des Picea Speichersystems von Home Power Solutions

Parameter	Wert
Elektrische Spitzenleistung (5s)	20 kW
Elektrische Hochleistung (3h)	8 kW
Elektrische Dauerleistung	1,5 kW
Platzbedarf innen	3 m <sup>2</sup>
Platzbedarf außen (H <sub>2</sub> -Speicher)	3-5 m <sup>2</sup>
Leistungsaufnahme Elektrolyse	2,5 kW
Saisonale Speicherkapazität (nutzbar)	600-3.000 kWh <sub>th+el</sub>

Die Investitionskosten für ein Speichersystem von Home Power Solutions variieren je nach Anzahl der Speichermodulen. Ein System mit einem Speichermodul inkludiert kostet rund 54.000 € (netto). Die Speicherkapazität beträgt bei diesem System 600 kWh<sub>th+el</sub>.

## 4.2 Elektrolyse-Systeme

### 4.2.1 Proton Onsite

Proton Onsite ist ein amerikanischer Hersteller von PEM-Elektrolyseuren. Der Leistungsbereich reicht dabei von Kleinst-Elektrolyseuren für Laboranwendungen bis hin zu Elektrolysesystemen mit mehreren Megawatt Anschlussleistung. Die von Proton Onsite vertriebenen Systeme beinhalten immer die Leistungselektronik, die Elektrolyse-Stacks sowie eine Gastrocknung.



Abbildung 4.3: Proton Onsite C20 PEM Elektrolyseur am Fraunhofer ISE mit einer maximalen Wasserstoffproduktionsrate von 20 Nm<sup>3</sup>/h

Tabelle 4.2: Spezifikationen der Proton Onsite S-Serie und H-Serie

	S10	S20	S40	H2	H4	H6
Produktionsrate [Nm <sup>3</sup> /h]	0,27	0,53	1,05	2	4	6
Spez. Leistungsbedarf [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	6,1	6,1	6,1	7,3	7,0	6,8
Ausgangsdruck [bar]	13,8			30		
Abmessung [m]	0,8 x 1 x 1,1 (BxTxH)			1,8 x 0,8 x 1,9 (BxTxH)		

Alternativ zur etwas leistungstärkeren H-Serie kann auch auf die S-Baureihe von Proton zurückgegriffen werden. Um dieselbe Wasserstoffproduktionsrate zu erreichen, werden zwei Proton S40 Elektrolyseure benötigt. Vorteilhaft an der S-Baureihe ist die luftgekühlte Ausführung, ein extra Kühlsystem ist nicht notwendig. Dadurch, dass zwei Systeme verbaut werden müssten, erhöht sich zudem die Verfügbarkeit des Systems. Während ein System gewartet wird, kann das andere System weiter betrieben werden. Nachteilig ist der geringere Betriebsdruck von 13,8 bar im Vergleich zur Proton H-Serie.

Von Proton Onsite wurden für zwei verschiedene Baureihen Richtpreisangebote angefragt.

## 4.2.2 H-TEC Systems // Ostermeier GmbH

H-TEC ist ein in Lübeck ansässiger Hersteller von PEM-Elektrolyse-Systemen und ein Tochterunternehmen der GP Joule Gruppe. H-TEC entwickelt seit 1997 PEM-Elektrolysesysteme. Aktuell bietet H-TEC PEM-Elektrolysestacks für Forschungszwecke und Elektrolyse-Systeme an.

Als interessante Option in dem in diesem Projekt betrachteten Leistungsbereich hat sich das Elektrolysesystem EL30 von H-TEC herausgestellt. Das Abmaß des Systems ist vergleichbar mit der Größe eines Kühlschranks und es wiegt rund 160-180 kg. In Abbildung 4.4 ist ein EL30-Elektrolysesystem dargestellt.



Abbildung 4.4: EL30-Elektrolysesystem von H-TEC

Die groben Spezifikationen des EL30-Elektrolysesystems für verschiedene Leistungen sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Je nach Systemleistung liegt der spezifische Energiebedarf für die Herstellung von Wasserstoff bei rund 5 kWh/Nm<sup>3</sup>.

Tabelle 4.3: Spezifikationen verschiedener Konfigurationen der EL30-Serie von H-TEC

	EL30/72	EL30/108	EL30/144
H <sub>2</sub> -Produktionsrate [Nm <sup>3</sup> /h]	1,8	2,7	3,6
Nennleistung [kW]	9,1	14	18
Ausgangsdruck [bar]	30	30	30
Abmessung [m]	1,2 x 0,56 x 0,8 (H x B x T)		
Trocknung	Optional		

Die EL30-Baureihe wird nicht mehr von H-TEC Systems angeboten. Jedoch verbaut die Firma Ostermeier die Elektrolyse-Stacks von H-TEC Systems in eigenen Systemen. Bei der Firma Ostermeier wurden daher drei verschiedene Systeme im Bereich von 1,0-3,0 Nm<sup>3</sup>/h angefragt.

**Tabelle 4.4: Technische Daten der Elektrolysesysteme der Ostermeier GmbH**

	EO 05.01	EO 10.01	EO 15.01
Leistungsaufnahme Lebensanfang/Lebensende [kW]	6,5 / 10,0	13,0 / 20,0	19,5 / 30
H <sub>2</sub> -Produktionsrate [Nm <sup>3</sup> /h]	1,0	2,0	3,0
Ausgangsdruck [bar]		19,0	
Außenmaße [m]		1,2 x 0,8 x 2,0	

## 4.3 Brennstoffzellen

### 4.3.1 Inhouse Engineering

Inhouse Engineering ist ein Unternehmen aus Berlin, welches Teststände für Brennstoffzellen entwickelt und auch ein Brennstoffzellen-BHKW im für das Projekt relevanten Leistungsbereich anbietet. Die technischen Spezifikationen des Brennstoffzellen-BHKWs von inhouse engineering sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

**Tabelle 4.5: Spezifikationen des Brennstoffzellen- $\mu$ -BHKW inhouse500+**

Parameter	Wert
Brennstoffzellentyp	NT-PEM
Brenngase	Erdgas (Biogas/Flüssiggas im Test)
Nennleistung elektrisch	5 kW
Nennleistung thermisch	7,5 kW
Gesamtwirkungsgrad	ca. 92%
Stromwirkungsgrad	ca. 34%
Temperatur Heizkreis	max. 50 / 70°C
Kaltstartdauer	ca. 1 h
Modulation 30 – 100 %	ca. 15 min
Abmaße (B x H x T)	740 x 1550 x 1159 mm
Gewicht	ca. 380 kg

Wie der Tabelle entnommen werden kann, wird das BHKW mit Erdgas betrieben. Ein Betrieb ausschließlich mit Wasserstoff ist mit dem System nicht möglich, da die Struktur des Brennstoffzellen-Stacks auf das

Produktgasgemisch aus vorgeschaltetem Reformer abgestimmt ist. In dem Reformer wird das Erdgas bei hoher Temperatur an einem Katalysator in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid gespalten und anschließend in den Brennstoffzellen-Stack geleitet.

Jedoch entwickelt inhouse engineering zurzeit auch ein reines Wasserstoff-Brennstoffzellen-BHKW, für welches ein Angebot eingeholt wurde. Des Weiteren befindet sich eine Wasserstoff-Therme in der Entwicklung, für welche ebenfalls ein Angebot eingeholt wurde. Das Wasserstoff-Heizgerät kann nur in Verbindung mit dem BHKW betrieben werden. Ein gesonderter Betrieb ist nicht möglich.

**Tabelle 4.6: Spezifikationen des Wasserstoff-Brennstoffzellen-BHKWs von inhouse engineering**

Parameter	Wert
Typ	Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle
Brennstoff	Wasserstoff (empfohlene Qualität: 5.0)
Elektrische Leistung [kW]	5 (Stack) / 4,2 (System)
Thermische Leistung [kW]	Ca. 3,6
Leistungsmodulation [%]	25-100
Abmaß (B x H x T) [mm]	740 x 1550 x 1159 mm
Installationsort	Frostgeschützt
Vorlauftemperatur Heizkreis [°C]	50 bis 65
Rücklauftemperatur Heizkreis [°C]	30 bis 50

### 4.3.2 Proton Motor

Proton Motor ist ein Hersteller von PEM-Brennstoffzellen-Systemen für stationäre sowie mobile Anwendungen aus der Nähe von München. Für die Rückverstromung von Wasserstoff bietet sich dabei ein baugleiches System, wie in Kapitel 2.2 vorgestellt, an. Die Brennstoffzelle kann nur mit Wasserstoff betrieben werden. Die technischen Spezifikationen sind in Tabelle 4.7 dargestellt.



Abbildung 4.5: Brennstoffzellensystem von Proton Motors

Tabelle 4.7: Spezifikationen des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Systems von Proton Motor

Parameter	Wert
Typ	Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle
Brennstoff	Wasserstoff (empfohlene Qualität: 5.0)
Elektrische Leistung [kW]	4,2 (System)
Abmaß (B x H x T) [mm]	1.000 x 800 x 2.000
Benötigte Kühlwassertemperatur [°C] (Abwärmenutzung ist möglich)	< 45
Installationsort	Indoor

## 4.4 Wasserstoffspeicher

Die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt gasförmig unter Druck. Die Speicherung unter Druck kann mit zwei unterschiedlichen Konzepten erfolgen. Einerseits kann die Speicherung direkt bei Elektrolysedruck erfolgen, andererseits ist eine Verdichtung auf einen höheren Druck möglich. Durch die Verdichtung erhöht sich die Speicherdichte, gleichzeitig verringert sich das Speichervolumen. Für die Verdichtung ist jedoch zusätzliche Antriebsenergie für den Verdichter erforderlich, wodurch der Gesamtwirkungsgrad sinkt und die Investitionskosten steigen. Vorteilhaft ist der deutlich geringe Platzbedarf für die Druckbehälter.

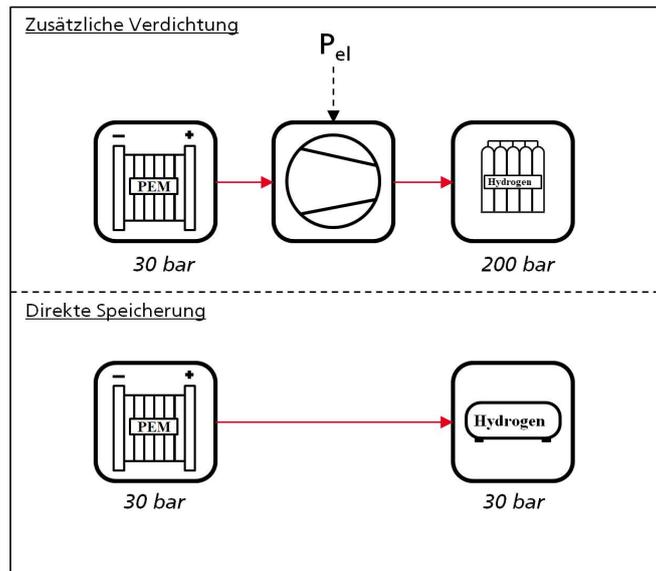


Abbildung 4.6: Aufbau der zwei verschiedenen Speicherkonzepte

### 4.4.1 Reuther STC

Für die direkte Speicherung, ohne zusätzliche Verdichtung, wurde ein Wasserstoff-Druckbehälter bei Reuther STC angefragt. Hierfür wurde wie in dem Projekt des energieautarken Mehrfamilienhauses ein Speicherdruck von 30 bar gewählt. Bei der Angebotseinholung wurde ein Speichervolumen von 60 m<sup>3</sup> angefragt. Dies entspricht bei einem Druck von 30 bar einer Wasserstoffkapazität von rund 150 kg.

Tabelle 4.8: Spezifikationen des Druckbehälters zur Speicherung von Wasserstoff bei 30 bar

Parameter	Wert
Medium	Wasserstoff
Max. zul. Betriebsdruck [bar]	30
Min. zul. Betriebsdruck [bar]	5
Geometr. Volumen [m <sup>3</sup> ]	60
Durchmesser [m]	2,8
Zylindrische Baulänge [m]	9,0
Gewicht [kg]	Ca. 16.000

## 4.4.2 Wystrach

Für die platzsparende Wasserstoffspeicherung mit einer höheren Speicherdichte muss der Wasserstoff auf einem höheren Druck gespeichert werden. Die kleinskalige Speicherung von Wasserstoff bei einem Druck von 200 bzw. 300 bar erfolgt mit Druckgasflaschenbündel. Ein entsprechendes Angebot wurde von Wystrach eingeholt. In Abhängigkeit der Lastzyklen kann auf verschiedene Druckgasflaschen-Typen zurückgegriffen werden. Für eine sehr geringe Anzahl von Zyklen (12) wird hierfür auf „TPED“-Flaschen zurückgegriffen. Zu berücksichtigen ist, dass zum Nachweis der Lastzyklen bzw. des Druckverlaufs eventuell eine entsprechende Messeinrichtung installiert werden muss. Druckgasflaschenbündel mit Druckgasflaschen des Typs „PED“ sind teurer in der Anschaffung, können jedoch auch einer höhere Anzahl von Zyklen ausgesetzt werden. Die Gasflaschen haben jeweils einen maximal zulässigen Druck von 300 bar. Auf einem Flaschenbündel sind 18 Druckgasflaschen je 50 Liter Einzelvolumen installiert.

Tabelle 4.9: Speicherkapazität für 200 bar Druckgasflaschenbündel

	TPED-Flaschen	PED-Flaschen
H <sub>2</sub> -Kapazität Bündel (@200 bar) [kg]		13,4

## 4.4.3 Verdichtung

Die platzsparende Wasserstoff-Speicherung in Flaschenbündeln bei hohem Druck erfordert eine Verdichtung auf das entsprechende Druckniveau, wofür ein Wasserstoffverdichter notwendig ist. In der Regel werden in dem betrachteten Leistungsbereich Membranverdichter oder pneumatisch angetriebene Verdichter eingesetzt. Für die Verdichtung auf 300 bar (maximaler Druck Druckgasflaschenbündel) werden in der Regel zwei oder dreistufige Verdichter eingesetzt. Im Vergleich zu pneumatisch angetriebenen Kolbenverdichtern weisen Membranverdichter eine höhere Effizienz im Betrieb auf. Gleichzeitig sind die Investitionskosten deutlich höher im Vergleich zu pneumatisch angetriebenen Kolbenverdichtern. Im Rahmen dieses Projekts wurden keine Angebote für Verdichter eingeholt, jedoch liegen dem Fraunhofer ISE Angebote aus anderen Projekten vor, die eine erste Indikation erlauben. Für einen Membranverdichter, der 1,3 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff von 25 auf 150 bar verdichtet, fallen Investitionskosten von rund 45.000 € an. Durch die höhere Druckdifferenz kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine zweite Stufe notwendig ist und die Kosten dadurch deutlich steigen (Schätzungsweise auf 80.000 €). Für einen entsprechenden pneumatischen Verdichter werden Investitionskosten von 50.000 € veranschlagt. Hinzu kommt ein Druckluftaggregat, welches die erforderliche Druckluft zum Antrieb der Kolben bereitstellt.

# 5. Diskussion / Bewertung der Speichersysteme

Im Rahmen einer Diskussion am Fraunhofer ISE zusammen mit Herrn Mayrhofer von der EnergieSysteme Mayrhofer GmbH wurden die verschiedenen Produkte und Konzepte für den saisonalen Energiespeicher auf Basis von Wasserstoff diskutiert und bewertet. Folgende Kriterien wurden für eine Bewertung berücksichtigt:

- Platzbedarf
- Komplexitätsgrad (Beispiel: zusätzlicher Verdichter; Ex-Schutz)
- Wirkungsgrad
- Investitionskosten

Für den Vergleich wurden drei Konzepte aufgenommen: Bei dem ersten Konzept handelt es sich um das All-in-One System von Home Power Solutions. Das zweite Konzept setzt sich aus einer 30 bar Elektrolyse und einem Speicher bei Elektrolysedruck zusammen. Entsprechend der Herstellerrecherche kommt hier nur ein Elektrolyseur von Proton Onsite in Frage sowie ein Druckzylinder von Reuther STC. Das dritte Konzept besteht aus einem Elektrolyseur mit einem geringen Betriebsdruck. Hier stehen Elektrolyseure der Ostermeier GmbH mit einem Betriebsdruck von 19 bar oder von Proton Onsite mit einem Betriebsdruck von 13 bar (S-Serie) zur Auswahl. Zusätzlich muss eine Verdichtung mit einem externen Verdichter auf den maximalen Speicherdruck von 200 bar erfolgen. Die Speicherung findet anschließend in Druckgasflaschen statt.

In Tabelle 5.1 sind die drei Konzepte hinsichtlich der definierten Kriterien gegenübergestellt.

**Tabelle 5.1: Bewertung der Konzepte (--: Nachteil; ++: Vorteil)**

	Erhöhung des Autarkiegrades	Platzbedarf	Komplexitätsgrad (Installation etc.)	Wirkungsgrad	Investitionskosten
All-in-One System von Home Power Solutions	0	++	+	-	~ 54.000,- €
30 bar Elektrolyse (Proton Onsite) + 150 kg Speicherung (30 bar) + 4,2 kW Brennstoffzellensystem	++	--	0	+	~ 353.000,- €
19 bar Elektrolyse (Ostermeier GmbH) + Verdichtung + 200 bar Speicherung + 4,2 kW Brennstoffzellensystem	+	+	--	-	~ 360.000,- €
13 bar Elektrolyse (Proton Onsite) + Verdichtung + 200 bar Speicherung + 4,2 kW Brennstoffzellensystem	+	+	--	-	~ 420.000,- €

### **Elektrolyse (30 bar) + 30 bar Speicherung**

Das Konzept mit einer Wasserstoff-Speicherung bei Elektrolysedruck kann bei entsprechender Auslegung (Proton Onsite H<sub>2</sub> Elektrolyseur mit knapp 15 kW Anschlussleistung) den höchsten Zugewinn beim Autarkiegrad ausweisen, da keine zusätzliche Verdichtung mit entsprechendem Energiebedarf notwendig ist. Gleichzeitig ist die Komplexität durch den fehlenden Verdichter überschaubar, auch weil die Elektrolysesysteme von Proton Onsite fertig montiert geliefert werden. Gegen das Konzept spricht jedoch der hohe Platzbedarf für den Druckzylinder. Dieser ist weder auf dem Gelände noch in dem Gebäude verfügbar, sodass diese Möglichkeit nicht in Betracht kommt. Aufgrund der Systemgröße ist zudem mit hohen Investitionskosten zu rechnen.

### **Elektrolyse (13 / 19 bar) + Verdichtung + 200 bar Speicherung**

Der Platzbedarf für den Wasserstoffspeicher kann stark reduziert werden, wenn der Wasserstoff zusätzlich mit einem Verdichter komprimiert wird. Für die Speicherung von ca. 150 kg Wasserstoff bei 200 bar, werden trotzdem rund 11 Druckgasflaschenbündel benötigt. Auch hierfür ist der Platz nicht ausreichend. Zusätzlich ergibt sich weiterer Platzbedarf im Innenraum für den Verdichter. Zudem ist es eventuell erforderlich, eine Ex-Zone zu definieren, wodurch wiederum erhöhte Kosten entstehen. Weiterhin wird das System durch den zusätzlichen Verdichter deutlich anfälliger für Ausfälle und die Wartungskosten erhöhen sich. Erfahrungen des Fraunhofer ISE von der institutseigenen Wasserstofftankstelle bestätigen diese Einschätzung. Hier sind die Verdichter der häufigste Grund für Ausfälle.

### **Home Power Solutions**

Als letzte Option bleibt das All-in-One System von Home Power Solutions. Vorteilhaft ist hier die geringe Baugröße und die fertige Verschaltung sowie Steuerung der Komponenten. Die Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs sowie die geringe Leistung der Brennstoffzelle sind jedoch für den hier beschriebenen Anwendungsfall deutlich zu gering, um einen nennenswerten Beitrag für einen deutlich höheren Autarkiegrad zu erzielen. Gleichzeitig bedarf es aufgrund der geringen Leistungswerte jedoch nur eines kleinen Speichers, der zu keinen Platzproblemen führt. Aufgrund des All-in-One-Charakters reduziert sich der Installationsaufwand trotz der Komplexität deutlich. In Verbindung mit den geringen Kosten des Systems sind zudem die finanziellen Risiken für die Betreiber überschaubar.

Sofern der geringe Effekt auf den Autarkiegrad vernachlässigbar ist, erscheint das System von Home Power Solutions, oder aber ein System mit vergleichbarer Systemgröße, als die beste Lösung für einen Energiespeicher auf Basis von Wasserstoff für die Bergwelt Kandel. Insbesondere der Platzbedarf der anderen Konzepte schließt diese aus. Wenngleich auch Systeme in einem ähnlichen Leistungsbereich wie das von Home Power Solutions zusammengestellt werden können, verbleibt ein höherer Komplexitätsgrad bei der Installation und im Betrieb.

## 6. Literatur

- [1] Ulrich Reichenbach: Bergwelt Kandel. Expose. URL: <https://www.bergwelt-kandel.de/>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [2] Stadtwerke Augsburg: Power to Gas. URL: <https://www.sw-augsburg.de/power-to-gas/>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [3] Stadtwerke Augsburg: Power-to-Gas-Anlage: wegweisendes Projekt zur Energiewende. URL: <https://www.sw-augsburg.de/magazin/detail/power-to-gas-anlage-wegweisendes-projekt-zur-energiewende/>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [4] EXYTRON GmbH: Klimafreundliches Wohnen in Augsburg. URL: <https://exytron.online/klimafreundliches-wohnen-in-augsburg/>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [5] Detail: Autarkie im Tarnkleid: Mehrfamilienhaus in Brütten. URL: <https://www.detail.de/artikel/autarkie-im-tarnkleid-mehrfamilienhaus-in-bruetten-30887/>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [6] Nina Egger: Egoist: Autarkes Mehrfamilienhaus Brütten. URL: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/egoist>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [7] Proton Motor Fuel Cell GmbH: Stationary Applications.
- [8] Proton Motor Fuel Cell GmbH: Energieautarkes Mehrfamilienhaus mit Brennstoffzellen. URL: <https://www.proton-motor.de/anwendungen/proton-motor-realisiert-energieautarkes-mehrfamilienhaus-mit-brennstoffzellen/>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [9] Energiewendebauen: Wasserstoff für die urbane Energiewende. URL: <https://projektinfos.energiewendebauen.de/forschung-im-dialog/neuigkeiten-aus-der-forschung/detailansicht/wasserstoff-fuer-die-urbane-energiewende/>. Abrufdatum 13.12.2019.
- [10] Norbert Fisch: Klimaneutrales Stadtquartier Neue Weststadt Esslingen. Recklinghausen 2019.
- [11] Weberhaus GmbH: Pilotprojekt zur autarken Energieversorgung eines Einfamilienhauses. URL: <https://www.weberhaus.de/haeuser-erleben/referenzen/pilotprojekt-zur-autarken-energieversorgung-eines-einfamilienhauses/>. Abrufdatum 18.12.2019.

## 7. Projektteam / Ansprechpartner

### **Kandel Bergwelt GmbH**

In den Engematten 9  
79286 Glottertal

Ansprechpartner:

Herr Michael Gschwander (Projektleiter BV Bergwelt Kandel)  
Herr Ulrich Reichenbach (Geschäftsführer)

### **Metzgerrei Reichenbach**

In den Engematten 9  
79286 Glottertal

Ansprechpartner:

Ulrich Reichenbach (Geschäftsführer)

### **Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE**

Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg i. Br.

Ansprechpartner:

Herr Christopher Voglstätter (Head of Team Power-to-Gas)  
Herr Marius Holst (Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Team Power-to-Gas)

### **EnergieSysteme Mayrhofer GmbH**

Emmy-Noether-Strasse 2  
79110 Freiburg i. Br.

Ansprechpartner:

Herr Anton Mayrhofer (Geschäftsführer)

# 8. Anlage: Projekterkenntnisse

## 1. Wirtschaftlichkeit

Ein wesentlicher Faktor für den wirtschaftlichen Betrieb der H<sub>2</sub>-Anlage stellt die Auslastung (Anzahl der Vollaststunden) der zentralen Anlagenkomponenten (Elektrolyseur, Brennstoffzellen-BHKW) dar. Eine wirtschaftliche Auslastung kann ab ca. 4.000 Vollaststunden/a erreicht werden. Dies lässt sich jedoch aktuell im BV Bergwelt Kandel allein mit der möglichen PV-Ausbeute von ca. 1.500 Vollaststunden/a nicht erzielen.

Möglicherweise kann durch eine zukünftige Erweiterung der Eigenenergieversorgung bspw. durch eine Kleinwindkraftanlage die Energieausbeute (Vollaststunden) gesteigert werden und damit verbunden auch die Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

## 2. Wahrnehmung und Akzeptanz

Der verfahrenstechnische Charakter und die Komplexität der H<sub>2</sub>-Anlage wird von den Bauherren der Bergwelt Kandel (Gastronomie- und Hotelbranche) eher als eine Anlagentechnik mit Bezug zum industriellen Umfeld (bspw. Verdichtungsdrücke bis zu 300 bar ü) wahrgenommen, welches für sie ein fremdes Terrain mit einem schwer einzuschätzenden unternehmerischen Risiko darstellt.

## 3. Flächenplanung und notwendiger Platzbedarf

Die frühzeitige Berücksichtigung des notwendigen Platzbedarfs für die Integration eines bzw. mehrerer 30 bar - H<sub>2</sub>-Speicher, ermöglicht die sog. „Direkte Speicherung“ (d.h. eine H<sub>2</sub>-Speicherung ohne Druckerhöhung) und damit verbunden die Nutzung einer ganzen Reihe von positiven Auswirkungen auf das geplante Projektvorhaben:

- geringerer Komplexitätsgrad (weniger Anlagenkomponenten)
- kein zusätzlicher Verdichter inkl. Druckluftkompressor notwendig
- höherer Wirkungsgrad
- geringere Investitionskosten
- geringere Betriebskosten (Eigenenergiebedarf, Wartungskosten)
- Steigerung der Akzeptanz (s.a. Pkt. 2)