

## Transformation eines Kohlesilos zum Solarkraftwerk mit farbigen PV-Modulen und Second-Life Speicher



Quelle: Martin Zeller

Gregor Steinke, Claudio Menn, Falk Dorusch, Achim Geissler  
Kontaktperson: Gregor Steinke, Institut Energie am Bau - Fachhochschule Nordwestschweiz,  
St. Jakobstrasse 84, 4132 Muttenz, [gregor.steinke@fhnw.ch](mailto:gregor.steinke@fhnw.ch), [www.fhnw.ch/habg/iebau](http://www.fhnw.ch/habg/iebau)

### Zusammenfassung

### Abstract

Das ehemalige Kohlesilo im Gundeldinger Feld in Basel wurde umgebaut und bietet nun Platz für Büros, Praxisräume, Konferenzzimmer und eine Zirkusschule. An den Fassaden und auf dem Dach wurde eine PV-Anlage mit farbigen Modulen installiert. Um den Eigenverbrauch der vor Ort erzeugten Elektrizität zu erhöhen und das öffentliche Stromnetz zu entlasten, werden gebrauchte Lithium-Ionen-Akkus aus Mobilitätsanwendungen als Second-Life Batteriespeicher eingesetzt. Die PV-Anlage und der Batteriespeicher werden in einem Messprojekt detailliert untersucht.

As a visible sign of the shift from fossil fuels to renewable energies, the former coal silo and heating plant of the machine factory Sulzer Burckhardt AG in the „Gundeldinger Feld“ in Basel is covered with colored PV modules. As part of the remodeling of the silo into office spaces, a building integrated PV system is installed on two facades and on the roof. In order to increase the self-consumption of the electricity that is generated on-site and to relieve the public grid, previously used lithium-ion batteries from electric vehicles are used as Second Life battery energy storage. The PV system and battery storage are investigated in detail in a monitoring project.

## 1. Ausgangslage

Das ehemalige Areal der Maschinenfabrik Sulzer Burckhardt AG im Basler Quartier Gundeli hat sich in den letzten 15 Jahren vom Industriestandort in einen lebendigen Ort mit vielfältigen Nutzungen gewandelt. Dieser Transformationsprozess des Gundeldinger Feldes ging mit der Ansiedlung kultureller, sozialer und gewerblicher Nutzungen einher und hat sich positiv auf die unmittelbare Umgebung und das Quartier ausgewirkt. Abbildung 3 zeigt den Situationsplan des Areals. Das knapp 20 Meter hohe Kohlesilo im Zentrum des Areals war das einzige Gebäude, welches noch nicht umgenutzt wurde (Abbildung 1). Die überwiegend fensterlosen massiven Betonwände liessen ohne grössere bauliche Eingriffe keine herkömmlichen Nutzungen zu. Das Erdgeschoss wird seit einigen Jahren durch eine Zirkusschule genutzt. Es entstand die Idee den ehemaligen Kohlespeicher umzubauen und als Büroflächen zu nutzen.



Abbildung 1: Gundeldinger Feld mit dem Kohlesilo im Ursprungszustand. Quelle: Martin Zeller



Abbildung 2: Gundeldinger Feld mit dem umgebauten Kohlesilo. Quelle: Martin Zeller



Abbildung 3: Situationsplan Gundeldinger Feld. Quelle: Baubüro in situ

## 2. Vorgehen

Im Rahmen des Umbaus des Silos zu Büroflächen wurden in die Stahlbetonwände der Süd- und Nordfassade Öffnungen zur Belichtung und Erschliessung eingeschnitten. Die Gebäudehülle wurde in den Obergeschossen komplett erneuert und erhielt einen sehr guten Wärmeschutz (Abbildung 4). Die Nord- und Südfassade wurde als aussen wärmegeämmte Konstruktion mit hinterlüfteter Bekleidung ausgeführt. Die Ost- und Westfassade erhielt eine verputzte Aussenwärmedämmung. Nordseitig wurde ein aussenliegender Treppen- und Aufzugsturm angeordnet (Abbildung 2). Als sichtbares Zeichen für den Wandel von fossilen zu erneuerbaren Energien wurden die opaken Fassadenflächen im Süden und Norden und die Dachfläche mit farbigen PV-Modulen versehen. Der erzeugte Strom wird zum Grossteil vor Ort verbraucht.

### Projektbeteiligte

Bauherrschaft:	Kantensprung AG, Basel
Architektur:	Baubüro in situ AG, Basel
PV-Anlage:	Solvatec AG, Basel
Farbiges PV-Glas:	SwissINSO AG, Lausanne
Batteriespeicher:	Dreifels AG, Gelterkinden
Monitoring:	iRIX Software Engineering AG, Basel
	FHNW - Institut Energie am Bau, Muttenz

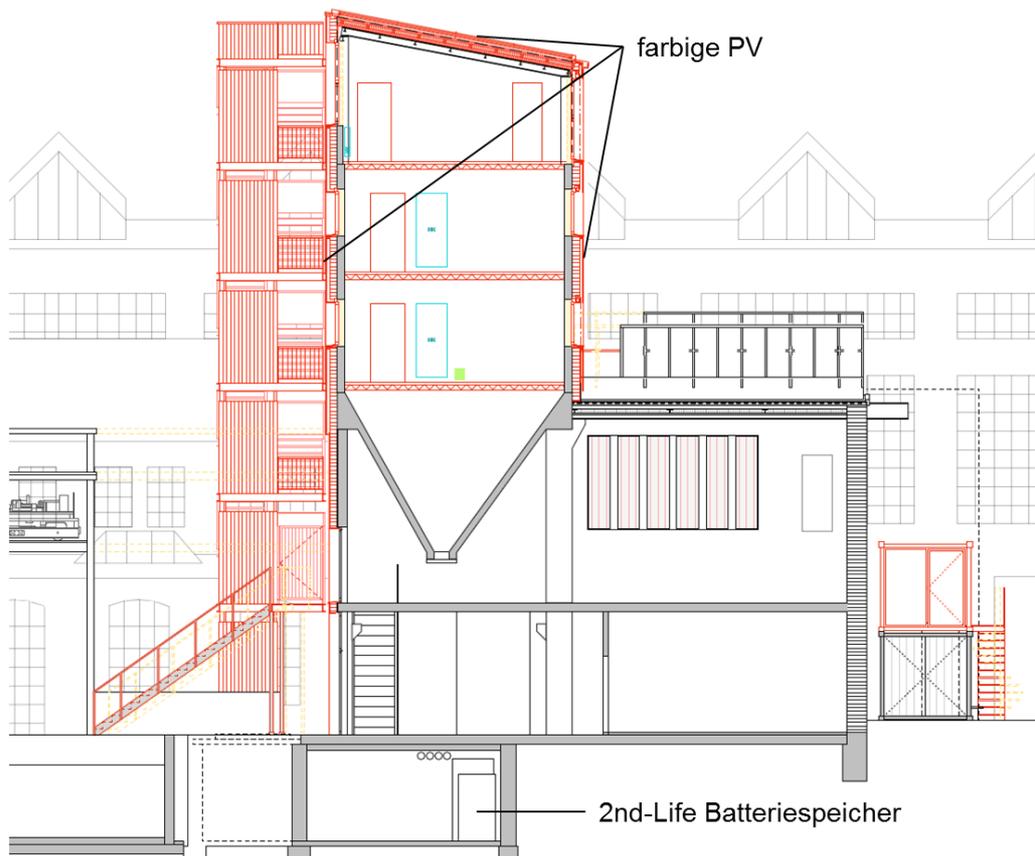


Abbildung 4: Querschnitt mit Darstellung der Umbauten (rot). Quelle: Baubüro in situ

## 2.1 Konstruktion Fassade und Dach

Die Fassade wurde als sehr gut wärmedämmte Konstruktion mit hinterlüfteter Bekleidung auf einer Holz-Alu-Unterkonstruktion ausgeführt (Abbildung 5 - 8). Als Wärmedämmung kamen 200 mm Mineralwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0.035 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zum Einsatz, wodurch ein U-Wert von  $0.20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht wurde. Die Bekleidung besteht aus farbigen rahmenlosen Photovoltaikmodulen und Faserzementplatten. Die Hinterlüftung im Bereich der fassadenintegrierten PV beträgt 80 mm. Dadurch kann die Wärme rückseitig der Module gut abgeführt werden, was sich positiv auf den Ertrag auswirkt. Zudem können im Hinterlüftungsraum Leistungsoptimierer der Module und die Verkabelung angeordnet werden. Hinterlüftungsöffnungen befinden sich im unteren Fassadenbereich und am Übergang zum Dach. Die Schnittstellen der Fassadenkonstruktion mussten sorgfältig geplant werden. Dies betrifft zum Beispiel die Übergänge der Photovoltaikmodule zur herkömmlichen Fassadenbekleidung. Die Fugen müssen übereinstimmen und die Vorderkante in der gleichen Ebene verlaufen. Hierbei waren die unterschiedliche Konstruktionsstärke der PV-Module und der Faserzementbekleidung zu berücksichtigen.

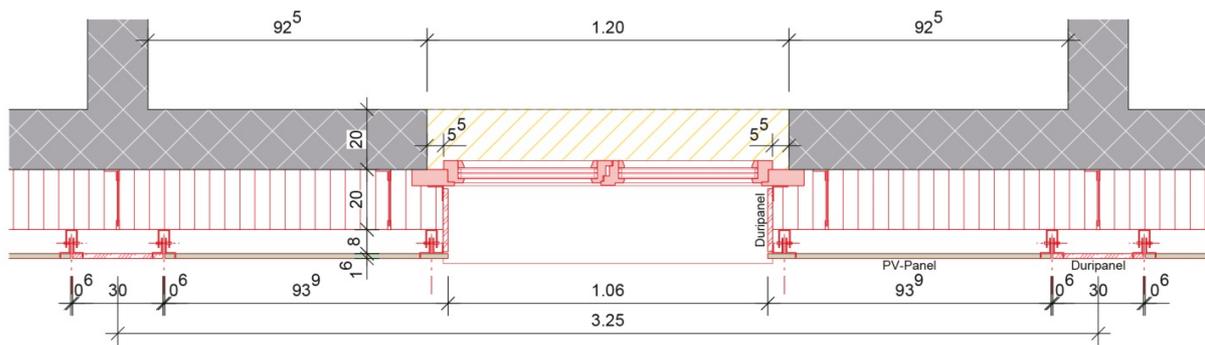


Abbildung 5: Horizontalschnitt Nordfassade. Quelle: Baubüro in situ

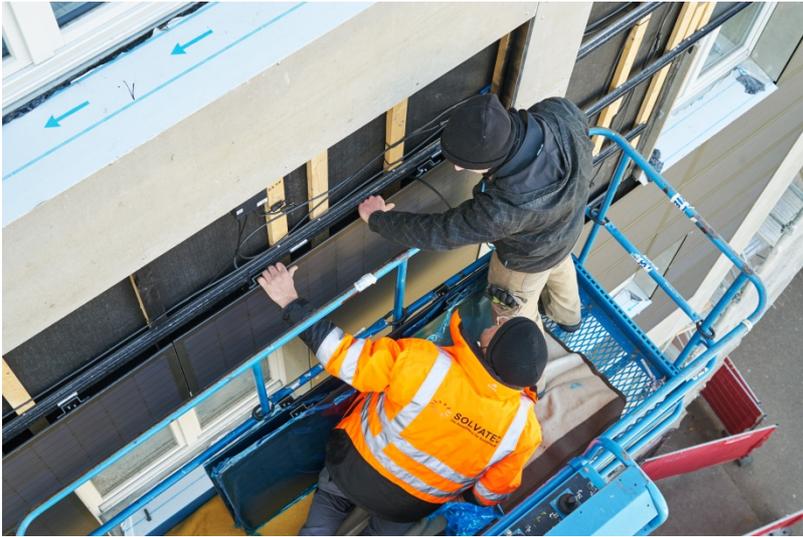


Abbildung 6: Montage der PV-Module an der Nordfassade. Quelle: Martin Zeller

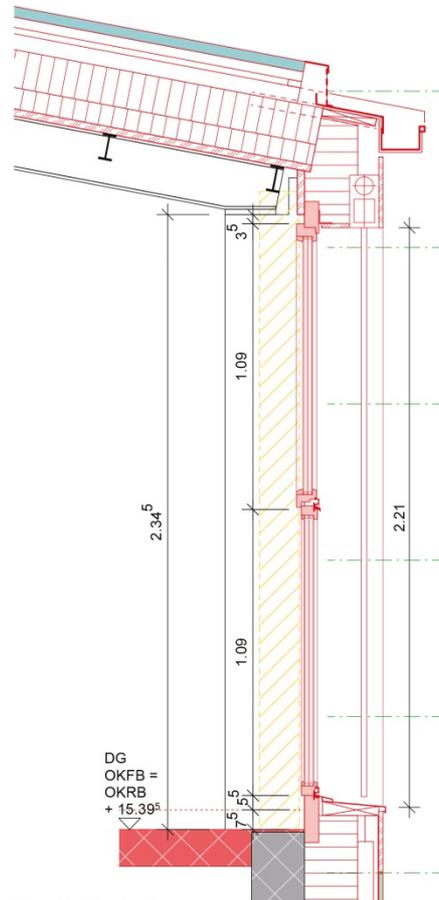


Abbildung 7 und 8: Nordfassade, Vertikalschnitt Südfassade und Dachanschluss. Quelle: Martin Zeller, Baubüro in situ

Das 11° geneigte Pultdach ist vollflächig mit farbigen und herkömmlichen PV-Modulen belegt. Abbildung 9 zeigt die Montage der dachintegrierten PV-Anlage. Die Module sind hinterlüftet und dienen als wasserführende Schicht.



Abbildung 9: Montage der dachintegrierten PV-Anlage, Unterkonstruktion System Mecosun. Quelle: Martin Zeller

## 2.2 Farbige PV in Fassaden und Dach

Am Gebäude kommen farbige PV-Module mit matter Oberfläche zum Einsatz. Im Vergleich dazu bieten herkömmliche Photovoltaikmodule mit dunkler spiegelnder Oberfläche eingeschränkte gestalterische Möglichkeiten. Die Photovoltaikmodule sind kaum als solche erkennbar, sondern mit herkömmlicher Fassadenbekleidung vergleichbar (Abbildung 10). Somit bieten sich zukünftig neue Möglichkeiten für gebäudeintegrierte Photovoltaikanlagen. Tabelle 1 zeigt Kenndaten der PV-Anlage.

Solarmoduloberfläche	138 m <sup>2</sup>
Nennleistung total	23 kWp
Solarmodule	Indach: mit Rahmen Antec Solar Kromatix 200kWp Farben- grau/blau/orange/grün/schwarz Masse 806x1586mm Fassade: Antec Solar Kromatix 123kWp Farben- grau/blau/orange/grün Masse 590x939mm + 590x1466mm  Module paarweise mit Power Optimizer P405(MC4) ausgestattet
Montagesystem	Indach: Mecosun; Fassadensystem: Gasser Fassadentechnik
Netzwechselrichter	Indach: Solaredge SE12.58k - EUR; Fassade: Solaredge SE10k - EUR
Kommunikation	Solaredge Monitoring Server API
Stromertrag Prognose	16'400 kWh

Tabelle 1: Kenndaten der PV-Anlage. Quelle: Solvatec

Am Pilotprojekt werden vier unterschiedliche Farben eingesetzt, um die Bandbreite der gestalterischen Möglichkeiten aufzuzeigen. Die Photovoltaikmodule der Fassaden wurden als individuell gefertigte rahmenlose Glas-Glas-Lamine mit monokristallinen Zellen ausgeführt und mit unsichtbaren rückseitigen Befestigungsschienen versehen. Für das Dach kamen gerahmte Glas-Folien-Lamine mit monokristallinen Zellen zum Einsatz. Das äussere farbige Deckglas der Module ist mit einer selektiv reflektierenden Beschichtung versehen. Die Beschichtungstechnologie wurde an der EPFL in Lausanne entwickelt. Die farbigen Spezialgläser werden durch die Firma SwissINSO in den Markt eingeführt. Eine spezielle Beschichtung der äusseren Gläser der PV-Module reflektiert einen kleinen Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts, wodurch die Farbwirkung erzeugt wird. Die Funktionsweise der Beschichtung ist in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 10: Ansicht Südfassade und Dachanlage. Quelle: Martin Zeller

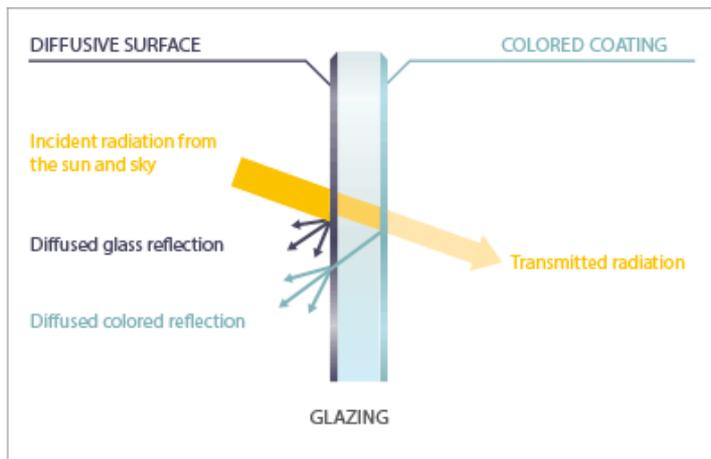


Abbildung 11: Funktionsweise der Beschichtung des SwissINSO Kromatix Glases. Quelle: SwissINSO

Die Farbintensität hängt vom Betrachtungswinkel und der Einstrahlung ab. Nach Aussage der Firma SwissINSO sollen neben den momentan angebotenen sechs Farben (Abbildung 12) bei erfolgreicher Markteinführung zukünftig noch zahlreiche weitere Farben verfügbar sein, sowie projektspezifische Wünsche realisiert werden können. Die farbigen Gläser lassen sich sowohl für Photovoltaikanlagen verschiedener Zelltechnologien als auch für solarthermische Anlagen einsetzen. Der Effizienz der PV-Module vermindert sich in Abhängigkeit vom Farbton nach Angaben des Herstellers um fünf bis zehn Prozent (Tabelle 2).



Abbildung 12: Angebotene Farbvarianten des SwissINSO Kromatix Glases. Quelle: SwissINSO

Die PV-Anlage besteht aus 172 Modulen mit einer Gesamtleistung von ca. 23 kWp. Im Entwurfsprozess wurden Anordnung und Abmessungen der PV-Module optimiert. Zunächst waren viele verschiedene Modulgrößen in schmaler länglicher Proportion vorgesehen. In enger Abstimmung mit dem Lieferanten der PV-Module konnte die Anzahl auf drei verschiedene Modulgrößen reduziert werden. Zudem wurden die Modulabmessungen auf Zellmasse optimiert, wodurch die Leistung bei gleicher Modulfläche vergrößert werden konnte.

Durch die zentrale Lage auf dem Areal ist die fassadenintegrierte Anlage sehr gut sichtbar. Über die neue aussenliegende Treppe am Silo kann auch die dachintegrierte Anlage aus der Nähe besichtigt werden. Mit Hilfe eines umfassenden Messsystems können die Leistungsdaten und Erträge der unterschiedlich farbigen Module verglichen werden (siehe Abschnitt 2.4).

Die fassaden- und dachintegrierte PV-Anlage mit farbigen Modulen wurde im Februar 2015 installiert und im April 2015 in Betrieb genommen. Aufgrund technischer Probleme lieferte die Dachanlage zunächst keinen Ertrag. Die Fehleranalyse ergab, dass die Ursache bei der Herstellung der PV-Dachmodule lag. Daher mussten sämtliche Module der Dachanlage ausgetauscht werden. Dies konnte aufgrund von Lieferschwierigkeiten der farbigen Gläser erst im April 2016 erfolgen. Der notwendige Austausch der Dachanlage hat auf Seiten einiger Projektpartner erheblichen finanziellen und personellen Mehraufwand verursacht, zu Einschränkungen im Betrieb des Gebäudes und der Anlage geführt und das vorgesehene Monitoring verzögert. Nach dem Austausch der Dachmodule läuft die Anlage weitestgehend störungsfrei.

	Schwarz	Grau	Blau	Grün	Gold
<b>Effizienz</b>	15.6%	14.9%	14.7%	14.8%	13.9%
<b>Abminderung der Effizienz in Abhängigkeit zur Farbe</b>	0%	-4.6%	-6.2%	-5.4%	-10.8%

Tabelle 2: Effizienz und Abminderung in Abhängigkeit zur Farbe. Quelle: SwissINSO

### 2.3 Second-Life-Batteriespeicher

Um den Eigenverbrauchsanteil des durch die PV-Anlage erzeugten Stromes vor Ort zu erhöhen, wurde ein neu entwickelter Second-Life Batteriespeicher mit Akkumulatoren aus Mobilitätsanwendungen installiert. In den sommerlichen Mittagsstunden und am Wochenende übersteigt die Stromproduktion der PV-Anlage den Stromverbrauch. Dieser Überschuss kann im Batteriespeicher zwischengespeichert und zeitversetzt vor Ort verbraucht werden.



Abbildung 13: Batteriespeicher im UG des Kohlesilos, Quelle: Dreifels, Gelterkinden

Speicherkapazität:	39 kWh
Batteriezellen:	LiFePO4 / 15 Ah / 750 Wh   50 V, Fa. Dreifels, 52 x 2nd-Life aus TWIKE Elektrofahrzeugen
Wechselrichter:	Lade-/Entladeleistung 10 kW AC, PV-Leistung 14.5 kW Fa. Voltronic, 2 x
Batteriemanagement:	PMU für je 8 Zellen, Fa. Dreifels, 7 x
Fernüberwachung:	Webinterface Dreifels-Powerbanksystem

Tabelle 3: Kenndaten des 2nd-Life Speichers. Quelle: SwissINSO

Der Batteriespeicher wurde durch die Firma Dreifels entwickelt und realisiert (Abbildung 13). Der Speicher hat eine Kapazität von 39 kWh. Die Kenndaten des Speichers zeigt Tabelle 3. Es kommen neuwertige und gebrauchte Hochleistungs-LiFePO4 Akkus aus TWIKE Elektrofahrzeugen zum Einsatz. Grundlagen dazu wurden in [1] und [2] dargestellt. Im Rahmen der technischen Konzeption wurde der Speicher zu Testzwecken zunächst am Standort der Firma Dreifels in Gelterkinden aufgebaut. Als vorbereitende Arbeiten für die Installation des Batteriespeichers war die Planung und Ausführung der baulichen Massnahmen für den Technikraum im UG des Kohlesilos notwendig. Es wurde ein ehemaliger Lagerraum zum Technikraum umgebaut. Abbildung 14 zeigt das Schema der Anlage. Der Speicher wurde im März 2016 in Betrieb genommen. Von den geplanten 39 kWh Gesamtkapazität wurden zunächst 23 kWh installiert. Die restlichen 16 kWh wurden im Juni 2016 eingebaut.

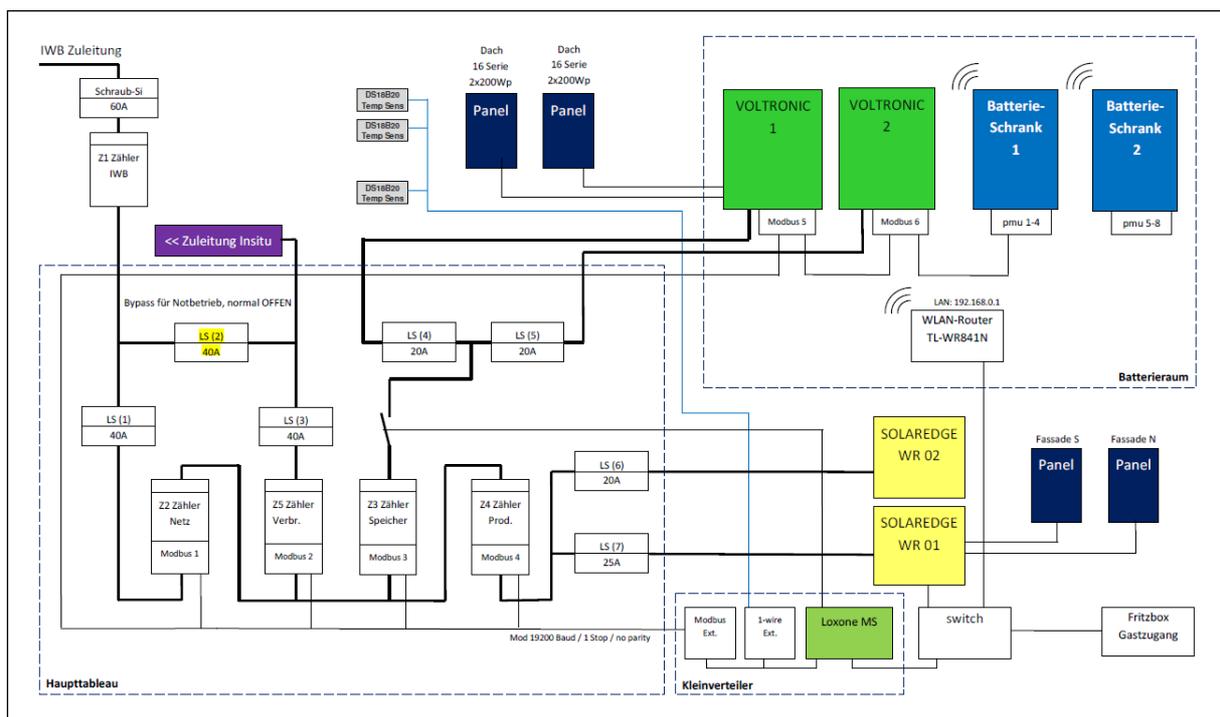


Abbildung 14: Schema PV - Wechselrichter - Akku - Zähler. Kohlesilo Gundeldinger Feld, Basel Quelle: Dreifels, Gelterkinden

## 2.4 Monitoring

Die Energie- und Leistungsdaten der PV-Anlage, des Speichers, der angeschlossenen Verbraucher, sowie die Einspeisung und der Bezug aus dem öffentlichen Elektrizitätsnetz werden durch ein Monitoringsystem für drei Jahre erfasst. Bei der PV-Anlage werden Daten der verschiedenfarbigen Module separat erhoben, um den Einfluss der farbigen Gläser zu ermitteln, und mit den Angaben des Herstellers vergleichen zu können. Ein weiteres Ziel ist die Optimierung der Dimensionierung

des Speichers in Bezug auf die PV-Anlage und die angeschlossenen Verbraucher. Zudem soll mit Hilfe des Monitorings das Batteriemanagementsystem verbessert werden. Dadurch können die Eigenverbrauchsquote erhöht und die Lastspitzen für das öffentliche Elektrizitätsnetz reduziert werden. Mit Hilfe der Messungen sollen Modelle für eine herkunftsbasierte Abrechnung des vor Ort verbrauchten Stroms entwickelt werden. Die Messung des Second-Life Speichers dient unter anderem zur Untersuchung des Alterungsverhaltens der einzelnen Speichermodule.

Die verschiedenen Messdaten werden auf einer gemeinsamen Datenplattform zusammengeführt und somit die Auswertung vereinfacht. Die technische Konzeption, Realisierung und Betreuung der Plattform wird durch den Projektpartner iRIX erbracht. Die Plattform ist seit Februar 2016 in Betrieb und wird weiter ausgebaut.

### 3. Resultate

Um die Auswirkung der verschiedenen Modulfarben auf den Ertrag zu vergleichen, wurden in einer ersten Auswertung die spezifischen Monaterträge der farbigen PV-Module auf dem Dach für Juni 2016 gegenübergestellt (Abbildung 15). Hierfür wurden Messwerte der Leistungsoptimierer von jeweils sechs konventionellen (schwarzen) und blauen Modulpaaren, je fünf grauen und grünen Modulpaaren und einem goldfarbenen Modulpaar verwendet. Die unterschiedliche Zahl der Modulpaare ist durch fehlende und fehlerhafte Messwerte begründet. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten der goldfarbenen Gläser sind nach dem Austausch der defekten Dachmodule nur zwei goldfarbene Module auf dem Dach vorhanden. Der mittlere spezifische Monatertrag der farbigen PV-Module pro Quadratmeter Bruttomodulfläche ist verglichen mit den konventionellen Modulen bei den grünen Modulen um 16% geringer, bei den blauen Modulen um 20%, den grauen und goldenen Modulen um 24% geringer.

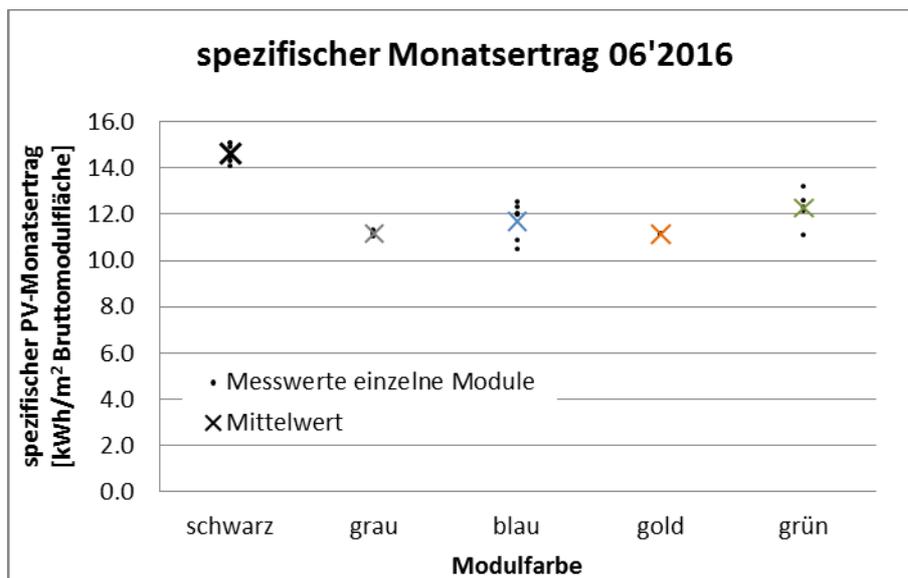


Abbildung 15: Spezifischer Ertrag der farbigen PV-Module auf dem Dach für Juni 2016

Zwischen März und Juni 2016 wurden etwa 2.8 MWh Elektrizität aus der PV-Anlage erzeugt. Der Stromverbrauch des angeschlossenen Verbrauchers liegt im gleichen Zeitraum bei ca. 2.5 MWh. Davon werden 830 kWh Solarstrom direkt genutzt und 460 kWh aus dem Batteriespeicher entladen. Der Eigendeckungsgrad wird mit Hilfe des Second-Life Speichers mit einer Kapazität von 23 kWh von 35 auf 53 % erhöht, die Grundlast während der Nachtstunden und die Spitzen am Morgen werden aus dem Speicher abgedeckt, der Tagesverbrauch wird bei ausreichender solarer Einstrahlung direkt durch den PV-Ertrag gedeckt.

#### **4. Diskussion und Ausblick**

Mit dem Umbau des Kohlesilos wurden die Integration farbiger PV-Module in Fassade und Dach, sowie der Einsatz eines 2nd-Life-Speichers demonstriert. Zahlreiche Anfragen von Fachleuten und interessierten Bauherrschaften belegen das grosse Interesse an den neuen Gestaltungsmöglichkeiten durch die farbigen PV-Module und der Weiterverwendung von Batterien aus Mobilitätsanwendungen in stationären Speichern.

Die ersten Auswertungen der Messungen haben erwartungsgemäss gezeigt, dass der Ertrag der farbigen PV-Module geringer ist als bei den konventionellen Modulen. Allerdings spiegeln sich in den Messwerten nicht die Angaben des Glasherstellers zur Abminderung der Effizienz (Tabelle 2) wider. Zum einen sind die Erträge im Vergleich zu den konventionellen Modulen weitaus stärker reduziert, als es die Herstellerangaben erwarten liessen. Zum anderen sind beispielsweise die Erträge der grauen Module im Vergleich zu den anderen Modulfarben stärker reduziert, obwohl die Herstellerangabe hierbei die geringste Reduktion angibt. Die Messwerte weisen teilweise eine grosse Streuung auf. Der Varianzkoeffizient beträgt bei den grünen Modulen 6% und bei den blauen Modulen 7%. Daher sollen die Messeinrichtungen und Messwerte nochmals überprüft werden und über einen längeren Beobachtungszeitraum ausgewertet werden. Der Eigendeckungsgrad wird durch den im Juni 2016 erfolgten Ausbau der Kapazität des Speichers erhöht. Zudem werden in den kommenden Monaten verschiedene Varianten für das Lademanagement erarbeitet, getestet und optimiert.

#### **5. Finanzielle Förderung**

Die Umsetzung wird als P+D-Projekt vom Bundesamt für Energie gefördert und im Rahmen des Projekts „2000-Watt-Gesellschaft – Pilotregion Basel“ vom Amt für Umwelt und Energie Kanton Basel-Stadt finanziell unterstützt.

#### **Literatur/Referenzen – Littérature/références – Literature/references**

- [1] Menn, C.; Geissler, A. "Electric Vehicle Batteries in Energy Storage Systems: An Economic Analysis For Swiss Residentials", CISBAT, September 2015, Lausanne, Switzerland. Institut Energie am Bau, Muttenz, 2015
- [2] Kim D.; Menn C.; Geissler A.; Hengevoss, D. "Quantifizierung des Umweltnutzens von gebrauchten Batterien aus der Elektromobilität als gebäudeintegrierte 2nd-Life Stromspeichersysteme", Bauphysik No. 022, 4/2015