Eigenstromversorgung eines Einfamilienhauses mit der bionischen Grätzelzelle

Internal power supply of a single-family home with dye sensitized solar cells

29. Mai 2013

Bionik-Projektarbeit

Westfälische Hochschule

Sarah Boesveld 201027090

boesveld.sarah@googlemail.com

Betreuer: Prof. Dr. Seidl (Westfälisches Institut für Bionik, Westfälische Hochschule, Bocholt)

Betreuerin: M. Sc. Katja Buß (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **3**

2 Die bionische Grätzelzelle **4**
2.1 Biologisches Vorbild - Photosynthese 4
2.1.1 Blattfarbstoffe 5
2.1.2 Photosysteme 5
2.2 Aufbau und Funktion der Grätzelzelle 6
2.3 Wirkungsgrad und Lebensdauer der Zelle 8
2.4 Derzeitige Anwendungen von Farbstoffsolarzellen 9
2.5 Gegenüberstellung einer bionischen und konventionellen Solarzelle . . 11

3 Betrachtetes Szenario **13**
3.1 Beschreibung des Anwendungsszenarios 13
3.2 Randbedingungen 13
3.3 “Steckbrief” der verwendeten Farbstoffsolarzelle 14
3.4 Dimensionierung von Farbstoffsolarzellenmodulen und der Lithium-Ionen-Batterie 15
3.4.1 Dimensionierung der Solarzellen 15
3.4.2 Betrachtung eines Musterhauses 18
3.4.3 Dimensionierung der Lithium-Ionen-Batterie 20
3.4.4 Kosten 20
3.5 Diskussion 22
3.6 Ergebnisse 22

4 Fazit und Ausblick **23**
4.1 Zusammenfassung/Fazit 23
4.2 Ausblick 23

1 Einführung

Die Erhöhung des Anteils an regenerativen Energien und die damit verbundene Energiewende ist ein stetig aktuelles Thema. Der Anteil der bisherigen Stromproduzenten wie Kohle- und vor allem Kernkraftwerken soll so minimiert werden.
Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat deshalb die Zielsetzungen bis 2020 die Stromversorgung zu 35% aus regenerativen Energien zu erzeugen. 2050 sollen diese bereits bis zu 80% des Bruttostroms produzieren. Heute (2013) liegt der Anteil bei ca. 17% (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2011). Wind- und Sonnenenergie stellen den wichtigsten Teil der erneuerbaren Energien dar. Durch weitere Forschung und Optimierung kann dieser Sektor zukünftig weiter vergrößert und leistungsfähiger gemacht werden.

Vor allem der Bereich der Solarenergie wird heute im Verhältnis zu anderen regenerativen Energien wenig genutzt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2011), bietet jedoch ein großes Potential zur Stromerzeugung durch die Ausnutzung der Sonneneinstrahlung. Die von der Sonne bereitgestellte Energiemenge, welche auf der Erdoberfläche eintrifft, beträgt $1{,}08 \cdot 10^{18}$ kWh (Quaschning, V. 2011). Der Weltenergiebedarf [1] lag im Jahr 2010 vergleichsweise bei rund 140.168 Milliarden kWh.
Heute ist die Produktion der Solarzellenmodule allerdings noch ein energieaufwendiger Prozess und verursacht hohe Kosten, sodass sich hohe energetische Amortisationszeiten ergeben. Die Farbstoffsolarzelle erweitert, als bionische und potentiell kostengünstigere Alternative zu herkömmlichen Solarzellen, die Anwendungsmöglichkeiten und bietet, trotz seines noch relativ geringen Wirkungsgrades von 12% einen weiteren Lösungsansatz zur Stromproduktion (Wark, M., Oekermann, T. 2009). Zurzeit wird die genaue Funktionsweise der sogenannten “Grätzelzelle” weiter erforscht, um möglichst zukunftsnah höhere Wirkungsgrade erzielen zu können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Farbstoffsolarzelle und deren Praktikabilität für ein betrachtetes realitätsnahes Anwendungsszenario untersucht. Das Szenario bezieht sich auf den Eigenstromverbrauch eines Einfamilienhauses im Sommer.
Die Zielsetzung des Projektes besteht darin, eine Schlussfolgerung über die Eignung der Farbstoffsolarzelle, hinsichtlich des Eigenstromverbrauchs eines Einfamilienhaushaltes im Sommer, ziehen zu können. Der genormte Eigenstromverbrauch einer vierköpfigen Familie soll hier durch entsprechend dimensionierte Farbstoffsolarmodule gedeckt und in einer Lithium-Ionen-Batterie zwischengespeichert werden. Dabei stehen vor allem die energetische Umsetzbarkeit und die Kosten im Vordergrund.
Die Projektarbeit wird im Rahmen eines Praktikums beim Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT angefertigt.

Anfangs wird ein Überblick über die Grätzelzelle und ihr natürliches Vorbild die Photosynthese bei Pflanzen gegeben. Im Vordergrund stehen hier der Aufbau und die Funktionsweise, sowie der derzeitige Stand der Technik in der Farbstoffsolarzellentechnologie. Schließlich wird der Grundlagenteil mit einer Gegenüberstellung zwischen konventioneller Solarzelle und bionischer Farbstoffsolarzelle abgeschlossen, um Charakteristika der Zellen im Vergleich herauszustellen. Im Hauptteil wird das betrachtete Anwendungsszenario beschrieben und die Randbedingungen festgelegt, um eine Grundlage für die Berechnung und Dimensionierung der einzelnen Module und der Batterie zu schaffen. Abschließend soll ein Fazit über die Eignung von Farbstoffsolarmodulen für das Szenario gezogen werden.
Durch die Berechnungen ergibt sich, dass die Grätzelzelle Potential für die Verwen-

[1] Menge an Primärenergie, die weltweit im Jahr benötigt wird in Form von Treibstoff, elektrischer Energie und Heizenergie

dung im Anwendungsszenario aufweist und abschließend eine positive Bilanz gezogen werden kann.

2 Die bionische Grätzelzelle

Die bionische Grätzelzelle ist eine photoelektrochemische Zelle aus dem Bereich Photovoltaik, welche Sonnenenergie, mithilfe eines pflanzlichen Farbstoffes, in elektrischen Strom umwandelt. Die Zelle beinhaltet keine Siliziumanteile, wie es in herkömmlichen Solarzellen meistens der Fall ist. Die Aufgabe der Lichtabsorption wird hier von pflanzlichen Farbstoffen übernommen.
Das Prinzip wurde Anfang 1990 von Michael Grätzel entdeckt und patentiert. Ihre Wirkweise wird in den Bereich der Verfahrensbionik eingeordnet.
Mit der Entwicklung der Farbstoffsolarzelle wurde ein typischer Top-Down-Prozess [2] durchlaufen. Die technische Problemstellung der Lichtabsorption bei Solarzellen, ohne die kostenintensiven Verfahren zur Herstellung von beispielsweise Siliziumzellen, war hier der Ausgangspunkt für eine Vorbildrecherche in der Natur (O Regan, B., Graetzel, M. 1991).

2.1 Biologisches Vorbild - Photosynthese

Im Pflanzenreich wird die Sonnenenergie, besonders im Bereich des sichtbaren Lichts von 400-700 nm, zur Erzeugung von Biomasse genutzt. Die Photosynthese findet nur in den grünen und somit chloroplastenhaltigen Bereichen der Pflanze statt (siehe Abbildung 1). Diese enthalten den Farbstoff Chlorophyll, der zur Bindung von Lichtenergie notwendigen ist. Der Ertrag der Photosynthese ist dabei von der Lichtintensität abhängig (Hafner, L. et al. 1997).
Im folgenden wird vorrangig auf den Mechanismus der Lichtabsorption, der für die Funktion der Grätzelzelle bedeutsam ist, eingegangen. Die Erzeugung der Biomasse wird nicht berücksichtigt.

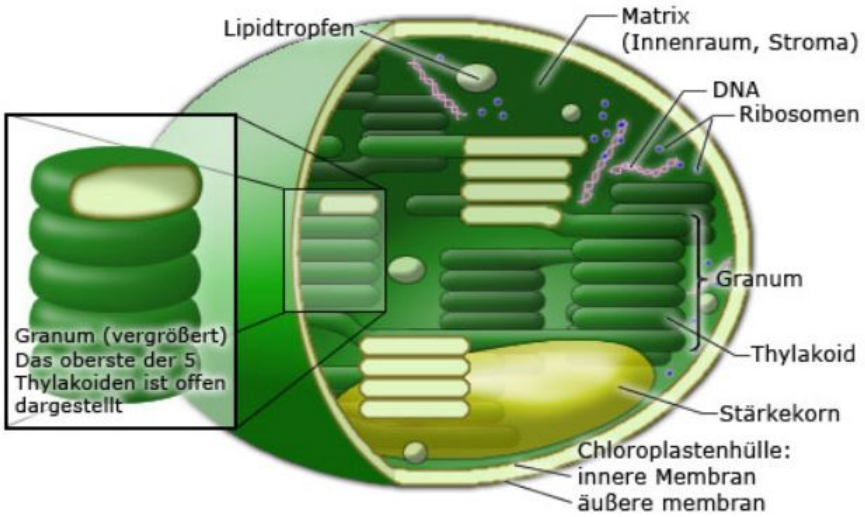


Abbildung 1: Querschnitt durch einen Chloroplasten (Hensel, L. 2013)

[2] Bionischer Entwicklungsprozess, bei dem ein bereits bestehendes technisches Produkt durch die Übertragung biologischer Prinzipien neue oder verbesserte Funktionen erhält.

2.1.1 Blattfarbstoffe

Die Grundlage der Photosynthese beruht auf der Absorption von violettem, blauem und rotem Licht[3], denn dadurch werden die Elektronen der Farbstoffmoleküle angeregt. Blätter von Pflanzen reflektieren grün-gelbes Licht. Aus diesem Grund erscheinen sie für den Betrachter grün (Hafner, L. et al. 1997).
Eine genaue Aufklärung der Farbstoffbestandteile kann durch Chromatographie erfolgen. Dabei stellt sich heraus, das der Hauptphotosynthesefarbstoff Chlorophyll ist, zum einen das blaugrüne Chlorophyll a und zum anderen das gelbgrüne Chlorophyll b. Außerdem sind unter anderem Carotinoide (Xanthophylle und Carotine) im Pflanzenfarbstoff enthalten (Nultsch, W. 2001) .
Beim Einfallen von Lichtstrahlen nehmen die Elektronen des Farbstoffmoleküls Energie auf und werden aus dem Grundzustand in einen Anregungszustand gebracht. Die Anregung kann aufgrund von Doppelbindungssystemen, welche zu großen Anteilen in Farbstoffen vorkommen, erfolgen (Farbtheorie nach Witt 1876 (Universität Bayreuth 2012)). Die Absorption ist also von den konjugierten Doppelbindungen im Porphyrinringsystem abhängig (siehe Abbildung 2) .

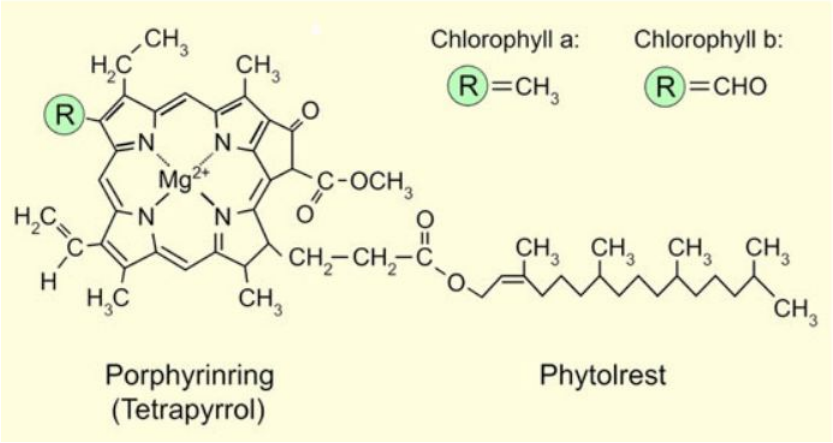


Abbildung 2: Strukturformel des Chlorophylls (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2002)

Ein Elektron kann nur die Energiemenge aufnehmen, die der Differenz aus Grund- und Anregungszustand entspricht. Das bedeutet, es wird die Farbe absorbiert, welche der Energiedifferenz gleichkommt. Die einzelnen Farben des Lichtes unterscheiden sich je nach Wellenlänge in ihrem Energiegehalt.
Im Chlorophyllmolekül gibt es zwei Anregungszustände: rotes Licht hebt ein Elektron in den ersten und blaues Licht in den zweiten energiereicheren Anregungszustand. Ein angeregtes Chlorophyll-Molekül kann ein Elektron des ersten Anregungszustandes auf ein Redox-System übertragen. Dieser Vorgang spielt bei der Lichtabsorption der Grätzelzelle eine wichtige Rolle.

2.1.2 Photosysteme

Es gibt zwei lichtabsorbierende Photosysteme, welche in den Thylakoidmembranen [4] der Chloroplasten liegen und aus vielen Pigmentmolekülen (Antennenkomplex) bestehen. Dieser auch Lichtsammelkomplex genannte Zusammenschluss hat die Aufgabe

[3] Engelmann Versuch, bei dem mit aerophilen Bakterien besetzte Grünalgen mit Licht unterschiedlicher Wellenlänge bestrahlt wurden. Bakterien befanden sich vorwiegend an den Stellen, die mit rotem und blauem Licht bestrahlt wurden → hohe Photosyntheseleistung

[4] Membransysteme im Inneren von Chloroplasten und Cyanobakterien. Die Tylakoide sind Träger der Photosynthesefarbstoffe

Licht zu absorbieren und die Energie zum Reaktionszentrum weiterzuleiten, in dem die Lichtreaktion der Photosynthese als Ausgangspunkt für die Zuckerbildung stattfindet (Abbildung 3).

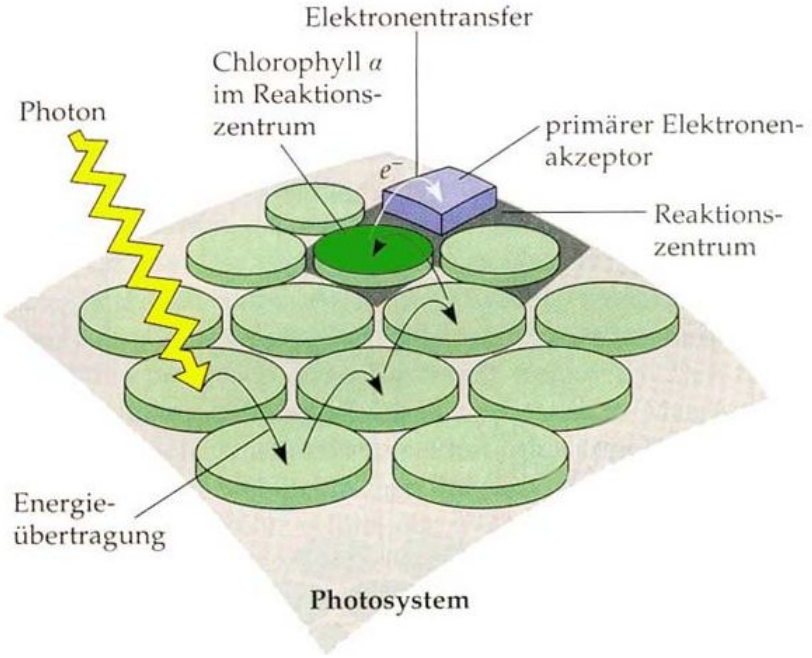


Abbildung 3: Lichtsammelkomplex (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2002)

Die beiden Photosysteme unterscheiden sich in ihren Reaktionszentren. Das Fotosystem I hat sein Absorptionsmaximum bei 700 nm (P_{700}) und das Fotosystem II bei 680 nm (P_{680}). Die Elektronenweiterleitung erfolgt hier schneller, als deren Rekombination mit dem Farbstoff erfolgen kann, was der Grund für die verlustarme Sonnenlichtnutzung ist.
Über die Carotinoide wird “grünes Licht” absorbiert und die Energie an das Chlorophyll weitergegeben, sodass bei der Photosynthese eine nahezu ideale Sonnenlichtnutzung stattfindet.

2.2 Aufbau und Funktion der Grätzelzelle

Die Grätzelzelle ist ein mehrschichtiger Komplex aus festen und flüssigen Komponenten:
Als äußere Begrenzung der Zelle dienen zwei Glas- oder Kuststoffplatten, die zum Inneren der Zelle mit einer leitfähigen Schicht TCO, oft Zinnoxide (transpartent conductive oxide), bedruckt werden. Diese transparenten elektrisch leitfähigen Oxide werden auch bei der Herstellung konventioneller Solarzellen verwendet (Fraunhofer ISE 2007). Auf einer der beiden Schichten aus TCO wird ein optisch transparenter Halbleiterfilm aus Titandioxid-Nanopartikeln von 10μm Dicke aufgebracht, auf welchem dann ein ladungsübertragender Farbstoff (Charge-Transfer-Farbstoff) absorbiert wird. Der Film aus Titandioxid-Nanopartikeln fungiert hier als Arbeitselektrode und generiert durch seine Porösität eine große, innere Oberfläche, welche viele Farbstoffmoleküle aufnehmen kann (Wark, M., Oekermann, T. 2009).
Die zur Lichtabsorption verwendeten Farbstoffe stammen aus Tee-Extrakten bis hin zu extrahiertem Spinatsaft. Der Wirkungsgrad der Zelle ist dabei unter anderem von der Intensität des gewählten Farbstoffes abhängig. Oft wird als Farbstoff ein Ruthenium-Komplex verwendet, der sich in Untersuchungen am effektivsten erwies. Es handelt

sich dabei um den Farbstoff N3, der auf dem Übergangsmetall Ruthenium basiert. Durch seine unterschiedlichen Oxidationsstufen, kann das Ruthenium viele Komplexverbindungen mit anderen Stoffen eingehen (Nazeeruddin, K., Baranoff, E., Grätzel, M. 2011). Hierdurch können Wirkungsgrade von bis zu 12% erzielt werden (O Regan, B., Graetzel, M. 1991).
Auf der anderen Glasplatte bzw. der darauf aufgetragenen Schicht TCO, der Titandioxidschicht gegenüberliegend, befindet sich die Gegenelektrode, die aus einer wenigen mikrometer dicken Platinschicht (teilweise Graphit) besteht.
Der Bereich zwischen den Elektroden der Farbstoffsolarzelle ist mit einer Redox- Elektrolytlösung, wie beispielsweise Iodidlösung, gefüllt (siehe Abbildung 4) (Nazeeruddin, K., Baranoff, E., Grätzel, M. 2011).

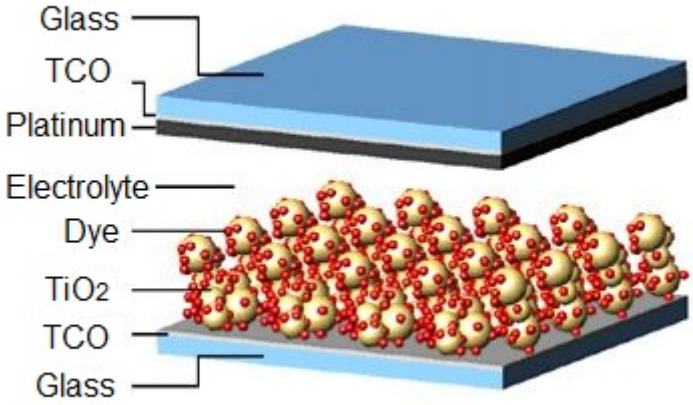


Abbildung 4: Sandwich-Aufbau einer Farbstoffsolarzelle (Fraunhofer ISE 2007)

Die Grundlegende Funktionen der Grätzelzelle ist wie folgt:
Trifft Sonnenlicht in Form von Photonen auf die Farbstoffsolarzelle, so werden diese von den Farbstoffmolekülen (Sensibilisatoren) absorbiert und in einen angeregten Zustand S^* versetzt (Abbildung 5a), dass bedeutet, sie nehmen ein höheres Energieniveau ein.

$$S_{absorbiert} + h\nu \rightarrow S^*_{absorbiert} \tag{1}$$

Infolgedessen wird ein Elektron vom Farbstoffmolekül freigesetzt und in das Leitungsband des Halbleiters TiO_2 injiziert. Der Farbstoff wird im oxidierten Zustand S^+ zurückgelassen.

$$S^*_{absorbiert} \rightarrow S^+_{absorbiert} + e^-_{injiziert} \tag{2}$$

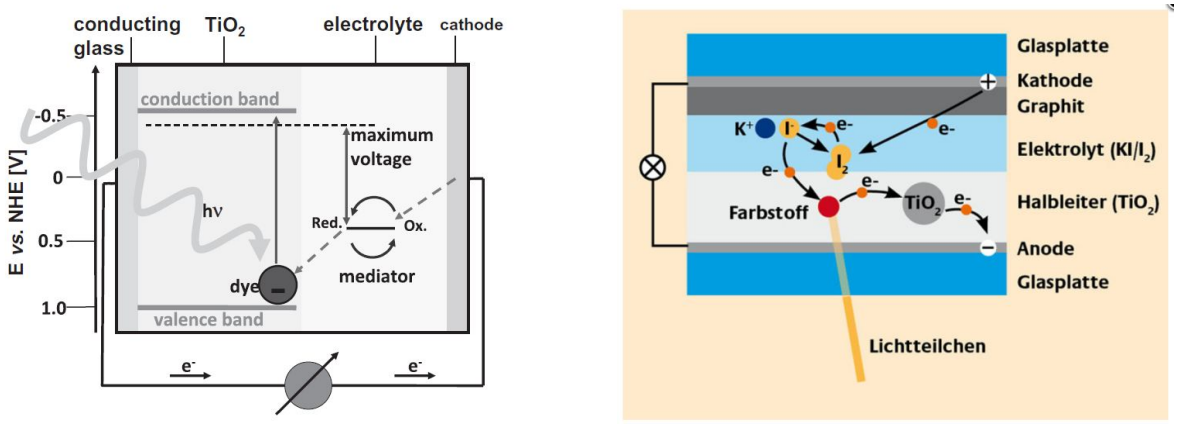
Das injizierte Elektron durchwandert den Halbleiter zur Kathode und gelangen dort in den Stromkreis. Gleichzeitig wird der Redox-Mediator reduziert (3), welcher wiederum das Farbstoffmolekül regeneriert (4).

$$I_3^- + 2e^-_{Kathode} \rightarrow 3I^-_{Kathode} \tag{3}$$

$$S^+_{absorbiert} + \frac{3}{2}I^- \rightarrow S_{absorbiert} + \frac{1}{2}I_3^- \tag{4}$$

Die Aufgabe des Elektrolyten besteht unter anderem darin, zu verhindern, dass die Elektronen die ionisierten Farbstoffmoleküle wieder umkehren. Das geschieht durch die negativen Anionen, die den Farbstoffmolekülen Elektronen zur Regenerierung zur

Verfügung stellen (Abbildung 5b). In der Farbstoffsolarzelle liegt im Gegensatz zur konventionellen Solarzelle kein elektrisches Feld vor (Nazeeruddin, K., Baranoff, E., Grätzel, M. 2011).
Bei Lichteinfall bilden sich zwei Stromkreise, ein äußerer nutzbarer und ein innerer Stromkreis, um den Farbstoff zu regenerieren (Fraunhofer ISE 2007).



(a) (b)

Abbildung 5: (a) Energieniveau-Diagramm, welches die Elektronen während eines Zyklus durchlaufen (Nazeeruddin, K., Baranoff, E., Grätzel, M. 2011) **(b)** Reaktionsabläufe in einer Farbstoffsolarzelle bei einfallendem Licht (Jungbluth, A. 2010)

Zusätzlich zu den Hauptreaktionen treten in der Zelle unerwünschte Nebenreaktionen auf, die den Wirkungsgrad beeinflussen. Zum einen ist hier die Reaktion zwischen injizierten Elektronen und dem oxidiertem Farbstoffmolekül zu nennen und zu anderen die des Elektrons mit einem oxidiertem Redox-Paar an der Titandioxid-Oberfläche.

2.3 Wirkungsgrad und Lebensdauer der Zelle

Wirkungsgrad und Lebensdauer sind für die Farbstoffsolarzelle wichtige Parameter, denn ihr zukünftiges Potential auf dem Markt der erneuerbaren Energien hängt unter anderem von diesen beiden Faktoren ab. Momentan liegt die Farbstoffsolarzelle in beiden Punkten noch hinter der konventionellen Solarzelle, hat aber beispielsweise einen Kostenvorteil (siehe Tabelle 1).

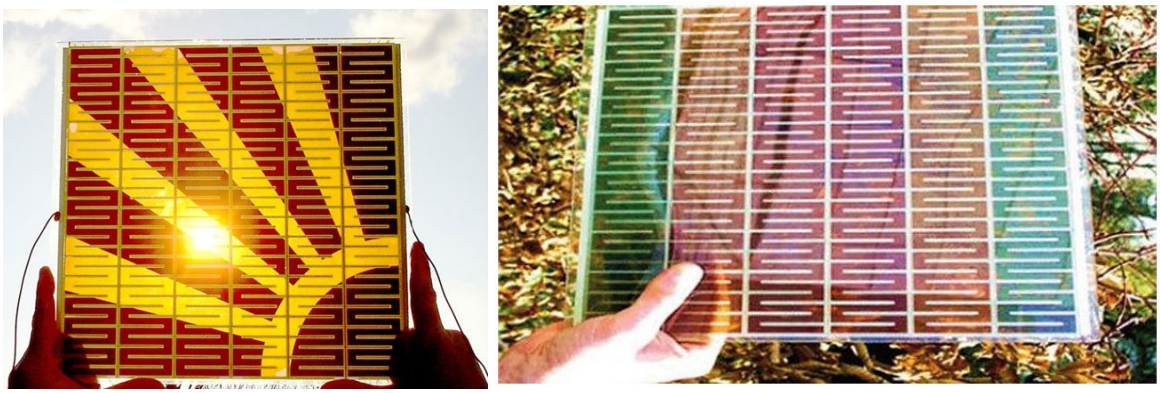
Der **Wirkungsgrad** der Farbstoffsolarzelle hängt von mehreren Faktoren ab. Eine wichtige Rolle spielt dabei der verwendete Farbstoff. Zum einen muss der Farbstoff sich durch eine große Langzeitstabilität auszeichnen, da er bei einer Lebensdauer der Zelle von 20 Jahren ca. 10^8 Zyklen aus Oxidation und Reduktion durchläuft. Lässt die Wirkung der Lichtabsorption des Farbstoffes nach, beispielsweise bei Zerfall, so sinkt der Wirkungsgrad. Des Weiteren sollte er ein großes Absorptionsspektrum besitzen und auf den Halbleiter TiO_2 abgestimmt sein, aufgrund einer kontinuierlichen Wechselwirkung zwischen den beiden Komponenten (siehe Punkt 2.2).
Der beste Wirkungsgrad, der bisher erzielt werden konnte liegt bei 12% und ist auf einen Ruthenium-Komplex zurückzuführen (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation; Lutz, A. et al. Juli 2007). Der Betrieb der Zelle ist jedoch auch mit natürlichen Farbstoffen möglich, wie Saft von zermörserten Blättern. In Schmetterlingsblütlern und Waldmeister ist beispielsweise der Stoff Kumarin enthalten, mit dem Wirkungsgrade bis 5,6% erreicht werden.

Die **Lebensdauer der Zelle** ist hinsichtlich der Konkurrenzfähigkeit mit siliziumbasierten Solarzellen relevant. Ein Stabilitätsverlust der Zelle kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Auf der Molekular-Ebene ist die zuvor genannte Beständigkeit des Farbstoffes von Bedeutung. Ruthenium-basierte Zellen liefern eine Lebensdauer von zwanzig oder mehr Jahren.
Ein weiterer Punkt ist die Resistenz gegen hohe Temperaturen. Farbstoffsolarzellen bieten Temperaturresistenzen bis zu 80°C. Ein realistischer Temperaturbereich, dem die Module während des Betriebs ausgesetzt sind, liegt zwischen -10°C bis 70°C.
Auf der Zell-Ebene muss die Funktionstüchtigkeit und das Zusammenspiel aller Einzel-Komponenten berücksichtigt werden. Herausforderungen ergeben sich derzeit noch in der Langlebigkeit der Dichtungen. Lässt die Dichtung nach, kann Wasser in die Zelle eindringen, was zu Versagen führt. Bei großen Modulen kann so teilweise Korrosion auftreten (Harikisun, R., Desilvestro, H. 2010).

2.4 Derzeitige Anwendungen von Farbstoffsolarzellen

Aktuell forschen mehrere Unternehmen an Farbstoffsolarzellen und deren Verbesserung, vor allem hinsichtlich des Wirkungsgrades.
Bisher gibt es unterschiedliche Ansätze zu Entwicklungskonzepten und Einsatz der Grätzelzelle.

- Die Fraunhofer-Institute IAO und ISE sind in einem größerem Projekt namens ColorSol - Nachhaltige Produktinnovationen durch Farbstoffsolarzellen - involviert (GIPV Gebäudeintegrierter Photovoltaik 2008). Ihnen gelang es ein Farbstoffsolarmodul mit einer Größe von 60 cm·100 cm zu entwickeln (siehe Abbildung 6a). Dieses soll zukünftig unter anderem als Gebäudefassade, für PV-Glazing (Überdachungen, Wintergärten) oder als PV-Fenster eingesetzt werden (Fraunhofer ISE 2007). Durch die Variation der Farbe der Zelle bieten sich auch hinsichtlich der Gestaltung von Gebäuden neue Möglichkeiten (siehe Abbildung 6b).
  Als Farbstoff wird ein auf Ruthenium basierender Komplex verwendet, mit dem bisher maximale Wirkungsgrade von 12% erzielt werden konnten (Hinsch, A., et al. 2011).



(a) **(b)**

Abbildung 6: (a) Bisher größte Farbstoffsolarzelle (Fraunhofer ISE 2007) **(b)** Solarmodul mit unterschiedlichen Farbstoffen (Fraunhofer ISE 2007)

- Die Firma G24 innovations stellt abwickelbare Farbstoffsolarzellen für Innen- und Außenanwendungen her (siehe Abbildung 7). Durch die Materialwahl, Kunststoff statt Glas, zeichnet sich die Zelle durch Flexibilität gegenüber anderen Zellen aus. Daraus ergibt sich ein einfacher Transport bzw. eine gute Lagerungsmöglichkeit der Module, eine leichte Montage sowie eine gewisse Robustheit gegen Bruch. Die bekannten Anwendungen an Fassaden, auf Dächern oder in Glas integriert, werden durch diese Farbstoffsolarzelle erweitert. Der Einsatz an Kleidungsstücken oder Rucksäcken und Taschen, um kleine elektronische Geräte wie Handys oder MP3 Player unterwegs aufzuladen (Harvesting), wird dadurch ermöglicht.

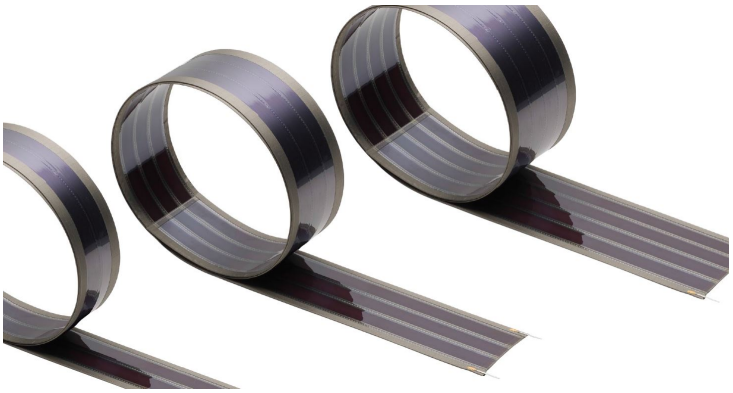


Abbildung 7: Aufrollbare Farbstoffsolarzellenmodule (G24innovations 2013)

- Einem Forschungsteam der Monash University und der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, sowie der Universität Ulm gelang eine Verbesserung von p-Typ-Farbstoffsolarzellen[5], durch einen anderen Redoxmediator. Dieser basiert auf einem Kobaltkomplex und erreichte eine Energieumwandlungseffizienz von 1,3 % von bisher nur 0,41%.
  Die Monash University Melbourne erforscht zudem eine Kombination von n- [6] und p-Typ-Farbstoffsolarzellen zu einer Tandemzelle. Diese enthält farbstoffsensibilisierte Photoanode und Photokathode. Dazu sind effiziente Photokathoden (z.B. aus Nickeloxid) notwendig (Daeneke, T. et al. 2011).

- Das Unternehmen Dyesol aus Australien arbeitet an der Industrialisierung und Kommerzialisierung der Farbstoffsolarzellentechnologie. In Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Projektpartnern werden neue Anwendungsgebiete erschlossen. In Kooperation mit dem Glashersteller Pilkington beispielsweise werden Solarzellen Fenster erforscht und produziert.
  Des Weiteren werden die Einzelkomponenten wie unter anderem die Farbstoffe, Tiatandioxidpasten oder neue Dichtmittel untersucht oder neu entwickelt, um die Qualität der bisherigen Zellen zu steigern.

- Zwei Forscher der Universität Basel entwickelten einen Farbstoff auf Zinkbasis. Im Gegensatz zu Ruthenium (ca. 2990 €\ Kilo) ist Zink ein preisgünstiges Material (6,30 €\ Kilo). Die neuen Erkenntnisse sollen zur Entwicklung von Farbstoffsolarvorhängen genutzt werden, die tagsüber Energie speichern und abends als Beleuchtungselement dienen.

Die Farbstoffsolarzelle, welche in dem betrachteten Anwendungsszenario eingesetzt werden soll, wird in Punkt 3.3 näher erläutert.

[5] Bei p-Typ Farbstoffsolarzellen befinden sich ein p-Halbleiter mit dem entsprechenden Farbstoff auf der Photokathode. Es wird eine positive Ladung übertragen, gegensätzlich zu n-Typ-Farbstoffsolarzellen, die eine negative Ladung übertragen. Der angeregte Farbstoff zieht Elektronen aus dem Valenzband des Halbleiters.

[6] Farbstoffsolarzelle, welche wie in Punkt 2.2 funktioniert und aufgebaut ist

2.5 Gegenüberstellung einer bionischen und konventionellen Solarzelle

Tabelle 1 zeigt auf, dass die bionische Grätzelzelle genauso gute Eigenschaften aufweist, wie die konventionelle Solarzelle. In einigen Punkten wie der Herstellung, bietet sie sogar Vorteile gegenüber siliziumbasierten Solarzellen.

Tabelle 1: Gegenüberstellung einer Farbstoffsolarzelle und einer konventionellen Solarzelle anhand verschiedener Merkmale

Merkmal	**Bionische Grätzelzelle**	**konventionelle Solarzelle** (auf Silizium-Basis)
Wirkungsgrad	bis 12% (O Regan, B., Graetzel, M. 1991)	um 20% bei Solarzellenmodulen auf Basis von kristallinem Silizium / unter Verwendung von amorphem Silizium ist der Wirkungsgrad geringer (Bührke, T., Wengenmayr, R. 2011)
Umweltfreundlichkeit	ausschließlich Verwendung umweltfreundlicher Materialien und Chemikalien	bei der Herstellung der Zelle und dem Abbau des Roh-Siliziums werden giftige Chemikalien verwendet. Die ablaufenden Prozess sind wahrscheinlich umweltschädlich. Es sind keine Angaben bekannt, wie viel davon in die Umwelt gelangt.
Kosten	Günstige Materialien, hoher Materialkostenfaktor ist das Ruthenium (aktuell ca.2990 €\kg)	hochreines Halbleitermaterial und die Herstellung der Zelle sind teuer/ (für den Verbraucher: 1€/Watt)
Herstellung	Günstige, einfache Herstellung durch Siebdruck, Glassinthertechnik, Roll-to-roll- Verfahren (Polymerbasis) (Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit; Beucker, S. et al. 2007)	Aufwendige und teure Herstellung durch Silizium- und Dünnschichttechnik z.B. Verdampfung im Vakuum - hohe Temperaturen und reines Material notwendig (Wark, M., Oekermann, T. 2009)
Lebensdauer	10-20 Jahre je nach Belastung (auf Molekularebene mehr als 20 Jahre) (Harikisun, R., Desilvestro, H. 2010)	bis 25 Jahre je nach Belastung
Energetische Amortisationszeit	ca. 29,8 Monate (in Deutschland unter Standradbedingungen)/ 15 Monate (Südeuropa) (Fraunhofer ISE 2007)	ca. 60 Monate (Deutschland) (Fraunhofer ISE 2007)/ je nach Kristallisationszustand des Siliziums veränderbar
Anwendungsbereiche	Dächer, Fassaden, Einbau in Fenstern, etc. → große Flächen, einfachere Ausrichtung zur Sonne und Mehrfachfunktion, wie Gestaltung oder Blendeschutz/ keine direkte Ausrichtung zur Sonne notwendig	vorwiegend auf Dächern oder in Solarparks mit Gestellen/ Ausrichtung zur Sonne notwendig

Merkmal	**Bionische Grätzelzelle**	**konventionelle Solarzelle** (auf Silizium-Basis)
Abmaße	Modulbauweise; größte, bisher hergestellte Zelle 60cm·100cm (Hinsch, A., et al. 2011)	variable, genormte Größen der Module je nach Kundenwunsch z.B. 1660mm·990mm mit 210-250 Watt Leistung
Speicherung der produzierten Energie	Speicherabhängig Bsp. Batterien	Speicherabhängig Bsp. Batterien
Design	Gestaltungsmöglichkeiten in Farbe, Muster und Transparenz → Architektur z.B. Überkopfverglasung	keine/ wenig gestalterische Variationsmöglichkeiten
Stabilität	hohe thermische Stabilität (bis 65°C Temperaturunabhängig) Einsatzbereich von -10°C bis 70°C (Bührke, T., Wengenmayr, R. 2011)/ keine verminderte Leistungsfähigkeit bei diffusen Lichtverhältnissen	bei höheren Temperaturen Wirkungsgradverluste- optimale Modultemperatur 25°C; ca 0,5% Lesistungsminderung pro 1°C Zunahme/ Beeinträchtigungen bei diffusem Licht
Recycling	Momentan noch keine geeigneten Recyclingverfahren	Recycling in ungiftige Bestandteile - Recyclingverfahren weißt positive Energiebilanz auf
Zukunftspotential	sehr hoch durch seine vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und die geringen Kosten	hoch durch immer neue Technologien

Die Gegenüberstellung ist in dem Punkt Kosten nicht direkt vergleichbar, da die Grätzelzelle noch nicht auf dem Markt ist. Die Kosten pro Watt können dementsprechend nicht angegeben werden.
Der Punkt Amortisationszeit ist herauszustellen. Es ist beachtlich, dass die bionische Farbstoffsolarzelle die halbe Amortisationszeit einer konventionellen Zelle besitzt. Trotz des geringen Wirkungsgrades ist die Zelle also, durch die energiesparenden Herstellungsmethoden, wirtschaftlich.

3 Betrachtetes Szenario

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit bionischer Grätzel-Zellen als erneuerbare Energieform wird hier ein Anwendungsszenario betrachtet. Es wird untersucht, ob sich eine Eigenstromversorgung eines Einfamilienhaushaltes mit Farbstoffsolarzellen realisieren lässt und ob es so in naher Zukunft eine Alternative zu siliziumbasierten Solarzellen geben wird.

3.1 Beschreibung des Anwendungsszenarios

Im Folgenden wird untersucht, ob es möglich ist, den Eigenstromverbrauch eines Einfamilienhauses, mithilfe von Farbstoffsolarzellen, im Sommer ohne zusätzliche Energiequellen zu decken.
Da die bionische Grätzelzelle sich zu Beginn der Markteinführung befindet und weiteren Optimierungsprozessen unterliegt, ist hier vorerst die Betrachtung des Zeitraums Sommer vorgesehen. In diesen Monaten wird weniger Strom benötigt als im Winter. So bietet sich eine erste Machbarkeitsstudie für den Einsatz der Farbstoffsolarzellen in den Sommermonaten an. Die Applikation in einem Einfamilienhaus gehört zur Kategorie Eigenstromversorgung und ist als Anwendungsszenario beachtenswert. Viele Hausbewohner entscheiden sich dazu eine PV-Anlage zu installieren, um unabhängiger von den Stromanbietern zu sein. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob es möglich ist, zukünftig PV-Anlagen um Module der bionischen Grätzelzelle zu erweitern oder eine gänzliche Eigenstromversorgung durch diese Module zu erwirken.

Der benötigte Strom soll dabei durch flächenmäßig angepasste Farbstoffsolarmodule produziert und in einer entsprechend dimensionierten Lithium-Batterie gespeichert werden. Die Batterie dient zur Zwischenspeicherung des Stroms vor dem Verbrauch durch die Hausbewohner. Es wird davon ausgegangen, dass das Einfamilienhaus von einer vierköpfigen Familie bewohnt wird. Der produzierte Strom steht den Hausbewohnern über die Lithium-Ionen Batterie zur Verfügung. Eine Netzeinspeisung ist hier nicht vorgesehen.
Bei diesem Projekt steht vor allem die energetische Umsetzbarkeit im Vordergrund. Des Weiteren ist jedoch zu berücksichtigen, zu welchem Preis eine Eigenversorgung realisierbar ist.
Das Szenario wird auf das Jahr 2012 bezogen. So können, nach Betrachtung eines Referenzjahres, verallgemeinerte Aussagen getroffen werden. Einstrahlungen und Sonnenstunden des Sommers 2012 gehen gemittelt in die Berechnung ein, da hier nur eine Überschlagsrechnung erfolgen soll (siehe Punkt 3.4). In der Sommerzeit wird zwischen dem Verbrauch an Wochentagen und dem Wochenende differenziert, um eine möglichst realitätsnahe Betrachtung zu gewährleisten.

3.2 Randbedingungen

Um eine Dimensionierung der Fläche an Farbstoffsolarzellen und der Lithium-Ionen-Batterie vornehmen zu können, müssen vorerst die Randbedingungen für das betrachtete Szenario festgelegt werden.

Die VDI-Richtlinie 4655, sowie eine Richtlinie der VDEW, enthält Festlegungen, die bei der Betrachtung des Anwendungsszenarios, von Bedeutung sind.

- **Einfamilienhaus**: Wohngebäude mit bis zu 3 Wohneinheiten und einer gemeinsamen Heizungsanlage, Kategorie H0

- **Jahreszeit**:
  Sommer: 15.5 bis 14.9 (123 Tage) - kalendarisch
- **Wocheneinteilung**: Samstag, Sonntag, Werktag

Der produzierte Strom ist von der Strahlungsleistung, d.h. Intensität der Sonne in Deutschland abhängig (Renewable Energy Concepts 2011). Die Angaben beziehen sich jeweils auf einen Sommertag.

- Sonnenschein (klar/ leicht diffus) $\rightarrow 600 - 1000 \frac{W}{m^2}$
- Sonnenschein bei leichter bis mittlerer Bewölkung $\rightarrow 300 - 600 \frac{W}{m^2}$
- stark bewölkt bis nebelig-trüb $\rightarrow 100 - 300 \frac{W}{m^2}$

Der Stromverbrauch eines durchschnittlichen Jahres liegt bei etwa 3500 kWh (Lippert, M., Schuh, H. 2008). Auf dieser Grundlage wurden weitere Berechnungen zum Stromverbrauch eines Einfamilienhauses in NRW gemacht (siehe Punkt 3.4).

Die Definition eines Einfamilienhaus, wird nach VDI 4566 festgelegt. Die Abgrenzung des Zeitraumes Sommer (123 Tage), sowie die Wochenunterteilung stammen aus den VDEW-Richtlinien, so müssen keine Tagesdurchschnittstemperaturen berücksichtigt werden (VDI). Für das Jahr 2012 beinhaltet dieses Zeitintervall 89 Arbeitstag, 17 Samstage und 17 Sonntage. Urlaubstage und Feiertage werden nicht berücksichtigt, da diese von Jahr zu Jahr variieren.
Der Bedeckungsgrad ist, bei der Farbstoffsolarzelle im Gegensatz zu siliziumbasierten Solarzellen nicht primär relevant, da der Wirkungsgrad nahezu unabhängig vom Einfallswinkel des Lichtes ist. Das bedeutet, dass die Zelle auch bei diffusem Licht [7] arbeitet und nur einen kleinen Teil seines Wirkungsgrades verliert, sobald keine direkte Sonneneinstrahlung mehr stattfindet.

3.3 "Steckbrief" der verwendeten Farbstoffsolarzelle

Im betrachteten Anwendungsszenario wird sich auf eine vom Fraunhofer ISE entwickelte Farbstoffsolarzelle bezogen, die noch nicht auf dem Markt verkäuflich ist. Die Solarzelle, die in diesem Szenario betrachtet wird hat folgende Eigenschaften:

- **Leistung**: Die Leistung ist von der Intensität der Sonneneinstrahlung abhängig. So ergibt sich bei einer durchschnittlichen Einstrahlung von 700 $\frac{W}{m^2}$ eine Leistung von $P = 71 \frac{W}{m^2}$ (Hinsch, A., et al. 2011).
- **Lebensdauer**: mindestens 10 Jahre
- **Abmaße**: relative Nutzfläche 10cm·10cm=100^{2}m
- **Wirkungsgrad**: 7,1%
- **Zellbestandteile**: siehe Punkt 2.2
- **Farbstoff**: ein auf Ruthenium-Komplex basierender Farbstoff
- **Energetische Amortisationszeit**[8]: 29,8 Monate

[7] Der Strahlungsanteil, der an Wolken, Dunst, Nebel oder Schmutzteilchen gestreut, reflektiert oder gebrochen wird und nicht gradlinig auf die Erde trifft

[8] Zeitraum in dem die Nutzung von Farbstoffsolarzellenmodulen soviel Nutzungsenergie bereitgestellt hat, wie für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung aufgewendet werden muss

- **Temperaturtoleranz**: -40 bis 85°C
- **sonstige Eigenschaften**: Arbeitet bei einen breitem Spektrum von Lichtverhältnissen (auch diffuses Licht)
- **Ausrichtung**: nicht relevant, kann an Hausfront bzw. Dach zur Sonne angebracht werden
- **Standort**: Deutschland (NRW)

Diese Farbstoffsolarzelle wurde vom Fraunhofer ISE dazu verwendet, die bisher größte Farbstoffsolarzelle zu entwickeln. Dazu wurde die 10cm·10cm große Zelle als Muster verwendet und auf eine Größe von 60cm·100cm hoch skaliert (Hinsch, A., et al. 2011). Durch diese Übertragung der Eigenschaften ist ein funktionsfähiger Prototyp entstanden.

3.4 Dimensionierung von Farbstoffsolarzellenmodulen und der Lithium-Ionen-Batterie

Im folgenden werden die Farbstoffsolarzellen und die Batterie dimensioniert, indem vorerst die elektrische Leistung pro Quadratmeter an Solarzelle errechnet wird. Dann muss der Stromverbrauch der vierköpfigen Familie ermittelt werden, um die benötigte Leistung, welche mindestens produziert werden muss, abschätzen zu können. Aus diesen Angaben wird der Bedarf an Quadratmetern der Farbstoffsolarmodule ermittelt. Die Quadratmeterzahl kann daraufhin in Relation zu einem ausgewählten Musterhaus gesetzt werden. Schließlich erfolgt die Dimensionierung der Batterie, sowie die Abwägung der Kosten.

3.4.1 Dimensionierung der Solarzellen

Die **elektrische Leistung** P der Farbstoffsolarzelle, in [$\frac{W}{m^2}$], wird aus dem bekannten Wirkungsgrad $[\eta]$ und der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung I_S berechnet.

$$\eta = \frac{P_{elektrisch}}{I_s} \tag{5}$$

$$\eta \cdot I_s = P_{elektrisch} \tag{6}$$

Als **Sonneneinstrahlung** wird ein durchschnittlicher Wert von 700$\frac{W}{m^2}$ angenommen. Dieser bezieht sich auf Wetterdaten des Kreises Unna. Betrachtet wird hier die horizontale Globalstrahlung des Jahres 2012 in den Sommermonaten.

$$P_{elektrisch} = 0,071 \cdot 700\frac{W}{m^2} = 49,7\frac{W}{m^2} \tag{7}$$

Tabelle 2 bietet eine Übersicht, wie sich die elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Lichtintensität ändert. Als Berechnungsgrundlage dient die Formel 6.

Tabelle 2: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität

Parameter	**Symbol**	**Licht-Intensität**			**Einheit**
		0,5	**0,7**	**1,0**	
Maximale Leistung	P_{max}	35,5	49,7	71,0	$\frac{W}{m^2}$
Betriebstemperatur	T_{op}	10-50			°C
Temperaturresistenz	T_R	-40-85			°C
Wirkungsgrad	η	7,1			%

Eine Lichtintensität von 1 entspricht 1000$\frac{W}{m^2}$. Die maximale Leistung bezieht sich auf einen Quadratmeter an Farbstoffsolarzellen.
So ergibt sich eine Leistung von rund 50$\frac{W}{m^2}$. Die Abmaße eines Moduls sind wie im Steckbrief aufgelistet 10cm·10cm. Um einen Quadratmeter Fläche abzudecken, sind 100 Einzelzellen notwendig.
Es kann also festgehalten werden, dass der Verbund aus 100 Einzelzellen bei einer Einstrahlung von 700$\frac{W}{m^2}$ rund 50$\frac{W}{m^2}$ produziert.

Berechnung des **Stromverbrauchs** des Einfamilienhauses:
Wie oben beschrieben, verbraucht ein Haushalt im Jahr durchschnittlich 3500kWh. Dabei ist zwischen den Sommer- und Wintermonaten zu unterscheiden, da im Winter mehr Strom verbraucht wird. In der Sommerzeit kann für das Jahr 2012 ein Verbrauch von 1002,98 kWh berechnet werden. Dies erfolgt durch das Aufsummieren der Verbrauchsdaten je 15 Minuten für jeden Sommertag. Die Summe wird mit 3,5 multipliziert und so auf einen Gesamtverbrauch von 3500 kWh hoch skaliert. Die Notwendigkeit des Hochskalierens besteht deshalb, weil die genormten Lastprofile der VDEW und somit auch das verwendete synthetische Lastprofil von e.on einem Jahresverbrauch von 1000kWh entsprechen. Die verwendeten Werte beziehen sich auf veröffentlichte Daten eines synthetischen Lastprofils[9] von 2012 des Stromanbieters e.on (e.on 2012). Das Lastprofil bezieht sich jedoch nicht allein auf einen Einfamilienhaushalt, sondern auf eine Mittlung zwischen mehreren Haushalten (H0), wie Ein-, Mehrfamilienhäusern und Einpersonenhaushalten.
Um sicherzustellen, dass zu jeder Tageszeit hinreichend viel Strom in der Batterie vorhanden ist, wird hier der Tag mit dem höchsten Verbrauch betrachtet. Im Sommer 2012 war das Samstag der 19. Mai 2012 mit einem Verbrauch von 9,38 kWh. Dieser Tag kann ebenfalls wie der Gesamtverbrauch im Sommer, durch das Aufsummieren der Verbrauchsdaten je 15 Minuten ermittelt werden. Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass die Batterie nie vollständig entladen wird, da ihre Lebensdauer maßgeblich davon abhängt.
In der folgenden Abbildung 8 ist der synthetische Lastgang für den 19. Mai 2012 dargestellt. Auf der x-Achse ist die Uhrzeit aufgetragen und die y-Achse gibt den Verbrauch in kWh an. Es ist zu erkennen, dass sich vor allem um die Mittagszeit (12 Uhr bis 1 Uhr), sowie in den Abendstunden (19 Uhr bis 20 Uhr) zwei Verbrauchsspitzen bilden. Diese müssen über die Lithium-Ionen-Batterie kompensiert werden.

[9] Ein aus gemessenen Lastgängen gewonnenes und mit Hilfe von Durchmischung verschiedener Verbrauchstypen verallgemeinertes Lastprofil

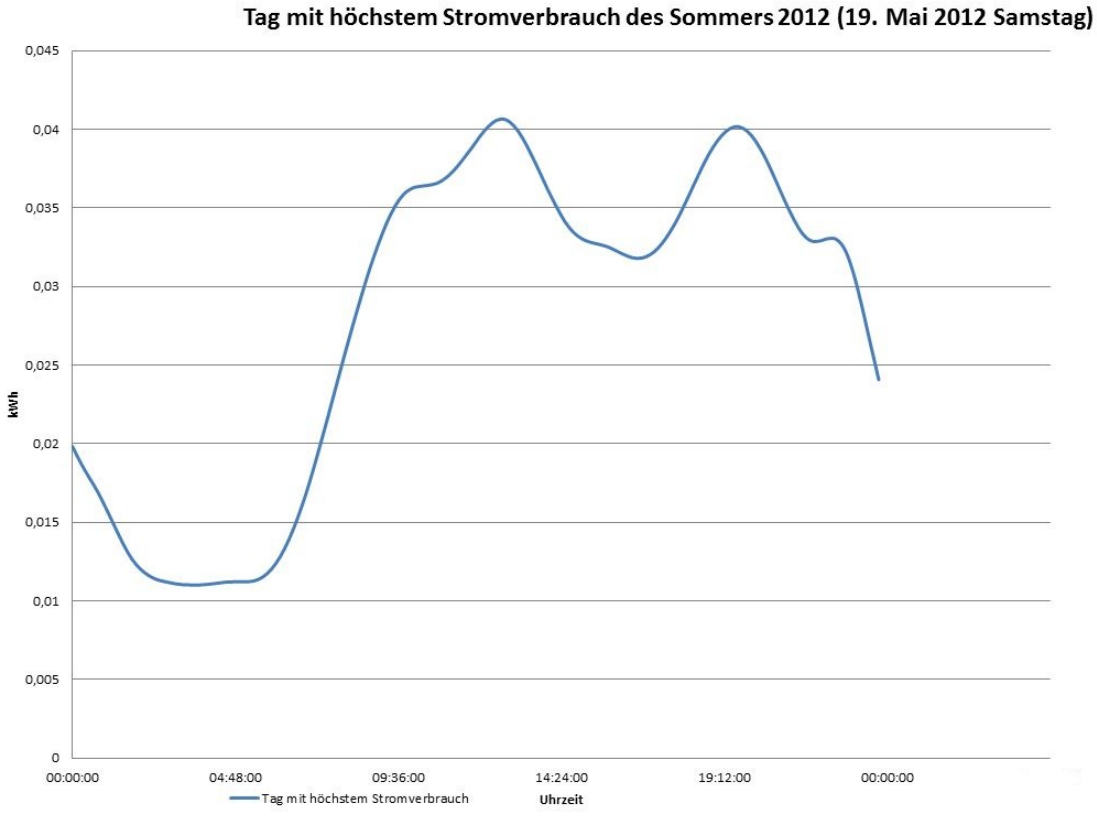


Abbildung 8: Tageslastprofil des 19. Mai 2012

Damit auch die eben genannten Verbrauchsspitzen abgedeckt werden können, wird ein Sicherheitsfaktor von 20% an Überproduktion des eigentlichen Verbrauchs festgelegt.
Bei einem gerundeten Verbrauch von 9,4 kWh ergibt sich ein Wert von ca. 1,9 kWh. Für den gesamt Tagesverbrauch errechnet sich:

$$9,4kWh + 1,9kWh = 11,3kWh = 11300Wh \tag{8}$$

Die durchschnittlichen **Sonnenstunden** eines Sommertages für den Kreis Unna betragen 6,4 Stunden.
Für die Überschlagsrechnung wird mit durchschnittlichen Sonnenstunden und mit der durchschnittlichen Einstrahlung gerechnet.
Die am Tag benötigte Leistung der Hausbewohner wird über den Quotienten des Tagesverbrauchs und den durchschnittlichen Sonnenstunden errechnet.

$$11300Wh : 6,4h = 1765,63W \tag{9}$$

Für die Berechnung der Fläche $[m^2]$ an Farbstoffsolarmodulen werden die notwendige Leistung und die Leistung eines Moduls ins Verhältnis gesetzt:

$$\frac{Leistung_{notwendig}}{Leistung_{Modul}} = Bereich[m^2] \tag{10}$$

$$\frac{1765,63W}{49,7\frac{W}{m^2}} = 35,53m^2 \tag{11}$$

Es werden also 36 m^2 Farbstoffsolarzellen gebraucht, um den Tageshöchstverbrauch

an Strom im Sommer 2012 am 19. Mai 2012 zu decken. Das entspricht 3600 Einzelzellen, welche untereinander in Reihe geschaltet sind.

3.4.2 Betrachtung eines Musterhauses

Die Fläche der Solarmodule muss in Relation zur Außenfläche des **Hauses** bzw. des Daches gesetzt werden. In diesem Anwendungsszenario wird ein Mustereinfamilienhaus angenommen (siehe Abbildung 9) (Viebrockhaus 2012).

Abbildung 9: Musterhaus (Viebrockhaus 2012)

Die Grundfläche des Hauses beträgt 9,02m·9,52m, womit sich eine Wohnfläche von 119,37 m^2 ergibt. Die Neigung des Satteldaches liegt bei einem Winkel von 45°.
Es ist zu beachten, dass die Montage nicht auf dem Dach des Einfamilienhauses erfolgen muss. Denkbar wäre auch eine Anbringung an die zur Sonne gerichtete Hausfassade oder eine Integration in Fensterschreiben (siehe Abbildung 10a und 10b). Bei diesem Musterhaus bietet sich die große Dachfläche jedoch an.

(a) **(b)**

Abbildung 10: (a) Farbstoffsolarzellen in ein Fensterglas integriert (Fraunhofer ISE 2007) **(b)** Integration in Glasschreiben eines Designerhauses (Das Energieportal 2013)

Bei genauerer Betrachtung des Verbrauchs muss zusätzlich zwischen **Werktag** und **Wochenendtag** unterschieden werden.
Als Beispiel für ein typisches Wochenlastprofil wird die Woche mit dem höchsten Stromverbrauch im Sommer 2012 (21. Mai bis zum 27. Mai) ausgewählt.
Die x-Achse zeigt den jeweiligen Tag von Montag bis Sonntag an und auf der y-Achse

ist der entsprechende Stromverbrauch in kWh abgetragen (siehe Abbildung 11).

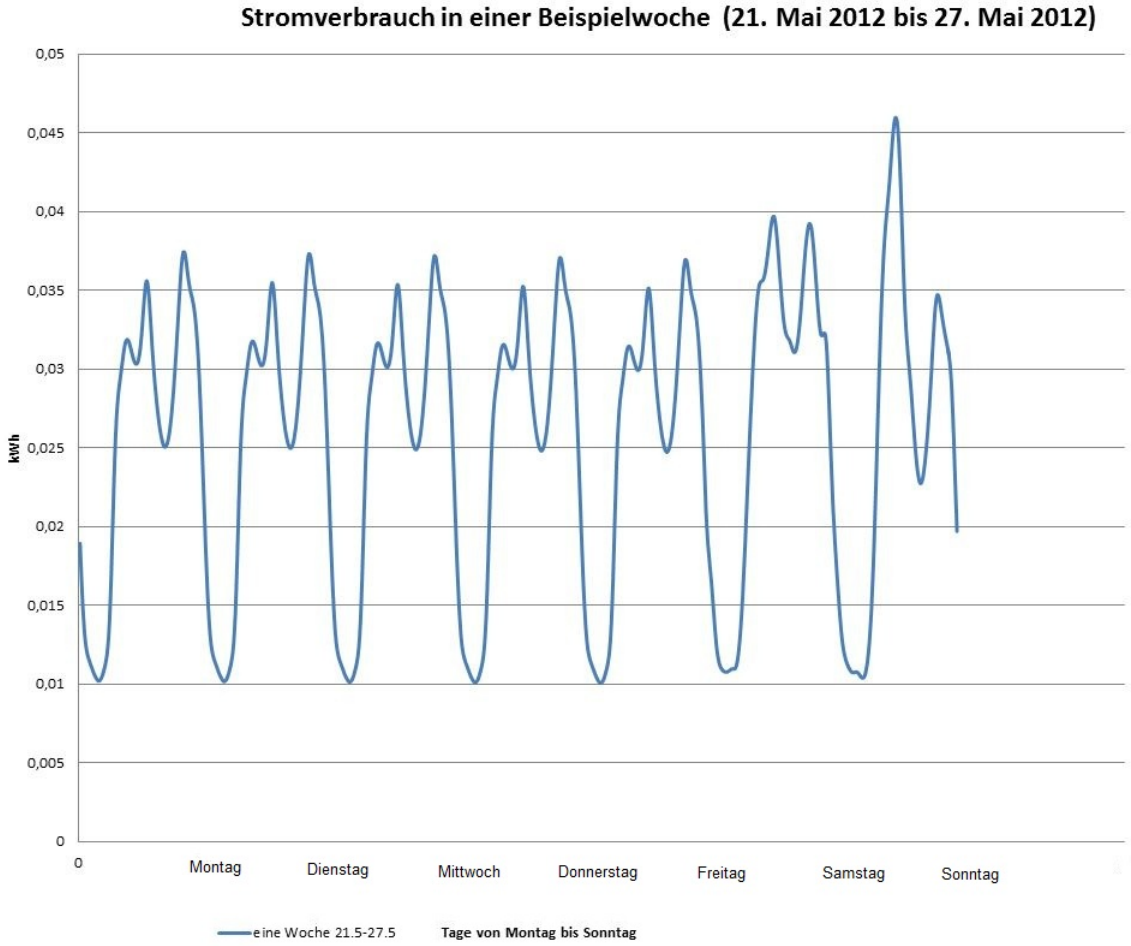


Abbildung 11: Synthetischer Lastgang einer Beispielwoche aus dem Sommer 2012

In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass an einem Wochentag weniger Strom verbraucht wird, als an einem Samstag. Sonntags liegt die Verbrauchsspitze um die Mittagszeit höher als am Wochentag oder am Samstag. Vom Gesamtverbrauch unterscheidet sich der Sonntag nicht vom Wochentag, die Fläche unter der Verbrauchsfunktion ist gleich (e.on 2012). Der Verbrauchspeak muss von der Batterie ausgeglichen werden.
Die Zielsetzung der Dimensionierung von Farbstoffsolarzellen und dementsprechend auch der Batterie besteht darin, während der Woche überschüssig produzierten Strom in die Batterie einzuspeichern, um ein Reservoir für das Wochenende zu schaffen.
Dazu wird eine Rückrechnung durchgeführt, die Aussage über die Überproduktion liefern soll. Diese bezieht sich auf die Beispielwoche:

$$36m^2 \cdot 49,7\frac{W}{m^2} = 1789,2W \tag{12}$$

$$1789,2W \cdot 6,4h = 11450,88Wh = 11,45kWh \tag{13}$$

Es werden also 11,45 kWh am Tag produziert.

- Verbrauch pro Werktag: 8,59 kWh
  Überschuss: 2,86 kWh pro Tag also 14,3 kWh an allen 5 Tagen

- Verbrauch Samstag: 9,16 kWh
  Überschuss: 2,29 kWh
- Verbrauch Sonntag: 8,6 kWh
  Überschuss: 2,85 kWh

Der Gesamtverbrauch liegt bei 60,71 kWh und die Produktion beträgt 80,15 kWh. Es findet also eine Überproduktion von 19,44 kWh statt, welche in die Batterie eingespeist werden.

3.4.3 Dimensionierung der Lithium-Ionen-Batterie

Die Größe der Batterie ist von der Leistung abhängig, welche eingespeichert werden soll.
Die 11,45 kWh, die täglich produziert werden, entsprechen 80% der Kapazität der benötigten Batterie. Diese Annahme wird getroffen, da die Batterie nie vollständig auf- bzw. entladen werden sollte. Der Ladezustand sollte 10% nicht unterschreiten und 90% nicht überschreiten (Photovoltaik-Web 2012).

$$14,31kWh \mathrel{\widehat{=}} 100\% \tag{14}$$

Das bedeutet, die Batterie muss bei einer gemittelten Sonneneinstrahlung von 700$\frac{W}{m^2}$ für eine Speicherkapazität von 14,31 kWh ausgelegt sein.

Bei höheren Einstrahlungswerten im Sommer soll der Speicher trotzdem in der Lage sein, den produzierten Strom zu speichern.
Es wird eine Einstrahlung von 1000$\frac{W}{m^2}$ und 10 Sonnenstunden angenommen, somit ergibt sich eine maximale Stromproduktion von:

$$0,071 \cdot 1000\frac{W}{m^2} = 71\frac{W}{m^2} \tag{15}$$

$$36m^2 \cdot 71\frac{W}{m^2} = 2256W \tag{16}$$

$$2256W \cdot 10h = 25560Wh = 25,56kWh \tag{17}$$

Die verwendete Lithium-Ionen Batterie müsste theoretisch, um den gesamten produzierten Strom zu speichern, für eine Speicherkapazität von 25 kWh ausgelegt sein. Da diese Extrema jedoch nur vereinzelt vorkommen, ist eine Dimensionierung in dieser Größenordnung aus Kostengründen nicht sinnvoll.
Die üblichen Größen von Batterien für PV-Hausanwendungen liegen im Bereich von 8,8 kWh bis 13,2 kWh. Es ist zu beachten, dass nicht nur eingespeichert, sondern gleichzeitig auch immer wieder Strom aus der Batterie ausgespeichert wird z.B durch den Stromverbrauch eines Kühlschrankes oder anderen Elektrogeräten.
Es ist ausreichend eine Lithium-Ionen-Batterie mit 11 kWh Speicherkapazität zu erwerben (weiter Anmerkungen siehe Kosten).

3.4.4 Kosten

Eine Kostenbetrachtung der Farbstoffsolarmodule ist hier nicht direkt möglich, da die ausgewählten Zellen noch nicht im Handel verfügbar sind. Diese wurden zu Testzwecken vom Fraunhofer ISE hergestellt und befinden sich noch nicht in Produktion.

Eine Option ist es, die Kosten vergleichsweise für eine PV-Anlage dieser Größenordnung abzuschätzen. Das ist beispielsweise über einen Photovoltaik-Rechner möglich (Solaranlagen-Portal 2012). Folgende Parameter werden in der Berechnung berücksichtigt:

- Dachtyp: Satteldach
- Installationsfläche: 36m^2
- Dachneigung: 45°
- Dachausrichtung: nach Süden
- Dacheindeckung: Ziegel
- Postleitzahl: 46397 Bocholt
- Inbetriebnahme: Juni 2013

Die Eingaben beziehen sich auf das Musterhaus. Als Installationsfläche werden die errechneten 36m^2 angegeben.
Art und Größe der Dachfläche sind die Grundlage zur Berechnung der Nennleistung, aus der sich die Investitionskosten bestimmen lassen. Die Kosten können über aktuelle Durchschnittswerte des Branchenmagazins Photon ermittelt werden. Anhand der Postleitzahl wird die Sonneneinstrahlung am Ort der Installation bestimmt. Diese Daten werden vom European Commission Joint Research Centre bezogen.
Es ergeben sich folglich Investitionskosten von 7788€ und die jährliche Stromproduktion beträgt für diese PV-Anlage 3808,21 kWh (Solaranlagen-Portal 2012). Bei einem Anschluss ans Stromnetz kann über den Photovoltaik-Rechner zusätzlich die Einspeisevergütung für die entsprechende Region berechnet werden. Dies ist in diesem Szenario jedoch nicht der Fall.
Die Anschaffungskosten der Farbstoffsolarmodule werden sich davon unterscheiden. Anfangs wird die neue Technologie noch mit hohen Kosten verbunden sein, sich jedoch im Laufe der Zeit auf einen niedrigeren Preis einstellen und stabilisieren, da die Herstellung und die Materialien günstig sind (siehe Tabelle 1).

Zur Speicherung des Strom wird eine Lithium-Ionen-Batterie angeschafft. Diese ist beispielsweise beim Batteriehersteller Voltwerk in verschiedenen Größen erhältlich (demas Großhandel GmbH 2012):

- Voltwerk VS5 Hybrid 8,8kWh
  19985 €
- Voltwerk VS5 Hybrid 11,0kWh
  24580 €
- Voltwerk VS5 Hybrid 13,2kWh
  28850 €

Mit der Absicht den Stromverbrauch der Familie nur im Sommer zu decken, wäre hier eine Batterie mit 11 kWh Speicherkapazität auch aus Kostengründen ausreichend. Die Kosten liegen dann bei rund 24600 €. Vor allem in den Sonnenreichen Mittagsstunden kann während des recht hohen Verbrauchs trotzdem viel überschüssiger Strom eingespeichert werden, um ein Reservoir zu schaffen.

3.5 Diskussion

Da die Farbstoffsolarzelle sich noch am Ende des Forschungsstadiums befindet, ergibt sich die Problematik, eine geeignete Zelle für das Anwendungsszenario zu finden. Einige Firmen, wie G24 innovations, stellen Zellen für spezielle Anwendungen her, welche jedoch einen relativ geringen Wirkungsgrad haben. Die bisher größte Zelle von Fraunhofer ISE mit 60cm·100cm ist momentan noch nicht verkäuflich, sie existiert bis jetzt nur als funktionstüchtiger Prototyp auf der hier verwendeten Grundlage an 10cm·10cm Farbstoffsolarzellen (Hinsch, A., et al. 2011).
Des Weiteren stellte es sich als notwendig heraus, eine Überschlagsrechnung mit gemittelten Werten durchzuführen, da es im Rahmen der Projektarbeit, sowohl aus zeitlichen Gründen, als auch aus Gründen des Projektumfangs nicht möglich ist, Wetterdaten auszuwerten. Dies kann in einer anschließenden Bachelorarbeit stattfinden. So mussten beispielsweise die Sonnenstunden, sowie die Einstrahlung gemittelt werden.
Bei einem größeren Projektumfang könnte zusätzlich Urlaubs- beziehungsweise Feiertage mit berücksichtigt werden, um mit der Betrachtung möglichst realitätsnah zu bleiben. Dabei sollte auch kein synthetisches Lastprofil verwendet werden, sondern reale Daten, mit Verbrauchsspitzen. In dem synthetischen Lastprofil sind diese Extrema mit einer Glättung, mittels polynomischer Anpassung, bearbeitet worden (Lübke, N., et al. n.d.). In Abbildung 11 ist ein synthetisches Lastprofil dargestellt. Dieses Profil könnte in einer Weiterführung der Arbeit um die Leistung der Grätzelzelle ergänzt werden. Die Kurven des Verbrauchs und der Erzeugung des Stroms können daraufhin übereinander gelegt werden, um Aussagen über den Ladezustand der Batterie zu treffen. Solche Energieverteilungskurven sind auch bei Anwendungen in Kombination mit einem Anschluss an das Stromnetz von Bedeutung. So wird dargestellt wann die Versorgung von der Batterie übernommen wird beziehungsweise ein Bezug vom Stromnetz erforderlich ist.
Da bisher keine Messdaten der Farbstoffsolarzelle, über einen längeren Zeitraum, vorhanden sind, gestaltet sich dies jedoch als schwierig. Es müssten vorerst realistische Langzeitmessungen für das entsprechende Szenario durchgeführt werden.

3.6 Ergebnisse

Ergebnisse und daraus resultierende Schlussfolgerungen:
Die Überschlagsrechnung hat ergeben, dass eine Eigenstromversorgung im Sommer mithilfe von Farbstoffsolarmodulen möglich ist. Die benötigte Fläche von 36m^2 ist dabei gut an dem ausgewählten Musterhaus unterzubringen beispielsweise auf dem Dach oder an der nach Süden gerichteten Hausfront. Das Vorhaben ist also realisierbar.
Es stellt sich jedoch die Frage, wie aussagekräftig die Überschlagsrechnung letztendlich ist. Zum einen sollte in dem betrachteten Anwendungsszenario nur ein Einfamilienhaus untersucht werden. Der Datensatz des Sommers 2012 (e.on 2012) ist aber aus einem durchschnittlichen Verbrauch aller Haushalte, darunter auch Mehrfamilienhäuser und Einpersonenhaushalte, gemittelt. Es ist also festzustellen, dass der Stromverbrauch nicht speziell an einen Vier-Personen Haushalt angepasst und als synthetisches Lastprofil relativ ungenau ist. Das Gleiche gilt für die Sonnenstunden beziehungsweise die Einstrahlungswerte. Die Einstrahlungsintensität erreicht mittags ihren Höhepunkt und nimmt von da an wieder ab. In einem größerem Projekt müsste dies mit berücksichtigt werden. Es ist sinnvoll Daten mehrerer Jahre auszuwerten, um sicher zu gehen, dass Jahre geringerer oder höherer Einstrahlungen nicht verallgemeinert werden. Hier sollte jedoch die theoretische Machbarkeit herausgearbeitet werden und kann trotz Ungenauigkeiten belegt werden.
Trotz dieser unvermeidlichen Schätzungen ist es gelungen die Leistungsfähigkeit der Farbstoffsolarzelle und deren Potential aufzuzeigen. In naher Zukunft ist es, wie in der

Projektarbeit herausgearbeitet wird, durchaus möglich, Farbstoffsolarzellen für die Versorgung von Haushalten oder öffentlichen Gebäuden zu verwenden. Vor allem ist zu betonen, dass die bionische Grätzelzelle auch bei diffusen Lichtverhältnissen arbeitet und sich damit von den konventionellen Solarzellen absetzt. Ihr noch geringerer Wirkungsgrad kann dadurch kompensiert werden. Der Bedeckungsgrad wird aus diesem Grund nicht berücksichtigt. Der genaue Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen muss im Einzelfall je nach Zelle jedoch noch einmal in Versuchen ermittelt bzw. recherchiert werden.
Insgesamt kann festgehalten werden, dass die in der Projektarbeit erzielten Ergebnisse Grundlage für weitere Studien in diese Richtung sein könnten.

4 Fazit und Ausblick

4.1 Zusammenfassung/Fazit

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über Wirkweise und Technologie der Grätzelzelle. In einem Anwendungsszenario wurde die Einsetzbarkeit untersucht. Der Hauptteil befasst sich mit dem betrachteten Szenario, sowie der Dimensionierung der Gräzelzellen und der Lithium-Ionen-Batterie. Vorerst wird eine geeignete Zelle ausgewählt und ein Steckbrief erstellt. Zusätzlich müssen die Rahmenbedingungen aufgestellt werden. Durch eine Überschlagsrechnung wird demonstriert, dass für die Eigenstromversorgung eines Einfamilienhauses im Sommer 36m^2 Farbstoffsolarzellen und eine Batterie mit 11kWh Speicherkapazität benötigt werden.

Aus der Projektarbeit kann abschließend eine positive Bilanz gezogen werden. Das Vorhaben einer Machbarkeitsstudie zur Anwendung von Farbstoffsolarzellen für ein betrachtetes Anwendungsszenario war erfolgreich. Durch eine Überschlagsrechnung konnte aufgezeigt werden, dass es tendenziell möglich ist eine vierköpfige Familie in den Sommermonaten ohne zusätzliche Stromquellen zu versorgen. Die Kosten für die Solarmodule sind noch nicht abschätzbar. Aufgrund der niedrigen Herstellungskosten und der geringen Materialkosten ist es jedoch vorstellbar, dass die Module günstiger in der Anschaffung sind, als konventionelle Solarzellen. Ein Kostenfaktor bleibt die Anschaffung der Lithium-Ionen-Batterie, der jedoch auch bei einer konventionellen PV-Anlage zu berücksichtigen ist. Hervorzuheben ist hier noch einmal die geringe Amortisationszeit der bionischen Zelle. Mit 29,8 Monaten ist diese nur halb so groß wie bei konventionellen Solarzellen. Das ist als ein enormer energetischer Vorteil.
In den Ausarbeitungen ist keine Betrachtung der Winter- und Übergangsmonate mehr vorgesehen. Bei einer Versorgung in den Wintermonaten muss wahrscheinlich eine Unterstützung durch das regionale Stromnetz erfolgen.
Auch während der Sommermonate stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, zusätzlich zur Batterie eine Anbindung an das Stromnetz zu realisieren. An klaren Sommertagen könnte so überschüssig produzierter Strom (siehe Rückrechnung an Sommertagen höherer Einstrahlung), unter Vergütung, in das Stromnetz eingespeist werden, nachdem die Batterie ihren höchst Ladezustand erreicht hat.

4.2 Ausblick

Die Farbstoffsolarzelle weist ein hohes Potential für zukünftige Anwendungen auf. Jedoch muss noch intensiv an der Verbesserung des Wirkungsgrades geforscht werden, um die Grätzelzelle konkurrenzfähig zu konventionellen Solarzelle zu machen.
Ihr Vorteil liegt vor allem in der kostengünstigen Herstellung, sowie in der Vielfältigkeit

der Anwendungsbereiche, beispielsweise in Fensterscheiben integriert, und der damit verbundenen Unabhängigkeit vom Einfallswinkel des Lichtes.

Es ist wahrscheinlich, dass der Prototyp der bisher größten Farbstoffsolarzelle des Fraunhofer ISE in naher Zukunft als Produkt auf dem Markt erscheint. Das wäre ein großer Fortschritt in der Farbstoffsolarzellentechnologie, sodass die üblichen PV-Module um diese neue Technologie ergänzt werden können. Sowohl Firmen als auch Privathaushalte können dann diese Technik nutzen.
Schon jetzt wird an der Verbesserung der Zellen gearbeitet. Es sollen Recyclingverfahren für Farbstoffsolarmodule entwickelt werden, mit dem Ziel die Lebensdauer zu erhöhen. Außerdem wird dabei ein Augenmerk auf stabile, langlebige Dichtungen gelegt.

Das Zukunftspotential der Farbstoffsolarzelle ist groß. Die Chancen der bionischen Grätzelzelle stehen also gut, sich zukünftig auf dem Markt der regenerativen Energien zu etablieren und den Sektor der Solarenergie zu ergänzen. Schon heute (2013) existieren erste Produkte auf dem Markt: Kleine Farbstoffsolarzellen, die an Rucksäcken oder Kleidung befestigt werden, um Handys oder MP3 Player aufzuladen. Der Marktanteil ist noch klein, wird sich aber in Zukunft weiter ausprägen.
In Kombination mit konventionellen Energiespeicherlösungen wie Batterien ergeben sich große Einsatzmöglichkeiten. Es gibt bereits erste Versuche Farbstoffsolarzellen auf Papier aufzudampfen, mit dem Vorsatz irgendwann Solartapeten zu entwickeln.

Abbildungsverzeichnis

1 Querschnitt durch einen Chloroplasten (Hensel, L. 2013) 4
2 Strukturformel des Chlorophylls (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2002) 5
3 Lichtsammelkomplex (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2002) . . . 6
4 Sandwich-Aufbau einer Farbstoffsolarzelle (Fraunhofer ISE 2007) 7
5 Funktionsprinzip von Farbstoffsolarzellen 8
6 Designs von Farbstoffsolarzellen 9
7 Aufrollbare Farbstoffsolarzellenmodule (G24innovations 2013) 10
8 Tageslastprofil des 19. Mai 2012 17
9 Musterhaus (Viebrockhaus 2012) 18
10 Einsatzgebiet von Farbstoffsolarzellen in Fenstern 18
11 Synthetischer Lastgang einer Beispielwoche aus dem Sommer 2012 . . 19

Literatur

Bührke, T., Wengenmayr, R. (2011), 'Erneuerbare Energie-Konzept für die Energiewende; 3.Auflage'.

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit; Beucker, S. et al. (2007), 'Trends und Rahmenbedingungen für das Innovationssystem Fabstoffsolarzelle-Perspektive 2020'.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011), 'Das Energiekonzept und seine beschleunigte Umsetzung; Beschlüsse des Energiewendepakets vom Juni/Juli 2011'.
URL: *http://www.bmu.de/themen/klima-energie/energiewende/beschluesse-und-massnahmen/*

Daeneke, T. et al. (2011), 'Hight efficiency dye-sensitized solar cells with ferrocene-based electrolytes '.

Das Energieportal (2013), 'Dyesol: Farbstoffsolarzelltechnologie öffnet der Gebäudeintegrierten Photovoltaik neue Möglichkeiten '.
URL: *http://www.das-energieportal.de/typo3temp/pics/3a312f7d98.jpg*

demas Großhandel GmbH (2012), 'Angebot für Lithium-Ionen-Batterie'.

e.on (2012), 'Syntehtisches Lastprofil des Jahres 2012 in der Kategorie H0 '.
URL: *http://www.eon-westfalenweser.com*

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation; Lutz, A. et al. (Juli 2007), 'Projekt ColorSol; Umwelteinwirkungen der Farbstoffsolarzelle-Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffes'.

Fraunhofer ISE (2007), 'Projekt ColorSol'.
URL: *http://www.colorsol.de/einfuehrung/*

G24innovations (2013), 'G24i Dye Sensitized Solar Module for Outdoor Applications'.

Hafner, L. et al. (1997), 'Biologie heute SII'.

Harikisun, R., Desilvestro, H. (2010), 'Long-term stability of dye solar cells'.

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2002), 'Photosynthese'.
URL: *http://www.uni-duesseldorf.de/MathNat/Biologie/Didaktik/Fotosynthese/dateien/lsf.html*

Hensel, L. (2013), 'Lukopolis Biologie Chloroplast '.
URL: *http://www.lukashensel.de/biomain.php?biopage=chloropl*

Hinsch, A., et al. (2011), 'Worldwide first fully up-scaled fabrication of dye solar module prototypes '.

Jungbluth, A. (2010), 'Solarenergie:Nano-Photovoltaig nach Pflanzenart'.
URL: *http://www.nanotruck.de/treffpunkt-nanowelten/nanotechnologie-konkret/energie-als-zukunftsressource/energie-gewinnen-und-speichern/nanotechnologie-photovoltaik-mit-graetzel-zellen.html*

Lübke, N., et al. (n.d.), 'Entwicklung eines synthetischen Jahreslastprofils für Haushaltsabnahme aus Elt.-Versorgungsnetzen '.

Lippert, M., Schuh, H. (2008), 'Batterien als Energiespeicher zur Förderung von Photovoltik-Eigenverbrauch im Smart Grid der Zukunft-Das Sol-ion Projekt '.

Nazeeruddin, K., Baranoff, E., Grätzel, M. (2011), ‘Dye-sensitized solar cells: A brief overview’.

Nultsch, W. (2001), ‘Allgemeine Botanik; 11. Auflage’.

O Regan, B., Graetzel, M. (1991), ‘A low cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized collodial TiO2 films’.

Photovoltaik-Web (2012), ‘Lebensdauer einer Batterie ’.
URL: *http://www.photovoltaik-web.de/batteriesysteme-akkusysteme-pv/lebensdauer-batterien.html*

Quaschning, V. (2011), ‘Regenerative Energiesysteme; 7.Auflage’.

Renewable Energy Concepts (2011), ‘Renewable Energy Concepts ’.
URL: *http://www.renewable-energy-concepts.com/german/sonnenenergie/basiswissen-solarenergie/strahlung-wetter.html*

Solaranlagen-Portal (2012), ‘Solarrechner ’.
URL: *http://www.solaranlagem-portal.com/photovoltaik-rechner*

Universität Bayreuth (2012), ‘Triphenylmethanfarbstoffe ’.

Viebrockhaus (2012), ‘Edition 400 ’.
URL: *http://www.viebrockhaus.de/massivhaus/edition-400.html*

Wark, M., Oekermann, T. (2009), ‘Farbstoffsolarzelle- Solarstrom nach der Art der Photosynthese’.