

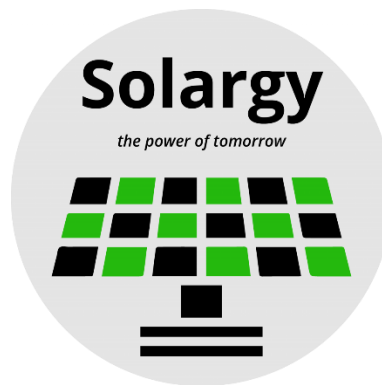


**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

BEING INSIDE

Interdisziplinäre Projektwoche BeING Inside 12.10. bis 16.10.2020

**Entwicklung eines Konzeptes zur Erzeugung,
Speicherung und Nutzung regenerativer Energien
in Schulen**



vorgelegt von Gruppe 9

Marcus Rothhaupt, Informationssystemtechnik 5. Sem.

Timo Zanzig, Wirtschaftsingenieurwesen 3. Sem.

Antonia Schneider, Wirtschaftsingenieurwesen 5. Sem.

Ronja Neumeister, Wirtschaftswissenschaften 3. Sem.

Ondrej Krpciar, Regenerative Energiesysteme 3. Sem.

Robert Mühlberg, Wirtschaftsingenieurwesen 3. Sem.

Julius Freitag, Mechatronik 5. Sem.

Clemens Tuma, Mechatronik 3. Sem.

I Vorbemerkung

Die gestellten Anforderungen der DREWAG/ ENSO wurden strukturiert und nach Themenbereichen und Teilaufgaben gegliedert, sodass eine Überführung in ein Pflichtenheft möglich wurde. Darin sind die erarbeiteten Realisierungsvorgaben niedergelegt. Es wurden Varianten verschiedener Speichergrößen entwickelt und die jeweilige Wirtschaftlichkeit untersucht. Basierend auf Vergleichsrechnungen wurde eine Investitionsentscheidung getroffen.

II Abkürzungsverzeichnis

PV-Anlage: Photovoltaikanlage

kWp: Kilowatt-Peak

III Lastenheft/ Gliederung

I	Vorbemerkung.....	2
II	Abkürzungsverzeichnis	2
III	Lastenheft/ Gliederung	2
1	Erzeugung.....	3
1.1	Bestandteile einer PV-Anlage.....	3
1.2	Analyse der Dachflächen und ähnliche Architekturstile.....	3
1.3	Anlagendimensionierung	3
1.3.1	Montagevarianten	3
1.3.2	Vergleich der Leistungsfähigkeiten bei untersch. Montagevarianten.....	3
1.3.3	Ergebnisse des Vergleichs	4
2	Nutzung.....	5
2.1	Lastgänge	5
2.1.1	Photovoltaikanlage	5
2.1.2	Schultyp	5
2.2	Sicherheitsaspekte	5
2.3	Umweltaspekte.....	6
3	Speicherung	6
3.1	Berechnung verschiedener Quoten	6
3.1.1	Autarkiequote	6
3.1.2	Eigenverbrauchsquote	6
3.2	Einfluss eines Stromspeichers	7
3.2.1	Autarkiequote	7
3.2.2	Eigenverbrauchsquote	7
3.2.3	Speichertyp	8
4	Wirtschaftlichkeit	8
4.1	Parameter	8
4.2	Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung	9
4.3	Rentabilitätsrechnung.....	9
4.4	Amortisationszeit.....	10
4.5	Investitionsentscheidung	10
5	Fazit und Ausblick	11
6	Quellen.....	12

1 Erzeugung

1.1 Bestandteile einer PV-Anlage

Zentraler Bestandteil einer PV-Anlage sind die Solarmodule, welche die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umwandeln. Ein Wechselrichter macht aus der Gleichspannung der Module eine Wechselfrequenz und hat mittlerweile oft auch die Maximum Power Point Tracker (MPPT) integriert. Diese sind für die Ertragsoptimierung der Module per Spannungsregelung zuständig. Ein Ertragszähler misst die gesamte Produktion der Anlage, um daraus dann in Kombination mit dem Bezugs- und Einspeisezähler die Vergütung und EEG-Umlage zu berechnen. Um einen Speicher einzubinden ist ein Laderegler bzw. Batteriewechselrichter nötig. Der Speicher selber wird mit Gleichspannung betrieben und fängt Ertragsüberschüsse auf, die nicht direkt verbraucht oder eingespeist werden.

1.2 Analyse der Dachflächen und ähnliche Architekturstile

Das Gebäude Espenstraße 5 der Laborschule Dresden (Werkhaus) ist ein Bauwerk des „Gebäudeschultyps Dresden“, erbaut in der DDR. Typisch für den Typenschulbau ab den 1960er Jahren sind einheitliche/ ähnliche Baumuster mit Flachdach. In unserem Fall sind die Ausmaße des Daches grundsätzlich 61,59x17,80m. Die geringe Neigung der Dachfläche (2,5%, auf die Modullänge von 1,67m etwa 4cm) erscheint einfach ausgleichbar. Unter Sicherheitsbestimmungen (Mindestabstände zum Rand etc.), weiteren baulichen Bedingungen wie Blitzableiter, Entwässerungssystem, Dachausstiege usw. ergibt sich eine effektiv nutzbare Fläche zur Solarmodulinstallation von insgesamt ca. 672m².

Zu erwarten ist, dass auch heute noch mindestens 100 solcher Schulen existieren, die größtenteils nutzbare Flachdächer besitzen, auf die unser Konzept angewendet werden kann. Genauere Daten über Anzahl, Zustand und Standorte passender Schulen sind aufgrund der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit nicht recherchierbar gewesen. Es muss jeweils ein statisches Gutachten angefertigt werden; der Preis hierfür ist in der Wirtschaftlichkeitsrechnung bei den Anschaffungskosten berücksichtigt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein großes Marktpotential vorhanden ist.

1.3 Anlagendimensionierung

1.3.1 Montagevarianten

Die Solarmodule können in unterschiedlichen Höhenwinkeln und Himmelsrichtungen montiert werden. Von dem Flachdach des Gebäudes ausgehend werden in der folgenden Nutzwertanalyse verschiedene Kombinationen verglichen.

Die Möglichkeit die Module dem Sonnenstand folgen zu lassen, um die Modulausnutzung weiter zu erhöhen, wird an dieser Stelle nicht betrachtet. Damit geht eine erhöhte Anlagenkomplexität, Wartungsaufwand und Fehleranfälligkeit einher.

1.3.2 Vergleich der Leistungsfähigkeiten bei untersch. Montagevarianten

Montagevariante/ Ausrichtung	süd	ost/west	flach
Spitzenleistung am Tag	5	4	2
Wartungsfreundlichkeit	5	5	0
Erzeugungsdauer pro Tag	3	5	2
Windangriffsfläche	0	3	5
Kühleffekt	5	4	0
Übereinstimmung mit Schulzyklus	3	5	2
Moduldichte	2	4	5
Summe	23	30	16

Tabelle 3.1, Nutzwertanalyse der Montagevarianten, 1-schlecht bis 5-sehr gut

Montagevariante	30° süd	10° ost/west	15° ost/west	flach
Himmelsrichtung	süd -17°	süd +73°/-107°	süd +73°/-107°	---
Neigungswinkel	30°	10°	15°	0°
Modulanzahl	173	306	306	306
Peakleistung	56,23kWp	99,45kWp	99,45kWp	99,45kWp
erwartete Jahresstromerzeugung	59.266,82kWh	88.307,93kWh	87.681,00kWh	88.973,58kWh
erwartete spezifische Jahresstromerzeugung	1.054,10kWh	887,96kWh	881,66kWh	894,66kWh

Tabelle 4.1, Leistungsvergleich der Montagevarianten

(Berechnungsgrundlage für Tabelle 4.1 ist das EU-Tool PVGIS¹. Es wurden konservative Parameter genutzt, bei denen die angegebenen Leistungsdaten mit großer Sicherheit erreicht werden. Leicht größere Erträge sind gut möglich. Es wurde das ganze System inkl. seiner Abzüge (z.B. Stromtransformation, weitere Bauteile) berücksichtigt.)

1.3.3 Ergebnisse des Vergleichs

Nach dieser Nutzwertanalyse und dem Vergleich der drei betrachteten Varianten zeigt sich, dass die Ost-West-Ausrichtung nach den obigen Kriterien die vorteilhafteste Möglichkeit ist. Da es ab einer Anlagengröße von 100 kWp die Notwendigkeit zur Direktvermarktung (mehr Organisationsaufwand für Anwender) ebenso wie weitere Bauliche Vorhaben (z.B. Fernsteuerbarkeit der Einspeisungsregulation) gibt, wurde die Entscheidung getroffen, diese Größe nicht zu überschreiten. Um eine Peakleistung von knapp 100kWp zu erreichen, werden 306 Solarmodule des unter 1.1 aufgeführten Modells benötigt. Diese Anzahl an Modulen lässt sich nur bei ost/west- bzw. flacher Ausrichtung auf dem Dach platzieren. In Abbildung 4.2 ist der Entwurf für das zukünftige Design des Daches einschließlich der genauen Verteilung der Solarmodule ersichtlich. Es wird eine gerade Anzahl von Solarmodulen aufgestellt, da Strings normalerweise immer dieselbe Modulanzahl haben sollten. In 5 Doppelreihen (Module lehnen in einem Aufstellwinkel von jeweils 15 Grad paarweise aneinander) befinden sich bis zu 33 Module hintereinander. Zwar wurde bei einem 10°-Aufstellwinkel eine leicht höhere Jahresstromerzeugung berechnet, jedoch haben wir uns für eine 15°-Neigung entschieden. Diese verspricht einen besseren Selbstreinigungseffekt, besseren Wasserabfluss sowie einen etwas besseren Kühleffekt und sollte letztendlich bessere Ergebnisse erzielen. Der leichte berechnete Vorteil einer 10°-Neigung in Hinblick auf die erwartete Jahresstromerzeugung. In der Mitte des Daches befindet sich ein ca. zwei Meter breiter Gang. Aufgrund der Neigung von 2,5% hin zur Mitte (ausgleichbar, da sehr geringe Höhenunterschiede) ist die Innenentwässerung weiterhin möglich. Zugleich befinden sich hier Blitzableiter mit ausreichendem Abstand zu den Modulen sowie Anschlagpunkte zur Absturzsicherung. Dachausstieg, Feuerwehirsirene, Überdachlftungselement sowie alle vorgegebenen Mindestabstände (z.B. Dachrand) sind bei der Verteilung der Solarmodule berücksichtigt.

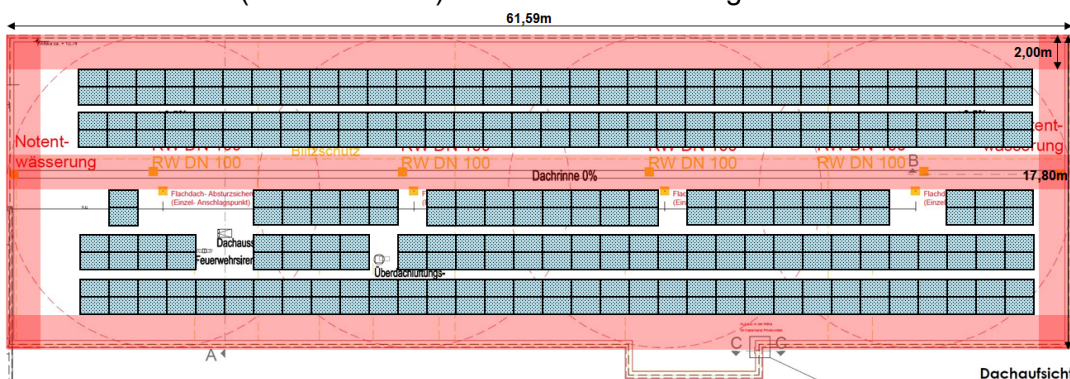


Abbildung 4.2, Dachaufsicht mit Anordnung der Solarmodule

¹ vgl. www.re.jrc.ec.europa.eu

2 Nutzung

2.1 Lastgänge

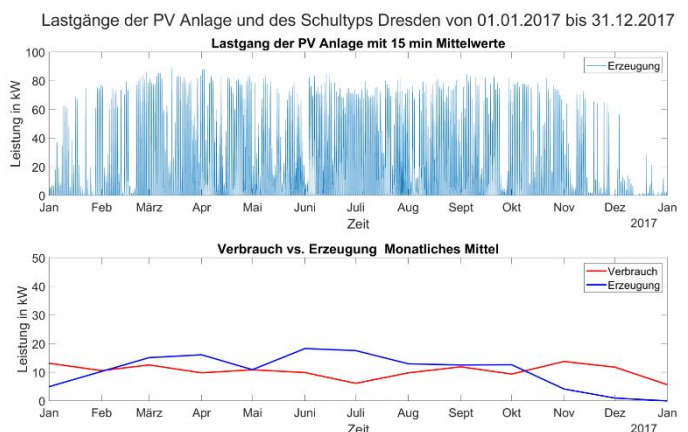
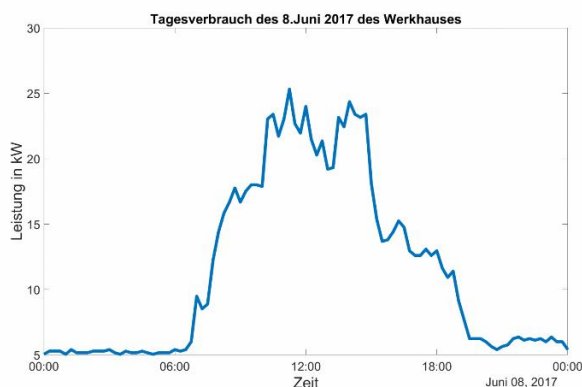
2.1.1 Photovoltaikanlage

Der Lastgang der PV-Anlage wurde auf Basis eines Musterlastgangs einer 1kWp Anlage, welcher bereitgestellt war, erstellt. Alle Werte wurden mit 100 multipliziert, um einen Musterlastgang für eine 100 kWp Anlage zu erhalten. Dieser Lastgang wurde dann auf das Jahr 2017 übertragen, um eine Übereinanderlegung mit dem Verbrauch der Laborschule zu ermöglichen. Der Lastgang der Photovoltaikanlage zeigt in den Diagrammen von 2.1.2 die mittleren Leistungswerte über den Tag, die Woche und den Monat verteilt.

2.1.2 Schultyp

Der Lastgang der Laborschule wurde basierend auf den Zählerauslesungen des Geschäftsjahres 2017, welche uns von der DREWAG in 15-Minuten-Abständen gegeben war, erstellt. In den nachfolgenden Diagrammen ist der Verbrauch der Schule in kW angegeben. Zur Veranschaulichung ist am Beispiel des 8. Juni 2017 der Verlauf des Nachfrageverhaltens des Werkhauses dargestellt. Weiterhin kann aus den nachfolgenden Diagrammen der monatliche Durchschnittsverbrauch entnommen werden.

Bei dem Schultyp Dresden handelt es sich oftmals, wie auch im Fall der Laborschule Dresden um eine Schule mit einem Hort. Horteinrichtungen sind generell über die Schulzeit hinaus aktiv und verändern so den Lastgang der Schule. Der dargestellte Lastgang beinhaltet dabei den Hort der Laborschule und somit beeinflusst der Hort maßgeblich den Verbrauch der Schule. Daraus folgt, dass das Konzept nicht exakt auf Schulen des gleichen Typs ohne Hort übertragen werden kann.



2.2 Sicherheitsaspekte²

Eine PV Anlage birgt verschiedenste Sicherheitsrisiken. Eines der größten Sicherheitsrisiken sind die Kabel, welche an der Rückseite des Werkhauses der Laborschule in den Keller geführt werden müssen. Dabei muss unbedingt auf eine ausreichende Sicherung der Kabel vor äußeren Einwirkungen und auf den Schutz von Kindern geachtet werden. Weiterhin kann die Anlage auch im Brandfall zu einem Sicherheitsrisiko werden. Bei unserer PV-Anlage speziell ist es empfehlenswert, für die Feuerwehr direkt eine Möglichkeit zu installieren, welche die Module noch in Dachnähe von den Leitungen trennt. Weiterhin ist zu erwähnen, dass PV-Anlagen einen direkten Löschangriff über das Dach behindern. Derartige, durch ein solches Feuer beaufschlagte, Objekte sind aus Sicht der Feuerwehr jedoch meistens nicht mehr zu retten, noch bevor die PV Anlage die Löschfähigkeit behindert. Bei Integration eines Energiespeichers ist die Umsetzung der jeweiligen

² vgl. „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“, Dr. Harry Wirth, Fraunhofer ISE

Brandschutzverordnung zu beachten. Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit der PV-Anlage wären zum Beispiel ein Extra-Schutz des Zugangs zum Dach und eine Sicherung des Zugangs zum Speicherraum. Weiterhin muss beim Installieren der PV-Anlage erhöhte Aufmerksamkeit auf die feste und korrekte Verankerung der Anlagenteile auf dem Dach vorherrschen. Des Weiteren müssen Verankerungen am Dach befestigt werden, damit die Schüler oder Arbeiter an einem Seil gesichert werden können.

2.3 Umweltaspekte³⁴

Auf die Umwelt wirken sich PV-Anlagen relativ gering aus, da sie rein rechnerisch bezogen auf eine Nutzungsdauer von 30 Jahren eine Emission in Höhe von 67 Gramm CO₂-Äquivalente/kWh erreichen. Im Vergleich zu einem Kraftwerk, das fossile Brennstoffe verbrennt, sind das ca. 627 CO₂-Äquivalente/ kWh weniger.

Nach der jahrelangen Nutzung lassen sich die Aluminiumrahmen, Anschlussdosen und das Glas vom Laminat vollkommen recyceln. Ein Verfahren zum Recyceln des Laminats, welches u.a. aus Silizium, Silber, Kupfer und Zellverbindern besteht, ist derzeit noch in der Entwicklung.

3 Speicherung

3.1 Berechnung verschiedener Quoten

3.1.1 Autarkiequote⁵

Die Berechnung der Autarkiequote wurde basierend auf der Summe der gesamten erzeugten Arbeit in kWh der PV-Anlage (Summe Erzeugung), der Summe der Einspeisungen in das Stromnetz (Summe Einspeisung) und der Summe des Verbrauchs (Summe Verbrauch) der Laborschule Dresden berechnet.

Ohne ein Batteriesystem beträgt die Autarkiequote der Schule ca. 38%. Die genaue Aufstellung der Rechnung ist wie folgt:

Werte: Summe Erzeugung = 87.681 kWh pro Jahr
Summe Einspeisung = 51.686 kWh pro Jahr
Summe Verbrauch = 94.562 kWh pro Jahr

$$\text{Autarkiequote} = \frac{\Sigma \text{Erzeugung} - \Sigma \text{Einspeisung}}{\Sigma \text{Verbrauch}} = \frac{87.681 \text{ kWh} - 51.686 \text{ kWh}}{94.562 \text{ kWh}} = 0,3806 = 38\%$$

3.1.2 Eigenverbrauchsquote⁵

Die Berechnung der Eigenverbrauchsquote wurde basierend auf der Summe der gesamten erzeugten Arbeit in kWh der PV-Anlage (Summe Erzeugung) und der Summe der Einspeisungen in das Stromnetz (Summe Einspeisung) der Laborschule Dresden berechnet.

Ohne ein Batteriesystem beträgt die Eigenverbrauchsquote der Schule ca. 41%. Die genaue Aufstellung der Rechnung ist wie folgt:

³ vgl. „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“, Dr. Harry Wirth, Fraunhofer ISE

⁴ vgl. www.umweltbundesamt.de

⁵ Der Wert für den Verbrauch ist aus dem Lastgang des Werkhauses entnommen. Der Wert für die Erzeugung basiert auf dem gegebenen Musterlastgang einer PV-Anlage und der mit dem Online-Tool PVGIS (www.re.jrc.ec.europa.eu) berechneten voraussichtlichen Dacherzeugung. Der Wert für die Einspeisung wurde mittels MATLAB bestimmt.

Werte: Summe Erzeugung = 87.681 kWh pro Jahr

Summe Einspeisung = 51.686 kWh pro Jahr

$$\text{Eigenverbrauchsquote} = \frac{\Sigma \text{ Erzeugung} - \Sigma \text{ Einspeisung}}{\Sigma \text{ Erzeugung}} = \frac{87.681 \text{ kWh} - 51.686 \text{ kWh}}{87.681 \text{ kWh}} = 0,41 = 41\%$$

3.2 Einfluss eines Stromspeichers

3.2.1 Autarkiequote

Unser Konzept ist ohne einen Speicher geplant. Nach den Vorgaben sollten wir allerdings dennoch den Wert eines Speichers zwischen 10 und 100 kWh annehmen. Um den Einfluss näherungsweise berechnen zu können, wurden einige sehr stark vereinfachte Annahmen getroffen. Da die erzeugte Leistung und der Verbrauch pro 15 Minuten als Datensatz gegeben waren, wurde anhand dieser Werte eine vereinfachte Batterieaufladung sowie Batterieentladung entworfen. Dabei wurde vereinfacht angenommen, dass die gesamte erzeugte Leistung in 15 Minuten abzüglich des Verbrauchs sofort und zu 100% in die Batterie einfließt, ohne Verlust und ohne Zeiteinfluss.

Die Werte der Autarkiequote ändern sich demnach wie folgt.

Speichergröße in kWh	0	10	50	95
Autarkiequote	38,1 %	41,4 %	51,5 %	58,5 %

Beispielhaft die Berechnung der Autarkiequote für einen Speicher mit 95 kWh:

Summe Erzeugung = 87.681 kWh pro Jahr

Summe Einspeisung = 32.343 kWh pro Jahr

Summe Verbrauch = 94.562 kWh pro Jahr

$$\text{Autarkiequote} = \frac{87.681 \text{ kWh} - 32.343 \text{ kWh}}{94.562 \text{ kWh}} = 0,585 = 58,5 \%$$

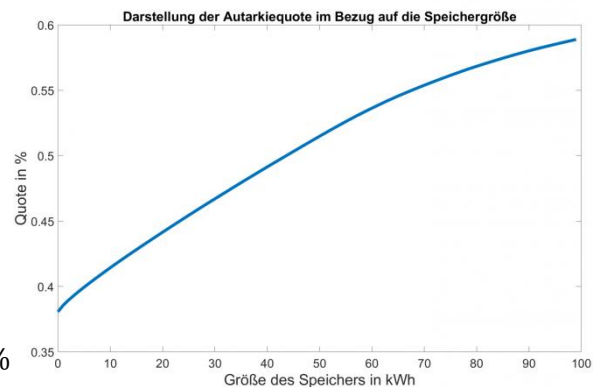


Abbildung 7.1, Autarkie i. Abh. des Speichers

3.2.2 Eigenverbrauchsquote

So wie die Autarkiequote wird auch die Eigenverbrauchsquote positiv von einem Speicher beeinflusst. Die Kurve der Eigenverbrauchsquote verläuft ähnlich zur Kurve der Autarkiequote.

Mit dem Speicher kann die Eigenverbrauchsquote verbessert werden sodass die Werte sich wie folgt ändern.

Speichergröße in kWh	0	10	50	95
Eigenverbrauchsquote	41,1 %	44,7 %	55,5 %	63,1 %

Beispielhaft die Berechnung der Eigenverbrauchsquote für einen Speicher mit 95 kWh:

Summe Erzeugung = 87.681 kWh pro Jahr

Summe Einspeisung = 32.343 kWh pro Jahr

$$\text{Eigenverbrauchsquote} = \frac{87.681 \text{ kWh} - 32.343 \text{ kWh}}{87.681 \text{ kWh}} = 0,631 = 63,1 \%$$

3.2.3 Speichertyp

Speichertypen	Blei-Akku	Lithium-Ionen-Akku	Redox-Flow-Batterie
Energiedichte	3	5	2
Wirkungsgrad	4	5	3
Sicherheit	3	3	5
Lebensdauer	3	4	4
Wartung	4	5	1
Recyclebarkeit	4	1	5
Rohstoffverfügbarkeit	5	5	5
Kosten	5	4	2
Volumen	4	5	1
Summe	35	37	28

Tabelle 8.1, Nutzwertanalyse zu Speichertypen, 1-schlecht bis 5-sehr gut

Für die von uns bevorzugten Lithium-Ionen-Akkus wird ein separater Raum mit konstant niedriger Luftfeuchtigkeit und Temperatur benötigt, wenn möglich auch ein Raum ohne große Sonneneinstrahlung. Außerdem ist ein Fenster zur direkten Entlüftung im möglichen Brandfall erforderlich sowie eine genaue Kennzeichnung des Raums.

4 Wirtschaftlichkeit

4.1 Parameter

Zur Betrachtung der verschiedenen Varianten hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Investitionsentscheidung sind Parameter zu identifizieren. Gegeben sind die folgenden Parameter, weitere Parameter wurden recherchiert oder berechnet.

wirtschaftliche Variablen	Beispiel Laborschule	spezifische Kosten der PV-Anlage	Preis für	€/kWp	
Nutzungsdauer	20 Jahre	Solarmodul	140 €	325 kWp	430,77
Strombezugskosten	22ct/kWh	Montagekosten	200 €	kWp	200
Einspeisevergütung	9ct/kWh	Montagesystem	125 €	kWp	125
EEG-Umlage 40%	6,76ct/kWh	Statikprüfung	1.000 €	Anlage	10
spezif. Kosten	900€/kWh	Anschluss	750 €	100kWp	7,5
Kalkulationszinssatz	5%	Verkabelung	3 €	pro Meter	15
ggf. Steuern	nicht berücksichtigt	Blitzschutzanlage	3.000 €	Anlage	30
Betriebskosten	1% der AHK	Zählereinrichtung	150 €	Stück	1,5
Speicherpreis	1000-2*x (kWh)	<i>Annahme: 500 m Kabel</i>		Summe	819,77
Wechselrichter	4500€/Stk.	<i>2 Wechselrichter je 4500€</i>			

Es handelt sich bei der Solaranlage um abnutzbares Vermögen, dies ist entscheidend für das durchschnittlich gebundene Kapital. Die Abschreibung erfolgt linear über 20 Jahre, nach den AfA-Tabellen des Bundesfinanzministeriums.

Zudem wurde eine Übersicht der Anschaffungskosten erstellt, im Rahmen der Berechnungen wurde der Wert auf 900€/kWp festgesetzt zur Vereinfachung. Kosten für Wartung wurden unter dem Aspekt der Garantie im Preis miteinbegriffen. Die Kosten des Speichers sind durch die Formel auf dem Merkblatt gegeben. Eine Statikprüfung wurde berücksichtigt, da die Schule ein öffentliches Gebäude ist. Weiterhin wurde der Austausch von Bestandteilen, wie Speicher und Wechselrichter, berücksichtigt und Rücklagen dafür gebildet. Im Folgenden werden einzelne statische Investitionsverfahren vorgestellt und für verschiedene Speicher durchgerechnet.

Der kalkulatorische Zinssatz wurde mit 5% konservativ angesetzt, um ein generelles Risiko der Investition abzufangen.

Die Rücklagen decken die entstehenden Kosten durch den Austausch des Speichers (statistisch nach 12 Jahren) und des Wechselrichters (2 Stück) innerhalb des Betrachtungszeitraums.

In unseren Betrachtungen wurden die Kosten des externen Stroms nicht berücksichtigt. Die generelle Rechnung zeigt, dass die Schule durch eine PV Anlage Geld spart durch den eigenen Strom. In den weiteren Rechnungen ist aufgezeigt welcher Speicher am wirtschaftlichsten ist, darauf basiert die Investitionsentscheidung der PV-Anlage.

Übersicht je Jahr	
Speicher 0 kWh	
Kosten	
Restwert	- €
Ø gebundenes Kapital	49.500,00 €
Nutzungsdauer	20 Jahre

	je Einheit	Einheiten	insgesamt
spezifische Kosten	900 €/kWp	100,00 kWp	90.000,00 €
+ Wechselrichter Sunny tripowercore1	4.500 €/Stück	2 Stück	9.000,00 €
+ Stromspeicher	1000€/kWh	0 kWh	- €
= Anschaffungskosten			99.000,00 €
Betriebskosten (1% der AK/Jahr)			990,00 €
+ kalkulatorische Zinsen (5%)			2.475,00 €
+ Abschreibungen			4.950,00 €
+ Rücklagen Wechselrichter/Speicher			450,00 €
= Fixkosten			8.865,00 €
EEG Umlage für selbstgenutzte kWh	0,027 €/kWh	37246,65 kWh	1.005,66 €
= variable Kosten			1.005,66 €

Einsparungen/Ertrag			
	je Einheit	Einheiten	insgesamt
Einsparungen selbstgenutzte kWh	0,22 €/kWh	37246,65 kWh	8.194,26 €
+ Einspeisevergütung	0,09 €/kWh	62358,08 kWh	5.612,23 €
= Einsparungen			13.806,49 €

4.2 Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung

Die Kosten werden aufgelistet, berechnet, addiert und schließlich gegenübergestellt. Zur besseren Abschätzung der Wirtschaftlichkeit wird der reine Gewinn gegenübergestellt. Die Erlöse aus Selbstnutzung und Einspeisung werden mit den Kosten verrechnet.

Gesamtkosten (Jahr)		Gewinnvergleich (Jahr)	
Restwert	- €	Erlöse	13.806,49 €
Ø gebundenes Kapital	49.500,00 €	- Fixkosten	8.865,00 €
Nutzungsdauer	20 Jahre	- Variable Kosten	1.005,66 €
		= originärer Gewinn	3.935,83 €
Betriebskosten	990,00 €		
+ kalkulatorische Zinsen (5%)	2.475,00 €		
+ Abschreibungen	4.950,00 €		
+ Rücklagen Wechselrichter/Speicher	450,00 €		
= Fixkosten	8.865,00 €		
EEG-Umlage für selbstgenutzte kWh	1.005,66 €		
= variable Kosten	1.005,66 €		
= Gesamtkosten	9.870,66 €		

4.3 Rentabilitätsrechnung

Da alle Parameter als Nettopreise angegeben sind, wurde die Rentabilität mit dem Nettoprinzip berechnet. Der originäre Gewinn mit Zinsen wird durch das gebundene Kapital geteilt.

Rentabilitätsvergleich

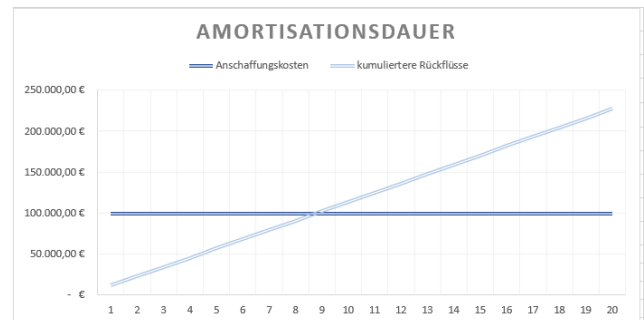
originärer Gewinn	3.935,83 €
+ kalkulatorische Zinsen	2.475,00 €
= korrigierter Gewinn	6.410,83 €
korrigierter Gewinn	6.410,83 €
/ Ø gebunden Kapital	49.500,00 €
* 100%	
= Nettorentabilität	12,95%

4.4 Amortisationszeit

Die Anschaffungskosten werden den durchschnittlichen Mittelrückflüssen gegenübergestellt und es wird geschaut, ab wann die Investition amortisiert ist. Markiert ist zum einen die Variante der schnellsten und rentabelsten Amortisation bei keinem Speicher und die Variante, wo der Gewinn bei null liegt und die Anlage nach 20 Jahren amortisiert ist.

Amortisationsrechnung

originärer Gewinn	3.935,83 €
+ kalkulatorische Zinsen	2.475,00 €
+ Abschreibungen	4.950,00 €
= Durchschnittlicher Mittelrückfluss	11.360,83 €
Anschaffungskosten (Kapitaleinsatz)	99.000,00 €
/ Durchschnittlicher Mittelrückfluss	11.360,83 €
= Amortisationszeit	8,71 Jahre



4.5 Investitionsentscheidung

Nach den vorangestellten Berechnungen fällt die Investitionsentscheidung auf das Konzept ohne einen Speicher aus wirtschaftlicher Sicht. Das Konzept amortisiert sich nach 8,71 Jahren. Der Zugewinn durch den Speicher übersteigt nicht dessen Kosten. Wenn nicht allein die Wirtschaftlichkeit betrachtet werden soll, sondern ebenfalls die Autarkie, kann die Entscheidung auch auf einen Speicher bis zu 95 kWh fallen, sodass das Konzept sich noch amortisiert. Bei einer öffentlichen Einrichtung, wie einer Schule, können auch weitere Faktoren überwiegen. Ein autarkeres System durch einen Speicher kann bezüglich Bildung relevant sein, um den Schülern einen schonenden Umgang mit Ressourcen zu lehren und der Schule ein grüneres Image geben.

Speicher	Kostenvergleich	Gewinnvergleich	Nettorentabilität	Amortisationsdauer
0 kWh	9.870,66 €	3.935,83 €	12,95%	8,71 Jahre
10 kWh	11.082,52 €	1.902,10 €	8,50%	10,81 Jahre
11 kWh	11.203,13 €	1.816,41 €	8,31%	10,92 Jahre
12 kWh	11.323,19 €	1.730,85 €	8,13%	11,03 Jahre
13 kWh	11.442,66 €	1.645,33 €	7,95%	11,14 Jahre
14 kWh	11.561,57 €	1.559,98 €	7,77%	11,25 Jahre
15 kWh	11.679,96 €	1.474,92 €	7,60%	11,37 Jahre
20 kWh	12.264,22 €	1.054,41 €	6,78%	11,92 Jahre
30 kWh	13.394,45 €	238,24 €	5,37%	13,01 Jahre
40 kWh	14.474,46 €	- 541,60 €	4,20%	14,08 Jahre

50 kWh	15.504,63 €	-	1.283,67 €	3,22%	15,13 Jahre
60 kWh	16.482,46 €	-	1.997,51 €	2,37%	16,17 Jahre
70 kWh	17.402,83 €	-	2.702,62 €	1,60%	17,23 Jahre
80 kWh	18.268,18 €	-	3.389,75 €	0,92%	18,31 Jahre
90 kWh	19.079,42 €	-	4.055,40 €	0,31%	19,41 Jahre
95 kWh	19.464,88 €	-	4.379,67 €	0,02%	19,96 Jahre
99 kWh	19.764,04 €	-	4.633,18 €	-0,19%	20,40 Jahre

Stromkostenabrechnung im Jahr						
	Solarstrom	bezogener Strom	verkaufter Strom	gesamt	mit laufenden Kosten	gesamt
ohne PV-Anlage		20.803,37 €		20.803,37 €		20.803,37 €
PV-Anlage ohne Speicher	1.005,66 €	12.609,41 €	5.612,23 €	8.002,84 €	1.440,00 €	9.442,84 €
PV-Anlage 95 kWh Speicher	1.494,13 €	8.629,01 €	2.910,85 €	7.212,29 €	1.440,00 €	8.652,29 €

5 Fazit und Ausblick

Ausgehend von der effektiv nutzbaren Dachfläche von ca. 672 m² werden 306 Solarmodule Typ "NEMO® 2.0 60 M" mit je 325 Watt in fünf Doppelreihen angeordnet. Damit ergibt sich eine Peak Leistung der Anlage von 99,45 kW. Die Ost-West Ausrichtung mit einem Höhenwinkel von 15° vereint das beste Verhältnis von Peak Leistung, Modulauslastung und finanziellem Aufwand. Die Unterkonstruktion kommt ohne Dachdurchdringung aus und wird im Rahmen der Dachstatik mit Gewichten beschwert. Es werden zwei Wechselrichter Typ "Sunny Tripower Core 1" von SMA mit je 50kW Leistung auf dem Dach installiert. Sie zeichnen sich durch Wetterbeständigkeit (IP65) und einfache Montage aus. Durch die Aufteilung auf zwei Geräte ist bei Ausfall von einem der Teilbetrieb der Anlage weiterhin gewährleistet. Außerdem kann das Kabel zwischen Wechselrichter und Hausanschlussraum spannungsfrei geschaltet werden. Die integrierten MPP-Tracker werden jeweils nur mit Modulen einer Himmelsrichtung verbunden, um eine optimale Ausnutzung der Module über den gesamten Tag zu erreichen. Der erforderliche Anlagenertragszähler und der Einspeisezähler wird im Hausanschlussraum installiert. Die Anlagenerweiterung "Sunny WebBox" ermöglicht die Fernwartungs- & Loggingfunktion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das von uns entwickelte Konzept zur Erzeugung von Photovoltaik-Energie auf Schuldächern ohne zusätzlichen Speicher nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich sehr sinnvoll ist. Durch den Wegfall eines Speichers sinken die Anschaffungskosten des gesamten Systems auf 99.000 Euro. Es ist kein geeigneter Speicherraum mehr erforderlich, die Anzahl der in Frage kommenden Schulen ist damit größer und die Skalierbarkeit wird dadurch einfacher. Nach einer Dauer von nur 8,71 Jahren sind die Investitionen amortisiert, es wird bei einer Nettorentabilität von 12,95% ein Gewinn bzw. Einsparungen verglichen zu Stromversorgung ohne PV-Anlage über 20 Jahre von etwa 157.000 Euro erwirtschaftet. Hierbei wurden die Erträge den Investitionen und anfallenden Kosten gegenübergestellt.

Selbst bei einer evtl. geringeren Einspeisevergütung von etwa 6ct/kWh durch spätere Errichtung des Systems ist die Version ohne Speicher die profitabelste Lösung. Eventuelle weitere zukünftige Förderungen auch durch regionale Klimaschutzziele sind möglich.

Als Geschäftsmodell kommen grundlegend zwei Konzepte in Frage: Die Erbauung und Eigentümerschaft durch den kommunalen Träger der Schule (die DREWAG/ENSO-Gruppe tritt als Dienstleister für Bau und Betrieb auf) oder die komplette Eigentümerschaft durch die DREWAG/ENSO-Gruppe. Hier könnte die DREWAG/ENSO-Gruppe als Verpächter agieren. Vorstellbar ist dabei, dass der Schulträger oder der Förderverein (für den die hohen Investitionskosten voraussichtlich zu hoch wären) die Anlage zu einem monatlichen Betrag pachtet, der der Schule trotzdem noch Einsparungen in den Energiekosten gewährleistet. Der Verpächter könnte bei passender Preisgestaltung einen größeren Markt erreichen und durch Bau und Betrieb ggf. auch über 20 Jahre weiterhin Geld verdienen.

Weiterhin ist es vorstellbar, bei besonderem Interesse durch die Kunden an einem hohen Speicher, eine Version mit 95kWh-Li-Ionen-Akku anzubieten. Diese kann bei geringem Profitinteresse (Amortisation nach 20 Jahren) und der Nachfrage nach möglichst hoher Autarkiequote (dann 58,5%) sinnvoll sein.

6 Quellen

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/solarenergie#undefined>

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP

<https://www.photovoltaiik-web.de/photovoltaik/ertragsprognose/pvgis/pvgis>

<https://www.photovoltaiik-web.de/photovoltaik/batteriesysteme-akkusysteme-pv/aufbau-batteriespeichersystem-pv>

<https://www.photovoltaiik-web.de/photovoltaik/wechselrichter/auslegung-wechselrichter>

<https://www.sma.de/produkte/uebersicht.html>

<https://www.elektroshop-bischof.de/heckert-solarmodul-nemo-2.0-60m-325watt-pv4s?sPartner=18010471>

<https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-anschaffungskosten#:~:text=Photovoltaik%20Montagesystem,-Montage%20einer%20Photovoltaikanlage&text=Aufgrund%20einer%20bundesweiten%20Umfrage%20werden,Euro%20pro%20Kilowatt%20peak%20angegeben.>

<https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-anschaffungskosten#:~:text=Photovoltaik%20Montagesystem,-Montage%20einer%20Photovoltaikanlage&text=Aufgrund%20einer%20bundesweiten%20Umfrage%20werden,Euro%20pro%20Kilowatt%20peak%20angegeben.>

<https://www.immobilien-wissen.de/was-kostet-ein-pruefstatiker/>

<https://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik/preis-solar-kosten.html>

<https://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik/preis-solar-kosten.html>

https://praxistipps.focus.de/blitzableiter-nachruesten-das-sollten-sie-beachten_100324