



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Pascal Gehrke

Fallstudie zur CO₂-neutralen Energieversorgung von Umformmaschinen

Pascal Gehrke

Fallstudie zur CO₂-neutralen Energieversorgung von Umformmaschinen

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Maschinenbau und Produktion - Produktionstechnik
und -management*
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Enno Stöver
Zweitgutachter: Dipl.-Ing Kai Benjamin Remmers

Eingereicht am: 08.04.2025

Pascal Gehrke

Thema der Arbeit

Fallstudie zur CO₂-neutralen Energieversorgung von Umformmaschinen

Stichworte

CO₂-Neutralität, Solarenergie, Energiespeicher, Berechnung Energieverbrauch, Auslegung PV-Anlage, Speicherauswahl

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit widmet sich der Auslegung einer CO₂-neutralen Energieversorgung des Laborversuches „Stauchversuch“ an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg. Als erneuerbare Energiequelle wurde die Photovoltaikanlage gewählt. Es werden notwendige Komponenten eines PV-Systems und Grundlagen der Energiespeicherung vorgestellt. Für die Auslegung wurde der Energieverbrauch eines Versuches ausgewertet. Mit diesem Verbrauch und dem Laborplan wurde der Jahresbedarf an Energie ermittelt. In einer Excel-Tabelle wird der Energieertrag eines Solarmoduls anhand der Globalstrahlungsdaten und Ausrichtung kalkuliert und auf Grundlagen dieser der Ladezustand der Batterie berechnet. Das Vorgehen wurde ebenfalls auf ein fiktives Unternehmen ausgeweitet und ähnliche Berechnungen ausgeführt.

Pascal Gehrke

Title of Thesis

Case study on CO₂-neutral energy supply for forming machines

Keywords

CO₂-neutrality, solar energy, energy storage, energy consumption calculation, PV system design, storage selection

Abstract

This bachelor's thesis is dedicated to the design of a CO₂-neutral energy supply for the “compression test” laboratory experiment at the Hamburg University of Applied Sciences. The photovoltaic system was chosen as the renewable energy source. The necessary components of a PV system and the basics of energy storage are presented. The energy consumption of a test was evaluated for the design. Using this consumption and the laboratory plan, the annual energy requirement was determined. The yield of a solar module is calculated in an Excel spreadsheet using the global radiation data and orientation, and the battery charge level is calculated. The procedure was also extended to a fictitious company and similar calculations were carried out.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	X
1 CO₂-Neutralität	1
1.1 CO ₂ -Ausstoß	2
1.2 Energieerzeugung 2023	2
1.3 Wichtigkeit CO ₂ -Neutralität	3
1.3.1 Treibhauseffekt	3
2 Erneuerbare Energien	6
2.1 Sonnenenergie	6
2.2 Strahlungsangebot	7
2.2.1 Berechnung der Direktstrahlung auf eine geneigte Fläche	7
2.2.2 Berechnung der Diffusstrahlung auf eine geneigte Fläche	9
2.2.3 Berechnung der Reflexionsstrahlung auf eine geneigte Fläche	9
2.3 Schwankungen	9
2.3.1 Zeitliche Varianz	10
2.3.2 Ortsabhängige Verteilung	10
2.3.3 Air Mass	11
2.4 Energieerzeugung aus Sonnenstrahlung	11
2.4.1 Einstellung der Spannung und der Stromstärke	12
2.5 Kilowattpeak	14
2.6 Weitere Netzkomponenten	14
2.6.1 Wechselrichter	14
2.6.2 Laderegler	15
2.6.3 Verkabelung	16
2.6.4 Weitere Komponenten	16
3 Energiespeicherung	17
3.1 Chemische Energiespeicher	17
3.1.1 Lithium-Ionen-Batterien	17
3.1.2 Blei-Säure-Batterien	18
3.1.3 Redox-Flow-Batterien	18

3.1.4	Wasserstoffspeicherung	19
3.2	Andere Energiespeicher	19
3.2.1	Mechanische Energiespeicher	19
3.2.2	Elektrische Energiespeicher	20
3.3	Bewertung der Speichermöglichkeiten	20
3.3.1	Wirkungsgrad	20
3.3.2	Energiedichte und Platzbedarf	20
3.3.3	Lebensdauer und Zyklen	20
3.3.4	Nachhaltigkeit	20
3.4	Energiespeicherauswahl	21
3.5	Integration der Speicher in das PV-System	21
4	Stand der Technik an anderen Hochschulen	22
4.1	Philipps-Universität Marburg	22
4.2	Universität Hamburg	22
4.3	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg	23
4.4	Universität Göttingen	23
5	Vorstellung des erarbeiteten Models	24
5.1	Vorstellen des Laborversuchs	24
5.1.1	Problem des Laborversuchs	25
5.2	Auswerten des Energieverbrauchs	25
5.2.1	Anlauf der Presse	27
5.2.2	Berechnung der Leistung während des Anlaufs	29
5.2.3	Berechnung der Leistung im Leerlauf	30
5.2.4	Berechnung der Leistung eines Hubs	31
5.2.5	Berechnen des Energieverbrauchs für den Laborversuch	32
6	Auslegung einer PV-Anlage	34
6.1	Berechnung des Energieverbrauchs	35
6.2	Grobe Rechnung auf dem Dach	35
6.3	Grobe Berechnung am Fenster	36
6.4	Genaue Berechnung	36
6.5	Fensterbebauung	39
6.6	Wirtschaftlichkeit	39
6.7	Richtlinien bei der Bebauung	40
7	Übertrag des Vorgehens auf ein Unternehmen	42
7.1	Vorstellen des Unternehmens	42
7.2	Abnahmezahlen	43
7.3	Vorstellen des Maschinenparks	44
7.3.1	Berechnen des Kundentaktes	44
7.3.2	Geprägte Bleche	44

7.3.3	Kugelzapfen	45
7.4	Berechnen Energieverbrauch	46
7.5	Grobe Berechnung	47
7.6	Batteriegröße	48
7.7	Simulation	49
7.7.1	Jahresbedarf	49
7.7.2	Erhöhung des Eigenverbrauchs	50
7.7.3	Autarkes System	51
8	Fazit	53
8.1	Zusammenfassung	53
	Literaturverzeichnis	55
A	Solarmodul	i
B	Wechselrichter	ii
C	Batterie	iv

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung in Deutschland (2023) nach [20]	2
1.2	Treibhauseffekt [22]	4
2.1	Jahresschwankung Solarkonstante [40]	6
2.2	Globalstrahlung am 10.07.2024 alle 10 Minuten aufsummiert nach [4]	10
2.3	Vergleich München und Hamburg	11
2.4	Einfluss Aufbau eines Moduls auf die Kennlinie [40]	13
2.5	Verschaltung Freilaufdiode [40]	13
2.6	Sinusspannung durch Pulsung einer Gleichspannung [40]	15
2.7	Auswirkung der Verkabelung	16
5.1	Ströme in den Klemmen Aufnahme 1	26
5.2	Ströme in den Klemmen Aufnahme 2	26
5.3	Schema Sternschaltung [2]	28
5.4	Schema Dreieckschaltung [2]	28
5.5	Erste Messung; Anlauf	29
5.6	Betrachtung des Leerlaufes während der ersten Messung	30
5.7	Betrachtung des Leerlaufes während der zweiten Messung	31
5.8	Betrachtung der ersten 5 Hübe (4000 Nm) und des letzten Hubs (5000 Nm) während der zweiten Messung	32
6.1	Verlauf der Batterieladung im Jahresverlauf für eine 0,42kWp Anlage	37
6.2	Schematischer Aufbau der Energieversorgung	38
6.3	Verlauf der Batterieladung im Jahresverlauf für eine 8,4kWp Anlage	39
7.1	Geprägtes Blech	43
7.2	Kugelgelenk	43
7.3	Verteilung des täglichen Ladezustands der Batterie [29]	51
7.4	Tage mit voller und leerer Batterie über die Monate [29]	52
A.1	Solarmodul Luxor	i
B.1	Wechselrichter Solax X3-HYBRID G4	ii
B.2	Wechselrichter SunnyIsland 8.0H	iii
C.1	LiFePo-Batterie	iv

Tabellenverzeichnis

1.1	Treibhausgase und deren Ursprung nach [44] [8]	5
1.2	Treibhauspotenziale und die Verweildauer in der Atmosphäre [36][44]	5
4.1	Vergleich der geplanten und tatsächlichen Produktion im Jahr 2020 nach [35] . .	23
5.1	Beobachtungen Laborversuch 16.01.2025	25
5.2	Erläuterung zu den Hülen in Abbildung 5.2	27
5.3	Berechnung der Leistung eines Hubs	32
6.1	Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung aus dem Datenblatt des Solarmoduls in Anhang A	37
6.2	Übersicht der Kosten [11] [19] [18]	39
6.3	Übersicht Amortisation	40
7.1	Veranschaulichung der Produktion	43
7.2	PV-Erträge mit einer 113,4 kWp PV-Anlage nach [29]	49
7.3	PV-Erträge und Tage mit voller/leerer Batterie mit einer 113,4kWp PV-Anlage nach [29]	50
7.4	Durchschnittliche tägliche PV-Erträge mit einer 178 kWp PV-Anlage nach [29] .	52

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
e	Energie	eV
m	Masse	kg
v	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$\dot{G}_G$	Globalstrahlung	$\frac{W}{mm^2}$
$\dot{G}_{Dr}$	Direktstrahlung	$\frac{W}{mm^2}$
$\dot{G}_{Df}$	Diffusstrahlung	$\frac{W}{mm^2}$
$\dot{G}_{Rf}$	Reflexionsstrahlung	$\frac{W}{mm^2}$
α	Neigungswinkel bezüglich der Horizontalebene	$^\circ$
β	Sonnenazimutwinkel	$^\circ$
γ	Ausrichtung der Flächennormalen bezüglich der Himmelsrichtung	$^\circ$
ϕ	Breitengrad	$^\circ$
δ	Sonnendeklination	$^\circ$
w_{St}	Sonnenstundenwinkel	$^\circ$
WOZ	wahre Ortszeit	h
GZ	gesetzliche Zeit	h
λ	Längengrad	$^\circ$
λ_0	Referenz Längengrad	$^\circ$
J'	Winkel des dazugehörigen Tages	$^\circ$
AG	Albedowert	
P	Leistung	W

Symbol	Beschreibung	Einheit
U	Spannung	V
I	Stromstärke	A
t	Zeit	s
S	Scheinleistung	W
$\bar{x}$	Mittelwert der verbrauchte Leistung	Ws
n	Benötigte Kilowattpeak Leistung	kWp
I_{SC}	Kurzschlussstrom	A
U_{OC}	Leerlaufspannung	V
s	Schichtbedarf	
Ma	Maschinenzahl	
L	Länge der Module	m
y	Abstand zwischen Modulreihen	m

1 CO₂-Neutralität

Deutschland als großer Industriestandort hat sich mit dem Klimaschutzprogramm von 2023 dazu verpflichtet, seine CO₂-Emissionen bis 2030 im Vergleich zu 1990 um mindestens 65% zu senken. Über das Jahr 2030 hinaus, wird für das Jahr 2045 die Treibhausgasneutralität in Deutschland angedacht. Somit darf ab diesem Jahr kein CO₂ mehr ausgestoßen werden. [28]

Die Bundesregierung hat damit eine große Aufgabe in Bewegung gesetzt, die durch mehrere Gesetze und Novellen im Klimaschutzprogramm begleitet wird. Das Klimaschutzprogramm ist dabei so aufgebaut, dass es die Emissionen von Deutschland auf die sechs größten Bereiche aufteilt. Jährlich wird dann das noch auszustoßende Kontingent geprüft und verglichen. Ein bewusst gewählter Ansatz dieses Programms ist es, dass nicht die Sektoren einzeln ihr Ziel erreichen müssen, sondern Deutschland als ganzes sein Ziel erreichen muss. Dabei darf ein Sektor für einen Erfolg, sein Ziel nicht erreichen, wenn ein anderer Sektor dafür sein Ziel unterschreitet. Die sechs Sektoren, welche das Klimaschutzprogramm angeht, sind:

- Energiewirtschaft
- Verkehr
- Gebäude
- Abfallwirtschaft
- Landwirtschaft
- Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)

Zum Erreichen des Ziels für 2025 muss Deutschland seine CO₂-Äquivalenten um 1,1 Milliarden Tonnen reduzieren. Mit den im Klimaschutzprogramm angesprochenen Maßnahmen wird von einer Reduktion um 900 Mio. Tonnen ausgegangen. Im Jahr 2021 hat der Energiesektor dabei den größten CO₂-Äquivalenten Ausstoß von 500 Millionen Tonnen aufgewiesen und bietet damit den größten Stellhebel zur Reduzierung. Um diesen Abbau im Energiesektor zu bewerkstelligen, wurden Gesetzesänderungen und Novellen verfasst, die diesem Sektor helfen sollen, den CO₂-Ausstoß deutlich zu verringern.

Das größte Potenzial steckt dabei in den erneuerbaren Energien. In 2022 stellten diese einen Anteil von etwa 46% am Bruttostromverbrauch dar. Dieser Anteil soll bis 2030 auf mindestens 80% steigen. Darüber hinaus soll bis 2035 die Stromerzeugung größtenteils oder vollständig dekarbonisiert sein. Aus diesem Grund vereinfachen und subventionieren die meisten Gesetzesänderungen

im Klimaschutzpaket den Ausbau von erneuerbaren Energien und die Flächenerschließung für diese. [28]

1.1 CO₂-Ausstoß

Aktuelle Zahlen zeigen einen CO₂-Äquivalenten Ausstoß von rund 674 Millionen Tonnen in Deutschland für das Jahr 2023. Damit wird ein Rückgang von 10% verzeichnet im Vergleich zu 2022. [46]

1.2 Energieerzeugung 2023

Im Jahr 2023 wurden 449,8 Milliarden kWh Strom erzeugt und in das Netz eingespeist. Dabei beträgt der Anteil von erneuerbaren Energien 56%, was eine Erhöhung von 6,7% im Vergleich zum Vorjahr ist. Strom aus fossilen Energieträgern ist dabei auf 44% gesunken, was einen Rückgang von 9,3 Prozentpunkten entspricht. Die prozentuale Aufteilung ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Damit wurden im Jahr 2023 das erste Mal in der deutschen Geschichte mehr Energie aus erneu-

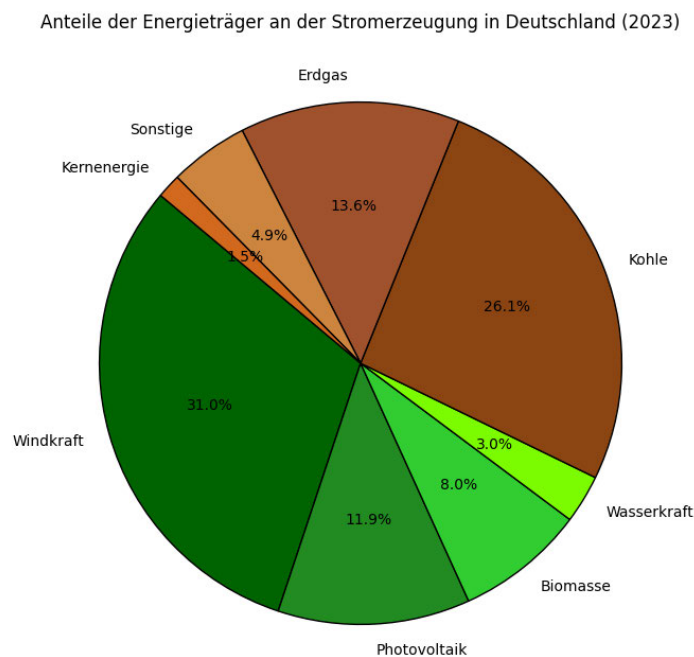


Abbildung 1.1: Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung in Deutschland (2023) nach [20]

erbaren Energien, als aus fossilen Energieträgern gewonnen. Für das Klimaschutzprogramm ist dies ein wichtiger Meilenstein. Zu den aber vorher erwähnten und für das Jahr 2030 angestrebten 80% fehlen noch viele Prozentpunkte. [20]

Generell gilt, je mehr Energie aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, desto weniger muss auf fossile Energieträger zurückgegriffen werden. Es gibt Länder wie Island und Norwegen, die deren Energiebedarf nur aus erneuerbaren Energien decken. [6] [23] Um ein ähnliches Endergebnis zu erzielen, wurden in dem Klimaschutzprogramm folgende Gesetzesänderungen beschlossen: [28]

- WindSeeG-Novelle: Es werden feste Ausbauziele für Offshore-Windenergie vorgegeben. Bis 2030 sollen 30 Giga Watt ausgebaut sein. Außerdem wurde das Ausschreiben von Flächen vereinfacht und der Planungs- und Genehmigungsprozess beschleunigt.
- Windenergieflächenbedarfsgesetz: Bund und Länder sollen einen bestimmten Anteil ihrer Landesfläche für Windenergie bereitstellen. Die Zielvorgabe für 2032 sind 2% der Bundesfläche mit einem Zwischenziel von 1,4% bis 2027.
- Solarpaket: Das Solarpaket umfasst Maßnahmen um den Ausbau von Photovoltaik zu beschleunigen. Die Maßnahmen erleichtern den Bau von Balkonanlagen, vereinfachen Photovoltaikanlagen für den Eigenverbrauch, bauen bürokratische Hürden für große PV-Anlagen ab und fördern Solarstrom.

1.3 Wichtigkeit CO₂-Neutralität

Der anthropogene Klimawandel ist ein reales Phänomen und im Laufe der Jahre werden die Anzeichen, dass dieser auftritt immer größer. Die Dürren, Trockenperioden, Temperaturrekorde und Waldbrände häufen sich immer mehr. Die Ursache für den Klimawandel ist der Treibhauseffekt, welcher durch die ausgestoßenen Emissionen verstärkt wird.[24]

Der natürliche Klimawandel ermöglicht erst das Leben auf der Erde. Bereits 1824 hat der französische Wissenschaftler Jean-Baptiste Fourier nachweisen können, dass es einen zusätzlichen Effekt geben muss, der mit Spurengasen zusammenhängt und das Klima auf unserer Erde bestimmt. Diese Erkenntnis wurde über die Zeit erweitert und ausgebaut. [45]

1.3.1 Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt ist essenziell für unser Überleben auf der Erde. Ohne diesen hätten wir eine mittlere Temperatur von -18 Grad Celsius im Gegensatz zu den heutigen +15 Grad Celsius. Für den Treibhauseffekt ist der Aufbau unserer Atmosphäre und die darin enthaltenen Gase, Moleküle und Partikel verantwortlich. Abbildung 1.2 zeigt den Treibhauseffekt. [42]

Für den Treibhauseffekt relevant ist die Troposphäre. Sie ist die unterste Schicht im Aufbau der Atmosphäre und reicht bis etwa 12km Höhe. In dieser Schicht, spielen sich alle Wettergeschehnisse

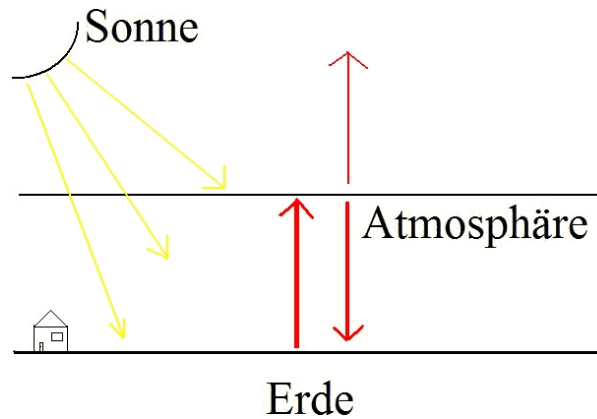


Abbildung 1.2: Treibhauseffekt [22]

ab. Der natürliche Treibhauseffekt hat seinen Ursprung in den Treibhausgasen in dieser Sphäre. Die kurzwelligen Sonnenstrahlen werden teilweise an der Atmosphäre reflektiert, aber der größte Teil durchdringt diese und trifft auf die Erdoberfläche. An dieser werden die kurzwelligen UV-Strahlungen (Wellenlänge von 200 nm bis 400 nm) absorbiert und als langwellige Infrarotstrahlung (780 nm bis 1 mm) wieder emittiert. Ein Teil dieser langwelligen Infrarotstrahlungen werden von den in der Troposphäre enthaltenen Treibhausgasen absorbiert und in alle Richtungen wieder abgegeben. Dabei wird auch ein Teil dieser zuvor aufgenommenen Infrarotstrahlungs-Wärme in Richtung Erdoberfläche gestrahlt und bleibt die Wärme in der Atmosphäre enthalten. [37] Die für den Prozess relevanten Treibhausgase sind: Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasserdampf, Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O).

Durch die Industrialisierung im 18. und 19. Jahrhundert begann man dampfbetriebene Systeme und Maschinen einzusetzen, was einen rasanten Fortschritt in der menschlichen Entwicklung auslöste. Da diese Maschinen auf Dampf angewiesen waren, war es notwendig, eine Energiequelle zu finden, um Wasser zu verdampfen – hierbei kamen damals Holz, Kohle oder Koks zum Einsatz. Dieser Wandel setzte sich über Jahrhunderte fort und erreichte seinen Höhepunkt in der Hochindustrie. Heutzutage leben wir in einer Welt, in der Energie eine zentrale Rolle spielt und in nahezu allen Bereichen unseres täglichen Lebens unverzichtbar ist. Zur Erzeugung dieser Energie, wurden anfangs fossile Energieträger verbrannt. Bei dieser Verbrennung entsteht Kohlenstoffdioxid. Ein weiterer Effekt der Industrialisierung war das Entstehen von urbanen Gebieten. Die Industrialisierung hat die Landwirtschaft und die Viehzucht, welche hoch naturbelastend sind, ausgeweitet. [27] Um diese Felder optimal zu verwenden, werden Düngemittel eingesetzt, welche umweltschädliche Gase freisetzen. Die Treibhausgase und deren natürliche sowie anthropogene Quelle, sind in der Tabelle 1.1 aufgezeigt.

Treibhausgas	Natürlicher Ursprung	Antrophogener Ursprung
Kohlenstoffdioxid	Vulkane, Atmung	Fossile Brennstoffe, Abholzung
Wasserdampf	Kondensation von Wasser	Bewässerung Landwirtschaft, Kühlung Kraftwerke
Methan	Sümpfe, Termiten	Viehzucht, Erdgasförderung
Lachgas	Ozean, Böden	Düngemittel, Industrie

Tabelle 1.1: Treibhausgase und deren Ursprung nach [44] [8]

Jedes der Treibhausgase hat einen unterschiedlich starken Einfluss auf den Treibhauseffekt. Zum Vergleich der Treibhausgase untereinander wurde das "Treibhauspotenzial" (Global Warming Potential, GWP) eingeführt. Es ist eine Maßzahl die angibt, wie stark das Treibhausgas im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid ist. Dabei hat Kohlenstoffdioxid ein GWP von 1.

Es wird unterschieden zwischen drei GWP Zeiträumen. Die Treibhausgase haben eine unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre. Deshalb unterscheiden sich die Arten, in deren Verweildauer wobei es folgende Berechnungsgrundlagen gibt.

- GWP über 20 Jahre zeigt kurzfristige Erwärmungseffekte auf.
- GWP über 100 Jahre ist die Standardmessung und wird hauptsächlich in den Klimaberichten verwendet.
- GWP über 500 Jahre zeigt die langfristige Wirkung der Treibhausgase.

Je höher der GWP-Wert ist, desto stärker trägt das Gas zur Erderwärmung bei. Durch die Skalierung der Gase auf einer GWP Skala, können die Gase untereinander verglichen werden. Das ist relevant zum Vergleichen und Abwiegen von verschiedenen Varianten. Die Tabelle 1.2 zeigt unterschiedliche GWPs der wichtigsten Treibhausgase und deren durchschnittliche Verweildauer auf.

Treibhausgas	Formel	GWP (20 Jahre)	GWP (100 Jahre)	GWP(500 Jahre)	Verweildauer in der Atmosphäre
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	1	1	1	100 bis 1000 Jahre
Methan	CH ₄	84-87	28-36	7-10	ca. 12 Jahre
Wasserdampf	H ₂ O	-	10 ⁻³	-	ca. 10 Tage
Lachgas	N ₂ O	273	265-298	150	ca. 114 Jahre
Fluorkohlenwasserstoffe (HFC-134a)	C ₂ H ₂ F ₄	3830	1430	435	ca. 14 Jahre
Schwefelhexafluorid	SF ₆	22800	23500	32600	ca. 3200 Jahre

Tabelle 1.2: Treibhauspotenziale und die Verweildauer in der Atmosphäre [36][44]

2 Erneuerbare Energien

Mit dem Vorwissen der vorherigen Kapitel, wird nun auf die erneuerbaren Energien geschaut. Sie stellen eine Alternative zu den fossilen Energieträger dar. Als erneuerbare Energieträger versteht man beispielsweise die Sonne, den Wind und die Bewegung der Meere. Für das Bearbeiten der Aufgabenstellung wird nur die Sonne betrachtet.

2.1 Sonnenenergie

Die Sonne hat einen 109-fachen Durchmesser unserer Erde. Sie besteht im Wesentlichen aus Wasserstoff und Helium. Im Kern der Sonne findet Kernfusion statt. Der Wasserstoff verschmilzt zu Helium. Der Massenverlust wird als Energie freigegeben. Pro Sekunde verschmelzen 650 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 646 Millionen Tonnen Helium. Die Energie lässt sich mit der folgenden Formel 2.1 berechnen. [40]

$$e = m \cdot v^2 \quad (2.1)$$

Diese Energie wird in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben. Die elektromagnetische Strahlung deckt dabei den gesamten Frequenzbereich ab. Die auf der Erde eintreffende Strahlung lässt sich mithilfe von Gleichungen berechnen. Die flächenspezifische Strahlungsleistung am oberen Rand der Erdatmosphäre wird als Solarkonstante bezeichnet und beträgt $1370 \frac{W}{m^2}$. Für diesen Wert gibt es monatliche Schwankungen, welche in der Abbildung 2.1 dargestellt sind. [40] Die Schwankungen kommen aufgrund der elliptischen Erdumlaufbahn um die Sonne.

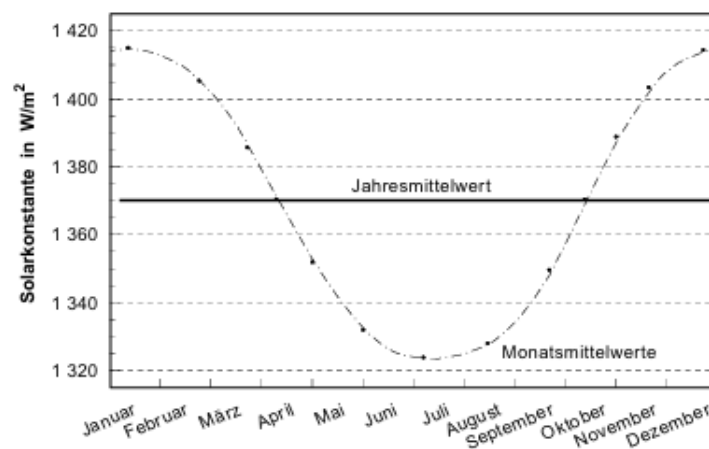


Abbildung 2.1: Jahresschwankung Solarkonstante [40]

Die Erde zieht keine kreisrunde Bahn um die Sonne, sondern eine Ellipse. Dadurch ist der Abstand zur Sonne nicht konstant.

2.2 Strahlungsangebot

Die eintreffende Strahlung wird durch die Atmosphäre und Hindernisse auf ihrem Weg zur Erdoberfläche gestreut. Die tatsächliche Strahlung wird Globalstrahlung ($\dot{G}_G$) genannt und setzt sich aus der Direkt- ($\dot{G}_{Dr}$) und Diffusstrahlung ($\dot{G}_{Df}$) zusammen. Hinzu kommt noch ein kleiner Teil von reflektierter Strahlung von der Umgebung des beobachteten Punktes. Dieser Anteil wird Reflexionsstrahlung ($\dot{G}_{Rf}$) genannt. Der Zusammenhang wird in Formel 2.2 beschrieben.

$$\dot{G}_G = \dot{G}_{Dr} + \dot{G}_{Df} + \dot{G}_{Rf} \quad (2.2)$$

Unter der Direktstrahlung versteht man die Strahlung welche von der Sonne ungehindert auf einen Punkt trifft. Die Diffusstrahlung erreicht über Ablenkungen und Streuung den selben Punkt. Sie ist viel schwächer als die Direktstrahlung, ist aber für die Energieerzeugung dennoch relevant. Für die Streuung der Diffusstrahlung sind beispielsweise Partikel in der Atmosphäre, Wolken und Moleküle in diesen oder das Auftreffen auf Oberflächen in direkter Nähe zum betrachteten Punkt verantwortlich. Die reflektierte Strahlung, wird beispielsweise an umliegenden Oberflächen reflektiert und treffen so die geneigte Fläche. Das ganze Jahr über entsteht so eine Kombination aus diesen drei Strahlungen. Im Folgenden wird die Berechnung der drei Anteile vorgestellt. Diese ist jedoch sehr aufwendig und wird häufig nicht selbstständig ausgeführt. Im Internet gibt es viele Simulations- und Berechnungstools, die diese Berechnung übernehmen.[40]

2.2.1 Berechnung der Direktstrahlung auf eine geneigte Fläche

Die Direktstrahlung auf eine geneigte Oberfläche ist notwendig um das Strahlungsangebot an einem Standort zu einem bestimmten Tag zu bestimmen. Im Folgenden wird die Berechnung vorgestellt.

Die Formel 2.3 zur Berechnung lautet:

$$\dot{G}_{Dr,g,a} = \dot{G}_{Dr} \left(\sin(\psi) \cos(\alpha) - \sin(\alpha) \cos(\psi) \sin(\beta - \gamma) \right) \quad (2.3)$$

Hierbei ist α der Neigungswinkel bezüglich der Horizontalebene, β der Sonnenazimutwinkel und γ die Ausrichtung der Flächennormalen bezüglich der Himmelsrichtung.

Der Winkel ψ muss zuvor berechnet werden. Dazu ist ein Zwischenschritt erforderlich, in dem w_{St} bestimmt wird. w_{St} ist der Stundenwinkel der Sonne. Dieser gibt die zeitliche Entfernung vom lokalen Höchststand der Sonne an. Wenn die Sonne sich an ihrem höchsten Punkt befindet, also wenn diese genau südlich steht, beträgt dieser Winkel 0 Grad. Werte für den Vormittag

sind negativ und für den Nachmittag positiv. Dieser Stundenwinkel lässt sich mit der wahren Ortszeit WOZ in Stunden berechnen. Diese auch als Sonnenzeit bekannte Zeit bezieht sich auf den tatsächlichen Stand der Sonne am Himmel. Bei wahrer Ortszeit 12 Uhr, befindet sich die Sonne an ihrem Höchststand. Diese lässt sich mit der geographischen Längenverschiebung und einer Zeitgleichung berechnen. Die Längenverschiebung beträgt 15 Minuten pro Längengrad nach Osten vom Referenzlängengrad. Die Zeitgleichung berücksichtigt dabei die jahreszeitlichen Schwankungen. [40]

$$\begin{aligned}\cos(\psi) = & [\cos(\alpha) \sin(\phi) - \cos(\phi) \cos(\beta) \sin(\alpha)] \sin(\delta) \\ & + [\sin(\phi) \cos(\beta) \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \cos(\phi)] \cos(\delta) \cos(\omega_{s,t}) \\ & + \sin(\beta) \sin(\alpha) \cos(\delta) \sin(\omega_{st}).\end{aligned}\quad (2.4)$$

Mit

- α für den Neigungswinkel der Fläche
- β für den Azimutwinkel, welcher die Abweichung von einer Ausrichtung in die Südrichtung angibt
- ϕ für den Breitengrad
- δ für die Sonnendeklination
- w_{st} für den Sonnenstundenwinkel

Für die Berechnung von w_{st} wird die folgende Formel 2.5 verwendet. [40]

$$W_{st} = (WOZ - 12,00h) \cdot \frac{15^\circ}{h} \quad (2.5)$$

Die wahre Ortszeit lässt sich mit der Formel 2.6 berechnen. [40] Der Bruch am Anfang des Terms berücksichtigt die Veränderung der Zeit durch die Längenverschiebung und der restliche Term ist die zuvor erwähnte Zeitgleichung, welche tagesabhängig ist.

$$\begin{aligned}WOZ = & GZ + \frac{\lambda - \lambda_0}{15^\circ/h} \\ & + (0.0066 + 7.3525 \cdot \cos(J' + 85.9^\circ) \\ & + 9.9359 \cdot \cos(2J' + 108.9^\circ) \\ & + 0.3387 \cdot \cos(3J' + 105,2^\circ))h\end{aligned}\quad (2.6)$$

J' ist der Winkel des dazugehörigen Tages. Für jeden Tag des Jahres wird J' um $0,986^\circ$ größer.

$$J' = 360^\circ \frac{\text{Tag des Jahres}}{\text{Zahl der Tage im Jahr}} \quad (2.7)$$

Anschließend muss die Sonnendeklination berechnet werden. Diese beschreibt, in welchem Breitengrad sich die Sonne im Zenit befindet und nimmt im Laufe des Jahres Werte zwischen $-23,45^\circ$

zur Wintersonnenwende und $+23,45^\circ$ zur Sommersonnenwende an. [40]

$$\delta = -23,45 \cos\left(\frac{2\pi}{365,25}\right)(J + 10) \quad (2.8)$$

Mit diesen Formeln, kann die Direktstrahlung an einem beliebigen Punkt auf eine beliebig geneigte Fläche berechnet werden.

2.2.2 Berechnung der Diffusstrahlung auf eine geneigte Fläche

Die Berechnung der Diffusstrahlung auf eine geneigte Fläche ist sehr kompliziert und hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Um dies zu vereinfachen, wird unterstellt, dass die Diffusstrahlung gleichmäßig im Raum verteilt ist. Unter dieser Prämisse, kann die Diffusstrahlung vereinfacht auf eine geneigte Oberfläche mit der Formel 2.9 berechnet werden. [40]

$$\dot{G}_{Df,g,a} = \frac{1}{2} \dot{G}_{Df} (1 + \cos(\alpha)) \quad (2.9)$$

Diese Annahme beschreibt jedoch nicht die komplette Strahlungsverteilung. Zu dieser isotropen Formel kann noch ein circumsolarer Anteil berechnet werden. Dies wird aber nicht weiter erläutert, da der isotrope Ansatz für einfache Berechnungen ausreichend ist.

2.2.3 Berechnung der Reflexionsstrahlung auf eine geneigte Fläche

Die Direkte- und Diffusestrahlung wird an Oberflächen in der Umgebung der geneigten Oberfläche teilweise reflektiert. Ein gewisser Anteil, dieser reflektierten Strahlung, erreicht die Fläche, welche wir betrachten. Diese Reflexionsstrahlung lässt sich bei einer geneigten Umgebung aus dem Albedowert der Umgebung, die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche und der Neigungswinkel der Fläche α nach Formel 2.10 bestimmen. Der Albedowert ist ein Wert, der das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung beschreibt. Je nach Umgebung der betrachteten Fläche kann dieser einen Wert zwischen 0,7 und 0,9 bei Schnee, 0,25 und 0,35 bei Sand und auf Wald oder Ackerflächen 0,1 und 0,2 annehmen. [40]

$$\dot{G}_{R,g,a} = A_G \cdot \dot{G}_G \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.10)$$

2.3 Schwankungen

Durch die runde Kugelform der Erde, gibt es Schwankungen in dem Strahlungsangebot. In Äquatornähe ist der Einfallswinkel und der Weg durch die Atmosphäre kürzer als weiter im Norden oder Süden. Das Strahlungsangebot ist abhängig vom Abnahmeort. Ebenfalls gibt es auch Schwankungen durch die Erdrotation und dem dadurch entstehenden Tag und Nachtzyklus.

2.3.1 Zeitliche Varianz

Durch den Sonnengang, ist die Verfügbarkeit der Strahlung über den Tag veränderlich. Die Energieerzeugung ist somit nur vom Sonnenaufgang bis zum Sonnenuntergang möglich und erreicht circa zur Mittagsstunde ihren Höchstwert. Deshalb, ist die Speicherung dieser Energie für eine ganztägige Energieversorgung wichtig. Nachts wird keine bis sehr wenige Energie erzeugt. Die Erzeugung schwankt aber auch im Tagesverlauf. Die Globalstrahlung in einer Messstation in Fuhlsbüttel, Hamburg kann der Abbildung 2.2 entnommen werden. Es ist deutlich zu erkennen, das tagsüber mehr Strahlung vorhanden ist als nachts. Außerdem zeigt der Tagesverlauf vom 10.07.2024 den Einfluss von Verschattungen durch Wolken. Ab 12 Uhr kommt es zu Schwankungen in der Globalstrahlung, was auf Verluste durch Wolkenverschattungen deutet.

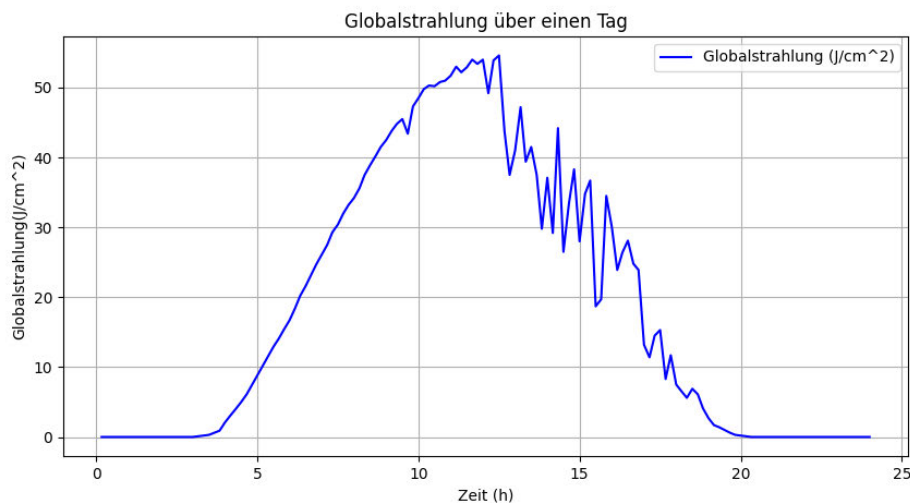


Abbildung 2.2: Globalstrahlung am 10.07.2024 alle 10 Minuten aufsummiert nach [4]

2.3.2 Ortsabhängige Verteilung

Die höchste durchschnittliche Globalstrahlungssummen findet man in den Wüstengebieten der Erde in der Nähe des Äquators. Dort herrschen meistens klare und wolkenlose Bedingungen und es gibt wenige abschwächend-wirkende Faktoren. Außerdem trifft die Sonnenstrahlung oft senkrecht auf die Oberfläche. Der Weg durch die Atmosphäre ist in Äquatornähe auch der kürzeste. Dort können Werte von mehr als $2200 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ erreicht werden. [40] Die Globalstrahlungssummen nehmen mit den nördlicheren und südlicheren Breitengraden ab, da die Strahlungsleistung mit der Entfernung zum Äquator und der Sonnenstand über dem Horizont abnimmt. Eine Ausnahme in Äquatornähe bilden die Tropen. Durch das besondere Klima dieser Vegetationszone mit den hohen Niederschlägen und der starken Wolkenbildung ist hier die Strahlung etwas schwächer. Die Abbildung 2.3 zeigt die monatliche Globaleinstrahlung in Hamburg und in München im Jahr 2023. Zu erkennen ist, dass München ein etwas höheres jährliches Globaleinstrahlungsangebot von $1234 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ während Hamburg nur $1069 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ erhält.

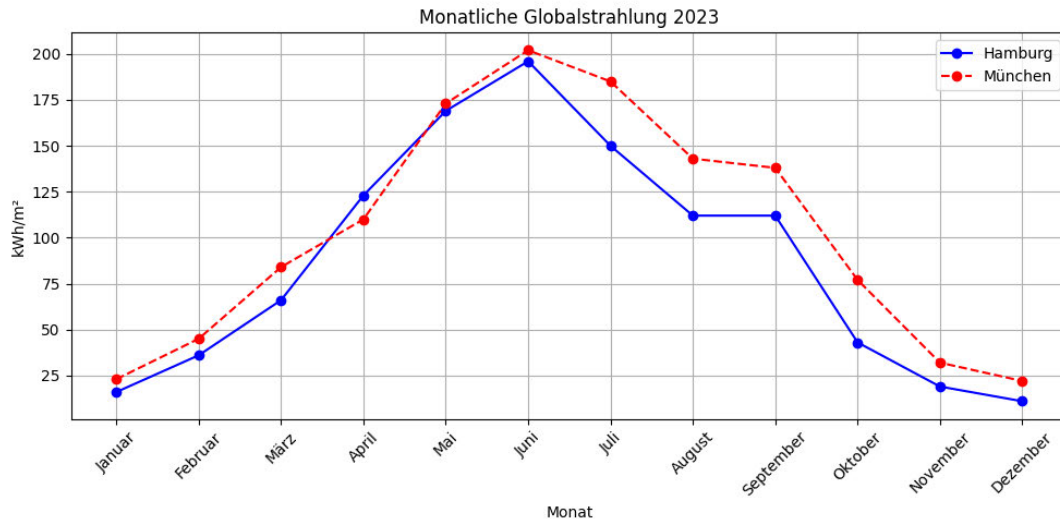


Abbildung 2.3: Vergleich München und Hamburg

2.3.3 Air Mass

Ein Wert, der die Abnahme der Solarenergie beschreibt ist der Air Mass Wert. Er beschreibt die Auswirkung der zurückgelegten Distanz in der Erdatmosphäre. Je flacher der Einfallswinkel der Strahlung, desto größer ist die zurückgelegte Distanz und desto höher ist der Air Mass Wert. Die Strahlung nimmt dabei durch die Streuung und Absorption mit der Luft und Partikeln in der Atmosphäre ab. Dies verringert die Intensität des Lichts und beeinflusst den Ertrag einer PV-Anlage negativ. Es gibt drei Air Mass Werte welche für die Energiebereitstellung einen Einfluss haben. AM0, ist dabei der Wert, der keinen Einfluss durch die Atmosphäre erfährt. Dieser Wert ist nur im Weltall oder an der Grenze der Atmosphäre erreichbar. Diese Strahlung wird auch als extraterrestrisches Spektrum bezeichnet. Die Leistung der Strahlung beträgt $1367 \frac{W}{m^2}$. Der direkt senkrechte Strahleneinfall wird als AM1 bezeichnet und ist auch der geringste auf der Erdoberfläche mögliche AM Wert. Die Strahlen durchdringen die 25km dicke Atmosphäre und werden dabei abgeschwächt. Damit dieser Zustand eintritt, muss die Sonne im Zenit stehen, was beispielsweise zur Mittagszeit oder in der Nähe des Äquators geschieht. Der für die meisten Berechnungen relevanter Air Mass Wert ist 1,5. Dies liegt vor, bei einem Sonneneinstrahlungswinkel von 48,2 Grad. Das Licht legt dabei das 1,5fache der Erdatmosphäre zurück. Bei klarem Himmel und keinen Wolken, erreicht die Solarstrahlung eine Leistung von $1000 \frac{W}{m^2}$. Mit diesen Werten, kann man Rechnungen und Vergleichswerte ermitteln, die mit den Werten in der Praxis gut übereinstimmen. [40] [1]

2.4 Energieerzeugung aus Sonnenstrahlung

Die Solarzellen bestehen aus einem Halbleitermaterial. Halbleiter weisen leitende Eigenschaften zwischen Metallen und Isolatoren auf. Diese Materialien sind bei einer tiefen Materialtemperatur keine elektrischen Leiter. Erst durch eine Erhöhung der Temperatur, ergibt sich bei diesen

Materialien die Fähigkeit, Elektronen zu leiten. Mit steigender Temperatur erhöht sich diese Leitfähigkeit weiter. Durch die Erhöhung der Temperatur lösen sich Valenzelektronen aus ihren Bindungen und werden zu Leitungselektronen. Diese Elektronen können dann durch den Halbleiter wandern. Gleichzeitig kann auch das entstandene Loch, aus dem sich das Elektron gelöst hat, wandern. Das Elektron stellt dabei eine negative Ladung, das Loch eine positive Ladung dar. Deshalb ist in einem Halbleiterkristall die Konzentration an Elektronen n und Löchern p immer gleich. In den Halbleitern stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Das heißt, Löcher werden wieder mit freien Elektronen verbunden. Die Konzentration an Elektronen und Löchern ist eine Materialkonstante. Der leitende Effekt lässt sich noch über die Störstellenleitung erhöhen. Dafür werden Fremdatome in den Halbleiter eindiffundiert, die eine höhere Wertigkeit als das Halbleitermaterial aufweisen. Dadurch kann das zuvor erwähnte thermodynamische Gleichgewicht angehoben werden. Die zusätzlichen Elektronen des Fremdatoms sorgen für mehr Elektronen n als Löcher p . Dieser Leitungszustand im Halbleiter wird n-Leitung genannt. Ähnlich dazu, lässt sich durch die Zugabe von minderwertigen Atomen eine p-Leitung erzeugen. Durch den Photoeffekt, welcher durch die Photonen der elektromagnetischen Strahlung entsteht, können Elektronen ebenfalls vom Valenzband gelöst werden und es entsteht so ein Elektronen-Loch-Paar. Die Elektronen können für die Erzeugung eines Stroms verwendet werden. Durch Potenzialunterschiede im Material entsteht ein Fluss und die Elektronen können wandern. Durch ein gezieltes Eindiffundieren von Fremdatomen können so Gebiete mit einer erhöhten p oder n Konzentration erzeugt werden. Diese Übergänge dieser Konzentrationsgebiete sind als p-n-Übergang bekannt. Nahe dieser Grenzen kommt es zu einem Austausch der Ladungsträger und zwischen den Gebieten entsteht eine unterschiedliche Raumladung, welche das elektrische Feld verstärkt. Wird ein Halbleiter dauerhaft beleuchtet, entstehen durch die Photonenenergie immer mehr solcher Elektronen-Loch-Paarungen. Der Halbleiter wird zum elektrischen Feld und verstärkt die Trennung der geladenen Teilchen mehr. Es baut sich im Halbleiter eine Spannung auf die messbar ist. Durch einen externen Stromkreis, kann das elektrische Feld von außen überwunden werden und es fließt ein Strom. Wird diese Spannung nicht abgebaut, baut sie sich zu einem Maximum auf. Dieser Wert ist die Leerlaufspannung der Solarzelle. Die Spannung einer sehr gut optimierten Silizium-Solarzelle beträgt etwa 800 mV. Führt man diese Spannung nun über externe Leiter ab und erzeugt einen Kurzschluss, erhält man den Kurzschlussstrom einer Solarzelle.[40] [33]

2.4.1 Einstellung der Spannung und der Stromstärke

Die Stromstärke und die Spannung einer Solarzelle sind beschränkt durch die Eigenschaften der Solarzelle. Um diese anzupassen und zu erhöhen, werden Solarzellen zu Solarmodulen verschaltet. Durch das Verschalten in Reihe, kann die Ausgangsspannung erhöht werden. Das parallele Verschalten erhöht die Stromstärke. Die Abbildung 2.4 zeigt den Einfluss des Aufbaus eines Solarmoduls auf die Spannungs-Strom-Kennlinie. [33] In den standardmäßigen Modulen werden oft 60 Zellen zu einem Modul verschaltet. Ein Problem bei dem Verschalten der Zellen zu Strängen ist die Verschattung von einzelnen Zellen. Durch den geringeren Strom von einer Zelle in einem

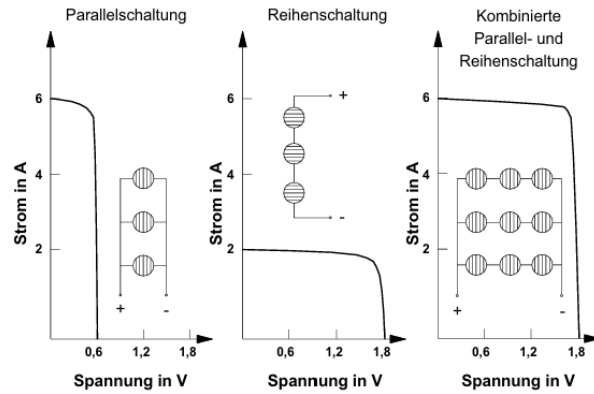


Abbildung 2.4: Einfluss Aufbau eines Moduls auf die Kennlinie [40]

Strang, werden die anderen Zellen ausgebremst und deren Strom verringert. Die Zelle erwärmt sich ebenfalls sehr stark, was die Lebensdauer reduziert. Um diesen Hotspot Effekt zu umgehen werden Bypass Dioden verbaut. Diese werden parallel zu den Zellen verbaut und verringern den Effekt der Ausbremsung. [40] Um den Solarertrag zu maximieren, werden die Module mit einem

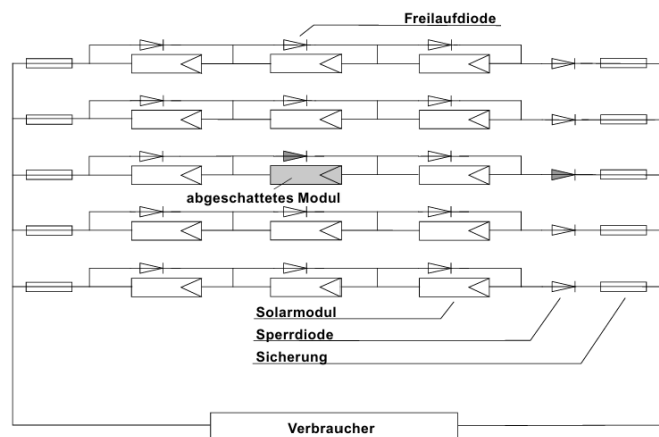


Abbildung 2.5: Verschaltung Freilaufdiode [40]

Maximum Power Point Tracking (MPPT) Verfahren betrieben. Die Spannung und der Strom einer Solarzelle ändern sich abhängig von Einstrahlung und Temperatur, sodass sich auf der Kennlinie ein Punkt mit maximaler Leistung ergibt. Ein MPPT-Regler oder -Algorithmus wird häufig in Wechselrichtern oder Laderegeln verbaut und tastet verschiedene Betriebspunkte ab und ermittelt kontinuierlich, bei welcher Kombination von Strom und Spannung die Leistung am höchsten ist. Die Leistungselektronik passt den Stromfluss durch die Module so an, dass die Solarzellen nahe diesem Punkt arbeiten. Dadurch wird zu jeder Tageszeit, bei jeder Wetterlage und bei verschiedenen Temperaturbedingungen, der höchstmögliche Solarertrag erzielt. [12]

2.5 Kilowattpeak

Für eine Vergleichbarkeit der Solarmodule, wird von den Herstellern der Nennleistungswert „Kilowattpeak“ (kWp) ermittelt und veröffentlicht. Dieser Wert wird von den Herstellern unter den Standard Test Bedingungen ermittelt. In diesen genormten Bedingungen wird das Modul mit $1000 \frac{W}{m^2}$ und einem Air Mass Wert von 1,5 bestrahlt und weist eine Zelltemperatur von 25 Grad Celsius auf. Mit diesem Wert können Module nicht nur verglichen werden, sondern auch schon grobe Ertragsprognosen durchgeführt werden. Dafür gibt es den spezifischen Jahresertrag, der standortabhängig ist. Dieser gibt an, wie viel Kilowatt Strom pro installiertem kWp erzeugt werden kann. Dies ist aber nur eine Prognose, die Bewölkung, Anlagenalter, Modulverschmutzung und Ausrichtung nicht berücksichtigt. In Mitteleuropa kann pro installiertem Kilowattpeak rund 850 bis 1250 kWh Strom im Jahr erzeugt werden. [40]

2.6 Weitere Netzkomponenten

Um den Strom aus einem Solarmodul verwenden zu können, sind weitere Netzkomponenten notwendig. Je nach Anwendungsfall handelt es sich um einen Wechselrichter oder Laderegler.

2.6.1 Wechselrichter

Der Wechselrichter ist notwendig, wenn der Strom im Haus verbraucht wird und ins Netz eingespeist wird. Der von den Solarpaneelen erzeugte Gleichstrom findet im Haushalt keine Verwendung, da die meisten Geräte 230V und 50Hz Wechselstrom benötigen. Ein Wechselrichter wandelt den Gleichstrom in einen verwendbaren Wechselstrom um. Es gibt unterschiedliche Varianten von Wechselrichtern welche je nach Leistungsbereich verwendet werden. Die einfachste Form ist der Rechteckwechselrichter. Es handelt sich dabei um eine H-Brücke aus 4 Schaltern und einen nachgeschalteten Transformator. Schalter S1 und S4 schließen gleichzeitig und wechseln sich im 50 Hz Rhythmus mit Schalter S2 und S3 ab. Somit kommt am Transformator der Strom in einer jeweils anderen Richtung an und gibt einen Wechselstrom ans angeschlossene Netz weiter.

Eine bessere und kostenintensivere Bauweise ist der Sinuswechselrichter. Dieser erzeugt aus der Gleichspannung dieselbe sinusförmige Wechselspannung aus dem Netz. Dafür werden zu der zuvor erwähnten Bauweise ein Pulsverhalten eines Schalters der Schaltpaare eingeführt. Mit der Pulsweitenmodulation kann so eine Sinuswelle erzeugt werden. Ein längerer Puls erzeugt somit eine höhere Spannung und ein kurzer Puls eine geringere Spannung. Eine solche Sinusspannung durch die Pulsung einer Gleichspannung kann der Abbildung 2.6 entnommen werden. Hinzu kommt noch die Unterscheidung zwischen einphasigen und dreiphasigen Wechselrichtern. Ab einer verbauten Leistung von 4,6kW empfiehlt sich ein dreiphasiges System zu verwenden. Einphasige sind günstiger und einfacher zu installieren, haben jedoch eine unregelmäßige Lastverteilung,

da der Strom nur über eine Phase läuft. Dies kann zu Effizienzverlusten und bei energieintensiven Verbrauchern, den Wechselrichter an seine Grenze bringen. Dreiphasige Systeme verteilen den Strom gleichmäßig auf drei Phasen. Dies führt zu einer besseren Netzstabilität und geringeren Spannungsschwankungen. Sie sind die bessere Option bei höheren Energiebedarfen. Die Installation und Anschaffungskosten sind dafür aber deutlich höher. [40] [34]

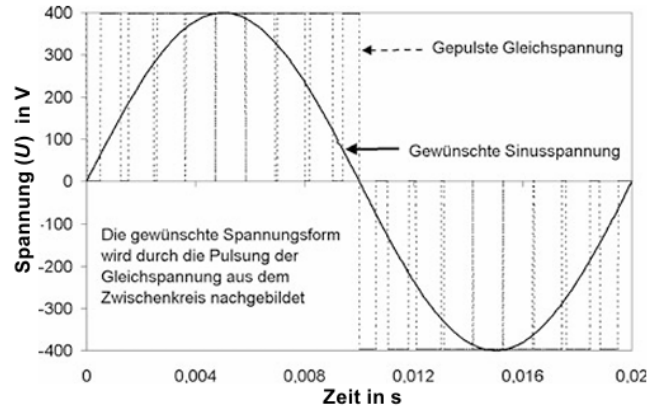


Abbildung 2.6: Sinusspannung durch Pulsung einer Gleichspannung [40]

2.6.2 Laderegler

Ein Laderegler ist für das Laden einer Batterie aus dem Strom einer PV-Anlage zuständig. Er schützt die Batterie vor Überladung und passt den eingehenden Strom und Spannung an. Durch die kontinuierliche Messung des Ladestandes, wird der Strom angepasst beziehungsweise bei voller Batterie gestoppt. Bei einem niedrigen Batteriestand werden nachgeschaltete Verbraucher getrennt, um eine Tiefenentladung zu vermeiden. Die zwei gängigsten Typen sind PWM-Regler und MPPT-Regler. Die PWM-Regler verbindet das Solarmodul direkt mit der Batterie. Durch die Pulsung der Spannung, regelt dieser die Ladespannung. Die Modulspannung wird dabei an die Batteriespannung angepasst und der Ladestrom entspricht dem Modulstrom. Solche Regler arbeiten effektiv, verlieren jedoch stark an Wirkungsgrad, wenn Batteriespannung und Modulspannung nicht identisch sind. Die überschüssige Energie wird in Form von Wärme abgegeben.

Der MPPT-Regler passt die Eingangsspannung laufend an den optimalen Punkt an. Es handelt es sich um einen DC-DC Wandler, welche das Solarmodul mit höherer Spannung arbeiten lässt und diese Überspannung in zusätzlichen Strom wandelt. Durch diese Anpassung kann ein MPPT-Regler eine Batterie mit einem hohen Wirkungsgrad von bis zu 98% laden. Auch ein MPPT-Regler verhindert das Überladen oder Tiefentladen einer Batterie. Jede PV-Anlage und Batteriesystem sollte mit einem Laderegler betrieben werden, um die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen und einen sicheren Betrieb gewährleisten zu können.[34]

2.6.3 Verkabelung

Die Solarmodule werden untereinander verkabelt und angeschlossen. Dabei gilt analog zu dem Zusammenschließen von einzelnen Zellen, dass sich die Spannung von in Reihe verschalteten Module zu einer Gesamtspannung aufaddiert. Diese Verschaltung wird String genannt. Durch die parallele Verschaltung von Modulen, addiert sich die Stromstärke auf. Durch Kombination von diesen beiden Verschaltungsarten, kann die gewünschte Spannung und Stromstärke erreicht werden. Zu beachten ist das bei einer parallelen Verschaltung der Kabeldurchmesser eine wichtige Rolle spielt. Diese Verschaltungen werden dann an einen Wechselrichter oder Laderegler angeschlossen. Die Verkabelung spielt eine wichtige Rolle für die Auslegung eines passenden Wechselrichters oder Laderegler. Diese sind für bestimmte Spannungen oder Ströme ausgelegt. Der Unterschied wird in Abbildung 2.7 verbildlicht. [43]

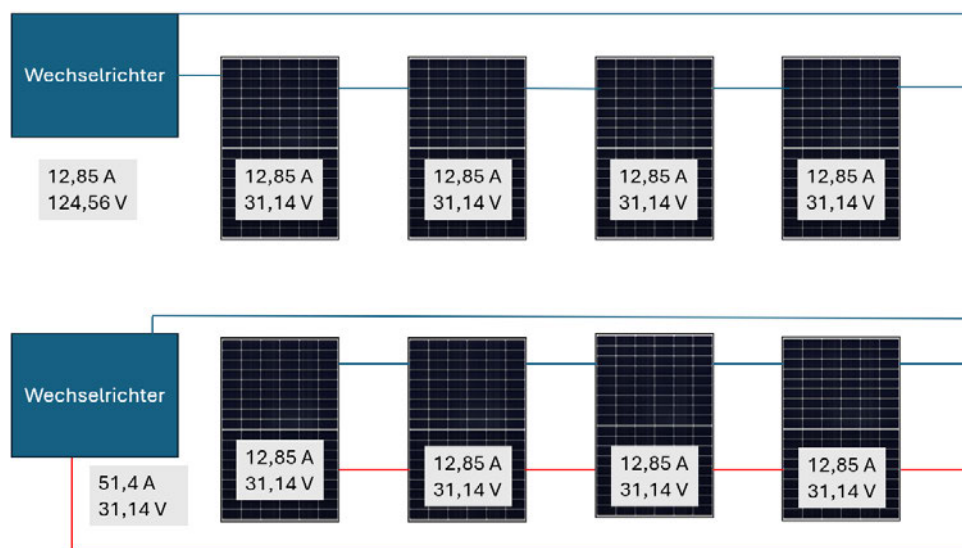


Abbildung 2.7: Auswirkung der Verkabelung

2.6.4 Weitere Komponenten

Weitere erforderliche Komponenten sind Sicherungen oder Trennschalter. Die Sicherungen schützen das Stromnetz und die Solaranlage vor Überspannungen oder zu großen Strömen. Trennschalter werden verwendet, um die Verbraucher von der Solaranlage zu trennen, für Wartungsarbeiten oder Reparaturen. Solaranlagen sind prinzipiell sehr wartungsarm. Sie verbrauchen keine Hilfsmittel oder benötigen keine externe Kühlung, die nachgefüllt oder ausgetauscht werden muss. Die typische Lebensdauer einer Solaranlage beträgt 20-25 Jahre. [30] Ein Wartungsgrund für Solaranlagen ist das Saubermachen der Module. Die Verschmutzung mindert den Wirkungsgrad und ruft den zuvor erwähnten Hotspot Effekt hervor, wenn diese nur lokal ist.

3 Energiespeicherung

Ein grundlegendes Problem ist die zeitliche Varianz des Solarenenergieangebots. Dieses schwankt über den zeitlichen Verlauf des Tages, aber auch über den Jahresverlauf. Energie aus PV-Anlagen stehen deshalb nur zu der Zeit bereit, in der sie erzeugt wird. Wenn diese Energie nicht benötigt und nicht verbraucht wird, geht sie verloren. Um diese Energie aufzubewahren und zu einem späteren Zeitpunkt zu verwenden, werden Speicher benötigt. Es gibt dabei unterschiedliche Funktionsweisen von Energiespeichern, die jeweils eigene Vor- und Nachteile aufweisen. Grundsätzlich wird unterschieden in chemische, mechanische oder elektrische Energiespeicher. Die folgenden Abschnitte stellen die verschiedenen Speicherarten vor.

3.1 Chemische Energiespeicher

Die chemischen Energiespeicher sind weit verbreitet und werden in unserem Alltag täglich verwendet. Bei chemischen Speichern wird durch den Strom eine chemische Reaktion hervorgerufen und so die Energie reversibel gespeichert. Diese kann dann zum benötigten Zeitpunkt wieder umgewandelt und abgegriffen werden. Chemische Speicher speichern dabei Ionen in einem Elektrolyten. Durch unterschiedliche Materialpaarungen, erhält man andere Eigenschaften und so kann diese Art der Speicherung gut an die Situation angepasst werden.

3.1.1 Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Akkus sind die verbreitetste Variante unter den PV-Heimspeichern. Ihre Funktionsweise beruht auf den wandernden Lithium-Ionen zwischen einer Kohlenstoff-Anode und einer Metalloxid-Kathode durch einen flüssigen Elektrolyten. Die beiden Elektroden sind durch eine Membran getrennt, welche passierbar für die Lithium-Ionen ist. Beim Laden werden Lithium-Ionen in die Anode eingelagert (Interkalation) und beim Entladen zur Kathode zurückbewegt, wobei Elektronen durch den äußeren Stromkreis fließen und nutzbaren Strom liefern. Die Zellen sind in Modulen zu Batteriespeichern verschaltet, oft überwacht durch ein Batteriemanagementsystem (BMS) zum Schutz vor Über- oder Tiefentladung. Vorteile der Lithium-Ionen Batterien sind ihre Energiedichte und der hohe Wirkungsgrad. Neuere Lithium-Eisenphosphat-Akkus können etwas über 10.000 Ladezyklen erreichen. Zu den Nachteilen der Lithium-Ionen Batterien gehört die Alterung. Die nutzbare Kapazität nimmt im Laufe der Zyklen langsam ab, sodass

gegen Lebensende weniger Speichervermögen vorhanden ist. Außerdem wird ein Batteriemanagementsystem erforderlich, da diese Akkus empfindlich auf Überspannung oder Tiefenentladung reagieren. Die Gewinnung der wichtigen Inhaltselemente Lithium und Kobalt geht leider mit ökologischen und sozialen Problemen einher. Das Recycling dieser Batterien ist komplex und noch nicht weit verbreitet. [10] [34]

3.1.2 Blei-Säure-Batterien

Blei-Säure-Batterien gehören zu den ältesten wiederaufladbaren Batterien und wurden eine lange Zeit in PV-Insulanlagen eingesetzt. Ihre Zellen bestehen aus Bleiplatten aus reinem Blei und Bleioxid und verdünnter Schwefelsäure als Elektrolyt. Beim Entladen wandeln sich die Bleiplatten in Bleisulfat. Beim Laden werden sie wieder in Blei und Bleioxid zurückgeführt. Dieser chemische Prozess ist schon seit etwa 150 Jahren bekannt. Ein Vorteil dieser Batterien ist ihre Robustheit. Sie sind unempfindlicher gegen Fehlbedienung und können besser mit kurzfristiger Überlastung umgehen. Dadurch benötigen Blei-Säure-Batterien in ihrer einfachsten Ausführung kein komplexes Batteriemanagementsystem. Dies senkt auch die Investitionskosten. Ein weiterer Vorteil besteht in dem bereits vorhandenen Recyclingprozess der Blei-Akkumulatoren. Eine nahezu komplette Wiederverwendung ist möglich. Zu den Nachteilen gehören eine geringere Energiedichte und ein hohes Gewicht. Außerdem ist durch den komplizierteren chemischen Prozess, die Alterung und Kapazitätsabnahme durch mehrer Zyklen deutlich höher als bei Lithium-Ionen Batterien. Mit jedem Zyklus wird etwas Elektrolyt verbraucht und es lagert sich Sulfat ab. Typische Lebensdauern sind fünf bis sieben Jahre. Außerdem sollten sie nicht Tiefenentladen werden. Um Schäden zu verhindern, werden maximal 50% der eigentlichen Kapazität verwendet. Trotz aufgezählter Nachteile, werden Blei-Säure Batterien noch für Inselsysteme verwendet. [40] [34]

3.1.3 Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Battrien sind großvolumige Flüssigbatterien, welche die elektrische Energie in zwei zirkulierenden Elektrolytflüssigkeiten speichern. Die Funktionsweise basiert dabei auf Redox-Reaktionen. In den getrennten Tanks befinden sich zwei unterschiedlich geladene Elektrolyten. Beim Laden und Entladen werden diese Flüssigkeiten durch eine Zelle mit zwei Elektroden und einer ionendurchlässigen Membran gepumpt. An den Elektroden finden chemische Oxidation beziehungsweise Reduktion statt, wobei Ionen durch die Membran wandern und Elektronen über den äußeren Stromkreis fließen.

Die Elektrolyte selbst werden dabei abwechselnd angereichert oder abgereichert und speichern so die Energie in ihrem chemischen Zustand. Vorteil von diesen Batterien ist die freie Skalierbarkeit. Die Leistung wird durch die Anzahl an Zellenstapel bestimmt, die Kapazität über das Tankvolumen. Damit eignen sich diese Batterien für besonders große Speicherbedarfe. Ein weiterer Vorteil ist das diese Batterien nicht altern. Über eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren bleibt die nutzbare Kapazität nahe zu konstant. Außerdem sind die Elektrolytflüssigkeiten in der

Regel nicht entflammbar. Zu den Nachteilen gehören der mittelmäßige Wirkungsgrad und der komplexe Anlagenaufbau. Um eine solche Batterie zu betreiben werden Pumpen, Rohrleitungen, Membranzellen und Steuerungen benötigt. Durch deren freie Skalierbarkeit und die damit eingehende Größe, sind diese Batterien vielversprechend als Großspeicher zur Netzstabilisierung. [16] [34]

3.1.4 Wasserstoffspeicherung

Da Wasserstoff in Zukunft ein relevanter Energieträger wird und die Rolle von primären Energieträgern ersetzen kann, wird es ebenfalls hier als Speichermedium betrachtet. Der PV-Strom betreibt einen Elektrolyseur und trennt in diesem Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff. Der gewonnene Wasserstoff wird dann in Tanks gespeichert. Bei Bedarf kann in einer Brennstoffzelle der Wasserstoff wieder zu Strom und Wärme umgewandelt werden. Vorteil dieser Speicherung ist die Verlustarmut. Es eignet sich gut um überschüssige Energie aus dem Sommer, im Winter zu verwenden. Ein Nachteil stellt der geringe Wirkungsgrad der Elektrolyse dar. Der rein elektrische Rundwirkungsgrad (Strom zu H_2 zu Strom) liegt unter 40%. Es gibt Konzepte zum Verwenden der Abwärme zum Heizen. Somit lässt sich der Gesamtwirkungsgrad erhöhen. [32] [34]

3.2 Andere Energiespeicher

Die erzeugte elektrische Energie muss nicht in chemischer Form gespeichert werden. Weitere Energiespeicherformen sind möglich, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden. Diese Energiespeicher haben eine untergeordnete Bedeutung für PV-Anwendungen, sondern sind eher für speziellere Anwendungen oder als Netzausgleichssysteme in Verwendung.

3.2.1 Mechanische Energiespeicher

Bei mechanischen Energiespeichern wird die Energie in Form von Lage-, Bewegungs- oder Druckenergie gespeichert und später wieder in elektrische Energie umgewandelt. Ein Beispiel dafür sind Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher oder Schwungradspeicher. Bei Pumpspeichern wird Wasser in ein höhergelegenes Becken gepumpt und bei Bedarf über Turbinen zur Stromzeugung genutzt. Druckluftspeicher funktionieren ähnlich, nur ist das verwendete Medium Druckluft. Bei Schwungradspeichern werden Schwungräder in Rotation versetzt, um die Energie später wieder abzugreifen. [39]

3.2.2 Elektrische Energiespeicher

Die Energie wird direkt in elektrischen oder magnetischen Feldern gespeichert. Das bekannteste Beispiel stellen dabei Kondensatoren dar. Leider besitzen diese Speicherarten eine geringe Speicherkapazität, profitieren dafür aber von sehr schnellen Lade- und Entladezeiten und einer hohen Lebensdauer. [26]

3.3 Bewertung der Speichermöglichkeiten

Jede Energiespeicher hat Vor- und Nachteile. Im Folgenden werden die praktikabelsten chemischen Energiespeicher anhand ihres Wirkungsgrades, der Energiedichte und Platzbedarf, ihrer Lebensdauer und Nachhaltigkeit bewertet.

3.3.1 Wirkungsgrad

Den höchsten Wirkungsgrad weisen die Lithium-Ionen Batterien auf. Sie besitzen einen Wirkungsgrad von circa 90%. Blei-Säure liegt deutlich darunter mit 70% bis 80%. Redox-Flow Systeme liegen in einem ähnlichen Bereich. Wie bereits erwähnt, ist Wasserstoff in seinem Rundtrip-Wirkungsgrad an letzter Stelle.

3.3.2 Energiedichte und Platzbedarf

Ebenfalls bei der Energiedichte sind Lithium-Ionen Batterien deutlich vorn. Die Energiedichte liegt bei circa $0,65 \frac{MJ}{kg}$. Blei-Säure-Batterien liegen hingegen bei etwa $0,1 \frac{MJ}{kg}$. Redox-Flow-Batterien benötigen große Tanks und sind für die Versorgung im Labor ungeeignet.

3.3.3 Lebensdauer und Zyklen

Mit einer Lebensdauer von über 20 Jahren und über 10.000 Zyklen ohne tiefgreifenden Kapazitätsverlust liegt die Lithium-Ionen Technologie weit vorne. Bleiakkus fallen mit einer Zyklenanzahl von 500 bis 1500 deutlich schwächer aus.

3.3.4 Nachhaltigkeit

In diesem Punkt schneiden die Bleibatterien positiv ab. Blei ist zwar giftig, aber durch die Recyclingquote von nahe 100% wird es vollständig recycelt. Bei Lithium-Ionen Batterien kommt der komplizierte und aufwendige Abbau von Lithium und Kobalt, welches die wichtigsten Inhaltstoffe für die Batterien sind.

3.4 Energiespeicherauswahl

Anhand der zuvor genannten Vorteile soll für das Labor abgewogen werden, ob eine Blei-Säure oder Lithium-Ionen Batterie angeschafft werden soll. Die positiven Aspekte, die für eine Blei-Säure-Batterie sprechen, sind die geringen Anschaffungskosten und die bessere Nachhaltigkeit.

3.5 Integration der Speicher in das PV-System

Das PV-System erzeugt Gleichstrom. Für die Speicherung in die Batterie, ist dies vorteilhaft, da diese ebenfalls Gleichstrom speichert. Bei der Kombination einer PV-Anlage und einem Energiespeicher kann zwischen zwei Modellen unterschieden werden. Ein Inselsystem wird als vollständig autark verstanden und versorgt die Verbraucher nur über die Batterie und das PV-System. Ein netzgekoppeltes System hat Zugang zum öffentlichen Netz und ermöglicht so eine garantierte Versorgung. Das Inselsystem wird oft verwendet bei Orten, an denen es keinen Netzanschluss gibt. Systeme mit Netzanschluss sind weiter verbreitet, da diese immer Strom liefern können, selbst wenn die PV-Anlage keinen erzeugt und die Batterie leer ist oder nicht weiter entleert werden sollte. Beim Netzanschluss hilft eine Batterie den Eigenverbrauch zu erhöhen. Die Einspeisung des erzeugten Stroms erfolgt zunächst in den Batteriespeicher. Erst nach dessen vollständiger Ladung wird überschüssiger Strom in das öffentliche Netz abgegeben.

4 Stand der Technik an anderen Hochschulen

Viele Hochschulen und Universitäten bieten eine große Dachfläche und großzügige Campusflächen zur Verfügung. Diese bieten eine optimale Fläche zur Deckung des Strombedarfs der einzelnen Bildungseinrichtungen. Im Folgenden werden vier Standorte vorgestellt, welche selber PV-Strom erzeugen, um ihren Strombedarf zu decken oder grünen Strom für das Netz herzustellen.

4.1 Philipps-Universität Marburg

Die Philipps-Universität in Marburg ist eine große Universität mit mehreren wissenschaftlichen Zentren. Die 16 Fachbereiche bieten ein vielfältiges und breit gefächertes Bildungsangebot, dabei werden die Ingenieurwissenschaften nicht angeboten. Auf diesen Zentren sind aktuell sechs große Photovoltaikanlagen installiert, die eine Leistung von 477kWp bringen. Die Universität kann mit diesen etwa 450.000kWh Strom im Jahr erzeugen. Zu den bereits vorhandenen Anlagen werden weitere dazukommen. Die Landesregierung hat verordnet möglichst viele Dachflächen für die Stromerzeugung zu verwenden. Ziel ist es, nicht den Eigenverbrauch zu decken, sondern im Stromnetz den konventionellen erzeugten Strom durch grünen Strom zu ersetzen. Ein Problem der Universität ist, dass viele Gebäude als Einzelkulturdenkmal klassifiziert sind. Deshalb muss bei Sanierungen und damit die Möglichkeit, die Dachfläche für die Stromerzeugung zu verwenden, oft mit der Denkmalschutzbehörde zusammengearbeitet werden. Gemeinsam werden dann angepasste Lösungen gefunden. Ebenfalls wichtig, ist die Prüfung der Dachstatik und Bebauungsmöglichkeiten. Im Interesse der Universität liegt eine PV-Bebauung auch aufgrund von Kostengründen. Diese Bebauung ist kostengünstiger als die historische Schiefereindeckung. [25]

4.2 Universität Hamburg

Die Universität Hamburg, gegründet im Jahr 1919, ist mit über 42.000 Studierenden die größte Forschungs- und Ausbildungseinrichtung Norddeutschlands. Sie bietet rund 170 Studiengänge in acht Fakultäten an und wurde 2019 als Exzellenzuniversität ausgezeichnet. Auf dem Dach des „Center for Hybrid Nanostructures“ (CHyN) in der Science City Hamburg Bahrenfeld wurde eine bedeutende Photovoltaikanlage in Betrieb genommen. Mit einer Leistung von knapp 160 Kilowattpeak und einer Fläche von über 750 Quadratmetern zählt sie zu den größten der HEnW KommunalEnergie GmbH auf Hamburger Dächern installierten Anlagen. Dieses Projekt ist das Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen der Universität Hamburg, der Sprinkenhof GmbH als

Eigentümer des Gebäudes und der HEnW KommunalEnergie GmbH, einer Tochtergesellschaft der Hamburger Energiewerke. Mit dieser Anlage kann an dem Standort rechnerisch rund 140.000 kWh Strom erzeugt werden. Es stellt einen wichtigen Beitrag zu den Klimaschutzzielen der Stadt Hamburg dar. [41]

4.3 Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Die Universität Oldenburg hat bereits auf 80% ihrer Dachfläche PV-Anlagen aufgestellt und ist damit ein Vorreiter unter den Hochschulen. Am Standort Haarentor sind auf sieben Dächern PV-Anlagen installiert mit einer Gesamtleistung von 569 kWp. Diese erzeugen im Jahr etwa 486.000 kWh. Ein weiterer Standort ist Welchoy, welcher jährlich etwa 139.000 kWh erzeugt. Wenn die geplanten neuen Anlagen in Betrieb genommen werden, steht eine Peakleistung von insgesamt 1400kWp zur Verfügung. [15]

4.4 Universität Göttingen

Die Universität Göttingen hat einen übersichtlichen Aufbau und hohe Transparenz ihrer Solaranlagen. Insgesamt betreibt die Uni neun Solaranlagen mit einer Gesamtpeakleistung von 382 kWp. Die Jahresproduktion im Jahr 2020 beträgt 336,172 kWh. Außerdem hat die Universität auch deren geplante Jahresproduktion für einige Anlagen veröffentlicht. In der Tabelle 4.1 werden die erwartete und tatsächliche Produktion miteinander verglichen. [35] Aus der Tabelle wird deut-

Modul	erwarteter Ertrag [kWh]	tatsächlicher Ertrag [kWh]	Differenz [kWh]
2435	19,125	22,569	3,44
2356	22,491	25,111	2,62
5360	59,097	49,576	-9,521
0685	55,584	60,313	4,729
6320	51,163	54,865	3,702
4395	36,784	39,394	2,61
2356 E	30,888	32,584	1,696
gesamt	275,132	284,412	9,28

Tabelle 4.1: Vergleich der geplanten und tatsächlichen Produktion im Jahr 2020 nach [35]

lich, dass die Energieerzeugung aus Solarenergie Schwankungen unterliegt, die nicht mitgeplant werden können. Diese können die unterschiedlichsten Ursachen haben, wie Verschmutzung der Module oder Verschattungen durch Wolken. Das Angebot an Solarenergie schwankt von Jahr zu Jahr, da die Anzahl der Sonnentage und die Wetterbedingungen nicht immer gleich sind.

5 Vorstellung des erarbeiteten Modells

In diesem Kapitel wird der Laborversuch an der Reibspindelpresse Eumuco RSPP 160/250 an der HAW im Raum F016 vorgestellt. Dies ist relevant, da anschließend die benötigte Energie im Jahr ermittelt werden kann. Daraus kann ein passendes Paar aus Solarmodul und Batterie ermittelt werden.

5.1 Vorstellen des Laborversuchs

Die Reibspindelpresse wird für das Labor „Stauchversuch“ in dem Modul „Fertigungstechnik“ verwendet. Ziel dieses Versuches ist es, das Arbeitsvermögen der Presse experimentell zu messen. Dafür wird eine Gruppe von Studenten fünf Aluminiumproben umformen und anschließend anhand von zwei Methoden das Arbeitsvermögen bestimmen.

Die erste Methode zur Bestimmung ist die Wärmebilanz. Diese Methode wird angewandt, unter der Annahme, dass die gesamte Umformarbeit in Wärmeenergie umgewandelt wird. Diese Wärme entsteht durch die Reibung der einzelnen Gleitebenen aneinander, während des Umformprozesses. Anhand der Wärme, kann bestimmt werden wie viel Umformarbeit insgesamt an der Probe verrichtet wird. Die Temperatur wird sehr aufwendig in einem Dewargefäß, welches mit Wasser gefüllt ist, gemessen. Dieser Schritt ist notwendig, da die Temperatur in der Probe ungleichmäßig verteilt ist und daher nicht direkt an der Oberfläche ablesbar. Die Probe wird nach dem Umformen in das Gefäß gelegt und anschließend die Temperatur des Wassers gemessen. Um die Temperatur homogen zu halten, wird das Wasser gerührt. Mit Hilfe der Temperaturdifferenz und der Masse der Probe, kann nun die verrichtete Arbeit berechnet werden. Die Vorbereitungen für das Messen durch die Wärmebilanz sind aufwendig und kosten Zeit.

Die zweite Methode ist die Bestimmung über ein Kraft-Weg-Diagramm. Um diese Methode zu verwenden, sind zusätzliche Sensoren notwendig. Es wurden ein Kraftdynamometer und ein induktiver Wegsensor verbaut. Der Kraftdynamometer kann die Verformung eines Körpers aufnehmen, der mit Dehnungsmessstreifen beklebt ist. Dadurch wird die Kraft ermittelt. Diese wird als Spannung ausgegeben und an den verbundenen Computer weitergeleitet. Der induktive Wegsensor, misst die Strecke, die der Stößel verfährt. Diese Daten, werden ebenfalls an den Computer gesendet. Durch eine Software, ist dieser in der Lage ein Kraft-Weg-Diagramm zu erstellen. Durch das Integrieren des Graphen, kann so die Umformarbeit bestimmt werden. Beide Methoden werden gleichzeitig angewendet. Das Diagramm wird automatisch vom Computer erzeugt und muss gespeichert und ausgedruckt werden. Die Temperatur des Dewargefäßes wird notiert und anschließend wird das Gefäß erneut vorbereitet. Für jede Probe müssen die genauen Maße

sowie das Gewicht notiert, neues Wasser ins Dewargefäß gefüllt und die Temperatur von diesem aufgenommen werden. Die Auswertung der Daten erfolgt anschließend. Ziel ist es, den Studenten vorzuführen, dass mit unterschiedlichen Methoden dasselbe Ergebnis erzeugt werden kann.

5.1.1 Problem des Laborversuchs

Durch den Aufbau vom Laborversuch und die Methode der Wärmebilanz, die eine gewisse Vorbereitung benötigt, befindet die Presse sich während des Versuches lange im Leerlauf. Bei zwei beobachtenden Laboren lief die Presse zwischen 32 und 45 Minuten. Während dieser Zeit werden die fünf Proben von den Studenten umgeformt und drei Vorführproben durch den Betreuer. Durch das Teilen der Hübe durch die benötigte Zeit, erschließt sich die Dauer eines Hubs von 4,5 Minuten. In der folgenden Tabelle 5.1 sind die Zeiten für ein Labor notiert.

Durchgeführt durch	Hub Nummer	Zeit nach Anschalten	Sekunden nach letzten Hub
Betreuer	1	1:15	0
	2	2:02	47
	3	2:30	28
Studierende	4	10:07	457
	5	16:04	357
	6	22:00	356
	7	26:28	268
	8	30:52	264
	Eingeschaltete Zeit gesamt	32:19	87

Tabelle 5.1: Beobachtungen Laborversuch 16.01.2025

Zwischen den Versuchen, die der Betreuer ausgelöst hat, wurden keine Vorbereitungen getroffen. Diese Proben wurden umgeformt, um die Funktionsweise und das Betätigen der Presse vorzuführen. Die Dauer zwischen den Hügen der Studenten ist deutlich länger. Das liegt an den zuvor erwähnten Vorbereitungen und Nachbereitungen der Wärmebilanz-Methode.

Wenn die Anlage 71 Hübe die Minuten leisten kann, beträgt die Dauer von einem Hub 0,84 Sekunden. In den 32:19 Minuten wurden 8 Hübe ausgeführt. Die gesamte Hubdauer während des Laborversuches beträgt somit 6,7 Sekunden. Für den Anlauf also das Erreichen der Drehzahl und dem Leerlauf benötigt die Maschine 19 Sekunden. Nach den 19 Sekunden wird auch die Stern-dreiecksschaltung umgeschaltet. Durch Abziehen dieser Betriebszustände, berechnet sich eine Leerlaufdauer von 31 Minuten und 54 Sekunden. Das ist ein prozentualer Anteil von 98,71%.

5.2 Auswerten des Energieverbrauchs

Um den Energieverbrauch der Maschine zu ermitteln, wurde mit dem Messkoffer des IPTs eine Messung des Stroms in den zuführenden Leitungen durchgeführt. Bei dem Koffer handelt es sich um eine Masterarbeit, die es dem IPT ermöglichen soll, bei Fremdfirmen Strommessungen

durchzuführen. Da die Presse zum Antreiben des Motors dreiphasigen Wechselstrom benötigt, wird mithilfe von Strommesszangen, der Strom in den Leitungen gemessen. Diese Messung wurde zweimal durchgeführt. Einmal wurde nur der Anlauf beobachtet und beim zweiten Mal der Anlauf mit einer Kombination aus unterschiedlichen Hüben. Diese beide Messungen sind Grundlage für die Berechnung des Energieverbrauchs. Die Diagramme 5.1 und 5.2 zusammen mit der Tabelle 5.2 beschreiben diese Messungen. Es wurde eine Auflösung von 16Hz verwendet, um ein Ergebnis zu erhalten, welches möglichst nah an der Realität ist. Dadurch stehen alle 0,16 Sekunden ein Messwert zur Verfügung.

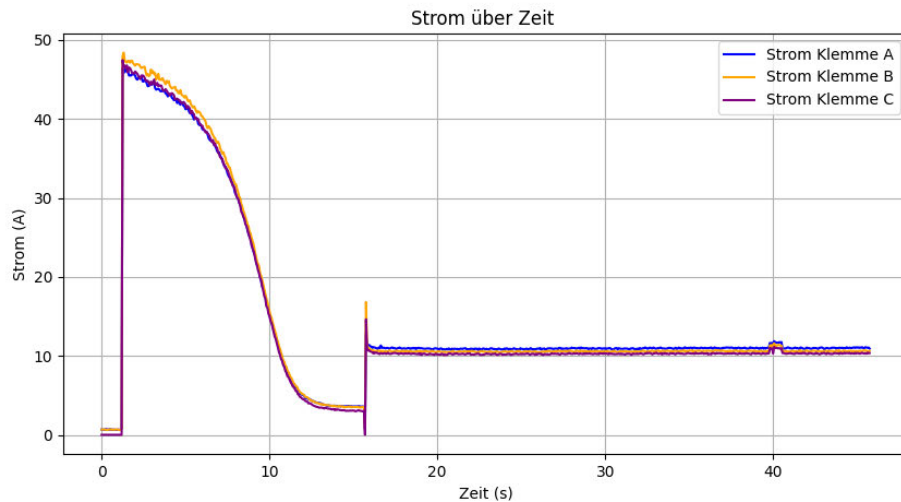


Abbildung 5.1: Ströme in den Klemmen Aufnahme 1

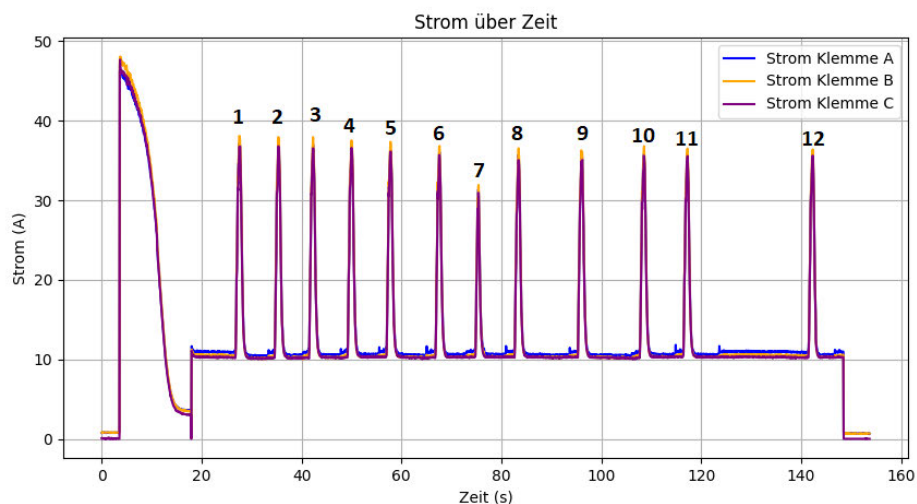


Abbildung 5.2: Ströme in den Klemmen Aufnahme 2

Hubanzahl	Besonderheit	Eingestellte Arbeit
1	einzelne Probe	4000 Nm
2		
3		
4		
5		
6	zwei Proben nebeneinander	
7	ohne Probe	
8	bereits umgeformte Probe	
9	2 übereinanderliegende bereits umgeformte Proben	
10	2 nebeneinanderliegend größerer Querschnitt	
11	größerer Querschnitt einzeln	
12	einzelne Probe	5000 Nm

Tabelle 5.2: Erläuterung zu den Hülen in Abbildung 5.2

Beim Umwandeln von Gleichstrom (DC) in Wechselstrom (AC) spielt der Leistungsfaktor, oft als $\cos(\phi)$ bezeichnet, eine wichtige Rolle. Er beschreibt das Verhältnis zwischen der tatsächlich nutzbaren Wirkleistung (P) und der gesamten Scheinleistung (S) in einem Wechselstromsystem. Ein Leistungsfaktor von 0,8 bedeutet, dass nur 80 % der elektrischen Leistung tatsächlich für nutzbare Arbeit verwendet werden können, während die restlichen 20 % als Blindleistung auftreten. Diese Blindleistung entsteht durch Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung, die insbesondere in Systemen mit Induktivitäten oder Kapazitäten eine Rolle spielen. In die folgenden Auswertungen wird dieser Leistungsfaktor mit einbezogen.

5.2.1 Anlauf der Presse

Zum sanften Anlauf der Presse wird eine Sterndreieckschaltung verwendet. Es handelt sich dabei um eine bewährte Methode, welche häufig verwendet wird, wenn große Massen mit Drehstrom-Asynchronmotoren in Bewegung versetzt werden sollen. Die Hauptaufgabe der Sterndreieckschaltung ist es den elektrischen Anlaufstrom zu begrenzen und die mechanische Belastung des Antriebsstrangs zu reduzieren.

Beim Anlauf des Motors in Dreieckschaltung, würde der gesamte Netzstrom in die Wicklungen fließen. Da das Anlaufmoment in dieser Phase gering ist, kann dies zu einem sehr hohen Stromverbrauch führen und das Stromnetz stark belasten. Um dies zu vermeiden, wird das Anlaufen in der Sternschaltung durchgeführt. Der Vorteil der Sternschaltung im Gegensatz zur Dreieckschaltung ist, dass die Spannung in den Wicklungen um $\sqrt{3}$ größer ist. Dadurch fließt in den Wicklungen ein geringerer Strom. Leistung und Verbrauch mindern sich um etwa zwei Drittel im

Gegensatz zur Dreieckschaltung. Nachteil ist ein geringeres Drehmoment des Motors, wodurch dieser sanfter anläuft.

Der Unterschied der beiden Verschaltungen liegt in deren Aufbau. Diese sind in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 abgebildet. Die Sternschaltung verbindet die drei Wicklungen des Motors an der einen Seite mit der Phase und an der anderen Seite in einem Sternpunkt, in dem die Wicklungen miteinander verbunden sind.

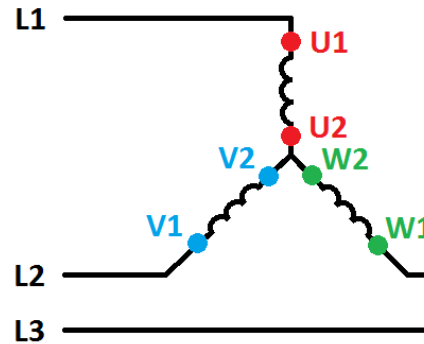


Abbildung 5.3: Schema Sternschaltung [2]

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Strang}} \cdot I \quad (5.1)$$

Um die gesamte Leistung des Motors abzugreifen, wird nach Erreichen von 80%-90% der Nenn-drehzahl auf die Dreieckschaltung umgeschaltet. Bei der Presse im Labor geschieht das nach circa 15 beziehungsweise 17 Sekunden (siehe Abbildung 5.1 und 5.2). Dabei sind die Wicklungen in einer Dreieckschaltung miteinander verbunden. Die Motorwicklungen sind jeweils zwischen zwei Phasen geschaltet. Dabei nimmt der Motor die gesamte Netzspannung auf und stellt seine gesamte Leistung dar. [31]

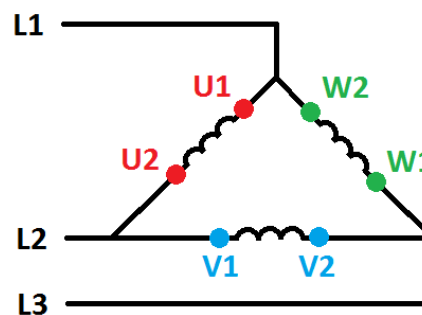


Abbildung 5.4: Schema Dreieckschaltung [2]

$$P = U_{\text{Strang}} \cdot I \quad (5.2)$$

Die Leistung ist dabei in der Dreieckschaltung um das dreifache größer als in der Sternschaltung. Durch die Aufgenommenen Werte, ist dieses Sichtbar, in der Berechnung wird das jedoch

vernachlässigt. Bei der Verwendung gemessener Werte wird zur Leistungsberechnung folgende Formel herangezogen 5.3

$$P = 3 \cdot U_{\text{Strang}} \cdot I_{\text{Strang}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Leiter}} \cdot I_{\text{Leiter}} \quad (5.3)$$

Diese Formel gilt unabhängig davon, ob eine Stern oder Dreiecksschaltung vorliegt. [38]

5.2.2 Berechnung der Leistung während des Anlaufs

In dem folgenden Diagramm 5.5 kann man den Strom in den drei Klemmen erkennen. Es ist eine veränderte Variante der Abbildung 5.1, die nur den Anlauf betrachtet. Bei genauer Betrachtung der beiden Messungen in den Abbildungen 5.2 und 5.5 fällt auf, dass die Anläufe unterschiedlich lang dauern. Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden, wird die verbrauchte Leistung für die Anläufe berechnet und anschließend der Mittelwert gebildet. Die verbrauchte elektrische Leistung

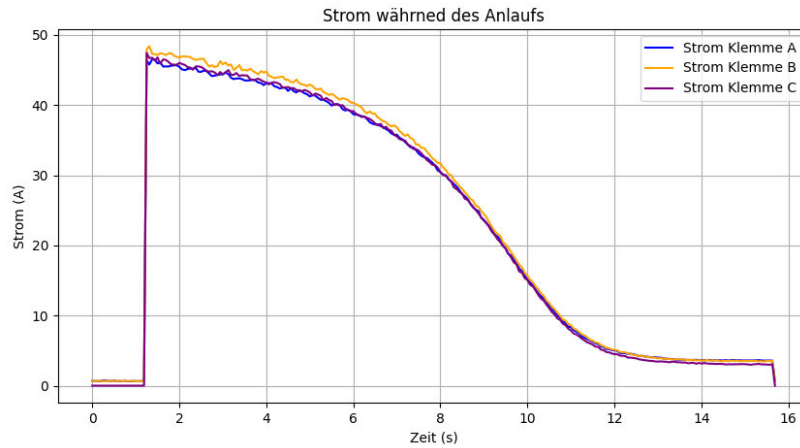


Abbildung 5.5: Erste Messung; Anlauf

lässt sich durch den Flächeninhalt des Graphens bestimmen. Ein anderer Weg ist das Aufsummieren der Leistungsmomentwerte multipliziert mit der zeitlichen Differenz der Werte. Dies ist in Formel 5.4 dargestellt.

$$E = \int P(t) dt \quad (5.4)$$

Die elektrische Leistung berechnet sich aus der Formel 5.5.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot (i_A + i_B + i_C) \cdot \cos(\phi) \quad (5.5)$$

Wobei der folgende Term 5.6 zur Berechnung der Scheinleistung verwendet wird und der Faktor $\cos(\phi)$ die Blindleistung berücksichtigt.

$$S = (i_A + i_B + i_C) \cdot U \quad (5.6)$$

Das Ergebnis ist die verbrauchte elektrische Leistung in diesem Messwert. Die Leistung in diesem Zeitintervall wird durch die Multiplikation mit $\frac{1}{16}$ berechnet. Das aufsummierte Produkt gibt dann einen Wert in Wattsekunde an. Für Energiespeicher ist jedoch der kWh-Wert wichtig, weshalb die Ergebnisse durch 1000 für Kilo und 3600 zur Umrechnung von Sekunde auf Stunde geteilt werden müssen.

$$E_1 = 0,0554kWh$$

$$E_2 = 0,0546kWh$$

$$\bar{E} = 0,055kWh$$

Im Gegensatz zum Leerlauf, ist es für den Anlauf aussagekräftiger, wie viele Kilowattstunden bei einem kompletten Anlauf verbraucht werden. Als relevante Zeitdauer wird hier der Umschaltvorgang zwischen der Stern- und der Dreieckschaltung gesehen.

5.2.3 Berechnung der Leistung im Leerlauf

Wie zuvor erwähnt, befindet sich die Presse größtenteils im Leerlauf. Um auf die verbrauchte Leistung im Leerlauf schließen zu können, wird die verbrauchte Leistung für den Leerlauf in einer Sekunde berechnet. Anschließend, kann diese Leistung variable mit der Dauer, die die Anlage sich im Leerlauf befindet multipliziert werden. Das Ergebnis ist die verbrauchte elektrische Leistung. Für die Berechnung des Leerlaufes werden beide Messungen betrachtet und ein Mittelwert gebildet. Die Abbildung 5.6 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt von der Abbildung 5.1. Eine leichte Schwankung der Ströme i_A , i_B , i_C ist zu erkennen. Außerdem ist zu sehen, dass bei Sekunde 24 ein Peak auftritt. Bei diesem Peak ist die Pumpe, welche die Stößelführung mit Öl versorgt, angesprungen. Diese schaltet sich automatisch alle 2-3 Minuten für eine Sekunde ein. Mithilfe

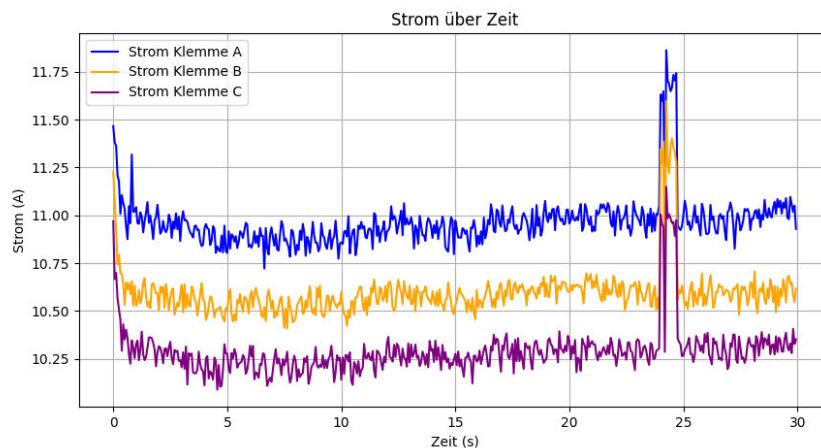


Abbildung 5.6: Betrachtung des Leerlaufes während der ersten Messung

einer Excel-Tabelle und den Formeln 5.5, 5.6, 5.7 wird die Leistung errechnet. Das Ergebnis ist

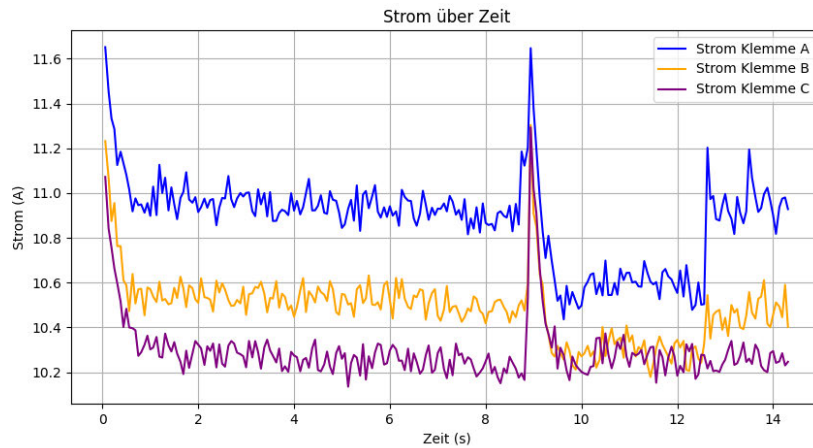


Abbildung 5.7: Betrachtung des Leerlaufes während der zweiten Messung

die Energie, welche die Presse in einem Messwert verbraucht.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.7)$$

Dabei ist x_i der Wert der verbrauchten Leistung und n die Anzahl der Messpunkte. Um die verbrauchte Energie in einer Sekunde zu berechnen, muss der Wert anschließend mit 16 multipliziert werden.

$$\bar{x}_1 = 0,000102 kWh$$

$$\bar{x}_2 = 0,000101 kWh$$

$$\bar{x} = 0,00010 kWh$$

Die Anlage verbraucht je Sekunde im Leerlauf eine Leistung von 0,0016 kWh.

5.2.4 Berechnung der Leistung eines Hubs

Zur Berechnung der Leistung eines Hubs, werden die Hübe aus der zweiten Messung entnommen. Zu einem Hubvorgang wird jeder Messwert mit einem Stromwert, der größer als 12 Ampere ist, angenommen. Dadurch entsteht folgende Abbildung 5.8. In der Aufnahme wurde ein Hub zu den Bedingungen des Laborversuchs durchgeführt. Der Verbrauch von diesem wird im Folgenden ermittelt. Um die Berechnungen nicht von einem Hub abhängig zu machen, wird die Leistung der fünf Hübe am Anfang auch berechnet. Die eingestellte Arbeit von diesen ist 4000 Nm anstatt den 5000 Nm des Laborversuchs. Die ausgewerteten Hübe sind in der Abbildung 5.8 abgebildet. Zum Berechnen, der verbrauchten Leistung eines Hubs, wird das gleiche Vorgehen und die selben Formeln wie im Abschnitt 5.2.2 verwendet. Aus der Abbildung und der Tabelle kann entnommen werden das der Strom für Hübe mit einer Einstellung von 4000 Nm größer als der für den Hub mit 5000 Nm. Außerdem bestehen die Hübe für die 4000 Nm Einstellung aus 27 Messwerten und der für die 5000 Nm nur aus 24. Um mehrere Hübe für die Berechnung des Energieverbrauchs zu berücksichtigen, wird der Mittelwert von diesen Hüben gebildet und anschließend angenommen

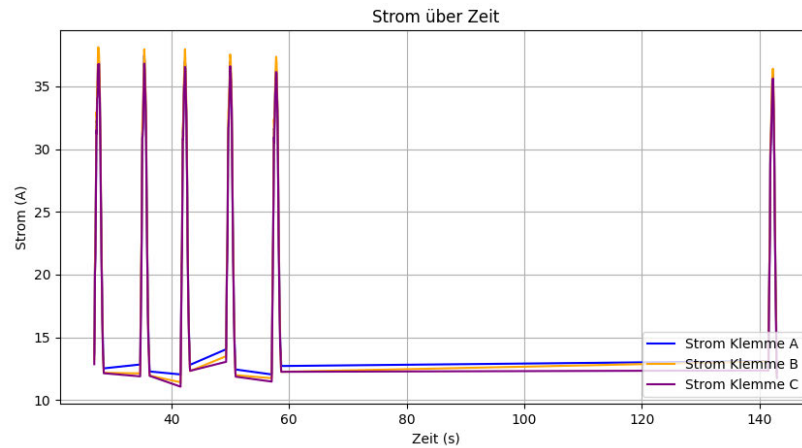


Abbildung 5.8: Betrachtung der ersten 5 Hübe (4000 Nm) und des letzten Hubs (5000 Nm) während der zweiten Messung

Hub	Messwerte von ... bis ...	verbrauchte Leistung
1	26,88 - 28,50	0,0067
2	34,69 - 36,31	0,0065
3	41,56 - 43,19	0,0066
4	49,31 - 50,94	0,0066
5	57,06 - 58,69	0,0065
6	141,56 - 143,00	0,0059

Tabelle 5.3: Berechnung der Leistung eines Hubs

das dies den Verbrauch eines Hubs für die 5000 Nm Einstellung entspricht. Der durchschnittliche Energieverbrauch für einen Hub beträgt somit 0,0065 kWh.

5.2.5 Berechnen des Energieverbrauchs für den Laborversuch

Die in den vorherigen Abschnitten berechneten Verbräuche, können mit den Informationen über die Laborveranstaltung zu einem gesamten Energieverbrauch pro Labor verrechnet werden. Wichtig dabei ist zu beachten, dass es sich um eine Annahme handelt, da die Zeiten je nach Labor variieren können. Aus diesem Grund, wird am Ende ein Sicherheitsfaktor von 25% eingebaut. Dadurch wird der Speicher größer ausgelegt, als tatsächlich benötigt, und hilft, Perioden mit schlechterem Wetter auszugleichen.

$$E_{Labor} = E_{Anlauf} + 3 \cdot E_{Hübe \text{ Betreuer}} + 5 \cdot E_{Hübe \text{ Studenten}} + t \cdot E_{Leerlauf} \quad (5.8)$$

Durch das Einsetzen der zuvor berechneten Verbräuche, errechnet sich ein Energieverbrauch je Laborversuch von 3,27 kWh bei den zuvor erwähnten Bedingungen. Durch den Sicherheitsfaktor entsteht ein Energieverbrauch von 4,08 kWh.

6 Auslegung einer PV-Anlage

Um eine PV-Anlage zur Versorgung des Laborversuchs auszulegen müssen einige Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen stellen die Rahmenbedingungen dar und sind entscheidend für die Auslegung der PV-Anlage in Bezug auf den Ertrag und den Energiespeicher. Die folgenden Berechnungen wurden mit der Excel-Tabelle „Auslegung einer PV-Anlage“ durchgeführt. Sie ist anpassbar und kann die Berechnungen durch die Eingabe von Input-Parametern durchführen. Zu diesen Parametern zählen der Jahresverbrauch, der Längengrad des Aufstellortes, die Neigung, die Ausrichtung und die installierte Leistung des Solarmoduls, sowie die Strahlungsdaten des jeweiligen Standortes auf eine ebene Fläche.

- Der Energieverbrauch bei einem Laborversuch beträgt die zuvor berechneten 4,08 kWh.
 - Das Labor findet im Semester während der Vorlesungszeit mit keinem bis vier Terminen in der Woche statt. Die Terminslots sind Dienstag 8:15 Uhr, Donnerstag 8:15 Uhr, Donnerstag 12:15 Uhr und Freitag 8:15 Uhr. Diese Annahme ist abgeleitet aus dem Laborplan für das Wintersemester 2024/2025. Insgesamt finden im Semester 25 Labore statt.
 - Die Wetterdaten an der HAW sind gleich zu den Wetterdaten der letzten Jahre an der HAW. Für die Berechnung in der Excel, werden Wetterdaten von 2023 verwendet. Diese wurden von PVGIS entnommen.
 - Als Aufstellort werden zwei Orte berechnet. Die Berechnung bezieht sich auf die Befestigung auf dem Dach der HAW, mit einer direkt Ausrichtung nach Süden und einer Neigung von 39 Grad. Dieser Winkel wurde gewählt, um einen hohen Ertrag im Sommer und im Winter zu erreichen. Die zweite Ausrichtung berücksichtigt eine Vorstellung von Professor Doktor Stöver. Es handelt sich um eine Aufstellung am Fenster hinter der Reibspindelpresse. Die genauen Annahmen für diese Aufstellung folgen.
 - Es wird ein netzgekoppeltes System verbaut, um die Batterie zu schonen. Deshalb wird die Batterie nur zu einem Batteriestand von 20% entladen. Dies führt ebenfalls zu einer langlebigeren Batterie.
 - In Hamburg wird je verbrauchter Kilowattstunde aus dem Netz 0,575 kg CO₂ ausgestoßen.
- [5]

6.1 Berechnung des Energieverbrauchs

Um eine passende PV-Anlage inklusive Batteriekapazität zu bestimmen, muss der Energieverbrauch durch die gesamten Laborversuche berechnet werden. In der Vorlesungszeit im Wintersemester 2024/2025 fanden 20 Labore für Maschinenbaustudenten statt. Hinzu kommen noch fünf weitere Labore für die Mechatronikstudenten. Im Sommersemester sind es tendenziell weniger Laborversuche. Damit die PV-Anlage und der Speicher nicht zu knapp dimensioniert werden, wird mit einem identischen Sommersemester von ebenfalls 25 Laborversuchen gerechnet. Je Labor, werden die 4,08 kWh verbraucht. Der Verbrauch in einem Semester beträgt damit 102 kWh. Durch die Annahme der identischen Semester ergibt sich so ein Jahresverbrauch von 204,1 kWh.

6.2 Grobe Rechnung auf dem Dach

Zum Berechnen der benötigten installierten kWp Leistung wird der jahrespezifische Ertrag benötigt. Dieser gibt an, wie viel kWh Strom pro installierter kWp Leistung an einem Standort mit einer bestimmten Ausrichtung und Neigung erzeugt werden kann. Um diesen Ertrag zu ermitteln wird das Online-Tool PVGIS, welches für spätere Berechnungen wichtig sein wird, verwendet. In diesem Tool kann der Jahresertrag abgelesen werden. Für die Koordinaten der HAW und einem Neigungswinkel von 39 Grad ergibt sich ein spezifischer Jahresertrag von $978 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$. [29] Mit diesem Wert lässt sich überschlagen, was für eine kWp Leistung die PV-Anlage benötigt, um den Verbrauch des Labors aufs Jahr gesehen zu decken. Bei dieser Berechnung wird nur der im Jahr mögliche Ertrag gegen den gesamten Verbrauch gerechnet. Dafür wird die Formel 6.1 nach der Anzahl an kWp n umgeformt und für die erzeugte Energie, der Jahresverbrauch eingesetzt. Verluste, wie in dem Wechselrichter, der Batterie oder dem Solarmodul werden vernachlässigt für diese grobe Rechnung.

$$\text{Erzeugte Energie} = n \cdot \text{spezifischer Jahresertrag} \quad (6.1)$$

$$n = \frac{\text{verbrauchte Energie}}{\text{spezifischer Jahresertrag}} \quad (6.2)$$

n ist dabei die benötigte kWp Leistung. Mit den angenommenen Werten ergibt sich folgender Term.

$$\frac{204,1 \text{ kWh}}{978 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}} = 0,20$$

Somit ergibt sich ein Bedarf an 0,2 kWp Leistung. Moderne Module haben eine Leistung von 350 Wp bis 450 Wp. Ein Modul mit einer Leistung von 350 Wp, wäre bereits ausreichend, um den Jahresverbrauch zu decken.

6.3 Grobe Berechnung am Fenster

Der Unterschied zwischen der Berechnung auf dem Dach und beim Fenster ist der Jahresertrag. Der zuvor erwähnte Jahresertrag ergibt sich nur bei einer Neigung von 39 Grad und einem Azimut Winkel von 0 Grad (Direkt Richtung Süden). Auf dem Dach kann die Anlage so montiert werden. Der neue Jahresertrag mit den geänderten Parametern lässt sich ebenfalls in PVGIS errechnen. Laut dem Tool ergibt sich für die neuen Bedingungen ein Jahresertrag von $749,02 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$ [29]. Mit diesem Jahresertrag und der Annahme von einer Leistung je Modul von 350 bis 450 Wp, kann nun geprüft werden wie viel kWp am Fenster installiert werden müssen. Die Annahme für die Montage am Fenster, ist ein Neigungswinkel von 70 Grad und einer nicht optimalen Ausrichtung nach Süden sondern einer Ausrichtung nach 240 Grad Südwest.

$$n = \frac{204,1 \text{ kWh}}{749,02 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}} \quad (6.3)$$

Die benötigte Kilowattpeak Nennleistung beträgt 0,27 kWp. Diese Leistung ist mit einem Modul erreichbar.

6.4 Genaue Berechnung

Eine genaue Berechnung ist mit der angefügten Exceltabelle möglich. Das Vorgehen wird im Folgenden erklärt. Die Excel ist so aufgebaut, dass sie aus den Daten der Globalstrahlung auf eine ebene Fläche, der verbrauchten Energie im Tagesverlauf und der Batteriegröße im Stundentakt den aktuellen zu erwartenden Ladestand der Batterie berechnet. Dadurch lässt sich prüfen, wie sich der Ladestand der Batterie im Jahreslauf ändert. Die Globalstrahlungsdaten für die Excel stammen aus dem Online Tool PVGIS. Zu dem eigenständig berechneten Ertrag, wird ebenfalls der von PVGIS berechnete stündliche Ertrag aufgeführt. Dieser ist für ein 0,5kWp System simuliert, da kleinere Eingaben als diese nicht angenommen werden. Diese Zahlen befinden sich in den Tabellenspalten mit „simuliert“. Zur Berechnung des PV-Ertrags werden die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Formeln verwendet. Das für diese Berechnungen verwendete Modul ist Luxor ECO LINE N-Type M108 LX-420M (siehe Anhang A). Es leistet eine Peakleistung von 420 Wp und eine Fläche von $1,95 \text{ m}^2$. Die Annahmen für diese Berechnung werden hier noch einmal aufgeführt.

- α Neigungswinkel = 39°
- β Azimutwinkel = 0°
- ϕ Breitengrad = 53.55611617533448
- δ Längengrad = 10.22

Mit der Formel 6.4 wird die gewonne Energie aus der Strahlung auf ein Modul und dessen Wp Wert berechnet.

$$W = W_p \cdot \frac{(\dot{G}_{Dr} + \dot{G}_{Df})}{1000} \quad (6.4)$$

Diese Formel setzt die vom Hersteller angegebene Peakleistung bei der standardisierten Bestrahlung von $1000 \frac{W}{m^2}$ ins Verhältnis zur tatsächlich auf die Modulfläche treffenden Strahlung. Dadurch lässt sich der Ertrag ermitteln.

Durch die Berechnung der Excel kann der Batterieladestand ermittelt werden. Dieser ist in der folgenden Abbildung 6.1 für das Jahr sichtbar.

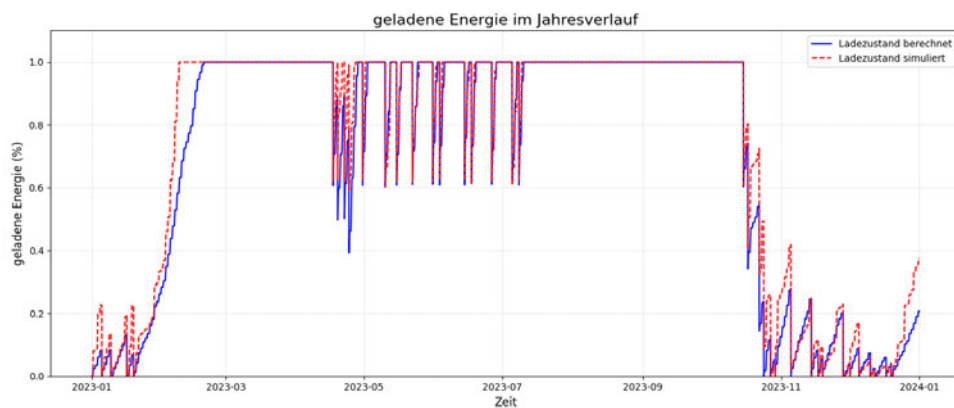


Abbildung 6.1: Verlauf der Batterieladung im Jahresverlauf für eine 0,42kWp Anlage

Für die Berechnung des Batteriestandes ist eine Nettokapazität von 10 kWh verwendet worden. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass die Batterie in den Sommermonaten den Verbrauch decken kann. Die Batterie pendelt zwischen einer vollen Aufladung und circa 50% Ladung. In den Wintermonaten wird die Batterie jedoch sehr oft leer und es muss Strom aus dem Netz verwendet werden. Diese Batterieladung wird nur möglich, wenn ein MPPT-Laderegler verbaut wird, der das Solarmodul optimal betreibt. Ein passender Laderegler für den Aufbau wird im Folgenden ausgewählt. Für den Laderegler, ist der Kurzschlussstrom und die Klemmspannung relevant. Durch das für die Berechnung ausgewählte Modul, sind diese festgesetzt und lassen sich dem Datenblatt entnehmen.

Die genaue Auswahl einer Batterie und eines Wechselrichters ist komplizierter.

Parameter	Wert
Kurzschlussstrom I_{sc}	13,86 A
Leerlaufspannung U_{oc}	38,12 V

Tabelle 6.1: Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung aus dem Datenblatt des Solarmoduls in Anhang A

Beide müssen gemeinsam beim Anlauf der Presse eine sehr hohe Spitzenleistung von fast 32 kW aufbringen. Eine Batterie mit 10 kWh Nettokapazität, wie sie in der Berechnung verwendet wurde, könnte die auftretenden hohen Ströme von bis zu 47 A nicht liefern. In dieser Batterie

ist genug Energie vorhanden, aber sie kann den hohen Strom und die hohe Leistung nicht bereitstellen. Da das Vergrößern der Batterie, auf eine höhere Speicherkapazität und Entladestrom den Aufbau sehr viel teurer und komplizierter gestalten würde, wird an dieser Stelle ein hybrider Wechselrichter verbaut. Dies stellt die wirtschaftlichste Lösung dar. Es handelt sich dabei um einen Wechselrichter, welcher an die Batterie angeschlossen wird und bei Bedarf, Strom aus dem Netz entnehmen kann. Dieser kann für den lastintensiven Anlauf und die Hübe den Strom aus dem Stromnetz an der HAW beziehen und den Leerlauf aus der Batterie betreiben. Ein passender dreiphasen Hybridwechselrichter ist der SolaX X-ESS G4 15kW (siehe Anhang B.1). Er ist in der Lage einen parallelen Netz- und Batteriebetrieb zu garantieren. Eine passende Batterie zu diesem Wechselrichter, ist die T-BAT-SYS-HV-12.0 (siehe Anhang C). Diese Batterie hat eine Nennleistung von 10,2 kW und kann den Leerlauf der Maschine versorgen. Die Kapazität dieser Batterie beträgt 10,9 kWh. Dieser Hybridwechselrichter hat eine Laderegler-Funktion nach dem MPPT-Verfahren und kann so, die beste Leistung des Solarmoduls beziehen. Um diesen Wechselrichter betreiben zu können, muss eine höhere Eingangsspannung als die 38,12 Volt von dem Solarmodul anliegen. Die Startspannung des Wechselrichters beträgt 200 Volt. Die Nennspannung 640 Volt. Um diese Spannungen zu erreichen, müssten 5,2 Module oder 19,98 Module für die Nennspannung verschaltet werden. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, wie groß der Unterschied zwischen der verbrauchten Energie und der benötigten Leistung liegt. Der Stromverbrauch kann durch 1 Modul gedeckt werden. Die folgende Abbildung zeigt wie ein schematischer Aufbau dieser Komponenten aussieht.

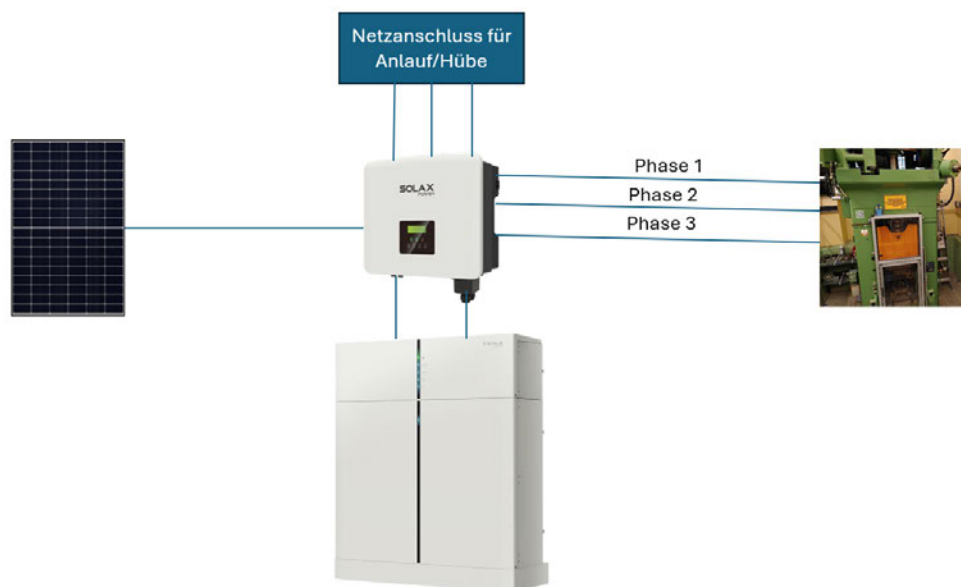


Abbildung 6.2: Schematischer Aufbau der Energieversorgung

Für das nun neu ausgelegte Erzeugersystem, welches nicht nur den Verbrauch deckt, sondern genug Leistung für das Betreiben im Leerlauf zur Verfügung stellt, wird die genaue Berechnung auch durchgeführt. Insgesamt können mit so einem System eine Jahresenergie von 7231 kWh erzeugt werden. Von diesen, werden aber durch den Laborversuch nur 204,1 kWh verbraucht. Die restlichen 7068 kWh bleiben unverbraucht. Wie bei der ersten Anlage, zeigt das folgende Diagramm 6.3 ebenfalls den Batterieladestand über den Jahresverlauf. Hier wird deutlich, das

der erzeugte PV-Ertrag die Batterie sehr gut laden kann. Im Dezember wird der geringste Batteriestand von circa 50% erreicht.

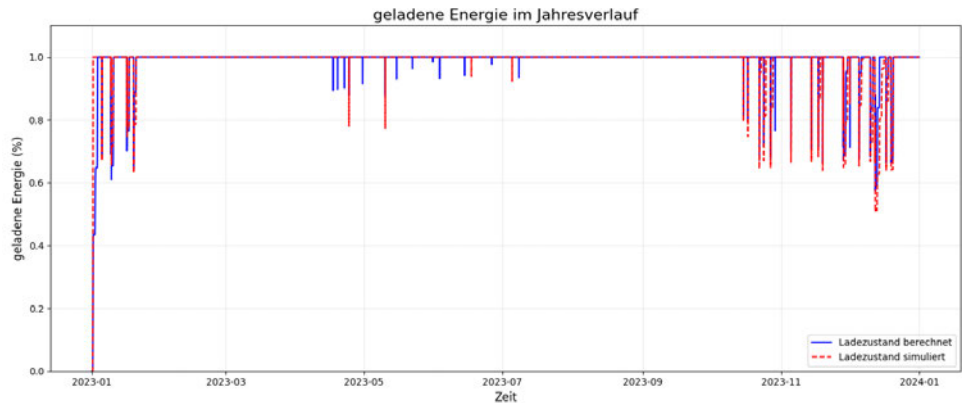


Abbildung 6.3: Verlauf der Batterieladung im Jahresverlauf für eine 8,4kWp Anlage

6.5 Fensterbebauung

Durch die notwendige Vergrößerung der Anlage zum betreiben des Wechselrichters und der Batterie, werden 20 Module benötigt. Für das Aufstellen dieser Anzahl an Modulen ist am Fenster hinter der Reibspindelpresse kein ausreichender Platz vorhanden. Die genaue Berechnung für diesen Aufstellort wird deshalb nicht weiter betrachtet.

6.6 Wirtschaftlichkeit

Ein wichtiger Aspekt der Auslegung ist nicht nur die Klimafreundlichkeit durch den verringerten CO₂-Ausstoß, sondern auch die Berücksichtigung der Investitionskosten und der Amortisationsdauer. In der Tabelle 6.2 sind alle notwendigen Systemkomponenten mit ihrer benötigten Stückzahl und den jeweiligen Kosten aufgeführt.

Bauteil	Stückzahl	Kosten in Euro
Solarmodul Eco Line Half-Cell M108 420Wp von Luxor	20	2280
SolaX X-ESS G4 15kW	1	2039
SolaX Triple Power 12,0 12kWh Solarspeicher	1	4272,60
Montage und Verkabelung inkl. Materialien	1	1500

Tabelle 6.2: Übersicht der Kosten [11] [19] [18]

Die Investitionskosten belaufen sich auf 10.092 Euro. Dabei ist für die Montage und Verkabelung

inklusive Materialien nur ein Annahmewert gewählt. Der Strompreis für eine kWh in der Grundversorgung beträgt in Deutschland 42,22ct. [9] Mit dieser Annahme kann berechnet werden, nach wie vielen Laborversuchen sich der Umbau auf die Solarenergieversorgung rentiert. Dafür wird angenommen, dass für das Versorgungssystem keine weiteren variablen Kosten dazukommen. Die folgende Tabelle 6.3 veranschaulicht das Ergebnis für die Anzahl der Labore, die Jahre, wenn wie im Jahr 2024/2025 nur 40 Labore stattfinden und die Jahre, wenn wie für die Auslegung der benötigten kWp Leistung von zwei identischen Semestern ausgegangen wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch den selbsterzeugten Strom im Jahr 9,545 kg CO₂ eingespart werden können. Die-

	Laborversuchen	Jahren mit 40 Versuchen	Jahren mit 50 Versuchen
Amorisation nach	5859	147	117

Tabelle 6.3: Übersicht Amortisation

se Amortisationsdauern zeigen, dass sich die Anschaffungskosten für eine Solarenergieversorgung nur für die Reibspindelpresse nicht lohnen. Die Kosten werden durch die hohe Anlaufleistung und den hohen Strom in die Höhe getrieben. Sollen die Hübe ebenfalls aus der Batterie versorgt werden, bräuchte man eine kostenintensivere Lösung aus beispielsweise drei miteinander verschalteten SMA Sunny Island 6.0H-13 (siehe Anhang B.2) Wechselrichtern. Diese können je Phase eine maximale Leistung von 8 kW für 30 Minuten leisten. Für einen Hub werden 20,5 kW benötigt. Einer kostet 2.598 Euro. [17] Dies würde den Preis noch weiter in die Höhe treiben und den Umbau unwirtschaftlicher machen.

6.7 Richtlinien bei der Bebauung

Die zuvor getroffenen Annahmen für die Bebauung auf dem Dach und am Fenster, sind nur theoretische Bebauungen. Sie berücksichtigen keine Vorschriften oder sonstiges. Ebenfalls zu beachten bei dem Gebäude Berliner Tor 21 ist, dass dieses unter Denkmalschutz steht. [7] Es wurde 1910 unter den Entwürfen von Fritz Schuhmacher fertiggestellt. Durch diesen Denkmalschutz ist das Ändern des äußeren Erscheinungsbildes sehr aufwändig. Dies muss eng in Absprache mit der Denkmalschutzbehörde stattfinden und benötigt Sondergenehmigungen. Am Beispiel der Philipps-Universität in Marburg, ist es aber möglich denkmalgeschützte Gebäude mit PV-Anlagen auszustatten. Neben dieser Einschränkung gibt es noch die Richtlinien in der VDI Norm 6012. Diese behandelt im Blatt vier die Bebauung von Gebäuden. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen gebäudeintegrierter und additiver Bebauung. Bei der gebäudeintegrierten Art müssen die Solarmodule und ihre Befestigung auch Funktionen der ersetzten Dachfläche übernehmen. Bei der additiven wird unterschieden zwischen der parallelen, welche die Solarmodulfläche parallel zur Befestigungsfläche mit einem Montagesystem am Dachtragwerk montiert und der aufgeständerten Art. Bei dieser läuft die Fläche nicht parallel zur Dachfläche und kann beispielsweise bei einem Flachdach eine Neigung beinhalten. Bei der Auslegung und Bemessung von Montagesystemen müssen alle auftretenden und mögliche Kräfte beachtet werden. Zu diesen

gehören die Eigenlast der Module inklusive Montagesystem, eine Schneelast, eine Windlast und der Last durch Temperaturdehnung. Durch Beachtung dieser Lasten, werden Forderungen an die Befestigung an der Dachfläche getroffen. Beispielsweise müssen bei der Montage bestimmte Anzugsmomente oder Vorspannkräfte eingehalten werden. Auch dürfen Funktionen von anderen auf dem Dach befindlichen Bauteilen wie Brand-, Blitz- oder Feuerschutz durch die Bebauung nicht eingeschränkt werden. Das Vorhaben muss durch einen Statiker berechnet und abgenommen werden.

So muss für das Ermitteln, ob die ausgelegte PV-Anlage erbaut werden darf, mehrere Instanzen erreicht und eine Zusammenarbeit ermöglicht werden. [14] [13]

7 Übertrag des Vorgehens auf ein Unternehmen

Anders als im Labor, ist die Laufzeit vom Maschinen deutlich höher. Oft arbeiten Unternehmen im zwei oder im drei Schichtbetrieb. Die Maschinen werden dann nur zum Rüsten, der Wartung, bei Ausfall oder zum Feierabend abgeschaltet. Im Folgenden wird ein imaginäres Unternehmen vorgestellt, welchem es wichtig ist eine komplette CO₂-neutrale Energieversorgung zu haben.

7.1 Vorstellen des Unternehmens

Die imaginäre Firma „AutoGreen Components GmbH“ ist ein innovativer mittelständischer Automobilzulieferer mit Sitz im Gewerbe- und Industriegebiet Buchholz in der Nordheide, strategisch günstig gelegen im unmittelbaren Hamburger Umland. Diese Standortentscheidung wurde sorgfältig getroffen, um die ideale Kombination aus infrastruktureller Anbindung, Nähe zu wichtigen industriellen Zentren, und Zugang zu qualifizierten Fachkräften optimal auszunutzen. Das Dach der Produktionshalle ist flach und von keinen Rohren oder Leitungen überzogen. Auf diesem können Solarmodule so aufgestellt werden, wie auf einer Freifläche. Die Abmessung dieser Dachfläche betragen 40m x 30m. Ein kleiner seitlicheranbau ist für Büros und die Geschäftsführung vorgesehen. Durch ein großes Tor an der Nordseite werden Rohlinge und Fertigbauteile in Containern durch LKWs abgeholt. AutoGreen Components GmbH beschäftigt derzeit rund 30 engagierte und qualifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und verfolgt dabei eine klare unternehmerische Ausrichtung auf Nachhaltigkeit und technologische Innovationen. Das Unternehmen konzentriert sich auf zwei wesentliche Produktlinien, die jeweils mittels speziell ausgewählter Fertigungsanlagen hergestellt werden, um höchsten Qualitäts- und Nachhaltigkeitsanforderungen gerecht zu werden. In der ersten Fertigungslinie werden Bleche produziert, die mittels einer Reibspindelpresse mit dem Firmenlogo geprägt werden. Diese Logo-Prägung dient der Kennzeichnung der Produkte. In die geprägten Flächen, setzt der Kunde dann Glaselemente ein. Diese Bleche werden im Fahrzeuginnenraum verbaut und dienen nur der Ästhetik. Die Fertigungslinie basiert auf verlässlichen Verbrauchsdaten, die aus einem realen Laborversuch stammen und somit eine praxisnahe Grundlage für die Planung und Realisierung der firmeneigenen nachhaltigen Energieversorgung bilden. Die Abbildung 7.1 zeigt ein solches Blech. Das Rohmaterial wird im passenden Format angeliefert. Es wird nur die Form eingeprägt. Die zweite Produktlinie umfasst die Herstellung von Kugelgelenksteckern, die im Bereich Fahrwerk verbaut werden. Diese Kugelgelenke erstellen eine Steckverbindung für die Radaufhängung. Zur Fertigung dieser Komponenten nutzt

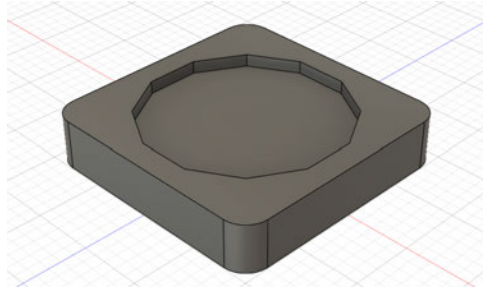


Abbildung 7.1: Geprägtes Blech

AutoGreen Components GmbH eine moderne CNC-Drehmaschine des Typs DMG MORI CLX 350. Diese Anlage wurde aufgrund ihrer hohen Fertigungspräzision und ihrer Zuverlässigkeit ausgewählt. Sie besitzt eine ausreichende Motorleistung für die Fertigung der Kugelgelenke, welches in der Abbildung 7.2 abgebildet ist. Als Rohling wird ein Zylinder in den Abmessungen 60mm Durchmesser und einer Länge von 90mm geliefert.

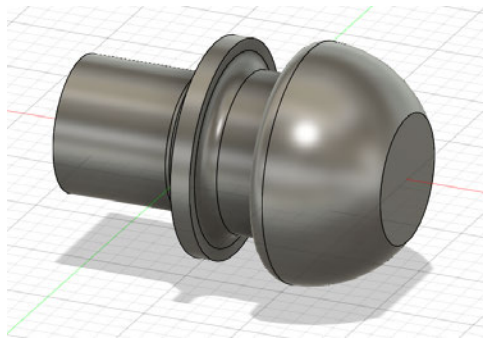


Abbildung 7.2: Kugelgelenk

7.2 Abnahmezahlen

Da beide Fertigungsprodukte für die Fahrzeuge des Kunden benötigt werden, hängen die Abnahmezahlen von ihnen ab. Durch die Erfahrung in der Zusammenarbeit mit der Planung und Disposition, ist dem Unternehmen bekannt, dass die Abnahme durch den Kunden konstant ist. Die Stückzahlen werden monatlich angefordert. Die Abnahmezahlen sind in der folgenden Tabelle 7.1 dargestellt.

Abnehmer	Produkt	Menge
AMW	geprägtes Blech	70000
	Kugelgelenkstecker	34000

Tabelle 7.1: Veranschaulichung der Produktion

7.3 Vorstellen des Maschinenparks

Zum Erreichen der gewünschten Abnahmezahlen werden die bereits erwähnte Reibspindelpresse Eumuco und eine DMG MORI CLX 350 verwendet. Der Bedarf wird durch ein zwei Schicht-System gedeckt.

7.3.1 Berechnen des Kundentaktes

Der Kundentakt ist eine wichtige Taktzahl. Im Gegensatz zum Maschinentakt, gibt diese an wie oft ein Teil fertiggestellt werden muss, um die geforderte Stückzahl zu erreichen. Der Maschinentakt gibt an, wie lange die Maschine braucht um ein Teil zu fertigen. Der Kundentakt ist fest und vom Kunden gefordert. Der Maschinentakt kann durch interne Maßnahmen optimiert werden. Dazu gehören Anpassungen am Layout, optimierte CNC-Programme oder besseres Teilehandling. Der Kundentakt wird berechnet durch die geforderte Stückzahl im Monat und kann auf ein Schichtziel berechnet werden. Dafür wird die folgende Formel 7.1 verwendet.

$$t_{\text{Kunde}} = \frac{\text{geforderte Menge}}{\text{Arbeitszeit im Monat}} \quad (7.1)$$

Der Kundentakt für die Bleche beträgt 15,2 Sekunden und für die Kugelnzapfen 31,1 Sekunden. Die Anzahl der benötigten Maschinen kann, aus diesem Kundentakt und der benötigten Zeit je Bauteil abgeleitet werden oder aus der zu produzierenden möglichen Menge und dem Schichtbedarf.

7.3.2 Geprägte Bleche

Die Reibspindelpresse wird zum Herstellen der Bleche verwendet. Jeweils ein Mitarbeiter wird pro Presse benötigt, um die Bleche einzulegen und nach der Prägung wieder zu entnehmen. Die Dauer eines Hubs beträgt 0,8 Sekunden. Der Mitarbeiter ist in der Lage alle 40 Sekunden ein Blech in das Werkzeug einzulegen, es zu positionieren und einzuspannen. Anschließend, muss eine Sicherheitstür geschlossen werden. Nach dem Betätigen des Zweihandschalters prägt die Presse mit dem Werkzeug das Blech. Anschließend löst der Mitarbeiter die Einspannung und legt das Blech in einen kleinen Container. Aus einem anderen Container entnimmt er ein neues Blech um diesen Vorgang zu wiederholen. Die geforderte Stückzahl von 70000 Blechen wird auf ein Schichtziel runtergebrochen. In der Formel 7.2 wird die Menge durch die Anzahl der Schichten im Monat geteilt, um den Schichtbedarf zu ermitteln.

$$s = \frac{\text{Stückzahl}}{\text{Schichten im Monat}} \quad (7.2)$$
$$\frac{70000}{42} = 1667$$

Somit ergibt sich ein Schichtziel von 1667 Blechen. Mit einer Taktzeit von 45 Sekunden, ist eine Reibspindelpresse besetzt, mit einem Mitarbeiter, in der Lage während einer Schicht abzüglich

Pause und persönlicher Verteilzeit 560 Bleche zu fertigen. Um das gewünschte Ziel zu erreichen, müssen drei Pressen angeschafft werden. Zur Berechnung der Maschinenanzahl, wird in der Formel 7.3 das Schichtziel durch die mögliche Ausbringung je Schicht von einer Presse geteilt.

$$Ma = \frac{\text{Schichtziel}}{\text{mögliche Ausbringung}} \quad (7.3)$$

$$\frac{1667}{560} = 2,976$$

7.3.3 Kugelzapfen

Für die Kugelzapfen wird eine CNC-Drehmaschine benötigt. Für die Berechnung der Bearbeitungsdauer wurde eine CAM-Anwendung verwendet. Die einzelnen Bearbeitungsschritte wurden in dieser programmiert und dadurch die Dauer ermittelt. Anschließend wurde, um die Dauer zu prüfen, ein Onlinetool verwendet, das die Schnittdaten, Bearbeitungsdauer und Motorleistung auslegt. [21] Das Letztere kann nicht aus der CAM-Anwendung berechnet werden. Die gesamte Bearbeitungsdauer setzt sich zusammen aus der Bearbeitungsdauer der einzelnen Schritte. Dazu muss die Zeit für die Werkzeugwechsel addiert werden. Da die Maschine über einen Werkzeugrevolver besitzt, beträgt diese Zeit fünf Sekunden. Für jeden Bearbeitungsschritt wird ein eigenes Werkzeug verwendet. Diese werden mithilfe der Formel 7.4 zusammengerechnet.

$$t_{\text{gesamt}} = 2 \cdot t_{\text{Planen}} + t_{\text{Schaft}} + t_{\text{Weit}} + t_{\text{Nut}} + t_{\text{Kopf}} + t_{\text{Umgreifen}} + 6 \cdot t_{\text{Werkzeugwechsel}} \quad (7.4)$$

$$t_{\text{gesamt}} = 2 \cdot 9,66s + 17,52s + 0,702s + 5,178s + 10,146s + 4s + 6 \cdot 5s$$

t_{gesamt} beträgt 86 Sekunden. Dies ist die reine Zeit, die das Bauteil, eingespannt in der Drehmaschine, benötigt. Dazu muss die Dauer gerechnet werden, die der Mitarbeiter zum Einlegen des Rohlings braucht und dem Entnehmen des fertigen Bauteils. Da es sich um ein rotationssymmetrisches Bauteil handelt und der Mitarbeiter den Rohling in das Backenfutter bis zum Anschlag einlegen kann, beträgt die Zeit zum Ein- und Ausspannen jeweils 10 Sekunden. Mit den weiteren Zeiten für das Teilehandling außerhalb der Maschine kann der Mitarbeiter alle 120 Sekunden ein Teil bearbeiten.

Zur Berechnung der benötigten Maschinenanzahl wird analog zu den geprägten Blechen die Formel 7.3 verwendet. Die Werkzeuge werden durch ein von der produktionsgetrenntes Instandhaltungsteam gewechselt. Dafür nutzen sie die Zeit in der Pause und nach Schichtende.

$$\frac{809}{210} = 3,85$$

Um den Bedarf der Kugelzapfen zu decken, müssen 4 CNC-Maschinen angeschafft werden.

7.4 Berechnen Energieverbrauch

Der Energieverbrauch wird vereinfacht nur für die Anlagen berechnet. Weitere Verbraucher wie Licht, Wärme, Computersysteme oder Gabelstapler werden vernachlässigt. Somit bleibt das Ergebnis mit dem der Hochschule vergleichbar. Für den Stromverbrauch der Presse, werden die bereits bekannten Daten und im Abschnitt 5.2 bereits berechneten Verbrauchsdaten angenommen. Für einen strukturierten Aufbau und einem besseren Überblick wird zuerst der Energieverbrauch, je hergestelltem Bauteil berechnet. Anschließend wird dadurch mit der Anzahl der Anläufe und Pausen je Schicht der Schicht- und Tagesverbrauch bestimmt. Durch den Tagesverbrauch, kann auf den gesamten Jahresverbrauch, geschlossen werden.

Das Fertigen eines Bauteils dauert, wie zuvor in Abschnitt 7.3.2 berechnet, 45 Sekunden. In diesen 45 Sekunden wird ein Hub ausgeführt welcher 0,8 Sekunden dauert und die restlichen 44,2 Sekunden befindet sich die Anlage im Leerlauf. Mit diesen Daten lässt sich der Energieverbrauch mit der Formel 7.5 berechnen.

$$E_{\text{Blech}} = 1 \cdot E_{\text{Hub}} + 44,2 \cdot E_{\text{Leerlauf}} \quad (7.5)$$

$$1 \cdot 0,0065 \text{kWh} + 44,2 \text{s} \cdot 0,0016 \frac{\text{kWh}}{\text{s}} = 0,077 \text{kWh}$$

Der Energieverbrauch je produziertem Blech beläuft sich auf 0,077 kWh. Um den Energieverbrauch je Schicht zu ermitteln, wird dieses Ergebnis mit der Schichtstückzahl und der Anzahl der Anläufe je Schicht verrechnet. Da der Mitarbeiter eine Mittagspause von einer Stunde hat, läuft die Maschine in einer Schicht zwei Mal an. Der Energieverbrauch je Schicht wird in der Formel 7.6 berechnet.

$$E_{\text{Schicht}} = 2 \cdot E_{\text{Anlauf}} + 1191 \cdot E_{\text{Blech}} \quad (7.6)$$

$$2 \cdot 0,055 \text{kWh} + 1191 \cdot 0,077 \text{kWh} = 128,83 \text{kWh}$$

Für eine Schicht beträgt der Energieverbrauch durch das Prägen der Bleche 128,83 kWh. Da zwei Schichten ausreichen um den Energiebedarf zu decken, werden pro Tag 257,67 kWh benötigt. Für das Berechnen des Energieverbrauchs beim Fertigen der Kugelgelenke gibt es keine Daten wie für die Presse, mit denen der Verbrauch genau berechnet werden kann. In dem Online Tool, welches zum Prüfen der Schnittdaten verwendet wird, der Motorleistung und der Bearbeitungsdauer, wird ebenfalls die verbrauchte Energie je Bearbeitungsschritt berechnet. Diese Werte werden für die Berechnung des Energieverbrauchs verwendet. Es wird die Annahme getätigt, dass der Verbrauch der Kühlung, der Steuerung und des Spanförderers zu vernachlässigen sind. Somit ergibt sich folgende Formel 7.7 für die Berechnung der Energie je Kugelstecker.

$$E_{\text{CNC}} = 2 \cdot E_{\text{Planen}} + E_{\text{Schacht}} + E_{\text{Weit}} + E_{\text{Nut}} + E_{\text{Kopf}} \quad (7.7)$$

Zur Bearbeitung vom Rohling zu einem fertigen Bauteil wird 0,13 kWh verbraucht. In einer Schicht werden 810 Kugelzapfen gefertigt. Der Energieverbrauch je Schicht beträgt somit 106,57 kWh. Der Tagesverbrauch beträgt 213,15 kWh.

Für die Produktion der Bauteile wird an einem Tag ein Strom von 470,83 kWh verbraucht. Der Verbrauch wird mit 230 Werktagen im Jahr multipliziert. [3] Der berechnete Jahresverbrauch beträgt 108.291 kWh.

7.5 Grobe Berechnung

Die Überschlagsrechnung für das Unternehmen, wird analog zur Überschlagsrechnung für die Hochschule durchgeführt. Es wird ermittelt, welche Kilowattpeak Leistung installiert werden muss, um den Verbrauch zu decken. Weiterhin ist für die Berechnung der spezifische Jahresertrag wichtig. Dieser beträgt in Buchholz in der Nordheide bei einer Neigung und Ausrichtung (39 Grad Neigung und -4 Grad Azimut Ausrichtung) $969,55 \frac{kWh}{kWp}$. [29] Die benötigte installierte Leistung lässt sich durch die bereits verwendete Formel 6.2 berechnen.

$$\frac{108.291 kWh}{969,55 \frac{kWh}{kWp}} = 111,69$$

Um den Jahresstrombedarf zu decken, müssen 112 kWp an Solarleistung installiert werden. Im Vergleich mit Werten aus dem Kapitel 4 ist dies kein hoher Wert und einige Universitäten betreiben Solaranlagen mit ähnlichen oder höheren Leistungen. Wenn von einer Modulleistung von 420 Wp ausgegangen wird, benötigt das Unternehmen 267 Module, um den Strombedarf zu erzeugen. Für eine Aufstellung auf dem Dach, die nur aus vollständigen Reihen besteht, werden jedoch 270 Module installiert. Die Kilowattpeak Leistung beträgt 113,4 kWp. Zur weiteren Berechnung wird ein genaues Modul benötigt. Dafür wird dasselbe Solarmodul wie für die Berechnung an der Hochschule von Luxor mit 420 Wp verwendet. Es handelt sich dabei um ein monokristallines Modul, welches die gewünschten 420 Wp leistet. Die Abmessungen eines Moduls sind 1722 x 1134 x 30mm. Die Anzahl der Module in einer Reihe, ist entscheidend für den Abstand zwischen den Modulreihen. Dafür wird die vorhandene Dachbreite von 30 Metern durch die Breite eines Moduls geteilt. In einer Reihe könnten somit 26,45 Module verbaut werden. Um gleichmäßige Reihen zu erhalten, wird die Zahl verkleinert, sodass es zu einer gleichmäßigen Verteilung der Module kommt. Diese Module werden mit 18 Modulen je Reihe und 15 Reihen auf dem Dach montiert. Um den Flächenbedarf dieser Module zu berechnen, wird die Formel 7.8 verwendet. [40] Bei einer Freiflächenaufstellung muss ein Kompromiss gefunden werden, zwischen einer engen Aufstellung, um mehr Module verbauen zu können und einer breiteren Aufstellung, um die Verschattung der Module durch andere Module zu minimieren. y ist der Abstand zwischen den beiden Modulreihen und L die Länge eines Moduls. Der Winkel β ist der Neigungswinkel des Moduls und α' der Winkel des einfallenden Sonnenlichts. Als Richtwert für α' wird in Mitteldeutschland 15 Grad angenommen. Durch die Wahl von Moduleckdaten, kann somit der Abstand zwischen den 15 Reihen berechnet werden.

$$y = L \cdot \left[\cos(\beta) + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha')} \right] \quad (7.8)$$

$$1,722m \cdot \left[\cos(39) + \frac{\sin(39)}{\cos(15)} \right] = 2,46m$$

Jede Reihe wird mit einem Abstand von 2,46m voneinander montiert, um die Verschattung durch die Vorgängerreihe möglichst gering zu halten. Die benötigten Dachflächenabmessungen für diese Aufstellung sind eine Länge von mindestens 36,9m und eine Breite von 20,41m. Diese sind durch die Dachabmessungen im Abschnitt 7.1 gedeckt.

7.6 Batteriegröße

Für die Batteriegröße werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Der eine Ansatz dient zur Erhöhung des Eigenbedarfs. Dafür wird die zuvor berechnete kWp Leistung verwendet. Diese deckt den gesamten Jahresverbrauch. Sie deckt jedoch nicht den täglichen Bedarf an Energie, der auch bei schlechten Wetterbedingungen verfügbar sein muss. Das Berechnen der Batteriegröße wird im Folgenden beschrieben. Der jährliche Energieertrag pro installierten kWp beträgt 938,15 kWh.[29] Diesen Wert kann man auf das durchschnittliche Erzeugnis pro Tag berechnen. Dieser Wert beträgt $2,65 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$. Mit der zuvor berechneten kWp Leistung ergibt sich eine grobe Abschätzung, welche in 7.9 berechnet wird.

$$E = \frac{\text{jährlicher Ertrag}}{\text{Tage im Jahr}} \cdot \text{installierte kWp Leistung} \quad (7.9)$$

$$2,65 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \cdot 113,4 \text{kWp} = 301,22 \text{kWh}$$

Somit werden im Schnitt täglich nur 301,22 kWh erzeugt. Dies sind 64% des täglichen Verbrauchs. Diese Energie wird hauptsächlich in den zwei Schichten verbraucht. Durch die Fünftageweche kann eine Batterie am Wochenende mit der zweifachen Menge des täglich erzeugten Stroms geladen werden. Die größte Batteriekapazität, die bei dieser Berechnung verbaut werden könnte, wäre eine Batterie mit einer Nettokapazität von 602,4 kWh und einer Bruttokapazität von 753,06 kWh.

Für ein komplett autarkes System, ist diese verbaute Leistung nicht ausreichend. Die Formel 7.9 kann umgeformt werden, um die geforderte kWp Leistung für die Deckung des täglichen Verbrauchs zu ermitteln.

$$\text{installierte kWp} = \frac{\text{täglicher Verbrauch}}{\text{Tagesertrag}}$$

$$\frac{470,83 \text{kWh}}{2,65 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}} = 177,25 \text{kWp}$$

Für eine komplettes Inselsystem wird von einer installierten kWp Leistung von 178 kWp ausgegangen. Um diese Leistung zu erhalten, müssen 423 Module miteinander verschaltet werden. Um Kosten zu sparen und die Batterie nicht zu über dimensionieren, entspricht ihre Kapazität dem täglichen Ertrag. Die Nettogröße beträgt 470,83 kWh. Bei einer Entladungstiefe von 80%, entspricht dies einer Bruttokapazität von 588,53 kWh.

7.7 Simulation

Die gerade berechneten Werte, können in dem PVGIS Programm simuliert werden. Es werden alle drei berechneten Konstellationen simuliert. Dafür werden die Funktionen „Performance of grid-connected PV“ für den Jahresverbrauch und „Performance of off-grid PV System“ für die Anwendungen mit einer Batterie verwendet. Das Programm berechnet auch die Verluste durch Wechselrichter und beispielsweise teilweiser Verschmutzung oder Kabel. Diese Verluste sind in den Simulationen mit 14% angesetzt.

7.7.1 Jahresbedarf

Um den Jahresbedarf in der Produktion zu decken wird eine Leistung von 113,4 kWp benötigt. PVGIS kann den Jahresertrag eine PV-Anlage ausgeben. Mit den zuvor angenommenen Rahmenbedingungen, wird so eine Berechnung der monatlichen PV-Erträge, der durchschnittlichen täglichen Erträge für die Monate und die gesamt erzeugte Energie angegeben. Diese Daten sind in der folgenden Tabelle 7.2 veranschaulicht. Der Tabelle kann entnommen werden, dass der

Monat	Durchschnittlicher Ertrag täglich [kWh]	Monatlicher Ertrag [kWh]
Januar	96,78	3000,2
Februar	184,04	5153,2
März	297,79	5046,61
April	426,75	12802,6
Mai	436,16	13521,1
Juni	448,18	13445,4
Juli	427,08	13239,4
August	390,52	12106
September	346,19	10385
Oktober	234	7253,9
November	123,44	3703,1
Dezember	82,01	2542,3
Jahresmittel	291,07	8865,3

Tabelle 7.2: PV-Erträge mit einer 113,4 kWp PV-Anlage nach [29]

durchschnittliche tägliche Ertrag nicht ausreichend ist, um den täglichen Verbrauch komplett zu decken. Die Wintermonate weisen geringe Erträge im Vergleich zu den Sommermonaten auf. Der Gesamtjahresverbrauch von 108.291 kWh wird mit einem Gesamtjahres PV-Ertrag von 106.384 kWh nicht gedeckt. Es werden 1906 kWh zu wenig produziert. Um den Jahresbedarf zu decken,

müsste die installierte kWp Leistung um 2kWp erhöht werden. Der Anteil der gedeckten täglichen Energie schwankt zwischen 95% im Juni, welcher der ertragreichste Monat ist, und 17% im Dezember. Der Durchschnitt liegt bei 61,8% und weicht leicht von dem zuvor in Kapitel 7.6 berechneten Anteil ab.

7.7.2 Erhöhung des Eigenverbrauchs

Durch das Dazuschalten einer Batterie, kann das Unternehmen versuchen den Netzbezug zu senken. Die Funktion, welche die Batterieberechnungen durchführt, verwendet Wetterdaten von mehreren Jahren, um eine möglichst genaue Berechnung durchführen zu können. Die Nettokapazität der Batterie beträgt 602 kWh um den PV-Ertrag von zwei Tagen laden zu können. Die folgende Tabelle 7.3, zeigt die leicht veränderten Erträge. Aus der Tabelle kann der durch-

Monat	Durchschnittlicher Ertrag täglich [kWh]	% volle Batterie	% leere Batterie
Januar	79,23	0	99,83
Februar	139,28	0	100
März	242,96	4,07	88,96
April	347,91	17,89	67,19
Mai	365,33	16,98	66,89
Juni	386,76	20,35	61,4
Juli	375,72	16,3	64,01
August	349,52	8,15	76,74
September	306	8,15	76,57
Oktober	205,18	0	97,79
November	110,92	0	100
Dezember	66,85	0	100

Tabelle 7.3: PV-Erträge und Tage mit voller/leerer Batterie mit einer 113,4kWp PV-Anlage nach [29]

schnittliche tägliche PV-Ertrag abgelesen werden. Im Vergleich zu der Tabelle 7.2, sind diese Werte niedriger. Das liegt daran, dass die PV-Anlage keinen Strom generiert, wenn die Batterie bereits vollständig geladen ist. Die Tage mit voller Batterie, sind der prozentuale Anteil der Tage im Monat, an dem die Batterie vollständig geladen wurde. Das folgende Diagramm 7.3 veranschaulicht den Batterieladestand besser. Die Analyse der täglichen Ladestände der Batterie zeigt, dass der Speicher in über 70% der Tage mit einem Ladestand zwischen 20 % und 28 % in den Nachtzyklus ging. An zwei Prozent der Tage wurde ein Ladezustand über 92 % erreicht, was

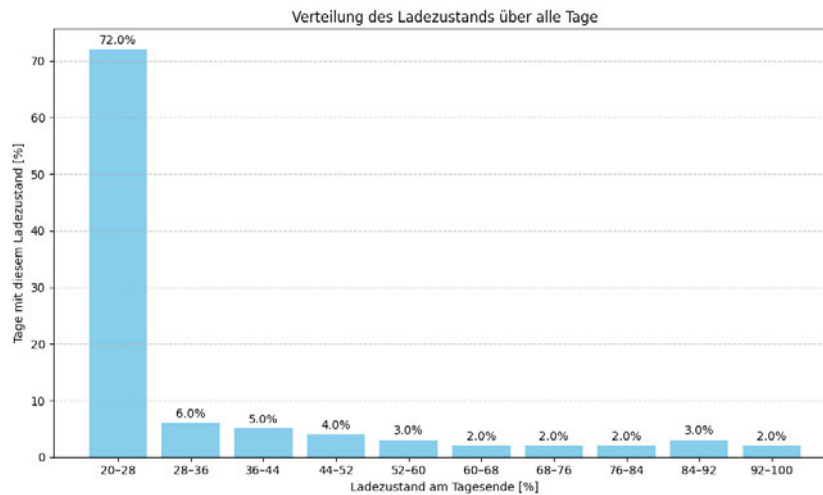


Abbildung 7.3: Verteilung des täglichen Ladezustands der Batterie [29]

darauf schließen lässt, dass eine vollständige Aufladung nahezu nie stattfindet. Für eine nachhaltige Optimierung empfiehlt sich daher eine deutliche Erhöhung der PV-Leistung, sowie eine Skalierung des Speichersystems, um eine ausgewogenere Ladezustandsverteilung zu erzielen.

7.7.3 Autarkes System

Die Berechnungen für eine autarke Energieversorgung mit einer PV-Anlage haben ergeben, dass die installierte kWp Leistung erhöht werden muss. Deshalb wird für das autarke System eine 178 kWp Anlage installiert. Die Batteriegröße wird im Vergleich zur Erhöhung des Eigenverbrauches reduziert, da diese durch die größere Anlage schneller geladen wird. Die simulierten Werte von PVGIS werden im Folgenden vorgestellt.

Die Tabelle 7.4 zeigt den durchschnittlichen täglichen Ertrag in dem jeweiligen Monat. Interessant für den autarken Ansatz ist das folgende Diagramm 7.4. Es zeigt die Batterieperformance des Systems. In den ertragreichen Sommermonaten ist die Batterie an mehr als 50 % der Tage vollständig gefüllt. In den Monaten Januar, November und Dezember dafür aber gar nicht. Die ausgelegte PV-Anlage hat nicht genügend Leistung um den Verbrauch in den ertragsschwachen Monaten eigenständig zu decken. Eine Lösung, wäre die deutliche Erhöhung der Batteriekapazität, um im Sommer die Überproduktion für den Winter einzuspeichern oder das Erhöhen der PV-Leistung. Als Überschlagrechnung wird aufgezeigt, wie hoch diese für eine Energieversorgung im Dezember sein müsste.

Monat	Durchschnittlicher Ertrag täglich [kWh]
Januar	124,36
Februar	211,22
März	322,92
April	422,19
Mai	438,79
Juni	456,98
Juli	450,88
August	437,30
September	400,62
Oktober	296,14
November	174
Dezember	104

Tabelle 7.4: Durchschnittliche tägliche PV-Erträge mit einer 178 kWp PV-Anlage nach [29]

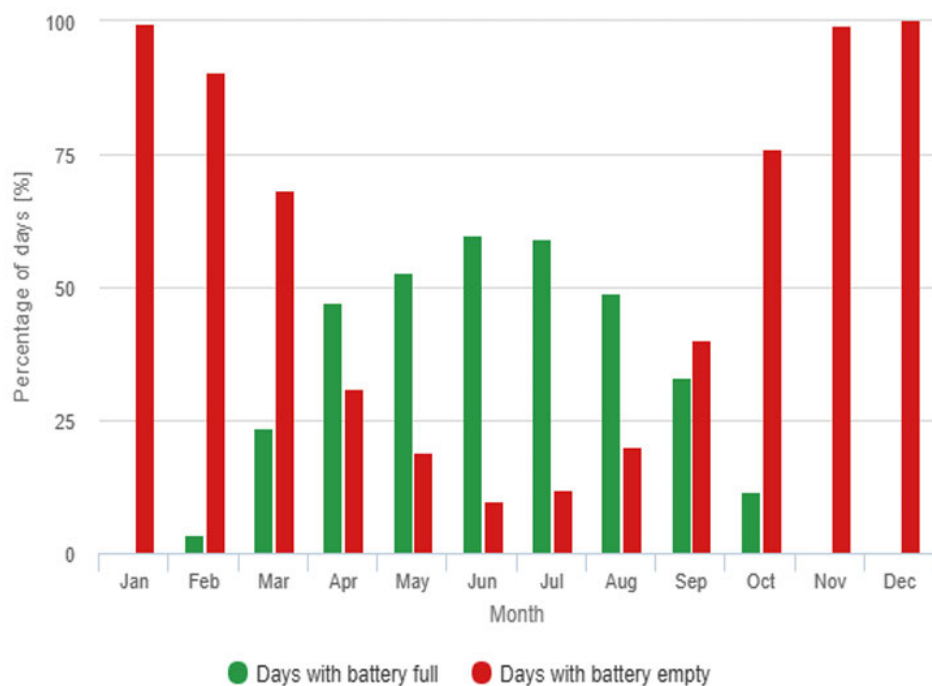


Abbildung 7.4: Tage mit voller und leerer Batterie über die Monate [29]

Im Dezember beträgt der durchschnittliche tägliche Ertrag 104kWh. Der Tagesverbrauch des Unternehmens beträgt 470,83 kWh. Damit die PV-Anlage diesen Ertrag bereitstellen kann, muss die Leistung rund um das fünffache erhöht werden. Es müssten anstatt der 270 Module also 1350 Module verbaut werden.

8 Fazit

8.1 Zusammenfassung

Eine CO₂-neutrale Energieversorgung ist wichtig für uns, um den Treibhauseffekt zu schwächen und noch unter der 1,5 Grad Celsius Erderwärmung zu bleiben. Als eine ausführlich behandelte Energieversorgung wurde die Energiegewinnung aus der Strahlung der Sonne vorgestellt. Sie hat ein großes Potenzial an Energieerzeugung, da sie platzsparend ist und clever auf Dachflächen platziert werden kann. Somit können diese Flächen einen höheren Nutzungsgrad erhalten, wenn die Statik und sonstige Kriterien dies zulassen. Ein Nachteil dieser Energieversorgung ist ihr zeitlicher Verlauf. Die Produktion fällt nachts weg und kann somit keine Verbraucher versorgen. Um diesen Nachteil zu umgehen, werden PV-Systeme mit Energiespeichern verbaut. Diese Energiespeicher können die erzeugte Energie zeitversetzt freigeben. Es gibt unterschiedliche Arten von Speichern. Je nach Anwendungsfall muss die kompatibelste Art gewählt werden.

Für den Laborversuch an der Hochschule für angewandte Wissenschaften wurde ein Jahresenergieverbrauch von 163,29 kWh ermittelt. Dieser kann durch ein PV-Modul, mit einer Leistung von 420 Wp gedeckt werden. Durch den Laborplan und den Vergleich von stündlich erzeugter PV-Energie und dem Verbrauch durch das Labor kann so ein Ladeverlauf ermittelt werden. Eine 10 kWh große Speicherkapazität, wäre in der Lage den Energieverbrauch zu decken. Leider kann eine Batterie dieser Größe zwar den Verbrauch decken, nicht aber den benötigten Strom und die erforderliche Leistung bereitstellen. Die Analogie hierzu ist ein Wassertank mit einem Wasserhahn. Es ist wichtig, für die Presse einen großen Wasserhahn mit einem hohen Durchfluss an Wasser zu besitzen. Die 32kW im Anlauf wären sehr kostenintensiv aus einer Batterie zu entnehmen, weshalb ein Hybriderwechselrichter verbaut wurde. Dieser kann den Anlauf und die Hübe der Reibspindelpresse über das Stromnetz der HAW betreiben und dann für den Leerlauf die Batterie verwenden. Außerdem wurde die Batteriegröße auf 12kWh erhöht. Die ausgewählte Batterie von SolaX kann eine Nennleistung von 10,2 kW aufbringen. Diese ist ausreichend für den Leerlauf. Außerdem wurde die Kilowattpeak Leistung von den theoretisch benötigten 0,2kWp auf 8,4kWp angehoben, um die Nennspannung des Wechselrichters zu generieren. Dafür werden 20 Module verwendet.

Um diese Überdimensionierung zu verhindern oder zumindest zu verringern, müsste der Motor der Reibspindelpresse im Anlauf eine geringere Leistung ziehen. Die Überlegung, einen anderen Motor oder das Anlaufverfahren zu ändern wären eine sinnvolle Erwägung. Außerdem stellt die

lange Nachlaufzeit von knapp 7 Minuten der Schwungräder ein Potenzial für mögliche Energierückgewinnung dar.

Für den Übertrag von diesem Vorgehen auf ein fiktives Unternehmen kommt noch ein anderes Problem ins Spiel. Der Energieverbrauch wird im Sommer gedeckt und die Batterie ist an mehr als 50% der Tage vollständig geladen. Die Wintermonate, können jedoch nicht den Bedarf decken und die Produktion würde stehen bleiben. Somit ist eine autarke Energieversorgung nicht möglich. Als Lösung stünden folgende Ansätze zur Verfügung.

- Erhöhung der Kilowattpeak Leistung, um in den ertragsschwachen Monaten den Tagesverbrauch decken zu können.
- Erhöhung der Batteriekapazität, um die überschüssige Energie aus den ertragsstarken Monaten für die ertragsschwachen Monate aufzubewahren.
- Die Inbetriebnahme einer Windenergieanlage in Betracht ziehen.

Windenergie und Solarenergie sind Gegenspieler. Die Solarenergie hat die höchsten Erträge im Sommer und Herbst. Die Windenergie im Winter und Frühling. Das Aufstellen von Windenergieanlagen ist deutlich komplizierter und an mehr Richtlinien gebunden, könnte jedoch für das Unternehmen die Deckung der fehlenden Energie in den Monaten bedeuten. Durch das Kombinieren dieser beiden Technologien könnte eine elegante Lösung zur Deckung des Energiebedarfs erreicht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] *Air Mass.* <https://photovoltaiksolarstrom.com/photovoltaiklexikon/air-mass/>
- [2] *Antriebe: Stern-/ Dreieck-Schaltung.* <https://www.xplore-dna.net/mod/page/view.php?id=261>
- [3] *Arbeitstage-Rechner 2025 | Randstad.* <https://www.randstad.de/karriere/karriereratgeber/arbeitsstage-rechner/>
- [4] *Climate Data Center.* <https://cdc.dwd.de/portal/>
- [5] *Energieportal Hamburg.* <https://www.energieportal-hamburg.de/?region-key=mitte>
- [6] *Energy.* <https://www.government.is/topics/business-and-industry/energy/>
- [7] *HAW-Hamburg: In neuem Glanz.* <https://www.haw-hamburg.de/detail/news/news/show/in-neuem-glanz/>
- [8] *Kohlendioxid in der Atmosphäre . Klimawandel-RLP.* https://www.klimawandel.rlp.de/klimawandel/kohlendioxid-in-der-atmosphaere?utm_source=chatgpt.com
- [9] *kWh Preis Strompreis.* <https://www.entega.de/ratgeber/strom/strompreis/was-kostet-strom/>
- [10] *Lithium-Ionen-Akkumulator.* <https://www.chemie.de/lexikon/Lithium-Ionen-Akkumulator.html>
- [11] *Luxor ECO LINE N-Type M108 LX-420M.* <https://www.photovoltaik4all.de/solarmodule/luxor-n-type-topcon-420>
- [12] *Maximum Power Point Tracking.* <https://homebattery.ecoflow.com/de/blog/mppt>
- [13] *Nautos: VDI 6012 Blatt 1.4.* <https://www.nautos.de/W7I/search/item-detail/DE88284287>
- [14] *Praxishilfe Denkmalpflege.*

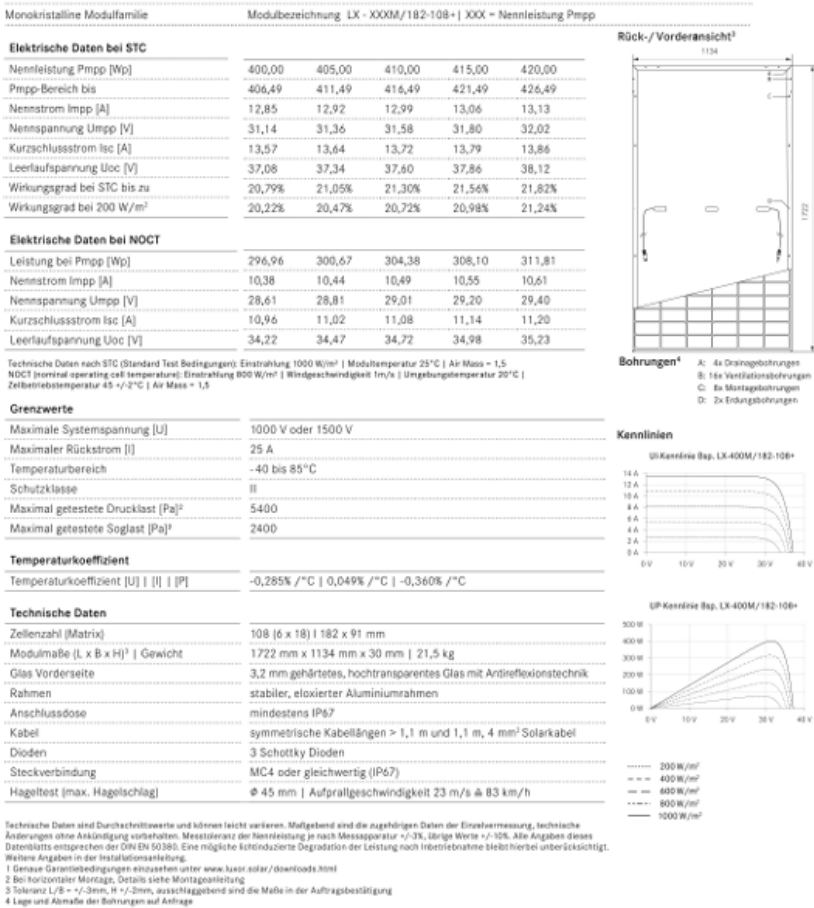
- [15] *PV-Anlagen* // Universität Oldenburg. <https://uol.de/klimaschutz-nachhaltigkeit/betrieb/energie/pv-anlagen>
- [16] *Redox-Flow-Batterie* - Fraunhofer ICT. <https://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/ae/rfb.html>
- [17] *SMA Sunny Island 6.0H-13 WLAN I Photovoltaik4all*. <https://www.photovoltaik4all.de/speicher/sma/sma-sunny-island-6.0h-13-wlan/WR36259>
- [18] *SolaX X3 Hybrid 15.0 D G4.2*. <https://www.photovoltaik4all.de/wechselrichter/solax-x3-hybrid-15.0-d-g4.2>
- [19] *SolaX X3-Hybrid G4 15kW Hybrid Wechselrichter 3-phasig online bestellen*. <https://solarspeicher24.de/a/solax-x3-hybrid-g4-15kw-hybrid-wechselrichter-3-phasig/9889380/>
- [20] *Stromerzeugung 2023: 56 % aus erneuerbaren Energieträgern*. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_087_43312.html
- [21] *ToolGuide*. <https://www.sandvik.coromant.com/de-de/tools/coroplus-toolguide>
- [22] *Treibhauseffekt (einfach) - Klimawandel*. https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Treibhauseffekt_%28einfach%29
- [23] *Understand low-carbon energy in Norway through Data | Low-Carbon Power*. https://lowcarbonpower.org/region/Norway?utm_
- [24] *Die Vereinten Nationen und der Klimawandel*. <https://dgvn.de/veroeffentlichungen/publikation/einzel/die-un-und-der-klimawandel>
- [25] *Wissenschaftl. Zentren*. <https://www.uni-marburg.de/de/universitaet/einrichtungen/wissenschaftliche-zentren>
- [26] *Elektrische Energiespeicher | Forschungsverbund Erneuerbare Energien*. <https://www.fvee.de/forschung/systemkomponenten/energiespeicher/elektrische-energiespeicher/>. Version: Februar 2022
- [27] *Industrielle Revolution*. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Industrielle_Revolution&oldid=250479807. Version: November 2024. – Page Version ID: 250479807
- [28] *Neues Klimaschutzgesetz ist in Kraft | Bundesregierung*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/klimaschutzgesetz-2197410>. Version: Juli 2024
- [29] *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en. Version: September 2024

- [30] *Lebensdauer Solarmodule – Wie lange hält eine Photovoltaikanlage?* / evm Blog. <https://www.evm.de/privatkunden/solaranlage/lebensdauer-solarmodule-wie-lange-haelt-eine-photovoltaikanlage/>. Version: Januar 2025
- [31] *Stern-Dreieck-Anlaufschaltung*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stern-Dreieck-Anlaufschaltung&oldid=253173756>. Version: Februar 2025. – Page Version ID: 253173756
- [32] AG, EWE: *Wasserstoff speichern*. <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/wasserstoffspeicherung-im-portrait>
- [33] BAUNETZ: *Stromerzeugung mit Photovoltaik*. <https://www.baunetzwissen.de/solar/fachwissen/solarstrom/stromerzeugung-mit-photovoltaik-pv-165780>. – Section: Baulexikon
- [34] DOPPELBAUER, Martin: *Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt*. 1st ed. 2020. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020 (Springer eBook Collection). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-29730-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-29730-5>. – ISBN 978-3-658-29730-5
- [35] EBELHOF, Am: *Anlagensteckbriefe für vorhandene PV-Anlagen*.
- [36] GACS, Julia: *Das Global Warming Potential (GWP) | Bedeutung und Anwendung*. <https://greenvisionsolutions.de/global-warming-potential-gwp/>. Version: Oktober 2023
- [37] GOLZE, Kay: *Deutschland und der Treibhauseffekt: Gesellschaftsphänomene und Perspektiven einer Energietransformation*. 1st ed. 2024. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-41433-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-41433-7>. – ISBN 978-3-658-41433-7
- [38] HESSELBACH, Jens: *Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele*. 2012. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8348-9956-9
- [39] HOCHWARTH, Dominik: *Mechanische Energiespeicher*. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/mechanische-energiespeicher-wie-isaac-newton-windkraft-und-photovoltaik-fit-fuer-die-energiewende-macht/>. Version: Oktober 2022
- [40] KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; STREICHER, Wolfgang (Hrsg.) ; WIESE, Andreas (Hrsg.): *Erneuerbare Energien: Systemtechnik · Wirtschaftlichkeit · Umweltaspekte*. 6., vollständig neu überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2020. – ISBN 978-3-662-61190-6
- [41] NEWSROOM-REDAKTION: *Erste Photovoltaik-Anlage der Universität Hamburg geht an den Start*. <https://www.uni-hamburg.de/newsroom/campus/2024/0821-chyn-photovoltaik.html>

- [42] REDAKTIONSSASSISTENZ 1, U. B. A.: *Die Treibhausgase*. Version: September 2013. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>. – Publisher: Umweltbundesamt
- [43] SELFIO SE - DO IT YOURSELF. ABER DO IT RICHTIG.: *Photovoltaik: Reihenschaltung & Parallelschaltung einfach erklärt*. <https://www.youtube.com/watch?v=9hJ3TMkNwZ8>. Version: März 2024
- [44] SHERWOOD, Steven C. ; DIXIT, Vishal ; SALOMEZ, Chryséis: The global warming potential of near-surface emitted water vapour. In: *Environmental Research Letters* 13 (2018), September, Nr. 10, 104006. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aae018>. – DOI 10.1088/1748-9326/aae018. – ISSN 1748-9326
- [45] SYSTEMADMIN_UMWELT: *Klima und Treibhauseffekt*. Version: September 2009. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt>. – Publisher: Umweltbundesamt
- [46] WILKE, Sibylle: *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Version: August 2013. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. – Publisher: Umweltbundesamt

A Solarmodul

ECO LINE HALF CELL M108 / 400 - 420 W



Ihr Luxor-Fachbetrieb



IEC
IEC 61215
IEC 61730

CE

Rohtext:
93/68/EWG
2014/35/EU (NSR)
2014/30/EU (EMV)

Die Gültigkeit der Zertifizierung/Lieferung für ein bestimmtes Land ist zu prüfen unter:
www.luxor.solar/downloads.html

ECO LINE HC_M108/200-410W_03/2023

Abbildung A.1: Solarmodul Luxor

B Wechselrichter



X3-HYBRID G4 (DREIPHASIG)

	X3-HYBRID-5.0-0	X3-HYBRID-6.0-0	X3-HYBRID-8.0-0	X3-HYBRID-10.0-0	X3-HYBRID-12.0-0	X3-HYBRID-15.0-0
PV-EINGANG						
Max. PV-Generatorleistung [Wp]	10000	12000	16000	20000	24000	30000
Max. PV-Eingangsspannung [V]	1080	1000	1000	1000	1000	1000
Startspannung [V]	200	200	200	200	200	200
Nennspannung [V]	640	640	640	640	640	640
MPP-Spannungsbereich [V]	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950
Anzahl der MPP-Tracker / Strings pro MPP-Tracker	2 (1 / 1)	2 (1 / 1)	2 (2 / 1)	2 (2 / 1)	2 (2 / 1)	2 (2 / 1)
Max. Eingangsstrom (PV1/PV2) [A]	16 / 16	16 / 16	28 / 16	28 / 16	28 / 16	28 / 16
Max. Kurzschlussstrom (PV1/PV2) [A]	20 / 20	20 / 20	35 / 20	35 / 20	35 / 20	35 / 20
AC-EINGANG, AC-AUSGANG						
Nennleistung AC [W]	5000	6000	8000	10000	12000	15000
Max. Scheinleistung [VA]	5500	6600	8800	11000	13200	15000
Nennstrom [A]	8.1	9.7	12.9	16.1	19.3	24.1
Max. Scheinleistung, Eingang [VA]	10000	12000	16000	20000	24000	28000
Max. Eingangsstrom [A]	16.1	19.3	25.8	32.0	32.0	32.0
Nennspannung AC [V]	415 / 240, 400 / 230, 380 / 220					
Netzfrequenz [Hz]	50 / 60					
Blindleistungsfaktor	0.8 voreilend ~ 0.8 nacheilend					
Clirrfaktor	< 3					
BATTERIEDATEN						
Batterietyp	Lithium-Ionen-Batterie / Bleisäure-Batterie					
Batteriespannungsbereich [V]	180 ~ 800					
Max. Lade- und Entladestrom dauerhaft [A]	30					
EPS-AUSGANG (MIT BATTERIE)						
Nennleistung AC [W]	5000	6000	8000	10000	12000	15000
Max. Scheinleistung [VA]	12000, 10s	12000, 10s	18000, 10s	18000, 10s	22500, 10s	22500, 10s
Max. Ausgangsstrom dauerhaft [A]	7.2	8.7	11.6	14.5	17.5	21.8
Nennspannung [V], Nennfrequenz [Hz]	400 / 230, 50 / 60					
Umschaltzeit [ms]	< 10					
Parallelbetrieb	JA					
SYSTEMDATEN						
Max. Wirkungsgrad [%]	98.0					
Europ. Wirkungsgrad [%]	97.7					
Batteriewirkungsgrad [%]	98.5 / 97.5					
IP-Schutzart	IP65					
Betriebstemperaturbereich [°C]	-35~60 (Abregelung über +45 °C)					
Max. Betriebshöhe [m]	< 3000					
Zulässige rel. Luftfeuchte [%]	0 ~ 100					
Typische Lärmemissionen [dB]	< 35			< 45		
Lagertemperatur [°C]	-40 ~ +70					
Abmessungen BxHxT [mm]	503 x 503 x 199					
Gewicht [kg]	30					
Kühlkonzept	Natürliche Kühlung			Intelligente Kühlung		
Schnittstellen	CT / Zähler(optional), Externe Steuerung RS485, Pocket W-Fi(Optional: LAN/4G), DRM, USB-Upgrade, NTC, Io p(optional)					
LEISTUNGS-AUFNAHME						
Inlandsverbrauch (Nacht) [W]	<40W für Standby, <5W für Leerlauf					
ZERTIFIZIERUNG						
Sicherheit nach	EN/IEC62109-1 / -2					
EMV-Richtlinien	EN61000-6-1 / 2 / 3 / 4, EN61000-3-2 / 3 / 11 / 12					
Zertifizierung nach	VDE4105, G99, G98, AS4777, EN50549, CEI 0-21, IEC61727, PEA / MEA, NRS-097-2-1, RD1699, TCR					

*1: PV BAT Max. Wirkungsgrad 98.5%; BAT AC Max. Wirkungsgrad 97.5%

*2: 8. Informationen können ohne Vorankündigung geändert werden.
430.0.00101.00

Abbildung B.1: Wechselrichter Solax X3-HYBRID G4

Technische Daten	Sunny Island 4.4M	Sunny Island 6.0H	Sunny Island 8.0H
Betrieb am öffentlichen Netz oder Generator			
Bemessungsnetzspannung / AC-Spannungsbereich	230 V / 172,5 V bis 264,5 V		
Bemessungsnetzfrequenz / zulässiger Frequenzbereich	50 Hz / 40 Hz bis 70 Hz		
Maximaler AC-Strom bei Eigenverbrauchsoptimierung (Netzbetrieb)	14,5 A	20 A	26 A ^o
Maximale AC-Scheinleistung bei Eigenverbrauchsoptimierung (Netzbetrieb)	3,3 kVA	4,6 kVA	6 kVA ^o
Maximaler AC-Eingangsstrom	50 A	50 A	50 A
Maximale AC-Eingangsleistung	11500 W	11500 W	11500 W
Verschiebungsfaktor einstellbar	0,8 übererregt bis 0,8 untererregt		
Inselbetrieb oder Ersatzstrombetrieb			
Bemessungsnetzspannung / AC-Spannungsbereich	230 V / 202 V bis 253 V		
Bemessungsnetzfrequenz / Frequenzbereich (einstellbar)	50 Hz / 45 Hz bis 65 Hz		
Bemessungsleistung (bei U _{nom} , f _{nom} / 25 °C / cos φ = 1)	3300 W	4600 W	6000 W
AC-Leistung bei 25 °C für 30 min / 5 min / 3 sec	4400 W / 4600 W / 5500 W	6000 W / 6800 W / 11000 W	8000 W / 9100 W / 11000 W
AC-Leistung bei 45 °C dauerhaft	3000 W	3700 W	5430 W
Bemessungsstrom / Maximaler Ausgangsstrom (peak)	14,5 A / 60 A	20 A / 120 A	26 A / 120 A
Kirrfaktor Ausgangsspannung / Leistungsfaktor bei Bemessungsleistung	< 5 % / -1 bis +1	< 1,5 % / -1 bis +1	< 1,5 % / -1 bis +1
DC-Eingang Batterie			
Bemessungseingangsspannung / DC-Spannungsbereich	48 V / 41 V bis 63 V	48 V / 41 V bis 63 V	48 V / 41 V bis 63 V
Maximaler Batterieladestrom / DC-Bemessungsladestrom / DC-Bemessungsentladestrom	75 A / 63 A / 75 A	110 A / 90 A / 103 A	140 A / 115 A / 130 A
Batterietyp / Batteriekapazität (Bereich)	Li-Ion ¹⁾ , FLA, VRLA / 100 Ah bis 10000 Ah (Blei) 50 Ah bis 10000 Ah (Li-Ion)		
Laderegulierung	iUoU-Ladeverfahren mit automatischer Vollladung und Ausgleichsladung		
Wirkungsgrad / Eigenverbrauch des Gerätes			
Maximaler Wirkungsgrad	95,5 %	95,8 %	95,8 %
Leerlaufverbrauch / Standby	18 W / 6,8 W	25,8 W / 6,5 W	25,8 W / 6,5 W
Schutzeinrichtung (Gerät)			
AC-Kurzschluss / AC-Überlast	● / ●		
DC-Verpolungsschutz / DC-Sicherung	- / -		
Übertemperatur / Batterietiefentladung	● / ●		
Überspannungskategorie nach IEC 60664-1	III		
Allgemeine Daten			
Maße (B / H / T)	467 mm / 612 mm / 242 mm (18,4 inch / 21,1 inch / 9,5 inch)		
Gewicht	44 kg (97 lb)	63 kg (138,9 lb)	63 kg (138,9 lb)
Betriebstemperaturbereich	-25 °C bis +60 °C (-13 °F bis +140 °F)		
Schutzklasse nach IEC 62103	I		
Klimaklasse nach IEC 60721	3K6		
Schutzart nach IEC 60529	IP54		
RoHS-III konform	●		
Ausstattung / Funktion			
WLAN, Speedwire / Webconnect / SISYSCAN (Multiclustern)	● / ● / -	● / ● / ○	● / ● / ○
Direktanbindung in Sunny Portal über Webconnect	●		
Sunny Portal powered by ennexOS über SMA Data Manager M oder L	●		
Micro SD-Speicherkarte für erweitertes Data Logging	○		
Anzeige über Smart Phone, Tablet, Laptop / Multifunktions-Relais	● / 2		
3-phasige Systeme (mit Drehfeld) ²⁾ / Ersatzstromfunktion	● / ●		
Ladezustandsberechnung / Vollladung / Ausgleichsladung	● / ● / ●		
Batterietemperatursensor / Kommunikationsleitungen	○ / ●		
Zertifikate und Zulassungen	www.SMA.Solar.com		
Deckelfarbe Gelb / Aluminium Weiß	○ / ○		
Garantie 5 / 10 Jahre	● / ● ²⁾		
Für Off-Grid Anwendungen			
Umschaltzeiten in den Backup-Betrieb (ohne Umschalt- oder MC-Box) ⁴⁾	-	0 ms (hochohmig) / 20ms (niederohmig)	
Automatische Drehfeldererkennung / Generatorsupport	● / ●		
Parallelschaltung / Multiclustern	- / -	● / ●	● / ●
Integrierter Sanftanlauf	●		
Zubehör			
Für Off-Grid Anwendungen			
Multiclusternboxen MC-BOX-6.3 / MC-BOX-12.3 / MC-BOX-36.3	○		
Batteriesicherung ²⁾	○		
Sunny Island Charger SIC50-MPT ²⁾ / SI Charger Piggy Back SICPB	○ / ○		
SMA Data Manager M	○		
Für On-Grid Anwendungen			
Sunny Home Manager / SMA Energy Meter	○ / ○		
Umschalteneinrichtung für Ersatzstrom ²⁾	○		
Typenbezeichnung	SI4.4M-13	SI6.0H-13	SI8.0H-13
● Serienausstattung ○ Optional - nicht verfügbar Alle Spezifikationen Stand: 09/2020			

● Serienausstattung ○ Optional - nicht verfügbar Alle Spezifikationen Stand: 09/2020

Abbildung B.2: Wechselrichter SunnyIsland 8.0H

C Batterie

	T-BAT-SYS-HV-3.0	T-BAT-SYS-HV-6.0	T-BAT-SYS-HV-9.0	T-BAT-SYS-HV-12.0
Nennspannung [V]	102.4	204.8	307.2	409.6
Betriebsspannungsbereich [V]	90~116	180~232	270~348	360~464
Energie gesamt [kWh]	3.0	6.1	9.2	12.2
Nutzbare Energie ^{III} [kWh]	2.7	5.5	8.3	10.9
Nennkapazität [Ah]	30			
Nennleistung [kW]	2.5	5.1	7.6	10.2
Max. Leistung [kW]	3.0	6.1	9.2	12.2
Empfohlener Lade-/Entladestrom [A]	25			
Max. Lade-/Entladestrom [A]	30			
Wirkungsgrad der Batterie bei Ein- und Ausbau	95%			
Zykluslebensdauer [90 % DOD]	6000 Zyklen			
Erwartete Lebensdauer/Garantie [Jahr]	10			
Verfügbarer Lade-/Entladetemperaturbereich [°C]	-30 to 50			
Lagertemperatur [°C]	-20 to 50 (3 Monate)			
Luftfeuchtigkeit [%]	0~100			
Hohenlage [m]	Unter 3000			
IP Schutzart	IP65			
Batterie zum Wechselrichter	RS485/CAN2.0			
Batterie zu Batterie/BMS	CAN2.0			
Kapazitätsanzeige der Mastersteuerung	4LED (25%, 50%, 75%, 100%)			
LED-Anzeige der Mastersteuerung (Arbeitsmodus)	1 LED			
Systemschalter (ein/aus)	Tastex1+Unterbrecherx1			
Sicherheit nach	CE/IEC62619/UN38.3/IEC62040/UKCA			
Klassifizierung der gefährlichen Materialien	Class 9			
Abmessungen (BxHxT) [mm]	MC0600: 482.5x173.5x153 HV10230: 482.5x471.5x153			
Gewicht Netto [kg]	MC0600: 7.5kg +HV10230: 34.5kg	MC0600: 7.5kg +2xHV10230: 69kg	MC0600: 7.5kg +3xHV10230: 103.5kg	MC0600: 7.5kg +4xHV10230: 138kg

Abbildung C.1: LiFePo-Batterie