



Diplomarbeit

Studie zum Einsatz von Photovoltaik auf Metrofahrzeugen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Science unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg KARTNIG

und

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann SUMMHAMMER

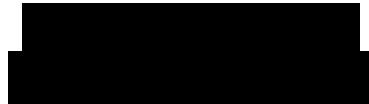
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik
Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Tobias Rudel

0926170



Wien am 27. März 2017

Tobias Rudel

Kurzfassung

Energieautarke Metro-Fahrzeuge stellen für den Schienenfahrzeugbetreiber und die Passagiere ein bisher unvorstellbares zusätzliches Sicherheitslevel dar. Ein Metro-Fahrzeug, welches nicht auf die dritte Schiene angewiesen ist, um die essentiellen Funktionen eines Passagierwaggons aufrecht zu erhalten, kann auch in Notfällen einen Minimalbetrieb oder eine Bergung der Passagiere gewährleisten. Um die Metro-Fahrzeuge weitestgehend energieautark zu gestalten, werden Solarpaneele auf die Dachflächen montiert und in die Struktur des Metro-Fahrzeugs integriert. Um das Potenzial einer Photovoltaik Anlage ausschöpfen zu können, sind alle Berechnungen für die Neubaustrecke in Riad, Saudi Arabien, durchgeführt worden. Dabei sind die klimatischen Bedingungen sowie die Umweltbedingungen ein nicht unerheblicher Faktor, den es zu berücksichtigen gilt. Zusätzlich werden die Systeme „Klimaanlage“, „konventioneller Antrieb“ und „Last-Mile-Drive“ genauer betrachtet und auf ihre Realisation in Kombination mit einer Solaranlage rechnerisch geprüft. Anhand dieser Basis wird ein Konzept für zukünftige Schienen- und Metro-Fahrzeuge entwickelt.

Abstract

Energy-self-sufficient metro vehicles represent a previously unimaginable additional security level for the rail vehicle operator and the passengers. A metro vehicle, which does not depend on the power rail in order to maintain the essential functions of a passenger coach, can have a minimum operation or an emergency Rescue of the passengers. In order to make the metro vehicles largely energy-self-sufficient, solar panels are mounted on the roof surfaces and will be integrated into the structure of the metro vehicle. In order to exploit the potential of a photovoltaic system, all calculations have been carried out for the newly build metro line in Riyadh, Saudi Arabia. The climatic conditions as well as the environmental conditions are a not insignificant factor, which must be taken into account. In addition, the systems “air-conditioning”, “conventional drive” and “Last-Mile Drive” will be examined more closely and calculated for their realization in combination with a solar system. Based on this foundation, a concept for future rail and metro vehicles will be developed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Beschreibung der Einsatzbedingungen	2
2.1	Eigenschaften der Sonneneinstrahlung	2
2.1.1	Solarkonstante	2
2.1.2	Spektrum der Sonne	3
2.1.3	Air Mass	4
2.1.4	Die Globalstrahlung	4
2.1.5	Der Sonnenstand	5
2.1.6	Strahlung auf geneigten Flächen	6
	Das Dreikomponentenmodell	7
	Ertragsgewinn durch Nachführung	7
2.1.7	Tagesverlauf der Sonneneinstrahlung	8
	Idealverlauf Sonneneinstrahlung	8
	Abweichende Tagesverläufe	9
2.2	Sonneneinstrahlung am Einsatzort Riad	11
2.2.1	Pilotanlage Wien	11
2.2.2	Satellitendaten	12
2.2.3	Auswerten der Daten aus Wien	13
	Eigenschaften	14
	Validieren der Satellitendaten	14
	Erkenntnis	15
2.2.4	Umweltbedingungen in Riad	15
2.2.5	Satellitenmessungen von Riad verglichen mit Wien	16
2.2.6	Nutzbare Leistung in Riad	17
2.3	Ausfallhäufigkeit der Stromversorgung in Riad	18
2.4	Grundlagen des Fahrbetriebes mit Schienenfahrzeugen	19
2.4.1	Kategorisierung	19
2.4.2	Zugfolge	19
	Fixed Block	20
	Moving Block	20
2.4.3	Automatisierung	21
2.4.4	Gleisinfrastuktur	21

2.4.5 Problematik bei Stromausfall	22
3 Bestehende PV-Anlagen	23
3.1 Beschreibung bestehender PV-Komponenten	23
3.2 Nutzwertanalyse	24
3.2.1 Bewertungskriterien auswählen	24
3.2.2 Bewertungskriterien beurteilen	25
Wirkungsgrad	27
Temperaturkoeffizient	27
Leistungsdegression	28
Gewicht	28
3.2.3 Bewertungskriterien gewichten	28
3.2.4 Technische Wertigkeit (TW)	30
3.2.5 Wirtschaftliche Wertigkeit (WW)	32
3.3 Ergebnis der Nutzwertanalyse	34
3.3.1 Beurteilung nach Diagonalen	36
3.3.2 Beurteilung nach Kreisringen	36
3.3.3 Gegenüberstellung Diagonalen- und Kreisringverfahren	37
3.3.4 Das ausgewählte PV-Paneel	37
4 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	39
4.1 Erstellen der Anforderungsliste	39
4.1.1 Anforderungen von Siemens Mobility	39
4.1.2 Technische Daten des Metro-Fahrzeuges	40
4.1.3 Anforderungen durch den Einsatz einem Metro-Fahrzeug	41
4.1.4 Anforderungsliste	41
4.2 Erforderliche Energie für den Notbetrieb einer Klimaanlage	44
4.3 Notwendige Energie für eine Schleichfahrt	45
4.3.1 Fahrwiderstände	45
4.3.2 Anfahren	48
4.3.3 Steigungen	49
4.3.4 Notwendige Energie	49
4.4 Notwendige Energie mit Last-Mile-Drive von Siemens	51
4.5 Wie viel Bauraum steht zur Verfügung	52
4.6 Wieviel m^2 Photovoltaik-Fläche steht zur Verfügung	52
5 Konzipieren	54
5.1 Abstrahieren der Problemstellungen	55
Ergebnis nach Schritt 1 und 2	56
Ergebnis nach Schritt 5	56
5.2 Funktionsstruktur	56
Gesamtfunktion	56
Teilfunktionen	57

5.3 Wirkstruktur	59
Suche nach Wirkprinzipien	59
Kombinieren von Wirkprinzipien	62
Auswählen geeigneter Wirkstrukturen	62
5.4 Bewertung nach VDI-2225	64
5.5 Festlegen einer prinzipiellen Lösung	67
6 Entwerfen	68
6.1 Methodisches Entwerfen	68
6.1.1 Erkennen gestaltungsbestimmender Anforderungen	70
6.1.2 Klären der räumlichen Bedingungen	70
6.1.3 Strukturieren in gestaltungsbestimmende Hauptfunktionsträger	70
6.1.4 Grobgestalten der gestaltungsbestimmenden Hauptfunktionsträger	71
Strom erzeugen	71
Energie speichern	72
Wandler	74
6.1.5 Suchen von Lösungen für Nebenfunktionen	74
Befestigung der PV-Paneele	75
Auswahl Befestigung	78
Volumen Zusatzsysteme	80
6.2 Bewerten des Entwurfs unter realen Einsatzbedingungen	81
6.2.1 Leistung pro Zug	81
6.2.2 Kosten	82
PV-Anlage	82
Speicher System	83
Konstruktion	84
Gesamt	84
7 Entwurf beurteilen	85
7.1 Systeme auf Eignung überprüfen	85
7.1.1 Klimaanlage	85
7.1.2 Schleichfahrt mit konventionellen Motor	85
7.1.3 Schleichfahrt mit Last-Mile-Drive	85
7.2 Fahrbetrieb bei Stromausfall	86
7.2.1 In Fahrtrichtung	86
7.2.2 Beliebige Fahrtrichtung	86
7.3 Ergebnis	87
8 Zusammenfassung und Ausblick	88
Literatur	90
Anhang	98

Glossar

Bezeichnung	Beschreibung
AM	Air-Mass
CdTe	Cadmiumtellurid
CIGS	Copper-indium-gallium-selenide
DB	Deutsche Bahn
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTO	Driverless Train Operation
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EN	Europäische Norm
Eumetsat	European Organisation for the Exploration of Meteorological Satellites
GoA	Grade of Automation
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer
LV	Lösungsvarinate
Mono-Si	monokristallines Silizium
NTO	Non Automated Train Operation
NWA	Nutzwertanalyse
Poly-Si	polykristallines Silizium
PV	Photovoltaik
SEC	Saudi Electricity Company
STC	Standard Test Condition
STC	Standard Test Condition
STO	Semi Train Operation
TOS	Train Operation on Sight
TW	technische Wertigkeit
UTC	Koordinierte Weltzeit
UTO	Unattended Train Operation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WOZ	Wahre Ortszeit
WW	wirtschaftliche Wertigkeit

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Beschleunigung	m/s^2
A	Energieverbrauch	J
A_{ges}	Fläche gesamt	m^2
A_{w}	Fläche pro Fahrzeug	m^2
b	Breite	m

Symbol	Beschreibung	Einheit
C	Kapazität	F
e_{ij}	Eigenschaftsgröße je Variante und Kriterium	–
E_{Akku}	Nennleistung Akkumulator	Wh
E_{Cap}	Nennleistung Kondensator	kJ
E_{Diffus}	Diffusstrahlung	W/m ²
E_{Direkt}	Direktstrahlung	W/m ²
E_{G}	Globalstrahlung	W/m ²
E_{Ges}	Gesamtsonneneinstrahlung	W/m ²
E_{Refl}	reflektierte Strahlung	W/m ²
E_{S}	Solarkonstante	W/m ²
F	Zugkraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
g_i	Gewichtung je Kriterium	–
Gw_{g_i}	Nutzwert je Variante	–
h	Höhe	m
I_{mp}	Strom Solarpaneel	A
k	Koeffizient	–
K	Faktor Spurweite	–
$l_{\text{B},2}$	Bremsweg Zug 2	m
l_{Block}	Blockabschnittslänge	m
$l_{\text{B},\text{max}}$	maximaler Bremsweg	m
$l_{\text{Z},1}$	Länge Zug 1	m
l_{Zf}	Zugfolgeabstand	m
m	Masse	kg
P	Leistung	kW
P_{eff}	effektive Leistung	W
P_{max}	Nennleistung	W
P_{Sonne}	Strahlungsleistung der Sonne	W
r	Bogenradius	m
r_{SE}	Abstand der Sonne zur Erde	m
s	Sicherheitszuschlag	m
S	Gesamtwertigkeit	–
t	Zeit	s
$t_{\text{außen}}$	Umgebungstemperatur	°C
t_{Cap}	Lastdauer Kondensator	s
t_{Pcoeff}	Temperaturkoeffizient	%/°C
t_{STC}	Temperatur bei STC	°C
U_{mpp}	Spannung Solarpaneel	V
v	Geschwindigkeit	m/s
Δv	Windgeschwindigkeit	m/s
w	maximaler Punktwert	–
w_{ij}	Wert je Variante und Kriterium	–

Symbol	Beschreibung	Einheit
w	spezifischer Fahrwiderstand (mit den gleichen Indizes wie bei W)	N/kN
W	Fahrwiderstand	N
W_a	Beschleunigungswiderstand	N
W_b	Bogenwiderstand	N
W_f	Laufwiderstand	N
Wg_i	Technische Bewertung je Variante	–
wg_{ij}	Gewichteter Wert je Variante und Kriterium	–
W_I	Neigungswiderstand	N
W_w	wirtschaftliche Bewertung	–
α_S	Azimutwinkel	°
β	Anstellwinkel	°
β	Steigung	°
γ_S	Elevationswinkel	°
δ	Sonnendeklination	°
η_G	Wirkungsgrad Getriebe	–
η_{gesamt}	Wirkungsgrad Gesamt	–
η_M	Wirkungsgrad Fahrmotor	–
η_{Panel}	Wirkungsgrad Solarpanel	–
η_{Temp}	Wirkungsgrad Temperatur	–
ϑ_A	Temperatur Absorberfläche	K
ϑ_U	Temperatur Umgebung	K
ξ	Massenfaktor	–
π	Kreiszahl	–
φ	Breitengrad	°
ω	Stundenwinkel	s

KAPITEL 1

Einleitung

In vielen Länder des arabischen und asiatischen Raumes werden neue U-Bahnen gebaut. Durch den Zuwachs der Bevölkerung und den steigendem Wohlstand steigt der Bedarf an Mobilität. Die meisten dieser Länder hatten in den letzten Jahrzehnten eine schnelle Entwicklung ihrer Wirtschaft und infolgedessen eine Expansion der urbanen Gebiete. Daher werden die meisten neuen Metrolinien in einer vergleichsweise neuen Infrastruktur errichtet. Weiters ist das Platzangebot in diesen Ländern größer und es kann oft auf unterirdisch verlegte Metrolinien verzichtet werden. Oftmals wird der Denkmalschutz nicht so streng verfolgt und auch das Umsiedeln von Menschen für staatliche Projekte ist eher üblich. Das Bohren von Tunnels ist in der Bauphase wesentlich aufwendiger und zeitintensiv als das Bauen von Zugtrassen auf Ständern oder Dämmen.

Die Kehrseite der schnellen Expansion ist eine überlastete Infrastruktur, da diese nicht so schnell und in geeigneter Qualität mitwachsen kann. Dieses Problem betrifft Metrolinien meistens dadurch, dass die Stromversorgung instabil ist. Aus diesem Grund ist mit Ausfällen zu rechnen. Dies bedeutet im Personentransport ein Sicherheitsrisiko, da zu Stoßzeiten eine große Anzahl an Personen auf engstem Raum versammelt ist. Sollte es zu einem Ausfall kommen, so kann eine Kühlung nicht gewährleistet werden. Dies führt in isolierten Räumen wie einem Metro-Fahrzeug, indem eine großen Anzahl an Personen verweilen, schnell zu einer erhöhten Innenraumtemperatur. Dies wird weiter verstärkt durch eine direkte Sonneneinstrahlung bei oberirdisch geführten Linien. Steigt die Innenraumtemperatur zu hoch, kann es zu der Situation kommen, dass die Passagiere die Türen öffnen und auf die Gleiskörper klettern. Dabei besteht die Gefahr, dass sie auf das benachbarte Gleis kommen, welches noch Strom führen kann und wo Fahrzeuge verkehren können. Daher wird versucht, derartige Situationen zu vermeiden. Sollte dies nicht möglich sein, so ist der Betreiber, per Gesetz, verpflichtet Notfallrichtlinien zu erfüllen. Dies kann eine Evakuierung der Personen bedeuten oder eine andere Art der Auflösung der Notsituation für die Passagiere.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, in Zusammenarbeit mit Siemens Österreich Konzepte für Notsituationen zu erarbeiten, die Stromunterbrechungen mit Hilfe von Photovoltaik auszugleichen und zu eruieren, welche Systeme eingesetzt werden können um Notsituationen zu verhindern.

KAPITEL 2

Beschreibung der Einsatzbedingungen

Entscheidend für diese Studie ist es, genaue Informationen darüber zu haben, welchen Einsatzbedingungen das System ausgesetzt sein wird. Darauf beziehend muss das Konzept ausgelegt werden.

2.1 Eigenschaften der Sonneneinstrahlung

Bei der Betrachtung eines Photovoltaik (PV)-Systems müssen vorab etliche Grundbegriffe geklärt werden, die im Folgenden eine Rolle spielen oder zum Verständnis des Systems beitragen. [24, S.37]

2.1.1 Solarkonstante

Die Solarkonstante ist jene Menge an Sonnenlicht, welches auf der Erde auftrifft. Sie wird in Leistung pro Flächeneinheit (W/m^2) gemessen. Die Abbildung 2.1 zeigt den Abstand zwischen Sonne und Erde sowie die Ausbreitung der Sonnenstrahlen anhand einer Hüllkugel. [24, S.37]



Abbildung 2.1: Abstand der Sonne und Erde mit der Hüllkugel des Sonnenlichts [24, S.37]

Im Inneren der Sonne fusionieren vier Wasserstoffatome zu einem Heliumkern und erzeugen dabei Energie. Diese Energie wird an der Oberfläche, unter anderem, in Form von Strahlung abgegeben. Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt $P_{\text{Sonne}} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Die Sonne gibt ihre Strahlung kugelförmig in alle Richtungen ab. Mit dem Abstand zwischen Sonne und Erde von $r_{SE} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ kann die Leistungsdichte der Sonneneinstrahlung

auf der Erde mittels Gleichung 2.1 bestimmt werden. [24, S.37f]

$$E_S = \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{Kugeloberfläche}} = \frac{P_{\text{Sonne}}}{4 * \pi * r_{SE}^2} = \frac{3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 * \pi * (1,496 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

Beim Abstand der Sonne zur Erde beträgt die Leistungsdichte $E_S = 1367 \text{ W/m}^2$. Dieser Wert wird als Solarkonstante bezeichnet und ist lediglich außerhalb der Atmosphäre valid. [24, S.38]

2.1.2 Spektrum der Sonne

Die Sonne kann als annähernd idealer schwarzer Körper bezeichnet werden, welcher eine Oberflächentemperatur von 5778 K hat. Folglich kann man das Strahlungsspektrum der Sonne mithilfe des planckschen Strahlungsgesetzes bestimmen. Das real gemessene Spektrum außerhalb der Erdatmosphäre, Air Mass 0 (AM0), schwankt jedoch geringfügig gegenüber dem idealen Schwarzkörperspektrum. Das Spektrum erstreckt sich auf den Bereich zwischen 140 nm und 10 cm. Das Integral der AM0 Kurve nach den Wellenlänge ist die Solarkonstante $E_S = 1367 \text{ W/m}^2$. [24, S.38][49, S.17]

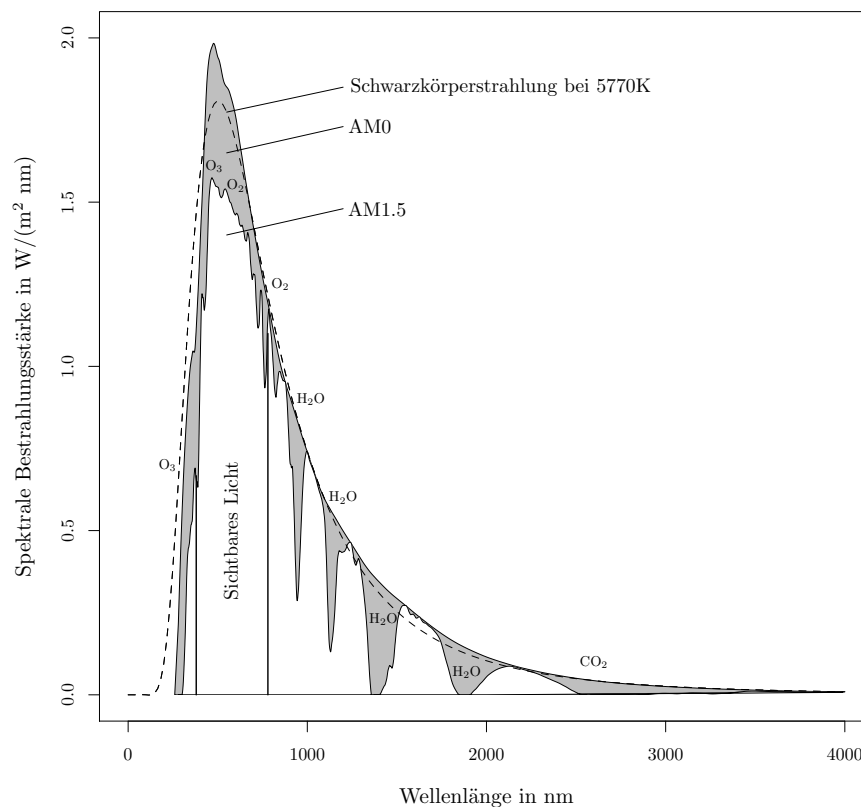


Abbildung 2.2: Spektrum der Sonneneinstrahlung (Daten:ASTM E-490[1],ASTM G-173-03[2], [7, S.38])

In Abbildung 2.2 ist zusätzlich zum AM0 (schwarze Linie) auch das AM1,5 (grauer Bereich) aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass verschiedene Elemente, wie Wasserdampf (H_2O) oder Kohlenstoffdioxid (CO_2), in der Erdatmosphäre gewisse Wellenlängen abschwächen oder teilweise gänzlich blockieren. [49, S.21][7, S.38f]

2.1.3 Air Mass

Wie in Abbildung 2.2 ersichtlich, beeinflusst die Erdatmosphäre wesentlich die auf die Erde auftreffende Sonneneinstrahlung. Je weiter der Weg durch die Atmosphäre, desto geringer ist die auftretende Strahlung. Um jene Eigenschaft beschreiben zu können, wurde der „Air Mass“-Wert eingeführt. Er gibt an, wie lange der Weg des Sonnenlichtes verglichen zu einem senkrechten Durchgang durch die Atmosphäre ist. Die Abbildung 2.3 zeigt die Werte AM0, AM1, AM1,5 und AM2. [49, S.20][24, S.39]

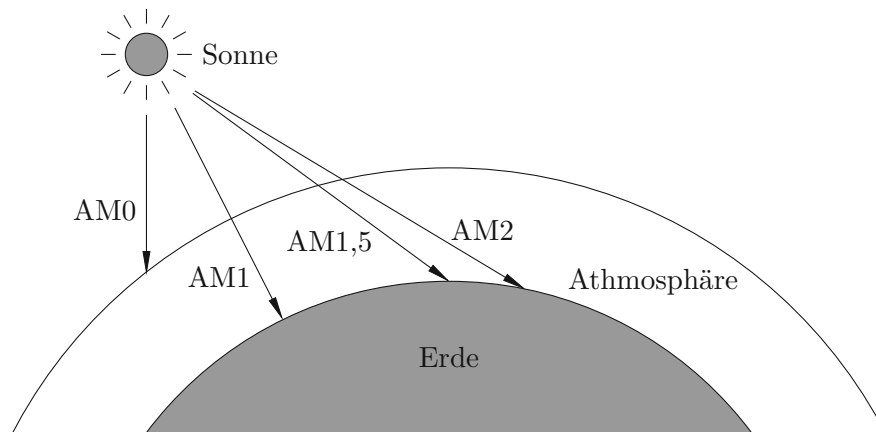


Abbildung 2.3: Air Mass [49, S.20]

Für Vergleiche von PV-Modulen, hat sich der AM1,5 Wert als Standard etabliert. Hierdurch ist es leicht möglich, verschiedene Module zu vergleichen. [24, S.39]

2.1.4 Die Globalstrahlung

An der Erdoberfläche kommt es zu einer höher gemessenen Strahlung, als der zuvor berechnete Air-Mass Wert angibt. Diese Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass der AM-Wert nur die direkte Einstrahlung (Direktstrahlung) angibt. In der Atmosphäre werden die Lichtteilchen nicht nur abgeschwächt oder blockiert, sondern auch reflektiert oder gestreut. Aufgrund dessen kommt es zu einer zusätzlichen indirekten Einstrahlung (Diffusstrahlung). [24, S.40]

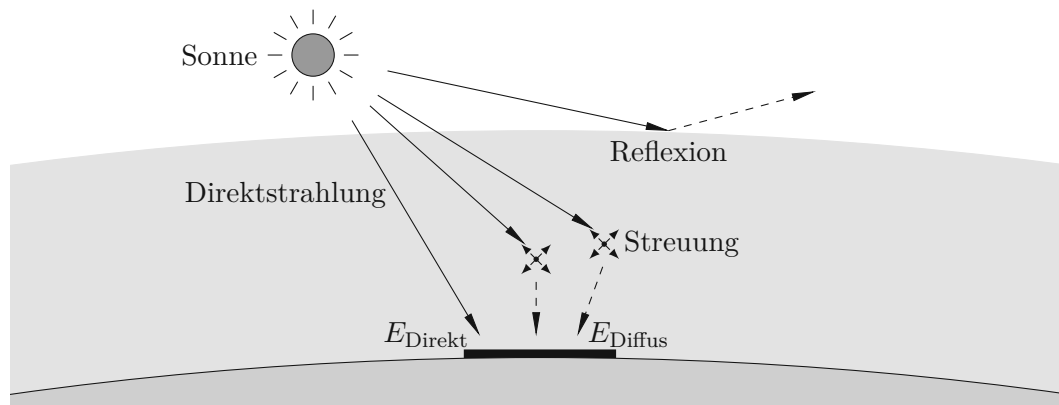


Abbildung 2.4: Globalstrahlung [24, S.40]

Die Abbildung 2.4 zeigt die Direkt- und Diffusstrahlung, letztere entsteht durch Störungen in der Atmosphäre. Diese Störungen können kleine Partikel wie Ruß oder Sand sein. Die Globalstrahlung setzt sich folglich aus der Direkt- und Diffusstrahlung zusammen. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 2.2 beschrieben.

$$E_G = E_{Direkt} + E_{Diffus} \quad (2.2)$$

Unter der Annahme, dass die Sonneneinstrahlung am Beginn der Atmosphäre als Bezugsgröße gleich 100 % gesetzt werden, kommt die Direktstrahlung auf einen Anteil von 22 % und die Diffusstrahlung auf 25 % an der Erdoberfläche. [49, S.18]

2.1.5 Der Sonnenstand

Die nutzbare Energie einer PV-Anlage ist abhängig vom Sonnenstand. Des weiteren gibt der Sonnenstand Auskunft über den Air Mass Wert und daraus den möglichen Anteil an Direkt- und Diffusstrahlung. Der Sonnenstand kann mit zwei Parametern beschrieben werden, dem Azimutwinkel α_S und dem Elevationswinkel γ_S . [24, S.47]

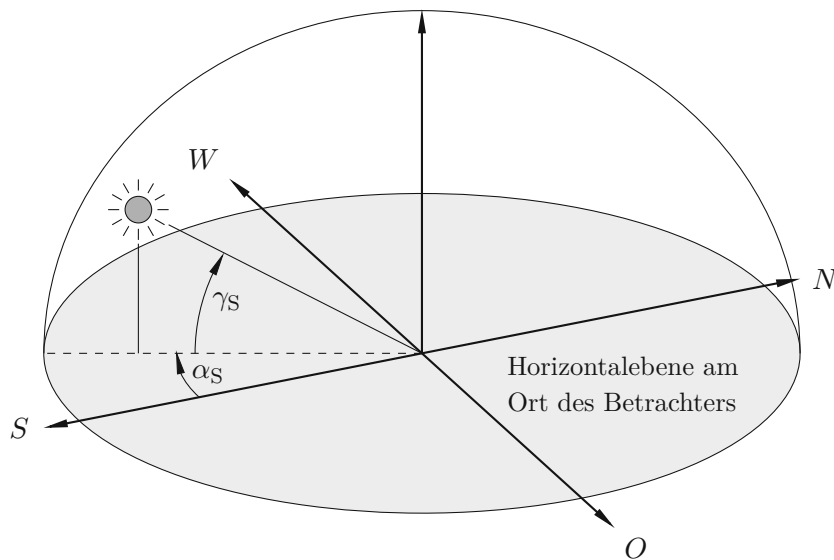


Abbildung 2.5: Sonnenstand mit eingezeichnetem Azimut- und Elevationswinkel [24, S.47]

Die Abbildung 2.5 zeigt den Azimut- und Elevationswinkel zur Bestimmung des Sonnenstandes für einen bestimmten Standort. Nun kann man mit Hilfe der wahren Ortszeit (WOZ) die jeweilige Drehposition der Erde angeben. Dies ist in Gleichung 2.3 beschrieben. [24, S.47]

$$\omega = (\text{WOZ} - 12) * 15^\circ \quad (2.3)$$

Mit Hilfe des Breitengrades φ und der Sonnendeklination δ (Winkelabstand der Sonne zur Äquatorebene), ergeben sich der Azimut- und Elevationswinkel aus den Gleichungen (2.4) und (2.5). [24, S.47]

$$\sin \gamma_S = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega \quad (2.4)$$

$$\sin \alpha_S = \frac{\cos \delta * \sin \omega}{\cos \gamma_S} \quad (2.5)$$

Mit dem Azimut- und Elevationswinkel kann nun für jeden Standort zu jeder Jahreszeit der Sonnenstand berechnet werden. Mittels dieser Berechnung kann man die mögliche Leistung und eventuelle Verschattungen vorhersagen. [24, S.48]

2.1.6 Strahlung auf geneigten Flächen

Um die Menge (Ertrag) an Sonneneinstrahlung auf einer Fläche zu erhöhen kann das PV-Modul in einem Winkel gegenüber der Horizontalen angebracht werden. Dieser Winkel wird Anstellwinkel β genannt. Mit einer Anstellung erreicht man eine höhere Einstrahlung zu gewissen Tages- und Jahreszeiten und somit einen höheren Jahresertrag. Dies kann mit dem Dreikomponentenmodell beschrieben werden. Zusätzlich kann das PV-Modul mit der

Sonne mitbewegt werden (Nachführung) um den Ertrag weiter zu steigern. [24, S.48]

Das Dreikomponentenmodell

Die Strahlung setzt sich bei einer geneigten Fläche anders zusammen als bei einer horizontalen Fläche. Zusätzlich zur Direkt- und Diffusstrahlung gibt es bei geneigten Flächen noch eine dritte Komponente, die reflektierte Strahlung. Der Boden in unmittelbarer Nähe der Solarpaneele reflektiert Strahlung. Gegenüber einem horizontal angebrachten PV-Modul ist der Direktstrahlungsanteil bei einer geneigten Fläche höher. Wird der Anstellwinkel β so gewählt das die Sonnenstrahlen lotrecht auf das PV-Modul trifft wird die mögliche Strahlungsmenge maximiert. [24, S.48]

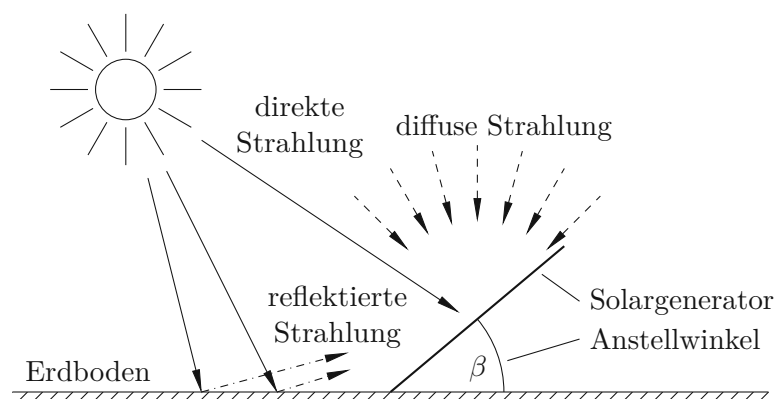


Abbildung 2.6: Anstellwinkel [24, S.49]

Die Abbildung 2.6 zeigt einen um den Winkel β angestellten Solargenerator und die direkte, diffuse und reflektierte Strahlung. Mit dem letztgenannten Anteil ergibt sich eine veränderte Gesamtstrahlungsmenge nach Gleichung 2.6. [24, S.48]

$$E_{\text{Ges}} = E_{\text{Direkt}} + E_{\text{Diffus}} + E_{\text{Refl}} \quad (2.6)$$

Ertragsgewinn durch Nachführung

Durch Nachführung des PV-Moduls mit dem Sonnenstand kann eine verbesserte Nutzung der Sonneneinstrahlung in den Morgen- und Abendstunden erreicht werden. Mit dieser Technik sind die Paneele meistens optimal zur Sonne ausgerichtet und liefern einen maximalen Ertrag. [24, S.54]

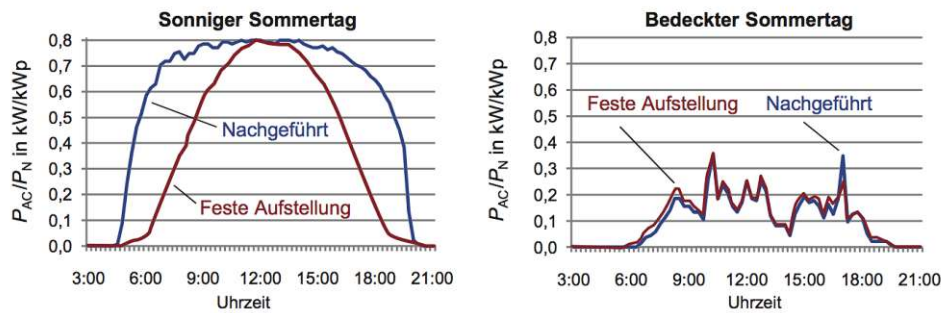


Abbildung 2.7: Nachführung [24, S.54]

In Abbildung 2.7 ist die Leistungsrate über die Zeit an einem sonnigen sowie einem bedeckten Tag aufgetragen. An einem sonnigen Tag kann mit Hilfe der Nachführung der Ertrag erheblich gesteigert werden. An einem bedeckten Tag hingegen ist keine Steigerung möglich, es kommt wie in Abbildung 2.7 zu erkennen zu einer Verringerung. Laut Mertens (siehe [24]) kann der Ertrag mit einer Nachführung bei einem sonnigen Tag um 60 % gesteigert werden wohingegen bei bedeckten Tagen eine Verringerung von 10 % auftritt. Dies liegt daran dass der Anstellwinkel in den Morgen und Abendstunden bei nach geführten Anlagen relativ hoch ist und somit weniger Diffusstrahlung aufgenommen werden kann. [24, S.54]

2.1.7 Tagesverlauf der Sonneneinstrahlung

Die Sonneneinstrahlung ist eine der wichtigsten Größen um den Ertrag einer PV-Anlage zu beschreiben. Er gibt an wie viel Energie auf einer Fläche auftrifft. Die Sonneneinstrahlung ist gleichbedeutend mit der Globalstrahlung aus Gleichung 2.2 und 2.6. Die Sonneneinstrahlung hängt nicht nur vom Standort, Azimut- und Elevationswinkel oder der Anstellung ab, sondern auch von den Umweltbedingungen. Dies kann wie oben erwähnt Bewölkung sein aber auch Regen oder Luftverschmutzung. Aufgrund dessen ist der Ertrag jeden Tag unterschiedlich. Im Nachfolgenden werden unterschiedliche Situationen grob skizziert, welche anhand des Tagesverlaufs beschrieben werden können.

Idealverlauf Sonneneinstrahlung

Ein idealer Tag hat einen Verlauf der Sonneneinstrahlung der einer Glockenkurve ähnelt. Eine solcher Verlauf ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Auf der x-Achse ist die Zeit aufgetragen und auf der y-Achse ist die Sonneneinstrahlung in W/m^2 aufgetragen. Mit den ersten indirekten Sonnenstrahlen (Dämmerung) beginnt der Wert für die Sonneneinstrahlung zu steigen. Bei den ersten direkten Sonnenstrahlen wird die Kurve steiler. Wenn die Sonne im Zenit steht, erreicht die Sonneneinstrahlung ein Maximum. Danach nimmt sie wieder ab, bis die Sonne untergegangen ist und auch die letzten indirekten Sonnenstrahlen der Abenddämmerung abgeklungen sind.

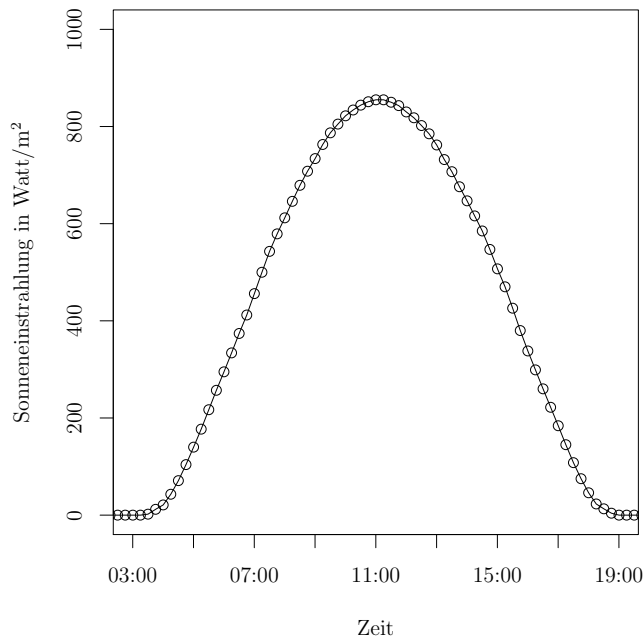


Abbildung 2.8: Tagesverlauf Sonneneinstrahlung in Wien am 27.07.2005 (Daten: SoDa)

Der soeben beschriebene Verlauf ist deutlich in Abbildung 2.8 zu sehen. Sie stammt aus den Daten der Webplattform SoDa¹. Diese stellt verschiedene Wetter- und Klimadaten zur Verfügung. Sie bietet einen Datensatz gebührenfrei an. Dieser ist beschränkt auf den Zeitraum 2004 und 2005. Die Abbildung (2.8) zeigt Wien am 27.07.2005.

Abweichende Tagesverläufe

Nicht immer hat die Sonneneinstrahlung einen Verlauf wie in Abbildung 2.8. Oftmals wird die PV-Anlage abgeschattet. Dabei verringert sich die Leistung, die die Paneele erzeugen teilweise erheblich. Dabei können grob zwei Fälle unterschieden werden, Diesig und Bewölkt.

¹ www.soda-pro.com

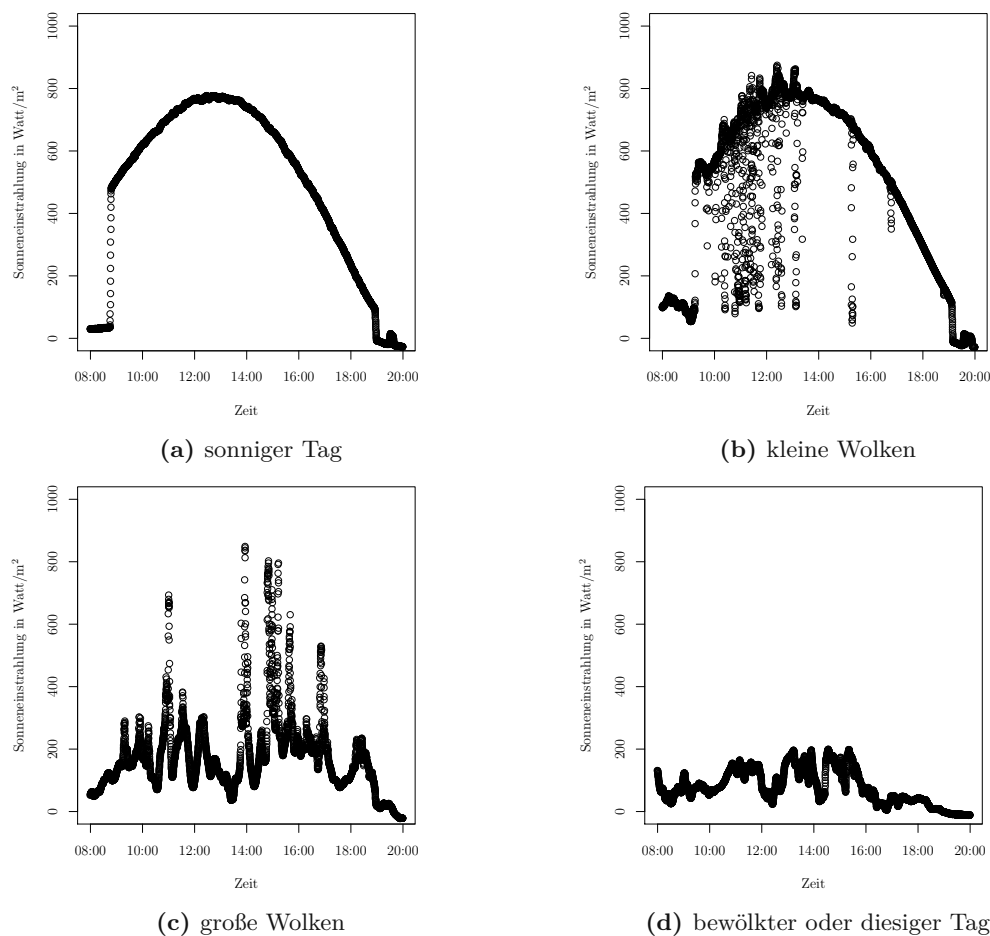


Abbildung 2.9: Unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung an verschiedenen Tagen (Daten: Siemens)

Diesig Bei diesigem Wetter spricht man von dunstiger Luft, hoher Luftfeuchtigkeit, einem hohen Anteil an Verunreinigungen (Smog) oder auch Hochnebel. Weiters ist die Permeabilität der Atmosphäre in Bezug auf Licht gering. Dies ist im Diagramm erkennbar, da die Werte der Sonneneinstrahlung durchgehend niedrig sind. Tage mit diesen Witterungsbedingungen sind für die Erzeugung von Solarstrom ungeeignet. Abbildung 2.9(d) zeigt so einen Tag am 2015-05-26 in Wien.

Bewölkt Bei einer Bewölkung kann zwischen zwei Arten unterschieden werden, die entweder getrennt oder gemischt auftreten können.

Durch Wolkenbildung werden die Solarpaneele abgeschattet und der Ertrag der Sonneneinstrahlung sinkt. Die Auswirkungen einer Abschattung sind abhängig von Größe und Geschwindigkeit der Wolke. Wenn sich kleine Wolken zügig bewegen, entstehen nur kleine Einbrüche und die verlorene Leistung ist gering. In Abbildung 2.9(b) ist zu sehen, dass über den Tag verteilt Einbrüche der gemessenen Werte durch die Wolken entstehen. Wenn die

Wolken flächiger sind oder nicht abziehen, kommt es zu längeren Abschattungen. Dabei wird durchschnittlich eine geringere Leistung pro Tag erzeugt und nur, wenn die Wolkendecke aufbricht, entstehen vereinzelt Spitzen der Messwerte (siehe Abbildung 2.9(c)).

2.2 Sonneneinstrahlung am Einsatzort Riad

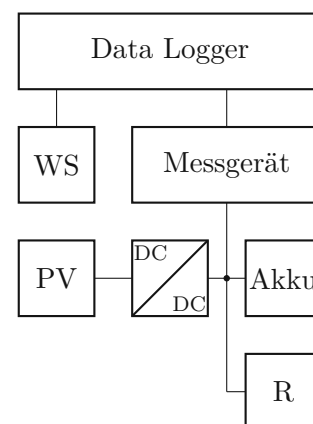
Alle Annahmen, die in dieser Arbeit getroffen werden, sind in Bezug auf den Einsatzort Riad (Riyadh) in Saudi Arabien zu verstehen (die geographische Lage und die Umweltbedingungen werden später in Kapitel 2.2.4 genauer beschrieben). Für Riad sind keine Bodenmessungen der Sonneneinstrahlung frei verfügbar, dafür aber Satellitendaten. Diese Daten sind auch für Wien verfügbar. Um die Satellitendaten zu Validieren werden die Daten der Pilotanlage in Wien, mit den Daten der Satelliten verglichen. Damit kann bestimmt werden, ob sie den Anforderungen hinsichtlich Zeitintervall und Messtoleranz genügen.

2.2.1 Pilotanlage Wien

In Wien wurde eine Pilotanlage von Siemens auf dem Firmengelände in der Leberstraße errichtet und ein Jahr lang betrieben, um den Ertrag einer PV-Anlage zu ermitteln. Die Anlage hatte die Form eines Daches eines Metrozuges (siehe Abbildung 2.10(a)). Damit die Einsatzbedingungen jenen auf einem Metrozug möglichst ähnlich sind, wurde die Anlage so aufgebaut, dass sie während des Tages einen Speicher mittels einem Ladegerät lädt, da dies auch im realen Einsatz der Fall wäre. In den Nachtstunden wurde der Speicher über einen Widerstand (R) entladen. Dies ist in Abbildung 2.10(b) schematisch dargestellt.



(a) Aufbau Projektanlage, Copyright: Siemens



(b) Schematischer Aufbau der Projektanlage

Abbildung 2.10: Pilotanlage Siemens Werksgelände Leberstraße Wien

Zusätzlich wurde zu der Pilotanlage eine Wetterstation (WS) hinzugefügt. Temperatur, Windstärke, Windrichtung und Sonneneinstrahlung wurden gemessen. Die Messung der Daten erfolgt alle 10 s. Infolgedessen ist die Auflösung der Daten fein und es können kleinste Änderungen der Witterungsbedingungen berücksichtigt werden.

Pyranometer Zur Messung der Sonneneinstrahlung wird ein Pyranometer verwendet. Hierfür grundlegend ist eine schwarzen Absorberfläche. Sie wird durch die Sonneneinstrahlung

erhitzt und hat eine andere Temperatur als die Umwelt. Die sich ergebende Temperaturdifferenz ist ein Maß für die Sonneneinstrahlung. Die Absorberfläche wird durch eine Glaskuppel von der Umwelt abgesondert und mithilfe einer weißen Verkleidung wird das Erwärmen des Pyranometergehäuses verhindert. Die schwarze Absorberfläche reagiert auf das gesamte Spektrum der Sonne aber die Glaskuppel beschränkt das Spektrum auf 300 nm bis 2800 nm. Auch wenn der Bereich nicht das komplette Spektrum der Sonneneinstrahlung abdeckt, ist die Abdeckung ausreichend (vgl. Abbildung 2.2). Damit sich die Glaskuppel nicht beschlagen kann ist eine Trocknungspatrone verbaut, die halbjährlich getauscht werden muss. Die Abbildung 2.11 zeigt ein Pyranometer. [24, S.218f]

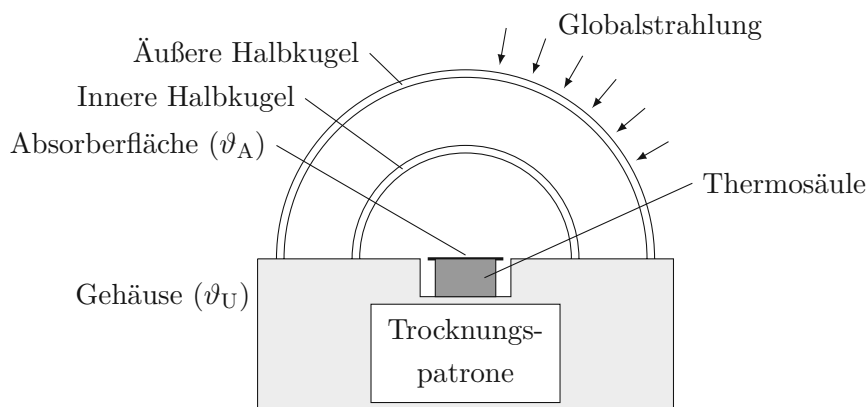


Abbildung 2.11: Aufbau eines Pyranometer [24, S.219]

In der Pilotanlage der verbauten Wetterstation ist ein Sternpyranometer Type 8101 des Herstellers Schenk im Einsatz. Die Tabelle 2.1 beinhaltet die technischen Daten des Sternpyranometers.

2.2.2 Satellitendaten

Die Wetterdaten von Riad stammen von der Online Plattform SoDa. Die Daten werden aus dem McClear Modell des ECMWF ¹ und dem Cloud Index der Eumetsat ² ermittelt.

Tabelle 2.1: Technische Daten Sternpyranometer Type 8101 Schenk [36, S.3]

Messbereich	0...1500	W/m ²
Umgebungstemperatur	-40...60	°C
Ausgang	15	μV/Wm ⁻²
Spektralbereich	0,3...3	μm
Auflösung	<1	Wm ⁻²
Temperatureinfluss	<3	%
Gewicht	1	kg

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

² European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites

Ersteres berechnet die Sonneneinstrahlung auf einer horizontalen Fläche ohne Einfluss von Wolken. Hierbei wird mit einberechnet das Störelemente in der Atmosphäre die Lichtdurchlässigkeit beeinflussen können und dadurch die Sonneneinstrahlung vermindert wird. Diese Störelemente sind Ozon (O_3), Wasserdampf und Schwebstoffe wie Sand oder Feinstaub.[21, S.2404,S.2407] Der zweite Wert ist die Bewölkung. Die geht aus dem Cloud Index hervor und gibt an wo und wie stark die Bewölkung ist. Aus diesen beiden Modellen wird eine ortsbasierte Sonneneinstrahlung (HelioClim-3) errechnet. Die Daten haben ein Zeitintervall von 15 min und beziehen sich auf eine quadratische Fläche von 3-5 km Seitenlänge. [5]

2.2.3 Auswerten der Daten aus Wien

Für diese Studie sind nur die Daten der Sonneneinstrahlung relevant. Die gewonnenen Daten werden mithilfe der Software R¹ und R-Studio² aufbereitet und in einzelne Tage gegliedert. Anschließend sind bei allen Datensätzen die Nachtstunden ohne Sonneneinstrahlung entfernt worden. In Abbildung 2.12 sind exemplarisch sechs unterschiedliche Tage abgebildet. Sie stammen alle aus der Pilotanlage auf dem Werksgelände von Siemens auf der Leberstraße.

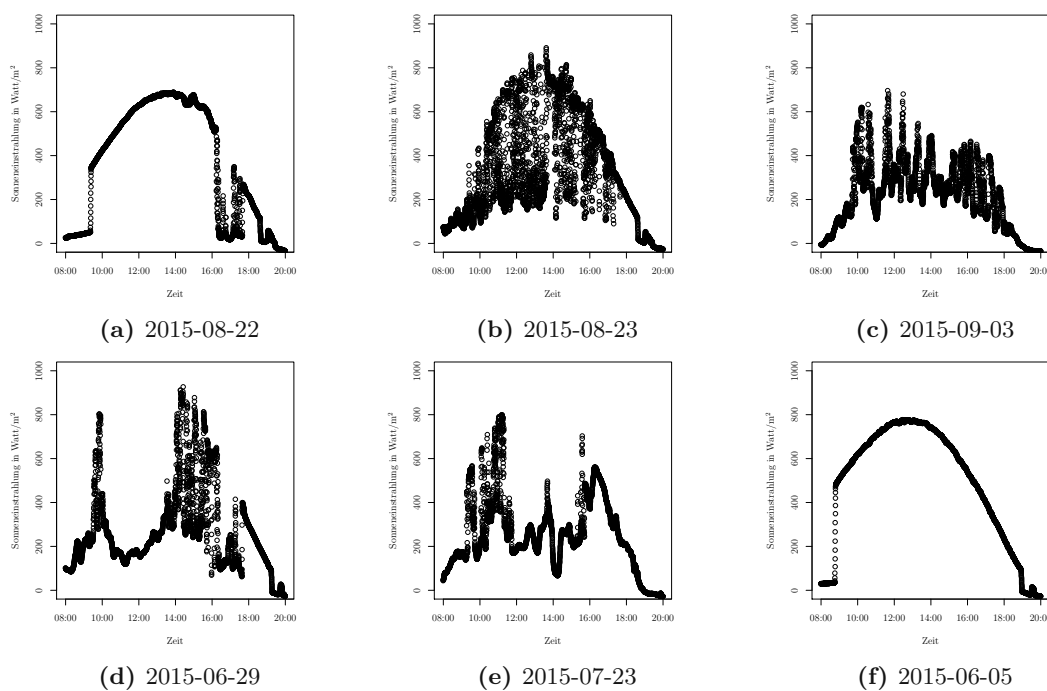


Abbildung 2.12: Verschiedene Verläufe der Sonneneinstrahlung in Wien am Werksgelände Leberstraße (Daten: Siemens)

¹ Version 3.3.1

² Version 0.99.903

Eigenschaften

Die Daten die in Wien erhoben wurden haben eine Besonderheit verglichen mit dem Normalverlauf (siehe Abbildung 2.8). Wie in Abbildung 2.12(f) zu sehen ist, steigt die Sonneneinstrahlung nur ganz leicht an und hat dann zu einem gewissen Zeitpunkt einen sprunghaften Anstieg. Verursacht wird dies durch eine Abschattung der Paneele seitens des benachbarten Gebäudes. Dadurch treffen, bis zu dem Anstieg, nur die indirekten Sonnenstrahlen auf die Paneele auf. Steigt die Sonne über das benachbarte Gebäude hinweg, treffen die Sonnenstrahlen direkt auf die Paneele und verursachen den plötzlichen Anstieg. Selbiger Vorgang ist abends zu beobachten. Wie in Abbildung 2.9(a) ablesbar, ist ein steiler Abfall erkennbar, kurze Zeit später wieder ein vorübergehender Anstieg. Der Abfall wird wieder durch eine Abschattung durch das Gebäude verursacht und der vorübergehende Anstieg ist erklärbar durch einen Spalt zwischen zwei Gebäuden, wodurch das Licht für eine kurze Zeit wieder direkt auf die Paneele fallen kann. Zwar sind die Sprünge weitaus geringer als am Vormittag, dennoch ersichtlich.

Validieren der Satellitendaten

Eine wichtige Frage ist es zu klären wie genau die Satellitendaten sind. Dazu werden die Daten aus der Pilotanlage mit den aus den Wettersatelliten verglichen. Die frei erhältlichen Daten für die Sonneneinstrahlung durch Satelliten sind begrenzt auf die Jahre 2004 und 2005. Aus diesem Grund können keine Daten eines einzelnen Tages herangezogen werden. Um dennoch einen Vergleich aufstellen zu können wurden zwei sonnige Tage ohne Störungen gegenübergestellt. Beide Tage befinden sich in den Sommermonaten. In diesen Tagen ist die Sonneneinstrahlung am höchsten.

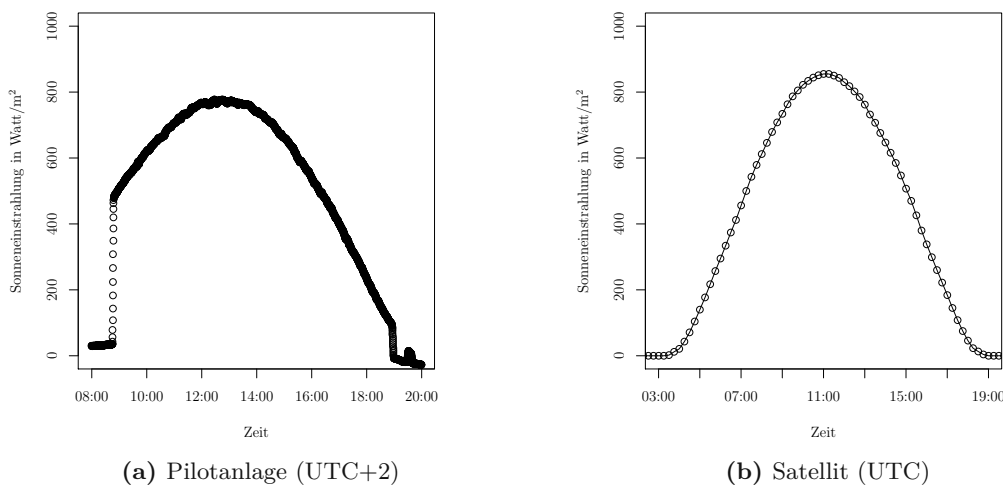


Abbildung 2.13: Satellitenmessungen verglichen mit Pilotanlage (Daten: Siemens, SoDa)

In Abbildung 2.13 ist zu sehen, dass sich die Daten der Pilotanlage mit den Satellitendaten weitestgehend decken. Die Unterschiede liegen am Aufstellort, wie im vorherigen Absatz erklärt und an der Zeitangabe. Die Daten aus der Pilotanlage habe die örtliche Sommerzeit

(UTC+2) und die Satellitendaten verwenden die Koordinierte Weltzeit (UTC¹).

Erkenntnis

Die Daten der Pilotanlagen zeigen, dass Tage mit idealem Wetter für eine Solaranlage selten sind. Auch in den Sommermonaten ist mit Bewölkung in diesen Breitengraden zu rechnen. Um Schwankungen des Ertrages zu kompensieren muss ein Speichersystem verwendet werden. Dieses muss groß genug sein, um derartige Schwankungen abfangen zu können. Daraus folgt, dass die kleinste Auflösung des Zeitintervalls der Satellitendaten annehmbar ist um Rückschlüsse für PV-Anlage ziehen zu können.

2.2.4 Umweltbedingungen in Riad

Für die Arbeit wird der Ort Riad (Riyadh) betrachtet. Riad ist die Hauptstadt von Saudi-Arabien und hat die Koordinaten 24°39' N, 46°43' O [50]. Das Klima in dieser Region ist eher trocken und die Temperaturen liegen ausschließlich im positiven Bereich der Celsius-Skala. Der Tag hat viele Sonnenstunden und die Sonneneinstrahlung ist hoch.



Abbildung 2.14: Karte von Saudi-Arabien und der Hauptstadt Riad [Wikimedia Commons: GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>) (von NormanEinstein)]

1 Universal Time, Coordinated

Die Abbildung 2.14 zeigt Riad auf der Arabischen Halbinsel. In der Tabelle 2.2 sind alle relevanten Wetterdaten aufgelistet. Die Arabische Halbinsel hat einen sehr hohen Anteil an Wüste. Der dort vorkommende Sand ist schwer abrasiv und in Verbindung mit Salz aus dem Meer besteht ein erhöhtes Korrosionsrisiko. Aufgründessen sollen die Anlagen so ausgelegt werden, dass Sandstürme keine Schäden an den Anlage verursachen.

Dieser Ort wird gewählt, weil hier neue Metrolinien gebaut werden. Die grundlegenden Daten für die Strecken sind öffentlich zugänglich und die Fahrzeuge für zwei Linien werden von Siemens hergestellt. Die ersten Züge sind bereits gefertigt und die Gleisanlagen befinden sich im Bau. [51]

Damit bietet uns dieses Projekt die grundlegenden Informationen und den gewünschten Standort um die Studie durchzuführen.

2.2.5 Satellitenmessungen von Riad verglichen mit Wien

Anhand der vorhin erwähnten gewonnenen Erkenntnissen können nun die Satellitendaten ausgewertet werden. Dazu werden die gleichen Anpassungen an den Daten des Online Dienstes SoDa vorgenommen, wie zuvor bei den Daten aus der Pilotanlage. Um einen besseren Überblick zu bekommen, werden Riad und Wien nun gegenüber gestellt (siehe Abbildung 2.15). Als ergänzende Information sind die Temperaturen in Grad Celsius eingetragen. Daraus wird ersichtlich, welche Temperaturen zu erwarten sind, denen die Anlage sowie die Passagiere ausgesetzt werden.

Tabelle 2.2: Klimatablelle für Riad (Daten: <http://www.wetterkontor.de/>)

	max. Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	rel Luftfeuchte –	Sonne [h/Tag]
Jan	20,2	11	50	7,3
Feb	22,9	10	40	8,5
Mär	27,6	24	35	7,8
Apr	32,3	29	33	8,7
Mai	38,7	8	22	9,3
Jun	41,5	0	14	11,1
Jul	42,8	0	15	10,7
Aug	42,5	0	14	10,6
Sep	40,1	0	18	10,0
Okt	34,6	1	24	9,1
Nov	27,4	6	37	8,0
Dez	21,7	11	46	7,1

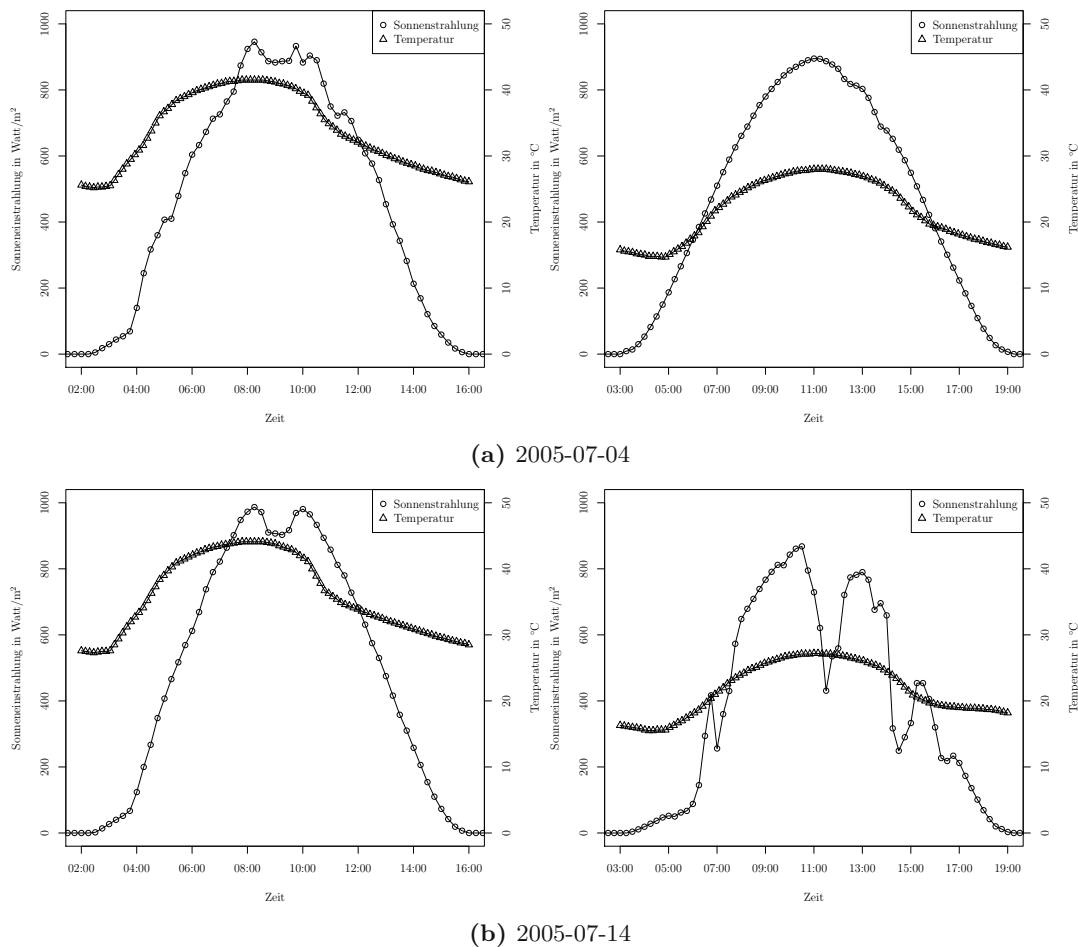


Abbildung 2.15: Vergleich der Satellitendaten für Riad und Wien (Daten: SoDa)

In der Auswertung ist erkennbar, dass die maximale Sonneneinstrahlung zwischen Riad und Wien nur geringfügig abweicht. Die Abschattung in Riad durch Wolken ist kaum vorhanden, ganz im Gegenteil zu Wien. Weiters ist die Zeitspanne der Störungen in Riad geringer. Somit kann mit davon ausgegangen werden, dass das Zeitintervall der Messungen der Satellitendaten ausreichend ist und keine großen Abweichungen vor Ort zu erwarten sind.

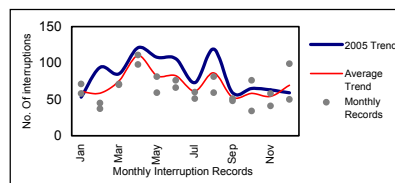
2.2.6 Nutzbare Leistung in Riad

Die Maximalleistung ist nur kurz verfügbar, wenn die Sonne ihren Höchststand hat. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, diesen Wert als Berechnungsgrundlage heranzuziehen. Es muss ein Wert definiert werden, der über einen weiten Bereich des Tages zur Verfügung steht. Dabei muss das Verhältnis zwischen Leistung und Zeitspanne betrachtet werden. Es ist auch nicht zielführend, die Leistung zu niedrig anzunehmen, welche dann tagsüber ohne Probleme erzielt werden kann, allerdings für diese Studie und weitere Verwendungszwecke ungeeignet ist.

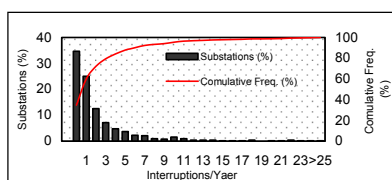
Um dem Verhältnis rechnerisch zu tragen wird jener Wert für die Sonneneinstrahlung herangezogen der mehr als 50 % der Zeit erreicht wird. Für diese Arbeit liegt dieser Wert bei 600 W/m^2 .

2.3 Ausfallhäufigkeit der Stromversorgung in Riad

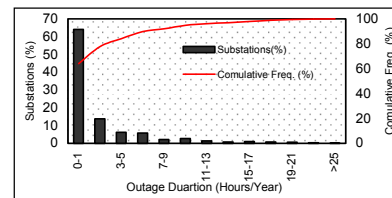
Eine Studie aus dem Jahr 2005 zeigt die Ausfälle im Saudi Electricity Company (SEC) Netzwerk in Saudi Arabien. Aufgelistet sind wie oft diese vorkommen und welche Zeitspanne sie einnehmen, sowie welche Ursachen es für die Ausfälle gab. [3]



(a) Ausfälle pro Monat im Vergleich zum Trend der historischen Daten



(b) Ausfälle pro Jahr



(c) Ausfalldauer

Abbildung 2.16: Kennwerte der Ausfälle im SEC-Netzwerk 2005 [3, S.5]

In der Abbildung 2.16 sind verschiedene Auswertungen der Ausfälle im SEC-Netzwerk. Wertvolle Informationen bieten die Graphen in Abb. 2.16(b) und 2.16(c). Der Graph zeigt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit mit mehreren Ausfällen pro Jahr zu rechnen ist und, dass diese zu 95 % weniger als 15 min andauert. Diese Erkenntnisse sind im späterem Verlauf essentiell um Annahmen bei der Auslegung treffen zu können.

Tabelle 2.3: Prozentuale Ursache für die Ausfälle SEC-Netzwerk 2005 [3, S.5]

Ursache	Wahrscheinlichkeit [%]
Wetter bedingt	34
Versagen des Equipments	31
Versagen einer Schutzeinrichtung	8
Menschliches Versagen	7
System Mängel	8
Verschiedenes	12

Des weiteren sind in Tabelle 2.3 die Ursachen der Ausfälle und ihr prozentueller Anteil angegeben.

2.4 Grundlagen des Fahrbetriebes mit Schienenfahrzeugen

Schienenfahrzeuge sind Verkehrsmittel die Personen oder Güter auf einem gesonderten Fahrweg transportieren und dabei spurgebunden sind. Im folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften und Begrifflichkeiten, die in dieser Studie verwendet werden, erläutert. [15, S.8]

2.4.1 Kategorisierung

Die Norm (DIN-25003) teilt Schienenfahrzeuge in mehrere Kategorien ein. Eisenbahn- und Straßenbahnfahrzeuge sind die Hauptgruppen. Metro-Fahrzeuge fallen in die Gruppe der Straßenbahnen. [8]

Zusätzlich zu der Norm können Schienenfahrzeuge durch ihr Anwendungsgebiet und ihre Ausführungen spezifiziert werden. Ein besonderes Merkmal von Metro-Fahrzeugen ist der unabhängige Fahrweg, der grundsätzlich vom restlichen Verkehr getrennt ist. [40, S.596] Dem Umstand, dass Metro-Fahrzeuge in den Anfangszeiten hauptsächlich untertage gefahren sind, verdanken sie ihrem deutschen Namen, Untergrundbahn (U-Bahn). Diese Bezeichnung ist irreführend, da heutzutage Metro-Fahrzeuge sowohl im Tunnel als auch über der Erdoberfläche fahren. In vielen Städten mit historischen Stadtzentren fahren die Metro-Fahrzeuge im Stadtkern in Tunneln und in den Stadtentwicklungszonen auf der Erdoberfläche. Deshalb sollte der Begriff Metro verwendet werden. Er stammt aus dem Französischen und ist die Kurzform von chemin de fer métropolitain. Die Übersetzung ist Wörtlich Eisenbahn der Bewohner und bedeutet soviel wie Stadtbahn. [19][22] Weitere Eigenschaften der Metro sind eine Geschwindigkeit von ca 80 km/h, eine Zugfolge von minimal 90 s und ein Haltestellabstand von 500 m bis 1000 m. [40, S.595f]

Der Unterschied zur Eisenbahn, oder auch Vollbahn genannt, liegt meist beim verwendeten Bahnstromsystem. Metro Systeme benutzen, im Regelfall, eine Gleichstromspannung von 750 V, dagegen benutzen die ÖBB¹ oder die DB² einen Einphasenwechselstrom von 16,7 Hz bei einer Spannung von 15 kV. [10, S.398]

2.4.2 Zugfolge

Die Zugfolge besagt, in welchen Abständen Züge hintereinander fahren können. Es muss immerwährend ein Sicherheitsabstand zwischen zwei Fahrzeugen bestehen, welcher dem nachfolgenden Zug die Möglichkeit gibt, vor dem vorderen Zug zum Stehen zu kommen. Der Anhalteweg bei Schienenfahrzeugen kann mitunter mehrere hundert Meter betragen. Dies ist mehr als die Sichtweite. Aus diesem Grund muss der Fahrer die notwendige Information erhaltend, ob sich auf der vor ihm liegenden Strecke ein anderer Zug befindet oder nicht. Für diese Verfahrensweise stehen mehrere Methoden zur Verfügung, wobei in dieser Studie auf fixer Blockabstand (Fixed Block) und variabler Blockabstand (Moving Block) eingegangen wird. [28, S.39]

1 Österreichische Bundes Bahn

2 Deutsche Bahn

Fixed Block

Bei einem Fixed Block System sind die Strecken in Abschnitte mit festem Raumabstand unterteilt. Diese werden als Blockabschnitte bezeichnet. In jedem dieser Blockabschnitte darf sich zu jedem Zeitpunkt nur ein Zug befinden. Auf der Strecke sichern stationäre Lichtsignale die Abschnitte ab. Erst, wenn ein Zug einen Blockabschnitt verlassen hat, wird dieser für den nachfolgenden Zug freigegeben. Aufgrund dessen sind die Zugfolgezeiten bei Fixed Block beschränkt. Die Abschnitte haben eine Länge, welche dem maximalen Bremsweg plus einem eingerechneten Sicherheitsfaktor entsprechen. [28, S.37]

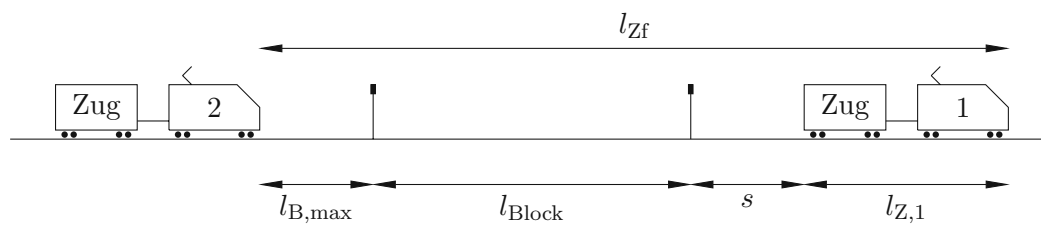


Abbildung 2.17: Fixed Block Methode [28, S.36]

Die Abbildung 2.17 zeigt eine Zugfolge mit der Fixed Block Methode. Der Zugfolgeabstand beschreibt den nötigen Abstand zwischen Zug 1 und Zug 2. Er wird wie folgt berechnet

$$l_{zf} = l_{z,1} + l_{B,max} + l_{Block} + s \quad (2.7)$$

l_{zf}	Zugfolgeabstand
$l_{B,max}$	maximaler Bremsweg
l_{Block}	Blockabschnittslänge
s	Sicherheitszuschlag
$l_{z,1}$	Länge des Zuges 1

Diese Art der Zugfolge ist die am häufigsten eingesetzte Methode im Bereich der Eisenbahnen. [28, S.38]

Moving Block

Im Gegensatz zu einem Fixed Block System, setzt ein Moving Block System keine festen Blockabschnitte und stationäre Lichtsignale voraus. Der nötige Abstand zwischen zwei Zügen errechnet die zentrale Steuerung fortwährend für die Züge, anhand Ihrer Geschwindigkeit. Der Abstand setzt sich zusammen aus dem Bremsweg und einem Sicherheitszuschlag. Je höher die Geschwindigkeit, desto höher muss auch der Sicherheitsabstand sein. Mit dieser Methode ist eine weitaus geringere Zugfolge zu erreichen als bei der Fixed Block Methode. [28, S.37]

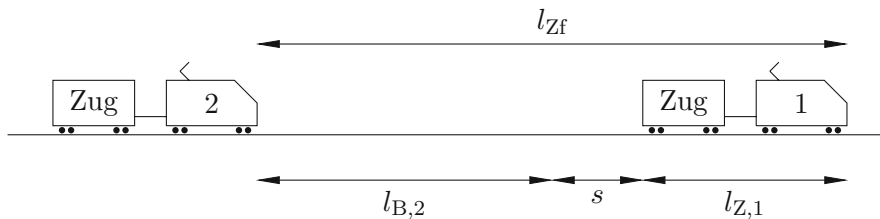


Abbildung 2.18: Moving Block Methode [28, S.36]

Die Abbildung 2.18 veranschaulicht das Konzept für das Moving Block Verfahren. In diesem Verfahren wird der Bremsweg von Zug 2 mit $l_{B,2}$ bezeichnet. Bei diesem Verfahren besteht die Herausforderung darin, die genaue Position der Züge zu bestimmen und verzögerungsfrei der zentralen Steuerung mitzuteilen. [28, S.37]

Die Strecke in Riad wird mit dem Moving Block Verfahren betrieben.

2.4.3 Automatisierung

Die Stufen der Automatisierung werden in der DIN EN 62290 festgelegt. Sie werden in die Kategorien GoA (Grade of Automation) 0 bis 4 unterteilt. Selbige geben an, welche Funktionen des Fahrbetriebes das System übernimmt. Die Tabelle 2.4 zeigt die Einteilung der Automatisierung anhand von DIN EN 62290. [9]

Tabelle 2.4: Automatisierungsgrade nach EN 62290-1 [17, S.592]

GoA	Merkmale
GoA 0	Fahren auf Sicht – Straßenbahnen
GoA 1	Nicht automatischer Betrieb (NTO) Fahren auf ortsfeste Signale mit punktförmiger Zugbeeinflussung
GoA 2	Halbautomatischer Fahrbetrieb (STO) Fahren mit kontinuierlicher Geschwindigkeitsüberwachung
GoA 3	Fahrerloser Betrieb (DTO) Fahrerloses Fahren – Begleiter im Zug
GoA 4	Unbegleiteter Fahrbetrieb (UTO) Fahrer- und begleiterloser Fahrbetrieb

In Riad werden die Strecken mit GoA 4 betrieben. Somit sind keine Fahrer oder Begleitpersonen an Bord und das System übernimmt sämtliche Aufgaben des regulären Betriebes selbstständig. [38]

2.4.4 Gleisinfrastruktur

Für die Bahnenergieversorgung wird ein dezentraler Ansatz verfolgt. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass die Strecke in Abschnitte unterteilt wird, welche physikalisch von einander getrennt sind. Diese werden je von einem eigenen Unterwerk mit Strom versorgt. Dies soll die Last gleichmäßig verteilen. Zusätzlich hat es den Vorteil, dass bei einem Zwischenfall nur der betroffene Abschnitt stillgelegt werden muss. Nachteiliger Effekt bei diesem Verfahren ist, dass zwei Stromkreise nicht durch eine Überbrückung kurzgeschlossen werden dürfen. Hieraus ergibt sich, dass zwischen den Abschnitten eine ausreichend große stromlose Lücke

existieren muss. Sie muss klein genug sein, um von einem Zug überwunden werden zu können und groß genug, um keine Überbrückung zu verursachen. In Riad ist der benötigte Wert einer stromlosen Lücke betreffend bei 11 m bis 19 m. Dies entspricht der Länge eines Waggons plus einem Sicherheitszuschlag. [10, S.396,451]

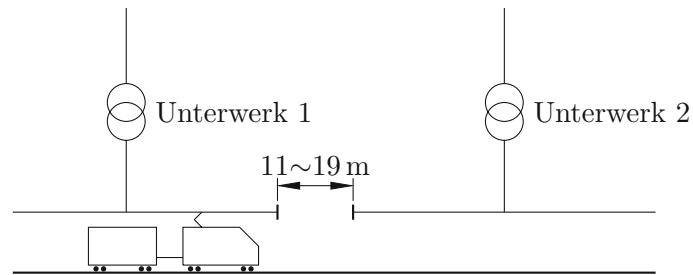


Abbildung 2.19: Dezentrale Bahnenergieversorgung [10, S.396]

In Abbildung 2.19 ist eine dezentrale Bahnenergieversorgung schematisch skizziert.

2.4.5 Problematik bei Stromausfall

Im Falle eines Stromausfalls ist nicht nur der Zug stromlos, auch die Kommunikation zu der zentralen Leitstelle ist unterbrochen. Daraus ergeben sich zwei schwerwiegende Probleme.

Zugposition Die genauen Zugpositionen sind dem System nicht bekannt. Die Züge wissen nicht wo die anderen Züge sich befinden.

Betroffene Streckenabschnitte Bei einem Stromausfall muss nicht das gesamte System davon betroffen sein. Es kann vorkommen das nur ein Abschnitt ohne Strom ist. Dabei muss beachtet werden, dass kein Zug aus einem Bereich mit Strom in einen Bereich ohne Strom einfahren darf, da nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann wo sich die Züge aufhalten. Eine weitere Problematik ist die Evakuierung der Fahrgäste über die Gleisanlage. Diese darf nur durchgeführt werden, wenn sichergestellt ist, dass kein Strom durch die Stromschiene fließt. Muss nun ein Fahrzeug, auf einem Streckenabschnitt ohne Strom evakuiert werden, stellen Abschnitte mit Strom eine potenzielle Gefahr dar.

KAPITEL 3

Bestehende PV-Anlagen

Der Markt bietet eine Vielzahl an verschiedenen Photovoltaik Modulen diverser Hersteller. Die Paneele unterscheiden sich dabei in den Abmessungen, der verwendeten Technologie und dem Preis. Eine Auswahl zu treffen, welche die geeignete PV-Anlage für dieses Projekt ist, gestaltet sich daher schwierig. Somit werden nach einer Recherche über die zur Verfügung stehenden Technologien diese nach dem Verfahren der Nutzwertanalyse verglichen. Anschließend wird eine Auswahl getroffen. Somit kann sichergestellt werden, dass die Auswahl nach objektiven Kriterien erfolgt und keine essentiellen Aspekte vergessen werden.

3.1 Beschreibung bestehender PV-Komponenten

Um eine Auswahl treffen zu können, die sich nachfolgend als sinnvoll erweist, müssen erst die zur Verfügung stehenden möglichen PV-Anlagen recherchiert werden. Da es sich um eine Machbarkeitsstudie für ein sich im Bau befindendes Projekt handelt, dürfen nur Technologien berücksichtigt werden, die schon am Markt und in großen Quantitäten verfügbar sind. Sowohl Quaschnig[33] in seinem Buch „Regenerative Energiesysteme“ als auch Watter[47] in seinem Buch mit gleichnamigem Titel listen die verschiedenen Technologien auf.[33, S.25][47, S.209] Für das Auswahlverfahren werden die fünf Technologien mit dem besten Wirkungsgrad herangezogen. Diese sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Übersicht Technologien und ihrer Wirkungsgrade[33, S.25][47, S.209]

Technologie		Wirkungsgrad
Kürzel	Langform	[%]
Mono-Si	Monokristallines Silizium	21,5
Poly-Si	Polykristallines Silizium	16,3
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer	19,4
CdTe	Cadmiumtellurid	13,2
CIGS	Copper-indium-gallium-selenide	14,5

3.2 Nutzwertanalyse

Am Anfang einer Beurteilung steht eine Vielzahl an Produkten, in diesem Fall PV-Anlagen. Sie werden im weiteren Lösungsvarianten genannt. Jede Lösungsvariante hat spezifische technische Daten und dadurch gewisse Vor- und Nachteile für die Studie. Um aus allen Lösungsvarianten die Beste ausfindig zu machen wird ein Bewertungsverfahren herangezogen. [30, S.166]

Laut Pahl&Beitz gibt es zwei zu bevorzugende Methoden für eine Bewertung [30, S.166]. Die Nutzwertanalyse (NWA) und die Bewertung nach VDI-2225. Beide Methoden formulieren Kriterien, die für die Studie wichtig sind. Dies kann zum Beispiel das Gewicht oder die Abmessung sein. Alle Bewertungskriterien müssen quantifizierbar sein. Um die Lösungsvarianten anhand den Kriterien bewerten zu können, muss für jedes Bewertungskriterium ein Skala festgelegt werden. Die Skala reicht von unbrauchbar bis ideal. Bei der NWA erstreckt sich die Skala in einem Wertebereich von 0 bis 10 Punkten und bei der VDI-2225 von 0 bis 4 Punkten. Zusätzlich kann man bei der NWA die Bewertungskriterien gewichten, um eine Differenzierung dieser zu ermöglichen. Aufgrund der feineren Unterteilung und der Gewichtung, ist die NWA für eine genauere Beurteilung besser geeignet. Die VDI-2225 wird vor allem dann eingesetzt, wenn nur ungenaue Informationen über die Eigenschaften der Lösungen bekannt sind. [30, S.170ff]

Für die Auswahl der PV-Anlage wird hier die NWA verwendet, da alle nötigen Eigenschaften der Varianten bekannt sind und somit ein differenziertes Ergebnis zu erwarten ist.

3.2.1 Bewertungskriterien auswählen

Wesentlich für den Erfolg einer NWA ist die Festlegung der zu bewertenden Kriterien. Sie spiegeln die Anforderungen an die ideale Lösung wieder. Nicht alle (technischen) Eigenschaften sind wichtig für die Erfüllung der Anforderungen. Sind die Lösungsvarianten einander sehr ähnlich, gibt es verschiedene Merkmale, die nicht unterscheidbar sind. Somit ist es auch nicht nötig, diese Merkmale als Kriterien für die NWA heranzuziehen. Es gibt drei Voraussetzungen, die möglichst erfüllt werden sollen, um eine Ideallösung zu finden. [30, S.167]

- Die Kriterien sollten die Zielvorstellungen für eine Lösung weitestgehend abdecken, damit keine entscheidungsrelevanten Anforderungen oder allgemeine Bedingungen unbeachtet bleiben.
- Alle Kriterien sollten unabhängig voneinander sein.
- Wenn möglich sind Kriterien für die Lösung quantitativ zu erfassen [30, S.167].

Nun werden alle in Frage kommende Eigenschaften zusammengetragen, welche eine PV-Anlage beschreiben. Hierbei gibt es offensichtliche Größen wie Leistung und Wirkungsgrad und weniger auffällige wie Gewicht oder der Temperaturkoeffizient (siehe Kapitel 3.2.2 Abschnitt Temperaturkoeffizient). In Tabelle (3.2) ist eine Auswahl an Eigenschaftsgrößen aufgeführt. Zusätzlich sind die Größen gekennzeichnet, die nach reiflicher Überlegung für die NWA herangezogen werden.

Tabelle 3.2: Eigenschaften einer PV Anlage

Eigenschaften	ausgewählt
Wirkungsgrad	+
Leistung	
Temperaturkoeffizient	+
Leistungsdegression	+
Gewicht	+
Reinigungsmittel resistent	
Umgebungstemperatur max	
Umgebungstemperatur min	

Wie in Tabelle 3.2 zu erkennen ist, sind vier Eigenschaftsgrößen ausgewählt worden. Der Wirkungsgrad gibt an, wie viel der zur Verfügung stehenden Energie umgewandelt werden kann. Die abgegebene Leistung ist abhängig von den Abmessungen der PV-Anlage und dem Wirkungsgrad, durch die Abhängigkeit der Leistung vom Wirkungsgrad wird nur letzteres als Eigenschaft herangezogen. Da die Dachfläche eines Zuges beschränkt ist, sollte der Wirkungsgrad einen hohen Wert aufweisen. Der Temperaturkoeffizient gibt an, um wie viel Prozent die Leistung fällt, bezogen auf Paneeltemperaturen, die über der in der Standard Test Condition (STC)² angegebenen Temperatur liegen. Dies ist relevant, da am Einsatzort im Sommer durchgehend Temperaturen über 30 °C herrschen und dadurch auch die Modultemperatur über der STC-Temperatur sein wird. Die Leistungsdegression gibt Auskunft darüber, in welchem Maße die Solarzellen altern und um wie viel Prozent sich ihre Leistung verringert. Da Schienenfahrzeuge eine Lebensdauer von 25-40 Jahre haben, ist dies kein unwesentlicher Faktor. Im Schienenfahrzeugbau spielt der Leichtbau eine Große Rolle. Jede Komponente die in einem Zug eingebaut wird, soll so wenig wie möglich wiegen. Damit spielt Gewicht eine wichtige Rolle als Kriterium. Die Metro-Fahrzeuge werden regelmäßig in Waschstraßen gereinigt. Daher ist es notwendig, dass die PV-Anlage auch resistent gegen Reinigungsmittel und Waschbürsten ist. Dies hängt mehr von der Einfassung ab, welche entweder gewählt werden kann oder speziell vom Hersteller für ein Einsatzgebiet angepasst wird. Die Betriebstemperatur wurde als Kriterium ausgeschlossen, da alle PV-Anlagen für die selben Bedingungen ausgelegt sind. Damit ist keine Unterscheidung anhand dieses Kriteriums möglich.

3.2.2 Bewertungskriterien beurteilen

Für die NWA werden nun alle Kriterien bewertet und bekommen eine Wert zwischen 0 und 10 Punkten. Wobei 0 für das schlechteste und 10 für das beste Ergebnis steht. Die Tabelle 3.3 zeigt wie die Punkte vergeben werden sollen. [30, S.172]

² Strahlung: 1000 W/m², AM1.5G, Paneel Temperatur: 25 °C [49, S.80]

Tabelle 3.3: Wertskala für die Nutzwertanalyse und VDI 2225 nach Pahl&Peitz [30, S.172]

Wertskala			
Nutzwertanalyse		Richtlinie VDI 2225	
Punkte	Bedeutung	Punkte	Bedeutung
0	absolut unbrauchbare Lösung	0	unbefriedigend
1	sehr mangelhafte Lösung		
2	schwache Lösung	1	gerade noch tragbar
3	tragbare Lösung		
4	ausreichende Lösung	2	ausreichend
5	befriedigende Lösung		
6	gute Lösung mit geringen Mängeln	3	gut
7	gute Lösung		
8	sehr gute Lösung		
9	über die Zielvorstellung hinausgehende Lösung	4	sehr gut (ideal)
10	Ideallösung		

Zum Aufstellen der Werteskala nach Tabelle 3.3 werden von allen PV-Anlagen entweder die besten Werte, oder ein theoretisch erreichbarer Wert als Ideallösung angenommen. Um die Bewertung einfach und nachvollziehbar zu gestalten, ist die Verteilung zwischen dem besten und dem schlechtesten Wert linear. Somit gibt es entweder eine Lineare Wachstumsfunktion oder eine Lineare Straffunktion. [30, S.173]

In Abbildung 3.1 sind alle vier ausgewählten Eigenschaftsgrößen mit der Verteilung und der dazugehörigen Funktionsgeraden abgebildet.

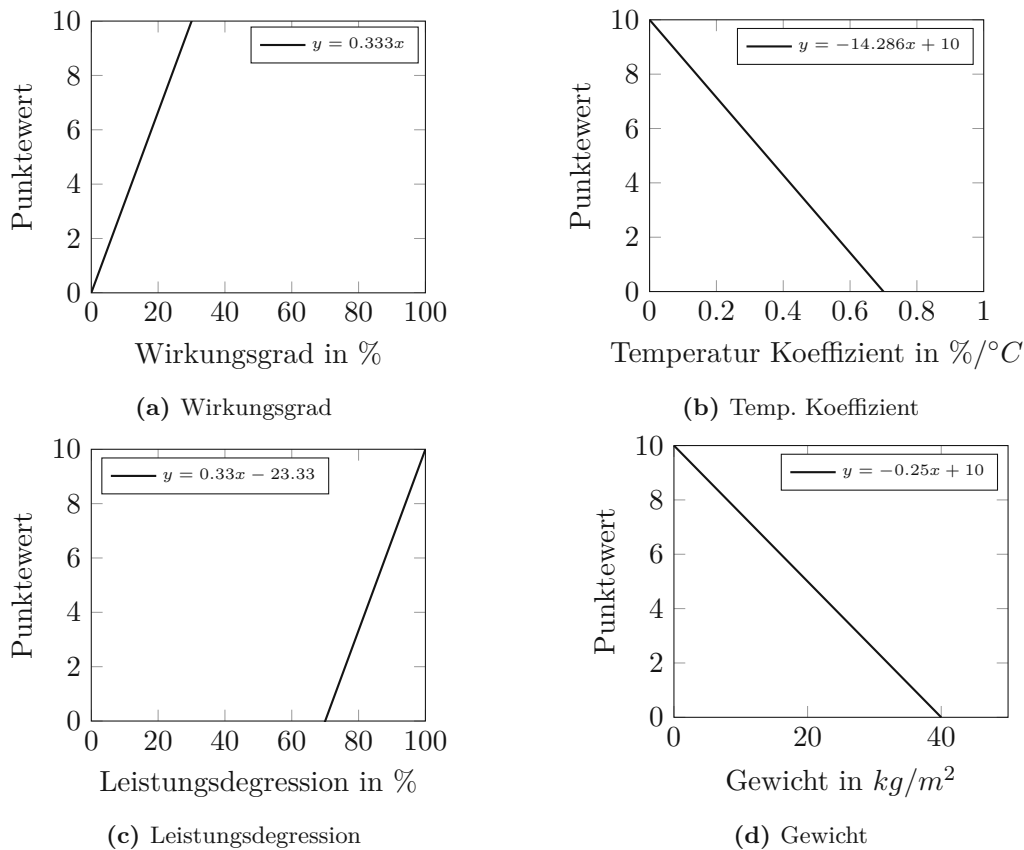


Abbildung 3.1: Punktebewertung aller Bewertungskriterien

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad wird in % angegeben und liegt bei den meisten Technologien zwischen 14 % und 22 % (siehe Tabelle 3.1). Diese Wirkungsgrade sind bezogen auf das derzeit technisch Mögliche und unterscheiden sich nur geringfügig. Die Ideallösung mit zehn Punkten wird mit 35 % angenommen da laut Literatur (vergleiche [49, S.39]) ein theoretisches Maximum des Wirkungsgrades bei 33 % liegt. Somit ist eine Steigerung des Wirkungsgrades noch möglich. Null ist hier mit 0 % als absolut unbrauchbare Lösung angenommen. Die Abbildung 3.1(a) stellt die Verteilung dar und gibt die Funktionsgleichung an.

Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient wird in $\%/^{\circ}\text{C}$ angegeben und beschreibt den prozentuellen Abfall der Leistung mit steigender Paneeltemperatur, ausgehend von der STC [49, S.80]. Ideal wäre es, wenn keine Abhängigkeit der Leistung von der Temperatur bestehen würde. Somit wird $0\%/^{\circ}\text{C}$ mit 10 Punkten auf der Skala belegt. Der schlechteste Wert von den ausgewählten PV-Modulen ist bei $0,45\%/^{\circ}\text{C}$, daher werden bei $0,7\%/^{\circ}\text{C}$ Null Punkte angenommen. Die Funktion stellt daher eine Lineare Straffunktion dar. Die Abbildung 3.1(b) zeigt die Verteilung und gibt die Funktionsgleichung an.

Leistungsdegression

Die Funktion für die Leistungsdegression ist eine monoton steigende Funktion (Abbildung 3.1(c)). Diese gibt an, wie viel Prozent der Nennleistung das PV-Modul nach 25 Jahren erbringt. Diese Zeitspanne wird gewählt, weil eine Mehrheit der Hersteller über diesen Zeitraum die Leistungsdegression angeben. Die Ideallösung ist, wenn keine Leistungseinbußen entstehen würde. Ab einem Wert von kleiner gleich 70 % kann die Lösung als unbrauchbar bezeichnet werden.

Gewicht

Das Gewicht spielt im Schienenfahrzeugbau eine wesentliche Rolle. Es wird versucht, die Achslasten so gering wie möglich zu halten. Des Weiteren soll möglichst viel Gewichtsanteil auf die beförderten Passagiere entfallen, um die Beförderungskapazität hoch zu halten. Das Gewicht der PV-Anlagen wird auf den Quadratmeter normiert, damit ein Vergleich zwischen den Paneelen möglich ist. Somit hat die Ideallösung ein Gewicht von 0 kg/m^2 . Da dies in der Realität nicht möglich ist, stellt es ein theoretisches Minimum dar und bekommt den Wert von 10 Punkten zugeteilt. Alle zu prüfenden Produkte haben ein Gewicht zwischen 1 kg/m^2 und 25 kg/m^2 . Somit wird das Maximum an Gewicht mit 40 kg/m^2 angenommen. Das entspricht dem Wert von 0 Punkten auf der Werteskala. Die Funktion, die die Verteilung des Gewichtes wiedergibt, ist monoton linear fallend (Abbildung 3.1(d)).

3.2.3 Bewertungskriterien gewichten

Nachdem allen Bewertungskriterien ein Punktwert zugeordnet wurde, werden sie gewichtet. Nicht alle sind gleich relevant, daher sollen sie in der NWA unterschiedlich gewichtet werden.

Es gibt verschiedene Methoden, eine solche Gewichtung durchzuführen. Eine dieser Methoden ist der Paarweise Vergleich. Dieser ist so konzipiert, dass man die Bewertungskriterien direkt miteinander vergleicht. Der Vorteil dabei ist, dass man sich nur entscheiden muss ob Bewertungskriterium A_1 wichtiger als A_2 ist. Es ist zeitgleich kein Vergleich zu allen anderen Kriterien nötig. Damit behält man den Überblick bei der Bewertung und muss sich nicht immer aller Kriterien entsinnen. [20, S.10][29, S.388f]

Die Bewertung erfolgt, indem man alle Bewertungskriterien ($A_1 \dots A_n$) in eine Kreuztabelle einträgt. Dies ist in Tabelle 3.4 dargestellt. Die Diagonalelemente werden ausgegraut, da ein Vergleich eines Kriteriums mit sich selbst nicht zielführend ist. Nun wird das erste Kriterium (A_1) mit dem Zweiten (A_2) verglichen. Dabei gibt es drei Möglichkeiten: [20, S.10 und 14]

- A_1 wichtiger als $A_2 \rightarrow 1$
- A_1 weniger wichtig als $A_2 \rightarrow 0$
- A_1 gleich wichtig wie $A_2 \rightarrow 0,5$

Wurde entschieden, ob das Kriterium wichtiger, weniger wichtig oder gleich wichtig ist, kann der Wert um die Diagonale gespiegelt werden und automatisch der dazugehörige Wert eingetragen werden. Nun wird A_1 weiter mit den restlichen Kriterien bis hin zu A_n verglichen. Dann folgt A_2 verglichen mit A_3 bis A_n . Diesem Schema wird Folge geleistet bis die gesamte Tabelle voll besetzt ist [29, S.388f]. Die Tabelle 3.4 zeigt den Paarweisen

Vergleich exemplarisch dargestellt.

Tabelle 3.4: Paarweiser Vergleich[20, S.14][29, S.388f]

	A_1	A_2	A_3	\dots	A_n
A_1		1	0	\dots	0,5
A_2	0				
A_3	1				
\vdots	\vdots				
A_n	0,5				

Nachdem die Tabelle ausgefüllt wurde, kann die jeweilige Gewichtung der Bewertungskriterien errechnet werden. Dazu werden die Punkte für jedes Kriterium horizontal aufsummiert. Nun werden die entstandenen Summen zu einer Gesamtsumme addiert. Für die Gewichtung wird die Summe der Bewertungskriterien durch die gesamte Summe dividiert. Das Ergebnis ist eine Prozentzahl, die über alle Bewertungskriterien addiert 100 % ergeben muss. [29, S.388f]

Die Tabelle 3.5 stellt den Paarweisen Vergleich für die in Tabelle 3.2 aufgeführten Bewertungskriterien dar. Dabei ist auffällig, dass das Kriterium Leistungsdegression im Vergleich zu den anderen Kriterien unwichtiger ist. Somit bekommt es keine Punkte und daraus folgt eine Gewichtung von 0 %, sprich es hat keinerlei Auswirkungen in der NWA.

Tabelle 3.5: Paarweiser Vergleich der Wertungskriterien für die NWA

	Wirkungsgrad	Temperatur Koeffizient	Gewicht	Leistungsdegression	Summe $\sum = 6$	Gewichtung
Wirkungsgrad		1	0	1	2	0,33
Temperatur Koeffizient	0		0	1	1	0,17
Gewicht	1	1		1	3	0,5
Leistungsdegression	0	0	0		0	0

3.2.4 Technische Wertigkeit (TW)

Die technische Wertigkeit gibt Auskunft darüber, wie gut die verschiedenen Lösungsvarianten (PV-Anlagen) in ihren technischen Ausführungen bezogen auf die gestellten Kriterien abschneiden. Dazu werden die Ergebnisse aus Kapitel 3.2.2 und 3.2.3 herangezogen und eine Tabelle wird erstellt. [30, S.174ff]

Nutzwertanalyse Bewertungskriterien																			
Kriterium	Gewichtung		Eigenschaft	Sunpower (1)			SolarWorld (2)			Sanyo (3)			Panasonic (4)						
	Punkteskala [w]			Techn. Bewertung [Wg_1]	0,66	Techn. Bewertung [Wg_2]	0,63	Techn. Bewertung [Wg_3]	0,67	Techn. Bewertung [Wg_4]	0,64								
	min	max	Gewicht [g_i]	Einheit	Eigenschaftsgröße [e_i1]	Wert [w_i1]	Gew. Wert [wg_i1]	Eigenschaftsgröße [e_i2]	Wert [w_i2]	Gew. Wert [wg_i2]	Eigenschaftsgröße [e_i3]	Wert [w_i3]	Gew. Wert [wg_i3]	Eigenschaftsgröße [e_i4]	Wert [w_i4]	Gew. Wert [wg_i4]			
Wirkungsgrad	0	10	0,33	%	20,06	6,69	2,21	17,56	5,85	1,93	18,65	6,22	2,05	16,75	5,58	1,84			
Temperatur Koeffizient			0,17	%/°C	-0,38	4,57	0,78	-0,41	4,14	0,70	-0,30	5,71	0,97	-0,29	5,86	1,00			
Leistungsdegression			0,00	%	91,80	7,24	0,00	91,30	7,07	0,00	84,00	4,64	0,00	84,00	4,64	0,00			
Masse			0,50	kg/m ²	11,41	7,15	3,57	10,74	7,32	3,66	10,79	7,30	3,65	11,69	7,08	3,54			
				Nutzwert [Gwg_1]	6,56			Nutzwert [Gwg_2]	6,29			Nutzwert [Gwg_3]	6,67			Nutzwert [Gwg_4]	6,38		
Kriterium	Gewichtung		Eigenschaft	Manz (5)			Solar Frontier (6)			First Solar (7)			Wattstunde (8)						
	Punkteskala [w]			Techn. Bewertung [Wg_5]	0,43	Techn. Bewertung [Wg_6]	0,54	Techn. Bewertung [Wg_7]	0,56	Techn. Bewertung [Wg_8]	0,77								
	min	max	Gewicht [g_i]	Einheit	Eigenschaftsgröße [e_i5]	Wert [w_i5]	Gew. Wert [wg_i5]	Eigenschaftsgröße [e_i6]	Wert [w_i6]	Gew. Wert [wg_i6]	Eigenschaftsgröße [e_i7]	Wert [w_i7]	Gew. Wert [wg_i7]	Eigenschaftsgröße [e_i8]	Wert [w_i8]	Gew. Wert [wg_i8]			
Wirkungsgrad	0	10	0,33	%	12,50	4,17	1,37	13,80	4,60	1,52	16,32	5,44	1,80	20,00	6,67	2,20			
Temperatur Koeffizient			0,17	%/°C	-0,36	4,86	0,83	-0,31	5,57	0,95	-0,34	5,14	0,87	-0,38	4,57	0,78			
Leistungsdegression			0,00	%	-	0,00	0,00	-	0,00	0,00	88,90	6,27	0,00	-	0,00	0,00			
Masse			0,50	kg/m ²	23,26	4,18	2,09	16,26	5,93	2,97	16,67	5,83	2,92	2,38	9,40	4,70			
				Nutzwert [Gwg_5]	4,29			Nutzwert [Gwg_6]	5,43			Nutzwert [Gwg_7]	5,59			Nutzwert [Gwg_8]	7,68		
Kriterium	Gewichtung		Eigenschaft	Hörmann Solyid (9)			Hörmann PK (10)			Global Solar (11)			Solarion (12)						
	Punkteskala [w]			Techn. Bewertung [Wg_9]	0,78	Techn. Bewertung [Wg_10]	0,57	Techn. Bewertung [Wg_11]	0,59	Techn. Bewertung [Wg_12]	0,66								
	min	max	Gewicht [g_i]	Einheit	Eigenschaftsgröße [e_i9]	Wert [w_i9]	Gew. Wert [wg_i9]	Eigenschaftsgröße [e_i10]	Wert [w_i10]	Gew. Wert [wg_i10]	Eigenschaftsgröße [e_i11]	Wert [w_i11]	Gew. Wert [wg_i11]	Eigenschaftsgröße [e_i12]	Wert [w_i12]	Gew. Wert [wg_i12]			
Wirkungsgrad	0	10	0,33	%	20,07	6,69	2,21	15,47	5,16	1,70	12,60	4,20	1,39	10,89	3,63	1,20			
Temperatur Koeffizient			0,17	%/°C	-0,38	4,57	0,78	-0,44	3,71	0,63	-0,43	3,86	0,66	-0,45	3,57	0,61			
Leistungsdegression			0,00	%	-	0,00	0,00	90,00	6,64	0,00	84,00	4,64	0,00	-	0,00	0,00			
Masse			0,50	kg/m ²	1,70	9,58	4,79	13,00	6,75	3,38	9,30	7,68	3,84	1,40	9,65	4,83			
				Nutzwert [Gwg_9]	7,77			Nutzwert [Gwg_10]	5,71			Nutzwert [Gwg_11]	5,88			Nutzwert [Gwg_12]	6,63		
Kriterium	Gewichtung		Eigenschaft	Mprime (13)			Solbianflex SP (14)			Solbianflex SXp (15)									
	Punkteskala [w]			Techn. Bewertung [Wg_13]	0,50	Techn. Bewertung [Wg_14]	0,74	Techn. Bewertung [Wg_15]	0,69										
	min	max	Gewicht [g_i]	Einheit	Eigenschaftsgröße [e_i13]	Wert [w_i13]	Gew. Wert [wg_i13]	Eigenschaftsgröße [e_i14]	Wert [w_i14]	Gew. Wert [wg_i14]	Eigenschaftsgröße [e_i15]	Wert [w_i15]	Gew. Wert [wg_i15]						
Wirkungsgrad	0	10	0,33	%	17,10	5,70	1,88	16,79	5,60	1,85	13,94	4,65	1,53						
Temperatur Koeffizient			0,17	%/°C	-0,45	3,57	0,61	-0,38	4,57	0,78	-0,44	3,71	0,63						
Leistungsdegression			0,00	%	87,90	5,94	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	0,00						
Masse			0,50	kg/m ²	20,00	5,00	2,50	1,70	9,58	4,79	2,40	9,40	4,70						
				Nutzwert [Gwg_13]	4,99			Nutzwert [Gwg_14]	7,41			Nutzwert [Gwg_15]	6,86						

Tabelle 3.6: Tabelle für die Technische Bewertung

Weiters werden Solarmodule ausgewählt, die untersucht werden sollen. Dazu wird für diese Studie pro Technologie in Tabelle 3.1 mindestens ein Exemplar ausgesucht. Diese sind am Markt verfügbar und weisen für die verwendete Technologie einen überdurchschnittlich hohen Wirkungsgrad auf. [30, S.174ff]

Für die technische Bewertung (Wg_i) wird zuerst für jede Lösungsvariante und jedes Kriterium ein Wert (w_i) nach den Geradengleichungen in Abbildung 3.1 errechnet. Mittels der Gewichtung (g_i) wird aus Tabelle 3.5 der gewichtete Wert (wg_i) ermittelt. Nun kann durch Addition aller gewichteten Werte mit Gleichung 3.1 der Nutzwert für jede Lösungsvariante angegeben werden. [30, S.174ff]

$$Gwg_i = \sum_{m=1}^n wg_{im} \quad (3.1)$$

Dieser Wert gibt einen relativen Vergleich der Lösungsvarianten untereinander an. Mithilfe der Formel 3.2 wird eine absolute Wertigkeit der Lösungsvariante angegeben. Dazu wird der Nutzwert auf den Idealwert bezogen. Der Idealwert stellt den maximal möglichen Wert dar und liegt bei dieser Nutzwertanalyse bei 10 Punkten. [30, S.174ff]

$$Wg_i = \frac{Gwg_i}{w_{\max} \cdot \sum_{i=1}^n g_i} \quad (3.2)$$

Die technische Bewertung ist optimal wenn sie den Wert 1 (=100 %) erreicht. Nun kann aus der Tabelle 3.6 die technische Bewertung abgelesen werden. Sie gibt an, wie gut die PV-Module in technischer Hinsicht verglichen mit der Ideallösung abschneiden.

Von den Fünfzehn untersuchten Paneelen schneidet das des Herstellers Hörmann Solyid 78 % am besten ab.

3.2.5 Wirtschaftliche Wertigkeit (WW)

Die technische Wertigkeit trifft nur bedingt eine Aussage bezüglich der Verwendbarkeit der PV-Module für diese Studie. Um eine höherwertige Aussagekraft zu erhalten muss zusätzlich eine wirtschaftliche Betrachtung hinzugezogen werden. Dafür werden die Kosten für verschiedene Lösungen herangezogen. Da jedes Modul eine andere Größe hat, somit

eine andere nutzbare Fläche sowie die daraus folgende unterschiedliche Leistung, kann man die Kosten nicht direkt miteinander vergleichen. Daher werden die Kosten über die Leistung normiert und in €/W angegeben.

Gleich wie in Kapitel 3.2.2 wird die Wirtschaftliche Wertigkeit berechnet. Dabei werden für jedes Paneel 0-10 Punkten vergeben. Die Funktionsgleichung wird ebenfalls linear angenommen. Als Referenz wurde die teuerste Variante mit 10€/W herangezogen und bekommt 0 Punkte. Die höchste Punktzahl ist erreicht, wenn keine Kosten entstehen. Daraus folgen die Funktionsgerade und die Funktionsgleichung ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

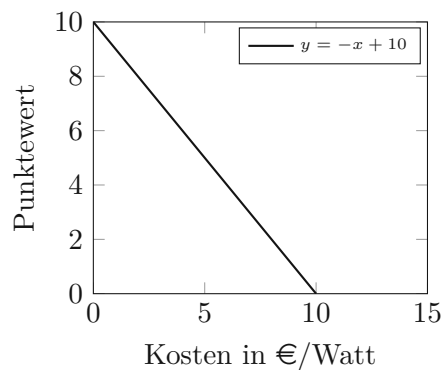


Abbildung 3.2: Punktbewertung für die Kosten

Gleich wie bei der technischen Bewertung wird bei der wirtschaftlichen Wertigkeit anhand der Funktionsgleichung der Wert (w) jeder Lösungsvariante ermittelt. Da diesmal nur ein Kriterium bewertet wird, kann die Gewichtung ausgelassen werden. [30, S.176]

$$W_W = \frac{w}{\text{Idealwert}} \quad (3.3)$$

Die wirtschaftliche Wertigkeit ist nun der Wert bezogen auf den Idealwert von 10 Punkten (Gleichung 3.3).

Tabelle 3.7: Wirtschaftliche Wertigkeit der Lösungsvarianten

Lösungsvariante	$\frac{\text{€}}{\text{Watt}}$	Wert (w)	wirtschaftliche Wertigkeit (W_W)
1 Sunpower	4,89	5,11	0,51
2 Solar World	0,95	9,05	0,91
3 Sanyo	1,57	8,43	0,84
4 Panasonic	1,26	8,74	0,87
5 Manz	–	–	–
6 Solar Frontier	–	–	–
7 First Solar	–	–	–
8 Watt Stunde	2,5	7,5	0,75
9 Hörmann Solyid	7,48	2,52	0,25
10 Hörmann PK	–	–	–
11 Global Solar	–	–	–
12 Solarion	–	–	–
13 Mprime	–	–	–
14 Solbianflex SP	10	0	0
15 Solbianflex SXp	6,21	3,79	0,69

Die Tabelle 3.7 enthält die wirtschaftliche Wertigkeit für die Lösungsvarianten. Nicht für jede Lösungsvariante konnte ein Preis in Erfahrung gebracht werden.

Bei der Wirtschaftlichen Wertigkeit schneidet das Paneel vom Hersteller Solar World mit 91 % am besten ab.

3.3 Ergebnis der Nutzwertanalyse

Stellt man für jedes PV-Modul die wirtschaftliche und technische Wertigkeit in einem Diagramm dar, kann abgelesen werden, welches Modul für diese Studie am besten geeignet ist. Ein Modul ist umso besser, je näher es am Punkt (1,1) und je näher es an der Funktionsgerade $y = x$ liegt. Die Funktionsgerade $y = x$ bezeichnet die optimale Beziehung zwischen technischer und wirtschaftlicher Bewertung. Da aus dem Diagramm allein oft nicht eindeutig hervorgeht welche Lösung die bessere Wahl darstellt, werden nun zwei Beurteilungsverfahren vorgestellt und miteinander verglichen.

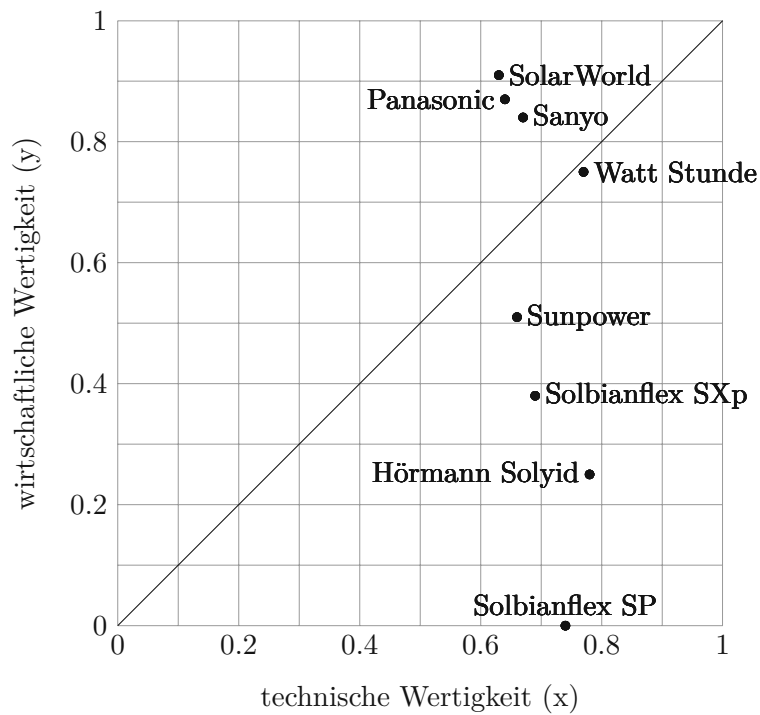
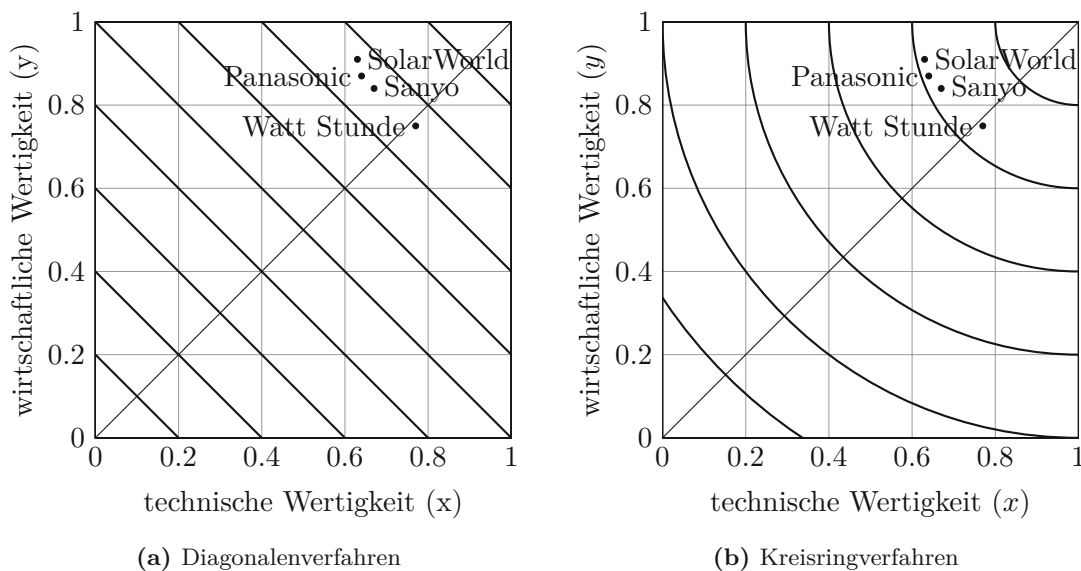


Abbildung 3.3: Auswertungsdiagramm NWA

Im Diagramm 3.3 sieht man die Lösungsvarianten, bei welchen es möglich war, eine technische- und wirtschaftliche Wertigkeit zu berechnen. Von den besten zehn techni-



(a) Diagonalenverfahren

(b) Kreisringverfahren

Abbildung 3.4: Bewertungsverfahren für die Nutzwertanalyse

schen Lösungsvarianten, konnte von acht ein Verkaufspreis recherchiert werden. Bei den verbleibenden zwei Varianten war weder ein Preis öffentlich ersichtlich, noch wollten die Unternehmen auf Anfrage Auskunft darüber geben. Diese Varianten sind Solarion (Platz 5) und Global Solar (Platz 10). Daher konnten diese im Diagramm 3.3 nicht eingetragen werden.

Im Nachfolgenden werden nur die besten vier Lösungsvarianten weiter betrachtet. Diese sind Solar World, Panasonic, Sanyo und Watt Stunde. Sie liegen so nahe beieinander, dass eine weiterführende Beurteilung notwendig ist. Die restlichen Varianten können nach Betrachtung des Diagramms 3.3 verworfen werden.

3.3.1 Beurteilung nach Diagonalen

Bei der Beurteilung nach Diagonalen werden senkrecht auf die Funktionsgerade $y = x$ Linien eingezeichnet. Dies ist in Abbildung 3.4(a) verdeutlicht. Diese Methode ist sehr simpel und kann schnell per Hand erledigt werden. Der Nachteil ist, dass sie nicht berücksichtigt, wie weit die Module von der Funktionsgerade $y = x$ entfernt sind.

Die Gesamtwertigkeit (S) ist umso besser, je höher der Wert in Gleichung 3.4 ist. Wobei die technische Wertigkeit x entspricht und die wirtschaftliche Wertigkeit y [29, S.394].

$$S = \frac{x + y}{2} \quad (3.4)$$

In der Tabelle 3.8 sind die besten vier Lösungsvarianten und ihre Gesamtwertigkeit für das Diagonalenverfahren aufgelistet.

Tabelle 3.8: Wertigkeit der Besten vier Lösungsvarianten nach dem diagonalen Bewertungsverfahren.

Lösungsvariante	Wertigkeit (S)
SolarWorld	0,77
Sanyo	0,755
Panasonic	0,755
Watt Stunde	0,76

3.3.2 Beurteilung nach Kreisringen

Im Gegensatz zu dem diagonalen Verfahren, ist das Kreisringverfahren besser dazu geeignet, kleine Wertigkeitsunterschiede zu beurteilen, wenn Lösungen nahe an der Funktionsgerade $y = x$ liegen. [29, S.394f]

$$S = 1 - \sqrt{\frac{(x-1)^2 + (y-1)^2}{2}} \quad (3.5)$$

Die Gesamtwertigkeit (S) wird mit der Formel 3.5 bestimmt. In der Tabelle 3.9 sind die besten vier Lösungsvarianten sowie ihre Gesamtwertigkeiten für das Kreisringverfahren aufgelistet.

Tabelle 3.9: Wertigkeit der besten vier Lösungsvarianten nach dem Kreisringverfahren.

Lösungsvariante	Wertigkeit (S)
SolarWorld	0,73
Sanyo	0,74
Panasonic	0,729
Watt Stunde	0,76

3.3.3 Gegenüberstellung Diagonalen- und Kreisringverfahren

Bei der Gegenüberstellung beider Verfahren sieht man, dass das Diagonalenverfahren gegenüber dem Kreisringverfahren ein weniger differenziertes Ergebnis liefert. Alle Lösungsvarianten liegen beim ersten Verfahren eng beieinander und eine Entscheidung anhand der Werte ist nur schwer möglich. Beim zweiten Verfahren liegt einer der vier Werte (Watt Stunde) deutlich über den anderen. Die Differenz ist hier höher aber noch immer nicht signifikant.

Tabelle 3.10: Gegenüberstellung der Gesamtwertigkeit nach dem Diagonalen- und Kreisringverfahren.

Lösungsvariante	Wertigkeit (S)	
	Diagonale	Kreisring
SolarWorld	0,77	0,73
Sanyo	0,755	0,74
Panasonic	0,755	0,729
Watt Stunde	0,76	0,76

Weiters beschreiben die Verfahren zwei verschiedene Lösungsvarianten als beste Lösung. Hier wird das Kreisringverfahren bevorzugt, da dieses die Lösungsvariante begünstigt, welche näher an der Ideallinie liegt und somit einen ausgewogenen Wert zwischen technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit aufweist.

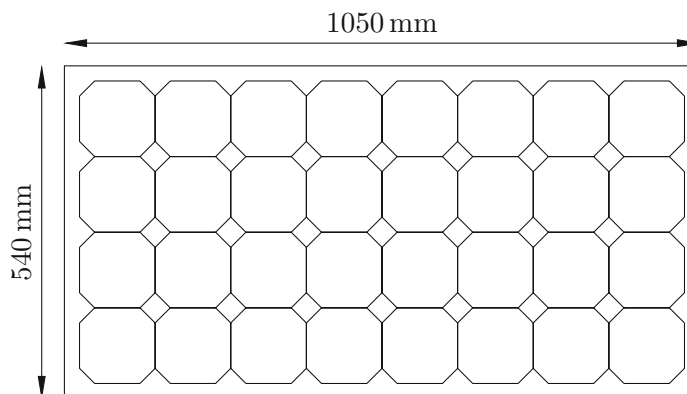
3.3.4 Das ausgewählte PV-Paneel

Das Diagonalenverfahren bietet keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lösungen. Somit wird das Kreisringverfahren für die Entscheidung herangezogen. Da die Stärken dieses Verfahrens bei der Differenzierung kleiner Wertigkeitsunterschiede liegt, ist es hier besser geeignet. Aus diesem Grund fällt die Entscheidung zugunsten der Modulen WS-100FX von Watt Stunde aus. In Tabelle 3.11 werden technischen Daten von den Paneelen veranschaulicht.

Tabelle 3.11: Technische Daten der WS-100FX Photovoltaik Module von Wattstunde [48]

Beschreibung		Wert	
Nennleistung	P_{\max}	100	W
Spannung	U_{mpp}	17,8	V
Strom	I_{mp}	5,62	A
Temperaturkoeffizient	Power $t_{P_{\text{coeff}}}$	-0,38	%/°C
Modulwirkungsgrad		20	%
Zellenzahl		32	
Gewicht		1,35	kg/Paneel
Abmessungen		1050 mm × 540 mm × 3 mm	

Diese Paneele sind am neuesten Stand der Technik für Serienprodukte und bieten einen hohen Wirkungsgrad von 20 %. Dies wird unter anderem durch monokristalline Module und eine rückseitige Kontaktstruktur ermöglicht. Dieses Modul kann flexibel über seine gesamte Breite um einen Winkel von 30° gebogen werden. In [Abbildung 3.5](#) sind die Abmessungen eines Paneels mit 32 Modulen dargestellt.

**Abbildung 3.5:** Hauptabmessungen und Anordnung der 32 Module des Photovoltaikpaneels WS-100FX von Watt Stunde[48]

KAPITEL 4

Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

In diesem Kapitel werden alle Anforderungen zusammengetragen und beschrieben. Mit diesen Anforderungen wird in den nachfolgenden Kapiteln konzipiert und entworfen. Je früher die Anforderungen in der Produktplanung feststehen und je genauer diese sind, umso mehr Arbeit erspart man sich später im Entwicklungsprozess. Es fallen dadurch aufwändige Überarbeitungen aus und man muss vieles nicht mehrfach bearbeiten. Infolgedessen können Kosten für die Produktplanung gespart werden. [30, S.213]

Des Weiteren wird in diesem Kapitel näher auf Umstände eingegangen, die die Aufgabenstellung präzisieren.

4.1 Erstellen der Anforderungsliste

Die Anforderungsliste ist ein zentrales Instrument des Produktentwicklungsprozesses. [30, S.214] Sie beinhaltet wichtige Informationen und erleichtert das interdisziplinäre Arbeiten. Es mag anfangs schwierig erscheinen, gewisse Werte anzunehmen. Aber durch Einschränkungen, denen ein Produkt meist zwangsläufig unterliegt, kann man mittels Ausschlussverfahren und überschlagsmäßigen Berechnungen viele Anforderungen beschreiben. Das Ergebnis dieser Verfahren ist eine weitgehend vollständige Anforderungsliste. Die Betonung liegt hierbei auf weitgehend, da es des öfteren vorkommt, dass sich Anforderungen im Laufe des Produktentwicklungsprozesses ändern oder neue Anforderungen hinzukommen. Diese müssen dann sogleich in der Anforderungsliste verändert oder hinzugefügt werden. Die in diesem Kapitel angeführte Anforderungsliste ist die endgültige Fassung. Letztendlich soll die Liste genaue Angaben enthalten, ohne jedoch bestimmte Lösungen, Fertigungsverfahren, Technologien oder Anwendungen vorauszusetzen. Denn diese sollen im Schritt Konzipieren gefunden werden.

4.1.1 Anforderungen von Siemens Mobility

Siemens Mobility hat für diese Studie verschiedene Anforderung an das zu konstruierende System formuliert. Diese Anforderungen werden in Wünsche und Forderungen eingeteilt und ebenfalls in die Anforderungsliste eingetragen.

Lichtraumprofil Eine wichtige Einschränkung ist, dass alle Aufbauten und Konstruktionen innerhalb des Lichtraumprofils sein müssen. Alle Änderungen an der Größe des Licht-

raumprofils würden Änderungen an den Gleis- und Bahnsteiganlagen erfordern. Bei der Konstruktion eines Zuges wird vom Betreiber der Anlage das Lichtraumprofil vorgegeben. Unter Verwendung dieser Vorgaben wird versucht, den Zug optimal an das Profil anzupassen. In diesem Fall ist der Zug bereits in der Fertigung und eine Anpassung des Wagenkastens ist nicht mehr möglich. Die Abbildung 4.1 zeigt das Lichtraumprofil im Querschnitt für einen Wagenkasten.

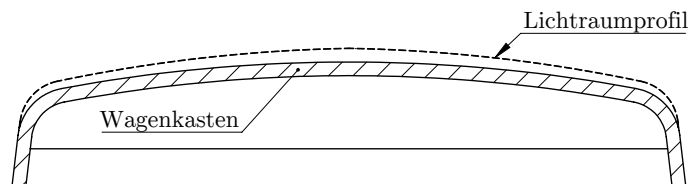


Abbildung 4.1: Kleinster Abstand zwischen Lichtraumprofil und Wagenkasten am Dach.

Gewicht Ein Metro-Fahrzeug wiegt leer mehrere Tonnen und ist dafür ausgelegt, zusätzlich hunderte Personen zu transportieren. Dabei spielt das Gewicht eine wichtige Rolle. Je größer das Eigengewicht ist, umso kleiner wird die Nutzlast eines Fahrzeuges. Die Betreiber geben eine maximale Achslast an, die nicht überschritten werden darf.

Notsysteme Die Betreiber verlangen von den Herstellern der Metro-Fahrzeuge die Aufrechterhaltung bestimmter Systemkomponenten. Dabei muss die Notbeleuchtung wie auch die Notbelüftung zwischen 30 min und 1 Stunde betrieben werden können.

Diebstahlschutz Auf Grund von Diebstählen und Vandalismus sollen die Photovoltaik-Module mit nicht normierten Verbindungen angebracht werden. Demnach soll es möglichst schwierig sein, Module ohne passendes Werkzeug abzumontieren.

Wartung Die Wartung der Module soll so simpel wie möglich gestaltet werden. Die Vorgabe besagt, dass ein defektes Modul innerhalb von drei Arbeitsstunden von einem Arbeiter ausgetauscht werden kann.

Kosten Die Kosten für die gesamte Konstruktion mit PV-Modulen, Halterungen und nötige Zusatzsysteme sollen den Rahmen von 150 000 € pro Metro-Fahrzeug nicht überschreiten.

Termin Der Endtermin für die Studie ist mit Ende 2016 veranschlagt.

4.1.2 Technische Daten des Metro-Fahrzeuges

Die Metro-Fahrzeuge in Riad sind Züge, die auf der Inspiro-Plattform basieren, welche aus dem Hause Siemens stammt. Zwei Fahrzeuge sind in Riad im Einsatz: ein Zug mit zwei und einer mit vier Waggonen. Für die weitere Betrachtung wird in dieser Studie der vierteilige Zug ausgewählt. Die zweiteilige Variante ist nicht geeignet, da sie keine frei mitlaufende Achse hat, welche essentiell für den Last-Mile-Drive ist (siehe Kapitel 4.4).

Der vierteilige Zug besitzt drei angetriebene und einen mitlaufenden Waggon und erfüllt somit die Anforderung einer freien Achse. Die Abbildung 4.2 zeigt den vierteiligen Zug aus Riad. [38]



Abbildung 4.2: Metrofahrzeug in Riad mit vier Waggons[38]

In Tabelle 4.1 sind die grundlegenden technischen Daten des Zuges aus Riad angeführt.

Tabelle 4.1: Technische Daten Fahrzeug Riad [38]

Zug Konfiguration	M-M-T-M ¹
Spurweite	1435 mm
Länge	75712mm
Breite	2740 mm
Max. Achslast	13,5 t
Zug Kapazität bei 4 Personen/m ²	522
Fahrgasttüren pro Waggon	6
Min. Kurven Radius	100 m
Max. Steigung	6 %
Max. Geschwindigkeit	80 km/h
Max. Beschleunigung	1,2 m/s
Durch. Verzögerung Betriebsbremse	1,2 m/s
Stromversorgung (DC)	750 V

Nötige Spannung Die Spannung der dritten Schiene beträgt 750 V DC. Das interne Bordnetz des Metrofahrzeugs hat aber eine Spannung von 110 V DC. Damit die generierte Leistung direkt in das Bordnetz eingespeist werden kann, soll die Arbeitsspannung aller Komponenten, nach dem Umrichten, 110 V DC betragen.

4.1.3 Anforderungen durch den Einsatz einem Metro-Fahrzeug

Metro-Fahrzeuge sind Verkehrsmittel, die Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. Auch wenn der Einsatzort Riad keine hohen Niederschlagswerte aufweist, muss die Konstruktion trotzdem Wasser- und Staubdicht sein. Auch die Integration des Systems in den Zug muss so gewählt sein, dass keinerlei Eindringen von Wasser und Staub möglich ist.

4.1.4 Anforderungsliste

Pahl und Beitz stellen die Werkzeuge zur Verfügung, um eine sinnvolle Anforderungsliste zu erstellen. Tabelle 4.2 enthält die Angaben, die mindestens in einer Anforderungsliste

¹ M...Motorcar, Angetriebener Waggon
T... Traincar, Nicht angetriebener Waggon

hinterlegt werden müssen. Damit wird ein Mindestmaß an Information sichergestellt.

Tabelle 4.2: Angaben die mindestens in einer Anforderungsliste dokumentiert werden müssen nach Pahl&Beitz [30, S.216]

Beschreibung Anforderung
Erstellungsdatum
Forderung oder Wunsch
Datum für Änderungen

In manchen Situationen kann es erforderlich sein, zusätzliche Angaben zu machen. Es kann von Nutzen sein, den Ersteller der Anforderung oder die zuständige Person anzugeben. Im Vorliegenden Fall reichen die vier Anforderungen in der obigen Liste.

Zusätzlich wird die Anforderungsliste in Unterkategorien unterteilt. Diese dienen der Übersicht und der thematischen Einteilung der Anforderungen. In der Tabelle 4.3 sind die Kategorien aufgelistet.

Tabelle 4.3: Kategorien zum Einteilen der Anforderungsliste nach Pahl und Beitz [30, S.220]

Geometrie
Mechanik
Energie
Gebrauch
Instandhaltung
Kosten
Termin

Die meisten der Kategorien sind von Projekt zu Projekt unterschiedlich. Nur die Punkte Kosten und Endtermin teilen sich die meisten Projekte.

Die Anforderungsliste für den Einsatz von PV-Anlagen auf Metro-Fahrzeugen wird in Tabelle 4.4 dargestellt. Aus der Liste geht hervor, dass einige Anforderungen unbedingt erfüllt werden müssen und eine Forderung (F) sind, während andere nur als Wunsch (W) deklariert werden. Somit ist augenscheinlich, wie die Wichtigkeit eingestuft wird.

Tabelle 4.4: Anforderungsliste nach Pahl Beitz [30, S.225]

Änder.	F/W	Anforderung	Datum
<i>Geometrie</i>			
26.05.16	F	Bauraum kleiner Lichtraumprofil	17.03.16
	W	PV-Paneele hinterkühlt	17.03.16
	F	Dachfläche maximal ausnutzen	17.03.16
	W	Modulabmessungen klein ¹	
	W	Seitenwände ausnutzen	28.03.16
<i>Mechanik</i>			
26.05.16	W	Gewicht gering ¹	17.03.16
<i>Energie</i>			
26.05.16	F	maximale Leistung	17.03.16
	F	Temperatur Arbeitsbereich $0^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$	17.03.16
	F	Spannung 110V ²	17.03.16
	F	Notbeleuchtung aufrecht erhalten 30min - 1h ³	17.03.16
	F	Belüftung aufrecht erhalten 30min - 1h ³	17.03.16
<i>Gebrauch</i>			
22.04.16	F	zul. Geschwindigkeit $v=90$ km/h PV-Anlage inaktiv	17.03.16
22.04.16	F	zul. Beschleunigung $a=1,2$ m/s PV-Anlage inaktiv	17.03.16
10.04.16	F	zul. Geschwindigkeit $v=5$ km/h PV-Anlage aktiv	17.03.16
22.04.16	F	zul. Beschleunigung $a=1,2$ m/s PV-Anlage aktiv	17.03.16
	F	Sonneneneinstrahlung + Winkel messen	01.06.16
	F	Staub- und Wasserdicht	17.03.16
	F	resistent gegen Sandsturm	17.03.16
<i>Instandhaltung</i>			
21.03.16	F	Diebstahlschutz Spezialwerkzeug für Montage	17.03.16
	F	PV-Modul Austausch innerhalb von 3 Stunden	17.03.16
<i>Kosten</i>			
05.04.16	W	max. 150,000€ pro Zug	17.03.16
<i>Termin</i>			
06.04.16	W	Konzept bis Ende 2016	29.03.16

¹ Ein Arbeiter muss die Module alleine austauschen können² Mit Hilfe eines Wechselrichters³ Zeit variiert je nach Betreiber

4.2 Erforderliche Energie für den Notbetrieb einer Klimaanlage

Die Inspiron-Plattform, welche in Riad verwendet wird, ist mit zwei Klimageräten und zur Dampfkondensation mit zwei Gebläsen pro Waggon ausgestattet. Die gesamte elektrische Leistung beträgt 300 kW. Jede dieser Klimaanlage kann einzeln angesteuert werden. Hierdurch können verschiedene Betriebszustände erreicht werden. Diese sind im normalen Betrieb von der Außentemperatur, der gewünschten Innenraumtemperatur und der Anzahl der im Fahrzeug befindlichen Personen abhängig.

Bei einem Notfall muss die Klimaanlage ein erträgliches Niveau der Raumtemperatur halten können und in der Lage sein, mit der vorhandenen Energie auszukommen. Somit ist ein sparsamer Betrieb vorteilhaft. Mögliche Betriebszustände sind in den Tabellen 4.5 bis 4.7 aufgeführt.

Tabelle 4.5: Klimaanlage Auslegungsprofil 1 (Außen- 38 °C, Innentemperatur 25 °C)

	Anzahl	Leistung	
		Nominal	Gesamt
Kompressor	2	8,7kW	17,5 kW
Kondensator Gebläse	2	0,8kW	1,5 kW
Gesamt			19,0 kW

Tabelle 4.6: Klimaanlage Auslegungsprofil 2 (Außen- 55 °C, Innentemperatur 32 °C)

	Anzahl	Leistung	
		Nominal	Gesamt
Kompressor	1	12,3 kW	12,3 kW
Kondensator Gebläse	2	2,5 kW	5,1 kW
Gesamt			17,5 kW

Tabelle 4.7: Klimaanlage Auslegungsprofil 3 (Außen- 45 °C, Innentemperatur 32 °C)

	Anzahl	Leistung	
		Nominal	Gesamt
Kompressor	2	10,3 kW	20,5 kW
Kondensator Gebläse	2	0,8 kW	1,5 kW
Gesamt			22,0 kW

In Tabelle 4.5 ist der Energieverbrauch bei voller Leistung der Klimaanlage und niedriger Stufe des Gebläses angegeben. Beide Klimageräte sind in Betrieb. Die gleichen Bedingungen sind in Tabelle 4.7, allerdings bei anderer Umgebungstemperatur. Bei dem Auslegungsprofil in Tabelle 4.6 ist nur ein Klimagerät in Betrieb.

4.3 Notwendige Energie für eine Schleichfahrt

Genaue Daten zum Energieverbrauch der am Markt befindlichen Modelle sind gut gehütete Geheimnisse der Hersteller. Sie könnten sonst zu viel Aufschluss über verwendete Techniken und Wirkungsgrade geben. Um dennoch eine vernünftige Berechnungsgrundlage zu bekommen, können mithilfe des Werkes „Elektrische Bahnen“ von Filipović Abschätzungen getroffen werden. Hier wird die Leistung, die ein Zug braucht, um sich fortzubewegen, abhängig von der Streckenführung, der Reibung und der Trägheit berechnet. Diese fasst Filipović unter dem Begriff der Fahrwiderstände zusammen. [11, S.21]

4.3.1 Fahrwiderstände

Für die Abschätzung werden vier Fahrwiderstände abgeleitet, die in Tabelle 4.8 aufgeführt sind.

Tabelle 4.8: Einflüsse für die Fahrt eines Zuges und deren Vorzeichen bei verschiedenen Verhältnissen [11, S.25]

		positiv	Null	negativ
Laufwiderstand	W_f	immer	-	-
Bogenwiderstand	W_b	Kurve	Gerade	-
Neigungswiderstand	W_I	Steigung	Ebene	Gefalle [sic]
Beschleunigungswiderstand	W_a	Beschleunigung	Beharrung	Verzögerung
Fahrwiderstand	W	möglich	möglich	möglich
Fahrgeschwindigkeit	v	Fahrt	Halt	-
Beschleunigung	a	Beschleunigung	Beharrung	Verzögerung
Zugkraft	F	Zugkraft	Auslauf	Bremskraft

Laufwiderstand Der Laufwiderstand beinhaltet in seiner Berechnung sowohl die vorhandene Reibung zwischen Rad und Schiene, Lager und Federreibung, als auch den Luftwiderstand. Dabei ist zu beachten, dass jede Bahn hier eigene Berechnungen anstellt und beachtliche Abweichungen auftreten können. Die Formel 4.1 kann nur einen Richtwert geben, solange keine genaueren Details zur Konstruktion bekannt sind. [11, S.29f]

$$w_F = 2,5 + k(v + \Delta v)^2 * 10^{-3} \quad (4.1)$$

Der Faktor k wird laut Tabelle 4.9 für den jeweilige Zug ausgewählt. In unserem Fall habe ich mich dazu entschieden $k = 0,33$ zu verwenden, da davon auszugehen ist, dass der Inspiro von Siemens der in Riad eingesetzt wird, einem gewöhnlichen Personenzug am ähnlichsten ist. Mit der Variable Δv findet die Windgeschwindigkeit Berücksichtigung in der Formel.

Tabelle 4.9: Koeffizient k [11, S.30]

k	Zusammensetzung der Züge
0,25	für Schnellzüge, Eilzüge und schwere Güterzüge,
0,33	für gewöhnliche Personenzüge,
0,40	für Eilgüterzüge,
0,50	für gewöhnliche Güterzüge gemischter Zusammensetzung,
1	für leere Güterzüge.

Bogenwiderstand Der Bogenwiderstand ist von der Strecke abhängig und ändert sich nahezu ständig. Dennoch wird für jedes Streckennetz ein minimal einzuhaltender Bogenradius (r) definiert. Damit kann man ein „Worst Case-Szenario“ berechnen. Die Formel 4.2 stellt den Zusammenhang von Spurweite zu Bogenradius dar und definiert damit den Widerstand bei einer Kurvenfahrt. [11, S.231f]

$$w_B = \frac{K}{r} \quad (4.2)$$

Der Spurweitenkoeffizient K ist abhängig von der Spurweite des Zuges. Tabelle 4.10 gibt eine Übersicht für den Koeffizient in Abhängigkeit der Spurweite an. Für den Inspirio ist $K = 750$ bei einer Spurweite von 1435 mm. [11, S.32]

Tabelle 4.10: Spurweitenkoeffizient K [11, S.32]

$K = 750$	für Spurweite von 1435 mm
530	für Spurweite von 1000 mm
400	für Spurweite von 750 mm
325	für Spurweite von 600 mm

Neigungswiderstand Der Neigungswiderstand tritt, wie der Name schon sagt, bei Neigungen der Strecke auf. Er kann positive und negative Werte annehmen, wie in Tabelle 4.8 gezeigt wird. In Formel 4.3 wird der Winkel (β) in Grad angegeben.[11, S.3432ff]

$$w_I = \sin\beta * 10^3 \quad (4.3)$$

Oftmals ist die Angabe der Steigung in der Einheit Prozent oder Promille angeführt. Für die Umrechnungen gelten die Gleichungen (4.4) und (4.5)

$$1\% = 0,01 = 10 \text{‰} \quad (4.4)$$

wobei

$$\beta = \arctan(\%) \quad (4.5)$$

ist.

Beträgt die Neigung weniger als 100 ‰ kann auf den Sinus verzichtet werden, da der Fehler maximal 0,5 ‰ beträgt. [11, S.34]

Beschleunigungswiderstand Der Beschleunigungswiderstand beinhaltet die Kraft die notwendig ist, um die translatorische, wie auch die rotatorische Trägheit aller Massen zu überwinden. Die Formel 4.6 beschreibt den Beschleunigungswiderstand. [11, S.34ff]

$$w_a = \frac{1}{g} * \xi * a * 10^3 \quad (4.6)$$

Mithilfe der Tabelle kann der Massenfaktor ξ bestimmt werden. [11, S.35]

Tabelle 4.11: Massenfaktor ξ [11, S.35]

für antriebslose Wagen der Adhäsionsbahnen (beladen):	1,02 – 1,04
für antriebslose Wagen der Adhäsionsbahnen (unbeladen):	1,05 – 1,12
für elektrische Triebwagen (beladen):	1,08 – 1,12
für elektrische Lokomotiven:	1,15 – 1,30
für antriebslose Wagen der Zahnradbahn (beladen):	1,05 – 1,10
für elektrische Triebwagen der Zahnradbahnen (beladen):	1,30 – 2,50
für elektrische Lokomotiven der Zahnradbahnen:	1,50 – 3,50

Gesamter Fahrwiderstand Aus den Gleichungen (4.1) bis (4.3) und (4.6) kann nun eine Summe gebildet werden, um den gesamten spezifischen Fahrwiderstand zu errechnen. Multipliziert man diesen mit der Gewichtskraft erhält man den gesamten Fahrwiderstand (W) oder die Zugkraft (F) (siehe Formel 4.7). [11, S.28]

$$F = W = \sum w_i * m * g \quad (4.7)$$

Energieverbrauch Der Energieverbrauch wird bestimmt durch die Zugkraft, die der Zug entwickeln muss, und den Wirkungsgrad des Antriebsstranges. In Formel 4.8 wird der Energieverbrauch (A) berechnet. Dieser bildet sich aus der Zugkraft (F) multipliziert mit der Wegstrecke (s). [11, S.41]

$$A = F * s \quad (4.8)$$

Um realistischere Werte zu erhalten, muss der Wirkungsgrad eingerechnet werden. Dabei ist sowohl der Getriebewirkungsgrad, als auch, der Fahrmotorwirkungsgrad einzubeziehen. In der Literatur wird der Wirkungsgrad laut Tabelle 4.12 angegeben. [11, S.41]

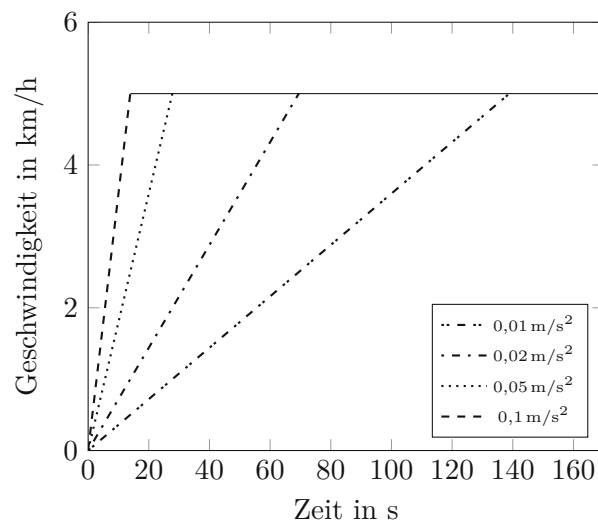
Tabelle 4.12: Wirkungsgrad Elektrischer Triebfahrzeuge[11, S.57,107]

Aggregat		Wirkungsgrad [%]
Getriebe	η_G	97-98
Fahrmotor	η_M	92
Gesamt	η_{gesamt}	90

4.3.2 Anfahren

Die Schleichfahrt soll bei einer maximalen Geschwindigkeit von 5 km/h stattfinden. Um diese Geschwindigkeit zu erreichen, kann unterschiedlich schnell beschleunigt werden. Im Normalfall hat der Zug eine Beschleunigung von $1,2 \text{ m/s}^2$ [38, S.1]. Wie in Abschnitt 4.3.1 mit der Formel 4.6 beschrieben, ist die nötige Zugkraft proportional zur Beschleunigung. Somit ist bei hoher Beschleunigung eine hohe Zugkraft notwendig.

Abbildung 4.3 zeigt die verschiedenen Beschleunigungsraten und die benötigte Zeit um auf 5 km/h zu kommen. In Tabelle 4.13 können die Zeiten abgelesen werden, die vergehen, bis der Zug die gewünschte Geschwindigkeit erreicht hat.

**Abbildung 4.3:** Beschleunigungsraten

Die Tabelle 4.13 zeigt den Zusammenhang zwischen Beschleunigung, Zeit und Zugkraft. Gut erkennbar ist, dass es sich hier um eine direkte Proportionalität zwischen Beschleunigung und Beschleunigungswiderstand handelt.

Tabelle 4.13: Der Zusammenhang zwischen Beschleunigung, Zeit und Widerstandskraft.

Beschleunigung a [m/s ²]	Anfahrzeit t [s]	Beschleunigungswiderstand w_a [N/kN]
0,1	13,9	11,01
0,05	27,8	5,5
0,02	69,5	2,2
0,01	139	1,1

Wie aus der Tabelle 4.13 zu entnehmen, ist es erforderlich, mit möglichst geringer Beschleunigung anzufahren.

4.3.3 Steigungen

Die Überwindung der Steigung stellt die größte Herausforderung dar. Die Zugkraft steigt mit der Steigung linear an. Da die Steigung nicht beeinflussbar ist, muss man entweder in die entgegengesetzte Richtung zum nächsten Bahnhof fahren oder die Fahrt kann nicht ausgeführt werden.

Die Tabelle 4.14 zeigt exemplarische Steigungswerte und die dazugehörige Zugkraft.

Tabelle 4.14: Neigungswinkel und die dazugehörigen Widerstandskräfte

Winkel β [°]	Neigungswiderstand w_I [N/kN]
3,8	66,3
2	34,9
1	17,5
0,5	8,73

4.3.4 Notwendige Energie

Die notwendige Energie, welche für eine Schleichfahrt benötigt wird, ist von den oben beschriebenen Fahrwiderständen abhängig. Zusätzlich ist eine bestimmte Geschwindigkeit erforderlich, um mit Formel 4.9 die benötigte Leistung berechnen zu können. [11, S.41]

$$P = W * v \quad (4.9)$$

Um die notwendige Energie für eine Schleichfahrt zu berechnen, sind zusätzlich zu den oben genannten Fahrwiderständen, noch weitere Angaben notwendig. Dazu zählen unter anderem die Geschwindigkeit, Massefaktor oder der Kurvenradius. Ein Großteil der Angaben wird von der Infrastruktur oder den Umweltbedingungen vorgegeben. Diese fließen meist in die Fahrwiderstände als Faktoren (zB. Massefaktor) ein. Aufgrunddessen ist es nicht möglich, alle Parameter frei zu wählen. Variable Parameter sind Geschwindigkeit, Beschleunigung und Windgeschwindigkeit (siehe Tabelle 4.15). Letztere kann nur geschätzt werden. [11, S.27-41]

Tabelle 4.15: Annahmen für die frei wählbaren Fahrbedingungen

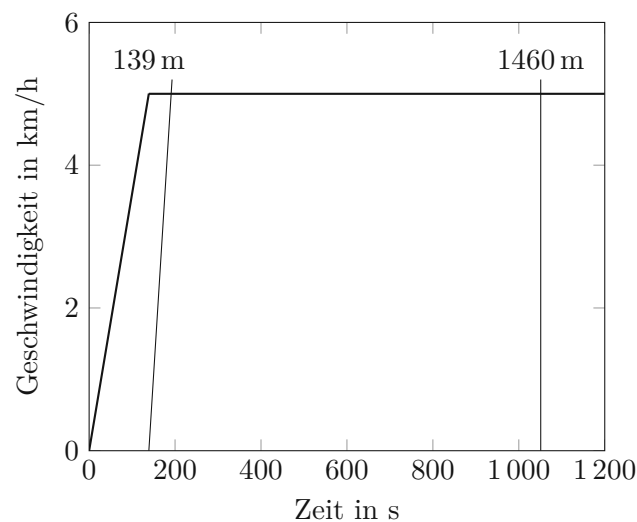
Bedingung	Annahme	
Geschwindigkeit	5	km/h
Beschleunigung	0,01	m/s ²
Windgeschwindigkeit	10	km/h

Aus diesen Angaben kann nun die für die Schleichfahrt nötige Leistung errechnet werden. Die Tabelle 4.16 gibt einen Überblick über mögliche Werte. Dabei sind Kurvenradius und Steigung variabel. Bei ersterem ist die Annahme mit 100 m der kleinstmögliche Radius. Dieser wird eher auf Abstellgleisen und Verschubbahnhöfen erreicht. Auf der Betriebsstrecke kann mit 300 m gerechnet werden. Für die Steigung werden Werte zwischen 1° und 3° herangezogen. Diese Werte sind für den größten Teil der Strecke realistisch.

Tabelle 4.16: Die notwendige Leistung mit $v = 5 \text{ km/h}$ und $a = 0,01 \text{ m/s}^2$ bei verschiedenen Neigungen und Kurvenradien.

Kurvenradius [m]	Steigung [°]	Leistung [kW]
100	1	41
100	2	66
100	3	91
300	1	33
300	2	58
300	3	84

Um abschätzen zu können, wie lange die Beschleunigungsphase und der Fahrweg ist, wurde in Abbildung 4.4 ein typischer Verlauf aufgezeichnet.

**Abbildung 4.4:** Weg Zeit Geschwindigkeitsdiagramm

Nach 139s ist die maximale Geschwindigkeit erreicht und es wirkt keine Beschleunigung mehr. Nach weiteren 912s wird eine Wegstrecke von 1460 m zurückgelegt. 1460 m ist der durchschnittliche Abstand zwischen zwei Stationen in Riad auf der Blauen Linie.[34]

4.4 Notwendige Energie mit Last-Mile-Drive von Siemens

Im September 2016 ist von Siemens ein neuartiger Antrieb vorgestellt worden[23]. Er verwirklicht, was in anderen Fahrzeugkategorien schon länger gang und gäbe ist. Mit diesem Antrieb ist es möglich, Personenzüge, Metro-Fahrzeuge oder auch Güterzüge ohne die Notwendigkeit einer Lokomotive zu verschieben. In Tabelle 4.17 sind die technischen Daten dieses Elektroantriebes aufgeführt. Dieser Antrieb ist so besonders, weil er einen Elektromotor und ein Getriebe direkt auf der Achse eines Drehgestells vereint. Der Elektromotor ist verglichen mit den regulären Antriebsmotoren wesentlich kleiner. Da mit diesem Elektromotor aber nicht die Geschwindigkeiten des normalen Betriebs erreicht werden müssen, bringt ein großer Motor für die Zwecke der Studie keine Vorteile. Das Getriebe ist so stark übersetzt, dass das nötige Anfahrmoment niedrig gehalten werden kann.

Tabelle 4.17: Technische Daten Last-Mile-Antrieb Siemens

Höchstgeschwindigkeit	10 km/h
Reichweite	15 km
Reisezugwagenmasse	50 t
Antriebsleistung	9 kW
Anfahrmoment	2600 N m

Die Abbildung 4.5 zeigt den Last-Mile-Drive auf der InnoTrans 2016 ausgestellt. Hier ist die Achse mit dem angebrachten Antrieb in Orange zu sehen. Dahinter lassen sich die Umrisse des Getriebes erkennen, an dem dann der 9kW Motor angebracht wird. Da nicht jede Achse eines Reisezugwaggon oder Metro-Fahrzeuges angetrieben wird, können die freien mitlaufenden Achsen für ein solches System genutzt werden.

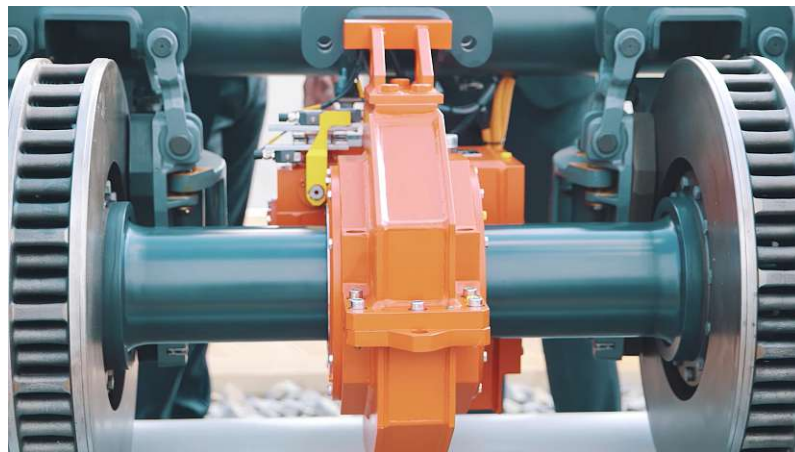


Abbildung 4.5: Last-Mile-Drive von Siemens ausgestellt auf der InnoTrans 2016 in Berlin. Copyright: Siemens, via Youtube URL: <https://youtu.be/O2y0mr8F7rc?t=11s>

4.5 Wie viel Bauraum steht zur Verfügung

Der zur Verfügung stehende Bauraum für eine PV-Anlage wird durch das Lichtraumprofil begrenzt. Dieses ist eine Grenze, die kein Teil eines Zuges überschreiten darf, da es sonst zu Kollisionen mit der Bahnanlage oder anderen Zügen kommen kann. Oberleitungen, Bahnsteige oder Überdachungen sind hierzu nur einige Beispiele. Mit einkalkuliert wird, dass der Zug in Kurven ausschert und durch Wind oder Unebenheiten auch ins Schwanken geraten kann.

Da in Riad schon ein fertig konstruierter Zug verwendet wird, ist nur wenig Platz zum Lichtraumprofil vorhanden, denn der vorhandene Platz wurde bereits so gut wie möglich genutzt. Bei der Konstruktion neuer Züge wäre es vorteilhaft, den Platz, den eine PV-Anlage benötigt, schon in der Planungsphase einzurechnen.

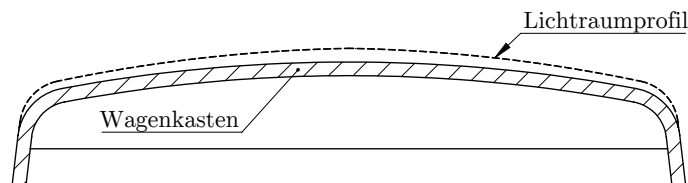


Abbildung 4.6: Kleinster Abstand zwischen Lichtraumprofil und Wagenkasten am Dach.

Somit steht für diese Studie zwischen Lichtraumprofil und Wagenkasten 50 mm Platz zur Verfügung.

4.6 Wieviel m^2 Photovoltaik-Fläche steht zur Verfügung

Geeignet für die Anbringung von Solarpaneelen sind drei Bereiche - im folgenden Sektoren genannt. Der erste ist die Dachfläche, diese ist horizontal und erlaubt eine Nutzung der Sonneneinstrahlung über den ganzen Tag hinweg. Der zweite und dritte Sektor sind jeweils die Seiten des Wagenkastens, zwischen Dachkante und Oberseite der Fenster. Die drei Sektoren sind schematisch in Abbildung 4.7 abgebildet.

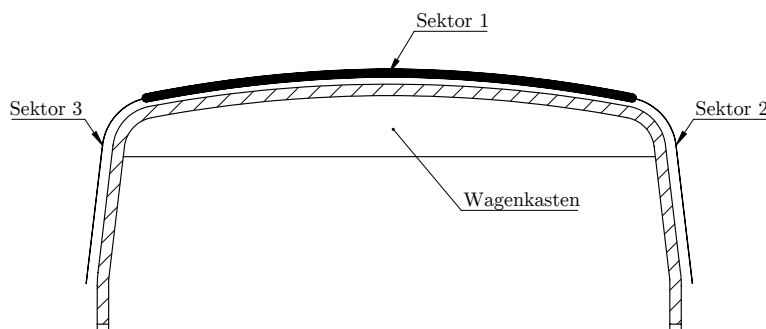


Abbildung 4.7: Dachabschnitte

Der Platz auf dem Metro-Fahrzeug ist nicht nur in der Breite beschränkt sondern auch in der Länge. Auf dem Dach sind noch die Klimageräte montiert. Somit ergeben sich die

Abmessung nach Tabelle 4.18.

Tabelle 4.18: Fläche der unterschiedlichen Dachsektoren.

Sektor	Länge [m]	Breite [m]	Fläche [m ²]
1	8,754	2,041	17,87
2 & 3	8,754	0,593	5,19

Anhand der Abbildung 4.6 sieht man, dass nur die leicht gekrümmte Fläche parallel zum Boden (Sektor 1) für die Gewinnung von Sonnenenergie genutzt werden kann, da nur diese innerhalb des Lichtraumprofils liegt. Die benutzbare Fläche für die Erzeugung von Solarstrom beträgt somit $17,87 m^2$.

KAPITEL 5

Konzipieren

Konzipieren ist das Entwickeln einer Lösung auf der Grundlage der Anforderungsliste. Das Konzept stellt einen vorläufigen Plan dar, wie die spätere Lösung in etwa aussehen wird. Es erfolgt hier keine Detailplanung oder Ausarbeitung gewisser Merkmale. [30, S.231]
Die Autoren Pahl und Beitz [30] schreiben dazu:

„Das Konzipieren ist die *prinzipielle Festlegung* einer Lösung.“ [30, S.231]

Dem Konzipieren ist ein Entscheidungsschritt vorgeschaltet. Dieser ist in Kapitel 4 beschrieben und die dortigen Erkenntnisse werden als Grundlage für das Konzipieren herangezogen. [30, S.231]

In Abbildung 5.1 sind die notwendigen Arbeitsschritte für das Konzipieren angeführt. Es ist ersichtlich, dass die Phase Konzipieren beginnt, sobald die vorläufige Anforderungsliste freigegeben wird.

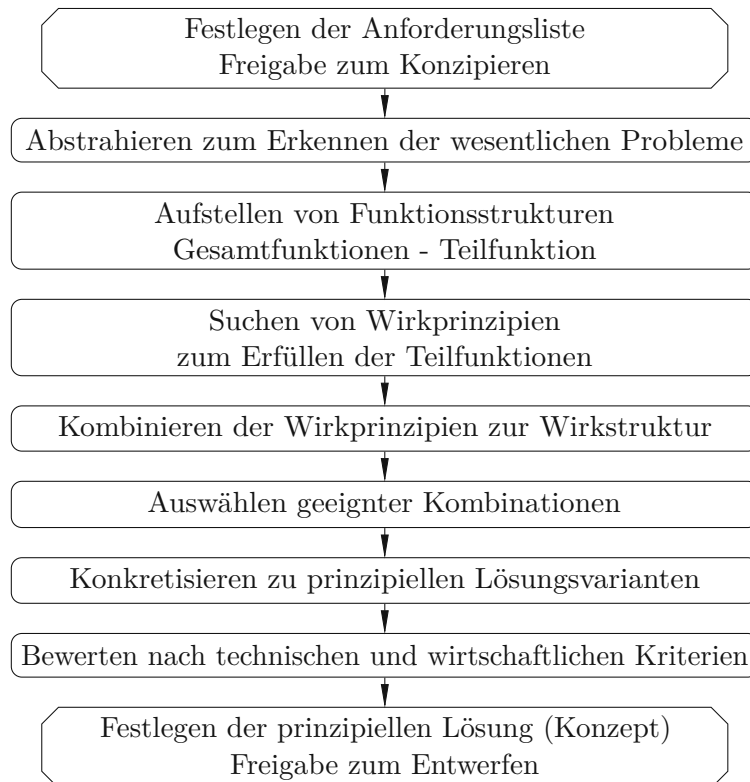


Abbildung 5.1: Arbeitsschritte Konzipieren[30, S.232]

Im nachfolgenden Kapitel wird erklärt, wie die Anforderungen, die in Kapitel 4 beschrieben wurden, umgesetzt werden können. Es sollen Methoden gefunden werden, um diese Ziele zu erreichen.

5.1 Abstrahieren der Problemstellungen

Als nächstes müssen die in Kapitel 4 gestellten Anforderungen zu Problemstellungen definiert werden, um diese im Weiteren behandeln zu können. Diese werden ausformuliert und nach Relevanz geordnet. [30, S.237][44]

Nicht immer lassen sich wesentliche Merkmale sofort abstrahieren. Infolgedessen werden folgende Schritte nach Pahl/Beitz angewendet:

1. Schritt: Gedanklich Wünsche weglassen.
2. Schritt: Nur noch Forderungen berücksichtigen, die die Funktionen und wesentlichen Bedingungen unmittelbar betreffen.
3. Schritt: Quantitative Angaben in qualitative umsetzen und dabei auf wesentliche Aussagen reduzieren.
4. Schritt: Erkanntes sinnvoll erweitern.
5. Schritt: Problem lösungsneutral formulieren. [30, S.237]

Ausgehend von der Anforderungsliste (Tabelle 4.4) werden nur die obigen Schritte durchgeführt. Der Schritt 1 ist ohne Probleme auszuführen. Bei Schritt 2 bedarf es einer

genaueren Betrachtung der Anforderungen. Nicht jede Forderung wirkt sich unmittelbar auf die Funktion aus oder betrifft eine wesentliche Bedingung. Zum Beispiel ist der Temperatur-Arbeitsbereich der PV-Anlage wichtig, aber es ergibt sich daraus keine andere Funktion des Systems.

Die Schritte 3 und 4 wurden im folgenden nicht aufgeführt, da sie keine Änderungen zu Schritt 2 ergeben.

Ergebnis nach Schritt 1 und 2

- Bauraum kleiner Lichtraumprofil
- Dachfläche maximal ausnutzen
- maximale Leistung
- Sonneneinstrahlung messen

Ergebnis nach Schritt 5

Schritt 5 stellt die Problemformulierung dar.

Sonnenlicht in Strom umzuwandeln und dabei die Fläche innerhalb des Lichtraumprofils maximal ausnutzen und die Sonneneinstrahlung quantifizieren.

Mit der Problemformulierung erreicht man, dass ein Problem neutral formuliert wird. Es dürfen keine Annahmen in einer Problemformulierung vorkommen, die auf ein Lösungsprinzip hindeuten. Damit wird gewährleistet, dass in den nächsten Schritten neutral an die Lösungsfindung herangegangen werden kann. [30, S.242]

5.2 Funktionsstruktur

Beim Aufstellen der Funktionsstruktur wird die Problemformulierung in eine Blockdarstellung überführt. Dabei wird Schritt 5 in die Gesamtfunktion *Solarstrom erzeugen* umgewandelt. Danach werden alle Energie-, Stoff- und Signalumsätze dargestellt, die im Zusammenhang mit den Funktionen und Eingangs- sowie Ausgangsgrößen stehen. Es wird eine Gesamtfunktion gefunden, deren Aufgabe es ist, die Eingangs- und Ausgangsgrößen übersichtlich darzustellen. Diese wird in Teilfunktionen niedrigerer Komplexität aufgegliedert. Die Funktionen müssen lösungsneutral dargestellt werden und ihre Benennung erfolgt durch ein Substantiv in Kombination mit einem Verb.[30, S.243]

Gesamtfunktion

Abbildung 5.2 zeigt die lösungsneutrale Darstellung der Problemformulierung mit den Eingangs- und Ausgangsgrößen. Hier sind die Energie-, Stoff- und Signalflüsse der Gesamtfunktion übersichtlich dargestellt. [30, S.242f]

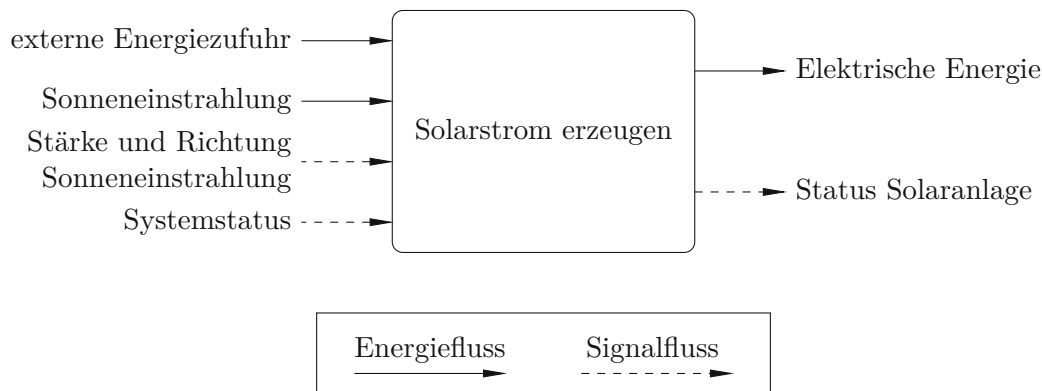


Abbildung 5.2: Gesamtfunktion mit Übersicht über die Eingangs- und Ausgangsgrößen

Eingangsgrößen sind die *Energie*, die *Sonneneinstrahlung*, die *Stärke und Richtung Sonneneinstrahlung* und der *Systemstatus*. Die PV-Anlage braucht in einigen Fällen Energie um ihre Funktion zu erfüllen. Die Sonnenenergie ist ein Energiefluss, aus dem die Solaranlage Strom gewinnen soll. Die Sonneneinstrahlung wird gemessen und der PV-Anlage übermittelt. Der Systemstatus beinhaltet Informationen über das Metro-Fahrzeug. Mit Hilfe dieses Signalflusses weiß die PV-Anlage, ob das Fahrzeug Strom hat.

Die Ausgangsgrößen bilden die produzierte *Elektrische Energie* als Energiefluss, der *Status Solaranlage* und die produzierte *Leistung* der PV-Anlage als Signalfluss. Der *Status Solaranlage* gibt an, ob die PV-Anlage Strom erzeugt und in welchem Zustand sie sich befindet.

Auffallend ist, dass Energie sowohl als Eingangs-, als auch Ausgangsgröße eingezeichnet ist. Obwohl die Funktion Strom erzeugen soll, wird für die Bereitstellung und für das Abfragen des Status der Solaranlage Energie benötigt.

Teilfunktionen

Die Gesamtfunktion stellt eine gute Übersicht der Eingangs- zu Ausgangsgrößen dar. Sie gibt aber keinen Hinweis darüber welche Prozesse oder Funktionen ablaufen müssen, um die Gesamtfunktion zu erfüllen. Die Lösung wird vielschichtiger sein, als die Gesamtfunktion vermuten lässt. Aus diesen Grund wird die Gesamtfunktion in Teilfunktionen unterteilt. Diese entsprechen später häufig den Baugruppen einer Konstruktion. Essentiell ist die Verknüpfung der Teilfunktionen. Diese muss auch die nötigen Flüsse darstellen. [30, S.243]

Die Funktionsstruktur mit den Teilfunktionen ist in Abbildung 5.3 abgebildet. Zusätzlich kann man in dieser Abbildung die Systemgrenze sehen.

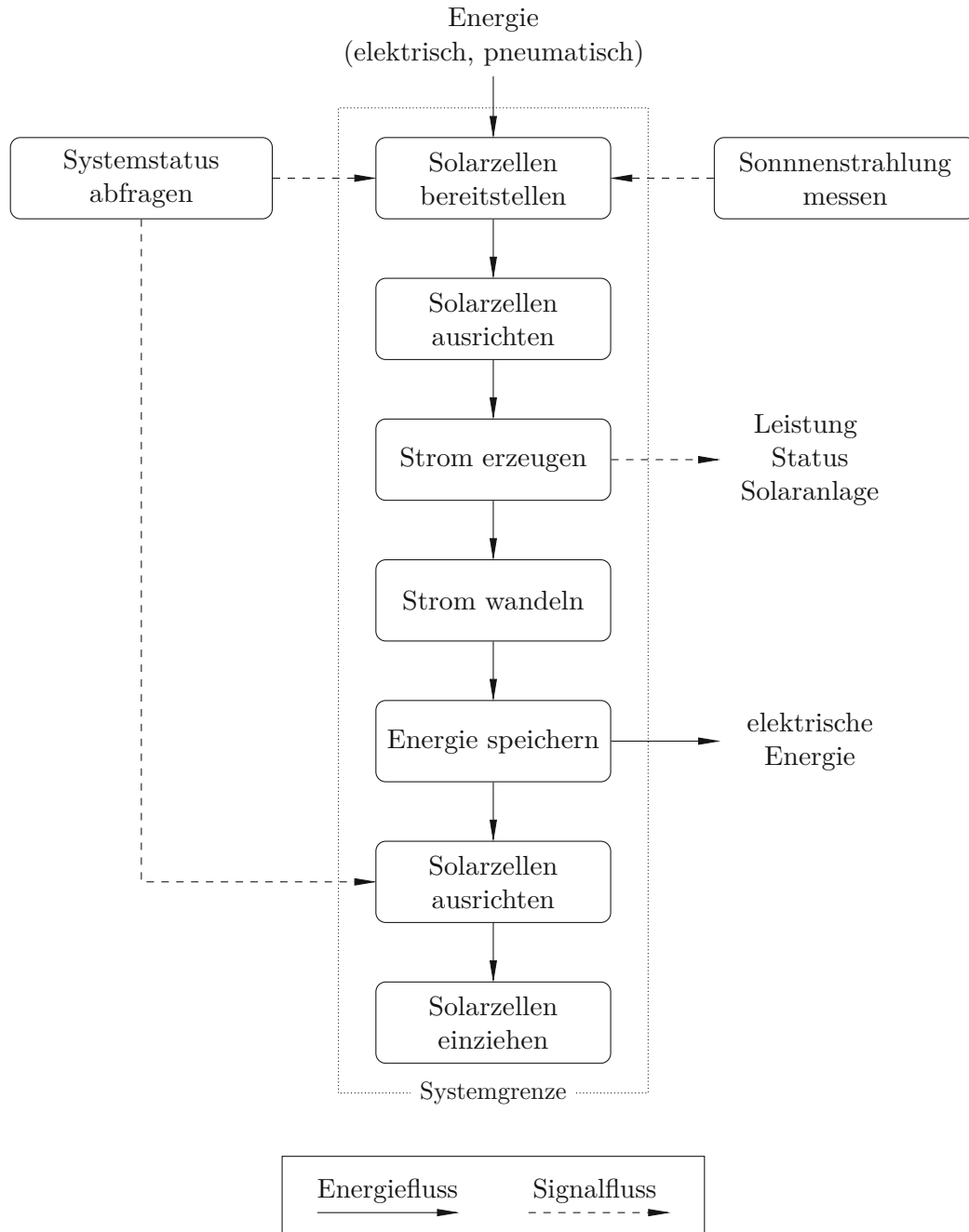


Abbildung 5.3: Funktionsstruktur der PV-Anlage

5.3 Wirkstruktur

Die Wirkstruktur ist die Gesamtheit der Wirkprinzipien, die die physikalische Umsetzung der Teilfunktionen darstellen. [30, S.255]

Suche nach Wirkprinzipien

In der nachfolgenden Tabelle 5.1 werden alle Teilfunktionen (A-F) aufgelistet, um ihnen eine oder mehrere Lösungsvarianten (1-5) zuzuweisen. Wie der Name schon andeutet, ist die Lösungsvariante eine mögliche Lösung einer Teilfunktion. In den meisten Fällen gibt es mehrere Lösungen für eine Teilfunktion. Für viele physikalische Probleme gibt es bereits bekannte Lösungsvarianten (vergleiche [35]). Wenn keine passenden Lösungsvarianten Katalogen gefunden werden können, müssen diese eigenständig erarbeitet werden. Dies nennt man einen morphologischen Kasten.

Es gibt die Möglichkeit, dass die PV-Paneele beweglich angebracht werden und dadurch ein Teil oder die gesamte Photovoltaische Fläche verdeckt ist. In diesem Fall müssen die Paneele von einem inaktiven Zustand in einen Zustand zum Strom erzeugen gebracht werden. Dieser Prozess wird in der Funktionsstruktur *Solarzellen bereitstellen* genannt. Wenn die PV-Paneele nicht mehr gebraucht werden, werden sie in den inaktiven Zustand zurück gebaut, dies ist mit *Solarzellen einziehen* bezeichnet. Beide Funktionen besitzen das gleiche physikalische System, somit sind die auch die gefunden Lösungsvarianten die gleichen. Das gleiche gilt für die Funktion *Solarzellen ausrichten*. [30, S.259]

Anschließend wird jede Lösungsvariante einer Teilfunktion mit den anderen Lösungsvarianten zur einer Wirkstruktur verbunden. Daraus ergeben sich 21600 mögliche Wirkstrukturen. Dies sind zu viele, um alle zu überprüfen. Daher werden sie im Folgenden dezimiert. Da sich die Teilfunktionen wiederholen, verringern sich die möglichen Wirkstrukturen auf 900 Möglichkeiten. Da die Anzahl der Lösungsvarianten noch immer weit über einem überprüfbar Maß liegt, wird mittels Auswahlliste anhand verschiedener Kriterien weiter reduziert. Die Kriterien für die Auswahlliste werden soweit wie möglich von der NWA und der VDI-2225 übernommen. [30, S.261]

Dafür wird jede Lösungsvariante (LV) einer Teilfunktion mit einer fortlaufenden Nummer versehen. Nun kann in der Auswahlliste jede LV anhand der Kriterien überprüft werden. Ist ein Kriterium negativ bewertet, scheidet die LV aus. Zusätzlich ist es auch möglich eine LV nach Beschaffung von zusätzlichen Informationen erneut zu beurteilen. Dazu wird sie in der Auswahlliste mit einem „?“ gekennzeichnet. Wird eine LV mit einem „!“ markiert, stößt es eine Überprüfung der Anforderungsliste an. Die Tabelle 5.2 stellt die fertig ausgefüllte Auswahlliste für den morphologischen Kasten in Tabelle 5.1 dar. [30, S.162ff]

Tabelle 5.1: Morphologischer Kasten

	Teilfunktion	Lösungsvarianten				
		1	2	3	4	5
A	Sonnenstrahlen messen	Pyranometer	Pyranometer + Winkel	Photodiode		
B	Solarzellen bereitstellen	 Aufklappen	 Aufschieben	 Ausrollen	 Ausfalten	Fix
C	Solarzellen ausrichten	ohne	 kippen	 Kippen + drehen		
D	Strom erzeugen	Poly-Si	Mono-Si	HIT	CdTe	CIGS
E	Strom wandeln	Wandler				
F	Energie speichern	Schwungmasse	Akkumulator	Supercap	Pneumatischer Speicher	
C	Solarzellen ausrichten	ohne	 kippen	 Kippen + drehen		
B	Solarzellen bereitstellen	 Aufklappen	 Aufschieben	 Ausrollen	 Ausfalten	Fix

Tabelle 5.2: Auswahlliste für den Morphologischen Kasten

Lösungsvariante (Lv) eintragen:	Lösungsvariante (Lv) nach <u>AUSWAHLKRITERIEN</u> beurteilen:				ENTSCHEIDEN	
	(+) ja (-) nein (?) Informationsmangel (!) Anforderungliste überprüfen				Lösungsvarianten (Lv) kennzeichnen: (+) Lösung weiter verfolgen (-) Lösung scheidet aus (?) Information beschaffen (Lösung erneut beurteilen) (!) Anforderungliste auf Änderung prüfen	
	<i>Verträglichkeit gegeben</i>					
	<i>Forderungen d. Anforderungliste erfüllt</i>					
Lv	<i>Grundsätzlich realisierbar</i>				Bemerkungen (Hinweise, Begründungen)	Entscheidung
	A	B	C	D		
A1	+	+	+	+		+
A2	+	-			Zu teuer	-
A3	+	-			Zu ungenau	-
B1	+	+	+	+		+
B2	+	+	+	+		+
B3	+	+	-		Biegeradius wäre zu hoch	-
B4	+	+	+	+		+
B5	+	+	+	+		+
C1	+	+	+	+		+
C2	+	+	+	+		+
C3	+	+	+	-		-
D1	+	-			Effektivität zu gering	-
D2	+	+	+	+		+
D3	+	-			Effektivität zu gering	-
D4	+	-			Effektivität zu gering	-
D5	+	-			Effektivität zu gering	-
E1	+	+	+	+		+
F1	+	-			Kapazität zu gering, Gewicht zu hoch	-
F2	+	+	+	+		+
F3	+	+	+	+		+
F4	+	-			Bauraum zu groß	-

Nach der Selektion erhält man einen reduzierten morphologischen Kasten mit weniger Einträgen. Er besteht aus acht möglichen Wirkstrukturen, von denen aber eine physikalisch widersprüchlich ist, da eine fix montierte PV-Anlage mit einem Kippmechanismus gepaart wäre. Somit wird diese Möglichkeit nicht als mögliche Wirkstruktur angeführt. Bei den

Teilfunktionen *Strom erzeugen* und *Strom wandeln* ist nach der Auswahlliste jeweils eine Lösungsvariante verblieben. Bei der Teilfunktion *Energie speichern* sind sowohl Akkumulator und Supercap als Lösung verblieben. Beide Systeme werden parallel eingesetzt, um die positiven Eigenschaften der jeweiligen Technologie nutzen zu können (vgl. [27]). Somit verbleibt bei *Strom erzeugen*, *Strom wandeln* und *Energie speichern* eine Lösung, die bei jeder Wirkstruktur vorhanden ist. Der Einfachheit und Übersichtlichkeit halber sind alle drei Teilfunktionen im morphologischen Kasten gemeinsam dargestellt.

Kombinieren von Wirkprinzipien

Nun werden die Lösungsvarianten zu Wirkstrukturen verbunden und fortlaufend mit SE1 bis SE7 (*Strom erzeugen*) abgekürzt und nummeriert. Dabei gilt die Grundlage, nur Verträgliches darf miteinander kombiniert werden. Es kann vorkommen, dass physikalische Eigenschaften untereinander nicht vereinbar sind. In Tabelle 5.3 ist der reduzierte morphologische Kasten mit den sich ergebenden Wirkstrukturen abgebildet. [30, S.260]

Auswählen geeigneter Wirkstrukturen

Damit die Wirkstrukturen bewertet werden können, werden mittels Auswahlliste die Wirkstrukturen beurteilt (siehe Tabelle 5.4).

Tabelle 5.3: Morphologischer Kasten nach der Auswahlliste mit Lösungsvarianten SEx (Strom erzeugen)

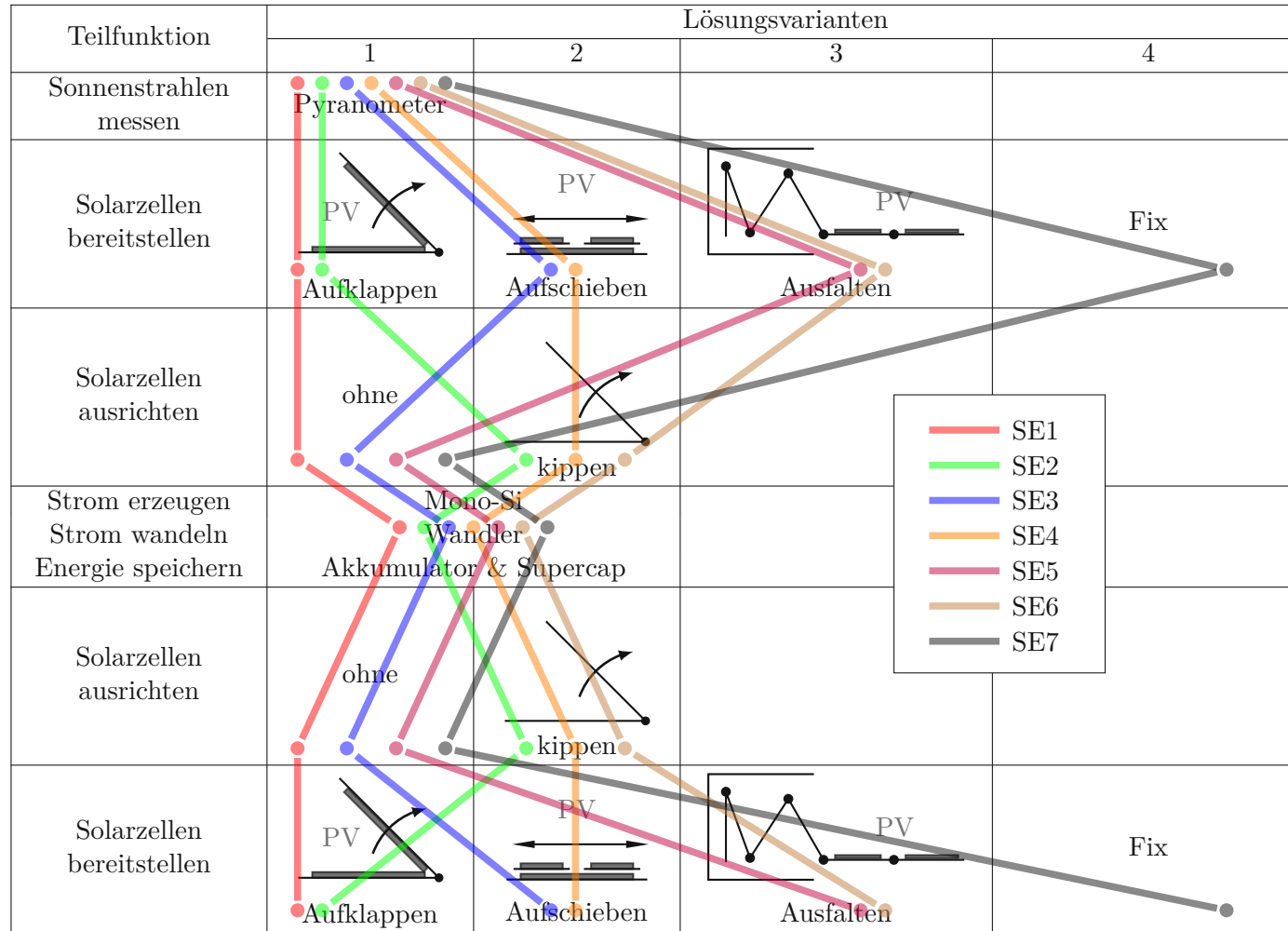


Tabelle 5.4: Auswahlliste für die Wirkstrukturen des Konzipierens

Lösungsvariante (Lv) eintragen:	ENTSCHEIDEN					Entscheidung
	Lösungsvarianten (Lv) kennzeichnen:					
Lösungsvariante (Lv) nach <u>AUSWAHLKRITERIEN</u> beurteilen:						
(+) ja						(+) Lösung weiter verfolgen
(-) nein						(-) Lösung scheidet aus
(?) Informationsmangel						(?) Information beschaffen (Lösung erneut beurteilen)
(!) Anforderungliste überprüfen						(!) Anforderungliste auf Änderung prüfen
	<i>Verträglichkeit gegeben</i>					
	<i>Forderungen d. Anforderungliste erfüllt</i>					
	<i>Grundsätzlich realisierbar</i>					
	<i>Aufwand zulässig</i>					
Lv	A	B	C	D	<i>Bemerkungen (Hinweise, Begründungen)</i>	
SE1	+	+	+	+		+
SE2	+	+	+	+		+
SE3	+	+	+	+		+
SE4	+	+	+	+		+
SE5	+	+	+	+		+
SE6	+	+	+	-	Aufwand zu groß	-
SE7	+	+	+	+		+

Die Lösungsvariante SE6 ist in der Auswahlliste (siehe Tabelle 5.4) negativ bewertet worden und wird daher nicht weiter betrachtet.

5.4 Bewertung nach VDI-2225

Die verbleibenden Wirkstrukturen werden nun bewertet, um eine oder mehrere Strukturen zu finden, die für diese Studie am geeignetsten sind. Dabei wird auf die VDI-2225 zurückgegriffen. Sie stellt eine gröbere Bewertung als die Nutzwertanalyse an. Dies ist hier von Nutzen, da noch keine detaillierten Kenntnisse über die Lösungsvarianten vorhanden sind. Die VDI-2225 bewertet jede Lösung mit 0 bis 4 Punkten (siehe Tabelle 3.3). Null Punkte beschreibt eine „unbefriedigende“ Lösung, vier Punkte gibt es für die „Ideallösung“. Die Berechnung für die technische- (TW) und wirtschaftliche Wertigkeit (WW) ist wie in Kapitel 3.3 durchgeführt und in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Ergebnisse der VDI-2225 für die Wirkstrukturen (SE_x)

	TW	TW	WW
	Leistung 1x	Leistung 2x	
SE1	0,67	0,63	0,44
SE2	0,83	0,88	0,38
SE3	0,50	0,50	0,44
SE4	0,67	0,75	0,31
SE5	0,75	0,69	0,50
SE7	0,58	0,69	1,00

Technische Wertigkeit Es wurden zwei verschiedene Bewertungen durchgeführt. Bei der ersten Bewertung wurden alle Kriterien mit maximal vier Punkten bewertet (einfach), bei der zweiten Variante wurden die Punkte für das Bewertungskriterium Leistung mit dem Wert 2 multipliziert. Es wurde dabei die Skala der Bewertung von 0-4 Punkte nicht auf 0-8 Punkte vergrößert, sondern nur die Bewertung der ersten Variante im Wert verdoppelt, damit das Kriterium Leistung höher gewichtet wird.

Wirtschaftliche Wertigkeit In die wirtschaftliche Wertigkeit fließen nötige Bauteile oder Systeme ein, die die Lösungsvarianten verteuern. Diese sind Motoren oder Sensoren, sowie die verwendete Sicherheitstechnik und die Komplexität der Lösung. Da hier nur Konzepte bewertet werden, kann man die Angaben nur als Schätzung betrachten. Eine Tabelle mit der genauen Auflistung ist im Anhang zu finden.

technische Wertigkeit		SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7
Gewicht	4	2	2	2	2	3	-	4
Verschmutzung	4	4	4	2	2	4	-	1
Leistung	4	2	4	2	4	2	-	2
Zeit bis aktiv								
Gesamt	12	8	10	6	8	9	0	7
technische Bewertung	TW	0,67	0,83	0,50	0,67	0,75	0,00	0,58
Geraden		0,552	0,604	0,469	0,490	0,625	0,000	0,792
Kreisring		0,538	0,543	0,468	0,460	0,605	0,000	0,705

technische Wertigkeit		SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7
Gewicht	4	2	2	2	2	3	-	4
Verschmutzung	4	4	4	2	2	4	-	1
Leistung	8	4	8	4	8	4	-	6
Zeit bis aktiv								
Gesamt	16	10	14	8	12	11	0	11
technische Bewertung	TW	0,63	0,88	0,50	0,75	0,69	0,00	0,69
Geraden		0,531	0,625	0,469	0,531	0,594	0,000	0,844
Kreisring		0,522	0,549	0,468	0,483	0,583	0,000	0,779

wirtschaftliche Wertigkeit		SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7
Motor	4	2	2	2	1	2	-	4
Sensoren	4	2	2	2	2	2	-	4
Sicherheitstechnik	4	1	1	1	1	2	-	4
Einfachheit	4	2	1	2	1	2	-	4
Gesamt	16	7	6	7	5	8	0	16
Bewertung		0,44	0,38	0,44	0,31	0,50	0,00	1,00

Tabelle 5.6: VDI Bewertung der Wikstruktur

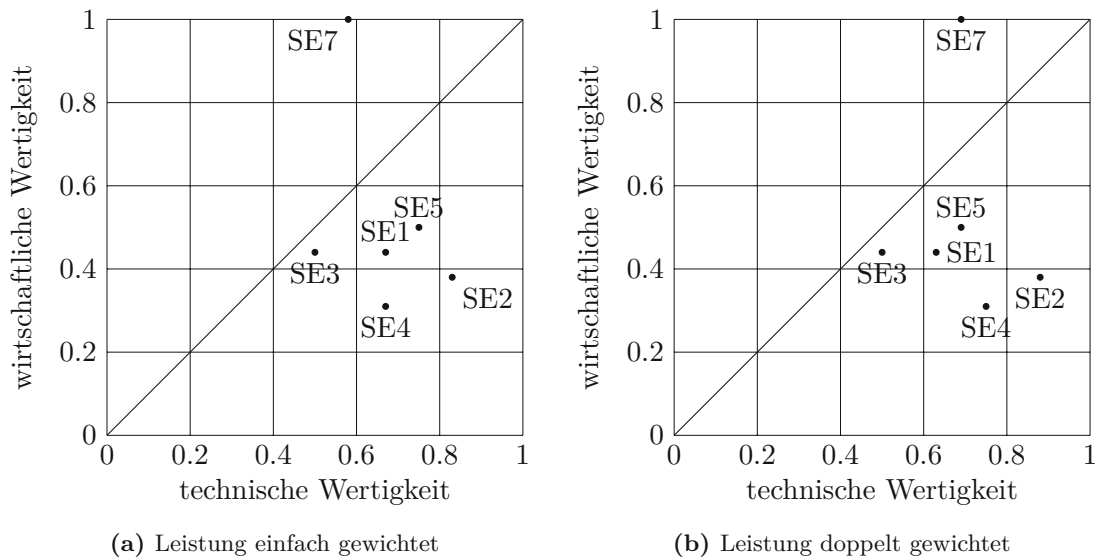


Abbildung 5.4: Bewertung der Wirkstruktur nach VDI 2225

Tabelle 5.6 zeigt die technische- (TW) und wirtschaftliche Wertigkeit (WW). Beide

Bewertungen sind in Abbildung 5.4 im Wertigkeitsdiagramm dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass sich die Lösungsvariante SE7 in beiden Bewertungen von allen anderen absetzt. Dies wird auch deutlich, wenn man die Gesamtwertigkeit (S) berechnet. Diese ist in Tabelle 5.7 dargestellt. Wie schon bei der NWA sind auch hier 2 Verfahren zur Berechnung der Gesamtwertigkeit herangezogen worden. Dies sind das Diagonalenverfahren (siehe Kapitel 3.3.1) und das Kreisringverfahren (siehe Kapitel 3.3.2).

Tabelle 5.7: Gegenüberstellung der Gesamtwertigkeiten (S) nach VDI-2225 für die Wirkstrukturen

	Diagonalenverfahren		Kreisringverfahren	
	Leistung 1x	Leistung 2x	Leistung 1x	Leistung 2x
SE1	0,552	0,538	0,531	0,522
SE2	0,604	0,543	0,625	0,549
SE3	0,469	0,468	0,469	0,468
SE4	0,490	0,460	0,531	0,483
SE5	0,625	0,605	0,594	0,583
SE6	–	–	–	–
SE7	0,792	0,705	0,844	0,779

5.5 Festlegen einer prinzipiellen Lösung

Aus der Bewertung nach VDI-2225 wird ersichtlich, dass sich die Wirkstruktur SE7 erheblich von den anderen Varianten absetzt. Dies ist bei allen Bewertungen so deutlich, dass darauf verzichtet wird, eine weitere Struktur in das „Entwerfen“ zu übernehmen. Somit stellt SE7 die gefundene prinzipielle Lösung dar. Sie besteht aus einem Pyranometer mit fix montierten Solar Paneelen auf Mono-Si Basis, ohne Ausrichtung nach dem Sonnenstand, einem Wandler und einer Kombination von Akkumulator und einem Supercap.

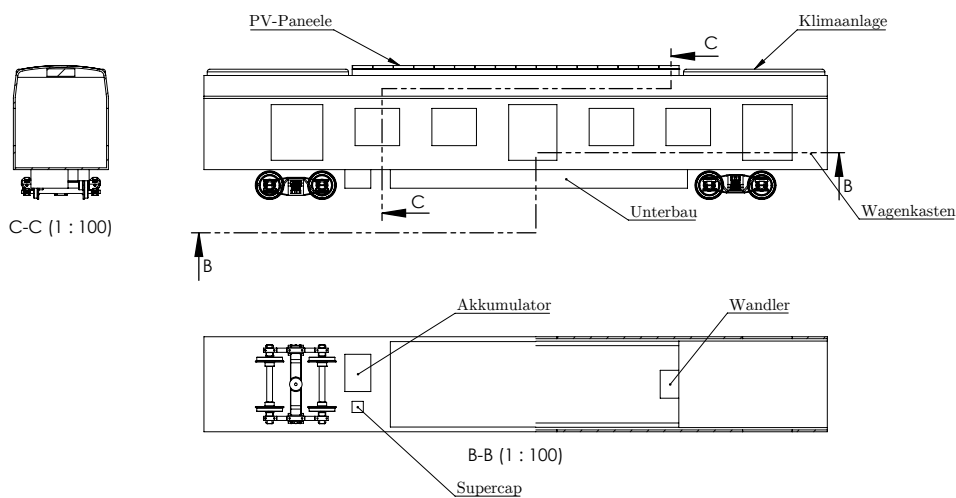


Abbildung 5.5: Prinzipielle Lösung der Phase Konzipieren

KAPITEL 6

Entwerfen

6.1 Methodisches Entwerfen

In der Konzeptphase wurde eine Wirkstruktur ausgewählt und daraus eine prinzipielle Lösung entwickelt. Nun kann eine technische Umsetzung in Form einer gestalterischen Festlegung der Lösung erfolgen. Die Vorgehensweise erfolgt nach dem Buch von Pahl&Beitz und der VDI 2223. Die Autoren Pahl und Beitz beschreiben das Entwerfen wie folgt: [30, S.305][45]

„Unter Entwerfen wird der Teil des Konstruierens verstanden, der für ein technisches Gebilde von der Wirkstruktur bzw. prinzipiellen Lösung ausgehend die Baustruktur nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eindeutig und vollständig erarbeitet.“ [30, S.305]

Anders als das Konzipieren, kann das Entwerfen nicht strikt nach linearen Arbeitsschritten, die hintereinander ausgeführt werden, abgehandelt werden. Viel mehr müssen viele Prozessschritte parallel oder in Iterationsprozessen ausgeführt werden. Die theoretische Reihenfolge der Hauptarbeitsschritte ist in Abbildung 6.1 dargestellt. [30, S.306]

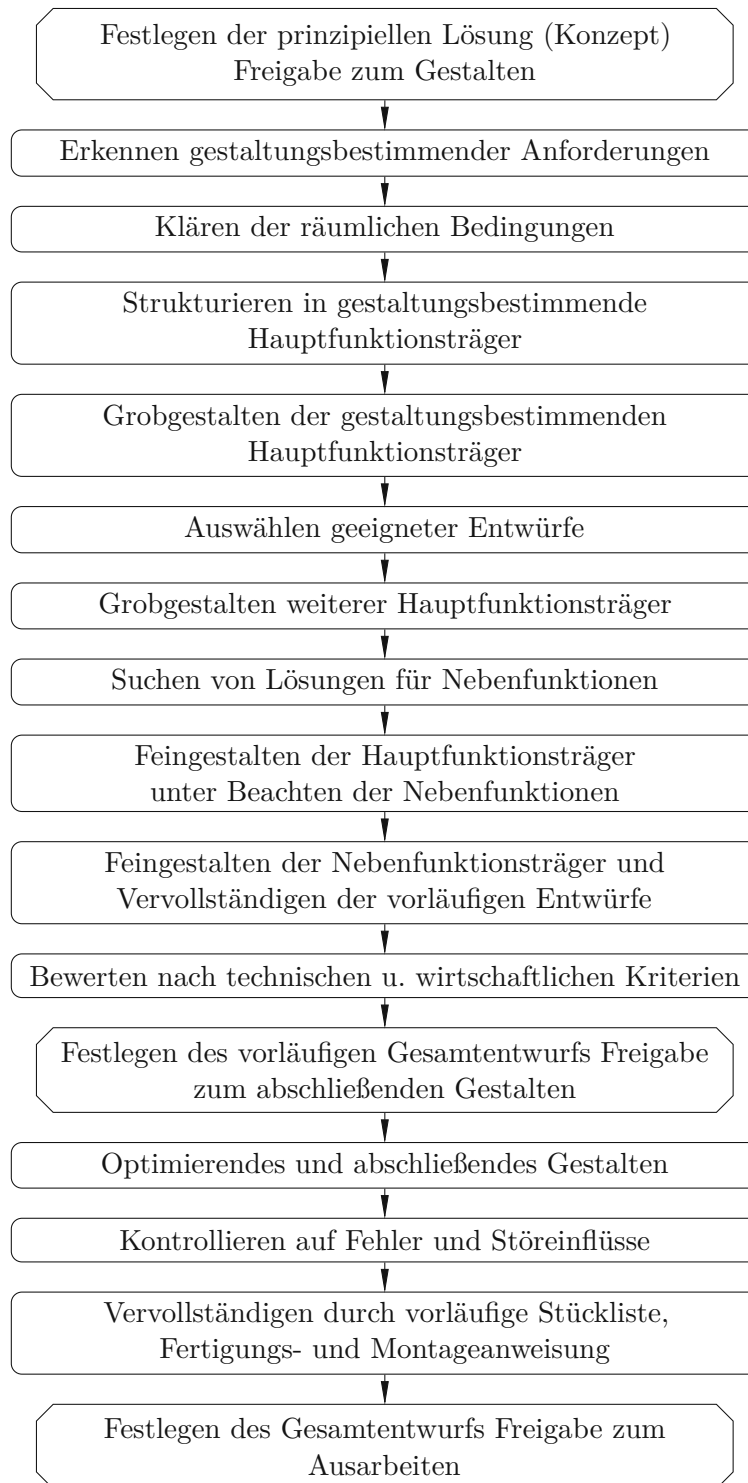


Abbildung 6.1: Hauptarbeitsschritte beim Entwerfen nach Pahl Beitz [30, S.307]

Dabei ist es auch nicht unüblich, kurzfristig einige Schritte auszulassen oder wieder

zu früheren Prozessen zurückzukehren. Damit das Entwerfen mit seiner Komplexität nicht chaotisch wird, haben Pahl&Beitz Hauptarbeitsschritte ausgewählt die den Prozess erleichtern sollen. [30, S.306]

6.1.1 Erkennen gestaltungsbestimmender Anforderungen

Die gestaltungsbestimmenden Anforderungen werden aus der Anforderungsliste erarbeitet. Im wesentlichen können die Anforderungen in drei Kategorien unterteilt werden. Dies sind abmessungsbestimmende, anordnungsbestimmende oder werkstoffbestimmende Anforderungen. [30, S.306]

Aus der Anforderungsliste (siehe Abbildung 4.4) ist die Anforderung *Hinterkühlt* eine die Anordnung betreffende Anforderung. Sie setzt voraus, dass zwischen der Metro-Fahrzeughülle und der PV-Anlage ein Abstand vorhanden sein muss. Dieser soll eine bessere Kühlung der PV-Anlage gewährleisten und somit den Effekt der schwindenden Leistung bei höheren Temperaturen (siehe Tabelle 3.11) mindern.

6.1.2 Klären der räumlichen Bedingungen

Die räumlichen Bedingungen sind aus der Anforderungsliste ablesbar (siehe Abbildung 4.4). Sie bestimmen die Gestalt des Entwurfes oder begrenzen die räumlichen Bedingungen [30, S.306]. Laut Kapitel 4.5 ist der Bauraum stark limitiert. Er wird durch die Vorgabe, dass kein Bauteil außerhalb des Lichtraumprofils liegen darf, beschränkt. Die Abbildung 4.6 veranschaulicht den zur Verfügung stehenden Platz für die Konstruktion.

6.1.3 Strukturieren in gestaltungsbestimmende Hauptfunktionsträger

Nachdem erkannt wurde, welchen Einschränkungen die Konstruktion unterliegt, werden aus der Funktionsstruktur (siehe Kapitel 5.2) die Hauptfunktionsträger ausfindig gemacht. Die Hauptfunktionen bestimmen maßgebend die Funktion und Gestaltung der gesamten Konstruktion. Die Abbildung 5.3 zeigt die Funktionsstruktur der PV-Anlage. Aus dieser sind zwei Hauptfunktionen zu erkennen: [30, S.308]

- Strom erzeugen
- Energie speichern

In Abbildung 6.2 sind die gestaltungsbestimmenden Hauptfunktionsträger dargestellt.

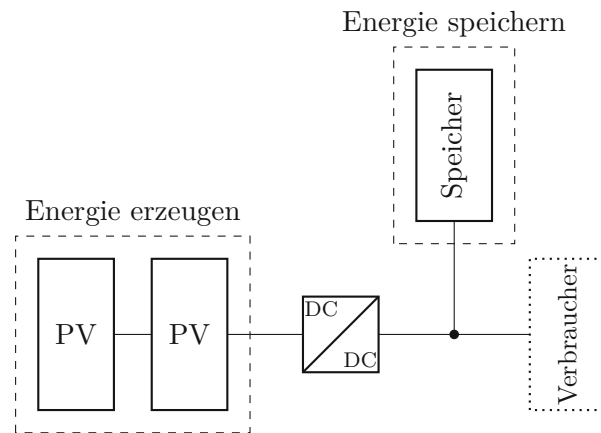


Abbildung 6.2: Gestaltungsbestimmende Hauptfunktionsträger

6.1.4 Grobgestalten der gestaltungsbestimmenden Hauptfunktionsträger

Nachdem die Hauptfunktionsträger aus der Funktionsstruktur erkannt wurden, werden diese nun grob gestaltet. Sie geben damit die weitere Konstruktion vor, die sich an den Hauptfunktionsträgern orientiert. [30, S.308]

Strom erzeugen

Die Funktion *Strom erzeugen* wandelt die einfallende Sonneneinstrahlung in elektrische Energie um. Die dabei verwendeten Technologien und Prozesse sind in Kapitel 3 beschrieben. Die Grundlage dafür bilden die PV-Paneele. Diese müssen auf den dafür vorgesehenen Bereich, auf dem Dach des Schienenfahrzeuges, montiert werden. Der zur Verfügung stehende Platz ist in Kapitel 4.6 beschrieben und die Abmessungen der Paneele in Tabelle 3.11. Die Dachfläche kann mit einem Rechteck angenähert werden. Somit ergeben sich zwei Möglichkeiten, die PV-Paneele anzubringen. Die gesamte zur Verfügung stehende Fläche ist in Tabelle 4.18 angeführt und schematisch in Abbildung 6.3(a) dargestellt.

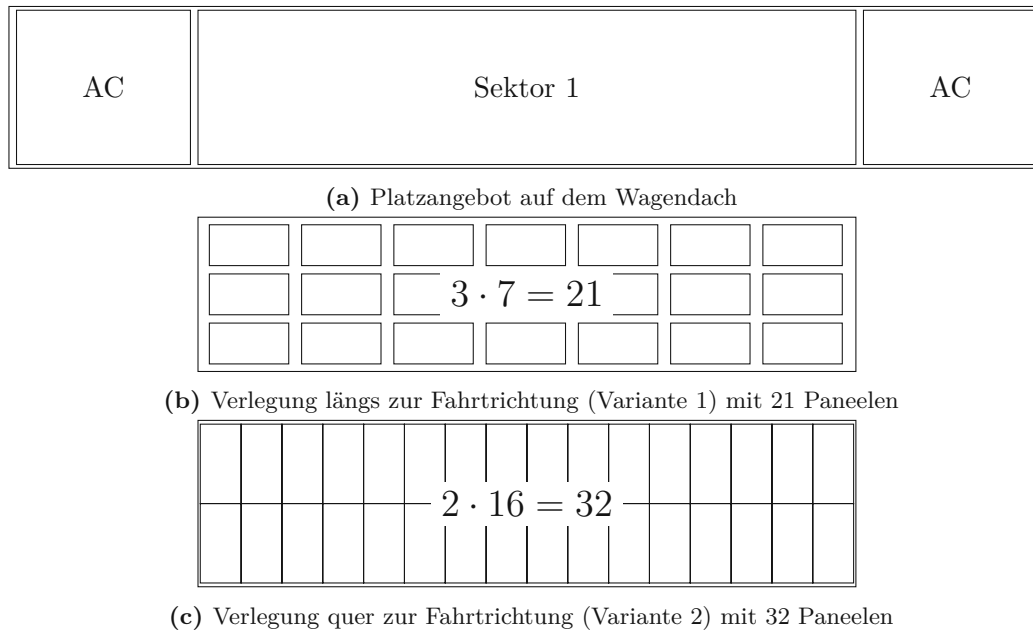


Abbildung 6.3: Grobe Auslegung der PV-Paneele für eine Flächenmaximierung

Die Variante 1 ist in [Abbildung 6.3\(b\)](#) dargestellt, die PV-Paneele sind längs zur Fahrtrichtung angeordnet. Somit können in der Breite drei Paneele verlegt werden und in der Länge sieben. Daraus ergeben sich insgesamt 21 Paneele. Dabei wird die zur Verfügung stehende Fläche zu 63,7% ausgenutzt. Bei der zweiten Variante ist die Ausrichtung der Paneele quer zur Fahrtrichtung. Hierbei ergibt sich eine höhere Dichte beim Anbringen der Paneele mit $2 \cdot 16$ Reihen. Insgesamt sind es 32 Paneele und eine Flächennutzung von 97%. Somit ist eine Anordnung nach der Variante 2 zu bevorzugen, da hier eine größere Fläche genutzt werden kann.

Energie speichern

Nachdem die Energie erzeugt wurde muss sie für eine spätere Verwendung zwischengespeichert werden. Dafür haben sich zwei Technologien im Schienenfahrzeugbau etabliert. Eine davon ist der gewöhnliche Lithium-Ionen-Akku und die andere ist eine Technologie, die in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat, der Supercap: eine Kombination aus einem Akkumulator und einem Kondensator. Dieser hat den Vorteil, dass er schnell Ladung auf - und abgeben kann, allerdings ist die gespeicherte Energie nicht so groß wie bei einem Lithium-Ionen-Akku. [Abbildung 6.4](#) zeigt verschiedene Technologien und ihre Leistungs- und Energiedichte. [41, S.605][14]

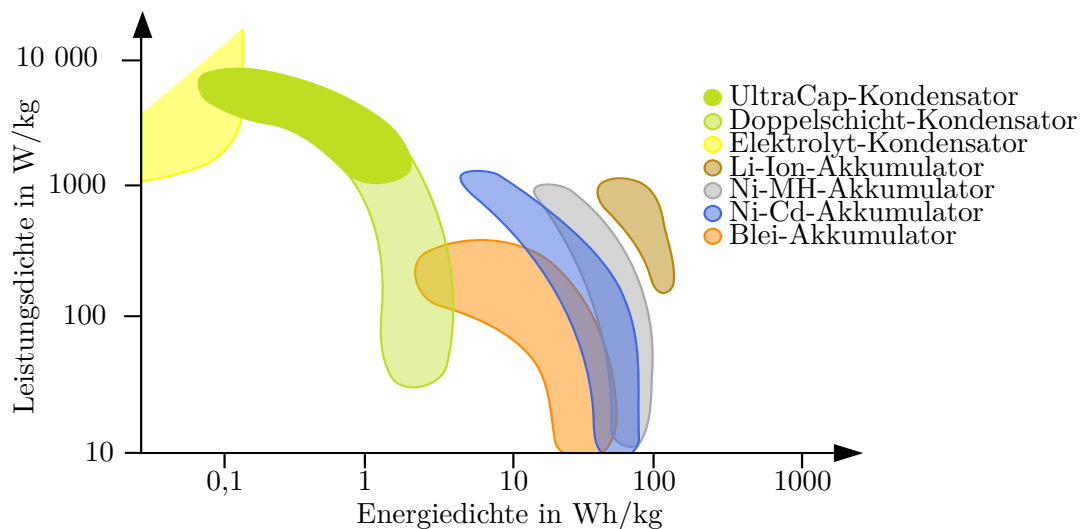


Abbildung 6.4: Energiespeicher mit Energiedichte und Leistungsdichte. [Wikimedia Commons: CC BY-SA 2.0 de (von MovGP0, Cepheiden und Alex42)]

Um eine vorteilhafte Kombination der beiden Technologien zu erzielen, werden sie parallel zueinander in den Antriebskreislauf integriert. Dies wird in Abbildung 6.5 dargestellt.

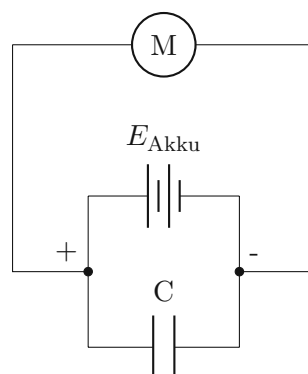


Abbildung 6.5: Antriebskreislauf mit parallel geschaltetem Kondensator und Akkumulator

Akkumulator Der Akkumulator muss die Energie bereitstellen, wenn die PV-Anlage keinen Strom liefern kann. Dies kann durch einen bewölkten Himmel, eine Abschattung durch benachbarte Gebäude oder im schlimmsten Fall durch einen Defekt der Anlage geschehen. Der Akku sollte genügend Energie speichern können, um den Zug über eine gewisse Strecke fortbewegen zu können, aber trotzdem so klein wie möglich sein, da hohe Kapazitäten einen hohen Platzbedarf und ein hohes Gewicht ergeben. Bei der Annahme einer maximalen Stromversorgung von 10 min (=0,17 h) und einer Last von maximal 9 kW ergibt sich eine erforderliche Kapazität des Akkus von:

$$E_{\text{Akku}} = 9 \text{ kW} * 0,17 \text{ h} = 1500 \text{ Wh} \quad (6.1)$$

Damit sollte der Akkumulator mindestens eine Energie von 1500 Wh haben.

Supercap Der Supercap, auch UltraCap Technologie genannt, ist eine Weiterentwicklung eines Kondensator. Damit ist es möglich, mehr Energie zu speichern als mit einem Kondensator und trotzdem hohe Lade- und Entladeleistungen zu erzielen. Dank dieser Eigenschaft kann der Supercap schnell Energie speichern und sie auch wieder abgeben. Das schnelle Laden ist bei PV-Anlagen nicht nötig. Dafür ist es beim Anfahren nötig, hohe Anfahrströme des Motors zu kompensieren. Dies kann der Supercap. Beim Anfahren eines Zuges muss das Losbrechmoment überwunden werden, dies führt zu hohen Anfahrströmen. Ist der Zug einmal in Bewegung, normalisieren sich die Ströme wieder und der Akkumulator kann die Stromversorgung übernehmen. Somit muss der Supercap nur in den ersten Sekunden Energie liefern. Hierfür wird eine Zeitspanne von 10 s angenommen. Mit den Gleichungen (6.2) bis (6.4) kann nun die notwendige Kapazität berechnet werden. [41, S.167 und 173][14]

$$t_{\text{Cap}} = 10 \text{ s} = 0,002778 \text{ h} \quad (6.2)$$

$$E_{\text{Cap}} = 9 \text{ kW} * 0,002778 \text{ h} = 25 \text{ Wh} = 90 \text{ kJ} \quad (6.3)$$

$$C = \frac{2 * E_{\text{Cap}}}{U^2} = \frac{2 * 90000 \text{ J}}{110^2 \text{ V}} = 1636,36 \text{ F} \quad (6.4)$$

Die Gleichung 6.4 wird von Sterner in *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration* [41, S.167] beschrieben. Somit benötigt der Supercap eine Kapazität von mindestens 1640 F.

Wandler

Der Wandler muss die Spannung, die von der PV-Anlage kommt, wandeln, damit diese in das Bordnetz eingespeist werden kann. Die Solarzellen erzeugen, abhängig von der Sonneneinstrahlung, eine Spannung zwischen 17,8 V und 21,6 V. Daraus folgt, dass die 32 PV-Paneele (siehe Kapitel 6.1.4) insgesamt eine Spannung zwischen 569,6 V und 691,2 V erzeugen. Diese müssen auf die intern verwendeten 110 V gewandelt werden. Des weiteren werden auch die Batterie und der Kondensator mit 110 V betrieben. Die meisten der Wandler sind für eine solche Spannung gebaut. Die für PV-Anlagen ausgelegten Wandler haben einen Ausgang mit Drehstrom, der die direkte Einspeisung in das öffentliche Netz ermöglicht. Aufgrund dessen muss der Wandler speziell für diesen Fall adaptiert werden. Technologisch stellt das kein Problem dar. Daher sollte ein angepasster Wandler kaum einen höheren Preis haben, als ein Serienprodukt. [13][12]

6.1.5 Suchen von Lösungen für Nebenfunktionen

Nebenfunktionen tragen nicht unmittelbar zur Gesamtfunktion bei, haben aber eine unterstützende Funktion für die Hauptfunktionen. Sie sind in ihrer Gestaltung meist abhängig von den Hauptfunktionen. [30, S.45]

Befestigung der PV-Paneele

Die Befestigung der PV-Paneele in Gestalt und Anordnung ist maßgebend von der Hauptfunktion *Strom erzeugen* abhängig. Zusätzliche Anforderungen sind die in der Norm beschriebenen Festigkeitsanforderungen und die Forderung aus der Anforderungsliste, dass ein Wechsel der PV-Paneele von einem Mitarbeiter alleine durchgeführt werden können soll. Des Weiteren ist als Wunsch eine Hinterlüftung der PV-Paneele in der Anforderungsliste aufgelistet. Diese Hinterlüftung soll die Paneele auf einer möglichst niedrigen Temperatur halten, um den Wirkungsgrad nicht zu verschlechtern. Schuld daran ist der negative Temperaturkoeffizient, welcher bei Erhöhung der Temperatur die Leistung verringert.

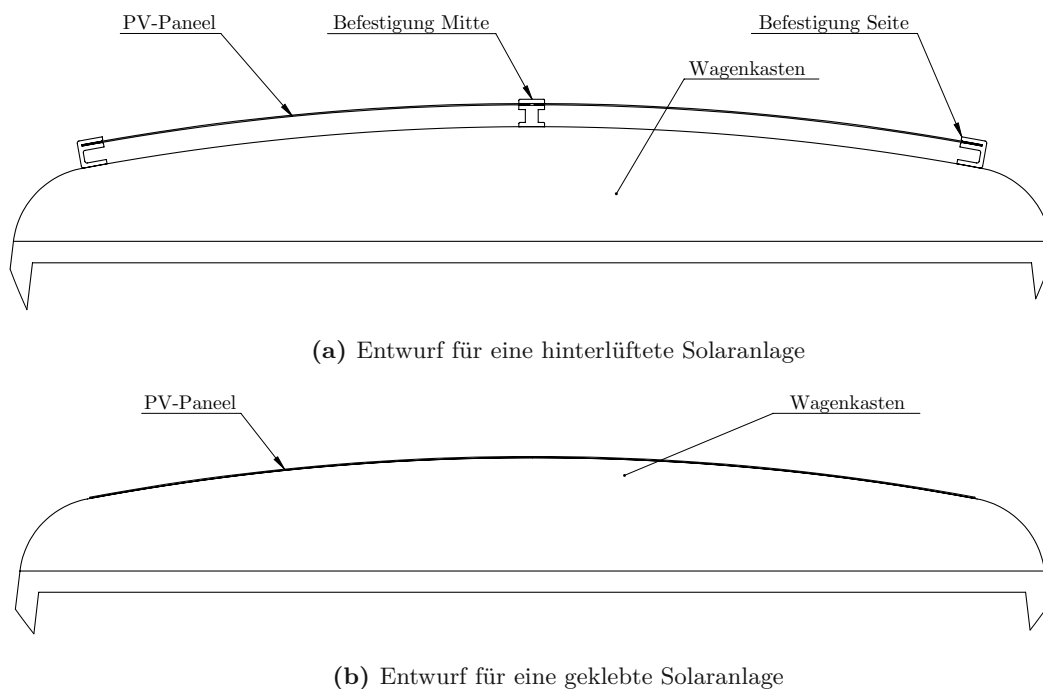


Abbildung 6.6: CAD Skizzen für die Befestigung der PV-Paneele an dem Wagenkasten

In Abbildung 6.6 sind zwei mögliche Lösungen für die Nebenfunktion *Befestigung* nach den Kriterien der prinzipiellen Lösung aus dem Kapitel Entwerfen (siehe 5.5) dargestellt. Der erste Entwurf beinhaltet eine Hinterkühlung. Bei dem zweiten Entwurf sind die Solarpaneele direkt auf dem Wagenkasten montiert. Für beide Varianten ist im Anhang eine technische Zeichnung zu finden.

Hinterkühlung Bei der Hinterkühlung, auch Hinterlüftung genannt, ist zwischen PV-Paneel und Befestigungsebene ein Luftspalt. In diesem Spalt wird die Wärme der PV-Paneele auf die Luft übertragen. Es gibt zwei Arten wie der Wärmeübergang stattfinden kann, natürliche oder erzwungene Konvektion.[46, S.21]

Im folgenden wird kurz auf die theoretischen Grundlagen von natürlicher und erzwungener Konvektion eingegangen.

Natürliche Konvektion: Natürliche Konvektion entsteht durch Dichteunterschiede im Fluid (in dieser Studie die Luft), dies führt zu Auftriebskräften. In einem senkrechten Spalt wird die Luft auf der Rückseite der Solar Paneele erwärmt und beginnt nach oben zu steigen. Dabei wird durch den entstandenen Unterdruck frische kühle Luft von unten angesaugt und die warme Luft entweicht am oberen Ende. Damit wird Wärme von den Solar-Paneelen abgeführt (siehe Abbildung 6.7). [46, S.21]

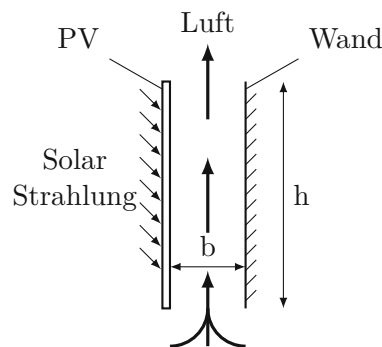


Abbildung 6.7: Natürliche Konvektion [42, S.3]

Dabei hängt die Strömungsgeschwindigkeit von zwei konstruktiven Faktoren ab, der Kanallänge und der Kanalbreite. Je länger der Kanal ist, desto größere Strömungsgeschwindigkeiten lassen sich erzeugen. Bei der Kanalbreite besteht ein optimales Verhältnis, bis zu diesem steigt die Geschwindigkeit an und ab einer größeren Breite nimmt sie wieder ab. Das optimale Verhältnis wird mit $\frac{b}{h} = \frac{1}{5}$ angegeben. [42, S.5]

Erzwungene Konvektion: Bei einer erzwungenen Konvektion treten keine Kräfte im System auf, sie müssen erzeugt werden. Dies kann durch Pumpen, Ventilatoren oder Ähnliches geschehen. Abbildung 6.8 zeigt einen einseitig erwärmten Spalt mit einer erzwungenen Konvektion mithilfe eines Lüfters. [46, S.21]

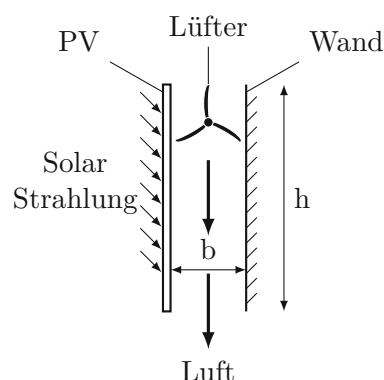


Abbildung 6.8: Erzwungene Konvektion mit Hilfe eines Lüfters.

Bei einer Befestigung der Solarpaneele auf dem Waggondach des Metro-Fahrzeuges entsteht fast keine natürliche Konvektion da der Höhenunterschied zwischen Einlauf und Auslauf gering ist, beziehungsweise weil die Spaltbreite durch das begrenzende Lichtraumprofil unter 50 mm liegt. Laut Su (siehe [42, S.5]) ist die Strömungsgeschwindigkeit bei einer Spaltbreite von 100 mm zu niedrig um eine nützliche natürliche Konvektion zu erreichen. Dieser Wert wird um mehr als das doppelte unterschritten. Darüber hinaus handelt es sich um einen nahezu horizontalen Spalt anstatt des benötigten vertikalen Spalts, dadurch wird eine natürliche Konvektion zusätzlich erschwert [46, S.758]. Abbildung 6.9 zeigt eine schematische Darstellung hinterkühlter PV-Paneele mit Konvektion. Weiters macht die Abbildung deutlich, wie der Luftstrom für eine Konvektion verlaufen würde.

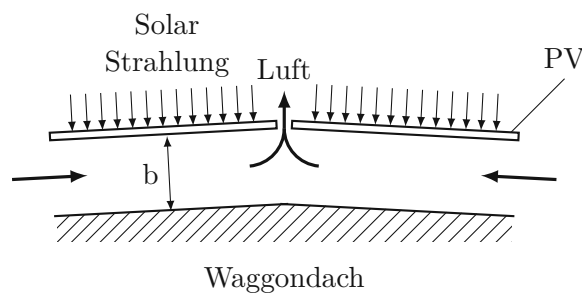


Abbildung 6.9: Schematische Darstellung hinterkühlter PV-Paneele mit möglicher Konvektion.

Die Breite b wird durch das Lichtraumprofil (siehe Kapitel 4.5) begrenzt. Zusätzlich muss noch der Platz für die Befestigung und die Tiefe der Solarpaneele mit einberechnet werden (siehe 3.11). Dabei wird deutlich, dass die Breite zu gering ausfällt. Somit würde eine natürliche Konvektion nur an der Oberseite der Paneele auftreten und eine erzwungene Konvektion an der Oberseite und zwischen den Paneelen und dem Waggon entstehen, wenn der Zug in Bewegung ist.

Ohne Hinterkühlung Hierbei werden die Solarpaneele direkt an dem Waggon angebracht. Auf diese Weise entsteht eine natürliche Konvektion an der Oberseite bei Stillstand und zusätzlich eine erzwungene Konvektion während der Fahrt an der Oberseite. Die Abbildung 6.10 zeigt die Solarpaneele direkt durch aufkleben angebracht an das Waggondach.

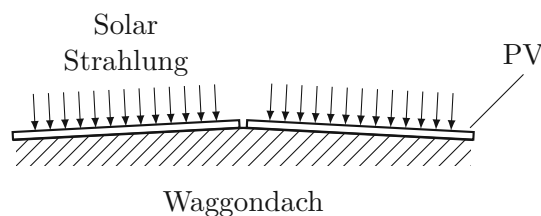


Abbildung 6.10: Schematische Darstellung aufgeklebter PV-Paneele

Auswahl Befestigung

Um die Entscheidung treffen zu können, ob ein Entwurf für eine hinterkühlte oder aufgeklebte PV-Anlage geeigneter ist, wird abermals eine NWA durchgeführt. Es werden teilweise die Kriterien der ersten NWA und der Bewertung nach VDI 2225 übernommen. Beide Entwürfe werden bewertet und die Punkte gemäß Tabelle 3.3 vergeben und die Bewertung nach Gleichung 3.2 berechnet. In Tabelle 6.1 wird ein paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien für eine NWA durchgeführt.

Tabelle 6.1: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien für die NWA der Befestigung

	Aufwand	Leistung	Gewicht	Summe $\sum = 3$	Gewichtung
Aufwand		0	0,5	0,5	0,17
Leistung	1		0	1	0,33
Gewicht	0,5	1		3	0,5

Mit den Gewichtungen kann nachfolgend die NWA durchgeführt werden. In Abbildung 6.11 ist der Wagenkasten mit montierten PV-Paneeelen abgebildet.

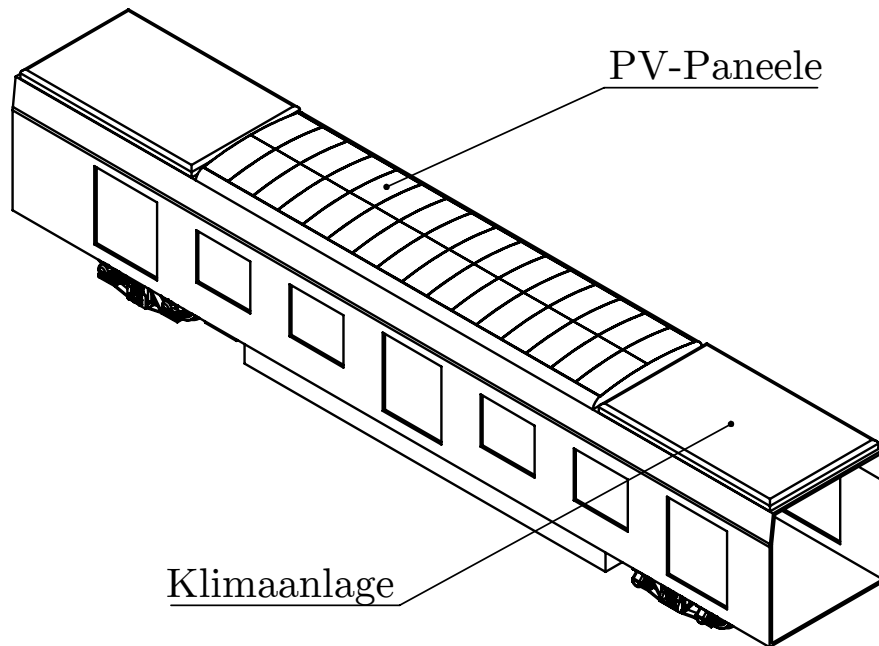


Abbildung 6.11: Isometrische Ansicht des Wagenkastens mit Solaranlage

Aufwand Der Aufwand ist bei beiden Varianten annehmbar, wobei das Aufkleben der PV-Paneele die simple Variante darstellt. Die Verbindung kann ohne Werkzeug hergestellt werden und ein Arbeiter kann dies in wenigen Minuten pro Paneel durchführen. Somit ist das Aufkleben die Ideallösung und bekommt 10 Punkte. Die hinterkühlte Variante ist im Vergleich dazu aufwändiger aber trotzdem noch von einem Arbeiter alleine durchführbar. Der Vorteil gegenüber dem Aufkleben ist, dass sich die Paneele einfacher ablösen lassen. Komplexer in der Konstruktion ist das Anbringen der Befestigung auf dem Wagenkasten. Er darf dadurch nicht beschädigt werden und die Dichtheit muss weiterhin gewährleistet sein. Zusätzlich muss ein Nachweis nach DIN EN 12663-1 erbracht werden, welcher beweist, dass die Befestigung den Belastungen, die durch die Fahrdynamik entstehen, stand halten kann. Durch den Mehraufwand gegenüber dem Aufkleben wird die hinterkühlte Variante mit 7 Punkten in der NWA bewertet.

Leistung Laut Su (siehe [42, S.6]) ist der Unterschied zwischen einer geringen bis kaum vorhandenen und einer guten natürlichen Konvektion gering. In seinen Versuchen zeigt er, dass die Effizienz von 24% auf 20% sinkt. Damit ergibt sich ein Unterschied von 4 Prozentpunkten. Diese 4 Prozentpunkten entsprechen bei den Solarpaneelen WS-100FX (siehe Tabelle 3.5) mit einem Wirkungsgrad von 20% einer Reduktion auf 19,2%. Zentgraf (siehe [52]) beschreibt den Vorteil der erzwungenen Konvektion gegenüber der natürlichen Konvektion. In seiner Studie kam es zu Unterschieden von über 17 Prozentpunkten. Damit würde sich der Modulwirkungsgrad des WS-100FX von 20% auf 16,6% verringern. Die hinterlüftete Variante wird im Gegensatz zu der aufgeklebten Variante auf beiden Seiten belüftet und weist daher eine leicht höhere Effizienz auf. Der Unterschied fällt allerdings

nur gering aus, da sich der Zug mit maximal 5 km/h fortbewegt. Da beide Varianten in etwa gleich viel an Leistung verlieren, wird die hinterlüftete Variante als befriedigende Lösung mit 5 Punkten bewertet und die aufgeklebte Variante als ausreichende Lösung mit 4 Punkten. [42][52]

Gewicht Wie schon in Kapitel 3.2.2 beschrieben, ist das Gewicht ein entscheidender Faktor. Dies wurde auch mit dem in Tabelle 6.1 durchgeführten paarweisen Vergleich bestätigt. Das Aufkleben der Solarpaneele verursacht kein zusätzliches Gewicht und ist somit die Ideallösung mit 10 Punkten. Bei der hinterkühlten Variante müssen zusätzliche Elemente angebracht werden, um den Abstand konstant zu halten und die Paneele zu fixieren. Mit modernen Aluminiumlegierungen lässt sich das zusätzliche Gewicht auf ein Minimum beschränken und stellt somit eine sehr gute Lösung dar, die auf der Werteskala 8 Punkten entspricht.

Tabelle 6.2: NWA der Befestigung

Kriterium	max Punkte	Gewichtung g_i	Lösungsvarianten			
			hinterkühlt		geklebt	
			w_{i1}	wg_{i1}	w_{i2}	wg_{i2}
Aufwand	10	0,17	7	1,19	10	1,7
Leistung	10	0,33	5	1,65	4	1,32
Gewicht	10	0,5	8	4	10	5
Wertigkeit				0,68		0,802

NWA Aus der NWA, in Tabelle 6.2, geht hervor, dass die Variante mit den geklebten Modulen für die gesetzten Anforderungen die bessere Alternative darstellt. Sie kommt auf eine Wertigkeit von 0,802, im Gegensatz zu 0,68 für die hinterkühlte Variante

Volumen Zusatzsysteme

Für die in Kapitel 6.1.4 beschriebenen Energiespeicher und den benötigten Wandler für die Einspeisung des elektrischen Stromes in das interne 110 V Netz muss der Bauraum festgelegt werden. Anhand der in der Literatur angegebenen Energiedichten und -volumina, kann eine Abschätzung des Bauraumes und des Gewichtes erfolgen (siehe Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4). Alle Systeme sind Standardprodukte, welche nach Verwendungszweck zusammengestellt werden. Da keine genaueren Informationen über Einbauverhältnisse zur Verfügung stehen, werden keine dezidierten Produkte angegeben.

Tabelle 6.3: Typische Energiedichte für Lithium-Ionen Akkus und Supercaps [41, S.39,180,265][6, S.38][43]

Energiespeicher	Energiedichte	
	[kW/m ³]	[W h/kg]
Akku	300	180
Supercap	10	4

Wandler Der Wandler, auch Wechselrichter genannt, ist ein weit verbreitetes Produkt und wird für den jeweiligen Verwendungszweck angepasst. Die maximale Leistung der PV-Anlage ergibt sich aus der Anzahl der Paneele mal der nominellen Leistung je Paneel. In Kapitel 6.1.4 ist die Anzahl der Paneele angegeben und aus Tabelle 3.11 kann die nominelle Leistung je Paneel abgelesen werden. Die maximale Leistung aller Paneele ist dementsprechend (Formel 6.5):

$$P_{max} = 32 * 100 \text{ W} = 3,2 \text{ kW} \quad (6.5)$$

Für die Leistung von nominell maximal 3200 W ist ein Bauraum kleiner als 0,1 m³ nötig. Das Gewicht des Wandlers beträgt unter 25 kg. [12]

Tabelle 6.4: Massen und Volumina für die Nebenfunktionen

Komponente	Masse		Volumen	
	[kg]	[dm ³]	[kg]	[dm ³]
Wandler	20	10		
Akku	4	4		
Supercap	22	7		

6.2 Bewerten des Entwurfs unter realen Einsatzbedingungen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde ein Entwurf für das PV-System erarbeitet. Nun soll dieser Entwurf unter Betrachtung der Anforderungen und Bedingungen bewertet werden.

6.2.1 Leistung pro Zug

Die erbrachte Leistung pro Zug hängt von der vorhandenen Fläche, dem Wirkungsgrad der PV-Anlage und der Sonneneinstrahlungsstärke ab. In Kapitel 4.6 ist beschrieben, wie viel Fläche für eine PV-Anlage am Zug vorhanden ist und wie viel davon für die Solarstrom Erzeugung genutzt werden kann. Die nominelle Leistung der Solarkollektoren ist in Kapitel 3.3.4 aufgeführt. Werden diese Werte nun mit den Erkenntnissen aus dem Abschnitt 2.2.4 berechnet, erhält man den produzierten Solarstrom. In Tabelle 6.5 sind die benötigten Annahmen und Werte für die Berechnung aufgeführt.

Tabelle 6.5: Benötigte Werte für die Berechnung der Leistung eines Zuges in Riad

Fläche	A_W	17,87	m^2
Sonneneinstrahlung	E_{Ges}	600	W/m^2
Temperatur	$t_{\text{außen}}$	40	$^{\circ}\text{C}$
	t_{STC}	25	$^{\circ}\text{C}$
Wirkungsgrad	η_{Panneel}	20	%

Bei vier Waggons pro Fahrzeug errechnet sich die Gesamtfläche nach Gleichung 6.6.

$$A_{\text{ges}} = A_W * 4 = 71,48 \text{ m}^2 \quad (6.6)$$

Die Leistung wird berechnet, indem die gesamte Fläche A_{ges} mit der Sonneneinstrahlung E und dem Wirkungsgrad der PV-Anlage multipliziert wird.

$$P = A_{\text{ges}} * E_{\text{ges}} * \eta_{\text{Panneel}} = 8578 \text{ W} \quad (6.7)$$

Die Photovoltaikmodule haben eine Temperaturabhängigkeit, welche berücksichtigt werden muss. Diese ist in Tabelle 3.11 aufgezeichnet und wird als „Temperaturkoeffizient“ mit dem Formelzeichen t_{Pcoeff} bezeichnet. Anhand von η_{Temp} kann bestimmt werden, um wie viel Prozent der Wirkungsgrad auf Grund des Temperaturkoeffizienten sinkt.

$$\eta_{\text{Temp}} = (t_{\text{außen}} - t_{\text{STC}}) * t_{\text{Pcoeff}} = -5,7\% \quad (6.8)$$

Aus Formel 6.7 und 6.8 kann nun die effektiv gewonnene Leistung berechnet werden.

$$P_{\text{eff}} = P * (1 + \eta_{\text{Temp}}) = 8090 \text{ W} \quad (6.9)$$

Die PV-Anlage kann nach Berücksichtigung aller Wirkungsgrade und physikalischen Einschränkungen eine Leistung von $P_{\text{eff}} = 8090 \text{ W}$ erzeugen. Diese Leistung kann verwendet werden, um Verbraucher zu betreiben.

6.2.2 Kosten

Die Kosten sind in einer so frühen Phase nur abschätzbar, da sie stark abhängig von Stückzahlen, Lieferzeitraum, Lieferant und genauen Anforderungen sind. Trotzdem ist eine überblicksmäßige Betrachtung der Kosten zweckmäßig und sinnvoll. Mit der Auflistung der zu erwartenden Kosten können die Kostentreiber ausfindig gemacht werden. Im Nachfolgenden werden die verschiedenen Komponenten sowie deren Kosten aufgelistet. Hierbei werden keine Mengenvorteile oder ähnliche Vorteile betrachtet. Die meisten Werte sind aus der Literatur entnommen. Aufgrund dessen darf das Ergebnis nur größenordnungsmäßig interpretiert und nicht als genaue Kostenkalkulation betrachtet werden.

PV-Anlage

Die Kosten für die Elemente der PV-Anlage stellen die größte Ausgabe dar. Sie besteht aus 4 Elementen: die PV-Paneele, dem Wandler, die Befestigung und die Verkabelung. Die Tabelle 6.6 gibt einen Überblick der Anteile an den Kosten aller Komponenten für ein

PV-Standardsystem. Die Befestigung wird im Gegensatz zu Standardsystemen weniger als 1 Prozent betragen, da die Kosten für das Aufkleben vernachlässigbar gering sind.

Tabelle 6.6: Kostenanteile für PV-Standardsysteme [49, S.63][37, S.24]

Komponente	Anteil [%]
PV-Modul	61 - 67
Wandler	05 - 24
Befestigung	11 - 22
Kabel / Anschluss	05 - 06

Solarzelle Die Solarzellen sind das wichtigste Element der PV-Anlage und sollten einen möglichst hohen Wirkungsgrad haben. Die dafür ausgewählten Paneele sind am neuesten Stand der Technik und folglich hochpreisig. Zur Anwendung kommen monokristalline Photovoltaik Module des Herstellers Wattstunde. In Tabelle 3.11 sind die Daten der Paneele aufgelistet.

Tabelle 6.7: Preise für Solarpaneele[49, S.3][39]

	Preis [€/W]	Kosten pro Zug [€]
Literatur	2	–
WS-100FX	2,5	32 000

In Tabelle 6.7 sind die Kosten pro Watt aufgelistet und die Gesamtkosten für die Bestückung eines Metro-Fahrzeuges. Laut Schumann (vgl. [37]) sind die PV-Paneele für 67% der Kosten verantwortlich. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Gesamtkosten vom 32 000 € einen Anteil von 67% nach Tabelle 6.6 darstellen.

Wandler Der Wandler ist simpler aufgebaut als für Standardsysteme nötig, da es nur ein Gleichspannungswandler ist und somit kein Frequenzumrichter benötigt wird. Daher kann zur Berechnung ein niedriger Wert aus Tabelle 6.6 gewählt werden. Bei 5% beträgt der gerundete Kostenanteil für den Wandler 2400 €.

Kabel Die Verlegung der Kabel und das Anschließen aller Teile und das Zusammenschließen zu einem System wird in Tabelle 6.6 mit durchschnittlich 5,5% angenommen und entspricht daher Kosten in Höhe von 2700 €.

Speicher System

Moderne Speichersysteme die den Forderungen aus der Anforderungsliste genügen sind komplex und dadurch teuer. Sie können speziell für den Einsatzzweck aus Standardkomponenten zusammgebaut werden, um bestmöglich auf Platzbedingungen und Gewichtsbeschränkungen Rücksicht zu nehmen. Da keine genaueren Informationen über Einbauverhältnisse

zur Verfügung stehen, werden auch hier keine dezidierten Produkte angegeben.

Akkumulator Die Akkumulatoren auf Basis der Lithium-Ionen Technologie haben in den letzten Jahren einen enormen Preisverfall erlebt. Die verschiedenen Quellen geben einen Bereich von 145 \$/kWh bis 250 \$/kWh an. Damit werden Kosten für den Akkumulator von 375 € pro Waggon und 1500 € für den gesamten Zug angenommen. Dabei wird der Euro dem Dollar wertmäßig gleichgesetzt. [31, S.10][43][16]

Supercap Die modernen Superkondensatoren haben erst in den letzten Jahren an Kapazität gewonnen und sind nun wirtschaftlich einsetzbar. Sowohl die Technologie als auch der Kostenfaktor unterliegen noch immer einer starken Entwicklung. Verschiedene Quellen geben einen Preis von 2400 \$/kWh bis 10 000 \$/kWh an. Damit werden Kosten pro Metro-Fahrzeug in Höhe von 1000 € angenommen. [32][43][26]

Konstruktion

Die Konstruktion ist bei aufgeklebten PV-Paneeelen nicht vorhanden, da die Paneele direkt auf den Waggon geklebt werden. Somit fallen keine Kosten für die Konstruktion an.

Gesamt

Eine Auflistung der gesamten Kosten ist in Tabelle 6.8 dargestellt.

Tabelle 6.8: Gesamte Kosten für einen Zug mit aufgeklebten Solarpaneelen

Komponente	Preis [€]
PV	32 000
Wandler	2400
Kabel	2700
Akku	1500
Supercap	1000
Gesamt	39 600

KAPITEL 7

Entwurf beurteilen

Nachfolgen werden alle Systeme Beurteilt, ob sie mithilfe der Photovoltaikanlage betrieben werden können. Weiters werden verschiedene Möglichkeiten gegeben einen Fahrbetrieb bei Stromausfall zu realisieren.

Im Falle eines Ausfalls der dritten Schiene müssen einige essentielle Systeme weiterhin mit Strom versorgt werden. Je nach Betreiber kann die geforderte Zeit zwischen 30 und 120 Minuten liegen. Dabei wird das Licht für den Fahrgastraum und eine rudimentäre Belüftung für die ersten 300 Minuten betrieben. Die Onboard Systeme werden aus der Batterie 1 bis 2 Stunden aufrecht erhalten und als letztes werden die Positionslichter des Zuges abgeschaltet.

7.1 Systeme auf Eignung überprüfen

Die Eingangs erwähnten Systeme - Klimaanlage, konventioneller Motor und Last-Mile-Drive - haben unterschiedliche Energieaufnahmen und Eignen sich daher nicht alle für den Betrieb mit der Photovoltaikanlage.

7.1.1 Klimaanlage

Die Klimaanlage ist im arabischen und asiatischen Raum ein wichtiges System. Es wird weit aus öfter benutzt als in europäischen Metro-Fahrzeugen. Dies resultiert auch aus den höheren Temperaturen und der größeren Anzahl an heißen Tagen.[4]

Die verwendete Klimaanlage ist in Kapitel 4.2 beschrieben. Auch im niedrigsten Leistungsfall nach Tabelle 4.6 mit 17,5 kW pro Waggon ist die benötigte Leistung der Klimaanlage weitaus größer als die erzeugte Leistung der PV-Anlage.

7.1.2 Schleichfahrt mit konventionellen Motor

Der Energieverbrauch des konventionellen Antriebs ist in Kapitel 4.3 beschrieben. In Tabelle 4.16 ist die benötigte Energie aufgeführt.

Keines der Szenarien ist mit der erbrachten Leistung machbar. Die erforderliche Leistung ist um den Faktor 4-10 größer, als die erbringbare Leistung.

7.1.3 Schleichfahrt mit Last-Mile-Drive

Der Last-Mile-Drive ist wie in Kapitel 4.4 beschrieben ein kleiner Elektromotor mit einem sehr hoch übersetzten Getriebe. Damit ist es möglich, das Metro-Fahrzeug mit geringer

Geschwindigkeit zu bewegen. Für das Bewegen des Inspiro-Zuges sind bei Vollbeladung zwei dieser Antriebe notwendig. Auch wenn dieser Fall eher selten auftreten wird, muss er einkalkuliert werden. Damit ergibt sich laut Tabelle 4.17 für den Last-Mile-Drive eine maximale Leistungsaufnahme von 18 kW.

Auch diese erforderliche Leistung ist momentan noch zu hoch für die zur Verfügung stehende Fläche und den Wirkungsgrad der PV-Anlage.

7.2 Fahrbetrieb bei Stromausfall

Die Bewegung des Fahrzeuges mittels konventionellem Antrieb oder Last-Mile-Drive bei einem Ausfall der Stromversorgung birgt Gefahren. Wie in Kapitel 2.4 erläutert bricht bei einem Stromausfall auch die Kommunikation mit der zentralen Leitstelle zusammen. Die Fahrzeuge kennen die Position der anderen Fahrzeuge nicht. Aus diesem Grund ist die Gefahr einer Kollision hoch.

7.2.1 In Fahrtrichtung

Bewegen sich alle Züge in eine Richtung, ist die Gefahr einer Kollision minimal.

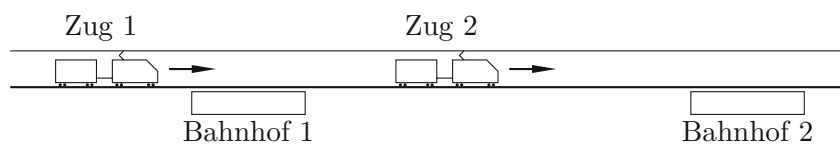


Abbildung 7.1: Fahrbetrieb in Fahrtrichtung

Die Abbildung 7.1 zeigt den Fall, bei dem alle Fahrzeuge in die gleiche Richtung fahren. In diesem Fall entstehen keine Probleme.

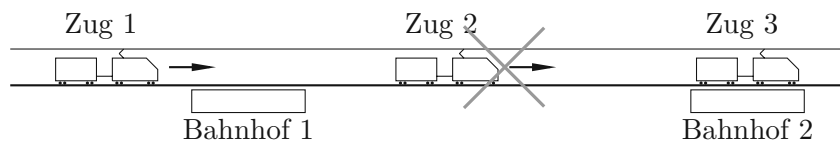


Abbildung 7.2: Fahrbetrieb in Fahrtrichtung mit Störung

Probleme können auftreten, wenn zusätzlich ein schadhaftes Fahrzeug (Zug 3) auf der Strecke oder in einem Bahnhof steht (siehe Abbildung 7.2). Nun ist es Zug 2 nicht mehr möglich in den Bahnhof 2 einzufahren.

7.2.2 Beliebige Fahrtrichtung

Fahren in beliebige Richtung hätte den großen Vorteil, dass die Strecke bis zum nächsten Bahnhof immer maximal die Hälfte des Streckenabschnittes ist. Zusätzlich kann das Fahrzeug den Weg nehmen, welcher eine negative Steigung hat. Damit kann die benötigte Leistung minimiert werden. Da ein Zug selbstständig entscheiden kann, in welche Richtung er fährt, darf er nur mit zwei Waagen in den Bahnhof einfahren. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass Züge von beiden Richtungen kommen können, ohne sich gegenseitig zu behindern.

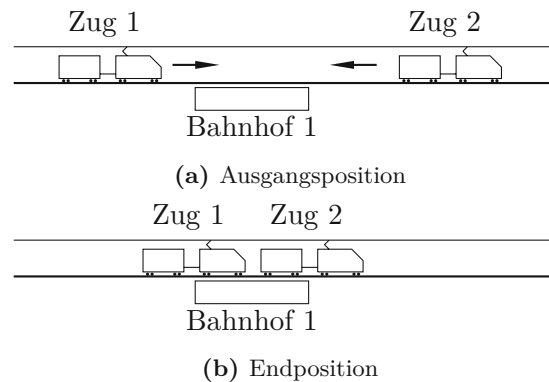


Abbildung 7.3: Fahrbetrieb mit beliebiger Fahrtrichtung

Die Passagiere werden über den Waggon evakuiert, der zur Gänze am Bahnsteig steht. Die Abbildung 7.3 zeigt ein solches Szenario. Beide Züge fahren in den gleichen Bahnhof ein.

7.3 Ergebnis

Da der Energiebedarf für die Systeme Klimaanlage und der konventionellen Motoren zu hoch ist, sind sie nicht geeignet um sie mit der PV-Anlage zu betreiben. Der Last-Mile-Drive kann bei einer Vollbeladung, auch nicht zuverlässig betrieben werden. Unter anderen Beladungszuständen ist dies aber durchaus möglich.

Für den Fahrbetrieb wird ein System mit beliebiger Fahrtrichtung als die effizientere Variante betrachtet. Auch wenn diese einen höheren Implementierungsaufwand bedeutet, überwiegen die Vorteile dieses Systems.

KAPITEL 8

Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Photovoltaik auf Metro-Fahrzeugen ist ein umfangreicher und interessanter Ansatz, mit dessen Hilfe es möglich ist, verschiedene Situationen zu bewältigen. In der Arbeit wurde der theoretische Einsatz von Photovoltaik auf einem Metro-Fahrzeug angedacht und auf Sinnhaftigkeit überprüft. Dabei dient die Metrostrecke in Riad, Saudi Arabien, als Untersuchungsgebiet. Ausgehend von der geografischen Lage und den technischen Daten von Metro-Fahrzeugen wurde eine technische Umsetzung der Konstruktion und der Integration der PV-Anlage in das System Schienenfahrzeug mit den Methoden nach Pahl&Beitz ausformuliert. Am Beginn stand die Auswahl der PV-Module mithilfe der Nutzwertanalyse und das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Dies hat die Grundlage geschaffen, um einen fundierten Produktentwicklungsprozess durchzuführen. Dabei wurde das System PV-Anlage im Schritt Konzipieren in eine Funktionsstruktur zerlegt und dafür die passenden Wirkstrukturen gefunden. Diese wurden in späterer Folge mit Hilfe der VDI-2225 bewertet und zu einer prinzipiellen Lösung zusammenführt. Darauf folgte das Entwerfen mit der Ausgestaltung der Hauptfunktionsträger und Nebenfunktionen. Abschließend fand eine Bewertung des Entwurfes mit den vorher, definierten Anforderungen statt.

Die größte Hürde für eine sinnvolle Verwendung in der Praxis ist einerseits der zu geringe Wirkungsgrad der Photovoltaik Module und andererseits das begrenztes Angebot an Fläche auf einem Metro-Fahrzeug. Wegen beider Faktoren kann nicht für jedes System ausreichend Leistung erzeugt werden. Sowohl die integrierte Klimaanlage, als auch der konventionelle Antrieb brauchen mehr Leistung, als ein vierteiliges Metro-Fahrzeug mit Photovoltaik Modulen auf dem Dach erzeugen kann. Sowohl der Antrieb als auch die Klimaanlage wurden für maximale Leistung konstruiert und ausgelegt und nicht um möglichst sparsam zu sein. Der Last-Mile-Drive hingegen wurde für einen sparsamen Betrieb ausgelegt. Somit ist es möglich, einen Großteil der Situationen mit der Kombination Photovoltaik und Last-Mile-Drive zu bewältigen.

Die Konstruktion einer optimalen Photovoltaikanlage auf einem Metro-Fahrzeug stößt schnell an ihre Grenzen. Die Optimierungen, die aus dem Konstruktionsprozess hervorgehen, sind in der Praxis oftmals nicht umsetzbar, da es zu starke Einschränkungen gibt, die das System Schienenfahrzeug vorgibt. Die größte Einschränkung ist der Platz zwischen Waggon

und Lichtraumprofil. Auf Grund dessen kann unter anderem keine Leistungssteigerung durch das Mitführen der Photovoltaik Paneele erfolgen. Diese Problematik kann verringert werden, wenn die Paneele von Anfang an in das Metro-Fahrzeug eingeplant werden und dadurch Platz geschaffen werden kann.

Genauso wie es mit dem Last-Mile-Drive gelungen ist, ein vorhandenes System zum Gebrauch mit weniger Leistung zu entwickeln, ist es auch möglich, andere bestehende Systeme neu zu gestalten und damit eine Möglichkeit zu schaffen, Photovoltaik auf Metro-Fahrzeugen effizient einzusetzen.

Trotz all dieser Entwicklungsmöglichkeiten ist eine Photovoltaik-Anlage für Notsituationen noch nicht reif für den Einsatz in einem Serienprodukt Metro-Fahrzeugen.

Literatur

1. *ASTM E490 - 00a(2014):Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables*. 2014. DOI: [10.1520/e0490](https://doi.org/10.1520/e0490) (siehe S. 3).
2. *ASTM G-173-03: Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface*. 2012. DOI: [10.1520/g0173-03r12](https://doi.org/10.1520/g0173-03r12) (siehe S. 3).
3. AL-BASSAM, LAITH, KHALED AL-HAMDI und AHMED ABU-ELSEOUDI: „Tracking transmission system performance within Saudi Electricity Company (SEC) network“. *CIREC* (2007), Bd. Session 3(Paper No 0022): S. 5 (siehe S. 18).
4. BAUMERT, KEVIN und SELMAN MINDY: *Heating and Cooling Degree Days*. World Resource Institute, 2003 (siehe S. 85).
5. BLANC, PHILIPPE, BENOÎT GSCHWIND, MIREILLE LEFÈVRE und LUCIEN WALD: „The HelioClim project: Surface solar irradiance data for climate applications“. *Remote Sensing* (2011), Bd. 3(2): S. 343–361 (siehe S. 13).
6. BURKE, ANDREW: *Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology*. 2000 (siehe S. 81).
7. CEHAK, KONRAD: *Allgemeine Meteorologie*. Universitäts- Lehr- und Studienbücher : Naturwissenschaften. Wien: Prugg, 1978 (siehe S. 3, 4).
8. DIN: *DIN 25003; Systematik der Schienenfahrzeuge – Übersicht, Benennungen, Definitionen*. Sep. 2001 (siehe S. 19).
9. DIN: *DIN EN 62290; Bahnanwendungen - Betriebsleit- und Zugsicherungssysteme für den städtischen schienengebundenen Personennahverkehr*. Juni 2015 (siehe S. 21).
10. FENDRICH, LOTHAR [HRSG.]: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2., neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2013 (siehe S. 19, 22).
11. FILIPOVIĆ, ZARKO: *Elektrische Bahnen; Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. 5. überarb. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2015. DOI: [10.1007/b137584](https://doi.org/10.1007/b137584) (siehe S. 45–49).
12. *Fronius*. <http://www.fronius.com> (siehe S. 74, 81).
13. FRONIUS: *Spannungsbedingte Leistungsverluste bei PV Modulen*. Juli 2011 (siehe S. 74).

14. HÉCTOR D., ABRUÑA, YASUYUKI KIYA und JAY C. HENDERSON: „Batteries and electrochemical capacitors“. *Phys. Today* (Dez. 2008), Bd. 61(12): S. 43–47. DOI: [10.1063/1.3047681](https://doi.org/10.1063/1.3047681) (siehe S. 72, 74).
15. IHME, JOACHIM: *Schienefahrzeugtechnik*. Springer Nature, 2016. DOI: [10.1007/978-3-658-13541-6](https://doi.org/10.1007/978-3-658-13541-6) (siehe S. 19).
16. JENS, LUBBADEH: *Volle Ladung*. Feb. 2016 (siehe S. 84).
17. JÜRGEN, KRIMMLING: *Einführung Verkehrstelematik*. 2016 (siehe S. 21).
18. KINSEY, G. S., D. H. MEAKIN, C. SCHMID, C. FERRARA und S. STECKLUM: „Results of the first round of the Photovoltaic Durability Initiative“. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013 IEEE 39th*. Juni 2013: S. 1571–1574. DOI: [10.1109/PVSC.2013.6744445](https://doi.org/10.1109/PVSC.2013.6744445).
19. KLIEN, HORST [HRSG.] und DUDEN-SCHRIFTLÉITUNG BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT Leipzig: *Duden; Rechtschreibung der deutschen Sprache und der Fremdwörter; Der große Duden*. Lizenzausg. für Österreich, 13. Aufl., [Nachdr.] Nebent. Der große Duden; Hier auch der Neudr. von 1950. Wien: Globus-Verl., 1950 (siehe S. 19).
20. KÜHNAPFEL, JÖRG B.: *Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb*. 1. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. DOI: [10.1007/978-3-658-05509-7](https://doi.org/10.1007/978-3-658-05509-7) (siehe S. 28, 29).
21. LEFÈVRE, M., A. OUMBE, P. BLANC, B. ESPINAR, B. GSCHWIND, Z. QU, L. WALD, M. SCHROEDTER-HOMSCHÉIDT, C. HOYER-KLICK, A. AROLA, A. BENEDETTI, J. W. KAISER und J.-J. MORCRETTE: „McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions“. *Atmospheric Measurement Techniques* (Sep. 2013), Bd. 6(9): S. 2403–2418. DOI: [10.5194/amt-6-2403-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013) (siehe S. 13).
22. LEO.ORG: *LEO.org: zweisprachiges Online-Wörterbuch*. [Online; Stand 19. Jänner 2017]. 2016 (siehe S. 19).
23. LEWIS, PETER: *Last mile drive – Variable train lengths for passenger coaches. (Siemens)*. Sep. 2016 (siehe S. 51).
24. MERTENS, KONRAD: *Photovoltaik; Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis*. München, 2013 (siehe S. 2–8, 12).
25. NAUMANN, VOLKER, TORSTEN GEPPERT, STEPHAN GROSSER, DANIEL WICHMANN, HANS-JOACHIM KROKOSZINSKI, MARTINA WERNER und CHRISTIAN HAGENDORF: „Potential-induced Degradation at Interdigitated Back Contact Solar Cells“. *Energy Procedia* (2014), Bd. 55. Proceedings of the 4th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2014): S. 498–503. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.08.015>.
26. NICHOLAS, BROWN: *Cheaper Ultracapacitors for Electric Vehicles*. März 2011 (siehe S. 84).

27. OSTADI, A. und M. KAZERANI: „A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery #x2013;Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus“. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (Okt. 2015), Bd. 64(10): S. 4449–4460. DOI: [10.1109/TVT.2014.2371912](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2371912) (siehe S. 62).
28. PACHL, JÖRN: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. Springer Nature, 2013. DOI: [10.1007/978-3-8348-2587-2](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2587-2) (siehe S. 19–21).
29. PAHL, GERHARD [BEGR.], WOLFGANG [BEGR.] BEITZ und JÖRG [HRSG.] FELDHUSEN: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre; Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung; Konstruktionslehre*. 8., vollst. überarb. Aufl. Nebent. Konstruktionslehre. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2013 (siehe S. 28, 29, 36).
30. PAHL, GERHARD, WOLFGANG BEITZ, JÖRG FELDHUSEN und KARL-HEINRICH GROTE: *Konstruktionslehre; Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (siehe S. 24–26, 30, 32, 33, 39, 42, 43, 54–57, 59, 62, 68–71, 74).
31. PAUL, DONOHOO-VALLETT: *Revolution...Now - The Future Arrives for Five Clean Energy Technologies – 2016 Update*. Sep. 2016 (siehe S. 84).
32. PETER, HARROP: *Supercapacitors replace batteries*. Apr. 2012 (siehe S. 84).
33. QUASCHNING, VOLKER: *Regenerative Energiesysteme; Technologie - Berechnung - Simulation ; mit 119 Tabellen und einer DVD*. 9., aktualisierte u. erw. Aufl. München: Hanser, 2015 (siehe S. 23).
34. RAILWAY TECHNOLOGY: *Riyadh Metro, Saudi Arabia*. <http://www.railway-technology.com/projects/-riyadh-metro-saudi-arabia>. [Online; Stand 20. August 2016]. 2016 (siehe S. 51).
35. ROTH, KARLHEINZ: *Kataloge; Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. 2. Aufl., wesentlich erw. u. neu gest. Berlin [u.a.]: Springer, 1994 (siehe S. 59).
36. SCHENK: *Sternpyranometer Type 8101, 8102*. <http://www.schenk.co.at> (siehe S. 12).
37. SCHUMANN, SVEN; *Montagegerechte Gestaltung eines Befestigungssystems für Photovoltaikgeneratoren*. 2004. DOI: [10.14279/depositonce-938](https://doi.org/10.14279/depositonce-938) (siehe S. 83).
38. SIEMENS: *Riyadh Metro, 74 driverless two- and four car metro trains*. Siemens AG. Nonnendammallee 101 13629 Berlin, 2016 (siehe S. 21, 41, 48).
39. SOLARKONTOR: *Preis Solarkontor WS-100FX*. <https://solarkontor.de/100w-solarmodul-flexibel>. 2016 (siehe S. 83).
40. STEIERWALD, GERD, HANS DIETER KÜNNE und WALTER VOGT: *Stadtverkehrsplanung; Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin, Heidelberg, 2005 (siehe S. 19).
41. STERNER, MICHAEL und INGO STADLER: *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Nature, 2014. DOI: [10.1007/978-3-642-37380-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37380-0) (siehe S. 72, 74, 81).

42. SU, YAXIN, BINGTAO ZHAO, FEINING LEI und WENYI DENG: „Numerical modelling of effect of channel width on heat transfer and ventilation in a built-in PV-Trombe wall“. *Journal of Physics: Conference Series* (Sep. 2016), Bd. 745: S. 032069. DOI: [10.1088/1742-6596/745/3/032069](https://doi.org/10.1088/1742-6596/745/3/032069) (siehe S. 76, 77, 79, 80).
43. *Supercap - Battery University* (siehe S. 81, 84).
44. VDI: *VDI2221; Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Mai 1993 (siehe S. 55).
45. VDI: *VDI2223; Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Jan. 2004 (siehe S. 68).
46. VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN, [HRSG.]: *VDI-Wärmeatlas*. Springer Science, 2013. DOI: [10.1007/978-3-642-19981-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3) (siehe S. 75–77).
47. WATTER, HOLGER: *Regenerative Energiesysteme; Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme*. 4., überarb. u. erw. Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015 (siehe S. 23).
48. WATTSTUNDE: *Monokristallines Semi-Flexibles Photovoltaikmodul; Wattstunde WS-100FX*. MEL-System KG (GmbH & Co). Lüneer Rennbahn 28 - 21339 Lüneburg, 2016 (siehe S. 38).
49. WESSELAK, VIKTOR und SEBASTIAN VOSWINCKEL: *Photovoltaik; Wie Sonne zu Strom wird*. Berlin, Heidelberg, 2012 (siehe S. 3–5, 25, 27, 83).
50. WIKIPEDIA: *Riad* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 5. Oktober 2016]. 2016 (siehe S. 15).
51. WIKIPEDIA: *U-Bahn Riad* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 20. August 2016]. 2016 (siehe S. 16).
52. ZENTGRAF, EBERHARD: *Experimente mit verschiedenen Kühlungsvarianten an monokristallinen Standard-PV-Modulen*. Techn. Ber. TEC-Institut, Juli 2009 (siehe S. 79, 80).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Abstand der Sonne und Erde mit der Hüllkugel des Sonnenlichts	2
2.2	Spektrum der Sonneneinstrahlung	3
2.3	Air Mass	4
2.4	Globalstrahlung	5
2.5	Sonnenstand mit eingezeichnetem Azimut- und Elevationswinkel	6
2.6	Anstellwinkel	7
2.7	Nachführung	8
2.8	Tagesverlauf Sonneneinstrahlung in Wien am 27.07.2005	9
2.9	Unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung an verschiedenen Tagen	10
2.10	Pilotanlage Siemens Werksgelände Leberstraße Wien	11
2.11	Aufbau eines Pyranometer	12
2.12	Verschiedene Verläufe der Sonneneinstrahlung in Wien am Werksgelände Leberstraße	13
2.13	Satellitenmessungen verglichen mit Pilotanlage	14
2.14	Karte von Saudi-Arabien und der Hauptstadt Riad	15
2.15	Vergleich der Satellitendaten für Riad und Wien	17
2.16	Kennwerte der Ausfälle im SEC-Netzwerk 2005	18
2.17	Fixed Block Methode	20
2.18	Moving Block Methode	21
2.19	Dezentrale Bahnenergieversorgung	22
3.1	Punktebewertung aller Bewertungskriterien	27
3.2	Punktebewertung für die Kosten	33
3.3	Auswertungsdiagramm NWA	35
3.4	Bewertungsverfahren für die Nutzwertanalyse	35
3.5	Hauptabmessungen und Anordnung der 32 Module des Photovoltaikpaneels WS-100FX von Wattstunde	38
4.1	Kleinster Abstand zwischen Lichtraumprofil und Wagenkasten am Dach. . .	40
4.2	Metrofahrzeug in Riad mit vier Waggonen	41
4.3	Beschleunigungsraten	48
4.4	Weg Zeit Geschwindigkeitsdiagramm	50
4.5	Last-Mile-Drive	51

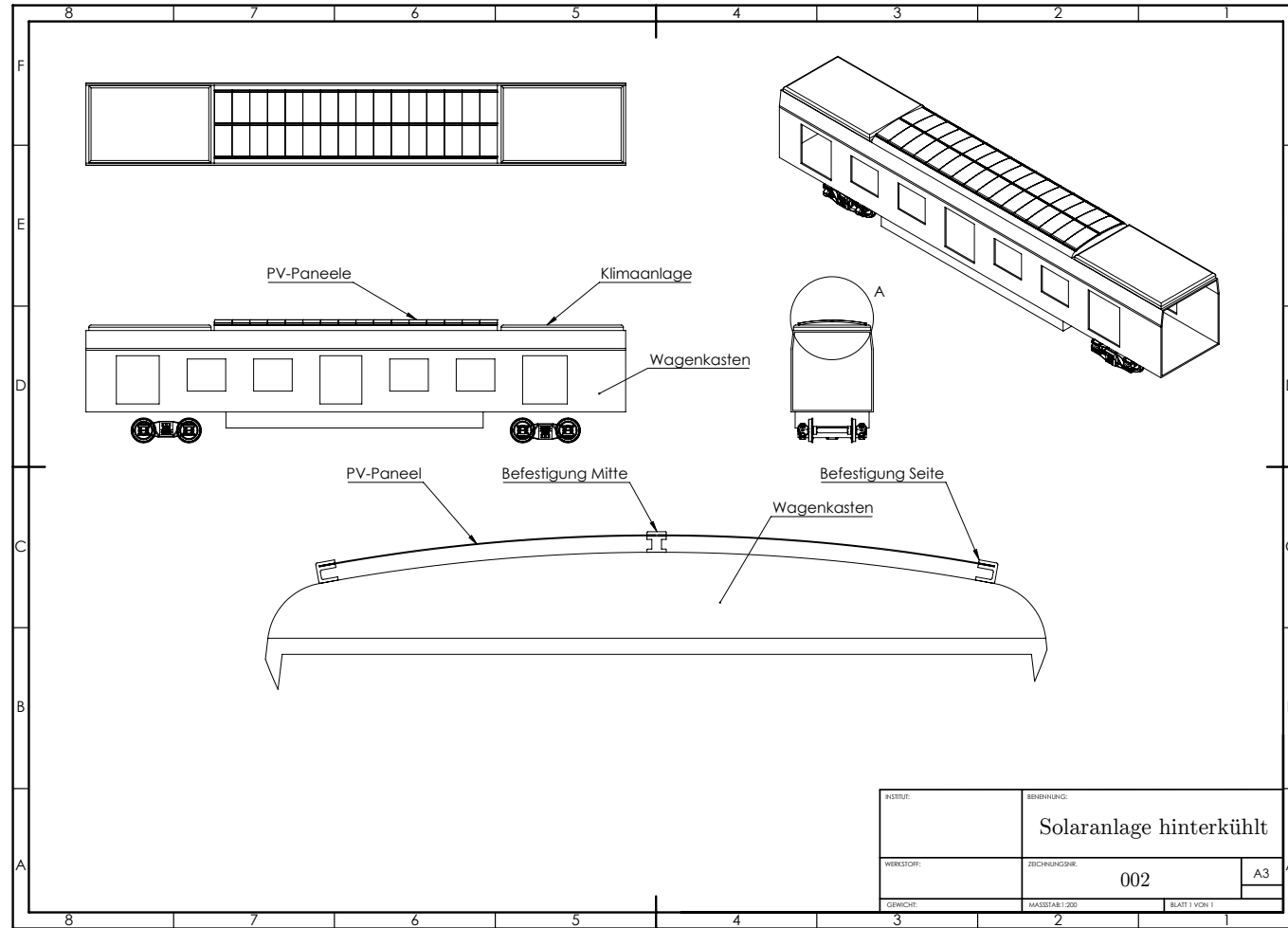
4.6	Kleinsten Abstand zwischen Lichtraumprofil und Wagenkasten am Dach. . .	52
4.7	Dachabschnitte	52
5.1	Arbeitsschritte Konzipieren	55
5.2	Gesamtfunktion mit Übersicht über die Eingangs- und Ausgangsgrößen . . .	57
5.3	Funktionsstruktur der PV-Anlage	58
5.4	Bewertung der Wirkstruktur nach VDI 2225	66
5.5	Prinzipielle Lösung der Phase Konzipieren	67
6.1	Hauptarbeitsschritte beim Entwerfen nach Pahl Beitz	69
6.3	Grobe Auslegung der PV-Paneele für eine Flächenmaximierung	72
6.4	Verschiedene Energiespeicher mit ihrer Energiedichte und Leistungsdichte .	73
6.7	Natürliche Konvektion	76
6.11	Isometrische Ansicht des Wagenkasten mit Solaranlage	79
7.1	Fahrbetrieb in Fahrtrichtung	86
7.2	Fahrbetrieb in Fahrtrichtung mit Störung	86
7.3	Fahrbetrieb mit beliebiger Fahrtrichtung	87

Tabellenverzeichnis

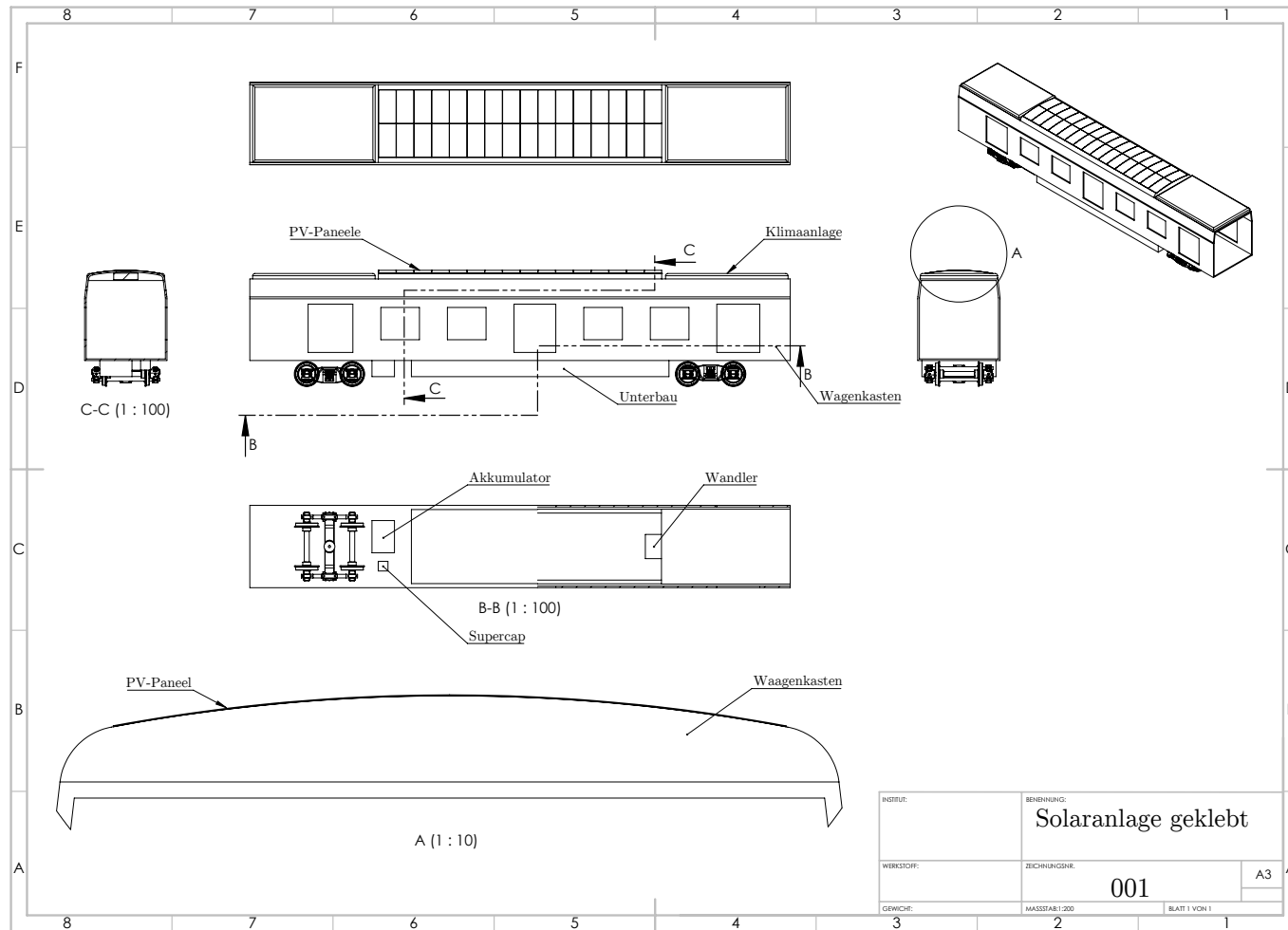
2.1	Technische Daten Sternpyranometer Type 8101 Schenk	12
2.2	Klimatabelle für Riad	16
2.3	Prozentuale Ursache für die Ausfälle SEC-Netzwerk 2005	18
3.1	Übersicht Technologien und ihrer Wirkungsgrade	23
3.2	Eigenschaften einer PV Anlage	25
3.3	Wertskala für die Nutzwertanalyse und VDI 2225 nach Pahl&Peitz	26
3.4	Paarweiser Vergleich	29
3.6	Tabelle für die Technische Bewertung	31
3.7	Wirtschaftliche Wertigkeit der Lösungsvarianten	34
3.8	Wertigkeit der Besten vier Lösungsvarianten nach dem diagonalen Bewertungsverfahren.	36
3.9	Wertigkeit der besten vier Lösungsvarianten nach dem Kreisringverfahren.	37
3.10	Gegenüberstellung der Gesamtwertigkeit nach dem Diagonalen- und Kreisringverfahren.	37
3.11	Technische Daten der WS-100FX Photovoltaik Module von Wattstunde	38
4.1	Technische Daten Fahrzeug Riad	41
4.2	Angaben die mindestens in einer Anforderungsliste dokumentiert werden müssen nach Pahl&Beitz	42
4.3	Kategorien zum Einteilen der Anforderungsliste nach Pahl und Beitz	42
4.4	Anforderungsliste nach Pahl&Beitz	43
4.5	Klimaanlagen Auslegungsprofil 1 (Außen- 38 °C, Innentemperatur 25 °C)	44
4.6	Klimaanlagen Auslegungsprofil 2 (Außen- 55 °C, Innentemperatur 32 °C)	44
4.7	Klimaanlagen Auslegungsprofil 3 (Außen- 45 °C, Innentemperatur 32 °C)	44
4.8	Einflüsse für die Fahrt eines Zuges und deren Vorzeichen bei verschiedenen Verhältnissen	45
4.9	Koeffizient k	46
4.10	Spurweitenkoeffizient K	46
4.11	Massenfaktor ξ	47
4.12	Wirkungsgrad Elektrischer Triebfahrzeuge	48
4.13	Der Zusammenhang zwischen Beschleunigung, Zeit und Widerstandskraft.	49
4.14	Neigungswinkel und die dazugehörigen Widerstandskräfte	49

4.15	Annahmen für die frei wählbaren Fahrbedingungen	50
4.16	Die notwendige Leistung mit $v = 5 \text{ km/h}$ und $a = 0,01 \text{ m/s}^2$ bei verschiedenen Neigungen und Kurvenradien.	50
4.17	Technische Daten Last-Mile-Antrieb Siemens	51
4.18	Fläche der unterschiedlichen Dachsektoren.	53
5.1	Morphologischer Kasten	60
5.3	Morphologischer Kasten nach der Auswahlliste mit Lösungsvarianten SEx (Strom erzeugen)	63
5.5	Ergebnisse der VDI-2225 für die Wirkstrukturen (SEx)	65
5.6	VDI Bewertung der Wikstruktur	66
5.7	Gegenüberstellung der Gesamtwertigkeiten (S) nach VDI-2225 für die Wikstrukturen	67
6.2	Nutzwertanalyse der Befestigung	80
6.3	Typische Energiedichte für Lithium-Ionen Akkus und Supercaps	81
6.4	Massen und Volumina für die Nebenfunktionen	81
6.5	Benötigte Werte für die Berechnung der Leistung eines Zuges in Riad	82
6.6	Kostenanteile für PV-Standardsysteme	83
6.7	Preise für Solarpaneele	83
6.8	Gesamte Kosten für einen Zug mit aufgeklebten Solarpaneelen	84

Anhang



Technische Zeichnung für die Anbringung der Solarpaneele mit hinterkühlung



Technische Zeichnung für die Anbringung der Solarpaneele ohne hinterkühlung