



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Sabrina Henning

Aufstellen eines Konzeptes zur Erhöhung des  
elektrischen Autarkiegrades für kleine Kommunen  
unter Maximierung erneuerbarer Energien

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Informations- und  
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Information and Electrical  
Engineering*

Sabrina Henning

Aufstellen eines Konzeptes zur Erhöhung des  
elektrischen Autarkiegrades für kleine Kommunen  
unter Maximierung erneuerbarer Energien

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstgutachter: Prof. Dr. -Ing. Michael Röther  
Zweitgutachter: Prof. Dr. -Ing. Volker Skwarek

Abgegeben am 16. April 2015

**Sabrina Henning**

## **Thema der Bachelorthesis**

Aufstellen eines Konzeptes zur Erhöhung des elektrischen Autarkiegrades für kleine Kommunen unter Maximierung erneuerbarer Energien

## **Stichworte**

Autarkie, Autarkiegrad, Energieeffizienz, Energieautarkie, Energieerzeugung, Demand-Side-Management, Regenerative Energien, Konventionelle Energieträger

## **Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit soll die Möglichkeit einer elektrischen Autarkiegraderhöhung durch erneuerbare Energien am Beispiel der Kommune Reinfeld untersucht werden.

Dazu wurden die technischen Daten der Stadt zusammengefasst und die Autarkiegrade einzelner Verbraucher analysiert. Abschließend wurden Möglichkeiten zur Erhöhung der autarken Stromversorgung einzelner Netzzellen und Großverbraucher aufgezeigt.

**Sabrina Henning**

## **Title of the paper**

Setting up a concept to increase the electric self-sufficiency for small communities, maximizing renewable energy

## **Keywords**

self-sufficiency, power efficiency, power self-sufficiency, energy production, Demand-Side-Management, renewable energy, conventional energy sources

## **Abstract**

This work investigated the possibility of electrical self-sufficiency by renewable energies using the example of the Commune Reinfeld.

The technical data of the city were combined and the degree of self-sufficiency in fact of individual consumers were analyzed. Finally, opportunities to increase the independent power of individual network cells and large consumers were identified.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei allen bedanken, die diese Bachelorarbeit „Aufstellen eines Konzeptes zur Erhöhung des elektrischen Autarkiegrades für kleine Kommunen unter Maximierung erneuerbarer Energien“ durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung begleitet und zu ihrem Gelingen beigetragen haben.

Besonders herzlich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. -Ing. Volker Skwarek bedanken. Dieser übernahm die umfangreiche Betreuung und unterstützte mich durch hilfreiche Anregungen und Ratschläge. Zudem gilt mein Dank auch Herrn Prof. Dr. -Ing. Michael Röther, der mir als weiterer Korrektor unterstützend zur Seite stand.

Des Weiteren bin ich der Stadtverwaltung Reinfelds für die zahlreichen Informationen und Materialien dankbar.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir dieses Studium ermöglicht haben und auf deren Unterstützung ich immer zählen kann; zudem bei meinen Freunden, die mich während dieser Zeit unterstützten und begleiteten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>X</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Definition: Autarkie . . . . .	1
1.2 Aktueller Autarkiegrad Reinfelds . . . . .	2
<b>2 Motivation</b>	<b>5</b>
2.1 Zielpakete für den Klimaschutz . . . . .	5
2.1.1 Das Kyoto-Protokoll . . . . .	5
2.1.2 „20-20-20-Ziele“ . . . . .	6
2.1.3 Erneuerbare-Energie-Gesetz . . . . .	6
2.2 Profitierende Akteure . . . . .	7
<b>3 Energieeffizienz</b>	<b>9</b>
3.1 Vermeidung . . . . .	9
3.2 Steigerung der Energieeffizienz . . . . .	9
3.3 Einsatz regenerativer Energien . . . . .	10
<b>4 Energieerzeugung</b>	<b>11</b>
4.1 Konventionelle Energieträger . . . . .	12
4.1.1 Fossile Energieträger . . . . .	13
4.1.2 Nukleare Energieträger . . . . .	14
4.2 Regenerative Energiequellen . . . . .	16
4.2.1 Solare Strahlungsenergie . . . . .	16
4.2.2 Windenergie . . . . .	19
4.2.3 Wasserkraft . . . . .	24
4.2.4 Biomasse . . . . .	27
4.2.5 Vorteile bei der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung . . . . .	30
4.2.6 Versteckte Risiken und Gefahren . . . . .	32
4.3 CO <sub>2</sub> -Emissionen bei der Energieerzeugung . . . . .	33
<b>5 Erfassung technischer Daten am Beispiel Reinfeld</b>	<b>35</b>
5.1 Demand-Side-Management . . . . .	35
5.2 Energieerzeugung . . . . .	37
<b>6 Autarkiegradbestimmung</b>	<b>38</b>
6.1 Autarkiegrad Schule . . . . .	38
6.1.1 Analyse der standardisierten Verbrauchsdaten . . . . .	38

---

6.1.2	Analyse der Autarkiegrade . . . . .	41
6.1.3	Zwischenfazit zum Autarkiegrad Schule . . . . .	51
6.2	Autarkiegrad verschiedener Haushaltsgrößen . . . . .	52
6.2.1	Analyse der standardisierten Verbrauchsdaten . . . . .	52
6.2.2	Analyse der Autarkiegrade . . . . .	55
6.2.3	Zwischenfazit zum Autarkiegrad verschiedener Haushaltsgrößen . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Möglichkeiten der Autarkiegraderhöhung</b>	<b>66</b>
7.1	Netzzelle: Reinfeld Schule . . . . .	66
7.2	Netzzelle: Reinfeld Eichenweg . . . . .	67
7.3	Großverbraucher: Camfil . . . . .	68
<b>8</b>	<b>Konzeptbewertung</b>	<b>69</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>70</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>71</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>76</b>
	<b>Anhang</b>	<b>78</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Lage der Stadt Reinfeld [siehe Anhang D] . . . . .	2
2	Energieflussdiagramm . . . . .	10
3	Energiewandlungskette (nach [KSW13, S. 3]) . . . . .	11
4	Primärenergieverbrauch in Deutschland (nach [Bun14b]) . . . . .	12
5	Erdgas [Sta10] . . . . .	13
6	Braunkohle [SVoJa] . . . . .	13
7	Mineralöl [GöoJ] . . . . .	14
8	KKI-1 und KKI-2 Isar [INF09] . . . . .	14
9	Kernkraftwerkkarte Deutschland [Bun15b] . . . . .	15
10	Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2013 [Bun13] . . . . .	16
11	Aufbau einer (kristallinen) Solarzelle (nach [Set13]) . . . . .	17
12	Ersatzschaltbild einer Solarzelle . . . . .	18
13	Prinzipieller Aufbau einer Windkraftanlage [VDE07] . . . . .	19
14	Klassifizierung von Windkraftanlagen (nach [KSW13, S.472]) . . . . .	20
15	Windkraftanlage mit Stall-Regelung und Asynchrongenerator [BunoJa] . . . . .	21
16	Verlauf der Leistungskennlinie einer Stall geregelten Windkraftanlage (nach [KSW13, S. 482]) . . . . .	21
17	Windkraftanlage mit Pitch-Regelung (nach [WS09, S.401-402]) . . . . .	22
18	Verlauf der Leistungskennlinie einer Pitch geregelten Windkraftanlage (nach [KSW13, S. 482]) . . . . .	22
19	Netzanbindung von Offshore-Windparks (nach [Dü11]) . . . . .	23
20	Schematischer globaler Wasserkreislauf (nach [Tec10]) . . . . .	24
21	Schematischer Aufbau einer Wasserkraftanlage (nach [KSW13, S. 560]) . . . . .	25
22	Wasserkraftanlagen und deren Einteilung (nach [KSW13, S. 561]) . . . . .	26
23	Wandlungsketten für Bioenergieträger (nach [WS09, S. 100]) . . . . .	27
24	Netto vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2013 (nach [MSH <sup>+</sup> 14, S. 25]) . . . . .	30
25	Vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2013 (nach [MSH <sup>+</sup> 14, S. 28]) . . . . .	31
26	CO <sub>2</sub> -Emissionen bei der Energieerzeugung verschiedener Kraftwerkstypen (nach [Sta15]) . . . . .	33
27	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Jahres . . . . .	42
28	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Wintermonats . . . . .	43
29	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommermonats . . . . .	44
30	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Winterwerktages . . . . .	45
31	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommerwerktages . . . . .	46
32	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Wintersamstages . . . . .	47
33	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommersamstages . . . . .	48
34	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Wintersonntages . . . . .	49

---

35	Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommersonntages . . . . .	50
36	Energiebilanz eines Jahres nach Haushaltsgrößen . . . . .	56
37	Energiebilanz eines Wintermonats nach Haushaltsgrößen . . . . .	57
38	Energiebilanz eines Sommermonats nach Haushaltsgrößen . . . . .	58
39	Energiebilanz eines Winterwerktages nach Haushaltsgrößen . . . . .	59
40	Energiebilanz eines Sommerwerktages nach Haushaltsgrößen . . . . .	60
41	Energiebilanz eines Wintersamstages nach Haushaltsgrößen . . . . .	61
42	Energiebilanz eines Sommersamstages nach Haushaltsgrößen . . . . .	62
43	Energiebilanz eines Wintersonntages nach Haushaltsgrößen . . . . .	63
44	Energiebilanz eines Sommersonntages nach Haushaltsgrößen . . . . .	64

## Tabellenverzeichnis

1	Daten für das Jahr 2013 der Stadt Reinfeld . . . . .	3
2	Emissionen im Basisjahr 1990, Emissionsänderung gemäß Kyoto-Protokoll und tatsächlich erreichte Emissionsänderung [UNF12] . . . . .	5
3	Jährlicher Stromverbrauch verschiedener Verbraucher . . . . .	36
4	Energieverbrauch Schule nach SLP . . . . .	38
5	Interpretation der SLP Gruppe G1 Werktags . . . . .	39
6	Interpretation der SLP Gruppe G1 Wochenende . . . . .	40
7	Energieverbrauch verschiedener Haushaltsgrößen nach SLP . . . . .	52
8	Interpretation der SLP Gruppe H0 Werktags . . . . .	53
9	Interpretation der SLP Gruppe H0 Wochenende . . . . .	54

## Abkürzungsverzeichnis

BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU	Europäische Union
HDÜ	Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
PV	Photovoltaik
RLM	Registrierte Lastgangmessung
SLP	Standard-Last-Profil
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft
WEA	Windenergieanlage

# 1 Einführung

Für die menschliche Existenz ist Energie eine zentrale Notwendigkeit. Doch unser derzeitiges Energiesystem befindet sich in einer Krise. Die zu verwendenden Ressourcen stoßen an eine objektive Grenze. Aus diesem Grund stehen „Erneuerbare Energien“ und „nachhaltige Energiesysteme“ im Mittelpunkt gesellschaftlicher Diskussionen. Die Zukunftsaufgabe eines nachhaltigen Energiesystems wird sowohl politisch als auch ingenieurwissenschaftlich geprägt. Politisch werden immer neue Rahmenbedingungen definiert und wirtschaftlich sucht man nach Wegen zur Minimierung der Energiekosten. Somit ist es die Aufgabe der Wissenschaft und Technik in den nächsten Jahren eine überwiegend auf regenerativen Energieträgern basierende Energieversorgung zu gewährleisten [WS09, S. 1-2].

Um den wirtschaftlichen Debatten aus dem Weg zu gehen, wird immer intensiver darüber nachgedacht, wie man sich von den Konzernen und ihrer Preispolitik möglichst unabhängig machen kann. Diese Bachelorarbeit soll die Frage klären, ob es möglich ist, den technischen Autarkiegrad unter wirtschaftlichen Aspekten für kleine Kommunen im Norden Deutschlands zu erhöhen.

## 1.1 Definition: Autarkie

Um die Bachelorthesis genauer zu verstehen, muss der Begriff Autarkie definiert werden.

Im Duden steht **Autarkie** für die Unabhängigkeit von äußeren Dingen, Einflüssen und Affekten. Konkret bedeutet dies: Sich selbstständig zu versorgen und dabei alles, was man verbraucht, aus eigenen Ressourcen zu erzeugen oder herzustellen [Bib13].

Das Adjektiv **autark** bedeutet „auf niemandes Weisung oder Unterstützung angewiesen“ zu sein [SP14]. Es kann verschiedene Gruppierungen beschreiben, die eigenverantwortlich und selbstbestimmt handeln können. Der Begriff wird vor allem in der Biologie, der Informatik, der Ökologie und der Politik verwendet.

Spricht man jedoch von „Energieautarkie“, sollte man sich mit einigen Begriffen vertraut machen: **Bilanzielle Energieautarkie:** bedeutet, dass eine Region/Gemeinde/Hausgemeinschaft rechnerisch über das Jahr gesehen so viel Strom produziert, wie sie selbst über das Jahr verbraucht. Die bilanzielle Energieautarkie bezieht sich dabei meist nur auf einen Teilbereich, z.B. Strom [Hei11].

**Teil-Energieautarkie:** bedeutet, dass die drei Energie relevanten Bereiche – Wärme, Strom, Mobilitätsenergie (Kraftstoffe, Strom) – in einer Region/Gemeinde/Hausgemeinschaft größtenteils durch eigene erneuerbare Ressourcen vor Ort produziert und selbst verbraucht werden. Es wird jedoch nicht in allen Bereichen eine komplette Energieautarkie erreicht [Hei11].

**Echte Energieautarkie:** Die erneuerbaren Energieressourcen in einer Gemeinde/Region/ Hausgemeinschaft werden vor Ort selbst erzeugt und decken den dort tatsächlich anfallenden Bedarf an Strom, Wärme und Mobilitätsenergie komplett ab [Hei11].

## 1.2 Aktueller Autarkiegrad Reinfelds

Die Stadt Reinfeld liegt 20 km südwestlich von Lübeck in der Metropolregion Hamburg. Die Einwohnerzahl beträgt ca. 8.700 Einwohner (Stand 2013).

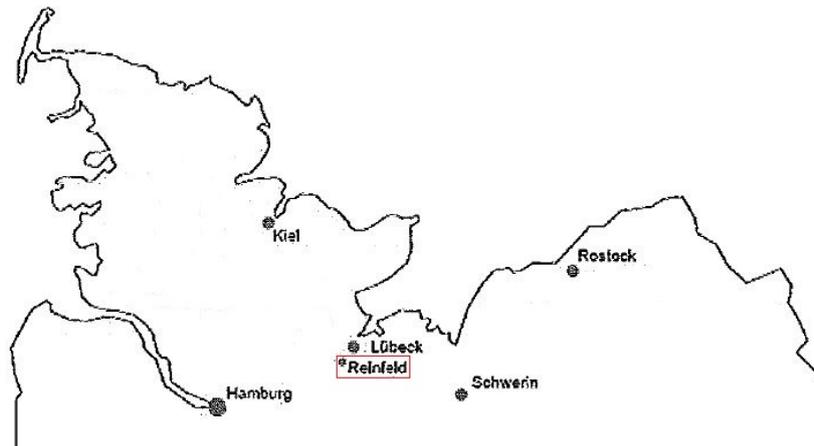


Abb. 1: Lage der Stadt Reinfeld [siehe Anhang D]

Das hohe Bestreben eine klimafreundliche Stadtentwicklung voranzutreiben qualifiziert Reinfeld als Anwendungsbeispiel für diese Bachelorthesis. Die Stadt orientiert sich an den übergeordneten Klimaschutzzielen des Kreises Stormarn und des Landes Schleswig-Holstein sowie an den CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen der Bundesregierung. Im Zuge der nachhaltigen Umsetzung dieser Klimaschutzaktivitäten wurde von der Stadt ein Förderantrag für die Erarbeitung eines Klimaschutzkonzeptes gestellt. Die Vorhabenbeschreibung zum Förderantrag ist dem Anhang D der Arbeit beigelegt.

Die Stadtverwaltung von Reinfeld stellte die Datei „Energienmengen 2012 2013 Stadt Reinfeld.xlsx“ dieser Abschlussarbeit zur Verfügung. Diese enthält die Energieverbrauchsdaten der Stadt sowie die Energieerzeugungszahlen aus erneuerbaren Energiequellen für die Jahre 2012 und 2013. Die vollständige Excel-Tabelle befindet sich im Anhang A der Arbeit. Die folgende Tabelle (1) bildet die Grundlage zur Berechnung des bilanziellen Autarkiegrades der Stadt Reinfeld.

**Strom Absatz in die Stadt**

Jahr	Sparte: Name	RLM: Anzahl Anlagen [in Stück]	RLM: Absatz Arbeit gesamt abgerechnet [in kWh]	SLP: Anzahl Anlagen [in Stück]	SLP: Absatz Arbeit gesamt abgerechnet [in kWh]
2013	Strom	34	12.594.569,00	4.788	17.209.910,00

**EEG-Aufnahme aus der Stadt**

Jahr	Energieart	Anzahl Anlagenschlüssel	Installierte Leistung [kW]	Erzeugte Menge [kWh]
2013	PV	53	618,84	-602.565,90
	Wasser	1	10,00	-3.226,12

**KWK-Aufnahme aus der Stadt**

Jahr	Energieart	Anzahl Anlagen	Installierte Leistung [kW]	eingespeiste Netzmenge [kWh]	Menge Eigenverbrauch [kWh]
2013	KWK	8	98,00	-20.007,00	-121.432,00

Tab. 1: Daten für das Jahr 2013 der Stadt Reinfeld

Tabelle 1 liefert Informationen über den Energiebedarf der Stadt Reinfeld für das Jahr 2013. Dabei steht RLM für *registrierende Lastgangmessung*. Dieser beschreibt einen Messvorgang durch Energieversorger bei Kunden mit einem Jahresverbrauch von mehr als 100 MWh elektrischer Energie. Die gesamte abgerechnete Arbeit der RLM-Kunden beträgt für das Kalenderjahr 2013 12.594.569 kWh.

Kunden, deren Jahresarbeit geringer als 100.000 kWh ist und die an die Niederspannung angeschlossen sind, benötigen keine viertelstündige registrierende Leistungsmessung. Die Versorgung dieser Kunden erfolgt unter Verwendung von synthetischen *Standardlastprofilen*, hier als SLP dargestellt [Str14]. Die für SLP-Kunden gesamt abgerechnete Arbeit beträgt im Jahr 2013 17.209.910 kWh.

Zusätzlich lassen sich der Tabelle die im Jahr 2013 durch erneuerbare Energien erzeugten Energiemengen entnehmen. So ergibt sich für die Sparte Photovoltaik eine erzeugte Energiemenge von 602.656,90 kWh pro Jahr und für die Energiegewinnung aus Wasser 3.226,12 kWh. Außerdem enthält Tabelle 1 die Energiedaten der Stadt durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Der Eigenverbrauch an Energie durch KWK liegt im Jahr 2013 bei 121.432 kWh.

Der Autarkiegrad kann nun wie folgt definiert werden:

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} \quad (1)$$

Mit Hilfe der Formel (1) ergibt sich folgender Autarkiegrad für die Stadt Reinfeld im Jahr 2013:

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{(602.565,90 + 3.226,12 + 121.432,00) \text{ kWh}}{(12.594.569,00 + 17.209.910,00) \text{ kWh}} = 0,0244 = \underline{\underline{2,44 \%}} \quad (2)$$

Der Autarkiegrad der Stadt Reinfeld ist mit einem Wert von 2,44 % sehr niedrig. Um dies zu ändern, wird mit dieser Bachelorthesis ein Konzept zur Erhöhung des elektrischen Autarkiegrades unter Maximierung von erneuerbaren Energien entwickelt.

## 2 Motivation

### 2.1 Zielpakete für den Klimaschutz

Das Thema Klimaschutz betrifft die ganze Welt. Aus diesem Grund treffen sich jährlich Vertreter aller Mitgliedsstaaten der Klimarahmenkonvention, um über weitere Schritte in der internationalen Klimapolitik zu verhandeln. Dabei haben die Städte und Kommunen in der EU in vielerlei Weise Anteil an der europäischen Klimaschutzpolitik.

Im Folgenden werden drei wichtige politische Zielpakete auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem beschrieben: Auf internationaler Ebene das Kyoto-Protokoll, auf EU-Ebene die sogenannten 20-20-20-Ziele und das Erneuerbare-Energien-Gesetz auf Bundesebene.

#### 2.1.1 Das Kyoto-Protokoll

Das Kyoto-Protokoll enthält Begrenzungs- und Reduzierungsverpflichtungen für die Industrieländer und gilt als Meilenstein für die Klimapolitik.

Es wurde 1997 bei der 3. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention verabschiedet. In diesem Protokoll wurden laut WESSELAK und SCHABBACH erstmals konkrete Reduktionsziele für die wichtigsten klimarelevanten Treibhausgase festgehalten. Die Industriestaaten haben sich dabei vertraglich verpflichtet, ihre Emissionen relevanter Treibhausgase bis 2012 um mindestens 5,2 % im Vergleich zu 1990 zu senken. Dabei wurden für die einzelnen Teilnehmerstaaten je nach aktueller Situation unterschiedliche Ziele zur Reduktion von Treibhausgasen definiert [WS09, S. 12].

Die folgende Tabelle (2) gibt einen Überblick über die Emissionen der größten Treibhausgasländer des Jahres 1990. Dargestellt ist der aktuelle absolute Stand der Emissionen 1990, die im Einzelnen eingegangenen Reduktionsverpflichtungen und der Istwert mit Stand 2012 für das Jahr 2010.

	Emissionen (1990) Mio t CO <sub>2</sub> -Äquivalente	Emissionsänderung Kyoto-Ziel	Emissionsänderung Ist 2010
USA	6.161	keine (urspr. -7,0%)	+10,4 %
Russland	3.350	0 %	-34,1%
Japan	1.267	-6,0 %	-0,7 %
Deutschland	1.246	-21,0 %	-24,8 %
Vereinigtes Königreich	767	-12,5 %	-22,6 %
Kanada	589	-6,0 %	+17,4 %

Tab. 2: Emissionen im Basisjahr 1990, Emissionsänderung gemäß Kyoto-Protokoll und tatsächlich erreichte Emissionsänderung [UNF12]

Das Kyoto-Protokoll sieht in seiner Fassung drei „flexible Mechanismen“, mit denen die Unterzeichnerstaaten ihre Reduktionsverpflichtungen in anderen Staaten erbringen können:

- Handel mit Emissionsrechten zwischen Industrieländern,
- Klimaschutzprojekt eines Industrielandes in einem anderen Industrieland und
- Klimaschutzprojekt eines Industrielandes in einem Entwicklungsland.

Diese Mechanismen ermöglichen es einerseits Emissionen handelbar zu machen, andererseits Klimaschutzprojekte dort zu fördern, wo sie am effektivsten sind [WS09, S. 13].

Das Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls wurde festgelegt auf eine Ratifizierung durch mindestens 55 Staaten, die zusammengerechnet mehr als 55 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 1990 verursachten. Da sich die USA weigerten, das Kyoto-Protokoll zu ratifizieren, konnte es erst im Jahr 2005 durch die Ratifizierung Russlands in Kraft treten [WS09, S. 13].

Die 2013 beginnende zweite Verpflichtungsperiode sollte auf der UN-Klimakonferenz in Katar 2012 beschlossen werden. Dort einigte man sich auf eine geplante Verlängerung des Kyoto-Protokolls („Kyoto II“) bis 2020. An der Verlängerung beteiligten sich Australien, 27 EU-Länder sowie weitere europäische Staaten, die für ca. elf bis 13 Prozent des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich sind – Russland, Kanada, Japan und Neuseeland erklärten ihren Austritt [Fra12].

### 2.1.2 „20-20-20-Ziele“

Der Weltbedarf an Primärenergieträgern wird in den nächsten Jahrzehnten drastisch zunehmen. Um diese Entwicklung zu stoppen, sind weltweit Maßnahmen in Kraft getreten. Dabei soll der Bedarf an Energie durch erneuerbare Energieträger gedeckt werden.

Als Konsequenz hat die EU die sogenannten "20-20-20-Ziele" festgelegt. Die folgenden europaweiten Vorgaben sind bis zum Jahr 2020 umzusetzen:

- 20% weniger Treibhausgasemissionen als 2005,
- 20% Anteil an erneuerbaren Energien und
- 20% mehr Energieeffizienz.

Es wurden individuelle Ziele zur Absicherung der gemeinsamen Strategie für das Jahr 2020 festgelegt, die die Mitgliedsländer der EU angenommen haben [BS14].

### 2.1.3 Erneuerbare-Energie-Gesetz

Die internationalen Vereinbarungen haben natürlich auch Auswirkungen auf nationaler Ebene. Es wurde ein Markteinführungsprogramm für Regenerative Energien entwickelt, dessen Kernpunkt das im Jahr 2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist. Ziel des EEG war es, den Markteintritt für Technologien wie Solar- und Windenergie zu ermöglichen. Dies sollte durch feste Vergütungen sowie garantierte Abnahme und die vorrangige Einspeisung

des Stroms realisiert werden. Um den weiteren Kostenanstieg spürbar zu bremsen, den Ausbau der erneuerbaren Energien planvoll zu steuern und die erneuerbaren Energien besser an den Markt heranzuführen, trat am 1. August 2014 das reformierte EEG in Kraft. Es beinhaltet vier wesentliche Maßnahmen [WS09, S. 14] [Bun14a]:

- Vorrang für regenerative Energien: Der zu einer EEG-Anlage nächstgelegene Stromnetzbetreiber ist verpflichtet Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energien vorrangig an das Netz anzuschließen und sowohl die elektrische Energie abzunehmen als auch zu vergüten.
- Einspeisevergütungen: Die Vergütungssätze sind mit Laufzeiten von 20 Jahren nach Technologien und Standorten differenziert. Die durchschnittliche Vergütung für Betreiber neuer Anlagen wird ab 2015 ca. 12 Cent/kWh betragen.
- Umlagefinanzierung: Die den Netzbetreibern entstehenden Kosten durch die Vergütungspflicht werden auf alle Stromabnehmer umgelegt.
- Degression der Einspeisevergütung: Der festgelegte Vergütungssatz sinkt jährlich um einen bestimmten Prozentsatz. Die Höhe der Degression orientiert sich am Fortschritt der technischen Mittel.

## 2.2 Profitierende Akteure

Erneuerbare Energie fördern, Energie sparen und Emissionen von Treibhausgasen verringern — das sind die primären Ziele der heutigen Energiepolitik. Daher ist es nötig herauszufinden, ob ein elektrisches Autarkiekonzept mit Hilfe von regenerativen Energien für kleine Kommunen realisierbar ist. In erster Linie profitieren dabei folgende Akteure:

- Gemeindevertretung
- Alt- und Neubürger
- Umweltschutzverbände
- Ansässige Unternehmen

Ohne das Engagement für erneuerbare Energien auf kommunaler und regionaler Ebene sind die Klimaschutzziele nicht zu erreichen. Dabei haben regenerative Energien auf kommunaler Ebene viele Vorteile für engagierte Bürger und kommunale Entscheidungsträger [Age11].

### Höhere Versorgungssicherheit

Eine stärkere Eigenversorgung mit Energie löst die Abhängigkeit von konventionellen Energieimporten und den stetig wachsenden Preisen für Gas, Öl und Kohle [Age11].

### **Regionale Wertschöpfung und lokale Beschäftigung**

Erneuerbare Energieanlagen müssen installiert, gewartet und betrieben werden. Die Umsetzung dieser Aufgaben können lokale Betriebe wie z.B. Handwerker, Servicetechniker oder Rohstoffzulieferer übernehmen. Die daraus resultierende regionale Wertschöpfung und wirtschaftliche Dynamik bieten gute Ansiedlungsperspektiven auch in ländlichen Regionen [Age11].

### **Finanzielle Einnahmen**

Wie bereits im Kapitel 2.1.3 *Erneuerbare-Energie-Gesetz* auf S. 6 beschrieben, kann der Strom aus Windenergie, Sonnenenergie, Biomasse, Wasserkraft oder Erdwärme in das Stromnetz eingespeist und nach den Sätzen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) vergütet werden. Als Betreiber von Energieversorgungsanlagen können Gemeinden oder Stadtwerke Einnahmen und Gewinne erzielen. Dies gilt natürlich auch für die Einwohner, die sich an den Bürgeranlagen beteiligen. Aufträge für lokale Unternehmen und der Anlagenbetrieb durch kommerzielle Investoren bringen der Kommune Steuereinnahmen und gegebenenfalls fallen auch Pachten für gemeindeeigene Flächen an [Age11].

### **Tourismusmanagement**

Das Engagement für die Errichtung erneuerbarer Energien kann von Gemeinden erfolgreich genutzt werden, indem man sich selbstbewusst als attraktive Stadt präsentiert. Beispielsweise zieht die *Energielandschaft Morbach* in Rheinland-Pfalz viele Besucher an, die sich ein Bild davon machen wollen, wie eine Gemeinde energieautark werden kann [Age11].

## 3 Energieeffizienz

Der Begriff der Energieeffizienz bezeichnet nach WESSELAK und SCHABBACH die zweckmäßige Verwendung von Energie. Das Ziel der Energieeffizienzmaßnahmen ist es, den Gesamtenergiebedarf zu reduzieren [WS09, S. 33]. Dabei ist die Energieeffizienz umso höher, je geringer die Verluste beim Erreichen der jeweiligen Verwendungen sind. Es ist notwendig mit der vorhandenen Energie sparsam umzugehen, da die Energienutzung die Umwelt belastet und uns fossile Energieträger nur begrenzt zur Verfügung stehen. Eine Steigerung der Energieeffizienz wirkt sich vermindern auf die Energiepreise aus und senkt zudem die Abhängigkeit von Energieimporten aus dem Ausland.

### 3.1 Vermeidung

Die beste Möglichkeit für Energiesparmaßnahmen stellt nach WESSELAK und SCHABBACH die Reduktion von Energieverbrauch dar. Man sollte sich also zuerst immer Gedanken darüber machen, ob der erzeugte Energieeinsatz vermeidbar ist [WS09, S. 33-34].

In Industrie und Gewerbe würden beispielsweise einfache Zeitschaltuhren und Bewegungsmelder für die Steuerung der Beleuchtung in Fluren und Treppenhäusern zur Reduktion des elektrischen Energiebedarfs beitragen. Außerdem können im Haushalt unnötige Stand-by-Verbräuche in elektronischen Haushaltsgeräten durch schaltbare Steckerleisten vermieden werden.

### 3.2 Steigerung der Energieeffizienz

Eine wichtige Aufgabe in der heutigen Zeit ist die Steigerung der Energieeffizienz. Um dies zu erreichen, werden Energieumwandlungsprozesse hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht. Anhand des Wirkungsgrades  $\eta$  kann man die Effektivität einer Energieumwandlung ermitteln. Der Wirkungsgrad stellt dabei das Verhältnis des energetischen Nutzens zum Aufwand dar:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Die in den Energieträgern enthaltene Energie steht jedoch nicht in der Form zur Verfügung, in der sie genutzt werden soll. Durch verschiedene technische Prozesse wird die Energie umgewandelt. Dabei unterscheidet man zwischen Primär-, End- und Nutzenergie. Abbildung 2 auf Seite 10, zeigt beispielhaft ein Energieflussdiagramm und soll die Bedeutung dieser Begriffe verdeutlichen.

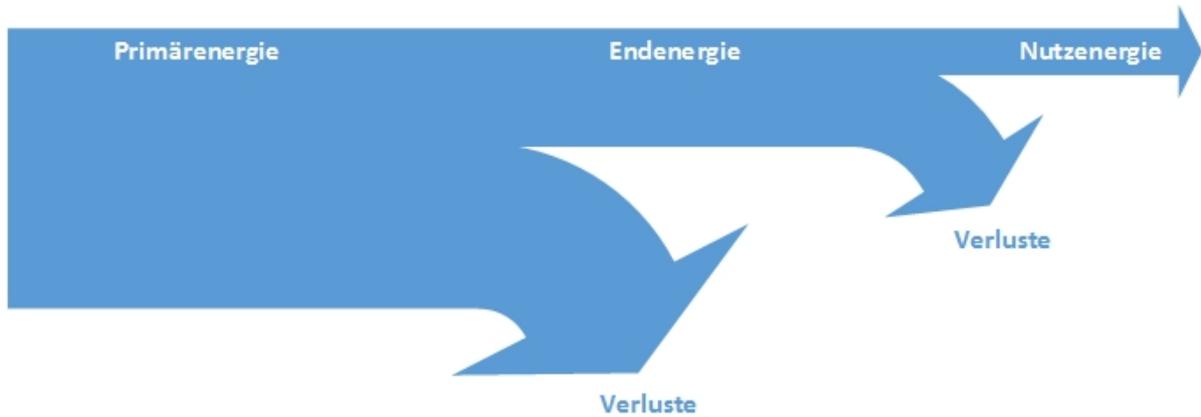


Abb. 2: Energieflussdiagramm

Primärenergie ist Energie in ihrem natürlichen Zustand, die noch nicht technisch aufbereitet ist. Sie wird unter anderem aus Stein- und Braunkohle, Rohöl, Kernenergie oder Wind gewonnen. Als Endenergie wird die Energie verstanden, die dem Verbraucher zugeführt wird. Diese ist durch energiespezifische Prozesse aufbereitet und umgewandelt worden. Hierzu zählen beispielsweise Erdgas, Kohlebriketts, Benzin oder Elektrizität.

Die Nutzenergie entsteht durch weitere, von dem Verbraucher verursachte Umwandlungsprozesse. Sie tritt in Form von Wärme, mechanischer Arbeit oder Licht auf [WS09, S. 4+35].

Nach WESSELAK und SCHABBACH kann die Energieeffizienz nun wie folgt definiert werden: Energieeffizienz bedeutet die Bereitstellung der erforderlichen Nutzenergie bei minimierten Endenergie- bzw. Primärenergieeinsatz [WS09, S. 35].

In Deutschland liegen große Energiesparpotentiale in der Sanierung älterer Gebäude. Bereits bestehende Gebäude verbrauchen in der Regel mehr Heizenergie als Neubauten.

Auch die gekoppelte Erzeugung von Elektrizität und Wärme oder Kälte steigert die Energieeffizienz. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erzeugen Strom und Nutzwärme in nur einem Prozess. Der Brennstoff kann effizienter genutzt werden und durch die geringe Brennstoffmenge werden weniger klimaschädliche CO<sub>2</sub> Emissionen freigesetzt.

### 3.3 Einsatz regenerativer Energien

Wenn die Maßnahmen zur Vermeidung und Energieeffizienzsteigerung ausgeschöpft sind, stellt der letzte Schritt nach WESSELAK und SCHABBACH den Ersatz der verwendeten fossilen Energieträger durch regenerative Energien dar [WS09, S. 36].

Schon seit vielen Jahren wird über die Endlichkeit der fossilen Energieträger diskutiert. Fest steht, dass das Angebot an fossilen sowie nuklearen Energieträgern die Nachfrage in naher Zukunft nicht mehr decken wird. Den Gegensatz stellen regenerative Energien dar. Sie erneuern sich von selbst innerhalb menschlicher Zeitmaßstäbe. Dies ist der wohl wichtigste Grund für den Einsatz regenerativer Energien und den Ersatz von konventionellen Energieträgern.

## 4 Energieerzeugung

Ohne Energie zur Deckung von Energiedienstleistungen ist unser derzeitiger Lebensstandard nicht möglich. Unter Energie wird nach Max Planck die Fähigkeit eines Systems verstanden, äußere Wirkungen hervorzurufen. Dabei wird unterschieden zwischen:

- mechanische Energie,
- thermische Energie,
- elektrische Energie,
- chemische Energie,
- potentielle Energie,
- Kernenergie und
- Strahlungsenergie.

Unter einem Energieträger wird nach KALTSCHMITT ein Stoff verstanden, aus dem entweder direkt oder durch Umwandlung mittels technischer Prozesse End- bzw. Nutzenergie gewonnen wird [KSW13, S. 3].

Wie in Kapitel 3.2 Steigerung der Energieeffizienz auf Seite 9 erwähnt, werden Energieträger nach dem Grad der Umwandlung unterteilt.

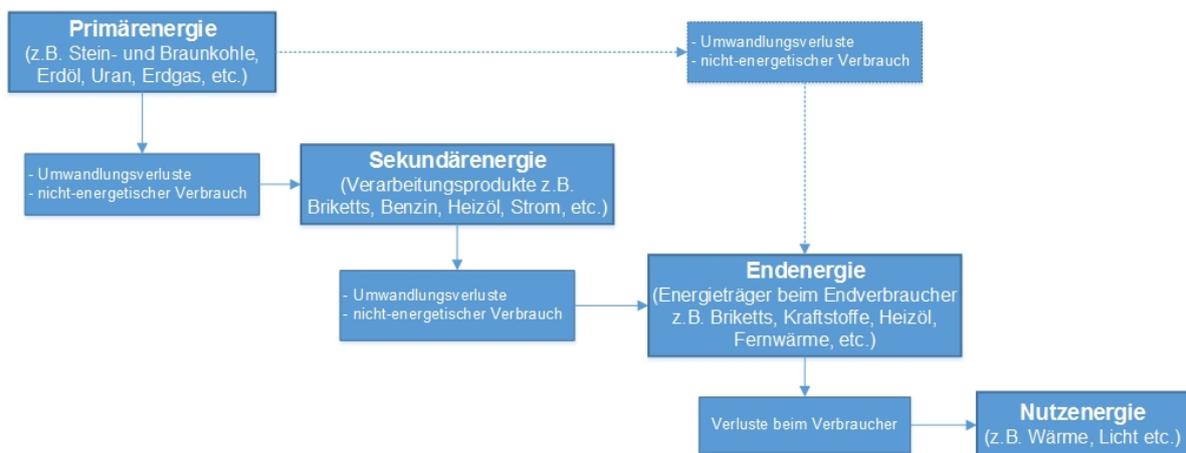


Abb. 3: Energiewandlungskette (nach [KSW13, S. 3])

Der jeweilige Energieinhalt dieser Energieträger ist die Primär-, die Sekundär- und die Endenergie (Abbildung 3).

Im Folgenden werden die verschiedenen Energieträger wie z.B. Kohle und Uran, aber auch Wind und Sonne dargestellt.

## 4.1 Konventionelle Energieträger

Zu den konventionellen Energieträgern zählen sowohl fossile als auch nukleare Energieträger. Die Verwendung fossiler Energieträger sorgt für langfristige Auswirkungen auf den Klimawandel, da diese mit stärkeren Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen klimaschädlichen Gasen einher geht. Bei der Verwendung von nuklearen Energieträgern wird radioaktiver Abfall produziert. Beide sind jedoch nur begrenzt vorhanden und in menschlichen Zeitdimensionen nicht erneuerbar [Ins08].

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2013 (13.828 PJ\*)

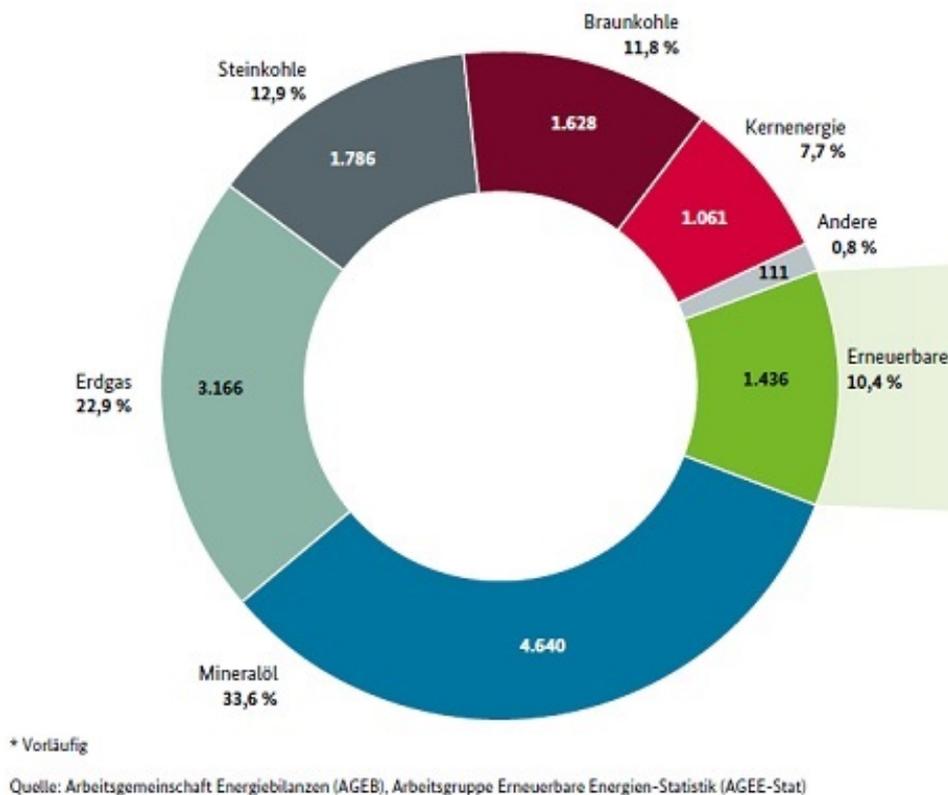


Abb. 4: Primärenergieverbrauch in Deutschland (nach [Bun14b])

Trotz der Gefahr für das Klima durch den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen, werden in Deutschland fast 90% der Primärenergieversorgung durch konventionelle Energieträger erzeugt (siehe Abbildung 4).

Im Folgenden werden die einzelnen konventionellen Energieträger erläutert und die Energiegewinnung verdeutlicht.

### 4.1.1 Fossile Energieträger

Als fossile Energieträger bezeichnet man kohlenstoffhaltige Energielieferanten, welche in langfristig andauernden Prozessen entstanden sind. Hierzu gehören insbesondere Erdgas, Kohle und Mineralöl.

#### Erdgas



Abb. 5: Erdgas [Sta10]

*Erdgas* spielt mit einem Anteil von 22,9% (vgl. Abbildung 4) eine große Rolle in der deutschen Energieversorgung und wird in vielerlei Hinsicht genutzt. Zum einen für die Erzeugung von Wärme (siehe Abbildung 5), zum anderen dient es als Energieträger für die Stromerzeugung oder die Speicherung von Energie. Erdgas ist im Vergleich zu anderen konventionellen Energieträgern klimafreundlicher, da bei der Bereitstellung weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt werden. Das Gas wird durch Rohrleitungen transportiert und verteilt. Diese Leitungen bilden in Deutschland das Gasnetz, durch die eine sichere Bewegung unterschiedlicher Gase über weite Strecken gewährleistet wird [Bun15a].

#### Kohle



Abb. 6: Braunkohle [SVoJa]

Der fossile Energieträger Kohle macht auch einen großen Teil des deutschen Primärenergieverbrauchs aus. Stein- und Braunkohle bildeten hier fast 25% (vgl. Abbildung 4) im Jahr 2013 (12,9% Steinkohle und 11,8% Braunkohle). Kohle ist ein fester Brennstoff. Er entstand vor Millionen Jahren durch Druck und vulkanische Hitze aus pflanzlichen Ablagerungen.

Der Abbau von *Steinkohle* erfolgt im Kohlebergwerk. Zur Energiegewinnung wird die Steinkohle durch eine Mühle pulverisiert und anschließend verbrannt. Der dabei erzeugte Dampf treibt Turbinen an, deren Bewegungen an einen Stromgenerator übertragen werden. Bei der Verbrennung des Kohlenstaubs entstehen klimaschädliche Gase [SVoJb].

Im Gegensatz zu der Steinkohle befindet sich die *Braunkohle* nur wenige Meter unter der Erde und wird im Tagebau gefördert (siehe Abbildung 6). Die Umwandlung in Energie erfolgt auf dem selben Weg wie bei der Steinkohle. Jedoch entsteht bei der Verbrennung von Braunkohle mehr Kohlendioxid [SVoJb].

## Mineralöl



Abb. 7: Mineralöl [GöoJ]

Mit einem Anteil von 33,6% am Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013 (vgl. Abbildung 4) ist *Mineralöl* der wichtigste Primärenergieträger für den deutschen Energiemarkt. Gleichzeitig ist es jedoch der fossile Energieträger mit den geringsten Reserven und Ressourcen. Mineralöl wird durch Bohrungen in die Erdoberfläche gewonnen und durch spezielle Sonden in die Lagerstätten gepumpt [SVoJb]. Aus dem bei der Förderung gewonnenen Rohöl entstehen durch Destillation und Raffination unterschiedliche Produkte für die verschiedenen Verwendungen von Mineralöl: Benzin, Dieselöl, Heizöle usw. (siehe Abbildung 7).

### 4.1.2 Nukleare Energieträger

Atomenergie oder auch Kernenergie ist wohl die am stärksten kritisierte Form der Energiegewinnung. Den Hauptkritikpunkt bilden die Sicherheitsrisiken in Kernkraftwerken. Unfälle wie in Tschernobyl und Fukushima prägen die Menschen und sorgen für Angst. In Deutschland bildet die Kernenergie mit 7,7% am Primärenergieverbrauch nur noch einen geringen Anteil (vgl. Abbildung 4).



Abb. 8: KKI-1 und KKI-2 Isar [INF09]

Kernkraftwerke sind Dampfkraftwerke, die mit nuklearen statt mit fossilen Brennstoffen betrieben werden [WS09, S. 27]. Durch die Spaltung schwerer Atomkerne wie Uran kann thermische

Energie erzeugt werden. Dabei spaltet ein Neutron einen Urankern in zwei Spaltprodukte. Neben der thermischen Energie entstehen so auch Neutronen, die weitere Spaltvorgänge in Form einer Kettenreaktion ermöglichen. Die thermische Energie wird dazu verwendet, ein Kühlmedium (z.B. Wasser) zu erhitzen. Hierbei entsteht Dampf, der Turbinen antreibt und deren Bewegungsenergie über einen Elektrogenerator in elektrische Energie umwandelt.

Laut dem BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE sind in Deutschland derzeit noch 9 Kernkraftwerke (KKW) mit einer elektrischen Leistung von ca. 12.000 MW in Betrieb. Diese werden gestuft bis Ende 2022 abgeschaltet [Bun15c].



Abb. 9: Kernkraftwerkkarte Deutschland [Bun15b]

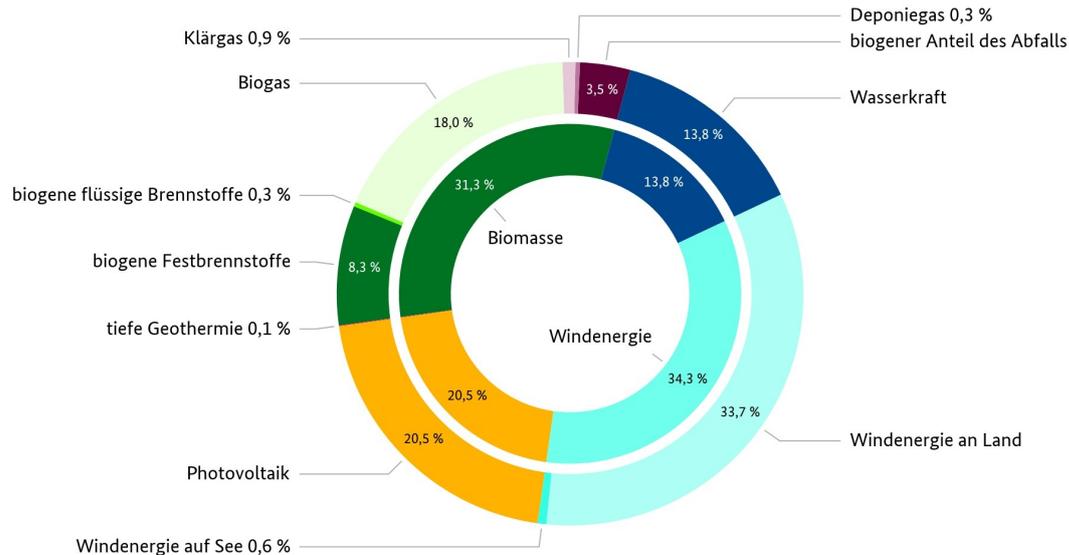
Abbildung 9 zeigt die Kernkraftwerke, die von 2001 bis 2011 (grau) und bis maximal 2022 (blau) die Berechtigung zum kommerziellen Leistungsbetrieb verloren haben bzw. noch verlieren werden [Bun15b].

## 4.2 Regenerative Energiequellen

Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist zu einem zentralen Punkt in der deutschen Klimapolitik geworden. Die Stromversorgung soll klimafreundlicher werden und gleichzeitig will man sich unabhängiger von fossilen Energieträgern machen. Mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz ist es gelungen, Solar-, Wind- und Bioenergie sowie andere regenerative Energien in den Markt zu integrieren.

### Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2013

Gesamt: 150,9 Mrd. Kilowattstunden



BMWi nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand: August 2014; Angaben vorläufig



Abb. 10: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2013 [Bun13]

Sonnen- und Windenergie bilden die wichtigste Form der regenerativen Energiegewinnung auf dem deutschen Markt. Aber auch Biomasse, Wasserkraft und Geothermie leisten einen wertvollen Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung.

### 4.2.1 Solare Strahlungsenergie

Die Sonne ist nicht nur ein Himmelskörper, sondern auch ein Erzeuger von elektromagnetischer Strahlung. Die Strahlung kann nach WESSELAK und SCHABBACH als Welle und Teilchen bezeichnet werden. Sobald Strahlung auf Materie trifft, kann ein Photon seine Energie entweder vollständig auf ein Atom übertragen oder überhaupt nicht. Man nennt den Vorgang, bei dem ein Photon seine Energie vollständig überträgt und danach nicht weiter existiert, Absorption. Andernfalls spricht man von Transmission (das Photon durchdringt die Oberfläche der Materie) oder Reflexion (das Photon wird von der Materie reflektiert) [WS09, S. 54-55].

Mit Hilfe von Solarzellen wird die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umgewandelt. Diesen Vorgang nennt man Photovoltaik (PV). In Abbildung 10 ist deutlich zu erkennen, dass die Photovoltaik mit einem Anteil von 20,5 % in der deutschen Stromerzeugung eine zentrale Rolle innehat.

### Aufbau und Funktionsbetrieb einer Solarzelle

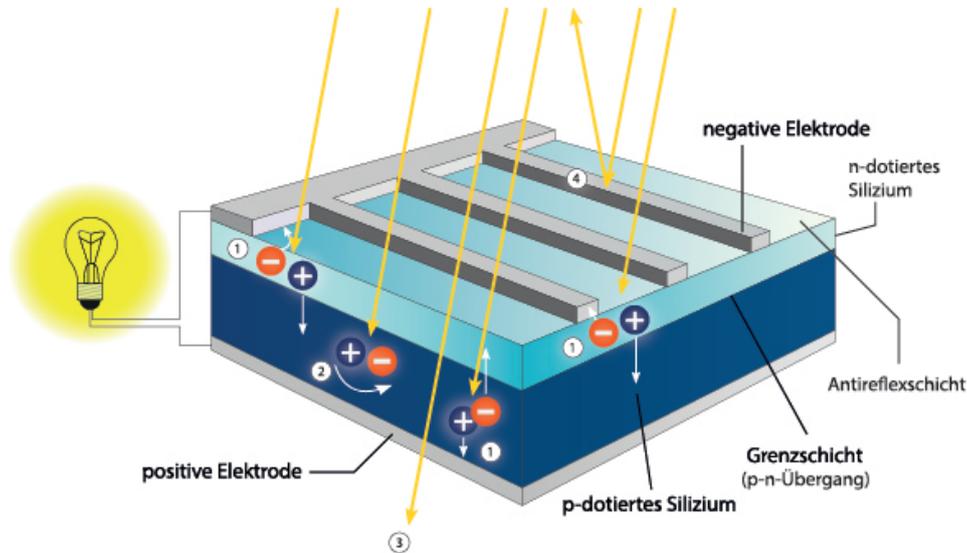


Abb. 11: Aufbau einer (kristallinen) Solarzelle (nach [Set13])

- (1) Ladungstrennung
- (2) Rekombination
- (3) ungenutzte Photonen-Energie (z.B. Transmission)
- (4) Reflexion und Abschattung durch Frontkontakte

Abbildung 11 zeigt den typischen Aufbau einer Solarzelle. In diesem Fall besteht das Ausgangsmaterial aus Silizium. Damit das Silizium als Energieerzeuger fungieren kann, werden in dessen Kristallgitter gezielt Verunreinigungen, so genannte Dotieratome eingebaut. Bei der Dotierung mit z.B. Phosphor (n-Dotierung) entsteht die obere Schicht der Solarzelle. Das Basismaterial wird durch die Verwendung von z.B. Bor (p-Dotierung) erschaffen. Auf der Zellerückseite wird ganzflächig ein metallischer Kontakt aufgebracht. Dieser bildet die positive Elektrode. Auf der Oberseite einer Solarzelle wird hingegen ein gitterartiges Kontaktsystem verwendet, welches Abschattungsverluste minimieren soll. Der Oberseitenkontakt bildet die negative Elektrode. Laut MÜLLER und KALTSCHMITT werden zur Reduktion von Reflexionsverlusten Antireflexionsschichten auf die Zelloberfläche aufgebracht. So erhält beispielsweise die Silizium Solarzelle ihre charakteristische Blaufärbung [KSW13, S. 365].

Die Solarzelle wird im beleuchteten Zustand als eine Stromquelle mit einer parallel liegenden p-n-Diode idealisiert.

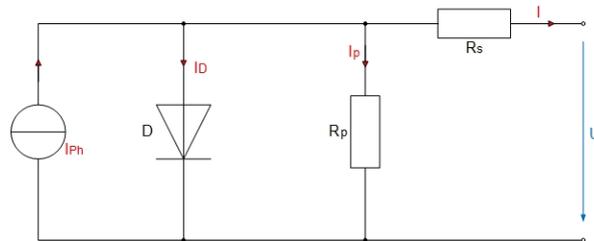


Abb. 12: Ersatzschaltbild einer Solarzelle

Dabei ist  $I$  der über die Kontakte fließende Strom,  $I_{Ph}$  der Photostrom und  $U$  die Spannung über der Diode  $D$ . In der Realität verhält sich die Solarzelle wie durch das Gleichspannungs-Ersatzschaltbild beschrieben (Abbildung 12). Der Serienwiderstand  $R_s$  setzt sich zusammen aus dem Widerstand der Kontakte, der Zuleitungen und aus dem Halbleitermaterial selbst. Der Parallel- oder Shuntwiderstand  $R_p$  berücksichtigt die unerwünschten elektrischen "Leckströme", die über einen Pfad fließen, die nicht zur Leitung für Strom vorgesehen ist und durch Defekte entstehen [KSW13, S. 366].

### Zelltypen

**Solarzellen aus kristallinen Silizium:** Ausgangsmaterial von Silizium ist Quarzsand ( $\text{SiO}_2$ ). Durch ein Reduktionsverfahren wird daraus so genanntes "metallurgisches Silizium", welches eine Reinheit von bis zu 99% aufweist. Eine geringe Verunreinigung im Silizium ist für Elektronikanwendungen jedoch weiterhin erheblich zu viel. Das Rohsilizium wird deshalb durch einen chemischen Prozess weiter gereinigt. Für die Photovoltaikindustrie dienen monokristalline Siliziumscheiben zur Herstellung von Solarzellen [KSW13, S. 373f].

**Dünnschichtzellen aus amorphen Silizium:** Amorphes Silizium ( $\text{a-Si:H}$ ) wird durch chemische Gasphasenabscheidung vom gasförmigen Silan ( $\text{SiH}_4$ ) in einem Plasma-Reaktor hergestellt. Dabei genügen Prozesstemperaturen von 80 bis 250 °C. Aufgrund der sehr kleinen Diffusionslänge von dotiertem  $\text{a-Si:H}$  würden die freien Ladungsträger in einem direkten pn-Übergang nicht lang genug überleben, um zur Stromerzeugung beitragen zu können. Deswegen wird zwischen die n- und p-dotierte Schicht eine undotierte (intrinsische) i-Schicht aufgebracht, in der die Lebensdauer der Ladungsträger wesentlich höher ist [KSW13, S. 378f].

### Netzgekoppelte Photovoltaik- und Inselanlagen

Bei PV-Anlagen kann man zwischen zwei unterschiedlichen Konzepten wählen: eine netzgekoppelte Anlage oder eine Inselanlage. Bei netzgekoppelten Anlagen wird Strom produziert, der komplett an den örtlichen Netzbetreiber verkauft wird. Der Netzbetreiber ist dabei verpflichtet, den Strom zu einer festgelegten Vergütung abzunehmen. Dem gegenüber stehen die Inselanlagen. Hierbei wird der gewonnene Strom nicht in das öffentliche Stromnetz gespeist. Der Strom wird stattdessen für die direkte Versorgung von elektronischen Geräten verwendet.

### 4.2.2 Windenergie

Die Nutzung des Windes ist eine der ältesten Vorgehensweisen, mechanische Arbeit verrichten zu lassen. In Deutschland hat die Nutzung von Windenergie in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Dies spiegelt sich auch im Jahr 2013 in der deutschen Stromerzeugung durch erneuerbare Energien wider. Hier beträgt der Anteil der Windenergie ganze 34,3% (siehe Abbildung 10).

Die solare Strahlung ist auch für die globale und lokale Bewegung von Luftmassen verantwortlich. Durch unterschiedliche Erwärmung der Erdoberfläche entstehen Luftdruckunterschiede in den bodennahen Luftschichten. Die Luftmassen strömen von Gebieten höheren Luftdrucks in Gebiete mit tieferem Luftdruck.

#### Aufbau und Funktionsbetrieb einer Windenergie-Anlage

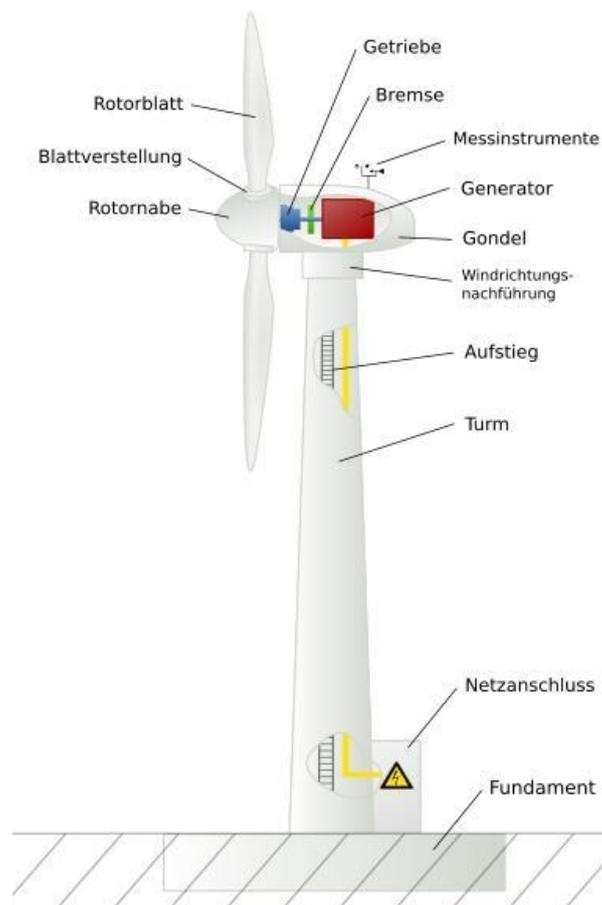


Abb. 13: Prinzipieller Aufbau einer Windkraftanlage [VDE07]

Abbildung 13 zeigt eine schematische Darstellung einer marktgängigen Horizontalachsenanlage mit Getriebe. Eine derartige Windkraftanlage besteht aus den Rotorblättern, der Rotornabe,

ggf. einem Getriebe, dem Generator, dem Turm, dem Fundament und dem Netzanschluss. Dabei können je nach Anlagentyp weitere Elemente hinzukommen oder weggelassen werden. Die Rotorblätter werden in der Regel aus Glasfaser-Kunststoff-Verbunden hergestellt und je nach Maschinenkonzept drehbar oder fest an die Nabe angeschlossen. Die Nabe ist über eine Welle entweder erst mit dem Getriebe und dann mit dem Generator verbunden oder es wird ein Ringgenerator verwendet. Dieser benötigt keine Übersetzung der Drehbewegung der Welle. Die Windrichtungsnachführung ist drehbar auf dem Turm gelagert und kann so entsprechend der Windrichtung ausgerichtet werden. Der Turm wird als Stahlrohr-, Beton- oder Gittermastkonstruktion ausgeführt [WS09, S. 378].

Um die in bewegten Luftmassen enthaltene Energie durch rotierende Windenergiekonverter nutzbar zu machen, existieren zwei unterschiedliche Prinzipien: das Auftriebsprinzip und das Widerstandsprinzip (siehe Abbildung 14).

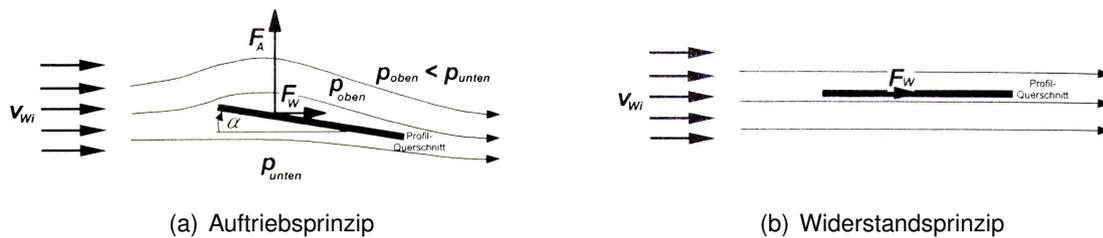


Abb. 14: Klassifizierung von Windkraftanlagen (nach [KSW13, S.472])

Beim Auftriebsprinzip wird die Auftriebskraft, die bei der Umströmung eines Rotorblattes entsteht, ausgenutzt. Die Fläche der Oberseite ist hierbei größer als die der Unterseite. Da an der Oberseite die Luftgeschwindigkeit größer ist als an der Unterseite, resultiert daraus ein Unterdruck an der Oberseite und ein Überdruck an der Unterseite. Diese Druckunterschiede sorgen für die Bewegung der Rotorblätter.

Bei dem Widerstandsprinzip schiebt der Wind jede Fläche quer zu seiner Richtung und es entsteht die sogenannte Widerstandskraft, welche die Fläche bewegt.

### Anlagenkonzepte

Der Aufbau von Windkraftanlagen ergibt sich durch unterschiedliche Varianten des eingesetzten Regelprinzips. Um die dem Wind entzogene Leistung an den zur Verfügung stehenden Abnehmer anzupassen, benötigt eine Windturbine eine Regelungseinrichtung. Im Folgenden werden die beiden marktgängigen Stall- und Pitch-Regelungskonzepte erläutert.

### Stall-Anlagen

Stall-Anlagen bestehen aus einem Rotor mit fest montierten Rotorblättern. Der Rotor ist dabei über ein Getriebe mit einem Asynchrongenerator verbunden. Um in ein Versorgungsnetz mit einer konstanten Frequenz einzuspeisen, muss der Rotor der Windkraftanlage unabhängig von der Windgeschwindigkeit mit konstanter Rotordrehzahl betrieben werden [WS09, S.400].

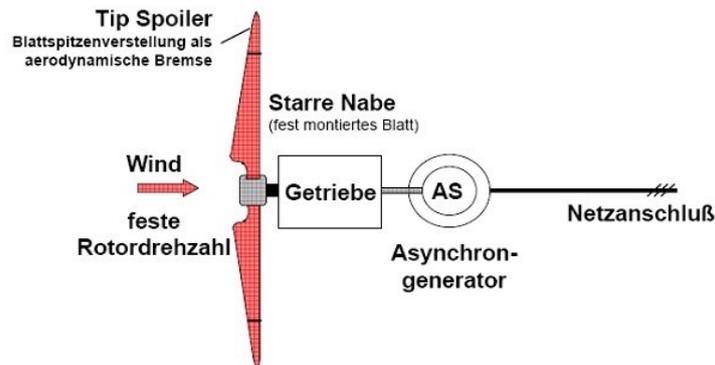


Abb. 15: Windkraftanlage mit Stall-Regelung und Asynchrongenerator [BunoJa]

Übersteigt die Windgeschwindigkeit die Nennwindgeschwindigkeit, ist zum Schutz vor Überlastung eine Leistungsbegrenzung erforderlich. Dies wird bei Stall-Anlagen durch verstellbare Spitzen der Rotorblätter realisiert. So zeigt Abbildung 16, dass die Leistungsaufnahme des Rotors durch die Stall-Regelung nur innerhalb eines bestimmten Bereiches begrenzt werden kann.

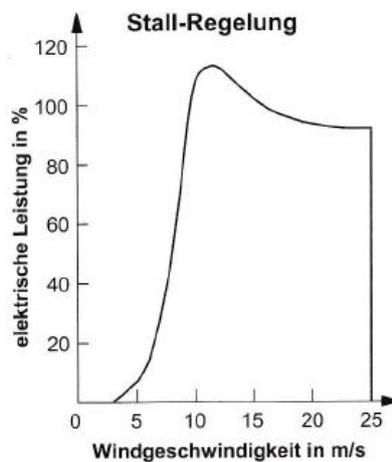
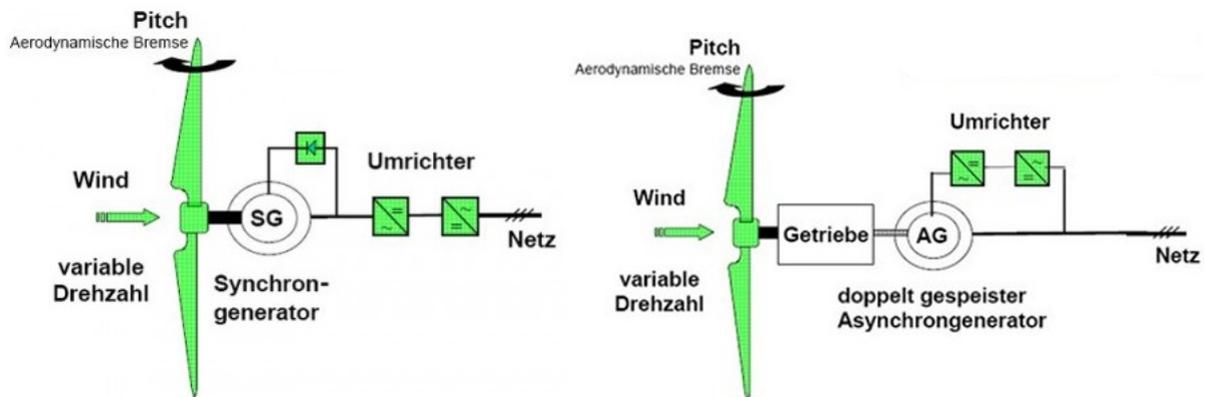


Abb. 16: Verlauf der Leistungskennlinie einer Stall geregelten Windkraftanlage (nach [KSW13, S. 482])

### Pitch-Regelung

Bei Windkraftanlagen der Multimegawattklasse wird die Verstellung des Rotorblattwinkels (Anstellwinkel = Pitch) zur Regelung der dem Wind entnommenen Leistung eingesetzt. Die Pitch-Regelung kann in Verbindung mit einem drehzahlfesten Generator oder mit variabler Drehzahl ausgeführt werden.



(a) Pitch-Regelung und Synchron-generator [BunoJb]      (b) Pitch-Regelung und Asynchrongenerator [Flu07]

Abb. 17: Windkraftanlage mit Pitch-Regelung (nach [WS09, S.401-402])

Durch eine Verdrehung des Rotorblattes werden die Anströmverhältnisse und damit die Luftkräfte auf die Rotorblätter gerade so beeinflusst, dass die Leistungsaufnahme des Rotors aus dem Wind bei Geschwindigkeiten zwischen Nenn- und Abschaltwindgeschwindigkeit weitgehend konstant bleibt (Abbildung 18; 100% der elektrischen Leistung entspricht der Nennleistung der Windkraftanlage).

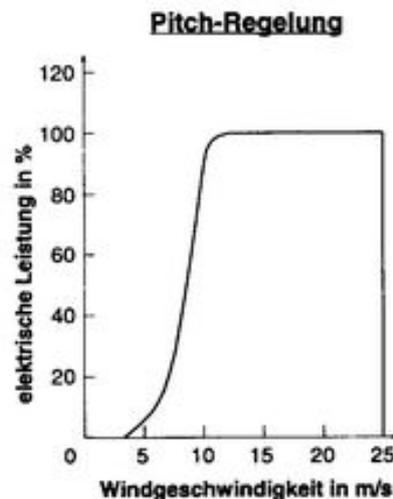


Abb. 18: Verlauf der Leistungskennlinie einer Pitch geregelten Windkraftanlage (nach [KSW13, S. 482])

## Netzkopplung

Für die Anbindung einer Windenergieanlage (WEA) an das öffentliche Versorgungsnetz oder ein beliebiges Inselnetz wird zwischen direkter und indirekter Netzkopplung unterschieden.

- Bei der direkten Kopplung an ein frequenzstarres Stromnetz dreht der Synchrongenerator mit konstanter Drehzahl und der Asynchrongenerator mit nahezu konstanter Drehzahl entsprechend der Netzfrequenz. Wegen der direkten Netzkopplung wirkt sich jede Änderung der Windgeschwindigkeit als veränderlicher Strom auf der Netzseite aus und führt dort zu Spannungsschwankungen. Daher sind direkt ans Netz gekoppelte Windkraftanlagen heute nicht mehr zulässig [KSW13, S.492-493].
- Bei der indirekten Netzkopplung kann der Generator mit variabler Drehzahl bzw. Frequenz betrieben werden. Der jedoch durch eine veränderliche Drehzahl entstehende Wechselstrom mit variabler Frequenz muss anschließend mit Hilfe eines Umrichters umgewandelt werden. Zudem ist durch die variable Drehzahl eine gute Anpassung an das Leistungsmaximum möglich. Bei mittleren bis großen Anlagen stellt die Netzanbindung über einen Frequenzumrichter eine gängige Technik dar. Hierbei kommen vornehmlich Synchrongeneratoren zum Einsatz [KSW13, S. 493-495].

Windkraftanlagen können entweder als einzelne Anlage oder in Form von Windparks in das öffentliche Stromversorgungsnetz eingebunden werden. Die Auslegung der Netzanbindungskomponenten hängt dabei von der jeweils anzuschließenden Leistung ab.

Die Netzanbindung von an Land aufgestellten Windparks (Onshore-Windpark) besteht aus der internen Verkabelung, der Übergabestation (Trafos oder Umspannwerke), der Stichleitung (Spannungsanschlussleitung) und dem Netzanbindungspunkt zur Stromeinspeisung in das örtliche Netz.

Die Realisierung von Offshore-Windparks ist aufgrund der weiten Entfernungen zwischen Küste und installiertem Windpark deutlich aufwendiger. Die hier verwendete Verkabelung besteht aus speziell für den Einsatz unter Wasser konzipierten kunststoffummantelten Seekabeln. Für die Übertragung der elektrischen Energie zum landseitigen Verknüpfungspunkt ist eine Hochspannungs-Drehstrom- (HDÜ) oder eine Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) möglich [KSW13, S. 502-504].

- Bei der HGÜ wird der von der WEA kommende Wechselstrom zunächst in einen Gleichstrom umgewandelt und dann mit Kabeln an Land transportiert. Dort erfolgt die Wechselrichtung in netzkompatiblen Wechselstrom.
- Bei der HDÜ wird der von der WEA kommende Wechselstrom mit Hilfe eines Transformators auf ein höheres Spannungsniveau gehoben und dann an Land übertragen. Dort erfolgt die Transformation für die Netzkompatibilität.

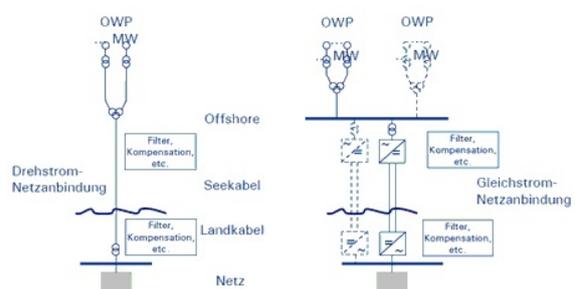


Abb. 19: Netzanbindung von Offshore-Windparks (nach [Dü11])

### 4.2.3 Wasserkraft

Aufgrund der solaren Einstrahlung auf der Erde verdunstet das Wasser an der Meeres- und Erdoberfläche (Abbildung 20). Entscheidend für den Kreislauf von Wasser zwischen einzelnen Reservoiren sind die physikalischen Prozesse Verdunstung, Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel usw.) und Transport von Dampf, Flüssigwasser und Eis. Dabei findet der größte Teil des Wasserkreislaufes über den Meeren statt. Die Nutzung der Wasserkraft als regenerative Energiequelle ist nur durch diesen Kreislauf auf der Erde möglich.

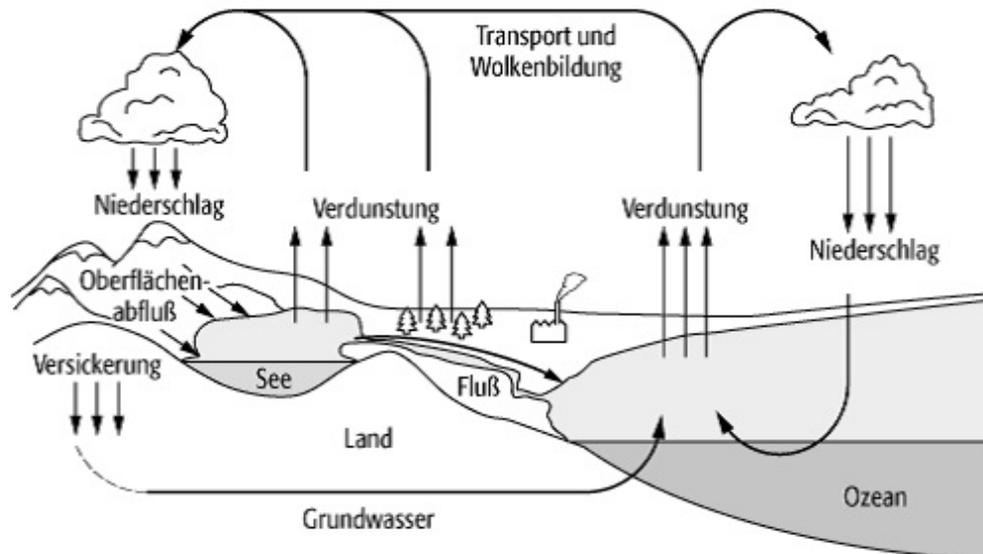


Abb. 20: Schematischer globaler Wasserkreislauf (nach [Tec10])

Die Nutzung der Wasserkraft lässt sich laut LINK bis ins 3. Jahrhundert vor unserer Zeit zurückverfolgen. Dabei wurde von einem Wasserradantrieb für ein Schöpfwerk berichtet [WS09, S. 403].

Wasserkraftanlagen dienen dazu, die potentielle und kinetische Energie des Wassers nutzbar zu machen. Aufgrund der physikalisch unvermeidbaren Umwandlungsverluste in den Wasserkraftanlagen kann aber nur ein Teil der Leistung nutzbar gemacht werden [KSW13, S. 555].

### Aufbau und Funktionsbetrieb einer Wasserkraftanlage

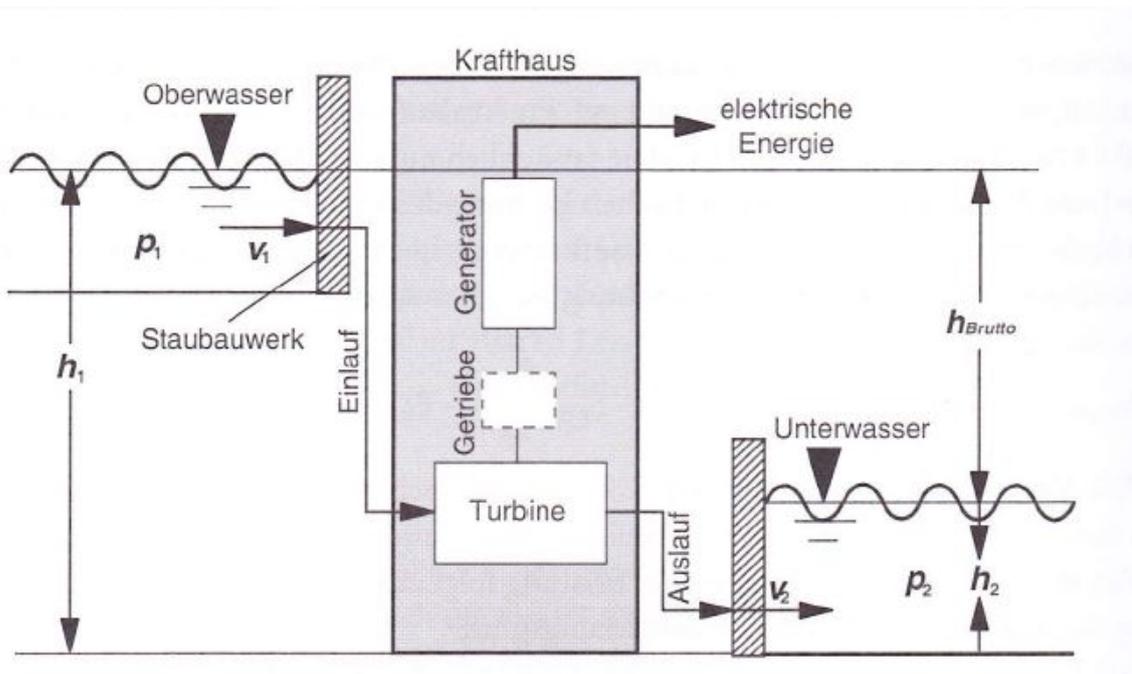


Abb. 21: Schematischer Aufbau einer Wasserkraftanlage (nach [KSW13, S. 560])

Ein Wasserkraftwerk besteht im einfachsten Fall aus einem Absperrbauwerk (z.B. Wehr, Staudamm), einem Einlauf, einem Auslauf und den maschinen- und elektrotechnischen Einrichtungen (Abbildung 21). Diese umfassen eine oder mehrere Turbinen, die zugehörigen Generatoren und weitere Komponenten. Diese Elemente können als Wehr, mit dem die Nutzung der Fallhöhe erst ermöglicht wird, im Krafthaus zusammengefasst werden.

Für die Energiewandlung sind bei Wasserkraftwerken im Wesentlichen zwei Systemkomponenten zuständig. Neben der Turbine, die dem Wasser die Energie entzieht und in mechanische Energie umwandelt, ist dies der Generator. Er wandelt die mechanische in elektrische Energie um und sorgt damit für die gewünschte Endenergie. Die Leistung bei einer Wasserkraftanlage hängt dabei im Wesentlichen vom Durchfluss, der Fallhöhe und den einzelnen Wirkungsgraden der maschinen- und elektrotechnischen Komponenten ab [KSW13, S. 559-560].

Die theoretisch nutzbare im Wasser enthaltene Leistung  $P_{W_a,th}$  zwischen zwei bestimmten Stellen im Fluss kann nach JORDE und KALTSCHMITT unter der Annahme gleicher Zu- und Abströmgeschwindigkeiten durch die Gleichung 3 berechnet werden.

$$P_{W_a,th} = \rho_{W_a} \cdot g \cdot \dot{q}_{W_a} \cdot (h_{OW} - h_{UW}) \quad (3)$$

Dabei ist  $\rho_{W_a}$  die Dichte des Wassers,  $g$  die Gravitationskonstante und  $\dot{q}_{W_a}$  der Durchfluss durch die Wasserkraftanlage.  $h_{OW}$  und  $h_{UW}$  beschreiben die geodätischen Höhen von Ober- und Unterwasserspiegel [KSW13, S. 555].

### Typisierung von Wasserkraftanlagen

Es gibt verschiedene Formen von Wasserkraftanlagen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anordnung, Größe und Betriebsweise. Je nach der zur Verfügung stehenden Fallhöhe werden die Kraftwerke in Niederdruck- und Hochdruckanlagen unterteilt, wobei die Grenzen für die Unterscheidung nicht klar definiert sind (Abbildung 22).

Druckhöhe	Niederdruck-anlagen		Hochdruck-anlagen	
Betriebsweise	Laufwasser-kraftwerke		Speicher-kraftwerke	Pump-speicherkraft-werke
Funktionsprinzip	Fluss-kraft-werk	Ausleitungs-kraftwerke	Talsperren-kraftwerke	

Abb. 22: Wasserkraftanlagen und deren Einteilung (nach [KSW13, S. 561])

Niederdruckanlagen haben eine relativ geringe Fallhöhe, jedoch vergleichsweise hohe Ausbaudurchflüsse. Hochdruckanlagen weisen demgegenüber relativ hohe Fallhöhen und vergleichsweise geringe Ausbaudurchflüsse auf. Laut M. AUFLEGER haben Hochdruckanlagen eine Fallhöhe von über 50 m und Niederdruckanlagen von unter 15 m [KSW13, S. 561].

Laufwasserkraftwerke nutzen den jeweils anfallenden natürlichen Zufluss. Häufig handelt es sich hierbei um Niederdruckanlagen. Hinsichtlich des Funktionsprinzips wird unterschieden in Flusskraftwerke und Ausleitungskraftwerke. Bei Ersteren ist das Kraftwerk typischerweise direkt neben dem Wehr angeordnet. Bei Letzterem ist das Kraftwerk seitlich des Fließgewässers an einem Ausleitungskanal platziert.

Im Unterschied zu den Laufwasserkraftwerken verfügen Speicherkraftwerke über einen Stauraum, der zeitweise gesteuert werden kann. Die Stromerzeugung ist daher nicht direkt an den momentanen natürlichen Zufluss gebunden, sondern kann nach den Markterfordernissen erfolgen. In der Regel handelt es sich hierbei um Hochdruckanlagen. Hinsichtlich des Funktionsprinzips wird hier zwischen Ausleitungs- und Talsperrenkraftwerke unterschieden. Bei den Talsperrenkraftwerken ist das Kraftwerk im Nahbereich der Talsperre angeordnet bzw. in das Absperrorgan integriert [KSW13, S. 561-562].

### Netzgekoppelte Wasserkraft- und Inselanlagen

In Deutschland werden Wasserkraftanlagen gekoppelt mit dem öffentlichen Versorgungsnetz oder anderen Industrienetzen betrieben.

Bei Inselbetrieb betreibt die Wasserkraftanlage allein ein lokales Versorgungsnetz und ist dabei nicht mit einem großen Stromnetz verbunden. In Deutschland ist dies jedoch, auf Grund der hohen Ansprüche an die Regelung zur Übereinstimmung zwischen der Nachfrage und dem Angebot an elektrischer Energie, unwirtschaftlich und kaum vorhanden [KSW13, S. 590].

#### 4.2.4 Biomasse

Mit 31,3% ist die Biomasse ein wichtiger Bestandteil der deutschen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (siehe Abbildung 10). Sie besitzt im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien den Vorteil, dass sie einerseits bedarfsgerecht zur Verfügung steht und andererseits in vielfältiger Form in feste, flüssige oder gasförmige Endenergieträger umgewandelt werden kann. Nach WESSELAK und SCHABBACH umfasst der Begriff Biomasse die in der Natur lebenden Tiere und Pflanzen, die daraus entstehenden Rückstände (z.B. tierische Exkremente), abgestorbene Pflanzen oder deren Bestandteile (z.B. Stroh), sowie tote Organismen und schließlich alle Stoffe, die beispielsweise durch eine technische Umwandlung oder eine stoffliche Nutzung entstanden sind (z.B. Pflanzenöle, Alkohol) [WS09, S. 99].

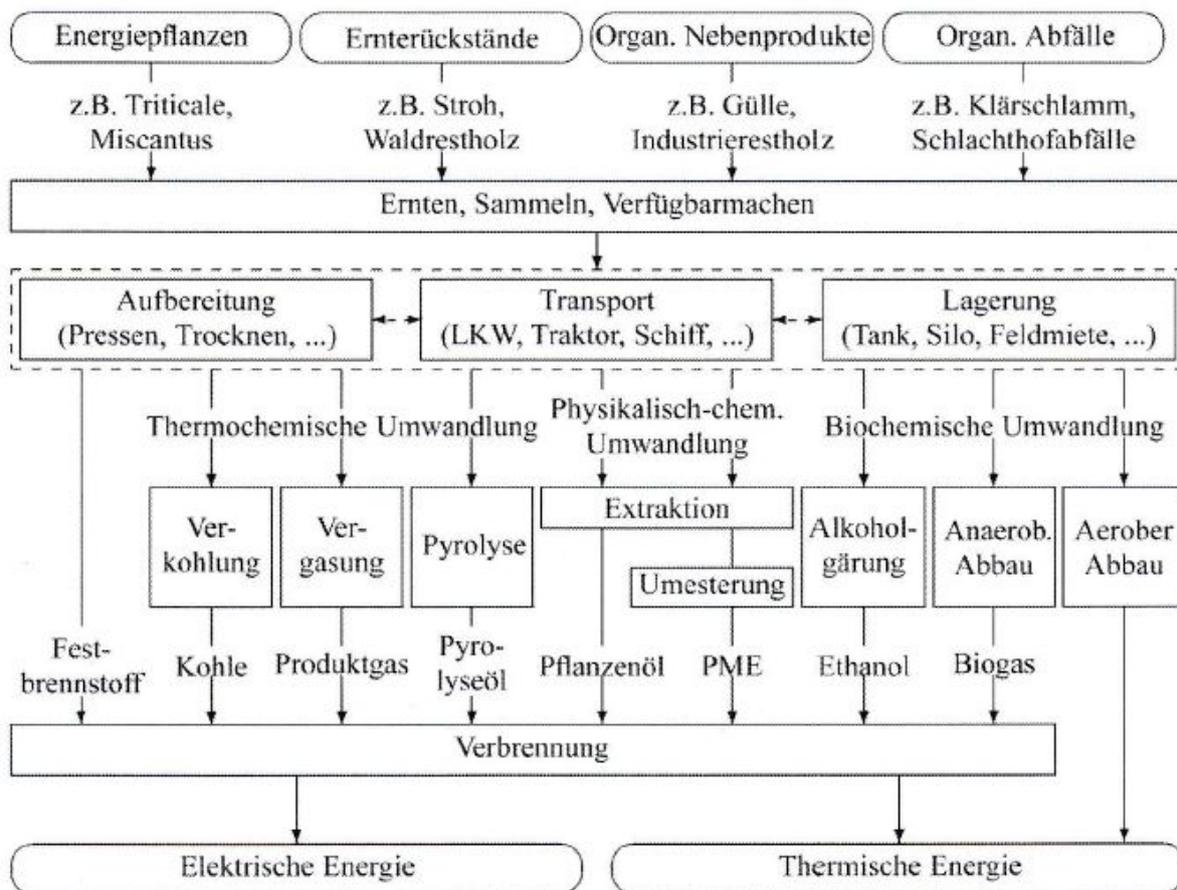


Abb. 23: Wandlungsketten für Bioenergieträger (nach [WS09, S. 100])

Abbildung 23 zeigt, wie Energie aus Biomasse durch unterschiedliche Umwandlungsschritte bereitgestellt werden kann. Sie umfasst alle Prozesse beginnend mit der Produktion von Energiepflanzen bzw. der Bereitstellung von Rückständen, Nebenprodukten oder Abfällen organischer Herkunft bis hin zur Endenergie.

### **Thermo-chemische Umwandlung**

Durch thermo-chemische Umwandlung von Biomasse werden organische Stoffe unter dem Einfluss von Wärme in feste, flüssige und/oder gasförmige Sekundärenergieträger überführt [KSW13, S.896f].

Die thermo-chemische Umwandlung von Festbrennstoffen lässt sich durch folgende Teilprozesse charakterisieren:

- Vergasung
- Pyrolyse
- Verkohlung

Bei der *Vergasung* werden die Festbrennstoffe bei möglichst hohen Temperaturen in brennbare Gase umgewandelt. Das entstandene Gas kann in Brennern zur Wärmebereitstellung oder in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung eingesetzt werden [KSW13, S.896].

Unter *Pyrolyse* versteht man die thermische Zersetzung eines Festbrennstoffes ausschließlich unter Einwirkung von Wärme. Das Ziel ist eine möglichst hohe Ausbeute an flüssigen Komponenten. Die entstandenen flüssigen Sekundärenergieträger können als Brennstoff oder Treibstoff eingesetzt werden [KSW13, S.896].

Unter der *Verkohlung* von fester Biomasse wird eine thermo-chemische Umwandlung mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute an veredeltem Festbrennstoff (Holzkohle) verstanden. Diese wird anschließend in geeigneten Anlagen zur Wärmebereitstellung eingesetzt [KSW13, S.897].

### **Physikalisch-chemische Umwandlung**

Bei der physikalisch-chemischen Umwandlung handelt es sich um ein Verfahren zur Bereitstellung von Endenergieträgern auf Pflanzenölbasis. Bei der *Extraktion* wird dem ölhaltigen Komponenten der Ölgehalt mit Hilfe eines Lösungsmittels entzogen. Danach werden Öl und Lösemittel durch Destillation wieder getrennt. Das derartig gewonnene Pflanzenöl kann in Motoren und Heizkraftwerken als Treib- und Brennstoff energetisch genutzt werden [KSW13, S.897].

### **Bio-chemische Umwandlung**

Das bio-chemische Veredelungsverfahren nutzt biologische Prozesse unter Wirkung von Mikroorganismen zur Umwandlung von Biomasse in Endenergie.

*Aerober Abbau:* Dieser Prozess ist als Kompostierung bekannt. Hier wird die organische Substanz von Mikroorganismen unter Einwirkung von Luftsauerstoff abgebaut. Das wichtigste Abbauprodukt ist dabei Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Bei diesem Prozess wird Wärme freigesetzt, die mit Hilfe von Wärmepumpen gewonnen und in Form von Niedertemperaturwärme verfügbar gemacht wird [WS09, S. 348].

*Anaerober Abbau:* Beim anaeroben Abbau von organischen Stoffen werden bestimmte Bakterien eingesetzt. Diese besitzen die Fähigkeit, organische Stoffe unter Luftabschluss abzubauen und dabei ein Mischgas (Biogas) zu erzeugen, das zu rund zwei Dritteln aus Methan besteht. Dieser Prozess läuft technisch u.a. in Bio- oder Klärgasanlagen ab [KSW13, S.898].

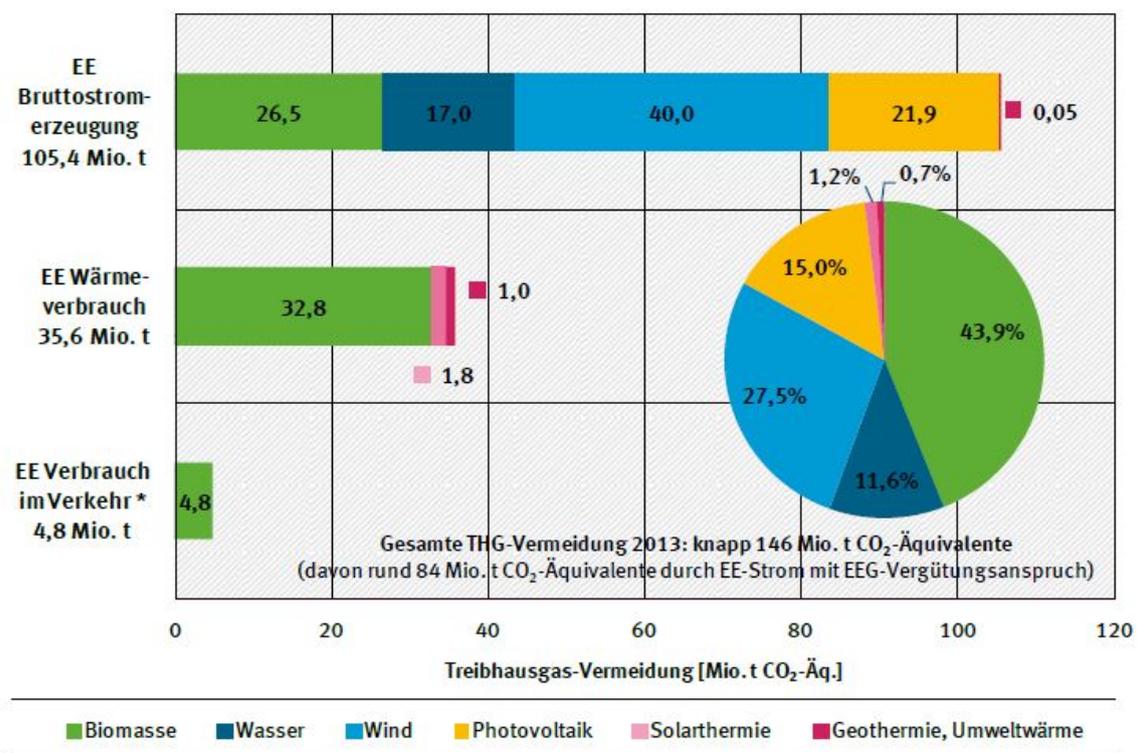
*Alkoholgärung:* Bei der alkoholischen Gärung werden zucker- und stärkehaltige Biomassen mit Hilfe von Mikroorganismen in Ethanol überführt. Reines Bioethanol kann dann als Treib- und Brennstoff in Motoren oder Verbrennungsanlagen eingesetzt werden [KSW13, S.898].

#### 4.2.5 Vorteile bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

Nachdem die Funktionsweisen der erneuerbaren Energieträger erläutert wurden, werden in diesem Kapitel deren Vorteile bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung dargestellt.

Regenerative Energien sorgen in vielerlei Hinsicht für positivere Werte bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung und tragen wesentlich zur Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland bei. Die Emissionsbilanzierung betrachtet dabei die durch erneuerbare Energien verursachten Emissionen und vergleicht diese mit den vermiedenen Emissionen einer alternativen, fossilen Energieerzeugung. [MSH<sup>+</sup> 14, S. 24]

Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien wurden im Jahr 2013 insgesamt 146 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente vermieden. Davon wurden rund 105,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Stromsektor (72 %), 35,6 Mio. t im Wärmebereich (25 %) und 4,8 Mio. t im Kraftstoffbereich (3 %) vermieden (siehe Abbildung 24).



\* vorläufige Schätzung auf Basis des Vorjahresrohstoffmixes und unter Verwendung der typischen THG-Werte für Biokraftstoffe nach RL 2009/28/EG und nur Biokraftstoffe ohne Stromverbrauch im Verkehrssektor

Abb. 24: Netto vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2013 (nach [MSH<sup>+</sup> 14, S. 25])

Im Stromsektor werden die höchsten spezifischen Treibhausgasvermeidungen erreicht. Hier kommen Technologien zum Einsatz, die Strömungs-, Wind-, solare Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandeln und dabei nur geringe direkte Emissionen verursachen. Im Wärme- und Transportsektor sind die Unterschiede der Energiequellen und Umwandlungstechnologien deutlich geringer, sodass auch weniger direkte Emissionen vermieden werden.

Die nachfolgende Abbildung (25) stellt die Gesamtemissionsbilanzen der verschiedenen Technologien zur erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeugung im Jahr 2013 nach Energieträgern dar.

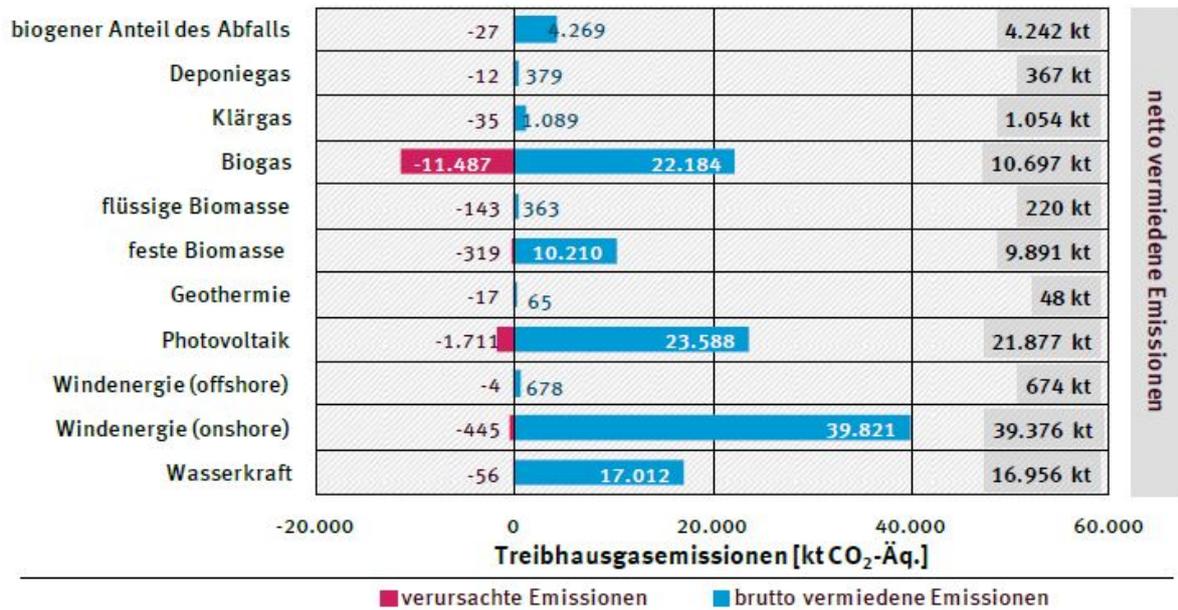


Abb. 25: Vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2013 (nach [MSH<sup>+</sup> 14, S. 28])

Abbildung 25 zeigt deutlich, dass der Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Windenergie an Land vermieden werden (39,376 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente), gefolgt von Photovoltaik (21,887 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.) und der Wasserkraft (16,956 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.). Die Netto-Vermeidung von Biogas fällt deutlich geringer aus als die Brutto-Vermeidung, da die Stromerzeugung aus Biogas auch erhebliche Emissionen verursacht (11,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.) [MSH<sup>+</sup> 14, S. 28]). Diese Zahlen verdeutlichen, dass der Ausbau von erneuerbaren Energien wesentlich zur Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland beiträgt.

#### 4.2.6 Versteckte Risiken und Gefahren

Die Menschen verlangen nach immer neueren Technologien, die das Leben erleichtern. Doch es ist nicht alles Gold, was glänzt und so ist es auch bei den Erneuerbaren Energien. Welche Risiken und Gefahren lauern also bei dem Ausbau regenerativer Energieanlagen?

Als einer der Nachteile gegenüber konventionellen, fossilen Energieträgern zeigt sich, dass erneuerbare Energien sehr teuer in ihrer Anschaffung sind. Dazu kommt, dass Solar- und Windanlagen unbeständig in der Energiebereitstellung sind. Die Stromversorgung wechselt somit von einer nachfrageorientierten hin zu einer angebotsorientierten. Mit dem Wechsel, insbesondere zu Wind- und Sonnenenergie, wird Strom dann erzeugt, wenn das Angebot für die Erzeugung da ist. Wenn aber der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint, muss die komplette Stromversorgung in (fossilen) Backup-Kraftwerken erfolgen.

Ein weiteres Problem ist die Brandgefahr. PV-Anlagen erzeugen Gleichstrom und sind auf dem Dach eines Hauses installiert. Wenn die Sonne scheint, lässt sich der Photovoltaikprozess nicht abschalten, auch wenn man die Anlage vom Netz trennt. Bei vorhandener Gleichspannung besteht daher erhebliche Gefahr von Kurzschlüssen oder Stromschlägen bei Löscharbeiten. Auch ein Brand an einem Windrad birgt Probleme. Aufgrund der Turmhöhe ist es für Feuerwehren nicht möglich die Anlage zu löschen und somit brennt diese komplett ab. Aus diesem Grund kann es hier schnell zu einem Totalschaden in Millionenhöhe kommen.

Eine physikalische Besonderheit bei der Stromversorgung bildet die Speicherung von Strom. Dieser muss immer genau so viel erzeugt werden, wie im Moment verbraucht wird. Das heißt Erzeugung und Verbrauch müssen immer exakt übereinstimmen. Je größer die Unterschiede zwischen Erzeugung und Verbrauch, desto größer sind die sich ergebenden Frequenzabweichungen. Dies führt im schlimmsten Fall zu einem Zusammenbruch des Netzes („Black Out“). Eine technisch verfügbare Speichertechnologie bildet die Pumpspeicherung. Um den Bedarf jedoch zu decken, müssten die in Deutschland vorhandenen Pumpspeicherkraftwerke in ihrem Speichervolumen um den Faktor 500 erweitert werden, was andererseits nicht realisierbar ist. Auch die Engpässe im Netz werden zu einem immer größeren Problem. So liegen diese bei der Sonnenenergie vor allem in den regionalen Netzen und bei der Windenergie in den Transportleitungen von Nord nach Süd. Der Strom, der - stark schwankend - vor allem an der Küste erzeugt wird, kann über die in Deutschland vorhandenen Leitungen nicht ausreichend zu den Verbrauchern nach Süden transportiert werden. Es wächst somit auch die Gefahr großflächiger und länger anhaltender Netzzusammenbrüche.

[Rot12]

### 4.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Energieerzeugung

Nachdem die Verfahren zur Energie- und Wärmeerzeugung aus konventionellen und regenerativen Energiequellen erläutert wurden, werden diese in Hinsicht auf die bei der Energieerzeugung entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen verglichen. Abbildung 26 zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Kraftwerkstypen in Gramm pro erzeugter Kilowattstunde. Hierbei wird nicht nur der Betrieb, sondern der gesamte Lebenszyklus von Anlagen inklusive aller Produktionsschritte berücksichtigt. Bei der Kernkraft wird die Entsorgung jedoch nicht betrachtet.

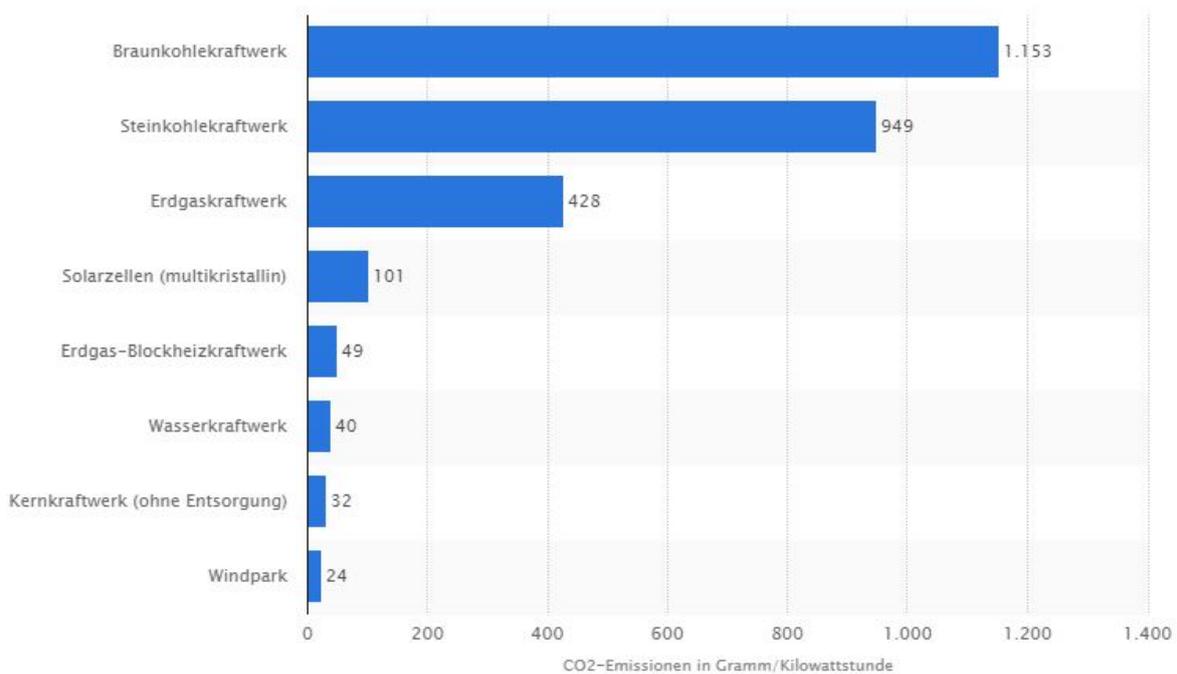


Abb. 26: CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Energieerzeugung verschiedener Kraftwerkstypen (nach [Sta15])

Die in den vorherigen Kapiteln angesprochenen negativen Auswirkungen auf das Klima spiegeln sich in Abbildung 26 deutlich wider. So produzieren ein Braunkohlekraftwerk bei der Bereitstellung von Energie 1.153 gCO<sub>2</sub>/kWh, ein Steinkohlekraftwerk 949 gCO<sub>2</sub>/kWh und ein Erdgaskraftwerk rund 428 gCO<sub>2</sub>/kWh. Damit liegen die fossilen Energieträger in Bezug auf den Ausstoß klimaschädlicher Gase weit vor anderen Energiequellen. Das schlechte Abschneiden der fossilen Energieträger kommt insbesondere dadurch zustande, dass mit Öl, Kohle oder Gas betriebene Kraftwerke häufig eine schlechte Effizienz bei der Stromerzeugung aufweisen. Auch Atomstrom ist keineswegs CO<sub>2</sub>-neutral. Kernkraftwerke verursachen zunächst im Betrieb keine CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Treibhausgasemissionen sind größtenteils der Stromproduktion vor- und nachgelagert. Betrachtet man den gesamten Lebensweg – von Uranabbau, Brennelementherstellung, Kraftwerksbau und -rückbau bis zur Endlagerung – so ist in den einzelnen Stufen des Zyklus zum Teil ein hoher Energieaufwand nötig, wobei Treibhausgase emittiert werden [Umw13].

Atomkraft verursacht deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als Kohlekraftwerke, aber mehr als bei der Energiegewinnung aus erneuerbaren Energien.

Dennoch verursachen auch diese CO<sub>2</sub>-Emissionen. Im Betrieb von regenerativen Energiequellen werden zwar keine fossilen Brennstoffe verwendet, aber die Herstellung solcher Anlagen verursacht Emissionen, die auf die produzierten Strommengen angerechnet werden müssen. Darum liegt auch Sonnenstrom aus Photovoltaikanlagen relativ hoch, weil die Fabrikation der Siliziummodule noch recht energieintensiv ist.

Die dargestellten Diagramme rechtfertigen nochmals die Aussage, dass bei der Energieerzeugung aus konventionellen Energieträgern wesentlich mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt werden als bei der Energiegewinnung durch Kernkraftwerke oder regenerativen Energien. Auch wenn die Unterschiede sehr groß sind, zeigt sich, dass Atomkraft und regenerative Energien nicht frei von klimaschädlichen Gasen sind. Bevor man sich auf eine Seite in der Klimapolitik stellt, sollte man sich über jegliche positive als auch negative Aspekte im Klaren sein.

## 5 Erfassung technischer Daten am Beispiel Reinfeld

Reinfeld ist eine Stadt im Kreis Stormarn (Schleswig-Holstein) und liegt zwischen Hamburg und Lübeck. Die Erarbeitung und Umsetzung eines Klimaschutzkonzeptes, welches neben einer Bestandsanalyse auch umzusetzende Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung aufzeigt, wurde bereits durch einen Förderantrag in die Wege geleitet. Aufgrund der engagierten Klimaschutztätigkeiten bietet die Stadt eine geeignete Grundlage für diese Bachelorthesis.

In den folgenden Kapiteln liegt das Hauptaugenmerk für erneuerbare Energien in Reinfeld bei der Photovoltaik. Diese bietet für den Standort die besten energetischen und wirtschaftlichen Potentiale. Große Industrieunternehmen in den Gewerbegebieten sorgen zudem für eine effektive Flächennutzung bei der Installation von Photovoltaik-Anlagen. Die Stadtwerke Reinfeld betreiben zusätzlich im angrenzenden Dorf Barnitz eine alte Windkraftanlage mit einer Leistung von etwa 50.000 kWh pro Jahr. Eine weitere Anlage ist jedoch aufgrund der schlechten Standortbedingungen nicht erstrebenswert. Die Wasserkraft ist durch das Gefälle der Stadt theoretisch als (Pump-)Speicherkraftwerk möglich. Diese Art der regenerativen Energien wird jedoch nicht weiter betrachtet. Auch die Energiegewinnung aus der Kraft-Wärme-Kopplung wird aufgrund der möglichen Verwendung von fossilen Energieträgern in dieser Arbeit nicht behandelt.

### 5.1 Demand-Side-Management

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Energiebedarf verschiedener Verbraucher der Stadt Reinfeld. Laut der STROMNETZ HAMBURG GMBH benötigen Energiekunden, deren Jahresenergiebezug geringer als 100.000 kWh ist und die an die Niederspannung angeschlossen sind, keine viertelstündige registrierende Leistungsmessung. Die Analyse dieser Kunden erfolgt daher in dieser Bachelorthesis und bei Energieversorgungsunternehmen unter Verwendung von synthetischen Standardlastprofilen (SLP). Die Standardlastprofile Haushalt, Gewerbe allgemein und Landwirtschaftsbetriebe entsprechen den repräsentativen Lastprofilen H0 – Haushalt, G0 – Gewerbe allgemein und L0 – Landwirtschaftsbetriebe des BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) vormals VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft) auf der Grundlage des Standardlastprofil-Verfahrens [Str14].

Die Standardlastprofile sind auf einen jährlichen Verbrauch von ca. 1.000 MWh normiert und decken das jeweilige Kalenderjahr vollständig ab. Darin sind Feiertage, Brückentage und Wochenenden eingearbeitet. Alle Angaben sind in gesetzlicher Zeit dargestellt und berücksichtigen die Umstellungen auf Sommer- und Winterzeit. Am Tag der Umschaltung von Winter- auf Sommerzeit werden die Arbeitswerte für die Zeiten 02:15; 02:30; 02:45; 03:00 gelöscht, womit dieser Tag nur 23 Stunden hat. Bei der Umschaltung von Sommer auf Winterzeit erscheinen die Arbeitswerte für die Zeiten 02:15; 02:30; 02:45; 03:00 doppelt und so enthält dieser Tag 25 Stunden [Str14].

Bei der Analyse verschiedener Verbraucher mittels SLP-Verfahren ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Verwendung der Daten um Standardwerte handelt. Eine explizite Datenanalyse für verschiedene Verbraucher ist in diesem Umfang nicht gewährleistet. Die Datei „Standardlastprofile Strom 2013 Regelzone TenneT.xls“ [N-E14], die zur Erstellung verschiedener Lastgänge verwendet wurde, befindet sich im Anhang B. Dabei wurde der Energiebedarf auf den jährlichen Verbrauch der Lastprofilgruppen normiert. Aufgrund des Umfangs der Stadt Reinfeld wurden nur die Lastprofile Haushalt (H0) und Gewerbe werktags (G1) in Betracht gezogen. Die jährlichen Verbrauchswerte für die Schule und Sporthalle der Stadt Reinfeld wurden zur Verfügung gestellt. Die Datei „Aufstellung Stromverbrauch Gebäude.pdf“ enthält diese Daten und ist dem Anhang C beigelegt.

Verbraucher	Jährlicher Stromverbrauch [kWh]
Einpersonen Haushalt (nach [Ene11, S. 5])	2.256
Vierpersonen Haushalt (nach [Ene11, S. 5])	ca. 5.000
Schule (siehe Anhang)	110.742
Sporthalle (siehe Anhang)	48.564

Tab. 3: Jährlicher Stromverbrauch verschiedener Verbraucher

Mit den jährlichen Stromverbrauchswerten aus Tabelle 3 und den Werten der Standardlastprofile konnte eine Analyse bezüglich der Verbraucherdaten der Stadt Reinfeld vorgenommen werden. Die erstellten Datensätze werden in Kapitel 6 ab Seite 38 weiter erläutert.

## 5.2 Energieerzeugung

Die Stadt Reinfeld bezieht bereits einen Teil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Laut der Vorhabenbeschreibung zum Förderantrag (siehe Anhang D) der Stadt Reinfeld haben die Stadtwerke eine neue Sparte „Energie“ gegründet. Aus diesem Grund wurden bereits einige Maßnahmen zur Erzeugung von Energie aus regenerativen Energiequellen umgesetzt:

- Errichtung eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) auf dem Klärwerkgelände zur Reduzierung des Stromverbrauchs mit einer Leistung von ca. 100.000 kWh/a.
- Installation des Wasserrades am Herrenteich, welches 35.000 kWh im Jahr generiert und in das Stromnetz einspeist.

Im Zuge der Umsetzung von Klimaschutzaktivitäten wurden im Jahr 2012 zwei Photovoltaik-Anlagen auf dem Schulgelände der Reinfelder Schule errichtet. Auf dem Dach der Immanuel-Kant-Schule ist eine 34,20 kWp Anlage und auf dem der anliegenden Sporthalle eine 46,80 kWp PV-Anlage installiert worden. Die Daten der Energieerzeugungswerte stammen aus dem *Sunny Portal*, der SMA Solar Technology AG und dienen in den folgenden Kapiteln als Grundlage für die Analyse des elektrischen Autarkiegrades.

Um eine Untersuchung auf Haushaltsebene durchzuführen, wurden die Energieerzeugungsdaten einer solaren Hausanlage verwendet. Diese Hausanlage befindet sich in der unmittelbaren Nähe von Reinfeld und hat eine Gesamtanlagenleistung von 15,52 kWp. Die Besonderheit der Anlage liegt in der Ausrichtung der Solarmodule. In Südwestrichtung sind monokristalline Siliziumzellen und in Nordostrichtung Dünnschichtzellen verbaut. Die Daten der Energieerzeugungswerte dieser solaren Hausanlage stammen ebenfalls aus dem *Sunny Portal*, der SMA Solar Technology AG.

## 6 Autarkiegradbestimmung

In diesem Kapitel werden die einzelnen elektrischen Autarkiegrade verschiedener Verbraucher bestimmt. Dabei sind die Standardlastprofile (SLP) der Gruppen H0 – Haushalte und G1 – Gewerbe werktags (Schule) verwendet worden. Um den Autarkiegrad zu bestimmen, wird der Gesamtenergiebedarf der einzelnen Verbraucher mit dem Energieertrag einer realen, bereits installierten Photovoltaikanlage (PV-Anlage) ins Verhältnis gesetzt. Für die Berechnung des Autarkiegrades wird die Formel (1) von Seite 3 verwendet [Autarkiegrad [%] = Eigenerzeugte Energie / Gesamtenergiebedarf]. Dabei werden die Jahres- und Monatsdaten auf bilanzielle und die Tagesdaten auf physikalische Autarkie untersucht. Die dargestellten Verbrauchs- und Erzeugungswerte sind nach der zweiten Kommastelle gerundet.

### 6.1 Autarkiegrad Schule

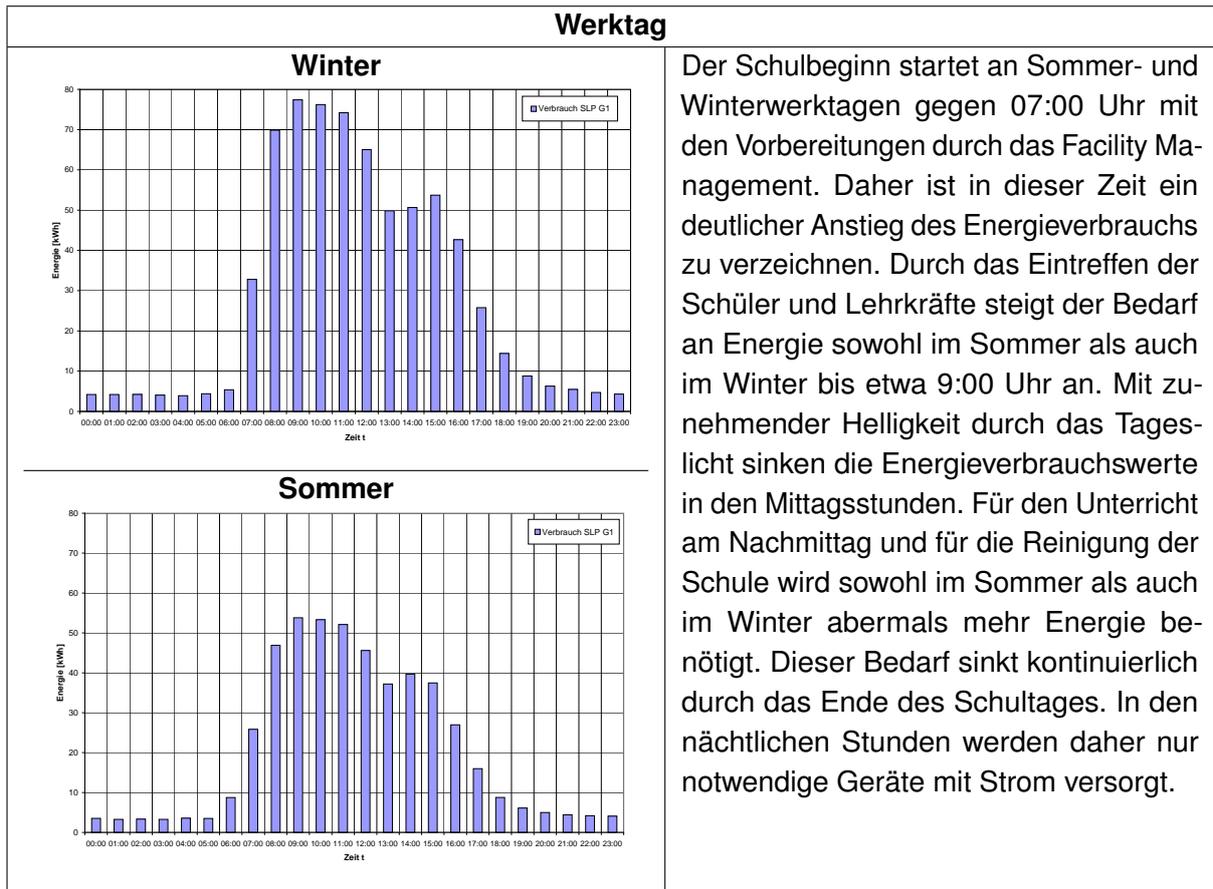
Der Energiebedarf des Reinfelder Schulkomplexes (Erich-Kästner-Schule und Immanuel-Kant-Schule) sowie der Reinfelder Sporthalle wurde mit Hilfe der SLP-Datensätze ermittelt und anschließend auf den jährlichen Verbrauch von 159.306 kWh/a normiert. Tabelle 4 zeigt die nach der zweiten Kommastelle gerundeten Gesamtenergieverbrauchswerte verschiedener Jahreszeiten und Wochentage, ermittelt durch SLP-Daten des Jahres 2013 (vgl. Anhang E).

	<b>Gesamtenergiebedarf</b>
Jahr	159.305,97 kWh
Wintermonat	16.315,47 kWh
Sommermonat	10.872,33 kWh
Winterwerktag	692,46 kWh
Sommerwerktag	496,53 kWh
Wintersamstag	130,86 kWh
Sommersamstag	103,83 kWh
Wintersonntag	111,57 kWh
Sommersonntag	84,51 kWh

Tab. 4: Energieverbrauch Schule nach SLP

#### 6.1.1 Analyse der standardisierten Verbrauchsdaten

Die Auswertung der standardisierten Verbrauchsdaten der Schule erfolgt in den Tabellen 5 und 6. Die erstellten Abbildungen zeigen die standardisierten Energieverbrauchsdaten der Schule in Abhängigkeit der Zeit. Die Abszissenachse ist stündlich unterteilt. Die Ordinatenachse zeigt jeweils die Energie in Kilowattstunden [kWh]. Für die Darstellung wurde die Form des Säulendiagramms gewählt. Ersichtlich sind die Energiebedarfswerte der Schule und Sporthalle (Verbrauch SLP G1) über die blauen Säulen.



Tab. 5: Interpretation der SLP Gruppe G1 Werktags

<b>Samstag</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Winter</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Sommer</b></p>	<p>Der Samstag ist arbeitsfrei, deshalb wird im Sommer und im Winter durchschnittlich nur 4 bis 5 kWh über den Tag verbraucht. In der Zeit von 08:00 Uhr bis 12:00 Uhr steigt der Energiebedarf aufgrund von Reinigungsarbeiten geringfügig an.</p>
<b>Sonntag</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Winter</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Sommer</b></p>	<p>Da der Unterricht nur an Werktagen stattfindet, wird sowohl an Sommer- als auch an Wintersonntagen nur Energie für die nötigsten elektronischen oder thermischen Geräte gebraucht. Daher wird ganztägig nur ein geringer Energiebedarf verzeichnet.</p>

Tab. 6: Interpretation der SLP Gruppe G1 Wochenende

### 6.1.2 Analyse der Autarkiegrade

Um den Autarkiegrad bestimmen zu können, müssen die Energieverbrauchsdaten mit den Energieerzeugungsdaten der photovoltaischen Schul- und Sporthallenanlagen kombiniert werden. Die folgenden Abbildungen 27 bis 35 zeigen die durch Photovoltaikanlagen erzeugte bzw. von der Schule und Sporthalle verbrauchte Energie in Abhängigkeit der Zeit. Auf der Abszissenachse sind die stündlichen, täglichen und monatlichen Werte angegeben. Die Ordinatenachse zeigt jeweils die Energie in Kilowattstunden [kWh]. Für die Darstellung wurde die Form des Säulendiagramms gewählt. Dabei stammen alle verwendeten Daten aus dem Jahr 2013.

Dargestellt sind die standardisierten Energiebedarfswerte der Schule und Sporthalle (Verbrauch SLP G1) über die blauen Säulen. Die erzeugten Energiedaten der Schul- und Sporthallenanlage sind summiert über die orangenen Säulen (Erzeugung PV-Anlage Sporthalle+Schule) ersichtlich. Mit diesen Daten ist ein Vergleich zwischen Energieverbrauch und -erzeugung möglich.

Auf Monats- und Jahresebene erfolgt eine Analyse des bilanziellen Autarkiegrades. Bei dieser Betrachtung werden die Energieerzeugungsdaten unabhängig vom momentanen Bedarf betrachtet. Das Versorgungsnetz dient als Speicher, in den Überschüsse eingespeist und Defizite bezogen werden. Aus der Tagesbetrachtung wird der physikalische oder auch technische Autarkiegrad gewonnen. Diese Form der Autarkie bezieht sich auf den momentanen Bedarf. Dabei gehen Überschüsse, die nicht lokal gespeichert werden, wie in diesem Fall, an das Versorgungsnetz verloren. Die verwendeten technischen Daten zur Berechnung der Autarkiegrade befinden sich im Anhang E.

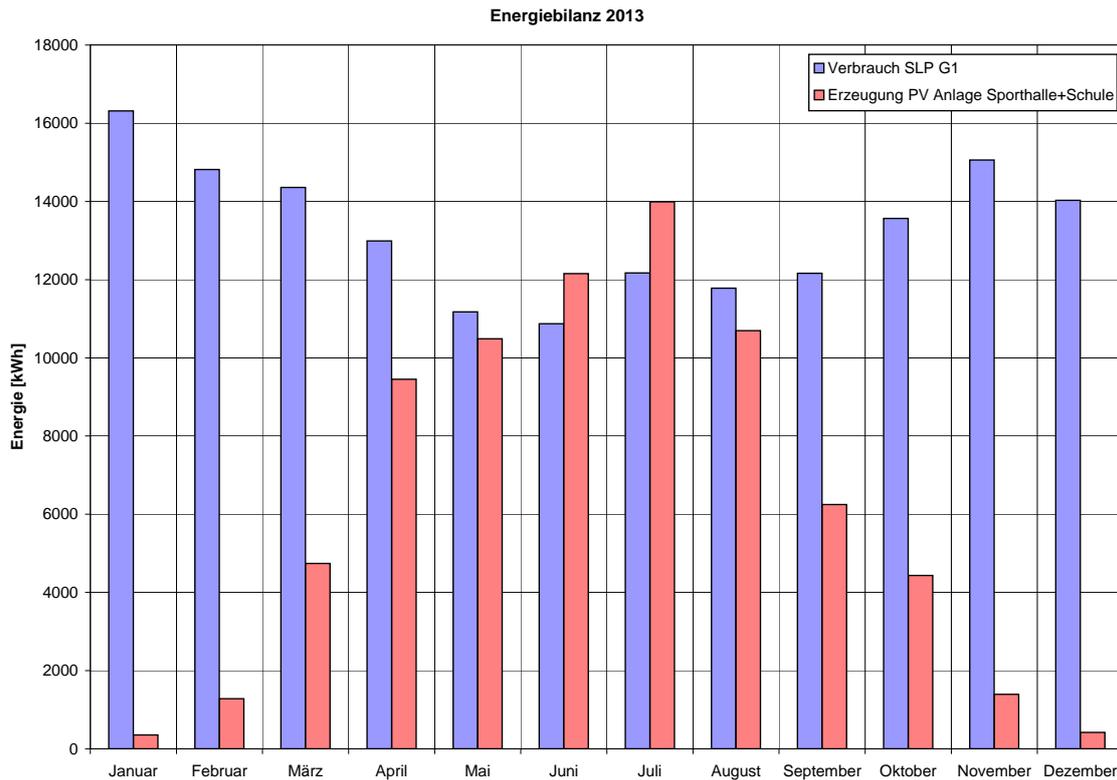


Abb. 27: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Jahres

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{75.653,47 \text{ kWh}}{159.305,97 \text{ kWh}} = 0,4749 = \underline{\underline{47,49 \%}} \quad (4)$$

Die Grafik 27 zeigt deutlich die Antiparallelität zwischen Energiebedarf und Energieerzeugung durch photovoltaische Anlagen. In den Wintermonaten (Dezember, Januar und Februar) ist der Energieverbrauch wesentlich höher als die Energieerzeugung. Ebenso verhält es sich mit den Frühjahrs- und Herbstmonaten. Der Unterschied zwischen Energieverbrauch und -erzeugung wird im Verlauf dieser Monate jedoch geringer. Lediglich in den Sommermonaten Juni und Juli gelingt es den PV-Anlagen den Energiebedarf der Schule und Sporthalle zu decken. Durch den sehr hohen Energieertrag lässt sich außerdem ein bilanzieller Autarkiegrad von 47,49 % (Formel 4) errechnen. Dies bedeutet, dass die Schule und Sporthalle fast zur Hälfte mit eigens erzeugtem Strom versorgt werden kann.

Es ist deutlich erkennbar, dass der Autarkiegrad nur gering erhöht werden kann, wenn die Überschüsse gespeichert würden. Eine vollständige bilanzielle Autarkie scheint für diesen Standort nicht erreichbar zu sein. Die Unterschiede zwischen Sommer- und Wintermonaten sind bereits in diesem Diagramm deutlich zu erkennen. Um genauere Aussagen treffen zu können, muss eine Analyse auf Monatsebene stattfinden.

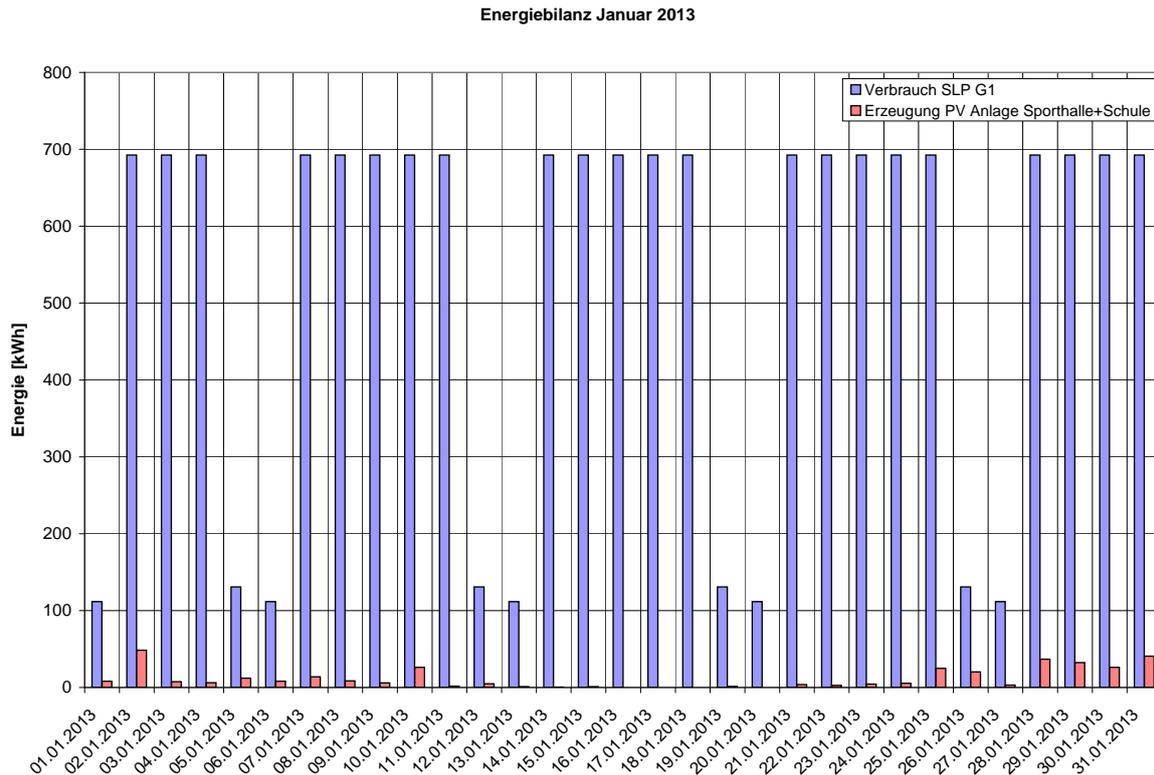


Abb. 28: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Wintermonats

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{356,77 \text{ kWh}}{16.315,47 \text{ kWh}} = 0,02187 = \underline{\underline{2,187 \%}} \quad (5)$$

Um die ersichtlich gewordene Theorie, dass die PV-Anlagen von Schule und Sporthalle in Wintermonaten einen vergleichsweise niedrigen Energieertrag liefern, zu stützen, wurden die Energiebilanzen in gleicher Weise für Winter- und Sommermonate erstellt. So wird in Abbildung 28 ersichtlich, dass eine energetische Autarkie in dem hier dargestellten Wintermonat (Januar) kaum zu realisieren ist. Der bilanzielle Autarkiegrad beträgt lediglich 2,187 % (Formel 5). Die PV-Anlagen können den normierten Energiebedarf der Schule weder an den ersichtlichen Werktagen noch an den Wochenenden decken. Die schlechten Wetterbedingungen (Regen, Schnee, Wolken) und die niedrige Strahlungsintensität der Sonne sorgen in diesem beispielhaften Wintermonat für einen unzureichenden Energieertrag.

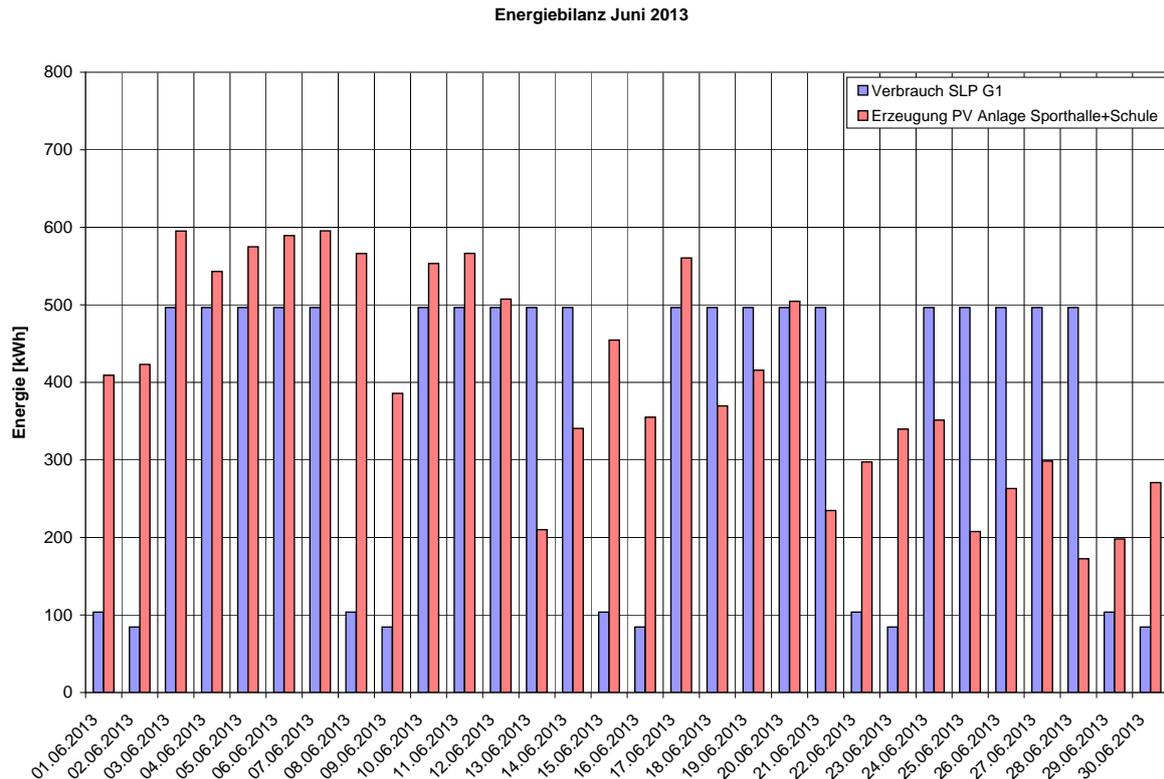


Abb. 29: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommermonats

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{12.153,30 \text{ kWh}}{10.872,33 \text{ kWh}} = 1,1178 = \underline{\underline{111,78 \text{ \%}}} \quad (6)$$

An diesem Sommermonat (Juni) ist erkennbar, dass die PV-Anlagen den standardisierten Energiebedarf der Schule zu Beginn deutlich decken können. Ab dem 18. Juni wird jedoch ersichtlich, dass die Energieerzeugungswerte sinken. So können an den Werktagen vom 24. bis 28.06. die Energieverbrauchswerte der Schule durch die PV-Anlagen nicht mehr erreicht werden und die Energie muss vom Versorgungsnetz bezogen werden. Durch die geringen Energieverbrauchswerte an Wochenenden kann jedoch ein bilanzieller Autarkiegrad über 100 % erreicht werden.

Eine vollständige bilanzielle Autarkie ist somit für Sommermonate durchaus erreichbar. Aufgrund des hohen Energiebedarfs an Wintertagen kann eine vollständige bilanzielle Autarkie für die Winterjahreszeit ausgeschlossen werden. Um diese These zu belegen werden ergänzend ausgewählte Wochentage in Hinsicht auf die Autarkie betrachtet.

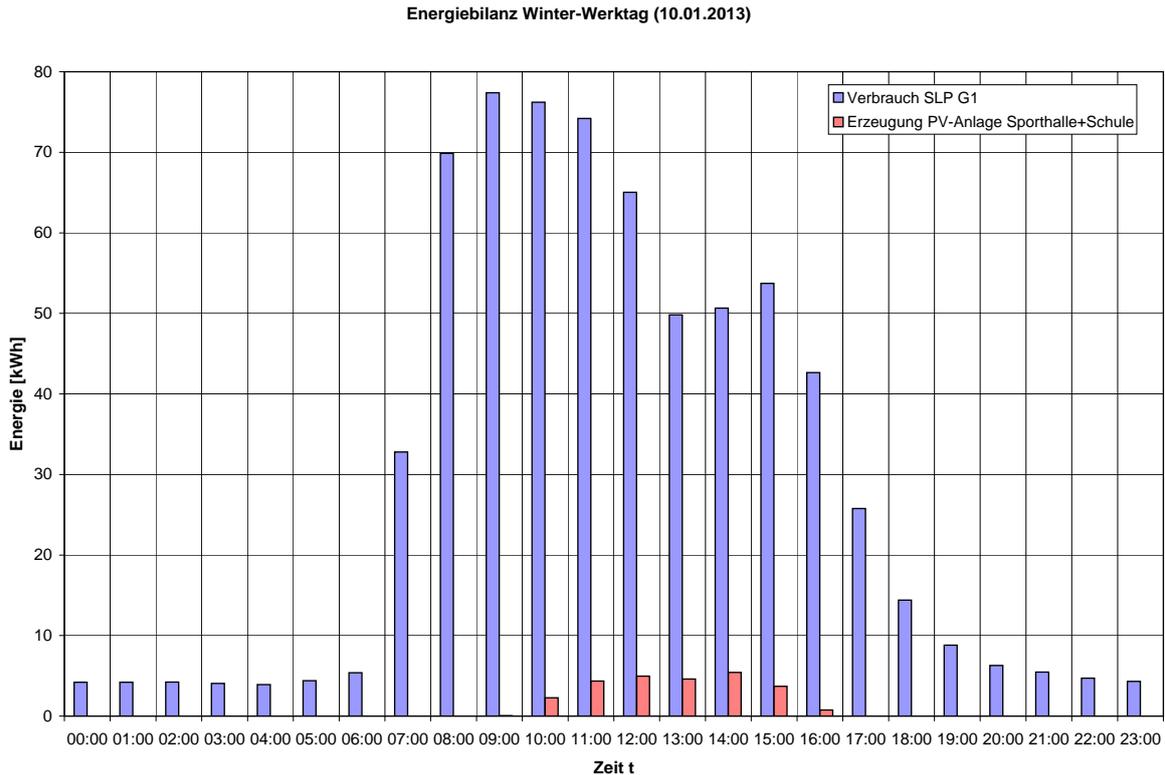


Abb. 30: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Winterwerktages

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{26,14 \text{ kWh}}{692,46 \text{ kWh}} = 0,0377 = \underline{\underline{3,77 \%}} \quad (7)$$

Die Energieerzeugungsdaten der Abbildung 30 zeigen, dass die PV-Anlagen an diesem Winterwerktag (10.01.2013) nicht in der Lage sind, den Energiebedarf der Schule zu decken. Dies verdeutlicht auch der sehr geringe physikalische Autarkiegrad von 3,77 % (Formel 7). In der Winterjahreszeit ist der Bedarf an Energie durch die Witterungsverhältnisse erhöht. Doch genau diese führen bei photovoltaischen Anlagen zu einer niedrigen Energieausbeute. Daher kann eine autarke Stromversorgung für Winterwerktage ausgeschlossen werden.

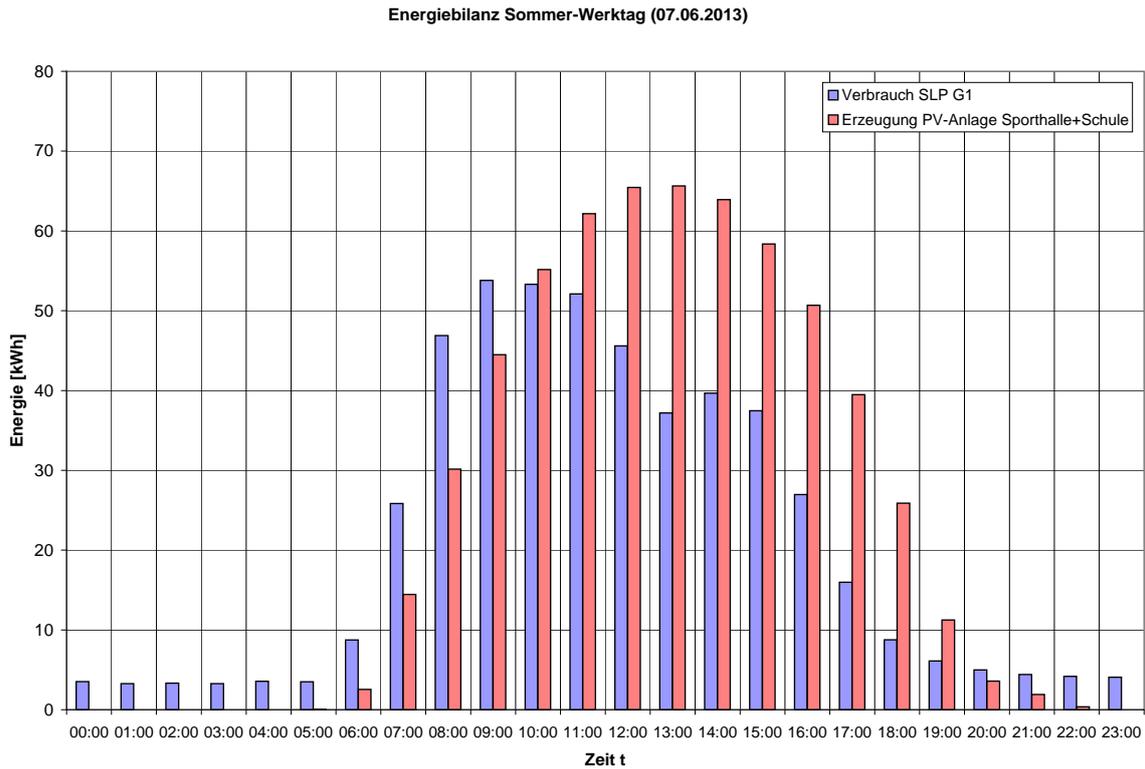


Abb. 31: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommerwerktaages

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{420,69 \text{ kWh}}{496,53 \text{ kWh}} = 0,8473 = \underline{\underline{84,73 \%}} \quad (8)$$

Mit einem physikalischen Autarkiegrad von 84,72 % (Formel 8) ist deutlich zu erkennen, dass die PV-Anlagen den Energiebedarf der Schule an einem Sommerwerktag in hohem Maße decken können. Aufgrund der schwachen Energieerzeugung in den frühen Morgen- und späten Abendstunden ist jedoch eine vollständig autarke Energieversorgung nicht möglich.

Im Vergleich zwischen den Sommer- und Winterwerktagen wird deutlich, dass die PV-Anlagen im Winter aufgrund der geringen Strahlungsintensität der Sonne nicht genügend Energie erzeugen können, um eine elektrische Autarkie zu gewährleisten. An Sommerwerktagen ist der Energieertrag hingegen sehr hoch und es wird sogar mehr Energie erzeugt als benötigt. Dieser Überschuss an Energie könnte bei Bedarf gespeichert oder anderen Netzzellen in Reinfeld zur Verfügung gestellt werden.

Der Energiebedarf der Schule ist an Werktagen durch den schulischen Betrieb erhöht. Aus diesem Grund lässt sich vermuten, dass außerhalb der Betriebszeiten, also an Wochenenden eine vollständige physikalische Autarkie erreicht werden kann.

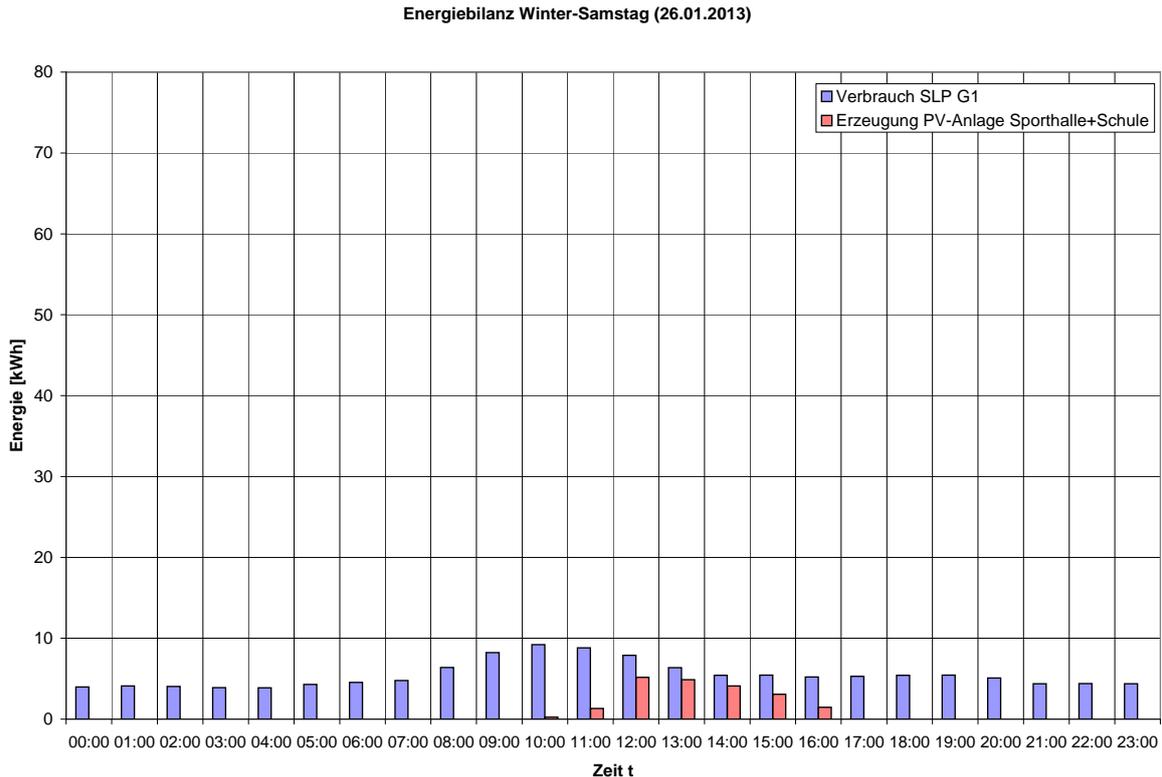


Abb. 32: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Wintersamstages

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{20,28 \text{ kWh}}{130,86 \text{ kWh}} = 0,1550 = \underline{\underline{15,50 \%}} \quad (9)$$

Für Samstag, den 26.01.2013 wurde ein physikalischer Autarkiegrad von 15,49 % (Formel 9) berechnet. Der Autarkiegrad hat sich aufgrund des geringen Energiebedarfs im Vergleich zum Winterwerktag um das vierfache gesteigert. Doch ist es auch diesem Wintersamstag nicht möglich, ausreichend Energie für den schulischen Bedarf zu erzeugen. Der Energieertrag bleibt unter dem schulischen Energieverbrauch und es wird kein Überschuss an Energie produziert. Dadurch lässt sich der Autarkiegrad auch mit geeigneten Speichermedien nicht wesentlich erhöhen.

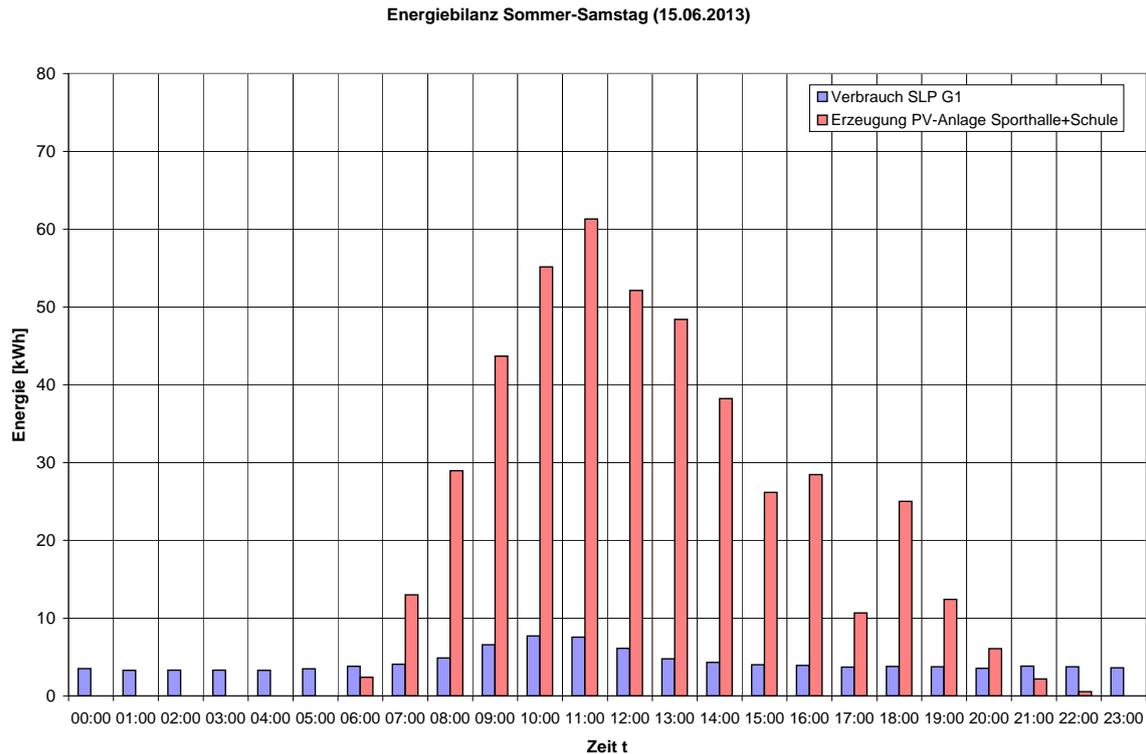


Abb. 33: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommersamstages

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{73,81 \text{ kWh}}{103,83 \text{ kWh}} = 0,7109 = \underline{\underline{71,09 \%}} \quad (10)$$

An diesem Sommersamstag (15.06.2013) wird ein physikalischer Autarkiegrad von 71,09 % (Formel 10) erreicht. Dieser ist durch den geringeren Energiebedarf am Wochenende niedriger als an einem Sommerwerktag. In den Mittagsstunden ist in Abbildung 33 deutlich zu erkennen, dass wesentlich mehr Energie zur Verfügung steht, als von der Schule eigentlich benötigt wird. Um 11:00 Uhr stehen somit fast 90 % des maximalen Tageswertes als überschüssige Energie zur Verfügung. Damit könnte durch geeignete Mittel der Autarkiegrad nochmals deutlich gesteigert werden.

Die Unterschiede zwischen Sommer- und Wintersamstagen sind abermals drastisch zu erkennen. An dem hier verwendeten Sommersamstag wurde zeitweise das Eifache an Energie erzeugt als an dem in Abbildung 32 dargestellten Samstag im Winter. Die Energieverbrauchs-werte der Schule unterscheiden sich nur geringfügig. Während der maximale Tageswert im Winter 9,2 kWh beträgt, liegt dieser im Sommer nur 1,5 kWh darunter.

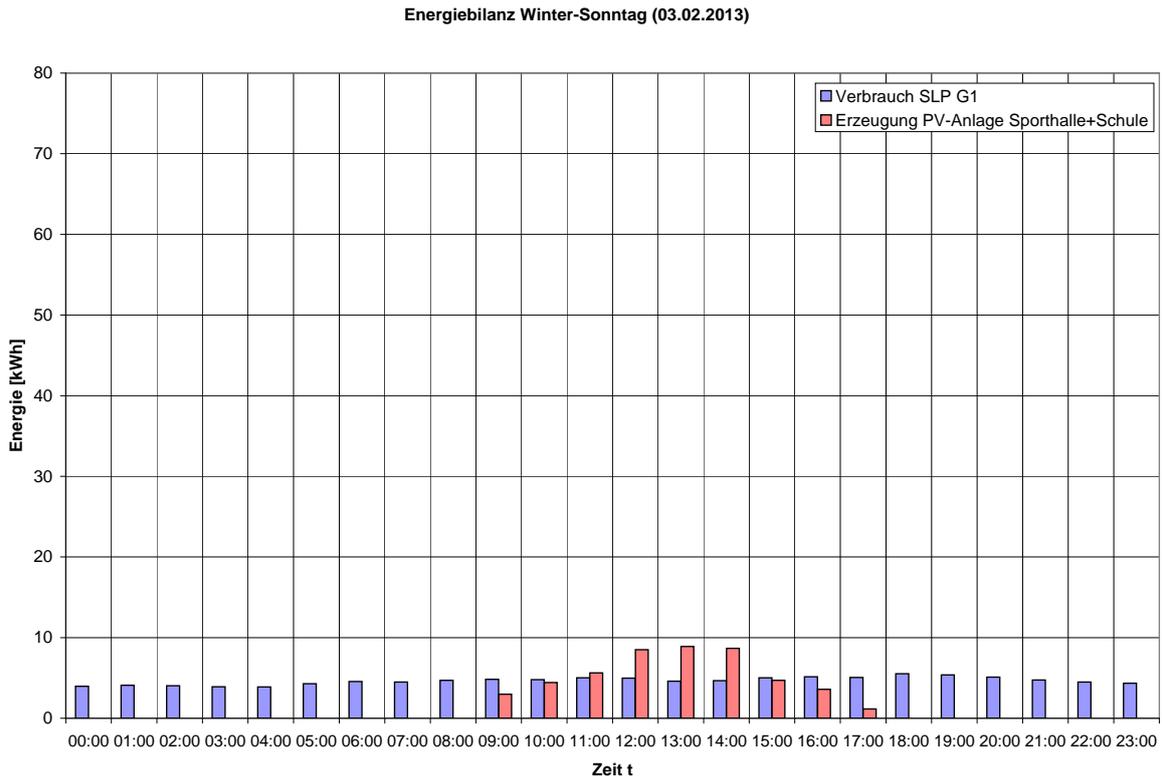


Abb. 34: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Wintersonntages

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{48,54 \text{ kWh}}{111,57 \text{ kWh}} = 0,4351 = \underline{\underline{43,51 \%}} \quad (11)$$

Im Vergleich zu den bereits diskutierten Winterwochentagen ist der Autarkiegrad an diesem Wintersonntag deutlich besser. Für den 03.02.2013 wurde ein physikalischer Autarkiegrad von 43,5 % (Formel 11) ermittelt. Dieses, für einen Tag in der Winterjahreszeit, sehr gute Ergebnis ist in der Grafik deutlich ersichtlich (vgl. Abbildung 34). Der Energiebedarf der Schule kann bereits um 11:00 Uhr gedeckt werden. Zwischen 11:00 Uhr und 15:00 Uhr wird sogar ein deutlicher Energieüberschuss bis zu 4,31 kWh verzeichnet.

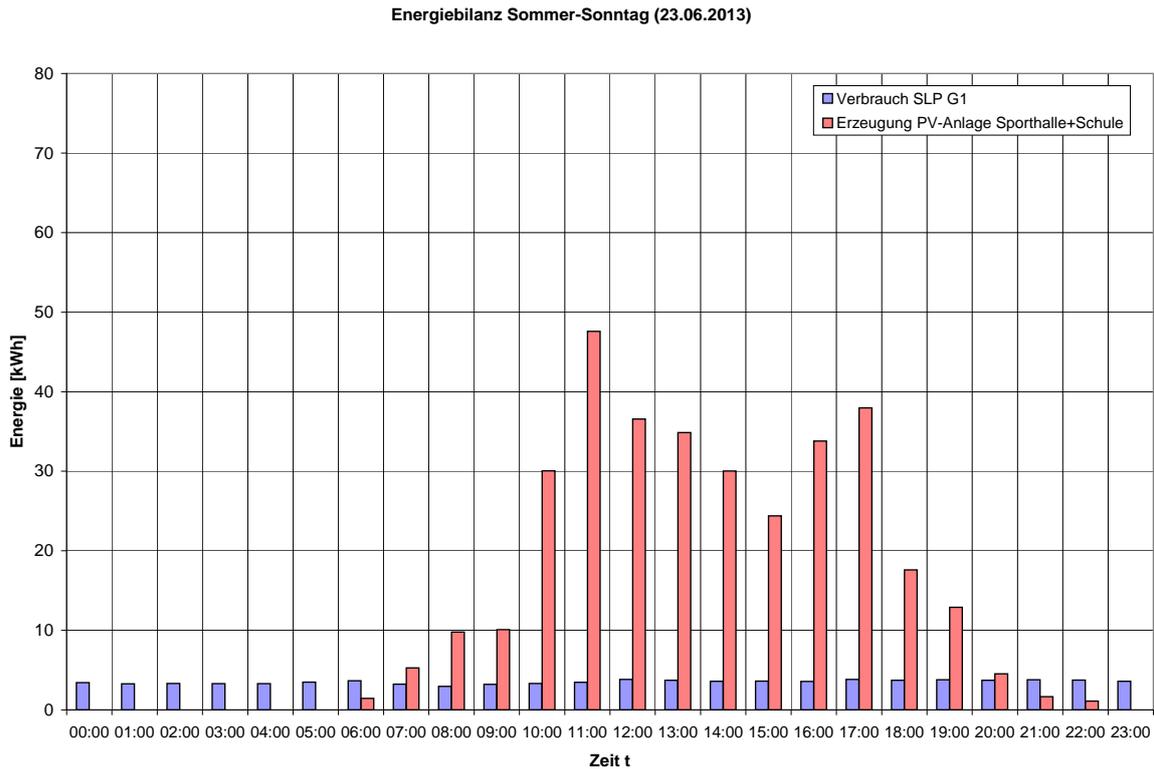


Abb. 35: Energiebilanz Schule/Sporthalle eines Sommersonntages

$$\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{53,82 \text{ kWh}}{84,51 \text{ kWh}} = 0,6368 = \underline{\underline{63,68 \%}} \quad (12)$$

An diesem Sommersonntag wurde ein physikalischer Autarkiegrad von 63,68 % (Formel 12) berechnet. Im Vergleich zu den bereits analysierten Sommerwerktagen wurde mit diesem Ergebnis der niedrigste Wert ermittelt. Dies liegt an dem vergleichsweise sehr geringen Energiebedarf der Schule. So werden an diesem Sonntag im Sommer nur durchschnittlich 3,5 kWh benötigt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass je geringer der Energiebedarf der Schule ist, desto niedriger ist auch der physikalische Autarkiegrad.

Der Unterschied zwischen einem Sommer- und Wintersonntag ist trotz der guten Energieerzeugung im Winter, deutlich ersichtlich. Die PV-Anlagen haben an diesem Sommersonntag das fünffache an Energie erzeugt, als an dem in Abbildung 34 dargestellten Wintersonntag. Es ist den PV-Anlagen am 03.02.2013, nur durch den sehr geringen Energieverbrauch von durchschnittlich 4,6 kWh möglich, zumindest zeitweise den Energiebedarf der Schule laut Standardlastprofilaten zu decken. Im Sommer stehen hingegen zur Zeit, in der die maximale Energie erzeugt wird, fast 93 % der Energie zur Verfügung, die nicht für die Deckung der Last genutzt werden können.

### 6.1.3 Zwischenfazit zum Autarkiegrad Schule

Der bilanziell errechnete jährliche Autarkiegrad der Schule liegt bei fast 50 %. Die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten sind jedoch deutlich ersichtlich geworden. Während der Sommermonat Juni eine vollständige bilanzielle Autarkie erreichte, wurde im Wintermonat Januar nur ein sehr geringer Autarkiegrad ermittelt.

Die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten wurden abermals bei der Analyse der physikalischen Autarkiegrade in Bezug auf ausgewählte Wochentage ersichtlich. Die Ergebnisse der Winterwochentage waren dabei wesentlich geringer als die der Sommerwochentage. Des Weiteren wurde deutlich, dass eine vollständige autarke Stromversorgung bei der täglichen Betrachtung nicht erreicht wurde.

Dies lässt darauf schließen, dass eine bilanzielle Autarkie erstrebenswerter ist. Aufgrund der unzureichenden Betrachtung zwischen unterschiedlichen Jahres- und Tageszeiten ist diese Art der Autarkie jedoch nicht praxisorientiert. Die Analyse der physikalischen bzw. technischen Autarkie brachte im Vergleich keine ausreichend befriedigenden Ergebnisse. Die Erhöhung dieser Werte ist allerdings durch den Energieüberschuss an erzeugungsreichen Tagen mit angemessenen Speichermedien möglich.

## 6.2 Autarkiegrad verschiedener Haushaltsgrößen

Nach der Analyse der Autarkiegrade für verschiedene Jahres und Tageszeiten der Schule stellt sich die Frage, ob eine vollständige physikalische Autarkie überhaupt möglich ist. Aus diesem Grund werden die Autarkiegrade verschiedener Haushaltsgrößen in Bezug auf eine solare Hausanlage ebenfalls analysiert.

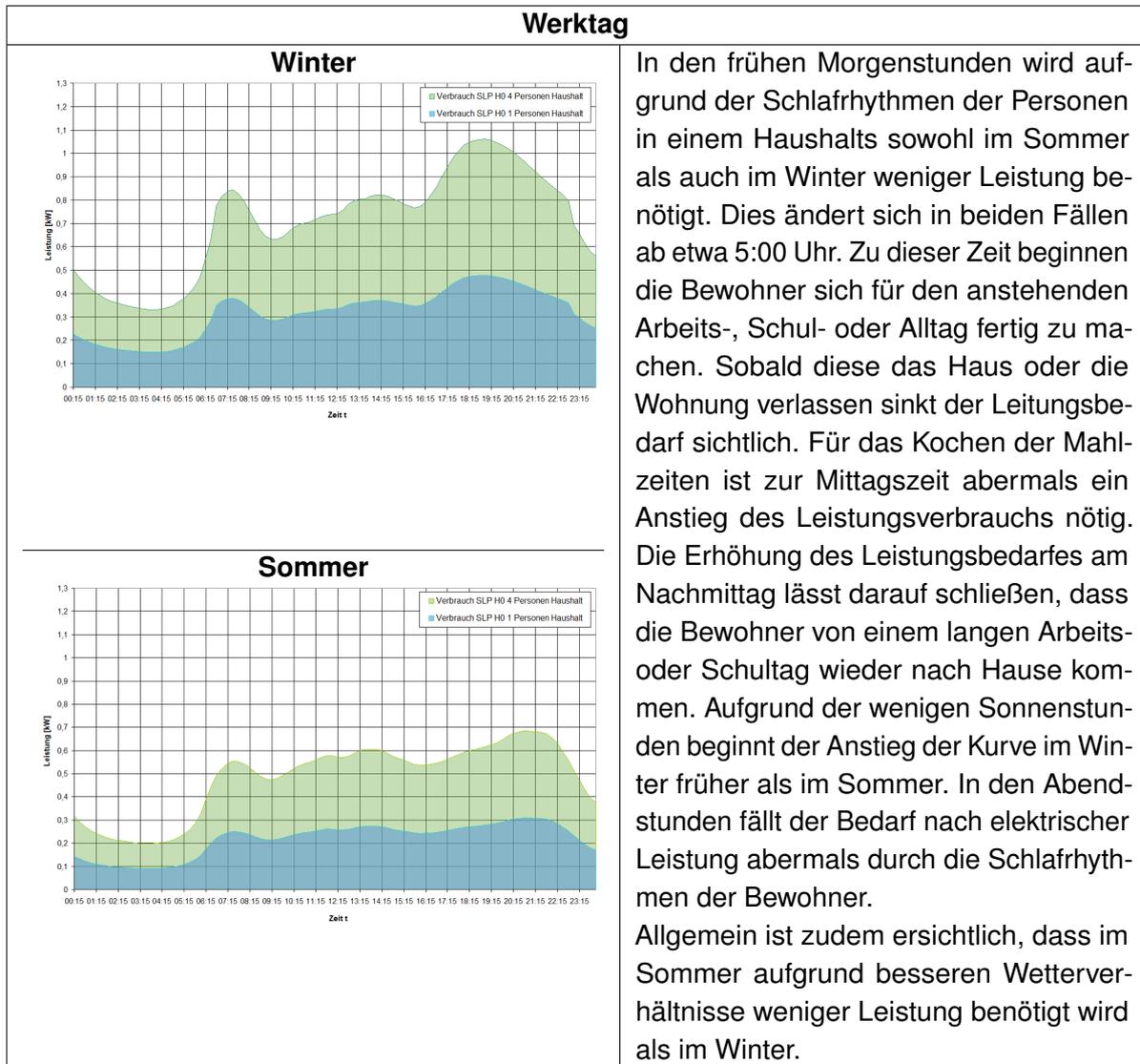
Der Energieverbrauch der Haushaltsgrößen wurde mit Hilfe von Standardlastprofilen (SLP) ermittelt und anschließend auf den jährlichen Verbrauch von 2.256 kWh/a bei Einpersonenhaushalten und 5.000 kWh/a bei Vierpersonenhaushalten normiert. Tabelle 7 zeigt die für das Jahr 2013 ermittelten Gesamtbedarfswerte verschiedener Jahreszeiten und Wochentage (vgl. Anhang F).

	<b>Gesamtenergiebedarf Einpersonenhaushalt</b>	<b>Gesamtenergiebedarf Vierpersonenhaushalt</b>
Jahr	2.256 kWh	5.000 kWh
Wintermonat	236,85 kWh	524,93 kWh
Sommermonat	155,44 kWh	344,49 kWh
Winterwerktag	30,55 kW	67,70 kW
Sommerwerktag	20,81 kW	46,13 kW
Wintersamstag	29,69 kW	65,81 kW
Sommersamstag	21,98 kW	48,72 kW
Wintersonntag	29,47 kW	65,32 kW
Sommersonntag	20,33 kW	45,07 kW

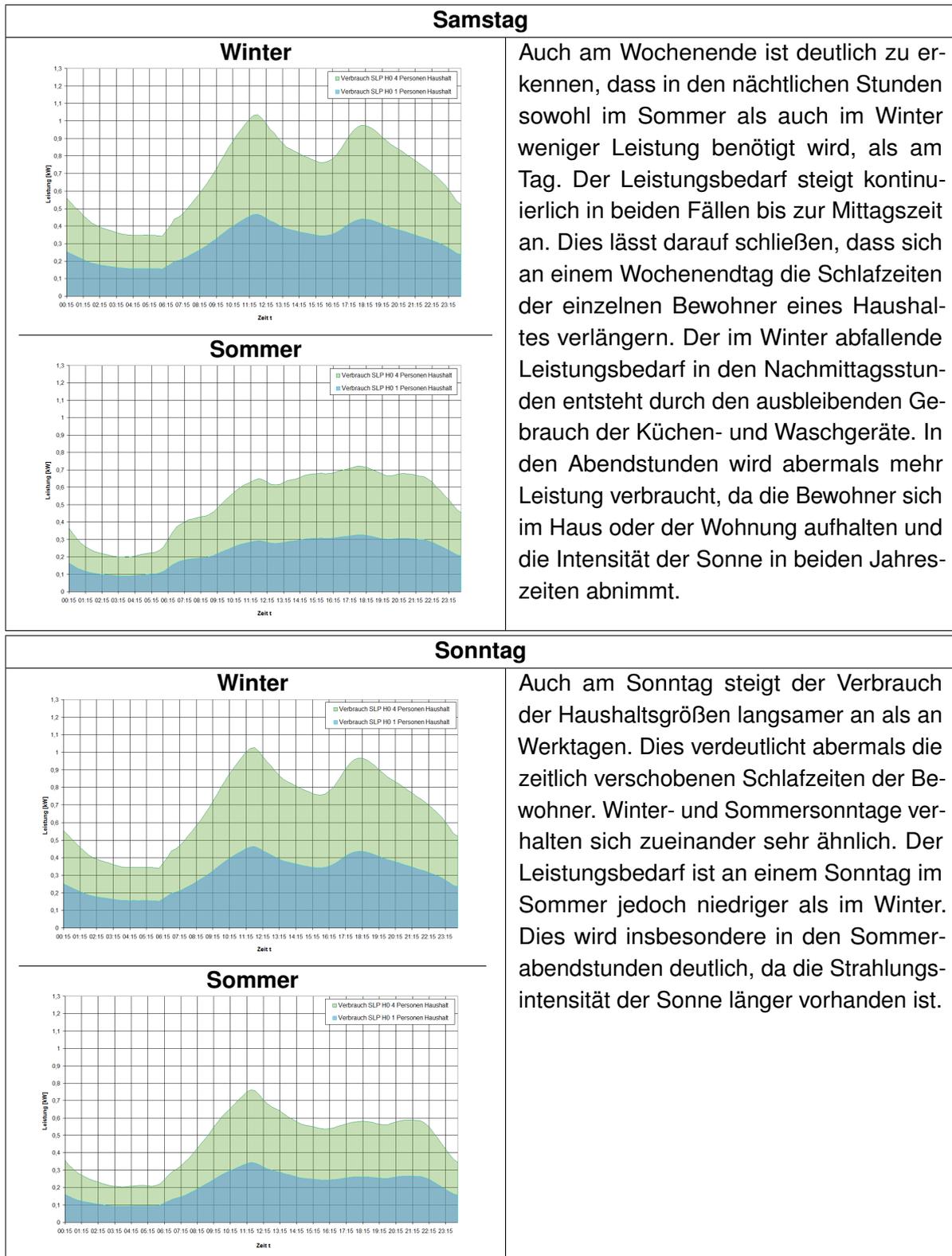
Tab. 7: Energieverbrauch verschiedener Haushaltsgrößen nach SLP

### 6.2.1 Analyse der standardisierten Verbrauchsdaten

Eine Analyse der standardisierten Verbrauchsdaten der verschiedenen Haushaltsgrößen erfolgt in Tabelle 8 und 9. Die hier verwendeten Abbildungen zeigen die durch SLP ermittelten Leistungsverbrauchsdaten der Haushaltsgrößen in Abhängigkeit der Zeit. Die Abszissenachse ist stündlich unterteilt und die Ordinatenachse zeigt jeweils die Leistung in Kilowatt [kW]. Aufgrund der zur Verfügung stehenden viertelstündigen Erzeugungswerte der solaren Hausanlage wurde hier die Form eines Flächendiagramms mit Bezug auf die Leistung gewählt. Die Leistungsbedarfswerte eines Einpersonenhaushaltes sind über die blaue Fläche und die eines Vierpersonenhaushaltes über die grüne Fläche ersichtlich.



Tab. 8: Interpretation der SLP Gruppe H0 Werktags



Tab. 9: Interpretation der SLP Gruppe H0 Wochenende

### 6.2.2 Analyse der Autarkiegrade

Die Autarkiegrade der verschiedenen Haushaltsgrößen können jedoch nur in Verbindung mit einer realen PV-Anlage bestimmt werden.

Die Abbildungen 36 bis 44 zeigen die durch eine solare Hausanlage erzeugte bzw. von verschiedenen Haushaltsgrößen benötigte Energie in Abhängigkeit der Zeit. Auf der Abszissenachse sind die stündlichen, täglichen und monatlichen Zeitintervalle aufgetragen. Die Ordinatenachse zeigt die Leistung in Kilowatt [kW] an Wochentagen und die Energie in Kilowattstunden [kWh] bei der monatlichen und jährlichen Energiebilanz. Die verwendeten Daten beziehen sich auf das Kalenderjahr 2013.

Für die Darstellung der Wochentage wurde die Form eines Flächendiagramms gewählt. Es werden die standardisierten Leistungsverbrauchswerte eines Einpersonenhaushaltes (Verbrauch SLP H0 1 Personen Haushalt) durch die blaue Fläche und die eines Vierpersonenhaushaltes (Verbrauch SLP H0 4 Personen Haushalt) über die grüne Fläche dargestellt. Die erzeugten Leistungswerte der in Kapitel 5.2 auf Seite 37 dargestellten solaren Hausanlage (Erzeugung solare Hausanlage) verdeutlicht die orange Fläche. Aufgrund einer langsamen Updaterate auf der digitalen Schnittstelle des Digitalstromzählers der solaren Hausanlage, kommt es zu negativen Werten bei den Tagesverläufen der Leistungserzeugung.

Für die Darstellung der monatlichen und jährlichen Energiebilanz wurde aufgrund der zur Verfügung stehenden täglichen Energiedaten der PV-Anlage die Form des Säulendiagramms gewählt. Die standardisierten Energieverbrauchsdaten sind für einen Einpersonenhaushalt über die blaue Säule (Verbrauch SLP H0 1 Personen Haushalt) und für einen Vierpersonenhaushalt (Verbrauch SLP H0 4 Personen Haushalt) über die grüne Säule ersichtlich. Die erzeugte Energiemenge der solaren Hausanlage (Erzeugung solare Hausanlage) verdeutlicht die orange Säule.

Es erfolgt analog zu Kapitel 6.1.2 eine Analyse des bilanziellen Autarkiegrades verschiedener Haushaltsgrößen auf Jahres- und Monatsebene und die des physikalischen auf Tagesebene. Für die Berechnungen der physikalischen Autarkiegrade wurden die Viertelstundenwerte genutzt. Die für den Autarkiegrad verwendeten technischen Daten befinden sich im Anhang F.

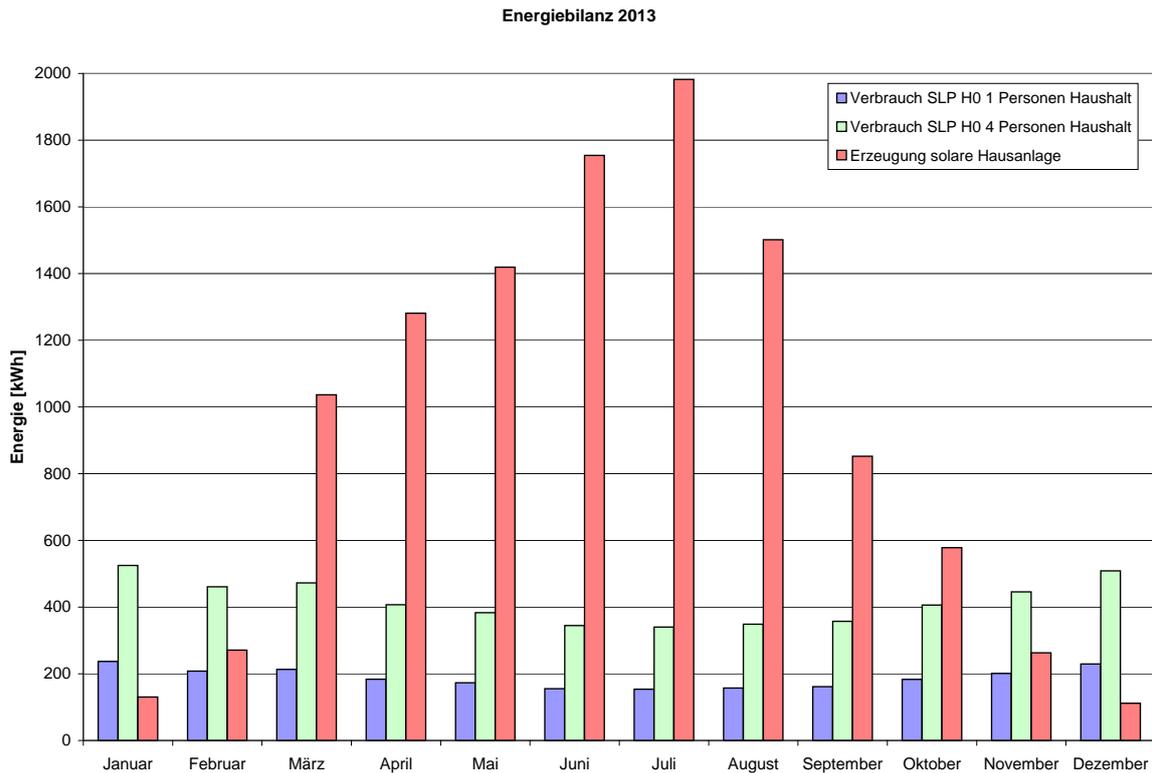


Abb. 36: Energiebilanz eines Jahres nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{11.181,65 \text{ kWh}}{2.256,00 \text{ kWh}} = 4,956 = \underline{\underline{495,6 \%}} \quad (13)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{11.181,65 \text{ kWh}}{5.000,00 \text{ kWh}} = 2,236 = \underline{\underline{223,6 \%}} \quad (14)$$

In Abbildung 36 ist die Dominanz der photovoltaischen Hausanlage deutlich ersichtlich. Lediglich in den Wintermonaten Januar und Dezember gelingt es der PV-Anlage nicht, den Energiebedarf der beiden Haushaltsgrößen zu decken. Außerdem ist ein hoher Energieüberschuss von Frühling (März) bis Herbst (Oktober) zu verzeichnen. Dies birgt Potentiale für eine effektive Energiespeicherung. Die hohen bilanziellen Autarkiegrade (vgl. Formel 13 und 14) verdeutlichen abermals die mehr als ausreichende Energieerzeugung der Solaranlage.

Damit scheint die verwendete solare Hausanlage in der Lage zu sein, die standardisierten Energiebedarfe verschiedener Haushaltsgrößen über mehrere Monate ausreichend versorgen zu können. Die Unterschiede zwischen Sommer und Winter zeigt eine Analyse der Autarkiegrade auf Monatsebene.

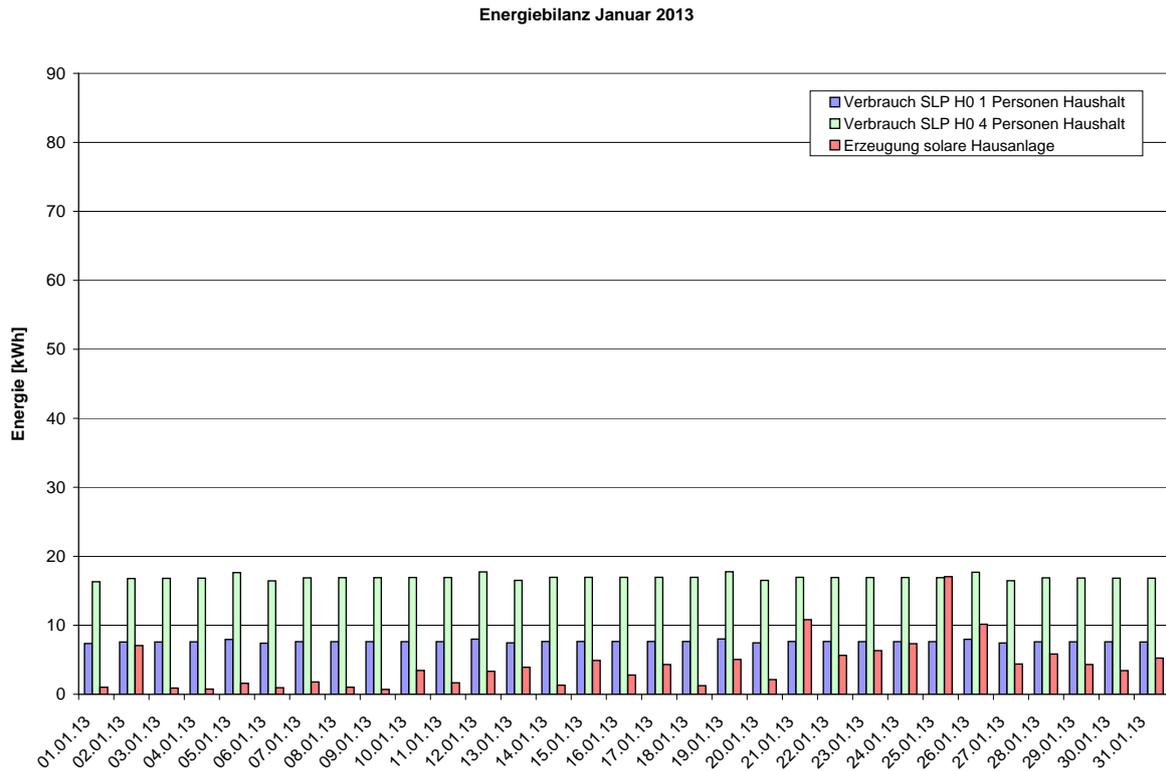


Abb. 37: Energiebilanz eines Wintermonats nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{130,55 \text{ kWh}}{236,85 \text{ kWh}} = 0,5512 = \underline{\underline{55,12 \%}} \quad (15)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{130,55 \text{ kWh}}{524,93 \text{ kWh}} = 0,2487 = \underline{\underline{24,87 \%}} \quad (16)$$

In diesem beispielhaften Wintermonat (Januar) kann die solare Hausanlage den Energiebedarf eines Einpersonenhaushaltes über die Hälfte mit eigen erzeugter Energie decken (Formel 15). Die autarke Versorgung des normierten Vierpersonenhaushaltes gelingt hingegen nur zu 24,87 % (Formel 16). Die Abbildung 37 zeigt, dass es keine großen Unterschiede bei dem Energieverbrauch der verschiedenen Haushalte zwischen Werk- und Wochenendtagen gibt. Außerdem ist ersichtlich, dass die Energieerzeugung am Anfang des Monats, bedingt durch schlechte Wetterverhältnisse, weniger produktiv ist als am Ende. So können in der zweiten Hälfte des Monats die Energiebedarfe des standardisierten Einpersonenhaushalts zeitweise gedeckt werden.

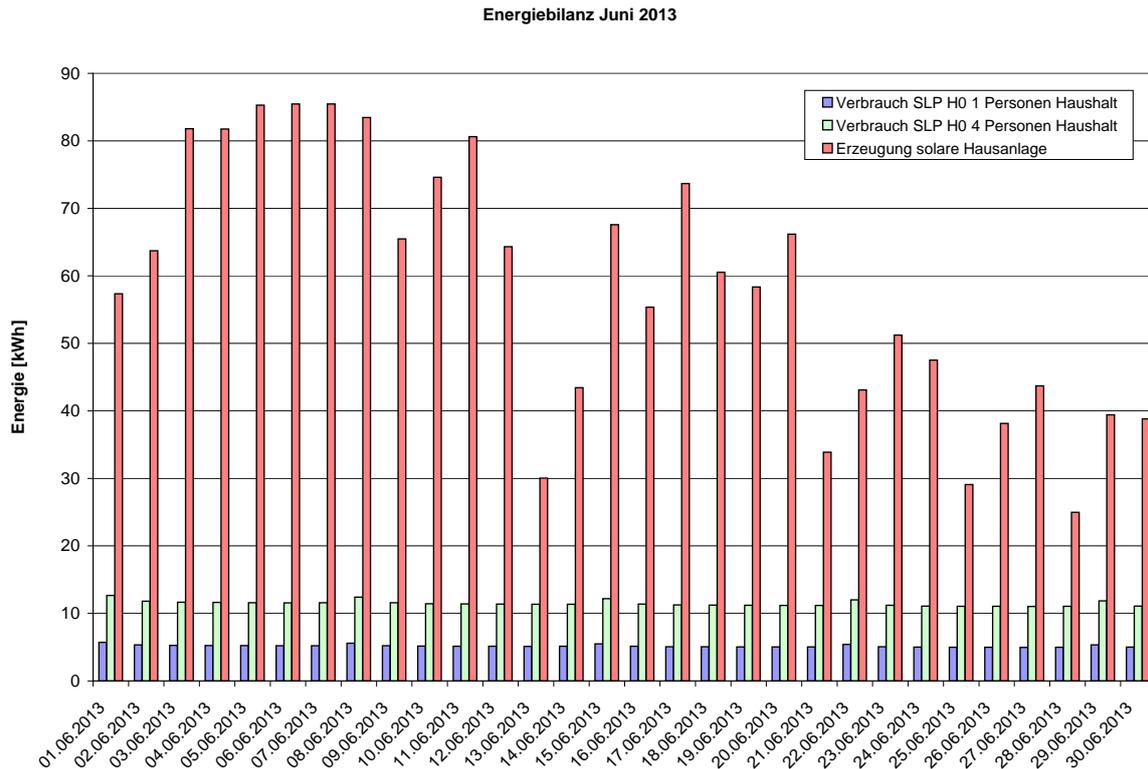


Abb. 38: Energiebilanz eines Sommermonats nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{1.754,35 \text{ kWh}}{155,44 \text{ kWh}} = 11,286 = \underline{\underline{1128,6 \%}} \quad (17)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Energie}}{\text{Gesamtenergiebedarf}} = \frac{1.754,35 \text{ kWh}}{344,50 \text{ kWh}} = 5,092 = \underline{\underline{509,2 \%}} \quad (18)$$

Die Energieerzeugung durch die solare Hausanlage kann in diesem beispielhaften Sommermonat (Juni) an jedem Tag, sowohl einen Einpersonenhaushalt, als auch einen Vierpersonenhaushalt mehr als ausreichend mit Energie versorgen. Formel 17 und 18 belegen die vollständige bilanzielle Autarkie für den Sommermonat Juni des Jahres 2013. Abbildung 38 verdeutlicht abermals den deutlichen Energieüberschuss für Sommermonate. Am 07.06. werden lediglich 6 % der an diesem Tag gesamt erzeugten Energie von einem Einpersonenhaushalt benötigt.

Eine vollständige bilanzielle Autarkie kann damit auf Monatsebene für einen standardisierten Haushalt bis vier Personen erreicht werden. Nachfolgend werden ausgewählte Wochentage bezüglich momentan vorliegender Autarkie analysiert.

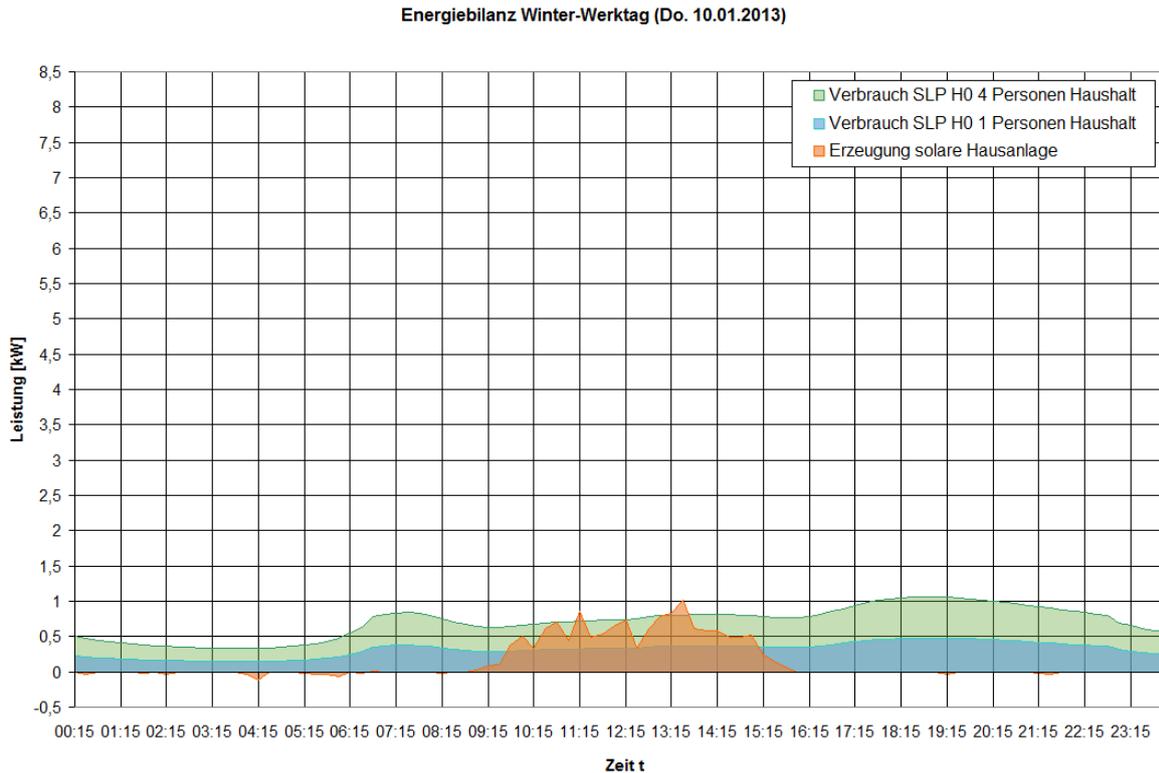


Abb. 39: Energiebilanz eines Winterwerktages nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{7,73 \text{ kW}}{30,55 \text{ kW}} = 0,2530 = \underline{\underline{25,30 \%}} \quad (19)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{13,26 \text{ kW}}{67,70 \text{ kW}} = 0,1959 = \underline{\underline{19,59 \%}} \quad (20)$$

Wie sich bereits vermuten lässt, ist eine autarke Stromversorgung durch Solaranlagen für die Winterjahreszeit nur schwer realisierbar. In dem Diagramm 39 zeigt sich, dass die solare Hausanlage an diesem Winterwerktage, durch die geringe Anzahl an Sonnenstunden, ebenfalls nur wenige Stunden am Tag Leistung erzeugt. Für einen Einpersonenhaushalt mit einem geringen Leistungsbedarf reichen diese Stunden bereits aus, um einen physikalischen Autarkiegrad von 25,30 % (Formel 19) zu erreichen. Ein standardisierter Vierpersonenhaushalt erreicht aufgrund der relativ hohen Erzeugungswerte, die um die Mittagszeit verzeichnet werden können, einen Autarkiegrad von fast 20 % (vgl. Formel 20). Dennoch kann der Leistungsbedarf beider Haushaltsgrößen in den Abend- und Nachtstunden nicht von der PV-Anlage gedeckt werden.

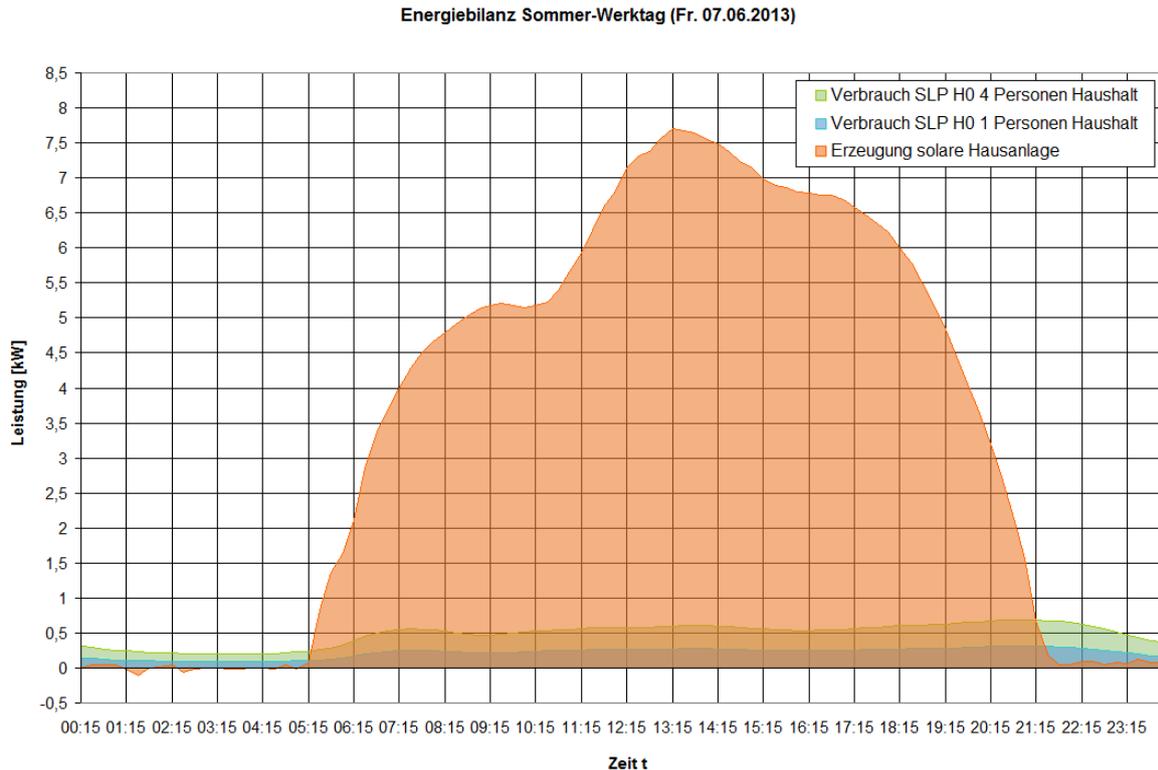


Abb. 40: Energiebilanz eines Sommerwerktages nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{16,98 \text{ kW}}{20,81 \text{ kW}} = 0,8160 = \underline{\underline{81,60 \%}} \quad (21)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{36,40 \text{ kW}}{46,13 \text{ kW}} = 0,7891 = \underline{\underline{78,91 \%}} \quad (22)$$

Die physikalischen Autarkiegrade beider Haushaltsgrößen liegen an diesem Sommerwerktage um die 80 % (vgl. Formel 21 und 22). Die PV-Anlage ist nach Abbildung 40 über viele Stunden in der Lage mehr als ausreichend Leistung für die verschiedenen Haushaltsgrößen bereit zu stellen. Die guten Wetterverhältnisse und die starke Intensität der Sonnenstrahlen sorgen speziell in der Mittagszeit für einen Leistungsüberschuss von 7,1 kW bei einem Vierpersonenhaushalt und 7,43 kW bei einem Einpersonenhaushalt. Ohne effektive Speicherung verfallen diese Werte jedoch. Aufgrund der Lichtverhältnisse in den Nachtstunden kann eine vollständige physikalische Autarkie für diesen Sommerwerktage nicht erreicht werden.

Auch in Bezug auf eine solare Hausanlage sind die Unterschiede der Erzeugungsdaten zwischen Sommer und Winter deutlich ersichtlich. Im Sommer werden daher zur Mittagszeit 6,7 kW (4P) mehr Leistung erzeugt, als im Winter. Eine autarke Stromversorgung wird für beide Haushaltsgrößen an Werktagen verschiedener Jahreszeiten nicht erlangt.

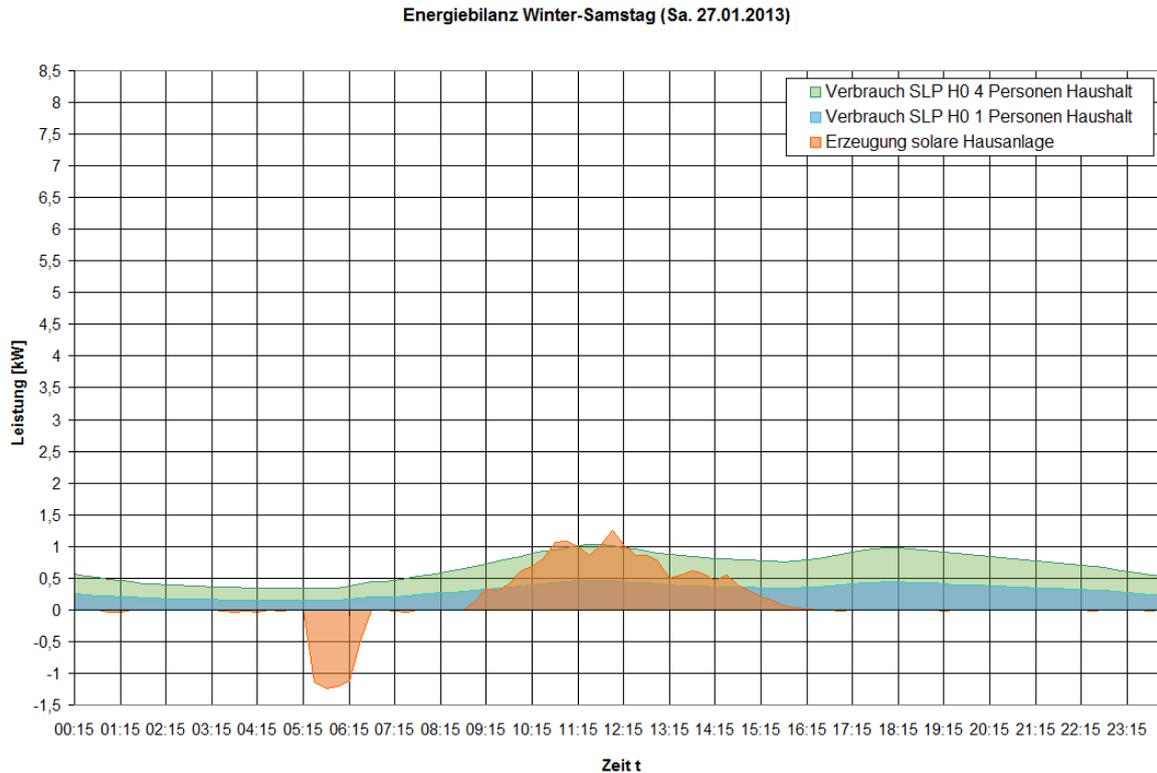


Abb. 41: Energiebilanz eines Wintersamstages nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{4,54 \text{ kW}}{29,69 \text{ kW}} = 0,1529 = \underline{\underline{15,29 \%}} \quad (23)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{11,32 \text{ kW}}{65,81 \text{ kW}} = 0,1720 = \underline{\underline{17,20 \%}} \quad (24)$$

Der in Abbildung 41 dargestellte Tagesverlauf an einem Wintersamstag zeigt ebenfalls, dass die Erzeugung elektrischer Leistung durch PV-Anlagen in der winterlichen Jahreszeit den Bedarf nicht decken kann. Der physikalische Autarkiegrad für einen normierten Einpersonenhaushalt beträgt an diesem Tag durch den geringen Leistungsbedarf lediglich 15,29 % (Formel 23). Bei einem Vierpersonenhaushalt gelingt es der PV-Anlage nur für kurze Zeit den Leistungsbedarf zu decken. Die überschüssige erzeugte und nicht gespeicherte Leistung bei Einpersonenhaushalten kommt hier den Vierpersonenhaushalten zugute, sodass sich ein physikalischer Autarkiegrad von 17,20 % (Formel 24) errechnen lässt. Der Leistungsbedarf kann abermals durch unzureichende Lichtverhältnisse, in den Abend- und Nachtstunden nicht gedeckt werden. In der Zeit von 05:15 Uhr bis 06:30 Uhr kommt es aufgrund der bereits erwähnten langsamen Updaterate des Digitalstromzählers, bei der solaren Energieerzeugung zu negativen Leistungswerten bis -1,25 kW. Zu dieser Zeit wird eine Batterieanlage zwangsgeladen. Dies wird als Energieverbrauch der solaren Hausanlage und damit als negative Einspeisung von der Monitoranlage gewertet.

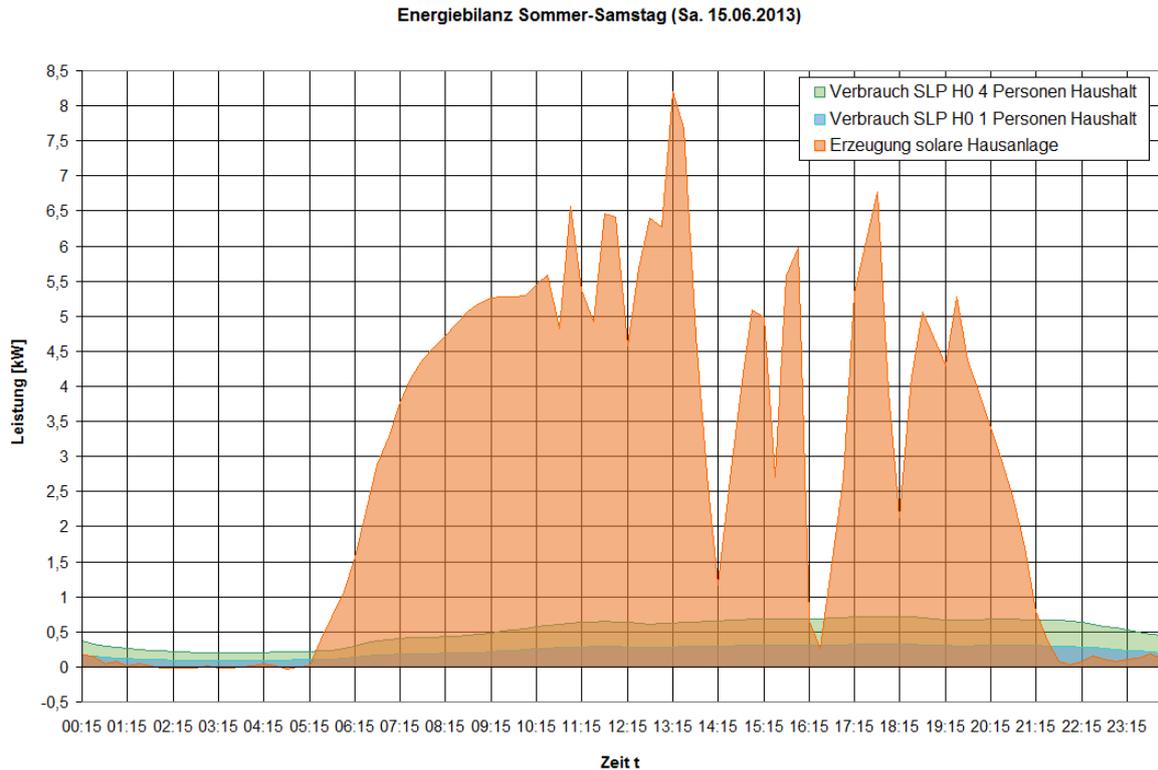


Abb. 42: Energiebilanz eines Sommersamstages nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{18,74 \text{ kW}}{21,98 \text{ kW}} = 0,8526 = \underline{\underline{85,26 \%}} \quad (25)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{39,37 \text{ kW}}{48,72 \text{ kW}} = 0,8081 = \underline{\underline{80,81 \%}} \quad (26)$$

An dem Tagesverlauf der Leistungserzeugung durch eine solare Hausanlage, in Abbildung 42 werden unterschiedliche Wetterbedingungen verdeutlicht. So ist ersichtlich, dass sich die Erzeugungsdaten in den Morgenstunden proportional zur Intensität der Sonnenstrahlen verhalten. Ab 11:00 Uhr sind deutliche Schwankungen im Kurvenverlauf zu verzeichnen. Dies lässt darauf schließen, dass am Nachmittag eine Schlechtwetterfront über Reinfeld hinweg gezogen ist. Da die Erzeugungswerte trotz der Wettergegebenheiten weit über den Verbrauchsdaten liegen, betragen die physikalischen Autarkiegrade für unterschiedliche Haushaltsgrößen über 80 % (vgl. Formel 25 und 26).

Obwohl die Wetterverhältnisse an diesem Sommersamstag nicht beständig sind, können um die Mittagszeit Erzeugungswerte über 8 kW verzeichnet werden. Im Winter wird um 12:00 Uhr lediglich ein Spitzenwert von 1,26 kW (vgl. S. 61) erzeugt. Damit lässt sich zur Zeit der maximalen Tageserträge ein Unterschied von 85 % ermitteln.

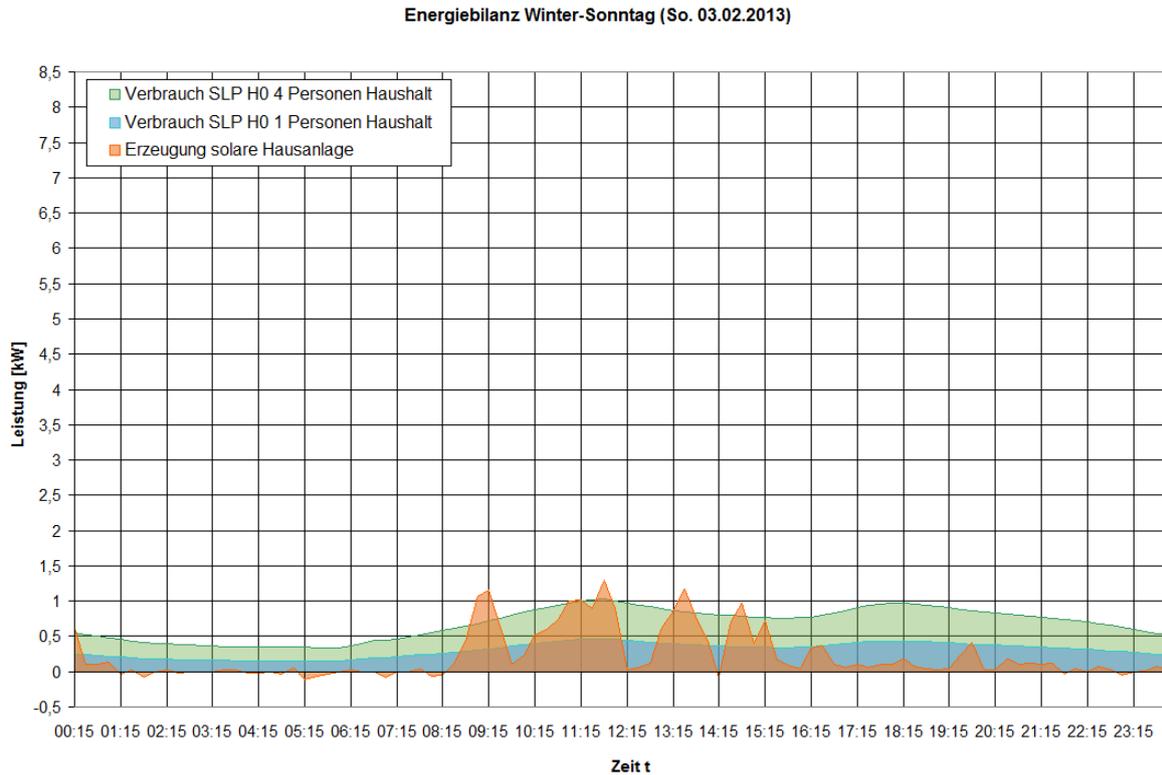


Abb. 43: Energiebilanz eines Wintersonntages nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{12,22 \text{ kW}}{29,47 \text{ kW}} = 0,4147 = \underline{\underline{41,47 \%}} \quad (27)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{19,72 \text{ kW}}{65,32 \text{ kW}} = 0,3019 = \underline{\underline{30,19 \%}} \quad (28)$$

An diesem, in Abbildung 43 dargestellten Wintersonntag, wurden für die unterschiedlichen Haushaltsgrößen die höchsten physikalischen Autarkiegrade in der Winterjahreszeit errechnet. Der Autarkiegrad beträgt bei einem Einpersonenhaushalt 41,47 % (Formel 27) und bei einem Vierpersonenhaushalt 30,19 % (Formel 28). Diese Ergebnisse sind dem hohen Leistungsertrag der PV-Anlage an diesem repräsentativen Wintersonntag geschuldet. Bereits um 9:00 Uhr kann der Leistungsbedarf der Ein- und Vierpersonenhaushalte gedeckt werden.

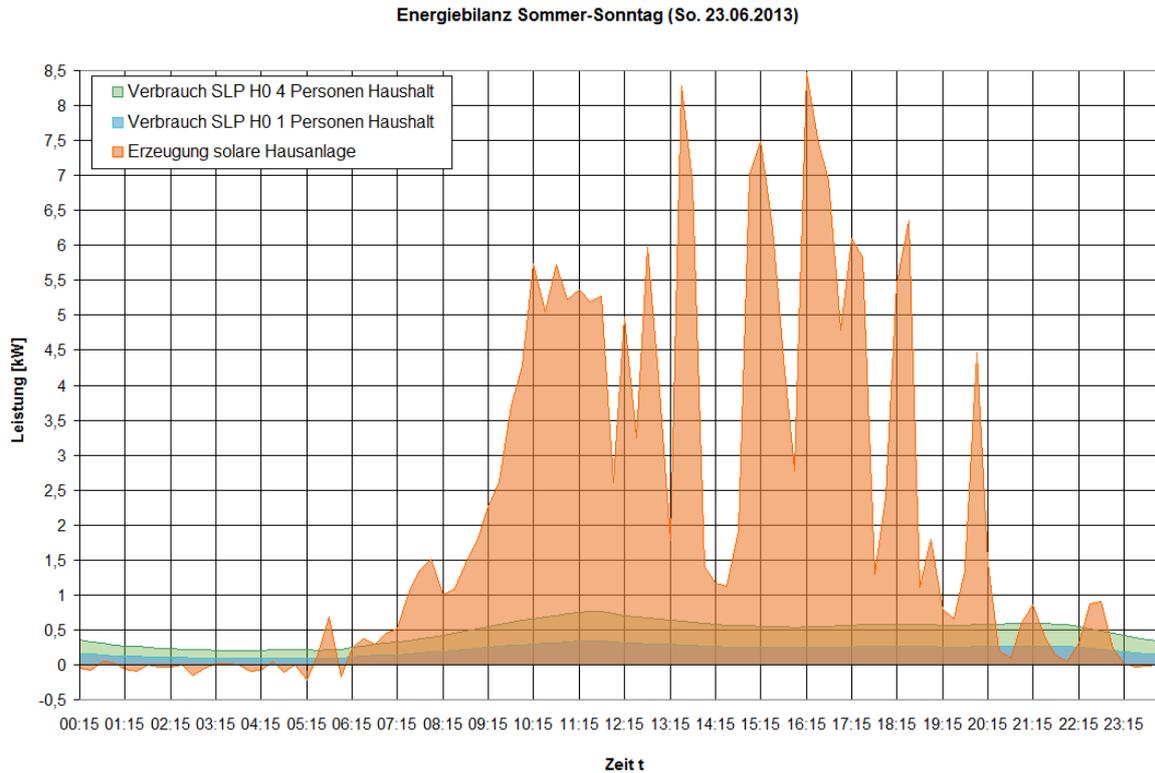


Abb. 44: Energiebilanz eines Sommersonntages nach Haushaltsgrößen

$$\text{Autarkiegrad}_{1P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{15,62 \text{ kW}}{20,34 \text{ kW}} = 0,7679 = \underline{\underline{76,79 \%}} \quad (29)$$

$$\text{Autarkiegrad}_{4P} [\%] = \frac{\text{Eigenerzeugte Leistung}}{\text{Gesamtleistungsbedarf}} = \frac{34,64 \text{ kW}}{45,07 \text{ kW}} = 0,7686 = \underline{\underline{76,86 \%}} \quad (30)$$

Der Tagesverlauf der Leistungserzeugung an dem in Abbildung 44 dargestellten Sommersonntag deutet auf einen verregneten Tag hin. Um 14:30 Uhr ist daher ein deutlicher Einbruch bei der Leistungserzeugung zu verzeichnen. Trotz der Wetterverhältnisse werden bei beiden Haushaltsgrößen physikalische Autarkiegrade von 76 % (vgl. Formel 29 und 30) errechnet. In der Zeit zwischen 6:30 Uhr und 20:15 Uhr kann der Leistungsbedarf der Haushalte mehr als ausreichend gedeckt werden. Aus diesem Grund wird in der Nachmittagszeit ein Leistungsüberschuss von fast 8 kW erzeugt.

Obwohl der Wintersonntag vergleichsweise effektiver als andere Wintertage war, kann dennoch eine Differenz von etwa 7 kW zwischen den maximalen Erzeugungswerten im Sommer und Winter festgestellt werden.

Eine vollständige physikalische Autarkie kann abermals an Wochenenden verschiedener Jahreszeiten nicht ermittelt werden.

### 6.2.3 Zwischenfazit zum Autarkiegrad verschiedener Haushaltsgrößen

Der errechnete Jahresautarkiegrad zeigte, dass für beide Haushaltsgrößen eine vollständige bilanzielle Autarkie vorlag. Zu diesem Ergebnis tragen im wesentlichen die mehr als ausreichend ausgelegte solare Hausanlage und der geringe jährliche Energiebedarf bei. Dennoch gab es abermals große Unterschiede zwischen der Sommer- und Winterjahreszeit. Während die PV-Anlage im Sommermonat Juni mehr als ausreichend Energie für die Bedarfe beider Haushaltsgrößen erzeugte(17)(18), wurden im Wintermonat Januar hingegen nur Autarkiegrade von 55 % (15) bei Einpersonenhaushalten und fast 25 % (16) bei Vierpersonenhaushalten errechnet.

Diese Gegensätzlichkeit wurde abermals bei der Berechnung der physikalischen Autarkiegrade in Bezug auf ausgewählte Wochenenden deutlich. Dabei ergaben sich im Sommer für beide Haushaltsgrößen physikalische Autarkiegrade über 75 % (29)(30). Die maximal erreichte Autarkie im Winter betrug dabei nur 41 % (27) und wurde an einem Wintersonntag für einen Einpersonenhaushalt errechnet. Eine vollständige autarke Stromversorgung konnte aufgrund der unzureichenden Versorgung bei schlechtem Wetter und in der Nacht für beide Haushaltsgrößen nicht erreicht werden.

Anhand dieser Befunde kann darauf geschlossen werden, dass eine bilanzielle Berechnung der Autarkie erstrebenswerter ist. Denn je niedriger der solare Eigenverbrauch ist, desto höher ist die bilanzielle Autarkie. Hierbei werden jedoch die Defizite in der Stromversorgung nicht betrachtet. Deswegen darf man die physikalische Autarkie nicht vernachlässigen.

Insgesamt zeigte sich jedoch, dass die Autarkiegrade der Haushalte erhöht waren und dass die Energieüberschüsse an Sommertagen große Potentiale für die mögliche Steigerung der Autarkie bieten.

## 7 Möglichkeiten der Autarkiegraderhöhung

Die Berechnung der Autarkiegrade zeigte, dass eine vollständige physikalische Autarkie bei verschiedenen Verbrauchern wegen der Nacht nicht zu erreichen ist. Auf Grund dessen werden in diesem Kapitel Möglichkeiten zur Steigerung der Autarkiegrade von Verbrauchern und PV-Anlagen aufgezeigt. Um die Mittel besser verifizieren zu können, sind in diesem Abschnitt exemplarisch die Möglichkeiten der Autarkiegraderhöhung für ausgewählte Reinfeld Netzellen und Großverbraucher dargestellt. Das zentrale Wort dabei heißt: Energiespeicher. Mit ihnen können die regionalen Schwankungen bei der photovoltaischen Erzeugung verringert und der Anteil des direkten Selbstverbrauches erhöht werden.

### 7.1 Netzzelle: Reinfeld Schule

Kapitel 6.1 hat bereits verdeutlicht, dass in der Reinfeld Schule und Sporthalle großes Potential zur Erhöhung des elektrischen Autarkiegrades liegt.

Das größte Problem bei der Nutzung der Sonnenenergie ist die schwankende elektrische Energiebereitstellung. Im Winter, bei trübem Wetter oder nachts sinkt der Ertrag. An sonnenreichen Tagen wird hingegen mehr Energie erzeugt als vom Verbraucher benötigt. Damit eine durchgehende Stromversorgung möglich wird, braucht man einen Speicher, der die Energiemengen langfristig bereit stellen kann. Batterien können elektrische Energie in chemisch gebundene Energie umwandeln und umgekehrt genauso. Sie eignen sich daher als elektrochemische Speicher in der PV-Branche. Auf dem elektronischen Markt haben sich verschiedenartige Batteriesysteme etabliert. Lithium-Ionen-Batterien decken eine weite Spanne an Leistungs- und Energiedichten ab und stellen laut REICHERT, SCHWUNK und SCHULZ die leistungsfähigste Technologie dar [KSW13, S. 410]. Die Bleibatterie ist der heute noch am weitesten verbreitete Akkumulator. Sie hat allerdings eine eingeschränkte Energiedichte, ist aber preisgünstig, gut verfügbar und kann leistungsfähig sein [KSW13, S.411].

Da der Gesamtenergiebedarf bei der Berechnung der Autarkie eine zentrale Rolle spielt, sollten die Energiebedarfswerte für die Erhöhung dieser, ebenfalls gesenkt werden. Tabelle 4 auf Seite 38 zeigte, dass speziell an Wochentagen unterschiedlicher Jahreszeiten, der Energiebedarf im Vergleich zu Wochenenden deutlich erhöht ist. Eine Reduktion des Energiebedarfs an Wochentagen würde den Autarkiegrad der Netzzelle Schule steigern. Um den Gesamtenergieverbrauch der Schule und Sporthalle zu senken, könnte eine Modernisierung der Gebäudeeinrichtungen in Frage kommen. Firmen wie Philips bieten bereits energieeffiziente Beleuchtungslösungen an. Durch einen einfachen Lampentausch können bereits bis zu 10 % an Energie gespart werden. Eine effektivere Lösung bietet jedoch der Einbau intelligenter Beleuchtungsanlagen mit tageslichtabhängiger Regelung und Präsenzmeldung. Mit Hilfe dieser Installation können bis zu 75 % der Energie eingespart werden [Phi09, S. 2]. Dies würde, in Bezug auf die durch SLP-Daten ermittelten Verbrauchswerte der Schule, eine Einsparung von 372 kWh an Sommerwerktagen und 519 kWh an Winterwerktagen bewirken.

## 7.2 Netzzelle: Reinfeld Eichenweg

Die Netzzelle Eichenweg bildet ein im Jahr 2011 erbautes und nord-westlich in Reinfeld gelegenes Neubaugebiet. Zu diesem zählen die Straßen Eichenweg, St.-Pryve-Straße und Kaliskaweg. Das Neubaugebiet zählt 51 Wohnhäuser, eine Kindertagesstätte und ein Pflegezentrum. Die Ausrichtung der Hausdächer ist für PV-Anlagen günstig in Richtung Süden gelegen. Drei der 51 Wohnhäuser sind mit solarthermischen Anlagen ausgestattet. Lediglich zwei im Neubaugebiet befindliche Häuser haben eine PV-Anlage auf ihrem Dach installiert. Dies bedeutet, dass nur 4 % dieser Netzzelle Energie aus erneuerbaren Energiequellen beziehen.

Der Autarkiegrad dieser Netzzelle ist durch den sehr geringen Anteil von erneuerbaren Energien, im speziellen der Photovoltaik, nicht hinreichend akzeptabel. Durch die südliche Ausrichtung vieler Dachhälften ist dieses Gebiet für photovoltaische Anlageninstallationen angemessen geeignet. 19 dieser Häuser sind optimal südlich ausgerichtet und bieten großflächige Hausdächer. Darüber hinaus gewährt das Pflegezentrum durch dessen Gebäudekomplex die Installation von PV-Anlagen auf zwei Dachflächen. Die Kindertagesstätte verfügt über mehrere ungleichmäßig gelegene Flachdächer. Hier würde sich der Anschluss einer auflastarmen, photovoltaischen Aufständerung lohnen. Mit diesem Ausbau würden rund 40 % der Netzzelle Energie aus regenerativen Quellen beziehen.

Da der Großteil dieser Netzzelle aus Wohnhäusern besteht, muss der Autarkiegrad auch in Bezug auf verschiedene Haushaltsgrößen gesteigert werden. In Kapitel 6.2 wurde bereits ersichtlich, dass die Autarkiegrade an Wintertagen deutlich niedriger sind als an Sommertagen. Durch gute Wetterverhältnisse wurde jedoch deutlich, dass dieser gesteigert werden kann. Auch bei Haushalten würde sich eine zusätzliche Reduktion des Leistungs- und Energieverbrauchs speziell in den Wintermonaten positiv auswirken. Es gibt viele nützliche Möglichkeiten den Stromverbrauch im Haushalt zu senken. Der meiste Strom wird dabei für Küchen- und Bürogeräte, Warmwasserbereitstellung, Beleuchtung und bei dem Wäschetrockner und der Waschmaschine benötigt [Ver13, S. 5]. Laut der VERBRAUCHERZENTRALE macht die Warmwasseraufbereitung durchschnittlich den zweithöchsten Energieverbrauch in einem Haushalt aus. Durch einen Austausch des herkömmlichen Durchlauferhitzers gegen einen elektronisch geregelten, können bereits 10 % des Stroms gespart werden [Ver13, S. 11]. Außerdem können solarthermische Kollektoren zur Warmwasserbereitung oder als eigenständige Heizung verwendet werden. Zusätzlich sollte man Energiesparlampen im Haus einbauen, da die klassischen Glühlampen nur 5 % des Stroms in Licht umwandeln und die restliche Energie in Wärme verloren geht. Bereits kleine Veränderungen wirken sich effektiv auf die Reduktion des Energieverbrauches aus.

Ob netzgekoppelte oder Inselanlage, Energiespeicher haben positive Auswirkungen auf den Autarkiegrad verschiedener Verbraucher. Durch das „zeitliche verschieben“ von Leistung kann die tagsüber produzierte Photovoltaik-Energie zu mehreren Zeiten zur Verfügung stehen. Damit können Verbraucher zu Spitzenlastzeiten und unzureichender Erzeugung weiterhin mit eigen erzeugter Energie versorgt werden.

### 7.3 Großverbraucher: Camfil

Camfil ist ein im Gewerbegebiet gelegenes Unternehmen, das in Reinfeld zu den Großverbrauchern an Strom zählt. Die Firma ist im Bereich der Luftreinigungssysteme tätig [CamoJ]. Um den geringen Autarkiegrad Reinfelds von 2,44 % (siehe Formel 2 auf Seite 4) zu steigern, ist es nötig, dass sich Großverbraucher, wie das Unternehmen Camfil, eigenständig mit Strom versorgen.

Die Fläche, die das Unternehmensgebäude einnimmt, bietet eine geeignete Grundlage für die Anbindung einer photovoltaischen Anlage. Das Flachdach des Hauptgebäudes lässt sich auf etwa 9.500 m<sup>2</sup> schätzen. Eine Anlagenkonstruktion, speziell für die Installation auf Flachdächern, würde sich positiv auf die eigenständige Stromversorgung der Stadt auswirken.

Rechenbeispiel: Für die Dachfläche Camfils würde eine Anlagenkonstruktion ähnlich der der Reinfelder Sporthalle in Frage kommen. Geht man davon aus, dass die PV-Anlage der Sporthalle eine Fläche von etwa 895 m<sup>2</sup> in Anspruch nimmt und einen jährlichen Ertrag von 44.017,19 kWh leistet, kann man diese Ergebnisse auf eine größere Dachfläche approximieren. Wenn auf nur 9.000 m<sup>2</sup> der Dachfläche des Unternehmens Camfil eine PV-Anlage installiert wird, würde sich ein jährlicher Ertragswert von 442.630,96 kWh ergeben. Bezieht man dieses Ergebnis in die Berechnung des Autarkiegrades für Reinfeld (siehe Formel 2 auf Seite 4) mit ein, ergibt sich ein neuer Autarkiegrad der Stadt Reinfeld von ungefähr 4 %.

Abschließend kann festgestellt werden, dass diese sehr große Solaranlage den Reinfelder Autarkiegrad um 1,56 % erhöhen könnte. Dieses Ergebnis bestätigt, dass ein Ausbau des solaren Energieerzeugungssektors wesentlich zur Erhöhung der elektrischen Autarkie der Stadt beiträgt.

## 8 Konzeptbewertung

In den vorangestellten Kapiteln wurde gezeigt, wie sich der Energiebedarf verschiedener Verbraucher und die Energieerzeugung unterschiedlicher photovoltaischer Anlagengrößen in Bezug auf Tages- und Jahreszeiten verhalten. Anhand dieser Daten wurden anschließend Möglichkeiten einer effektiveren Nutzung der Solarenergie und Senkung des Strombedarfes der Verbraucher verdeutlicht. An dieser Stelle wird das dargestellte Konzept in Hinsicht auf Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet und diskutiert.

Die allgemeine Durchsetzung der Möglichkeiten zur Autarkiegraderhöhung der Stadt Reinfeld ist fraglich. Um die Energieverbräuche der öffentlichen und privaten Gebäude zu senken, müssen die Einstellungen gegenüber energieeffizienter Lebensweisen geändert werden. Jeden Bürger von einer effizienteren Nutzung der Energie zu überzeugen, ist jedoch nicht realistisch. Das Bewusstsein für Solaranlagen kann bei Bürgern und ansässigen Unternehmen durch geeignete Förderungen, Kampagnen und Informationen gesteigert werden. Um den Autarkiegrad der Stadt zu erhöhen, müssen diese Zielgruppen von der Photovoltaik überzeugt werden.

In Bezug auf die Errichtung photovoltaischer Anlagen ist die Durchsetzung jedoch eher fraglich. Die Einspeisevergütung bei PV-Anlagen sinkt monatlich. Laut BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT (BSW) erhalten Betreiber für eine Dachanlage bis 40 kWp im März 2015 12,15 ct/kWh. Die Degression beträgt dabei 0,25 % [BSW15a]. Für den Eigenverbrauch selbst erzeugten Solarstroms aus einer neuen Solaranlage müssen künftig bis zu 40 % der jeweils gültigen Ökostrom-Umlage entrichtet werden. Für 2014 sind das laut BSW, rund 1,9 Cent je Kilowattstunde [BSW15b]. Von der Abgabe auf den Eigenverbrauch befreit sind dagegen unter anderen Inselanlagen und Neuanlagen mit weniger als 10 kWp Nennleistung.

Im Mai 2013 ist eine weitere Förderung in Kraft getreten. Hierbei werden Speicher von PV-Anlagen, die ab dem 1. Januar 2013 installiert wurden gefördert. Der Zuschuss beträgt pro Kilowattpeak Solaranlagen-Leistung bis zu 660 Euro. Ziel dieser Regelung ist es, dass die Anlagenbetreiber dazu beitragen, die Einspeisung des Sonnenstroms gleichmäßiger auf die Netze zu verteilen und Produktionsspitzen zu vermeiden [BSW13].

Trotz der Vergütungssätze und Förderungen für Solarstrom bleiben die zu investierenden Kosten bei den Einwohnern und Unternehmen. Nicht jeder kann diese Investitionskosten selber tragen. Für die notwendige Modernisierung öffentlicher Gebäude in Bezug auf die Einsparmöglichkeiten bei den Energieverbräuchen, ist eine Finanzierung von der Stadt Reinfeld selbst erforderlich. Diese ist zwar kostenaufwendig, durch geeignete Förderungen jedoch realistisch.

Eine vollständige autarke Stromversorgung durch photovoltaische Anlagen mit Energiespeicher ist durch die Unbeständigkeit der Technologie auf Grund der unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten nicht möglich. Ein dezentrales Einsetzen mehrerer erneuerbarer Energien würde den Autarkiegrad der Stadt Reinfeld effektiver steigern.

## 9 Zusammenfassung

In der Einführung dieser Bachelorarbeit wurde darauf hingewiesen, aus welchen Gründen eine Erhöhung des elektrischen Autarkiegrades von Kommunen notwendig ist. Aufgrund der hiesigen Preispolitik der Konzerne wird immer intensiver darüber nachgedacht, wie man sich von diesen trennen kann. Doch ist es möglich, den elektrischen Autarkiegrad für kleinere Kommunen im Norden Deutschlands zu erhöhen?

Eine Zielsetzung dieser vorliegenden Bachelorarbeit bestand darin, zu verdeutlichen, welche motivierenden Gründe für eine autarke Energieversorgung sprechen. Dazu erfolgte zuerst die Betrachtung verschiedener politischer Zielsetzungen zum Schutze des Klimas, sowie die Hervorhebung der Vorteile für engagierte Kommunen. Anschließend wurde gezeigt, welche Möglichkeiten für eine zweckmäßige Verwendung von Energie existieren.

Ein weiteres Vorhaben bestand darin zu verdeutlichen, welche Energiequellen es gibt und wie viele CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Erzeugung freigesetzt werden. Dabei wurden zuerst die konventionellen Energiequellen vorgestellt und beschrieben. Anschließend fand eine Analyse der verschiedenen regenerativen Energiequellen statt, wobei zusätzlich die Vorteile bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung und versteckte Risiken und Gefahren dargestellt wurden.

Des Weiteren erfolgte eine Darstellung der erworbenen technischen Daten der Stadt Reinfeld. Zum einen wurde die Herangehensweise zur Ermittlung der Energiebedarfe verschiedener Verbraucher erläutert und zum anderen bereits bestehende regenerative Energiequellen dargestellt. Im Anschluss wurden diese Erkenntnisse verbunden, was eine Analyse der Autarkiegrade verschiedener Verbraucher ermöglichte. Zuerst erfolgte eine Untersuchung der ermittelten Daten in Bezug auf die Reinfeld der Schule. Dabei sind die Autarkiegrade an unterschiedlichen Wochentagen sowie Jahreszeiten bestimmt und vergleichend analysiert worden. Im Anschluss erfolgte eine Untersuchung auf der Ebene verschiedener Haushaltsgrößen, wobei abermals verdeutlicht wurde, dass eine bilanzielle Autarkie nicht aussagekräftig ist, sondern die physikalische, da diese die Defizite in der Stromerzeugung berücksichtigt.

Ergänzend dazu wurden Handlungsempfehlungen für mögliche Autarkiegraderhöhungen einzelner Netzzellen und Großunternehmen Reinfelds dargestellt.

Anhand von diesen Empfehlungen kann die Frage geklärt werden, ob sich das entwickelte Konzept zur Erhöhung des elektrischen Autarkiegrades der Stadt Reinfeld in der Realität umsetzen lässt oder ob es nur eine theoretische Überlegung bleibt. Bei der Konzeptbewertung wurde herausgearbeitet, dass bei der Umsetzung des Vorhabens hinsichtlich einer Erhöhung der elektrischen Autarkie viele Aspekte zu beachten sind. Wenn man einige dieser Aspekte berücksichtigt, ist es möglich den Autarkiegrad der Stadt zu erhöhen. Dennoch muss man erkennen, dass eine vollständige autarke Stromversorgung mit den gegebenen Mitteln und Rahmenbedingungen nicht zu realisieren ist.

## Literaturverzeichnis

- [Age11] AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN: *Erneuerbare-Energien-Projekte in Kommunen - Erfolgreiche Planung und Umsetzung*. 5. überarbeitete Auflage. [http://www.kommunal-erneuerbar.de/fileadmin/content/PDF/AEE\\_KommunalErneuerbar\\_Aufl05\\_web.pdf](http://www.kommunal-erneuerbar.de/fileadmin/content/PDF/AEE_KommunalErneuerbar_Aufl05_web.pdf), 2011. – abgerufen am 04. November 2014
- [Bib13] BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH: *Autarkie, die*. <http://www.duden.de/rechtschreibung/Autarkie>, 2013. – abgerufen am 03. Dezember 2014
- [BS14] BUCHHOLZ, Bernd M. ; STYCZYNSKI, Zbigniew: *Smart Grids - Grundlagen und Technologien der elektrischen Netze der Zukunft*. VDE VERLAG GMBH, 2014.
- [BSW13] BSW-SOLAR: *Informationen zur Förderung von Solarstrom-Speichern*. [http://www.solaranlagen-portal.com/blog/wp-content/uploads/2013/04/Speicherprogramm\\_Hintergrundpapier.pdf](http://www.solaranlagen-portal.com/blog/wp-content/uploads/2013/04/Speicherprogramm_Hintergrundpapier.pdf), 2013. – abgerufen am 07. März 2015
- [BSW15a] BSW-SOLAR: *EEG 2014 - feste Einspeisevergütungen im Überblick*. [http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/20141215\\_Verguetungsuebersicht\\_Jan\\_bis\\_Mrz\\_Basis.pdf](http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/20141215_Verguetungsuebersicht_Jan_bis_Mrz_Basis.pdf), 2015. – abgerufen am 07. März 2015
- [BSW15b] BSW-SOLAR: *EEG-Reform - Das ändert sich ab August für Solarstrom-Erzeuger*. <http://www.solarwirtschaft.de/presse-mediathek/pressemeldungen/pressemeldungen-im-detail/news/eeg-reform-das-aendert-sich-ab-august-fuer-solarstrom-erzeuger.html>, 2015. – abgerufen am 07. März 2015
- [Bun13] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2013*. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/erneuerbare-energien,did=645890.html>, 2013. – abgerufen am 06. Januar 2015
- [Bun14a] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *EEG-Reform: Planbar. Bezahlbar. Effizient*. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-reform.html>, 2014. – abgerufen am 04. November 2014
- [Bun14b] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Energiegewinnung und Energieverbrauch - Primärenergieverbrauch nach Energieträgern*. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiegewinnung-energieverbrauch.html>, 2014. – abgerufen am 03. Januar 2015

- [Bun15a] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Erdgasversorgung in Deutschland*. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Konventionelle-Energietraeger/gas.html>, 2015. – abgerufen am 24. März 2015
- [Bun15b] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Kernkraftwerksstandorte in Deutschland*. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Konventionelle-Energietraeger/uran-kernenergie,did=156054.html>, 2015. – abgerufen am 06. Januar 2015
- [Bun15c] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Uran und Kernenergie*. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Konventionelle-Energietraeger/uran-kernenergie.html>, 2015. – abgerufen am 06. Januar 2015
- [BunoJa] BUNDESVERBAND WINDENERGIE E.V.: *Dänisches Konzept - mit passiver oder aktiver Stallregelung*. <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik/anlagenkonzepte/daenisches-konzept-mit-passiver-oder-aktiver-stallregelung,o.J..> – abgerufen am 25. Januar 2015
- [BunoJb] BUNDESVERBAND WINDENERGIE E.V.: *Konzepte mit Synchrongenerator (permanent- und fremderregt)*. <http://www.wind-energie.de/en/node/267>, o.J.. – abgerufen am 25. Januar 2015
- [CamoJ] CAMFIL KG: *Über Camfil*. <http://www.camfil.de/Uber-Camfil-Farr/>, o.J.. – abgerufen am 06. März 2015
- [Dü11] DÜNKEL, Wolfgang: *Bericht zum Vortrag „Ausbau des Höchstspannungsnetzes - Stromautobahnen für Windstrom“*. <http://www.vde.com/de/Regionalorganisation/Bezirksvereine/Kassel/Berichte/2011/seiten/ausbauhoechstspannung.aspx>, 2011. – abgerufen am 26. Januar 2015
- [Ene11] ENERGIEAGENTUR.NRW: *Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“*. [http://www.energieagentur.nrw.de/\\_database/\\_data/datainfopool/erhebung\\_wo\\_bleibt\\_der\\_strom.pdf](http://www.energieagentur.nrw.de/_database/_data/datainfopool/erhebung_wo_bleibt_der_strom.pdf), 2011. – abgerufen am 12. Februar 2015
- [Flu07] FLUCHER, Christof: *Seminar Windkraftanlagen 16.April 2007 HTBLuVA Wiener Neustadt*. <http://slideplayer.de/slide/916100/>, 2007. – abgerufen am 25. Januar 2015
- [Fra12] FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG GMBH: *Mini-Kompromiss beim Welt-Klimagipfel*. <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/kyoto->

- protokoll-verlaengert-mini-kompromiss-beim-welt-  
klimagipfel-11986836.html, 2012. –  
abgerufen am 27. Januar 2015
- [GöoJ] GÖHLER GMBH UND CO. KG: *Mineralölwirtschaft*. <http://www.goehler.de/images/gal-mineraloel-01-big.jpg>, (o.J.). – abgerufen am 05. Januar 2015
- [Hei11] HEIZUNG LÜFTUNG KLIMATECHNIK: *Definitionen rund um Energieautarkie*. <http://www.energieweb.at/epapers/821892/files/assets/downloads/page0025.pdf>, 2011. – abgerufen am 10. Februar 2015
- [INF09] INFORUM VERLAGS- UND VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH: *Kernkraftwerke in Deutschland*. <http://www.kernenergie.de/kernenergie/themen/kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland.php>, 2009. – abgerufen am 06. Januar 2015
- [Ins08] INSTITUT FÜR POLITIKWISSENSCHAFT: *Konventionelle Energieträger*. <https://www.uni-marburg.de/fb03/politikwissenschaft/energieundsicherheit/traeger/34konventionelleenergien>, 2008. – abgerufen am 01. April 2015
- [KSW13] KALTSCHMITT, Martin ; STREICHER, Wolfgang ; WIESE, Andreas: *Erneuerbare Energien*. Springer Vieweg, 2013.
- [MSH<sup>+</sup>14] MEMMLER, Michael ; SCHREMPF, Ludger ; HERMANN, Sebastian ; SCHNEIDER, Sven ; PABST, Jeannette ; DREHER, Marion: *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013*. [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_29\\_2014\\_schrempp\\_komplett\\_10.11.2014\\_0.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_29_2014_schrempp_komplett_10.11.2014_0.pdf), 2014. – abgerufen am 20. Januar 2015
- [N-E14] N-ENERGIE-NETZ GMBH: *Standardlastprofile*. <https://www.n-ergie-netz.de/kunden/unsere-leistungen/strom/netznutzung.html>, 2014. – abgerufen am 09. Dezember 2014
- [Phi09] PHILIPS GMBH: *Licht macht Schule*. [http://www.lighting.philips.de/pwc\\_li/main/shared/assets/downloads/licht\\_macht\\_schule\\_0609.pdf](http://www.lighting.philips.de/pwc_li/main/shared/assets/downloads/licht_macht_schule_0609.pdf), 2009. – abgerufen am 04. März 2015
- [Rot12] ROTH, Dr. Eike: *Chancen und Risiken der deutschen Energiewende*. <http://www.vernunftkraft.de/de/wp-content/uploads/2012/06/Dr.-Eike-Roth-Chancen-und-Risiken-der-deutschen-Energiewende.pdf>, 2012. – abgerufen am 20. Januar 2015

- [Set13] SETZERMANN, Dipl. Ing. Thom: *Photovoltaik: Die Funktion*. <http://www.solarladen.de/photovoltaik-funktion>, 2013. – abgerufen am 06. Januar 2015
- [SP14] SIEVERS, Jan ; PADROCK, Philippe: *autarkie*. <http://neueswort.de/autark/>, 2012 - 2014. – abgerufen am 03. November 2014
- [Sta10] STADTWERKE ESCHEDE: *Erdgas*. [http://www.stadtwerke-eschwege.de/cms/Erdgas/Contentbild/Erdgas\\_480px.jpg](http://www.stadtwerke-eschwege.de/cms/Erdgas/Contentbild/Erdgas_480px.jpg), 2010. – abgerufen am 05. Januar 2015
- [Sta15] STATISTA: *CO2-Emissionen durch Stromkraftwerke nach Kraftwerktypen (in Gramm pro Kilowattstunde)*. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38910/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-nach-kraftwerk/>, 2015. – abgerufen am 28. Januar 2015
- [Str14] STROMNETZ HAMBURG GMBH: *Standardlastprofile*. [https://www.stromnetz-hamburg.de/de/file/Informationen\\_zu\\_den\\_Standardlastprofilen\\_2015.pdf\\_64134849.pdf](https://www.stromnetz-hamburg.de/de/file/Informationen_zu_den_Standardlastprofilen_2015.pdf_64134849.pdf), 2014. – abgerufen am 23. Februar 2015
- [SVoJa] STROMANBIETER-VERGLEICH: *Konventionelle Energie*. <http://www.stromanbieter-vergleich.net/grafik/Braunkohle.jpg>, (o.J.). – abgerufen am 05. Januar 2015
- [SVoJb] STROMANBIETER-VERGLEICH: *Konventionelle Energie*. <http://www.stromanbieter-vergleich.net/stromerzeugung-konventionelle-energie.php>, (o.J.). – abgerufen am 24. März 2015
- [Tec10] TECHNIKLEXIKON: *Wasserkreislauf*. <http://www.techniklexikon.net/d/wasserkreislauf/wasserkreislauf.htm>, 2010. – abgerufen am 27. Januar 2015
- [Umw13] UMWELTBUNDESAMT: *Ist Atomstrom wirklich CO2-frei?* <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/ist-atomstrom-wirklich-co2-frei>, 2013. – abgerufen am 28. Januar 2015
- [UNF12] UNFCCC: *National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2010*. <http://unfccc.int/resource/docs/2012/sbi/eng/31.pdf>, 2012. – abgerufen am 03. November 2014
- [VDE07] VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *Windenergie*. <http://www.vde.com/de/fg/ETG/Arbeitsgebiete/V1/PublishingImages/Windenergie/Aufbau-Windanlage-1.jpg>, 2007. – abgerufen am 07. Januar 2015

- [Ver13] VERBRAUCHERZENTRALE BUNDESVERBAND E.V: *Stromsparen im Haushalt*.  
[https://www.verbraucherzentrale-energieberatung.de/downloads/VZE\\_Broschuere\\_Stromsparen.pdf](https://www.verbraucherzentrale-energieberatung.de/downloads/VZE_Broschuere_Stromsparen.pdf), 2013. –  
abgerufen am 06. März 2015
- [WS09] WESSELAK, Viktor ; SCHABBACH, Thomas: *Regenerative Energietechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

## Stichwortverzeichnis

### Symbole

20-20-20-Ziele ..... 6

### A

Aerober Abbau ..... 28

Alkoholgärung ..... 29

Anaerober Abbau ..... 29

Ausleitungskraftwerke ..... 26

Autarkie ..... 1

    autark ..... 1

Autarkiegrad ..... 3

### B

Batteriesysteme ..... 65

Bilanzieller Autarkiegrad ..... 40

Bio-chemische Umwandlung ..... 28

Biomasse ..... 27

Black Out ..... 31

Bleibatterie ..... 65

Blockheizkraftwerk ..... 36

Braunkohlekraftwerk ..... 32

### C

CO<sub>2</sub>-Bilanzierung ..... 29

CO<sub>2</sub>-Emissionen ..... 30, 32

### D

Demand-Side-Management ..... 34

Durchfluss ..... 25

### E

Endenergie ..... 10

Energieautarkie ..... 1

    Bilanzielle Energieautarkie ..... 1

    Echte Energieautarkie ..... 2

    Teil-Energieautarkie ..... 1

Energieeffizienz ..... 9

Erdgas ..... 13

Erdgaskraftwerk ..... 32

Erneuerbare-Energien-Gesetz ..... 6

### F

Fallhöhe ..... 25f

Flusskraftwerke ..... 26

Fossilen Energieträger ..... 13, 32

### G

Gravitationskonstante ..... 25

Großverbraucher

    Camfil ..... 67

### H

Hochdruckanlagen ..... 26

### I

Indirekte Netzkopplung

    Windkraftanlage ..... 23

Inselanlagen ..... 18

### K

Kernenergie ..... 14

Kohle ..... 13

    Braunkohle ..... 14

    Steinkohle ..... 13

Konventionelle Energieträger ..... 12

Kyoto-Protokoll ..... 5

### L

Lastgänge ..... 35

Lastprofil ..... 34

Laufwasserkraftwerke ..... 26

Leckströme ..... 18

Lithium-Ionen-Batterie ..... 65

### M

Mineralöl ..... 14

### N

Nennwindgeschwindigkeit ..... 21, 23

Netzkopplung

    Photovoltaikanlagen ..... 18

    Windkraftanlagen ..... 23

Netzzelle

Reinfeld Eichenweg .....	66	Windgeschwindigkeit .....	21
Reinfeld Schule .....	65	Windkraftanlage .....	19f
Niederdruckanlagen .....	26	Auftriebsprinzip .....	20
Niederspannung .....	34	Widerstandsprinzip .....	20
Nutzenergie .....	10	Windpark	
<b>P</b>		Offshore .....	23
Physikalisch-chemische Umwandlung ...	28	Onshore .....	23
Physikalischer Autarkiegrad .....	40		
Pitch-Regelung .....	22		
Primärenergie .....	10		
Pyrolyse .....	28		
<b>R</b>			
Regenerative Energien .....	16, 29		
Registrierende Lastgangsmessung .....	3		
Rotordrehzahl .....	21		
<b>S</b>			
Solare Strahlungsenergie .....	16		
Solarzelle .....	17		
Zelltypen .....	18		
Speicherkraftwerke .....	26		
Stall-Anlagen .....	21		
Standardlastprofil .....	3, 34		
Steinkohlekraftwerk .....	32		
Synchrongenerator .....	23		
<b>T</b>			
Talsperrenkraftwerke .....	26		
Thermo-chemische Umwandlung .....	28		
Tourismusmanagement .....	8		
Treibhausgasvermeidung .....	30		
<b>V</b>			
Vergasung .....	28		
Verkohlung .....	28		
Vermeidung .....	9		
Versorgungssicherheit .....	7		
<b>W</b>			
Wasserkraft .....	24		
Wasserkreislauf .....	24		
Windenergie .....	19		

## **Anhang**

Der Anhang dieser Bachelorthesis befindet sich auf USB-Stick, einzusehen bei den Prüfern Prof. Dr. -Ing. Michael Röther und Prof. Dr. -Ing. Volker Skwarek.

# Versicherung über die Selbständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 16. April 2015

Ort, Datum

Unterschrift