



**Welchen Nutzen kann die Steigerung der elektrischen  
Autarkie im Einfamilienhaus mit PV-Anlage, E-Fahr-  
zeug und einer flexiblen Laderegelung bringen?**

**Eine ökonomische und ökologische Betrachtung.**

**Projektarbeit**

im Studiengang Energietechnik und Ressourcenoptimierung

vorgelegt von

**Katharina Gutowsky**

Matrikelnummer: 1170077

am 29.09.2020

an der Hochschule Hamm-Lippstadt

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Torsten Cziesla

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Uwe Neumann



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Grundlagen</b> .....                                  | <b>2</b>  |
| 2.1      | Photovoltaik.....   | 2         |
| 2.2      | Lastprofil für Haushalte.....   | 8         |
| 2.3      | Elektromobilität.....   | 10        |
| 2.4      | Speicher .....  | 14        |
| 2.5      | Flexible Laderegelnungen.....   | 15        |
| <b>3</b> | <b>Untersuchung der Autarkie</b> .....                                | <b>16</b> |
| 3.1      | EFH mit PV-Anlage .....   | 16        |
| 3.2      | EFH mit PV-Anlage und E-Auto .....                                    | 18        |
| 3.3      | EFH mit PV-Anlage und Speicher, ohne E-Auto .....                     | 19        |
| 3.4      | EFH mit PV-Anlage, E-Auto und Speicher .....                          | 20        |
| 3.5      | EFH mit PV-Anlage, E-Auto, Speicher und flexibler Laderegelung.....   | 21        |
| 3.6      | Autarkiebetrachtung der verschiedenen Szenarien .....                 | 22        |
| <b>4</b> | <b>Ökonomische Betrachtung</b> .....                                  | <b>24</b> |
| 4.1      | Kapitalwertmethode .....  | 24        |
| 4.2      | EFH mit PV-Anlage .....   | 25        |
| 4.3      | EFH mit PV-Anlage und E-Auto .....                                    | 25        |
| 4.4      | EFH mit PV-Anlage und Speicher, ohne E-Auto .....                     | 27        |
| 4.5      | EFH mit PV-Anlage, E-Auto und Speicher .....                          | 28        |
| 4.6      | EFH mit PV-Anlage, E-Auto, Speicher und flexibler Laderegelung.....   | 29        |
| 4.7      | Ökonomische Betrachtung verschiedener Szenarien.....                  | 30        |
| <b>5</b> | <b>Ökologische Betrachtung</b> .....                                  | <b>31</b> |
| 5.1      | CO2 Einsparung mit PV Anlage.....                                     | 31        |
| 5.2      | CO2 Einsparung mit PVA und E-Auto .....                               | 33        |
| 5.3      | CO2-Einsparung mit PVA und Speicher, ohne E-Auto.....                 | 33        |
| 5.4      | CO2-Einsparung mit PVA, E-Auto und Speicher .....                     | 34        |
| 5.5      | CO2-Einsparung mit PVA, E-Auto, Speicher und flexibler Laderegelung35 | 35        |
| 5.6      | Ökologische Betrachtung verschiedener Szenarien.....                  | 36        |
| <b>6</b> | <b>Fazit und kritische Auseinandersetzung</b> .....                   | <b>38</b> |
| <b>7</b> | <b>Literaturverzeichnis</b> .....                                     | <b>40</b> |
| <b>8</b> | <b>Supplementary Data</b> .....                                       | <b>44</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Einstrahlung des Sonnenlichts auf eine horizontale Fläche und eine Fläche senkrecht zur Einfallrichtung .....                         | 3  |
| Abbildung 2: Änderung der jährlichen solaren Bestrahlung in Berlin in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung im Vergleich zur Horizontalen ..... | 4  |
| Abbildung 3: Aufbau einer klassischen netzgekoppelten PV-Anlage .....  | 4  |
| Abbildung 4: Installierte PV-Leistung in Deutschland (Stand 2020).....   | 5  |
| Abbildung 5: Einspeiseprofil PV .....  | 6  |
| Abbildung 6: Lastprofil H0 Werktag .....   | 8  |
| Abbildung 7: Lastprofil H0 Samstag .....   | 9  |
| Abbildung 8: Lastprofil H0 Sonntag/Feiertag .....  | 10 |
| Abbildung 9: Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2020 .....  | 11 |
| Abbildung 10: Bestand der Personenkraftwagen mit Elektroantrieb in Deutschland nach Marken.....  | 12 |
| Abbildung 11: Ladeprofile von Elektrofahrzeugen .....  | 13 |
| Abbildung 12: kumulierte Lastprofile.....  | 14 |
| Abbildung 13: AC-gekoppeltes PV-Speichersystem (links) und DC-gekoppeltes PV-Speichersystem (rechts).....  | 15 |
| Abbildung 14: Autarkie und Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von der PVA-Größe .....   | 17 |
| Abbildung 15: Autarkievergleich .....  | 18 |
| Abbildung 16: Autarkie und Eigenverbrauch mit PVA und Elektroauto.....   | 19 |
| Abbildung 17: Vergleich Autarkie für Haushalt mit 4000 kWh Jahresverbrauch .   | 23 |
| Abbildung 18: Kapitalwert in Abhängigkeit des Autarkiegrads.....   | 25 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 19: Kapitalwerte für Einfamilienhaus mit PV-Anlage und E-Auto.....  | 26 |
| Abbildung 20: Vergleich Kapitalwert.....  | 30 |
| Abbildung 21: Entwicklung des CO2-Emissionsfaktors für den Strommix in<br>Deutschland in den Jahren 1990 bis 2019 ..... | 31 |
| Abbildung 22: CO2-Einsparung durch Erzeugung über 20 Jahre.....   | 32 |
| Abbildung 23: CO2-Einsparung durch Eigenverbrauch über 20 Jahre .....   | 32 |
| Abbildung 24: CO2-Einsparung durch Eigenverbrauch über 20 Jahre mit<br>Elektroauto .....                                | 33 |
| Abbildung 25: CO2-Einsparung durch Eigenverbrauch über 20 Jahre mit<br>Speicher .....                                   | 34 |
| Abbildung 26: CO2-Einsparung mit PVA, Elektroauto und Speicher .....  | 35 |
| Abbildung 27: CO2-Einsparung durch Eigenverbrauch mit PVA, Speicher, E-Auto<br>und flexibler Laderegulung .....         | 36 |
| Abbildung 28: Vergleich CO2-Einsparung.....   | 36 |

## **Tabellenverzeichnis**

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Kosten für PV-Anlagen in NRW .....  | 7  |
| Tabelle 2: Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher, ohne E-Auto .....                                     | 20 |
| Tabelle 3: Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher und E-Auto .....                                       | 21 |
| Tabelle 4: Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher und vorhandenen E-Auto mit flexibler Laderegelung..... | 22 |
| Tabelle 5: Kapitalwert PVA mit Speicher .....  | 27 |
| Tabelle 6: Kapitalwert mit PVA, E-Auto und Speicher .....  | 28 |
| Tabelle 7: Kapitalwert mit PVA, Speicher, E-Auto und flexibler Laderegelung ...  | 29 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                 |                               |
|-----------------|-------------------------------|
| a               | Jahr                          |
| CO <sub>2</sub> | Kohlenstoffdioxid             |
| DHI             | Direct Horizontal Irradiance  |
| DIF             | Diffuse Horizontal Irradiance |
| DNI             | Direct Normal Irradiance      |
| EEG             | Erneuerbare-Energien-Gesetz   |
| EFH             | Einfamilienhaus               |
| GHI             | Global Horizontal Irradiance  |
| GWp             | Gigawatt peak                 |
| kg              | Kilogramm                     |
| kWh             | Kilowattstunde                |
| kWp             | Kilowatt peak                 |
| PKW             | Personenkraftwagen            |
| PR              | Performance Ratio             |
| PV              | Photovoltaik                  |
| PVA             | Photovoltaikanlage            |
| W               | Watt                          |
| Wh              | Wattstunden                   |

# 1 Einleitung

Ein relevantes Problem der heutigen Zeit ist der Klimawandel, welcher ungeahnte Folgen haben wird. In der Europäischen Union wird daher das Ziel verfolgt, eine kohlendioxidarme Wirtschaft in Europa umzusetzen, um so Treibhausgase in vielen Bereichen einzusparen. Die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien und der Umstieg auf Elektrofahrzeuge spielen bei der Dekarbonisierung eine wichtige Rolle.

Der Ausbau von PV wird dabei durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert (1, S. 1–2). Hinzu kommt, dass der durchschnittliche Strompreis für einen Haushalt von 19,46 ct/kWh im Jahr 2006 um ca. 56 % auf 30,43 ct/kWh im Jahr 2019 gestiegen ist (2). Dadurch, dass die durchschnittlichen PV-Gestehungskosten geringer sind als der durchschnittliche Haushaltsstrompreis, ist es wirtschaftlich von Vorteil, den selbsterzeugten Strom im Eigenverbrauch zu nutzen. (1)

Ist in einem Haushalt ein Elektrofahrzeug vorhanden, so wird der Strombedarf nahezu verdoppelt (1).

Aus diesen Gründen wurde bei der Energieversorgung Beckum festgestellt, dass immer mehr Kunden anstreben, Energieautark zu werden. So vertreibt die Energieversorgung Beckum gemeinsam mit der Firmaalcona Automation seit 2018 den „STROMAT“, eine Wallbox für Elektroautos. Aufgrund der Nachfrage wurde für den „STROMAT“ eine Solarkopplung entwickelt, welche seit 2019 vertrieben wird. Diese Arbeit untersucht daher, welchen Nutzen die Solarkopplung in Verbindung mit einer PV-Anlage, einem Elektroauto und einem Speicher hinsichtlich der Autarkie, der Wirtschaftlichkeit und der CO<sub>2</sub>-Einsparung bringt.

Zunächst werden das Erzeugungsprofil von PV-Anlagen, das Lastprofil von Haushalten sowie das Ladeprofil von E-Autos näher betrachtet. Aus den Profilen wird errechnet, zu welchem Autarkiegrad es in den verschiedenen Kombinationen aus PV-Anlage, Speicher und Elektroauto kommt. Abschließend werden nach dem jeweiligen Autarkiegrad die Wirtschaftlichkeit und der ökologische Vorteil berechnet.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Photovoltaik

Die Energie der Sonne, die außerhalb der Atmosphäre auf die Erde trifft, beträgt im Mittel  $1371 \text{ W/m}^2$  und wird als Solarkonstante bezeichnet (3, S. 71).

$$E_0 = 1360,8 \pm 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Durch den variierenden Abstand zwischen Sonne und Erde ist dieser Wert Schwankungen unterlegen. Wenn die Strahlung der Sonne die Erdatmosphäre durchdringt, wird sie durch Reflexion, Absorption und Streuung gemindert. Der Wert, den die Sonne an einem klaren Tag auf Meereshöhe erreicht, beträgt in Deutschland etwa  $1000 \text{ W/m}^2$ . Die Reduktionen durch die Atmosphäre variieren in Abhängigkeit der Sonnenhöhe und der Witterung. Hinzu kommt, dass die Verluste bei niedrigen Sonnenhöhen durch den zunehmenden Weg der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre zunehmen. Des Weiteren schwankt die Strahlung erheblich zwischen den Jahreszeiten (3, S. 71–74).

Im Weltall besteht die Strahlung nahezu nur aus einem direkten Anteil. Auf der Erde setzt sie sich auf der horizontalen Fläche aus dem direkten und einem diffusen Anteil zusammen.

$$GHI = DHI + DIF \quad (1)$$

$$DHI = DNI \cdot \sin(\gamma_s)$$

mit:

GHI: Global Horizontal Irradiance

DHI: Direct Horizontal Irradiance

DIF: Diffuse Horizontal Irradiance

DNI: Direct Normal Irradiance

$\gamma_s$ : Sonnenstandswinkel

Auf Grund der Zusammensetzung kann die Globalstrahlung auch Werte oberhalb der extraterrestrischen Strahlung annehmen (3, S. 79–81).

Für die Berechnung der zu erwartenden Ertragswerte ist es zudem wichtig, Kenntnisse über die genaue Sonnenposition und dem Einfallswinkel zu haben. Diese werden über den Elevationswinkel  $\gamma_s$  und den Azimutwinkel  $\alpha_s$  berechnet, die Winkel sind dabei von Standort, Datum und Uhrzeit abhängig (3, S. 82–86).

Abzüge bei der direkten Einstrahlung gibt es auf die geneigte Fläche, da hier die Einstrahlung, im Vergleich zu einer auf die Sonne senkrecht ausgerichteten Fläche, durch die verminderte Fläche auf die die Strahlung trifft, kleiner ist, welches in der Abbildung 1 verdeutlicht wird (3, S. 86–87).

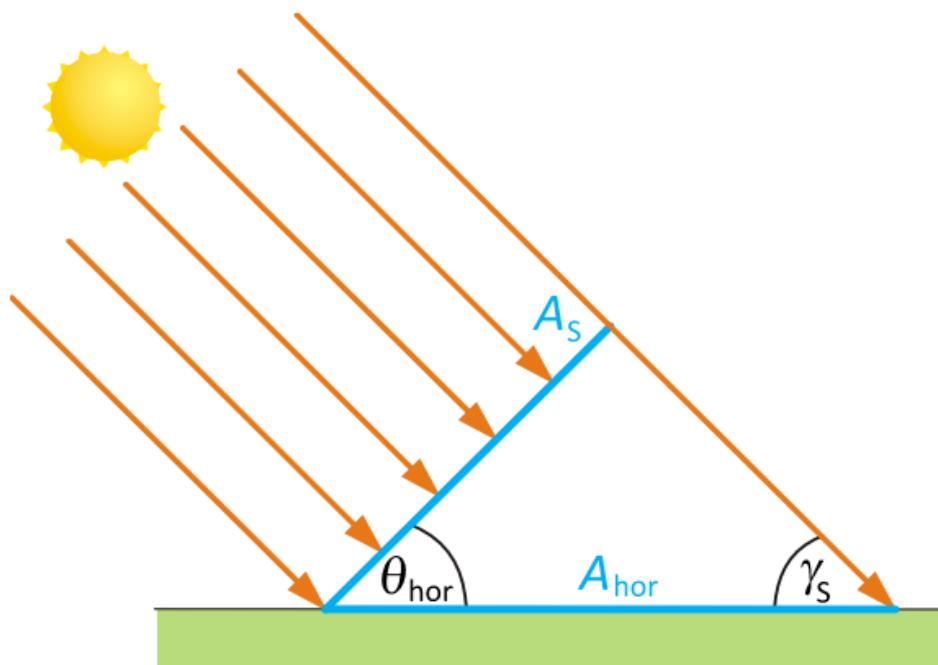


Abbildung 1: Einstrahlung des Sonnenlichts auf eine horizontale Fläche und eine Fläche senkrecht zur Einfallsrichtung (3, S. 86)

Aus dieser Gegebenheit lässt sich ein Strahlungsgewinn durch Neigung erzielen. Der optimale Winkel liegt in mitteleuropäischen Breitengraden bei etwa  $30^\circ$  nach Süden (3, S. 89–92). Die Änderungen der jährlichen solaren Bestrahlung in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung lässt sich in Abbildung 2 erkennen.

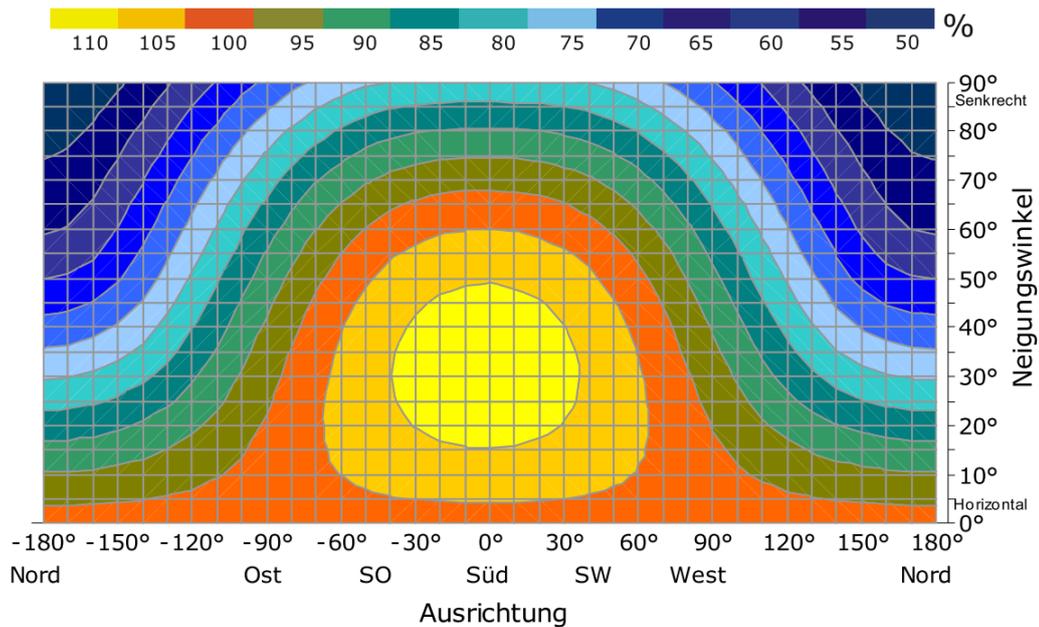


Abbildung 2: Änderung der jährlichen solaren Bestrahlung in Berlin in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung im Vergleich zur Horizontalen (3, S. 91)

Die direkte Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie mittels Solarzellen versteht sich als Photovoltaik. Diese Solarzellen werden zu einem Solarmodul verschaltet. Mehrere Solarmodule zusammengeschaltet bilden mit einem Wechselrichter eine PV-Anlage (4, S. 32–34). Der Aufbau einer solchen Anlage ist in Abbildung 3 zu sehen.

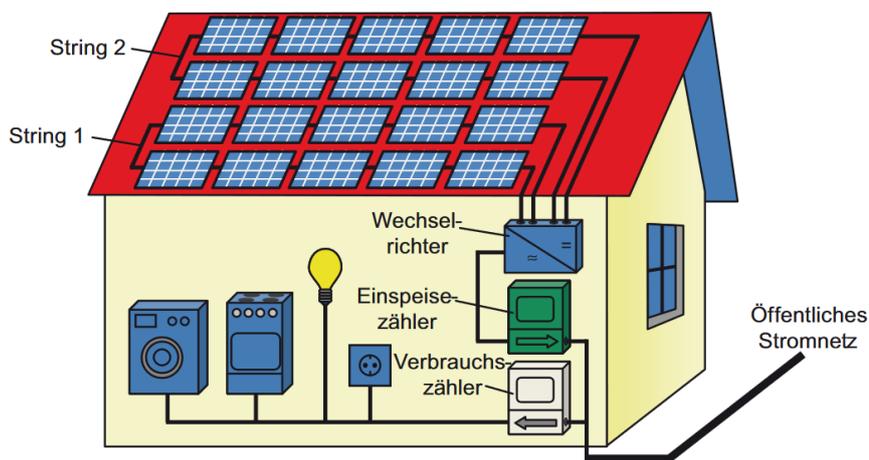


Abbildung 3: Aufbau einer klassischen netzgekoppelten PV-Anlage (4, S. 34)

Die Auswahl des Modultyps entscheidet über die benötigte Größe für die Modulfläche, da die verschiedenen Modultypen einen unterschiedlichen Wirkungsgrad haben. Der Wirkungsgrad beschreibt den Anteil der generierten elektrischen Leistung an der Strahlungsleistung auf diese Fläche. Für

eine Nennleistung von 1 kWp sind bei monokristallinen Zellen etwa 5,3 m<sup>2</sup> Modulfläche nötig (5, S. 133–135).

Um die Qualitätsbewertung eines PV-Generators, unabhängig von der Strahlung bewerten zu können, wird die Performance Ratio PR benötigt. Die PR beschreibt die Verluste durch z.B. Vogeldreck, Staub, Erwärmung, Leitungsverluste, Reflexionen und Wechselrichterverluste (5, S. 153).

In Deutschland sind aktuell (Stand 2020) etwa 49 GWp PV-Leistung installiert (6). Die Entwicklung der in Deutschland installierten PV-Leistung wird in Abbildung 4 in den Jahren 2000 bis 2019 dargestellt.

Installierte Leistung (kumuliert) der Photovoltaikanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2019 (in Megawattpeak)

Photovoltaik - Installierte Leistung in Deutschland bis 2019

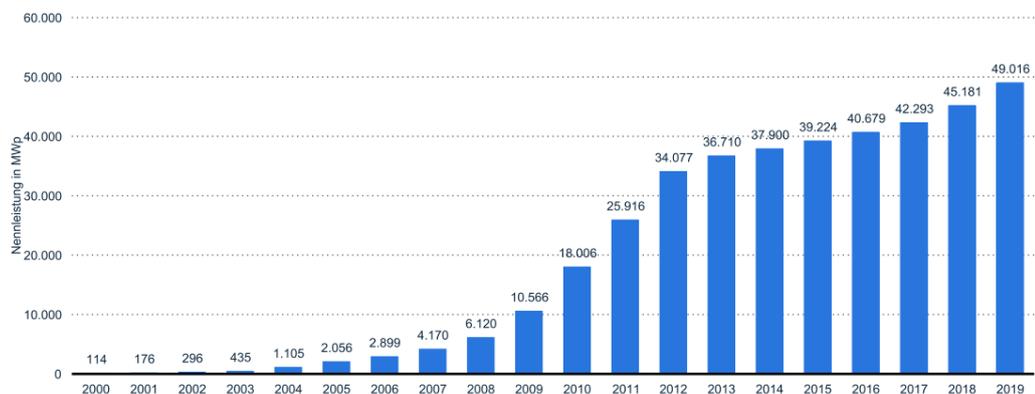


Abbildung 4: Installierte PV-Leistung in Deutschland (Stand 2020)

Die aktuelle Einspeisevergütung liegt bei 8,9 Cent/kWh bei PV-Anlagen auf Wohngebäuden bis 10 kWp bei einer Vertragslaufzeit von 20 Jahren (7). Der durchschnittliche Strompreis für Haushalte liegt im Vergleich dazu bei 30,43 Cent/kWh und steigt durchschnittlich um 3,33% seit 2006 (2).

In Abbildung 5 ist das synthetische Einspeiseprofil von PV-Anlagen der Stadtwerke Remscheid aus dem Jahr 2013 zu erkennen. Die Daten liegen in der Exceldatei „01 2006\_2013\_Lastprofil\_E0“ vor (8).

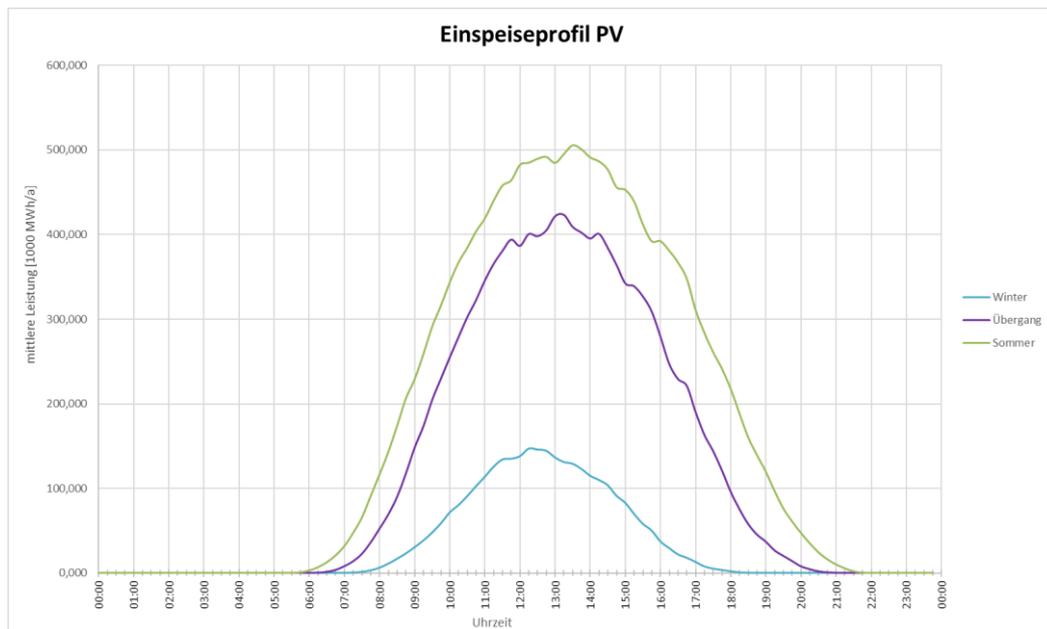


Abbildung 5: Einspeiseprofil PV

Das Einspeiseprofil PV (Abbildung 5) zeigt, dass die Leistungsspitze im Sommer und in der Übergangszeit bei 13 Uhr liegt, sich im Winter auf 12 Uhr verlagert, was durch die Zeitumstellung von Sommer- und Winterzeit zurückzuführen ist.

Die Einteilung der Jahreszeiten wurden folgendermaßen vorgenommen:

- Winter: 01.11 bis 20.03.
- Sommer: 15.05. bis 14.09.
- Übergangszeit: 21.03. bis 14.05. und 15.09. bis 31.10.

Der Eigenverbrauch einer PV-Anlage definiert sich über die Summe aus der Differenz zwischen abgegebener PV-Leistung  $\bar{P}_{PV}$  und der Netzeinspeisung  $\bar{P}_{Ein}$  jeweils multipliziert mit dem Zeitintervall  $\Delta t$ , dividiert durch die abgegebene PV-Leistung  $\bar{P}_{PV}$  (3, S. 177–181).

$$e = \frac{\sum \bar{P}_{PV} \cdot \Delta t - \bar{P}_{Ein} \cdot \Delta t}{\bar{P}_{PV} \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Der Autarkiegrad  $a$  definiert sich über die Summe der Eigenverbrauchsleistung  $\bar{P}_{\text{Eigenverbrauch}}$  multipliziert mit dem Zeitintervall, dividiert durch die Leistung des Verbrauchs des Haushaltes  $\bar{P}_{\text{Verbrauch}}$ , multipliziert mit dem Zeitintervall (3, S. 177–181).

$$a = \frac{\sum \bar{P}_{\text{Eigenverbrauch}} \cdot \Delta t}{\bar{P}_{\text{Verbrauch}} \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Eigenverbrauch und Autarkie sind wichtige Größen, um die Wirtschaftlichkeit von PV-Systemen zu errechnen.

Die Kosten einer PV-Anlage steigen nicht proportional nach kWp der Anlage, sondern nehmen mit zunehmender Gesamtgröße der Anlage ab (9, S. 9–11). Die Betriebskosten liegen bei ca. 1 % pro Jahr und beinhalten die Versicherungskosten, Wartung und Reparatur (10, S. 8).

Tabelle 1: Kosten für PV-Anlagen in NRW, eigene Bearbeitung nach (9, S. 9–11) und (10, S. 8)

| Größe in kWp | Investitionskosten NRW | Investitionskosten gesamte Anlage | jährliche Betriebskosten 1 % |
|--------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 1            | 1904 €/kWp             | 1.904 €                           | 19 €                         |
| 2            | 1904 €/kWp             | 3.808 €                           | 38 €                         |
| 3            | 1822 €/kWp             | 5.466 €                           | 55 €                         |
| 4            | 1740 €/kWp             | 6.960 €                           | 70 €                         |
| 5            | 1696 €/kWp             | 8.478 €                           | 85 €                         |
| 6            | 1651 €/kWp             | 9.906 €                           | 99 €                         |
| 7            | 1621 €/kWp             | 11.347 €                          | 113 €                        |
| 8            | 1591 €/kWp             | 12.728 €                          | 127 €                        |
| 9            | 1568 €/kWp             | 14.112 €                          | 141 €                        |
| 10           | 1545 €/kWp             | 15.450 €                          | 155 €                        |
| 11           | 1527 €/kWp             | 16.797 €                          | 168 €                        |
| 12           | 1509 €/kWp             | 18.108 €                          | 181 €                        |
| 13           | 1494 €/kWp             | 19.422 €                          | 194 €                        |
| 14           | 1479 €/kWp             | 20.706 €                          | 207 €                        |
| 15           | 1467 €/kWp             | 21.998 €                          | 220 €                        |
| 16           | 1454 €/kWp             | 23.264 €                          | 233 €                        |
| 17           | 1443 €/kWp             | 24.531 €                          | 245 €                        |
| 18           | 1432 €/kWp             | 25.776 €                          | 258 €                        |
| 19           | 1423 €/kWp             | 27.028 €                          | 270 €                        |
| 20           | 1413 €/kWp             | 28.260 €                          | 283 €                        |

Eine Übersicht der Kosten für PV-Anlagen nach Anlagenleistung ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Die Kosten für die ungeraden Leistungswerte zwischen 3 und 19 kWp wurden aus den umliegenden geraden Werten gemittelt, der Wert für 1 kWp entspricht dem Preis pro kWh für 2 kWp Anlagen.

## 2.2 Lastprofil für Haushalte

Das Lastprofil eines Verbrauchers für elektrische Energie zeigt den zeitlichen Verlauf der bezogenen Leistung an (11). Je nach Jahreszeit und Wochentag unterliegt der Lastgang jeweils stark unterschiedlichen tageszeitlichen Schwankungen (12, S. 375). Die Lastprofile werden in die verschiedenen Kundengruppen unterteilt, wobei Haushaltskunden der Gruppe H0 einzuordnen sind, worunter auch Einfamilienhäuser fallen (13).

Im Folgenden wird das Lastprofil H0 von Haushalten näher betrachtet. Es wird eine Unterscheidung der Wochentage in Werktage, Samstage und Sonntage/Feiertage vorgenommen, sowie eine Einteilung in die Jahreszeiten Sommer, Winter und Übergangszeit. Die Einteilung der Jahreszeiten wurde dem Kapitel 2.1 entnommen.

Nachfolgend dargestellt handelt es sich um analytisch normierte Lastprofile aus dem Jahr 2013 von den Stadtwerken Remscheid. Die Daten und Rechnungen können der Exceldatei „02\_2013\_Lastprofil\_H0“ entnommen werden (8). Das Lastprofil für Werktage findet sich in der Abbildung 6 wieder.

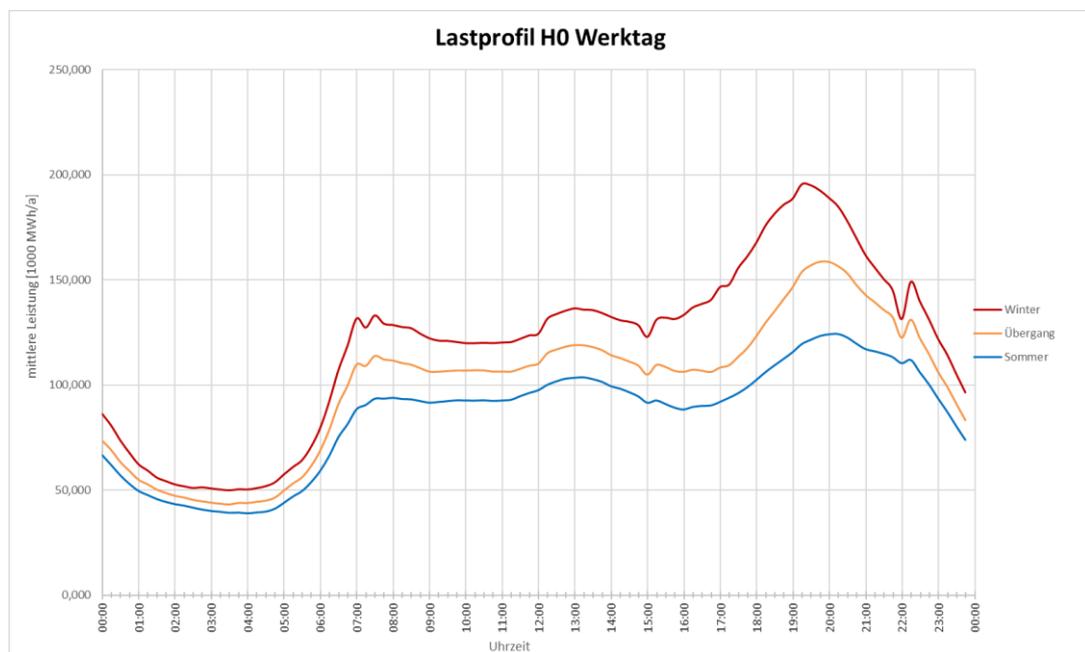


Abbildung 6: Lastprofil H0 Werktag

Es ist erkennbar, dass es für die einzelnen Jahreszeiten jeweils einen Peak morgens und abends sowie eine leichte Erhöhung um die Mittagszeit gibt. Abends ist der Peak zwischen 19 Uhr und 20 Uhr mit einer Leistung von

195.000 MWh/a am höchsten. Bei einem Einfamilienhaus liegt der durchschnittliche Stromverbrauch bei 4000 kWh/a (14). Mit diesem Wert ergibt sich abends eine Leistung von 780 Watt. Die erhöhten Werte lassen sich dadurch erklären, dass sich die Bevölkerung auf die Arbeit vorbereitet, ihr Mittagessen zubereitet und Abendunterhaltung betreibt und folglich verschiedene Geräte eingeschaltet sind. Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Stromverbrauch im Winter immer über den der Übergangszeit und dieser über dem des Sommers liegt. Dies lässt sich unter anderem durch den erhöhten Licht- und Heizbedarf zurückführen.

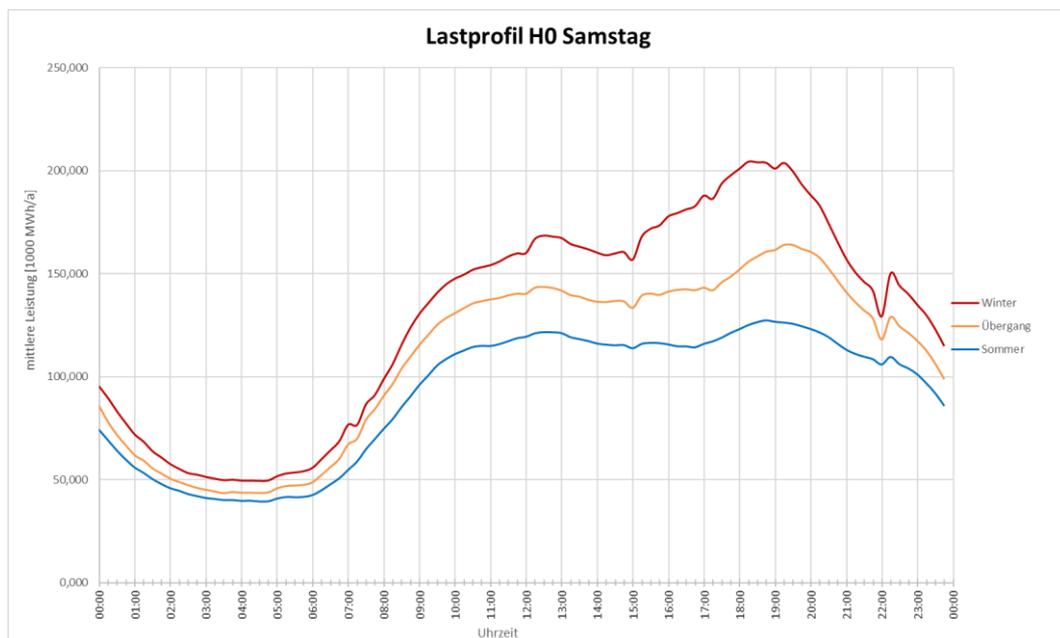


Abbildung 7: Lastprofil H0 Samstag

In Abbildung 7 ist das Lastprofil für Samstag abgebildet. Es ist zu verzeichnen, dass es zwei Peaks gibt, einen zur Mittagszeit und einem am Abend zwischen 18 Uhr und 19 Uhr. Im Vergleich zum Werktag entfällt das Peak in den frühen Morgenstunden, stattdessen steigt der Leistungsbedarf bis zum Mittag stetig an, dies ist dadurch zu erklären, dass am Samstag deutlich weniger Menschen arbeiten.

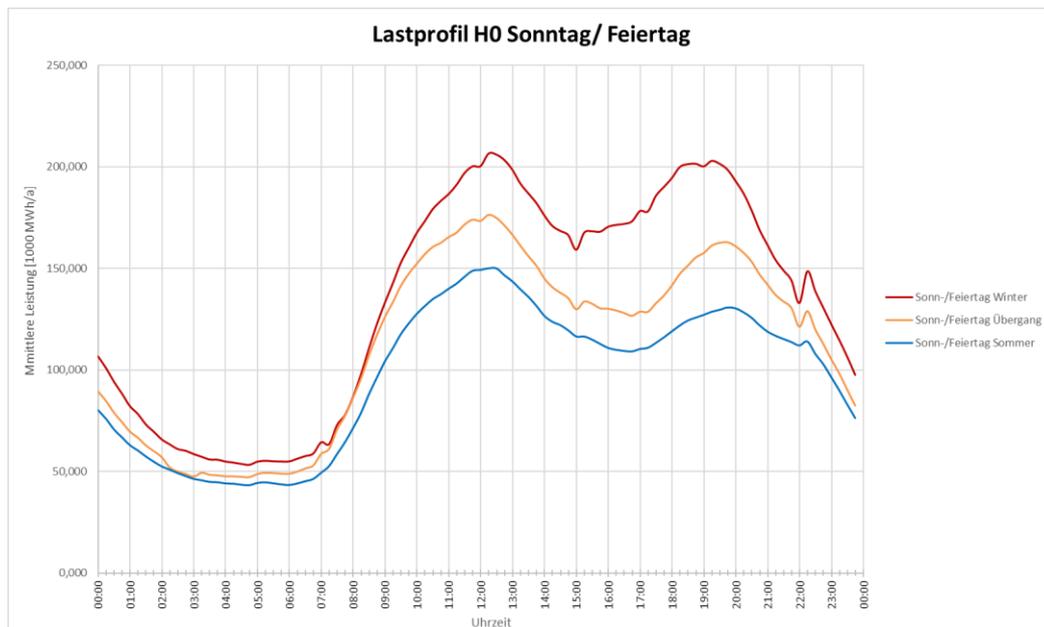


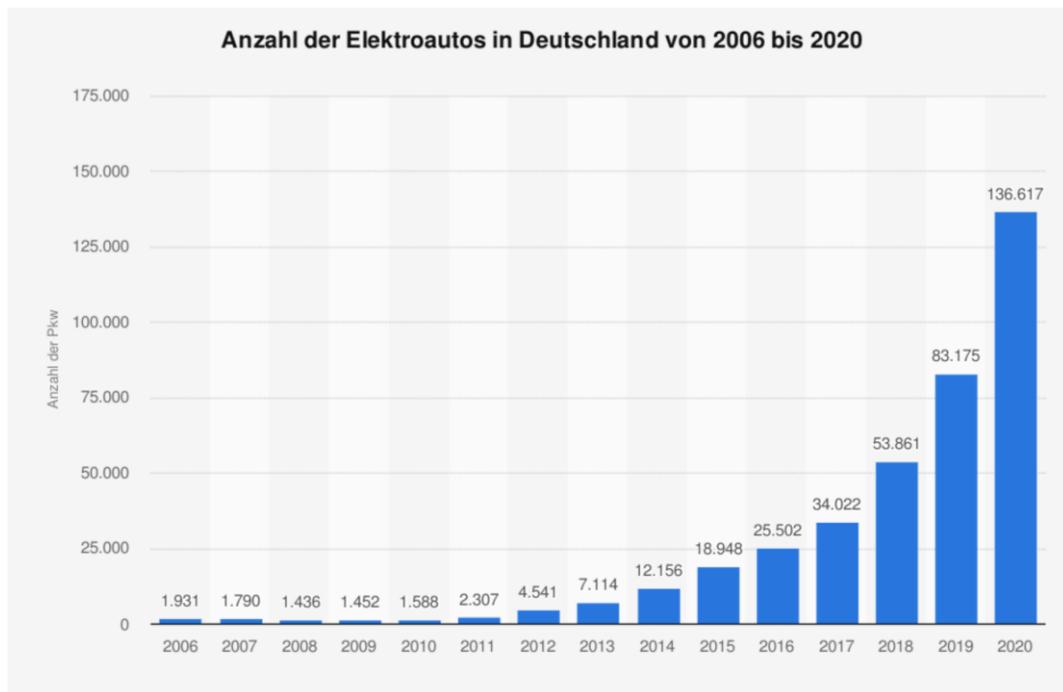
Abbildung 8: Lastprofil H0 Sonntag/Feiertag

Das Lastprofil für Sonn- und Feiertage ist in Abbildung 8 zu sehen. Wie beim Samstagsprofil auch, gibt es zwei Leistungspeaks. Ein Leistungspeak am Mittag und eines am Abend. Im Vergleich zu Werk- und Samstagen ist am Sonntag der Peak am Mittag höher als am Abend. Dies ist dadurch erklärbar, dass an einem Sonntag wesentlich mehr Personen mittags kochen. Der stärkere Leistungsabfall am Nachmittag ist durch die vermehrte Aktivität im Freien zurückzuführen.

### 2.3 Elektromobilität

Elektromobilität ist ein wichtiger Baustein für klimafreundliche Mobilität. Im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren spart sie, insbesondere in Verbindung mit Strom aus erneuerbaren Energien, viel CO<sub>2</sub> ein (15).

Ein Punkt, der den Markt für Elektroautos deutlich antreibt, ist der Umweltbonus des Bundes. Eine Entwicklung über die Anzahl der Elektroautos in Deutschland ist in Abbildung 9 verdeutlicht, in der die steigende Anzahl deutlich zu erkennen ist.



*Abbildung 9: Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2020 (16)*

Eine Übersicht über die meistverkauften Automarken in Deutschland wird in Abbildung 10 präsentiert. Der größte Bestand liegt mit 27.750 PKWs bei Renault, darauf folgt Smart und VW.

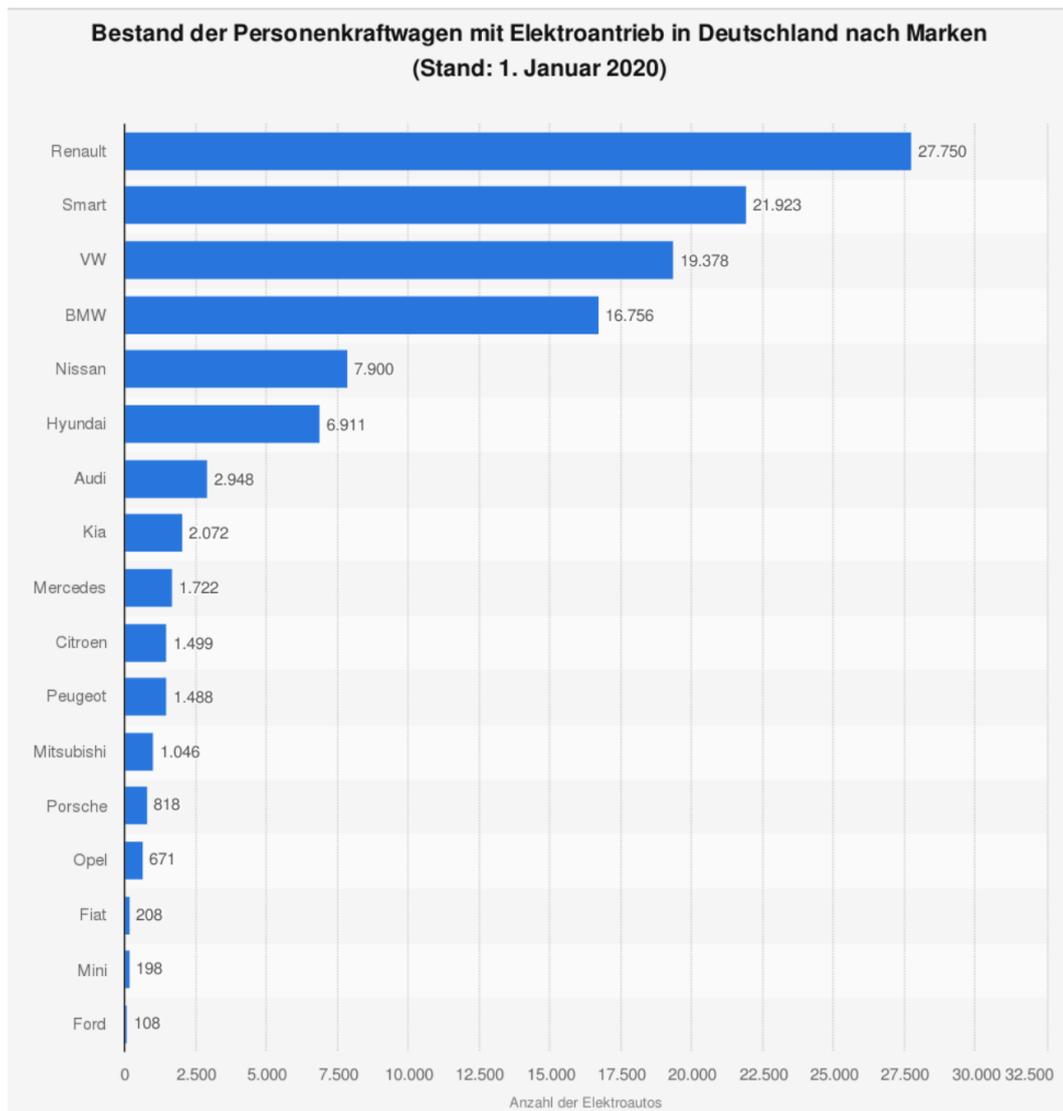


Abbildung 10: Bestand der Personenkraftwagen mit Elektroantrieb in Deutschland nach Marken (15)

Die mittlere Reichweite liegt bei den Fahrzeugen durchschnittlich bei 260 km (17). Der Verbrauch in kWh pro km variiert von Modell zu Modell und liegt zwischen 13,1 und 25,9 kWh/100 km (18).

Aktuell ist es für Energieversorger nicht notwendig ein separates Lastprofil für Haushalte mit Elektrofahrzeugen zu verwenden, da zurzeit (noch) nicht genügend Elektrofahrzeuge betrieben werden, als dass diese die Bilanzierung des Energieversorgers ungenauer gestalten würde. Vom Karlsruher Institut für Technologie wurde eigens ein Ladeprofil für Elektrofahrzeuge auf Grundlage des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen entwickelt. Bei diesem Modell wurde auf Grund nur sehr geringer Unterschiede zwischen dem Ladeverhalten von Samstag und Sonntag nur eine Unterteilung in Werktag und Wochenende vorgenommen (19).

Die Ladeprofile sind in Abbildung 11 zu sehen.

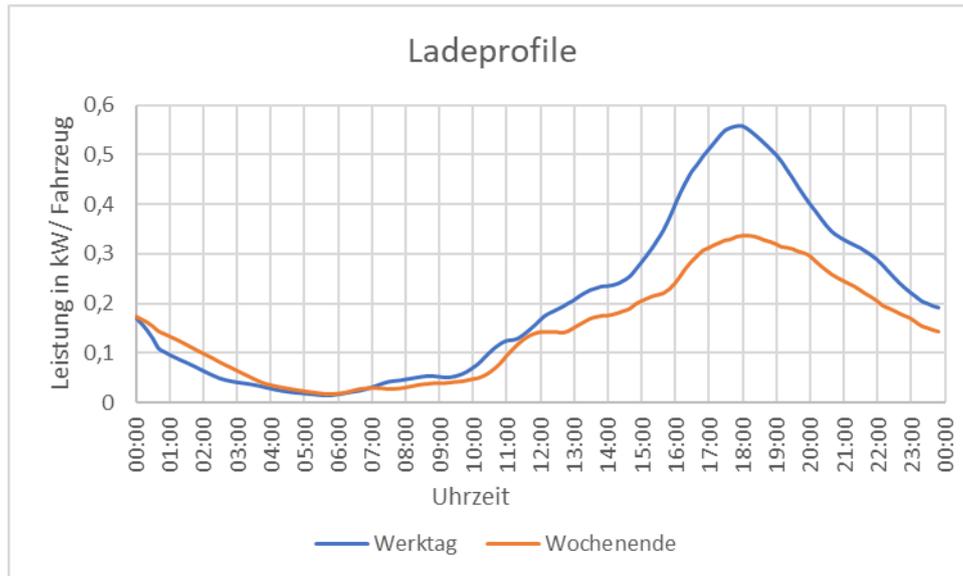


Abbildung 11: Ladeprofile von Elektrofahrzeugen, eigene Bearbeitung nach (19)

Bei den Ladeprofilen ist an beiden Kurven die größte Last um 18 Uhr zu erkennen. An Wochenenden ist im Vergleich zu Werktagen die Last insgesamt geringer.

Da die Ladeprofile nur die entstandene Last durch Elektrofahrzeuge widerspiegeln und die Last des restlichen Haushalts noch hinzuaddiert werden muss, findet sich ein kumuliertes Lastprofil in Abbildung 12 wieder. Der Jahresverbrauch des Haushaltes wird dabei mit 4000 kWh angenommen, der Unterschied zwischen den Jahreszeiten wurde gemittelt. Das Lastprofil des Haushaltes wurde aus Kapitel 2.2 verwendet.

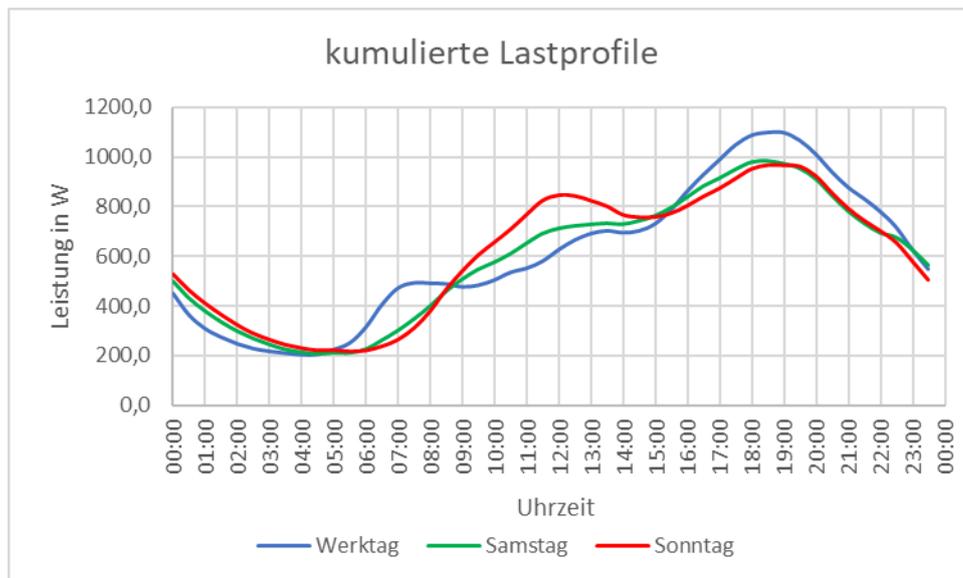


Abbildung 12: kumulierte Lastprofile

Im kumulierten Lastprofil wird verdeutlicht, dass Werktags zwei Lastspitzen entstehen. Eine Lastspitze ist morgens gegen 7 Uhr mit knapp 500 Watt zu verzeichnen, die zweite ist abends um 18:30 Uhr mit 1100 Watt. Sonntags gibt es eine Lastspitze um 12 Uhr mit 850 Watt und abends um 18:30 Uhr mit 970 Watt und somit ist diese Lastspitze deutlich geringer als Werktags. Das Lastprofil für Samstag ist eine Mischung aus dem Werktaglastprofil und dem Sonntaglastprofil.

## 2.4 Speicher

Speicher ermöglichen eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Erzeugung und Bedarf und beinhalten die Prozesse: Einspeichern (Laden), Speichern, Ausspeichern (Entladen) (12, S. 125–126).

Als Speicher eingesetzt werden überwiegend Batterien aus Blei-Gel oder Lithium-Ionen. Bei den Lithium-Ionen-Batterien ist der Vorteil, dass sie einen höheren Wirkungsgrad, eine höhere Lebensdauer und ein höheres Kostensenkungspotenzial haben. In das PV-Speichersystem werden die Batterien entweder über die AC-Stromseite oder die DC-Stromseite eingebunden. Batterien, die über die AC-Stromseite eingebunden werden, haben den Vorteil, dass sie unabhängig vom PV-System dimensioniert werden können. (20, S. 16–22). Eine Veranschaulichung der Batteriekopplungen ist in Abbildung 13 zu betrachten.

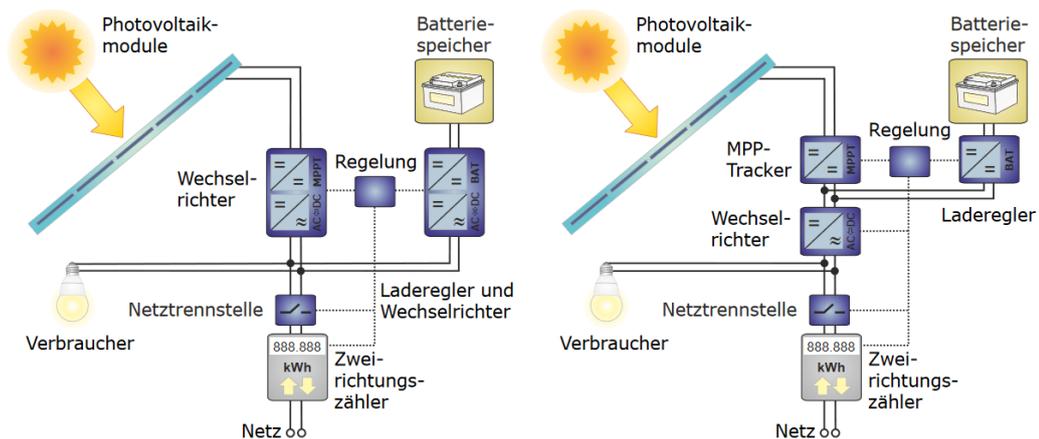


Abbildung 13: AC-gekoppeltes PV-Speichersystem (links) und DC-gekoppeltes PV-Speichersystem (rechts) (20, S. 19)

Die Größe der nutzbaren Batteriekapazität beeinflusst die Preise für das Speichersystem. PV-Speicher mit einer Kapazität von unter 6 kWh kosteten 2017 durchschnittlich über 1.700 €/kWh, zwischen 6 und 12 kWh kosteten unter 1.300 €/kWh und Systeme mit mehr als 12 kWh kosteten unter 1.000 €/kWh (21, S. 52).

## 2.5 Flexible Laderegelnungen

Die flexible Laderegelung wird am Beispiel der Solarkopplung für den „STROMAT“ der Firmaalcona Automation GmbH erklärt. Die flexible Laderegelung in Form der Solarkopplung bestimmt mit Hilfe eines zusätzlichen Energiezählers den Stromüberschuss, der durch die Erzeugung nach Abzug des Verbrauchs des Haushaltes entsteht. Somit wird das E-Auto durch 100 % Solarstrom geladen. Die Kosten für eine solche Regelung belaufen sich auf 799 € (22).

### **3 Untersuchung der Autarkie**

Im Folgenden wird untersucht, wie sich die Größe der Photovoltaikanlage mit dem Verbrauch eines Einfamilienhauses verhält. Näher untersucht werden dabei die Fälle:

- Einfamilienhaus mit PV-Anlage,
- Einfamilienhaus mit PV-Anlage und Elektroauto,
- Einfamilienhaus mit PV-Anlage und Speicher,
- Einfamilienhaus mit PV-Anlage, Elektroauto und Speicher, sowie
- Einfamilienhaus mit PV-Anlage, Elektroauto, Speicher und flexibler Laderegelung.

Der Verbrauch für das Einfamilienhaus wird mit 4000 kWh/ Jahr angenommen. Die Grundlage für die Berechnungen bilden das analytische Lastprofil für Haushalte und das synthetische Einspeiseprofil für PV-Anlagen von den Stadtwerken Remscheid aus dem Jahr 2013, welche in den Kapiteln 2.1 und 2.2 zu finden sind. Die Profile werden für die folgenden Berechnungen im Gesamten verwendet und nicht in Jahreszeiten oder Wochentage unterteilt, um ein genaueres Ergebnis zu erhalten.

#### **3.1 EFH mit PV-Anlage**

Die Formeln für die Berechnung des Eigenverbrauchs sind dem Kapitel 2.1 zu entnehmen. Eine ausführliche Berechnung ist der Exceldatei „03 Autarkie PV“ zu entnehmen. Eine Übersicht der Ergebnisse zum Eigenverbrauch und zur Autarkie bei einem Haushalt mit 4000 kWh und den verschiedenen Anlagengrößen findet sich in Abbildung 14 wieder.

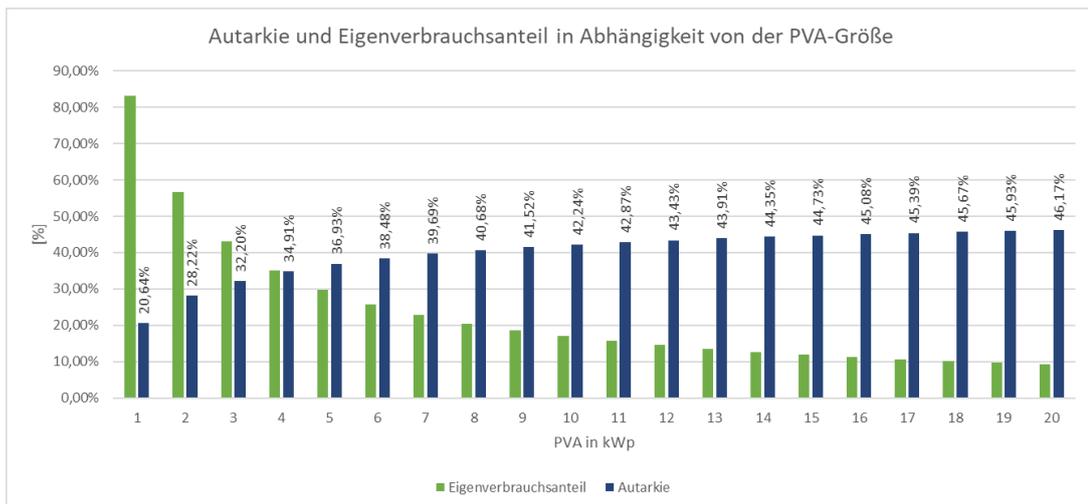


Abbildung 14: Autarkie und Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von der PVA-Größe

Die Grafik zeigt, dass mit zunehmender Anlagengröße der Eigenverbrauchsanteil sinkt und die Autarkie steigt. Es wird jedoch auch deutlich, dass kein proportionaler Zusammenhang besteht. Nimmt die Autarkie bei einer Vergrößerung der Anlage von 1 kWp auf 5 kWp um 79 % zu, sind es von 10 kWp auf 15 kWp nur 5 %.

Verdeutlich wird dies, wenn beispielhaft in Abbildung 15 Anlagen mit der Größe von 2 kWp, 4 kWp und 8 kWp und ihre Autarkie an einem Werktag im Sommer und im Winter verglichen werden. Es ist erkennbar, dass sich im Sommer eine Vergrößerung der Anlage kaum mehr auf die Autarkie auswirkt.

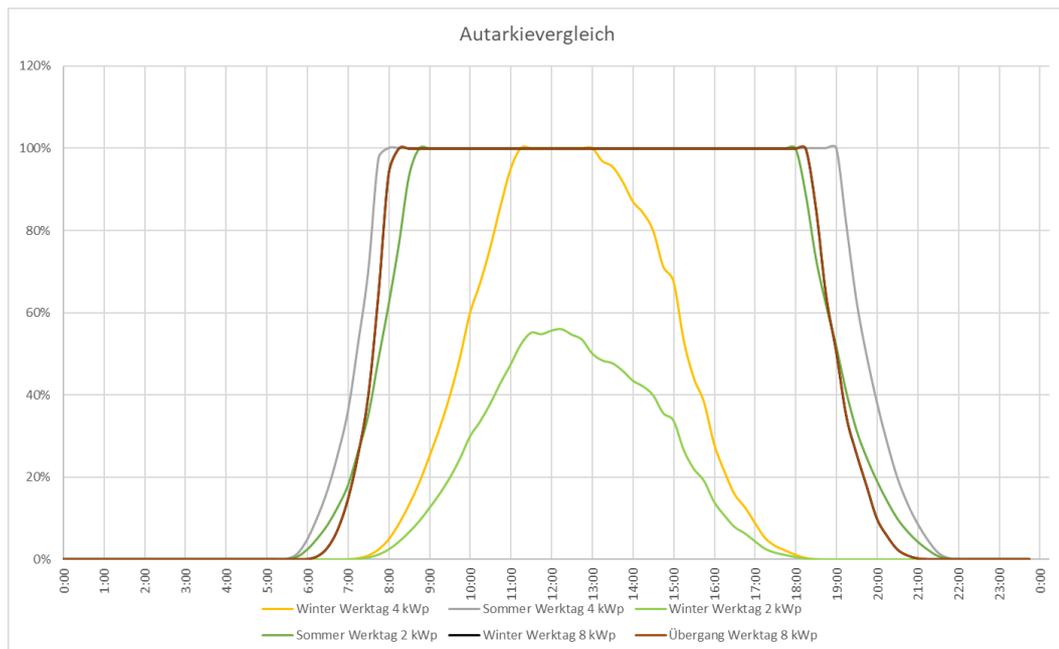


Abbildung 15: Autarkievergleich

### 3.2 EFH mit PV-Anlage und E-Auto

Wie in Kapitel 3.1 wird auf gleichem Weg die Autarkie eines Haushalts mit einem Stromverbrauch von 4000 kWh pro Jahr untersucht. Unterschied zum obigen Kapitel ist, dass nun der Verbrauch des Elektroautos mit in die Rechnung mit einbezogen wird, welche sich zum Verbrauch des Haushalts addiert. Die Berechnungen können der Exceldatei „04 Autarkie PV EAuto“ entnommen werden, die Ergebnisse der Rechnungen sind in Abbildung 16 abgebildet.

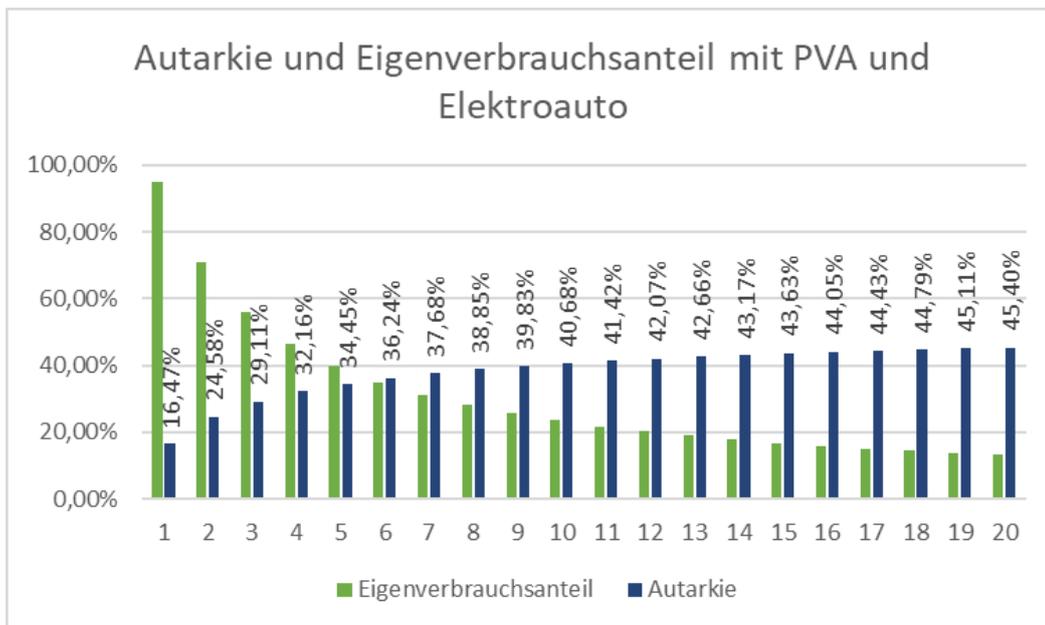


Abbildung 16: Autarkie und Eigenverbrauch mit PVA und Elektroauto

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 3.1 ist erkennbar, dass der Eigenverbrauchsanteil, im Vergleich zur Anlage ohne Elektroauto steigt, während die Autarkie etwas geringer ist. Dies ist durch den höheren Verbrauch zu erklären.

### 3.3 EFH mit PV-Anlage und Speicher, ohne E-Auto

Wie sich die Autarkie in einem Haushalt mit PV-Anlage und Speicher verhält, wird in diesem Kapitel untersucht. Der Verbrauch des Haushaltes beträgt 4000 kWh/a, die Größe der PV-Anlage beläuft sich zwischen 1 bis 20 kWp und der Speicher variiert mit einer Kapazität von 1 Wh bis 10.000 Wh. Die Rechnungen können der Exceldatei „05 Autarkie PV EAuto Speicher“ entnommen werden, die Ergebnisse finden sich in Tabelle 2 wieder.

Tabelle 2: Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher, ohne E-Auto

Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher  
ohne E-Auto (bei Verbrauch des Haushaltes von 4000 kWh/a)

|                    |        | Speicherkapazität |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
|--------------------|--------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                    |        | 0 Wh              | 1000 Wh | 2000 Wh | 3000 Wh | 4000 Wh | 5000 Wh | 6000 Wh | 7000 Wh | 8000 Wh | 9000 Wh | 10000 Wh |
| Leistung PV-Anlage | 1 kWp  | 20,64             | 23,48   | 24,64   | 24,85   | 24,85   | 24,85   | 24,85   | 24,85   | 24,85   | 24,85   | 24,85    |
|                    | 2 kWp  | 28,22             | 33,70   | 37,75   | 41,17   | 43,22   | 44,14   | 44,75   | 45,22   | 45,64   | 45,94   | 46,20    |
|                    | 3 kWp  | 32,20             | 38,68   | 44,02   | 48,66   | 51,41   | 53,07   | 54,03   | 54,69   | 55,21   | 55,69   | 56,05    |
|                    | 4 kWp  | 34,91             | 41,81   | 47,84   | 53,21   | 56,21   | 58,10   | 59,27   | 60,08   | 60,76   | 61,25   | 61,68    |
|                    | 5 kWp  | 36,93             | 44,16   | 50,56   | 56,27   | 59,57   | 61,61   | 62,85   | 63,74   | 64,45   | 65,09   | 65,62    |
|                    | 6 kWp  | 38,48             | 45,98   | 52,66   | 58,51   | 62,03   | 64,37   | 65,66   | 66,54   | 67,34   | 67,81   | 68,21    |
|                    | 7 kWp  | 39,69             | 47,47   | 54,38   | 60,31   | 63,93   | 66,40   | 67,91   | 68,80   | 69,47   | 69,98   | 70,41    |
|                    | 8 kWp  | 40,68             | 48,71   | 55,83   | 61,84   | 65,55   | 68,06   | 69,70   | 70,66   | 71,33   | 71,83   | 72,20    |
|                    | 9 kWp  | 41,52             | 49,73   | 57,07   | 63,18   | 66,96   | 69,53   | 71,17   | 72,18   | 72,91   | 73,43   | 73,85    |
|                    | 10 kWp | 42,24             | 50,62   | 58,14   | 64,35   | 68,23   | 70,85   | 72,53   | 73,48   | 74,22   | 74,80   | 75,25    |
|                    | 11 kWp | 42,87             | 51,38   | 59,04   | 65,40   | 69,39   | 72,07   | 73,71   | 74,66   | 75,39   | 75,96   | 76,48    |
|                    | 12 kWp | 43,43             | 52,01   | 59,84   | 66,27   | 70,39   | 73,13   | 74,76   | 75,72   | 76,49   | 77,06   | 77,60    |
|                    | 13 kWp | 43,91             | 52,57   | 60,55   | 67,02   | 71,25   | 74,06   | 75,74   | 76,73   | 77,49   | 78,13   | 78,65    |
|                    | 14 kWp | 44,35             | 53,06   | 61,18   | 67,69   | 71,96   | 74,89   | 76,64   | 77,63   | 78,42   | 79,03   | 79,56    |
|                    | 15 kWp | 44,73             | 53,50   | 61,74   | 68,30   | 72,60   | 75,57   | 77,43   | 78,47   | 79,20   | 79,80   | 80,31    |
|                    | 16 kWp | 45,08             | 53,90   | 62,20   | 68,85   | 73,18   | 76,19   | 78,09   | 79,18   | 79,93   | 80,49   | 80,98    |
|                    | 17 kWp | 45,39             | 54,28   | 62,61   | 69,36   | 73,71   | 76,76   | 78,72   | 79,83   | 80,59   | 81,11   | 81,59    |
|                    | 18 kWp | 45,67             | 54,62   | 62,99   | 69,82   | 74,20   | 77,29   | 79,30   | 80,45   | 81,19   | 81,71   | 82,19    |
|                    | 19 kWp | 45,93             | 54,93   | 63,34   | 70,21   | 74,67   | 77,78   | 79,84   | 81,02   | 81,77   | 82,29   | 82,78    |
|                    | 20 kWp | 46,17             | 55,22   | 63,67   | 70,54   | 75,10   | 78,25   | 80,32   | 81,55   | 82,31   | 82,83   | 83,30    |

Der obigen Abbildung ist zu entnehmen, dass die Autarkie für Anlagen mit Speicher, gegenüber den Anlagen ohne Speicher, gesteigert werden kann. Bei einer PV-Anlage mit 20 kWp und einem Speicher mit einer Kapazität von 10.000 Wh ist einer Steigerung der Autarkie von 80 % gegenüber einer Anlage ohne Speicher zu verzeichnen. Bei einer kleinen PV-Anlage von 1 kWp führt ein Speicher nur bis 3.000 Wh zu einer Steigerung von 20 %, darüber hinaus ist keine Steigerung möglich.

### 3.4 EFH mit PV-Anlage, E-Auto und Speicher

Auf die gleiche Weise, wie in den vorigen Kapiteln, wird nun die Autarkie eines Einfamilienhauses mit PV-Anlage, Elektroauto und Speicher untersucht. Der Verbrauch des Einfamilienhauses wird mit 4.000 kWh angenommen, hinzu addiert sich der Verbrauch für das Elektroauto, die PV-Anlage variiert mit einer Leistungsgröße von 1 kWp bis 20 kWp, der Speicher variiert mit 1 kWh bis 10 kWh Ladekapazität. Die Rechnungen sind der Excel-datei „05 Autarkie PV EAuto Speicher“ zu finden, die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher und E-Auto

|                    |        | Speicherkapazität |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
|--------------------|--------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                    |        | 0 Wh              | 1000 Wh | 2000 Wh | 3000 Wh | 4000 Wh | 5000 Wh | 6000 Wh | 7000 Wh | 8000 Wh | 9000 Wh | 10000 Wh |
| Leistung PV-Anlage | 1 kWp  | 16,47             | 17,31   | 17,33   | 17,33   | 17,33   | 17,33   | 17,33   | 17,33   | 17,33   | 17,33   | 17,33    |
|                    | 2 kWp  | 24,58             | 27,81   | 30,13   | 31,88   | 33,17   | 34,03   | 34,41   | 34,54   | 34,60   | 34,63   | 34,64    |
|                    | 3 kWp  | 29,11             | 33,30   | 36,52   | 39,32   | 41,85   | 43,96   | 45,31   | 46,07   | 46,60   | 47,05   | 47,45    |
|                    | 4 kWp  | 32,16             | 36,85   | 40,70   | 44,07   | 47,22   | 49,89   | 51,66   | 52,84   | 53,62   | 54,18   | 54,63    |
|                    | 5 kWp  | 34,45             | 39,36   | 43,61   | 47,53   | 51,10   | 53,92   | 55,84   | 57,12   | 58,05   | 58,77   | 59,29    |
|                    | 6 kWp  | 36,24             | 41,32   | 45,76   | 50,02   | 53,96   | 57,01   | 58,94   | 60,28   | 61,25   | 61,93   | 62,50    |
|                    | 7 kWp  | 37,68             | 42,93   | 47,52   | 51,91   | 56,11   | 59,26   | 61,36   | 62,75   | 63,71   | 64,40   | 65,00    |
|                    | 8 kWp  | 38,85             | 44,26   | 49,01   | 53,53   | 57,80   | 61,04   | 63,25   | 64,71   | 65,72   | 66,43   | 67,02    |
|                    | 9 kWp  | 39,83             | 45,40   | 50,28   | 54,92   | 59,28   | 62,47   | 64,77   | 66,40   | 67,44   | 68,18   | 68,78    |
|                    | 10 kWp | 40,68             | 46,37   | 51,38   | 56,15   | 60,55   | 63,75   | 66,03   | 67,73   | 68,92   | 69,74   | 70,35    |
|                    | 11 kWp | 41,42             | 47,22   | 52,36   | 57,24   | 61,67   | 64,88   | 67,21   | 68,88   | 70,14   | 71,04   | 71,67    |
|                    | 12 kWp | 42,07             | 47,96   | 53,21   | 58,21   | 62,70   | 65,91   | 68,26   | 69,97   | 71,21   | 72,13   | 72,82    |
|                    | 13 kWp | 42,66             | 48,62   | 53,97   | 59,07   | 63,63   | 66,89   | 69,25   | 70,96   | 72,22   | 73,12   | 73,82    |
|                    | 14 kWp | 43,17             | 49,19   | 54,64   | 59,84   | 64,46   | 67,73   | 70,14   | 71,90   | 73,15   | 74,06   | 74,70    |
|                    | 15 kWp | 43,63             | 49,69   | 55,24   | 60,52   | 65,19   | 68,53   | 70,99   | 72,76   | 74,03   | 74,89   | 75,54    |
|                    | 16 kWp | 44,05             | 50,15   | 55,78   | 61,13   | 65,86   | 69,26   | 71,79   | 73,58   | 74,84   | 75,67   | 76,33    |
|                    | 17 kWp | 44,43             | 50,56   | 56,27   | 61,65   | 66,47   | 69,86   | 72,50   | 74,32   | 75,56   | 76,40   | 77,06    |
|                    | 18 kWp | 44,79             | 50,95   | 56,71   | 62,19   | 66,99   | 70,48   | 73,12   | 74,99   | 76,23   | 77,08   | 77,74    |
|                    | 19 kWp | 45,11             | 51,30   | 57,09   | 62,66   | 67,47   | 71,01   | 73,66   | 75,56   | 76,87   | 77,72   | 78,39    |
|                    | 20 kWp | 45,40             | 51,63   | 57,44   | 63,09   | 67,91   | 71,46   | 74,16   | 76,08   | 77,45   | 78,33   | 79,01    |

In Tabelle 3 ist erkennbar, dass die Autarkie mit zunehmender Speicherkapazität steigt. Bei der kleinen Anlage mit 1 kWp wird deutlich, dass die Autarkie schon ab einer Speichergröße von 2.000 Wh nicht mehr gesteigert werden kann. Die Steigerung der Autarkie bei einer 20 kWp PV-Anlage und einer Speichergröße von 10.000 Wh beträgt 74 %. Im Vergleich zu Kapitel 3.3 fällt die Steigerung der Autarkie mit Elektroauto und Speicher geringer aus und weist auch absolut geringere Werte auf.

### 3.5 EFH mit PV-Anlage, E-Auto, Speicher und flexibler Laderegulung

Im Folgenden wird die Autarkie eines Einfamilienhauses mit einer PV-Anlage, einem Speicher, einem E-Auto und einer flexiblen Laderegulung dargestellt. Der Verbrauch des Haushaltes wird mit 4000 kWh ohne Elektroauto angenommen, die PV-Anlage hat eine Leistung zwischen 1 und 20 kWp, der Speicher hat eine Kapazität von 1 bis 10.000 kWh. Die Lademenge des Elektroautos wird täglich mit 4,405 kWh angenommen, wie bereits in Kapitel 2.3 aufgezeigt, was einer täglichen Fahrleistung von ca. 25 km pro Tag entspricht. Die erzeugte PV-Leistung wird als erstes für den Verbrauch des Haushaltes verwendet, die überschüssige Energie aus der Erzeugung und Verbrauch wird in den Speicher eingespeichert und die wiederum davon überschüssige Energie wird in das Elektroauto gespeist. Reicht die Energie

am Ende des Tages nicht für das Elektroauto aus, wird der Rest der benötigten Energie aus dem Stromnetz bezogen. Die Rechnungen sind in der Exceldatei „06 Autarkie PV EAuto Speicher flexible Laderegulung“ zu finden, die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

*Tabelle 4: Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher und vorhandenen E-Auto mit flexibler Laderegulung*

Autarkiegrad in % bei Benutzung von PV-Anlage mit Speicher, E-Auto und flexibler Laderegulung (bei Verbrauch des Haushaltes von 4000 kWh/a)

|                    |        | Speicherkapazität |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
|--------------------|--------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                    |        | 0 Wh              | 1000 Wh | 2000 Wh | 3000 Wh | 4000 Wh | 5000 Wh | 6000 Wh | 7000 Wh | 8000 Wh | 9000 Wh | 10000 Wh |
| Leistung PV-Anlage | 1 kWp  | 17,33%            | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%  | 17,33%   |
|                    | 2 kWp  | 31,26%            | 32,60%  | 33,54%  | 34,21%  | 34,39%  | 34,42%  | 34,43%  | 34,43%  | 34,43%  | 34,43%  | 34,43%   |
|                    | 3 kWp  | 37,96%            | 40,53%  | 42,77%  | 44,71%  | 45,62%  | 46,05%  | 46,29%  | 46,45%  | 46,57%  | 46,65%  | 46,73%   |
|                    | 4 kWp  | 42,02%            | 45,27%  | 48,23%  | 50,82%  | 52,09%  | 52,81%  | 53,20%  | 53,45%  | 53,66%  | 53,89%  | 54,06%   |
|                    | 5 kWp  | 44,87%            | 48,54%  | 51,93%  | 54,90%  | 56,44%  | 57,35%  | 57,83%  | 58,12%  | 58,30%  | 58,45%  | 58,60%   |
|                    | 6 kWp  | 46,97%            | 50,99%  | 54,72%  | 57,92%  | 59,58%  | 60,64%  | 61,23%  | 61,63%  | 61,95%  | 62,19%  | 62,35%   |
|                    | 7 kWp  | 48,58%            | 52,87%  | 56,88%  | 60,27%  | 62,08%  | 63,24%  | 63,89%  | 64,30%  | 64,60%  | 64,83%  | 65,03%   |
|                    | 8 kWp  | 49,91%            | 54,35%  | 58,61%  | 62,15%  | 64,11%  | 65,34%  | 66,03%  | 66,42%  | 66,72%  | 66,94%  | 67,10%   |
|                    | 9 kWp  | 51,06%            | 55,61%  | 60,00%  | 63,69%  | 65,82%  | 67,16%  | 67,90%  | 68,24%  | 68,50%  | 68,72%  | 68,90%   |
|                    | 10 kWp | 52,09%            | 56,73%  | 61,21%  | 64,96%  | 67,22%  | 68,68%  | 69,50%  | 69,86%  | 70,10%  | 70,29%  | 70,48%   |
|                    | 11 kWp | 53,02%            | 57,74%  | 62,30%  | 66,08%  | 68,38%  | 69,93%  | 70,80%  | 71,20%  | 71,46%  | 71,67%  | 71,85%   |
|                    | 12 kWp | 53,85%            | 58,65%  | 63,29%  | 67,10%  | 69,44%  | 70,97%  | 71,88%  | 72,35%  | 72,67%  | 72,89%  | 73,09%   |
|                    | 13 kWp | 54,59%            | 59,51%  | 64,20%  | 68,03%  | 70,41%  | 71,93%  | 72,85%  | 73,37%  | 73,75%  | 74,01%  | 74,20%   |
|                    | 14 kWp | 55,23%            | 60,27%  | 65,06%  | 68,92%  | 71,30%  | 72,86%  | 73,77%  | 74,28%  | 74,69%  | 74,98%  | 75,20%   |
|                    | 15 kWp | 55,79%            | 60,95%  | 65,84%  | 69,73%  | 72,16%  | 73,71%  | 74,65%  | 75,18%  | 75,54%  | 75,84%  | 76,07%   |
|                    | 16 kWp | 56,27%            | 61,53%  | 66,54%  | 70,49%  | 72,94%  | 74,55%  | 75,49%  | 76,01%  | 76,39%  | 76,66%  | 76,90%   |
|                    | 17 kWp | 56,72%            | 62,05%  | 67,15%  | 71,19%  | 73,69%  | 75,31%  | 76,30%  | 76,81%  | 77,19%  | 77,46%  | 77,69%   |
|                    | 18 kWp | 57,14%            | 62,52%  | 67,71%  | 71,81%  | 74,38%  | 76,05%  | 77,04%  | 77,60%  | 77,95%  | 78,22%  | 78,46%   |
|                    | 19 kWp | 57,54%            | 62,94%  | 68,20%  | 72,35%  | 75,01%  | 76,74%  | 77,75%  | 78,32%  | 78,68%  | 78,94%  | 79,18%   |
|                    | 20 kWp | 57,90%            | 63,35%  | 68,64%  | 72,85%  | 75,56%  | 77,37%  | 78,44%  | 79,01%  | 79,39%  | 79,65%  | 79,89%   |

Die obige Tabelle belegt, dass die Autarkie vor allem in den Bereich mit kleinem oder keinem Speicher deutlich gesteigert werden kann. So steigert sich die Autarkie bei einer Anlage von 20 kWp und keinem Speicher um 28 % gegenüber einem System ohne flexible Laderegulung, wie in Kapitel 3.4. Bei einer sehr kleinen PVA mit 1 kWp ist dagegen ab einem Speicher von 2000 Wh keine Steigerung zu verzeichnen.

### 3.6 Autarkiebetrachtung der verschiedenen Szenarien

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Szenarien aus Kapitel 3.1 bis 3.5 miteinander verglichen. Die Größe des Speichers, wenn vorhanden, wurde auf 6.000 Wh festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 zu betrachten.

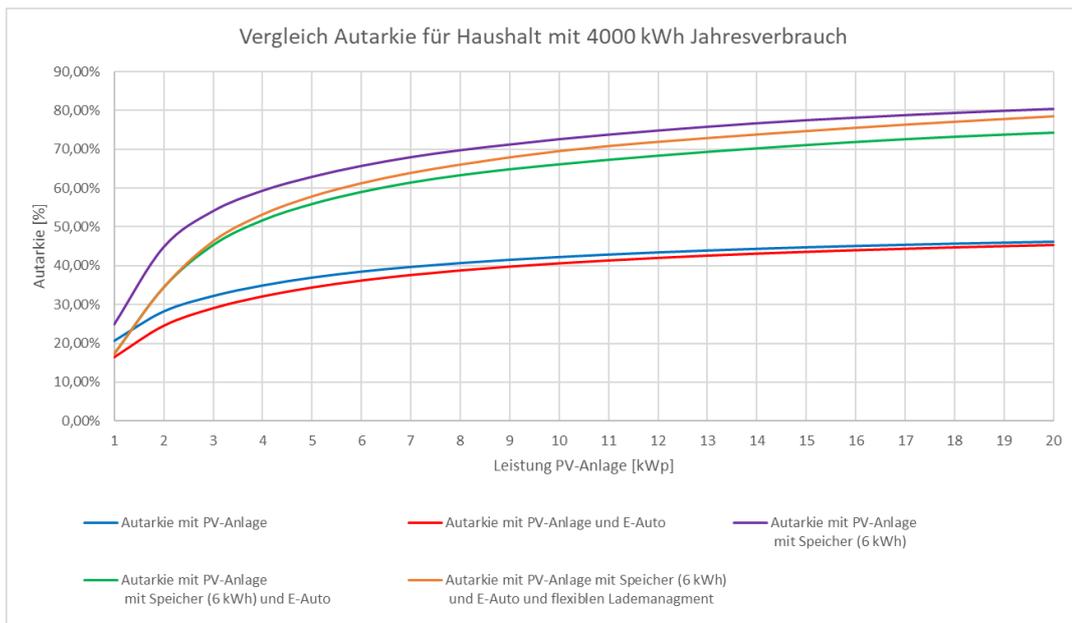


Abbildung 17: Vergleich Autarkie für Haushalt mit 4000 kWh Jahresverbrauch

Der Vergleich aller Szenarien (Abbildung 17) zeigt auf, dass mit zunehmender Größe der PV-Anlage die Autarkie in allen Szenarien gesteigert werden kann. Die Autarkie ist in den Fällen mit Speicher deutlich höher als in den Szenarien ohne Speicher. Ein Elektroauto verschlechtert die Autarkie, was durch den höheren Verbrauch zurückzuführen ist. Eine flexible Laderegelung steigert die Autarkie.

## 4 Ökonomische Betrachtung

Die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien aus Kapitel 3 werden nun unter dem Blickwinkel untersucht, welchen Nutzen die Steigerung der Autarkie aus ökonomischer Hinsicht bringt. Grundlage für die Berechnungen bilden die Ergebnisse der Verbrauchs-, Einspeise-, Eigenverbrauchs- und Autarkiewerte aus Kapitel 3. Verwendete Methode ist die Kapitalwertmethode, welche im folgenden Kapitel zunächst vorgestellt wird.

### 4.1 Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode ist ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung, da sie die zeitliche Komponente der Zahlungsflüsse per exponentieller Verzinsung berücksichtigt (23, S. 402). Der Kapitalwert versteht sich als abgezinster Wert sämtlicher Zahlungen und Rückflüsse der Investition mit Hilfe des Kalkulationszins auf den Planungszeitpunkt. Ein positiver Kapitalwert bedeutet, dass die Investition vorteilhaft ist, ein negativer Kapitalwert, dass die Investition sich eher vermögensmindernd auswirkt. Werden mehrere Investitionsprojekte miteinander verglichen, so ist die vorteilhafteste Investition, welche den höchsten positiven Kapitalwert hat. (23, S. 399).

$$C_0 = \sum_{t=0}^T \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

mit:

$C_0$ : Kapitalwert

t: Zeitpunkt

$R_t$ : Saldo der Ein- und Auszahlungen

i: Kalkulationszins

## 4.2 EFH mit PV-Anlage

Grundlage für die Berechnungen der Kosten sind die Investitions- und Betriebskosten für PV-Anlagen aus Kapitel 2.1. Die Werte der Autarkiegrade sind abhängig von der Anlagengröße, Grundlage bilden die Berechnungen aus Kapitel 3. Der interne Zinssatz wurde mit 2 % angenommen. Die Berechnungen können der Exceldatei „07 Kosten PVA“ entnommen werden. Die Ergebnisse der Kapitalwerte in Abhängigkeit zur Autarkie sind in Abbildung 18 dargestellt.

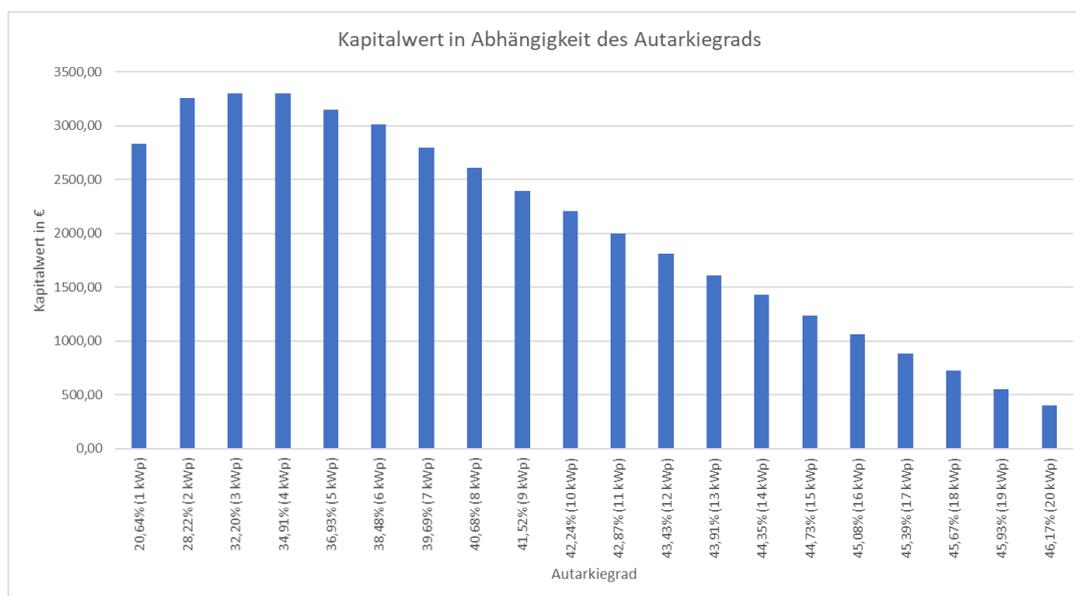


Abbildung 18: Kapitalwert in Abhängigkeit des Autarkiegrads

Abbildung 18 zeigt, dass der Kapitalwert bei zunehmender Autarkie zunächst steigt, bei einem Autarkiegrad zwischen 28 % und 35 % am höchsten ist und ab einer Autarkie von 37 % wieder sinkt.

## 4.3 EFH mit PV-Anlage und E-Auto

Wie aus Kapitel 2.2 ersichtlich, ist Renault in Deutschland der führende Hersteller an Elektro-PKWs, weshalb beispielhaft die Kosten eines Elektroautos am Beispiel des Renault „Zoe INTENS R135 Z.E. 50“ berechnet werden. Die Investitionskosten belaufen sich auf 27.196,64 €, die Betriebskosten setzen sich aus 985,56 € für die Batteriemiete (24) und 744 € für Versicherungsleistungen (25) zusammen, die Steuern betragen für die ersten 10 Jahre 0 €, danach belaufen sie sich auf 56 € (24).

Der Jahresverbrauch für das Elektroauto wird nach den Berechnungen für die Autarkie mit 1608 kWh angenommen, was bei einem Verbrauch von 17,7 kWh auf 100 km, einer Jahresfahrleistung von 9.085 km pro Jahr entspricht. Da bei einem Haushalt mit Elektroauto das Verbrennerauto wegfällt, wurden die Kosten dafür als Gewinn betrachtet. Die Investitionskosten für ein Verbrennerauto wurden auf 24.000 € festgelegt (26), die Betriebskosten wurden mit 876 € für Versicherung (27), 78 € für Steuern (26) und 689,26 € für Benzinkosten im Jahre festgelegt und beziehen sich auf einen VW Golf. Die Berechnungen finden sich in der Exceldatei „08 Kosten PVA Elektroauto“ wieder, die Ergebnisse sind in Abbildung 19 dargestellt. Der interne Zinssatz wird auf 2 % festgesetzt.

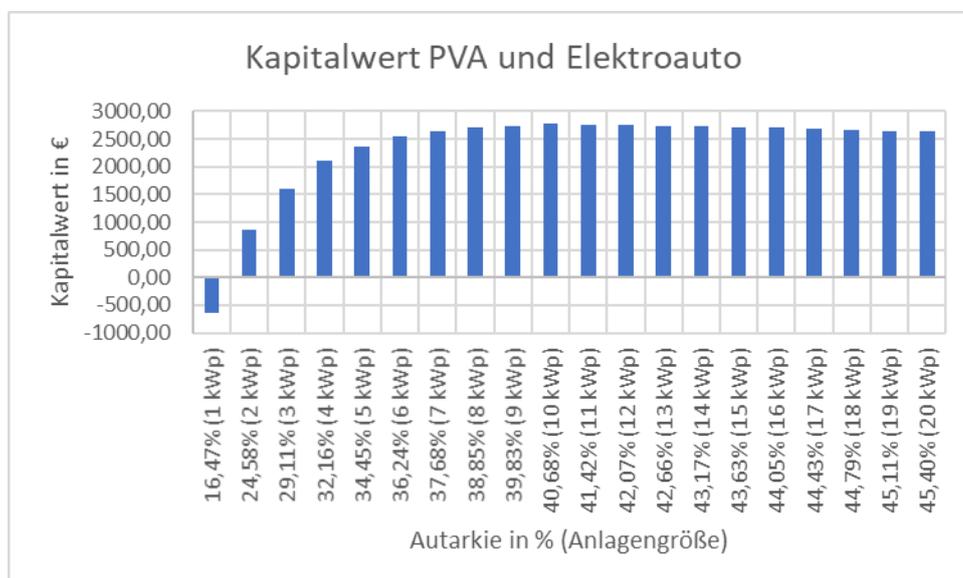


Abbildung 19: Kapitalwerte für Einfamilienhaus mit PV-Anlage und E-Auto

Die Berechnung der Kapitalwerte in Abbildung 19 zeigt auf, dass eine kleine PV-Anlage von 1 kWp in Verbindung mit einem E-Auto nicht wirtschaftlich ist. Ab einer PV-Anlagengröße von 2 kWp wird das System aus PVA und E-Auto wirtschaftlich, wobei ein E-Auto in Verbindung mit einer 10 kWp PV-Anlage den größten Kapitalwert aufweist.

## 4.4 EFH mit PV-Anlage und Speicher, ohne E-Auto

Tabelle 5: Kapitalwert PVA mit Speicher

|        | 0 kWh    |             | 1 kWh    |             | 2 kWh    |             | 3 kWh    |             | 4 kWh    |             | 5 kWh    |             | 6 kWh    |             | 7 kWh    |              | 8 kWh    |              | 9 kWh    |              | 10 kWh   |              |
|--------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
|        | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  |
| 1 kWp  | 20,64%   | 3.355,12 €  | 23,48%   | 2.236,78 €  | 24,64%   | 774,56 €    | 24,85%   | 882,39 €    | 24,85%   | 2.582,39 €  | 24,85%   | 4.282,39 €  | 24,85%   | 3.582,39 €  | 24,85%   | - 6.182,39 € | 24,85%   | - 7.482,39 € | 24,85%   | - 4.035,58 € | 24,85%   | - 8.782,39 € |
| 2 kWp  | 28,22%   | 4.031,57 €  | 33,70%   | 3.455,45 €  | 37,75%   | 2.585,64 €  | 41,17%   | 1.586,69 €  | 43,22%   | 306,91 €    | 44,14%   | 1.204,50 €  | 44,75%   | 379,46 €    | 45,22%   | - 1.583,12 € | 45,64%   | - 2.797,02 € | 45,94%   | - 4.035,58 € | 46,20%   | - 5.282,23 € |
| 3 kWp  | 32,20%   | 4.257,19 €  | 38,68%   | 3.886,21 €  | 44,02%   | 3.280,84 €  | 48,66%   | 2.531,97 €  | 51,41%   | 1.395,68 €  | 53,07%   | 35,96 €     | 54,03%   | 932,74 €    | 54,69%   | 231,97 €     | 55,21%   | - 1.425,37 € | 55,69%   | - 2.626,98 € | 56,05%   | - 3.853,19 € |
| 4 kWp  | 34,91%   | 4.414,14 €  | 41,81%   | 4.128,57 €  | 47,84%   | 3.664,64 €  | 53,21%   | 3.065,41 €  | 56,21%   | 1.980,37 €  | 58,10%   | 667,79 €    | 59,27%   | 1.607,62 €  | 60,08%   | 473,66 €     | 60,76%   | - 686,95 €   | 61,25%   | - 1.886,51 € | 61,68%   | - 3.098,36 € |
| 5 kWp  | 36,93%   | 4.402,37 €  | 44,16%   | 4.183,70 €  | 50,56%   | 3.795,61 €  | 56,27%   | 3.266,08 €  | 59,57%   | 2.242,53 €  | 61,61%   | 960,70 €    | 63,85%   | 1.911,88 €  | 63,74%   | 797,32 €     | 64,45%   | - 357,14 €   | 65,09%   | - 1.525,95 € | 65,62%   | - 2.717,31 € |
| 6 kWp  | 38,48%   | 4.395,34 €  | 45,98%   | 4.233,74 €  | 52,66%   | 3.903,04 €  | 58,51%   | 3.402,21 €  | 62,03%   | 2.423,76 €  | 64,37%   | 1.203,43 €  | 65,66%   | 2.167,86 €  | 66,54%   | 1.046,25 €   | 67,34%   | 11,27 €      | 67,81%   | - 1.291,42 € | 68,21%   | - 2.595,43 € |
| 7 kWp  | 39,69%   | 4.307,50 €  | 47,47%   | 4.201,59 €  | 54,38%   | 3.918,04 €  | 60,31%   | 3.433,61 €  | 63,93%   | 2.475,65 €  | 66,40%   | 1.281,97 €  | 67,91%   | 2.291,50 €  | 68,80%   | 1.173,93 €   | 69,47%   | 11,27 €      | 69,98%   | - 1.184,18 € | 70,41%   | - 2.395,04 € |
| 8 kWp  | 40,68%   | 4.242,04 €  | 48,71%   | 4.188,00 €  | 55,83%   | 3.947,50 €  | 61,84%   | 3.479,47 €  | 65,55%   | 2.539,96 €  | 68,06%   | 1.354,48 €  | 69,70%   | 2.390,65 €  | 70,66%   | 1.287,44 €   | 71,33%   | 124,78 €     | 71,83%   | - 1.072,73 € | 72,20%   | - 2.296,88 € |
| 9 kWp  | 41,52%   | 4.142,37 €  | 49,73%   | 4.125,83 €  | 57,07%   | 3.930,42 €  | 63,18%   | 3.482,89 €  | 66,96%   | 2.557,73 €  | 69,53%   | 1.384,55 €  | 71,17%   | 2.420,72 €  | 71,88%   | 1.327,76 €   | 72,91%   | 177,40 €     | 73,43%   | - 1.016,01 € | 73,85%   | - 2.229,92 € |
| 10 kWp | 42,24%   | 4.073,10 €  | 50,62%   | 4.090,53 €  | 58,14%   | 3.932,02 €  | 64,35%   | 3.504,98 €  | 68,23%   | 2.609,33 €  | 70,85%   | 1.437,39 €  | 72,53%   | 2.481,77 €  | 73,48%   | 1.376,50 €   | 74,22%   | 228,19 €     | 74,80%   | - 952,92 €   | 75,25%   | - 2.160,67 € |
| 11 kWp | 42,87%   | 3.974,60 €  | 51,38%   | 4.018,11 €  | 59,04%   | 3.888,30 €  | 65,40%   | 3.492,01 €  | 69,39%   | 2.609,90 €  | 72,07%   | 1.459,26 €  | 73,71%   | 2.495,44 €  | 74,62%   | 1.390,18 €   | 75,39%   | 239,82 €     | 75,96%   | - 943,34 €   | 76,48%   | - 2.136,75 € |
| 12 kWp | 43,43%   | 3.901,33 €  | 52,01%   | 3.960,93 €  | 59,84%   | 3.865,97 €  | 66,27%   | 3.484,02 €  | 70,39%   | 2.628,57 €  | 73,13%   | 1.490,23 €  | 74,76%   | 2.524,35 €  | 75,72%   | 1.421,14 €   | 76,49%   | 278,98 €     | 77,06%   | - 904,18 €   | 77,60%   | - 2.093,49 € |
| 13 kWp | 43,91%   | 3.811,60 €  | 52,57%   | 3.885,91 €  | 60,55%   | 3.821,69 €  | 67,02%   | 3.447,95 €  | 71,25%   | 2.615,04 €  | 74,06%   | 1.491,05 €  | 75,74%   | 2.535,43 €  | 76,73%   | 1.438,36 €   | 77,49%   | 294,15 €     | 78,13%   | - 874,66 €   | 78,65%   | - 2.068,07 € |
| 14 kWp | 44,35%   | 3.745,89 €  | 53,06%   | 3.831,44 €  | 61,18%   | 3.795,93 €  | 67,69%   | 3.430,38 €  | 71,96%   | 2.605,67 €  | 74,89%   | 1.506,28 €  | 76,64%   | 2.565,01 €  | 77,63%   | 1.467,94 €   | 78,42%   | 329,88 €     | 79,03%   | - 845,08 €   | 79,56%   | - 2.036,44 € |
| 15 kWp | 44,73%   | 3.661,16 €  | 53,50%   | 3.759,00 €  | 61,74%   | 3.747,08 €  | 68,30%   | 3.391,79 €  | 72,60%   | 2.573,23 €  | 75,57%   | 1.482,04 €  | 77,43%   | 2.563,31 €  | 78,47%   | 1.476,50 €   | 79,20%   | 326,14 €     | 79,80%   | - 850,87 €   | 80,31%   | - 2.046,33 € |
| 16 kWp | 45,08%   | 3.597,13 €  | 53,90%   | 3.705,45 €  | 62,20%   | 3.706,83 €  | 68,85%   | 3.369,99 €  | 73,18%   | 2.557,58 €  | 76,19%   | 1.474,58 €  | 78,09%   | 2.568,06 €  | 79,18%   | 1.487,49 €   | 79,99%   | 341,23 €     | 80,49%   | - 843,98 €   | 80,98%   | - 2.043,54 € |
| 17 kWp | 45,39%   | 3.526,07 €  | 54,28%   | 3.648,22 €  | 62,61%   | 3.655,75 €  | 69,36%   | 3.339,40 €  | 73,71%   | 2.531,09 €  | 76,76%   | 1.456,30 €  | 78,72%   | 2.558,07 €  | 79,83%   | 1.485,60 €   | 80,59%   | 341,39 €     | 81,11%   | - 852,02 €   | 81,59%   | - 2.053,62 € |
| 18 kWp | 45,67%   | 3.474,75 €  | 54,62%   | 3.608,38 €  | 62,99%   | 3.624,11 €  | 69,82%   | 3.324,17 €  | 74,20%   | 2.522,00 €  | 77,29%   | 1.455,41 €  | 79,30%   | 2.567,43 €  | 80,45%   | 1.503,16 €   | 81,19%   | 354,85 €     | 81,71%   | - 838,55 €   | 82,19%   | - 2.040,16 € |
| 19 kWp | 45,93%   | 3.410,88 €  | 54,93%   | 3.554,83 €  | 63,34%   | 3.578,76 €  | 70,21%   | 3.287,02 €  | 74,67%   | 2.501,25 €  | 77,78%   | 1.438,76 €  | 79,84%   | 2.561,03 €  | 81,02%   | 1.502,91 €   | 81,77%   | 356,65 €     | 82,29%   | - 836,76 €   | 82,78%   | - 2.036,31 € |
| 20 kWp | 46,17%   | 3.364,56 €  | 55,22%   | 3.519,29 €  | 63,67%   | 3.551,42 €  | 70,54%   | 3.259,67 €  | 75,10%   | 2.494,41 €  | 78,25%   | 1.440,11 €  | 80,32%   | 2.564,44 €  | 81,55%   | 1.516,57 €   | 82,31%   | 372,36 €     | 82,83%   | - 821,05 €   | 83,30%   | - 2.024,71 € |

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse für den Kapitalwert für eine PV-Anlage mit Speicher aufgeführt. Der zu betrachtende Zeitraum liegt zur Vereinfachung bei 20 Jahren, der interne Zinssatz wurde mit 2 % angenommen. Kapazitätsverluste werden bei den Speichern nicht berücksichtigt. Die genannten Rechnungen sind in der Excel-datei „09 Kosten PVA mit Speicher“ zu finden. Es ist erkennbar, dass ein Speicher die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einer Anlage ohne Speicher verschlechtert. Bei einer Speichergröße ab 9 kWh treten sogar negative Kapitalwerte auf. Wie in Kapitel 3.3 bereits belegt, steigt mit zunehmender Speichergröße die Autarkie. So ist bei einer Speichergröße von 6 kWh und einer PVA von 20 kWp zwar der Kapitalwert um 31 % niedriger, die Autarkie wurde aber um 73% gegenüber einer Anlage ohne Speicher gesteigert.

## 4.5 EFH mit PV-Anlage, E-Auto und Speicher

Tabelle 6: Kapitalwert mit PVA, E-Auto und Speicher

|        | 0 kWh    |             | 1 kWh    |             | 2 kWh    |             | 3 kWh    |             | 4 kWh    |             | 5 kWh    |             | 6 kWh    |              | 7 kWh    |              | 8 kWh    |              | 9 kWh    |              | 10 kWh   |              |
|--------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
|        | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  |
| 1 kWp  | 16,47%   | -641,72 €   | 17,33%   | -2.094,75 € | 17,33%   | -3.789,50 € | 17,33%   | -5.489,23 € | 17,33%   | -7.189,23 € | 17,33%   | -8.889,50 € | 17,33%   | -10.589,23 € | 17,33%   | -12.289,23 € | 17,33%   | -13.989,23 € | 17,33%   | -15.689,23 € | 17,33%   | -17.389,23 € |
| 2 kWp  | 24,58%   | 866,41 €    | 31,88%   | 116,06 €    | 30,13%   | -901,84 €   | 31,88%   | -2.087,32 € | 33,17%   | -3.408,03 € | 34,03%   | -4.889,50 € | 34,41%   | -6.389,23 €  | 34,54%   | -7.969,23 €  | 34,60%   | -9.549,23 €  | 34,63%   | -11.129,23 € | 34,63%   | -12.709,23 € |
| 3 kWp  | 29,11%   | 1.608,21 €  | 33,30%   | 1.140,11 €  | 36,52%   | 386,82 €    | 39,32%   | 489,96 €    | 41,85%   | 1.446,11 €  | 43,96%   | 2.525,75 €  | 45,31%   | 4.043,48 €   | 46,07%   | 5.623,21 €   | 46,60%   | 7.201,66 €   | 47,05%   | 8.770,01 €   | 47,45%   | 10.338,36 €  |
| 4 kWp  | 32,16%   | 2.105,69 €  | 36,85%   | 1.784,60 €  | 40,70%   | 2.116,53 €  | 44,07%   | 507,34 €    | 47,22%   | 2.665,53 €  | 49,89%   | 4.181,52 €  | 51,66%   | 5.756,50 €   | 52,84%   | 7.347,47 €   | 53,62%   | 9.938,44 €   | 54,18%   | 12.520,41 €  | 54,63%   | 15.093,38 €  |
| 5 kWp  | 34,45%   | 2.352,39 €  | 39,36%   | 2.095,97 €  | 43,61%   | 1.645,51 €  | 47,53%   | 1.098,03 €  | 51,10%   | 447,64 €    | 53,92%   | 423,25 €    | 55,84%   | 841,25 €     | 57,12%   | 1.624,26 €   | 58,05%   | 3.209,27 €   | 58,77%   | 5.779,30 €   | 59,29%   | 9.349,33 €   |
| 6 kWp  | 36,24%   | 2.555,63 €  | 41,32%   | 2.349,19 €  | 45,76%   | 1.954,60 €  | 50,02%   | 1.507,08 €  | 53,96%   | 965,47 €    | 57,01%   | 162,20 €    | 58,94%   | 1.429,64 €   | 60,28%   | 3.052,65 €   | 61,25%   | 4.545,68 €   | 61,93%   | 6.061,71 €   | 62,50%   | 8.571,74 €   |
| 7 kWp  | 37,68%   | 2.641,42 €  | 42,93%   | 2.484,97 €  | 47,52%   | 2.134,47 €  | 51,91%   | 1.725,17 €  | 56,11%   | 1.260,01 €  | 59,26%   | 486,14 €    | 61,36%   | 1.803,56 €   | 62,75%   | 3.292,64 €   | 63,71%   | 4.522,67 €   | 64,40%   | 6.002,70 €   | 65,00%   | 7.922,76 €   |
| 8 kWp  | 38,85%   | 2.717,64 €  | 44,26%   | 2.608,23 €  | 49,01%   | 2.304,78 €  | 53,53%   | 1.933,70 €  | 57,80%   | 1.489,12 €  | 61,04%   | 741,71 €    | 63,25%   | 2.091,47 €   | 64,71%   | 3.367,63 €   | 65,72%   | 4.342,64 €   | 66,43%   | 5.752,69 €   | 67,02%   | 7.002,76 €   |
| 9 kWp  | 39,83%   | 2.734,51 €  | 45,40%   | 2.672,15 €  | 50,28%   | 2.406,91 €  | 54,92%   | 2.071,11 €  | 59,28%   | 1.653,00 €  | 62,47%   | 890,89 €    | 64,77%   | 2.267,11 €   | 66,40%   | 3.442,64 €   | 67,44%   | 4.262,64 €   | 68,18%   | 5.112,64 €   | 68,78%   | 6.002,76 €   |
| 10 kWp | 40,68%   | 2.766,68 €  | 46,37%   | 2.739,60 €  | 51,38%   | 2.512,58 €  | 56,15%   | 2.215,01 €  | 60,55%   | 1.808,65 €  | 63,75%   | 1.049,48 €  | 66,03%   | 2.419,82 €   | 67,73%   | 3.522,64 €   | 68,92%   | 4.392,64 €   | 69,74%   | 5.262,64 €   | 70,35%   | 6.002,76 €   |
| 11 kWp | 41,42%   | 2.756,04 €  | 47,22%   | 2.761,30 €  | 52,36%   | 2.572,50 €  | 57,24%   | 2.207,27 €  | 61,67%   | 1.909,73 €  | 64,88%   | 1.153,50 €  | 67,21%   | 2.538,54 €   | 68,88%   | 3.602,64 €   | 70,14%   | 4.482,64 €   | 71,04%   | 5.412,64 €   | 72,02%   | 6.002,76 €   |
| 12 kWp | 42,07%   | 2.760,83 €  | 47,96%   | 2.792,82 €  | 53,21%   | 2.636,09 €  | 58,21%   | 2.406,14 €  | 62,70%   | 2.026,24 €  | 65,91%   | 1.270,01 €  | 68,26%   | 2.660,93 €   | 69,97%   | 3.692,64 €   | 71,21%   | 4.572,64 €   | 72,13%   | 5.502,64 €   | 73,22%   | 6.002,76 €   |
| 13 kWp | 42,66%   | 2.744,48 €  | 48,62%   | 2.796,77 €  | 53,97%   | 2.669,72 €  | 59,07%   | 2.469,17 €  | 63,63%   | 2.109,85 €  | 66,89%   | 1.368,33 €  | 69,25%   | 2.762,19 €   | 70,96%   | 3.782,64 €   | 72,22%   | 4.662,64 €   | 73,12%   | 5.592,64 €   | 74,06%   | 6.002,76 €   |
| 14 kWp | 43,17%   | 2.739,52 €  | 49,19%   | 2.809,45 €  | 54,64%   | 2.711,80 €  | 59,84%   | 2.540,65 €  | 64,46%   | 2.198,98 €  | 67,73%   | 1.460,39 €  | 70,14%   | 2.868,95 €   | 71,90%   | 3.872,64 €   | 73,15%   | 4.752,64 €   | 74,06%   | 5.682,64 €   | 75,04%   | 6.002,76 €   |
| 15 kWp | 43,63%   | 2.711,13 €  | 49,69%   | 2.792,82 €  | 55,24%   | 2.724,58 €  | 60,52%   | 2.576,94 €  | 65,19%   | 2.249,97 €  | 68,53%   | 1.531,96 €  | 70,99%   | 2.952,22 €   | 72,76%   | 3.962,64 €   | 74,03%   | 4.842,64 €   | 74,89%   | 5.772,64 €   | 75,44%   | 6.002,76 €   |
| 16 kWp | 44,05%   | 2.700,06 €  | 50,15%   | 2.793,52 €  | 55,78%   | 2.748,79 €  | 61,13%   | 2.621,74 €  | 65,86%   | 2.312,41 €  | 69,26%   | 1.612,04 €  | 71,79%   | 3.055,88 €   | 73,58%   | 4.052,64 €   | 74,84%   | 4.932,64 €   | 75,67%   | 5.862,64 €   | 76,33%   | 6.002,76 €   |
| 17 kWp | 44,43%   | 2.676,66 €  | 50,56%   | 2.778,94 €  | 56,27%   | 2.757,73 €  | 61,65%   | 2.639,50 €  | 66,47%   | 2.356,63 €  | 69,86%   | 1.653,32 €  | 72,50%   | 3.129,50 €   | 74,32%   | 4.142,64 €   | 75,56%   | 5.022,64 €   | 76,40%   | 5.952,64 €   | 77,08%   | 6.002,76 €   |
| 18 kWp | 44,79%   | 2.672,97 €  | 50,95%   | 2.784,07 €  | 56,71%   | 2.777,56 €  | 62,19%   | 2.688,74 €  | 66,99%   | 2.399,98 €  | 70,48%   | 1.726,07 €  | 73,12%   | 3.202,26 €   | 74,99%   | 4.252,64 €   | 76,23%   | 5.112,64 €   | 77,08%   | 6.002,76 €   | 77,44%   | 6.002,76 €   |
| 19 kWp | 45,11%   | 2.649,96 €  | 51,30%   | 2.769,88 €  | 57,09%   | 2.777,19 €  | 62,66%   | 2.709,83 €  | 67,47%   | 2.424,01 €  | 71,01%   | 1.764,81 €  | 73,66%   | 3.243,93 €   | 75,56%   | 4.302,64 €   | 76,87%   | 5.202,64 €   | 77,72%   | 6.002,76 €   | 78,33%   | 6.002,76 €   |
| 20 kWp | 45,40%   | 2.640,24 €  | 51,63%   | 2.771,92 €  | 57,44%   | 2.780,11 €  | 63,09%   | 2.741,26 €  | 67,91%   | 2.458,39 €  | 71,46%   | 1.802,12 €  | 74,16%   | 3.295,95 €   | 76,08%   | 4.352,64 €   | 77,45%   | 5.252,64 €   | 78,33%   | 6.002,76 €   | 79,01%   | 6.002,76 €   |

Aufbauend auf Kapitel 4.4 wird der Kapitalwert für eine PV-Anlage mit Elektroauto und zusätzlichen Speicher betrachtet. Die Annahmen für die Kosten sind die gleichen wie in den Kapiteln 4.2 bis 4.4. Die Berechnungen sind in der Exceldatei „10 Kosten PVA mit Speicher und Elektroauto“ zu finden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Kapitalwert bei einer PV-Anlage mit 20 kWp und einem Speicher mit 6 kWh mit 3.295,95 € am höchsten ist und sogar noch über den Wert aus Kapitel 4.4, was durch den höheren Eigenverbrauch durch das Elektroauto zu erklären ist. Bei einer Speicherkapazität von über 6 kWh wird der Kapitalwert wieder geringer, was durch die hohen Speicherkosten erklärbar ist.

## 4.6 EFH mit PV-Anlage, E-Auto, Speicher und flexibler Laderegulung

Tabelle 7: Kapitalwert mit PVA, Speicher, E-Auto und flexibler Laderegulung

|        | 0 kWh    |             | 1 kWh    |             | 2 kWh    |             | 3 kWh    |             | 4 kWh    |             | 5 kWh    |             | 6 kWh    |              | 7 kWh    |              | 8 kWh    |              | 9 kWh    |              | 10 kWh   |              |        |              |
|--------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|--------|--------------|
|        | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  | Autarkie | Kapitalwert  |        |              |
| 1 kWp  | 17,33%   | -1.187,87 € | 17,33%   | -2.887,87 € | 17,33%   | -4.588,50 € | 17,33%   | -6.288,50 € | 17,33%   | -7.988,29 € | 17,33%   | -9.688,50 € | 17,33%   | -11.388,29 € | 17,33%   | -13.088,29 € | 17,33%   | -14.788,29 € | 17,33%   | -16.488,29 € | 17,33%   | -18.188,29 € | 17,33% | -19.888,29 € |
| 2 kWp  | 31,26%   | 2.031,39 €  | 32,60%   | 725,36 €    | 33,54%   | -698,27 €   | 34,21%   | -2.201,28 € | 34,39%   | -3.848,36 € | 34,43%   | -5.539,54 € | 34,43%   | -7.436,60 €  | 34,43%   | -9.524,86 €  | 34,43%   | -11.808,12 € | 34,43%   | -14.280,58 € | 34,43%   | -16.952,04 € | 34,43% | -19.864,50 € |
| 3 kWp  | 37,95%   | 3.411,19 €  | 40,53%   | 2.466,80 €  | 42,77%   | 1.425,38 €  | 44,71%   | 295,75 €    | 45,62%   | -1.136,70 € | 46,05%   | -2.710,27 € | 46,29%   | -4.396,71 €  | 46,45%   | -7.192,67 €  | 46,57%   | -10.284,05 € | 46,57%   | -13.484,38 € | 46,57%   | -16.980,50 € | 46,57% | -20.982,00 € |
| 4 kWp  | 42,02%   | 4.205,62 €  | 45,27%   | 3.461,15 €  | 48,23%   | 2.631,42 €  | 50,82%   | 1.692,91 €  | 52,09%   | 366,30 €    | 52,81%   | -1.122,01 € | 53,20%   | -3.073,55 €  | 53,45%   | -6.533,85 €  | 53,66%   | -10.247,11 € | 53,89%   | -14.184,48 € | 54,06%   | -18.404,50 € | 54,06% | -23.172,00 € |
| 5 kWp  | 44,87%   | 4.616,96 €  | 48,54%   | 3.995,98 €  | 51,83%   | 3.292,67 €  | 54,90%   | 2.465,88 €  | 56,44%   | 1.218,65 €  | 57,35%   | -213,80 €   | 57,83%   | -627,32 €    | 58,12%   | -1.587,41 €  | 58,45%   | -2.183,49 €  | 58,45%   | -3.090,39 €  | 58,60%   | -4.346,29 €  | 58,60% | -6.000,00 €  |
| 6 kWp  | 46,97%   | 4.911,35 €  | 50,95%   | 4.393,26 €  | 54,72%   | 3.789,92 €  | 57,92%   | 3.030,75 €  | 59,58%   | 1.818,81 €  | 60,64%   | 430,45 €    | 61,23%   | 1.303,92 €   | 61,63%   | 1.215,52 €   | 61,95%   | 1.084,39 €   | 62,19%   | 2.313,83 €   | 62,35%   | 3.566,79 €   | 62,35% | 5.250,00 €   |
| 7 kWp  | 48,58%   | 5.047,12 €  | 52,87%   | 4.608,42 €  | 56,88%   | 4.087,40 €  | 60,27%   | 3.384,09 €  | 62,08%   | 2.216,25 €  | 63,24%   | 857,30 €    | 63,89%   | 1.748,41 €   | 64,30%   | 568,95 €     | 64,60%   | 642,85 €     | 64,83%   | 1.875,23 €   | 65,03%   | 3.116,42 €   | 65,03% | 5.000,00 €   |
| 8 kWp  | 49,91%   | 5.170,39 €  | 54,35%   | 4.775,79 €  | 58,61%   | 4.328,27 €  | 62,15%   | 3.669,06 €  | 64,11%   | 2.545,32 €  | 65,34%   | 1.206,95 €  | 66,03%   | 2.109,82 €   | 66,42%   | 924,48 €     | 66,72%   | 667,20 €     | 66,94%   | 1.522,63 €   | 67,10%   | 2.775,59 €   | 67,10% | 4.500,00 €   |
| 9 kWp  | 51,06%   | 5.237,24 €  | 55,61%   | 4.874,98 €  | 60,00%   | 4.465,68 €  | 63,69%   | 3.850,58 €  | 65,82%   | 2.776,82 €  | 67,16%   | 1.470,79 €  | 69,00%   | 2.388,36 €   | 68,24%   | 1.188,32 €   | 68,50%   | 35,24 €      | 68,72%   | 1.270,56 €   | 68,90%   | 2.517,63 €   | 68,90% | 4.000,00 €   |
| 10 kWp | 52,09%   | 5.237,33 €  | 56,73%   | 4.986,53 €  | 61,21%   | 4.603,70 €  | 64,96%   | 4.006,23 €  | 67,22%   | 2.970,69 €  | 68,68%   | 1.699,95 €  | 69,50%   | 2.641,03 €   | 70,10%   | 1.446,88 €   | 70,10%   | 217,44 €     | 70,29%   | 1.026,70 €   | 70,48%   | 2.270,84 €   | 70,48% | 3.500,00 €   |
| 11 kWp | 53,02%   | 5.267,55 €  | 57,74%   | 5.055,28 €  | 62,30%   | 4.695,96 €  | 66,08%   | 4.107,31 €  | 68,38%   | 3.083,53 €  | 69,93%   | 1.899,25 €  | 70,80%   | 2.795,04 €   | 71,20%   | 1.612,64 €   | 71,46%   | 389,08 €     | 71,67%   | 849,17 €     | 71,85%   | 2.096,25 €   | 71,85% | 3.000,00 €   |
| 12 kWp | 53,85%   | 5.425,26 €  | 58,65%   | 5.136,50 €  | 63,29%   | 4.800,70 €  | 67,10%   | 4.220,88 €  | 69,44%   | 3.208,86 €  | 70,97%   | 1.958,70 €  | 71,88%   | 2.926,24 €   | 72,35%   | 1.764,43 €   | 72,67%   | 558,51 €     | 72,89%   | 676,81 €     | 73,09%   | 1.918,00 €   | 73,09% | 2.500,00 €   |
| 13 kWp | 54,59%   | 5.453,01 €  | 59,51%   | 5.199,54 €  | 64,20%   | 4.878,44 €  | 68,03%   | 4.304,50 €  | 70,41%   | 3.304,24 €  | 71,93%   | 2.051,13 €  | 72,85%   | 3.021,62 €   | 73,37%   | 1.874,51 €   | 73,75%   | 886,23 €     | 74,01%   | 537,33 €     | 74,20%   | 1.781,47 €   | 74,20% | 2.000,00 €   |
| 14 kWp | 55,23%   | 5.486,27 €  | 60,27%   | 5.268,08 €  | 65,06%   | 4.976,38 €  | 68,92%   | 4.411,26 €  | 71,30%   | 3.411,00 €  | 72,86%   | 2.169,65 €  | 73,77%   | 3.137,20 €   | 74,28%   | 1.987,15 €   | 74,69%   | 1.009,33 €   | 74,98%   | 407,05 €     | 75,20%   | 1.642,36 €   | 75,20% | 1.500,00 €   |
| 15 kWp | 55,79%   | 5.487,28 €  | 60,95%   | 5.304,37 €  | 65,84%   | 5.042,07 €  | 69,73%   | 4.485,77 €  | 72,16%   | 3.500,21 €  | 73,71%   | 2.255,93 €  | 74,65%   | 3.232,30 €   | 75,18%   | 2.088,12 €   | 75,54%   | 893,96 €     | 75,84%   | 317,83 €     | 76,07%   | 1.550,21 €   | 76,07% | 1.000,00 €   |
| 16 kWp | 56,27%   | 5.493,86 €  | 61,53%   | 5.340,35 €  | 66,54%   | 5.113,33 €  | 70,49%   | 4.574,67 €  | 72,94%   | 3.594,99 €  | 74,55%   | 2.368,35 €  | 75,49%   | 3.344,72 €   | 76,01%   | 2.197,60 €   | 76,39%   | 1.009,33 €   | 76,66%   | 211,29 €     | 76,90%   | 1.440,73 €   | 76,90% | 500,00 €     |
| 17 kWp | 56,72%   | 5.491,04 €  | 62,05%   | 5.358,10 €  | 67,15%   | 5.157,55 €  | 71,19%   | 4.645,35 €  | 73,69%   | 3.680,37 €  | 75,31%   | 2.456,67 €  | 76,30%   | 3.447,74 €   | 76,81%   | 2.297,68 €   | 77,19%   | 1.009,41 €   | 77,46%   | 111,21 €     | 77,69%   | 1.343,59 €   | 77,69% | 0,00 €       |
| 18 kWp | 57,14%   | 5.504,99 €  | 62,52%   | 5.386,76 €  | 67,71%   | 5.212,67 €  | 71,81%   | 4.718,11 €  | 74,38%   | 3.773,71 €  | 76,05%   | 2.564,71 €  | 77,04%   | 3.555,77 €   | 77,60%   | 2.420,42 €   | 77,95%   | 1.223,32 €   | 78,22%   | 2,71 €       | 78,46%   | 1.226,73 €   | 78,46% | 0,00 €       |
| 19 kWp | 57,54%   | 5.505,50 €  | 62,94%   | 5.393,15 €  | 68,20%   | 5.239,64 €  | 72,35%   | 4.759,78 €  | 75,01%   | 3.841,84 €  | 76,74%   | 2.650,48 €  | 77,25%   | 3.647,43 €   | 78,32%   | 2.515,01 €   | 78,68%   | 1.320,86 €   | 78,94%   | 97,30 €      | 79,18%   | 1.132,14 €   | 79,18% | 0,00 €       |
| 20 kWp | 57,90%   | 5.516,36 €  | 63,35%   | 5.418,71 €  | 68,64%   | 5.274,02 €  | 72,85%   | 4.811,80 €  | 75,56%   | 3.908,56 €  | 77,17%   | 2.740,72 €  | 78,44%   | 3.755,31 €   | 79,01%   | 2.622,89 €   | 79,39%   | 1.434,62 €   | 79,65%   | 211,06 €     | 79,89%   | 1.018,38 €   | 79,89% | 0,00 €       |

Dieses Kapitel baut auf Kapitel 4.5 auf, indem nun die flexible Laderegulung hinzukommt. Die Berechnungen sind in der Exceldatei „11 Kosten PVA mit Speicher Elektroauto flexible Laderegulung“ zu finden, die Ergebnisse finden sich in Tabelle 7 wieder. Es wird verdeutlicht, dass die flexible Laderegulung bei kleinen PV-Anlagen und großem Speicher kleinere Kapitalwerte aufweist als bei großen PV-Anlagen und kleinem Speicher. Bei großen Anlagen und kleinem Speicher ist der Kapitalwert dagegen größer als in Anlagen ohne flexible Laderegulung aus Kapitel 4.5 und weist Steigerungen von knapp über 100 % auf.

## 4.7 Ökonomische Betrachtung verschiedener Szenarien

Im Folgenden werden die verschiedenen Szenarien aus Kapitel 4.1 bis 4.6 miteinander verglichen. Die Größe des Speichers, wenn vorhanden, wurde auf 6.000 Wh festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 zu sehen.

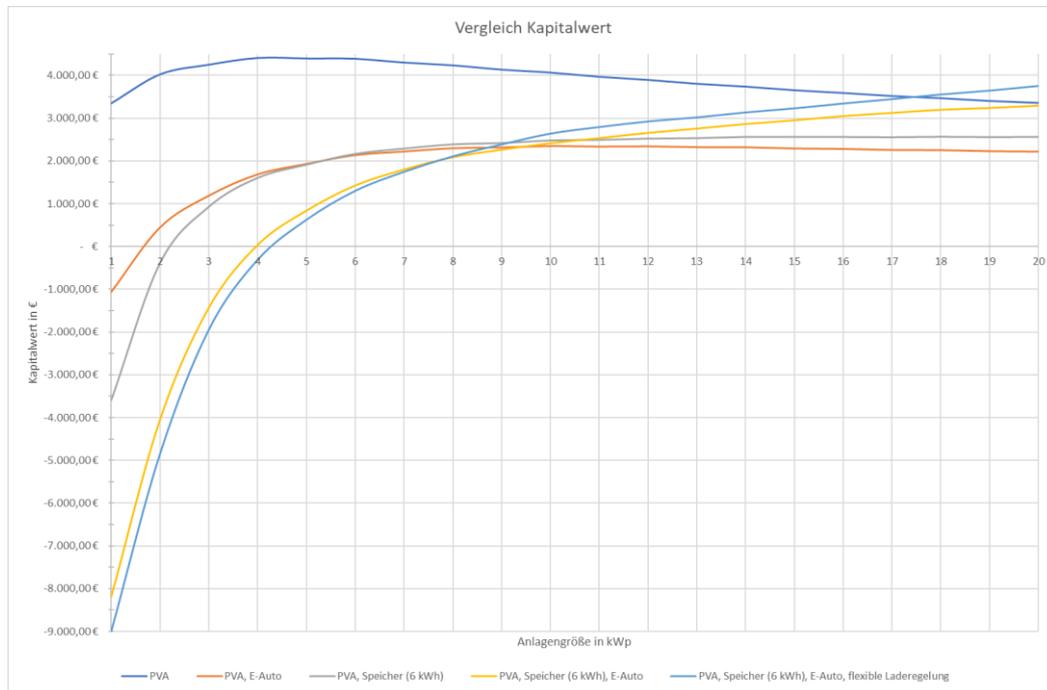


Abbildung 20: Vergleich Kapitalwert

Es ist erkennbar, dass nur die PVA-Anlage bereits ab einer kleinen Anlage von 1 kWp wirtschaftlich ist. Die PV-Anlage mit E-Auto wird ab 2 kWp wirtschaftlich, die PV-Anlage mit Speicher ab 3 kWp, die PV-Anlage mit Speicher und E-Auto ab 4 kWp und das System mit flexibler Laderegulung ab 5 kWp. Die PV-Anlagen ohne Speicher und E-Auto sind am wirtschaftlichsten mit einer Anlagengröße zwischen 4 und 6 kWp. Die Systeme PVA mit Speicher und PVA mit E-Auto sind ab 6 kWp am wirtschaftlichsten und nehmen darüber hinaus leicht ab. Die PVA mit Speicher und E-Auto sowie das System mit zusätzlicher flexibler Laderegulung werden umso wirtschaftlicher, je größer die PVA wird. Das System mit PVA, Speicher, E-Auto und flexibler Laderegulung ist ab 18 kWp Anlagengröße sogar wirtschaftlicher als die reine PV-Anlage.

## 5 Ökologische Betrachtung

Die Grundlage für die Berechnungen in den nachfolgenden Kapiteln bildet der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland, welcher in Abbildung 21 zu sehen ist.

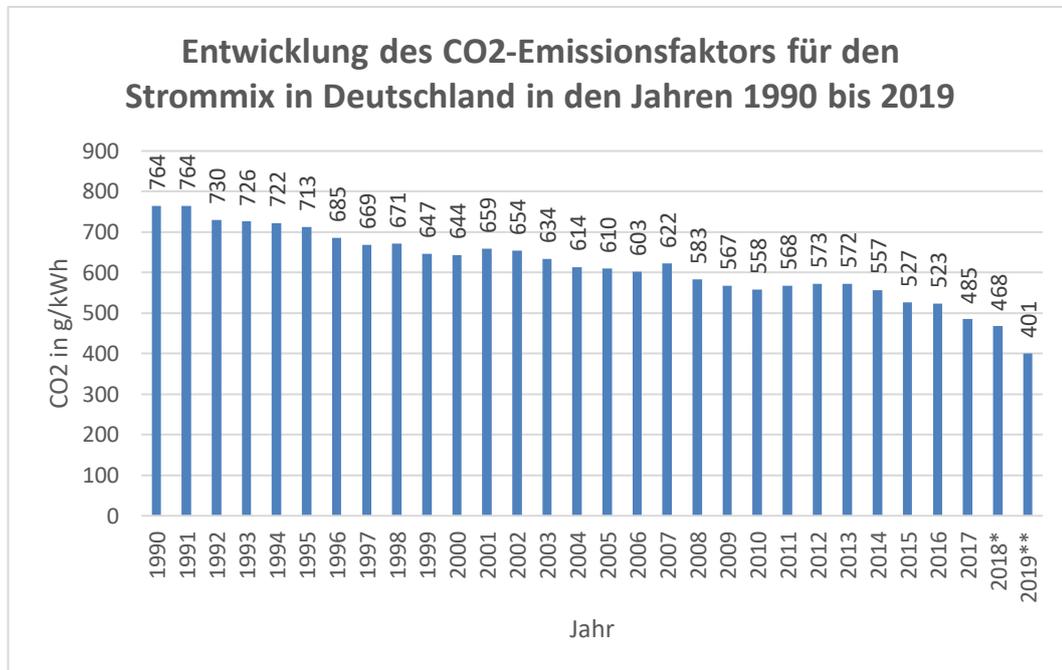


Abbildung 21: Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2019, eigene Bearbeitung nach (28)

Die Werte in Abbildung 21 für 2018 sind vorläufig und für 2019 geschätzt. Es ist erkennbar, dass der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor jedes Jahr durchschnittlich um 2,1 % sinkt. Der Start für die folgenden Berechnungen ist auf 2020 mit dem Zeitpunkt Null festgelegt. Der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix wurde für die Jahre mit dem Startpunkt von 2018 festgelegt und sinkt konstant um 2,1 %.

### 5.1 CO<sub>2</sub> Einsparung mit PV Anlage

Die CO<sub>2</sub>-Einsparung pro kWh PV-Strom berechnet sich aus dem CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland für die Jahre, abzüglich des Emissionsfaktors für PV-Strom, welcher bei 50 g CO<sub>2</sub>/kWh liegt und hauptsächlich durch die Herstellung zu erklären ist (10, S. 48). Die Daten für Erzeugung und Eigenverbrauch stammen aus Kapitel 3.1.

Mit der aus PV erzeugten Strommenge pro Jahr ergibt sich auf 20 Jahre die folgende Abbildung 22, bei der ein linearer Anstieg der PV-Erzeugung zu

verzeichnen ist. Die Rechnungen sind der „Exceldatei 12 CO2 Einsparung PV“ zu entnehmen.

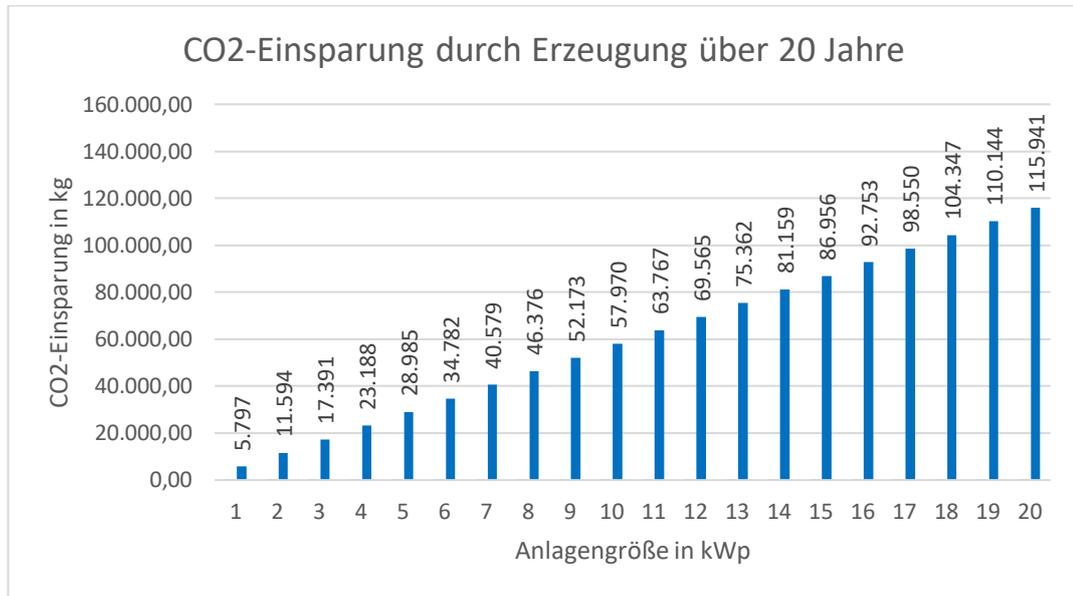


Abbildung 22: CO2-Einsparung durch Erzeugung über 20 Jahre

Anders sieht es aus, wenn die CO2-Einsparung für den Eigenverbrauch betrachtet wird, welche in Abbildung 23 zu sehen ist.

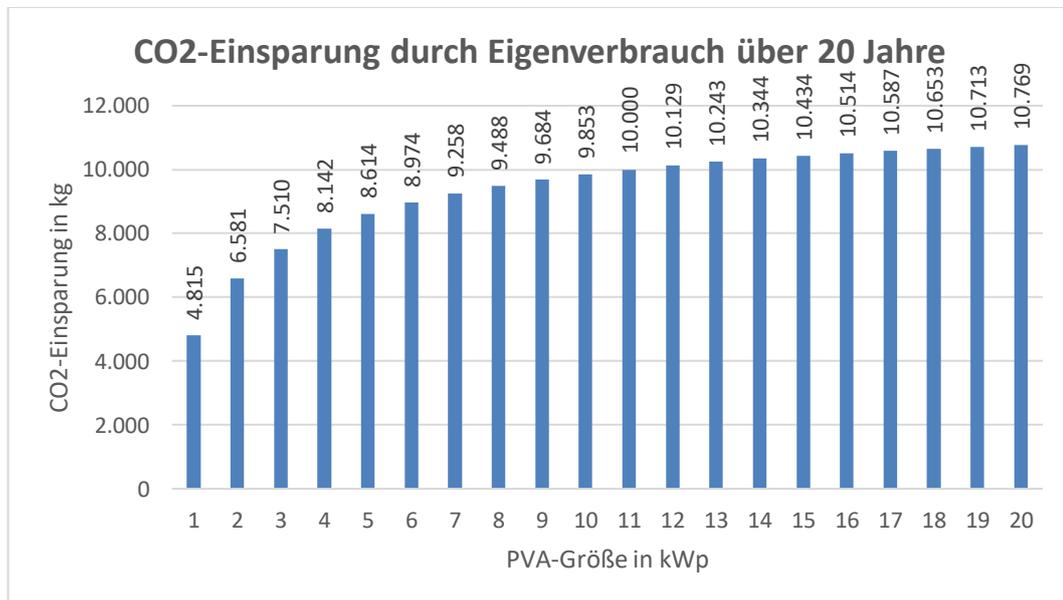


Abbildung 23: CO2-Einsparung durch Eigenverbrauch über 20 Jahre

In Abbildung 23 zeigt sich, dass der Anstieg der CO2-Einsparung mit Eigenverbrauch im Vergleich zu Abbildung 22, der CO2-Einsparung durch Erzeugung, nicht mehr linear ist. Dies ist durch den geringer werdenden Ei-

genverbrauch zu erklären, wie es schon in Kapitel 3.1 verdeutlicht. Insgesamt sinkt dadurch bei einer großen PV-Anlage von 20 kWp die totale Einsparung von 115.941 kg CO<sub>2</sub> um 93% auf 10.769 kg CO<sub>2</sub>.

## 5.2 CO<sub>2</sub> Einsparung mit PVA und E-Auto

Aufbauend auf Kapitel 5.1 wird nun die CO<sub>2</sub>-Einsparung durch den Eigenverbrauch mit PV-Anlage und Elektroauto berechnet. Grundlage bilden die Daten für den Eigenverbrauch aus Kapitel 3.2. Der Emissionsfaktor, der durch die Herstellung eines Elektroautos entsteht, wird dabei vernachlässigt, ebenso wie die CO<sub>2</sub>-Einsparung, die ein Verbrenner mit der gleichen Fahrleistung gebraucht hätte. In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Einsparung über 20 Jahre zu sehen. Die Rechnungen finden sich in der Exceldatei „13 CO<sub>2</sub> Einsparung PV EAuto“ wieder.

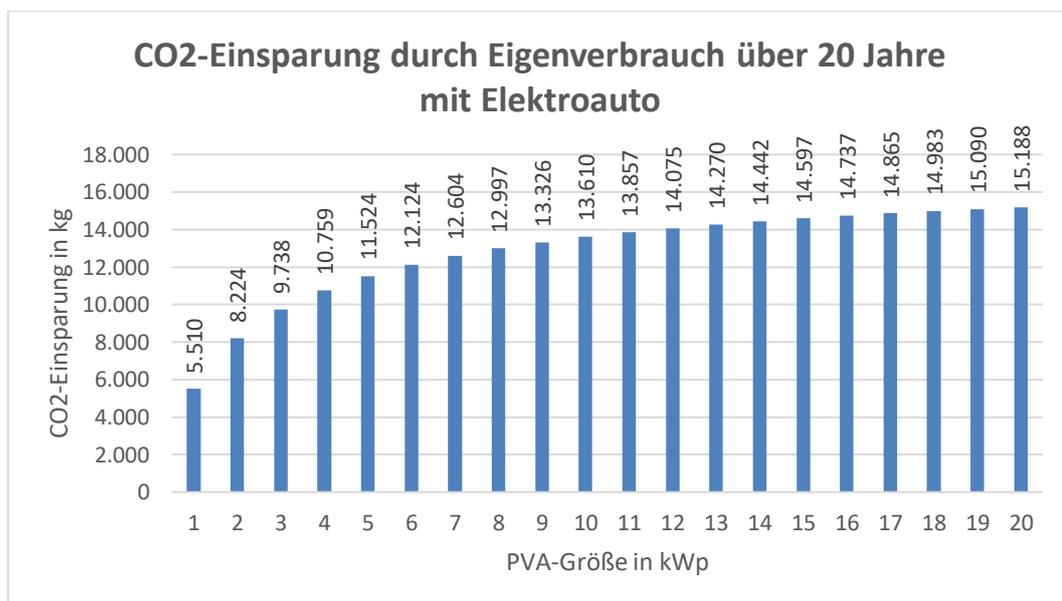


Abbildung 24: CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Eigenverbrauch über 20 Jahre mit Elektroauto

In Abbildung 24 zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 23 nur ein absoluter Anstieg der Zahlen, welches durch den erhöhten Eigenverbrauch mit Elektroauto zu verzeichnen ist.

## 5.3 CO<sub>2</sub>-Einsparung mit PVA und Speicher, ohne E-Auto

Im Folgenden wird die CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Eigenverbrauch mit PV-Anlage und Speicher untersucht. Grundlage bilden die Daten aus Kapitel 3.3. Die Emissionsfaktoren durch die Herstellung von Elektroauto und Speicher

werden vernachlässigt. Die Speichergröße wurde auf 6.000 Wh festgelegt. Die Rechnungen finden sich in der Exceldatei „14 CO2 Einsparung PV Speicher“ wieder, die Ergebnisse in Abbildung 25.

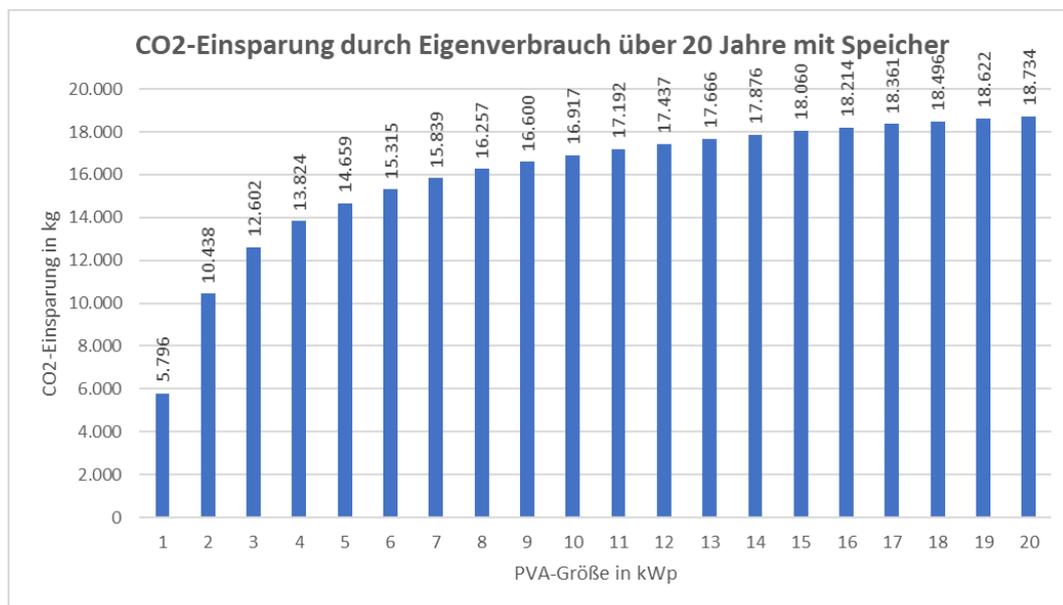


Abbildung 25: CO2-Einsparung durch Eigenverbrauch über 20 Jahre mit Speicher

Es ist zu sehen, dass die CO2-Einsparung mit Speicher nochmal über der CO2-Einsparung mit PV-Anlage und Elektroauto liegt.

#### 5.4 CO2-Einsparung mit PVA, E-Auto und Speicher

In diesem Kapitel wird die CO2-Einsparung mit PV-Anlage, Elektroauto und Speicher untersucht. Grundlage bilden die Daten aus Kapitel 3.4. Die Speichergröße wurde wie im vorigen Kapitel auf 6.000 Wh festgelegt. Die Emissionsfaktoren von Speicher und Elektroauto bei der Herstellung wurden vernachlässigt, ebenso die Einsparung von CO2 des Elektroautos die ein Verbrenner mit der gleichen Fahrleistung gehabt hätte. Die Berechnungen sind in der Exceldatei „15 CO2 Einsparung PV Speicher EAuto“ zu finden, die Ergebnisse in Abbildung 26.

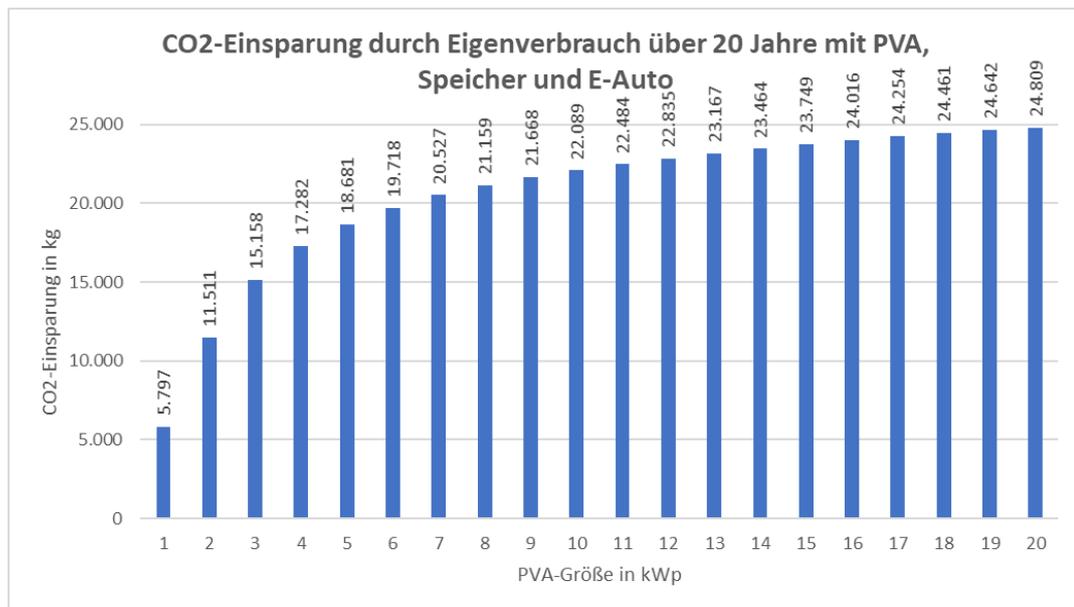


Abbildung 26: CO2-Einsparung mit PVA, Elektroauto und Speicher

Es ist erkennbar, dass die CO2-Einsparung bei einer kleinen PV-Anlage von 1 kWp nicht weiter angestiegen ist, bei den größeren PV-Anlagen sind Anstiege zwischen 10 % und 32 % zu verzeichnen.

### 5.5 CO2-Einsparung mit PVA, E-Auto, Speicher und flexibler Laderegulung

Im Folgenden wird die CO2-Einsparung mit PV-Anlage, Elektroauto, Speicher und flexibler Laderegulung untersucht. Grundlage bilden die Daten aus Kapitel 3.5. Die Emissionsfaktoren von Speicher, Elektroauto und flexibler Laderegulung bei der Herstellung wurden vernachlässigt, ebenso die Einsparung von CO2 des Elektroautos die ein Verbrenner mit der gleichen Fahrleistung gehabt hätte. Die Berechnungen sind in der Exceldatei „16 CO2 Einsparung PV Speicher EAuto flexible Laderegulung“ zu finden, die Ergebnisse in Abbildung 27.

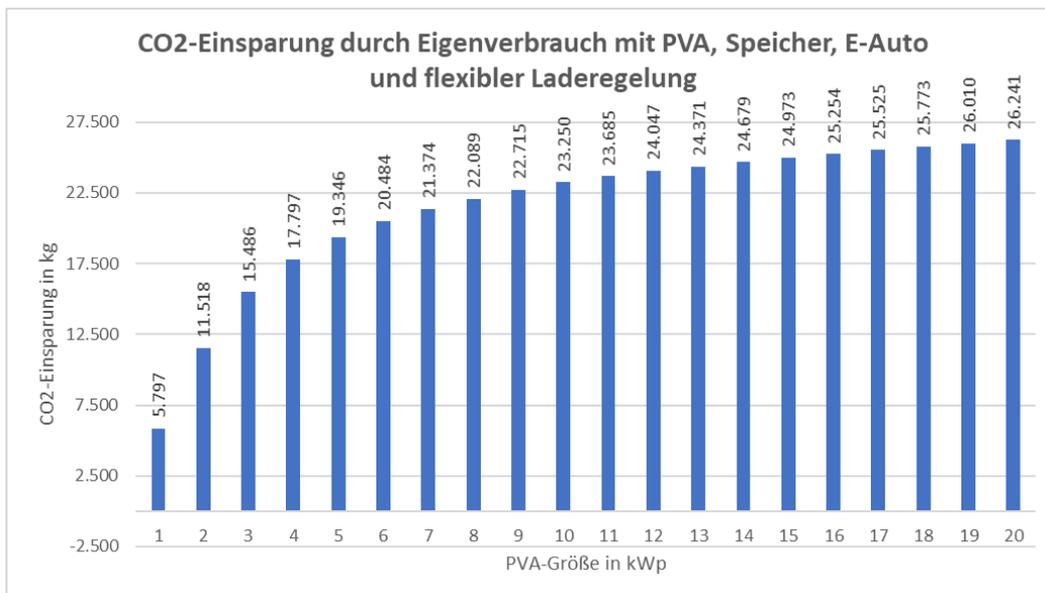


Abbildung 27: CO2-Einsparung durch Eigenverbrauch mit PVA, Speicher, E-Auto und flexibler Laderegelung

Es ist erkennbar, dass die CO2-Einsparung durch die flexible Laderegelung nochmals ab einer Anlagengröße von 2 kWp gesteigert werden konnte.

## 5.6 Ökologische Betrachtung verschiedener Szenarien

Anders als bei der Betrachtung der verschiedenen Szenarien in den Kapiteln 3 und 5 variieren die Ergebnisse der Kapitel 5.1 bis 5.6 weniger stark. Die Ergebnisse der Kapitel 5.1. bis 5.6 werden dennoch zur Verdeutlichung der Unterschiede miteinander verglichen. Die Größe des Speichers, wenn vorhanden, wurde auf 6.000 Wh festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 28 zu sehen.

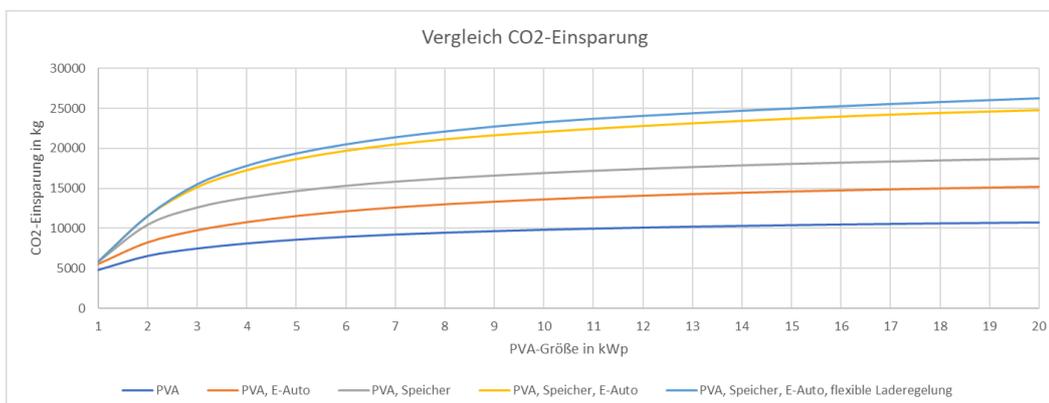


Abbildung 28: Vergleich CO2-Einsparung

Es ist erkennbar, dass die CO2-Einsparung bei allen Szenarien mit steigender PV-Anlagengröße steigt. Die geringste CO2-Einsparung verzeichnet die

reine PV-Anlage, gefolgt von der PV-Anlage mit E-Auto. Die PV-Anlage mit Speicher reiht sich ins Mittelfeld ein. Die PV-Anlage mit Speicher und E-Auto zieht bis etwa 2,5 kWp mit der PV-Anlage mit Speicher, E-Auto und flexibler Laderegelung gleich, ab dann weist letztere die größte CO<sub>2</sub>-Einsparung über 20 Jahre auf.

## 6 Fazit und kritische Auseinandersetzung

Durch die Untersuchung der Autarkie lässt sich festhalten, dass diese bei einem Einfamilienhaus mit PV-Anlage und Elektroauto durch einen Speicher und eine flexible Laderegelung deutlich gesteigert werden kann, wobei ein Haushalt ohne Elektroauto aber mit Speicher noch am besten abschneidet, dicht gefolgt von dem System aus PV-Anlage, E-Auto, Speicher und flexibler Laderegelung.

Ökonomisch betrachtet schneiden autarkiesteigernde Maßnahmen wie Speicher und flexible Laderegelung bei kleinen PV-Anlagen schlechter ab, als die PV-Anlage ohne autarkiesteigernde Maßnahmen. Es lässt sich aber festhalten, dass das System mit flexibler Laderegelung bei einer großen PV-Anlage sogar wirtschaftlicher ist, als das System ohne autarkiesteigernde Maßnahmen, selbst bei größerem Verbrauch durch das E-Auto.

Ökologisch betrachtet sind alle Systeme mit autarkiesteigernden Maßnahmen besser als die reine PV-Anlage an sich. Am besten schneidet das System mit flexibler Laderegelung ab, gefolgt von dem System PVA-E-Auto-Speicher.

Die Ergebnisse der Arbeit können als Grundlage dienen, um die Solarkopplung der Energieversorgung Beckum in Kooperation mitalcona Automation noch besser vertreiben zu können, oder einem Kunden der Energieversorgung besser zu belegen, weshalb eine Steigerung der Autarkie aus Kundensicht sinnvoll ist.

Kritisch zu betrachten ist, dass die Datengrundlage Last- und Erzeugungsprofile von den Stadtwerken Remscheid aus dem Jahr 2013 sind. Diese geben zwar ein besseres Bild wieder als z.B. das Standardlastprofil der TU München, welches z.B. noch eine deutliche Lastspitze werktags um die Mittagszeit aufweist, allerdings unterscheidet sich ein reales Lastprofil eines Haushaltes noch deutlich von einem analytischen, da hier z.B. das Einschalten eines Gerätes erkannt werden kann. Ebenso sind die Witterungseinflüsse über einen längeren Zeitpunkt nicht berücksichtigt, da nur ein Jahr betrachtet wird. Des Weiteren wurde die 70 % Regelung für PV-Anlagen

vernachlässigt, ebenso wie Lade- und Speicherverluste. Bei den Kostenrechnungen wurde nicht mit eingerechnet, dass Speicher und Elektroauto oft nur eine Nutzungserwartung von ca. 10 Jahren haben, ebenso wurden steigende Kosten für Benzinpreise vernachlässigt.

Es empfiehlt sich weitere Untersuchungen mit aktuelleren Daten und detaillierteren Berechnungen über einen längeren Zeitraum zu machen, allerdings sind Messwerte von intelligenten Messsystemen derzeit noch schwer zu beschaffen. Ebenso ist anzumerken, dass durch veränderte Ladezeitpunkte des Elektroautos deutliche Abweichungen bei der Autarkie durch den hohen Verbrauch des Elektroautos entstehen können. Es könnten z.B. noch weitere Untersuchungen gemacht werden, inwieweit sich der Ladezeitpunkt auf die Autarkie auswirkt und wie der Vergleich dann zu der flexiblen Laderegulierung ist. Einen weiteren Einfluss auf die Autarkie kann z.B. noch bei abendlichem Verbrauch die Dachausrichtung nach Westen bringen.

## 7 Literaturverzeichnis

1. KASCHUB, T. *Batteriespeicher in Haushalten unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfragesteuerung*: Karlsruhe, 2017.
2. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. *Durchschnittlicher Strompreis für einen Haushalt* [online], 2019 [Zugriff am: 25. August 2019]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/durchschnittlicher-strompreis-fuer-einen-haushalt.html>
3. QUASCHNING und VOLKER. *Regenerative Energiesysteme; Technologie - Berechnung - Klimaschutz*: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019. ISBN 978-3-446-46114.
4. MERTENS, K. *Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*.
5. QUASCHNING, V. *Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie - Energiewende*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2018. ISBN 9783446454163.
6. BMWI und AGEE-STAT. *Installierte Leistung (kumuliert) der Photovoltaikanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2019* [online]. (*in Megawattpeak*), 2020 [Zugriff am: 25. August 2020]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13547/umfrage/leistung-durch-solarstrom-in-deutschland-seit-1990/>
7. BUNDESNETZAGENTUR FÜR ELEKTRIZITÄT, GAS, TELEKOMMUNIKATION, POST UND EISENBAHNEN. *Anzulegende Werte für Solaranlagen August bis Oktober 2020* [online] [Zugriff am: 27. August 2020]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG\\_Registerdaten/EEG\\_Registerdaten\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html)
8. EWR GMBH. *Lastprofile* [online], 2013 [Zugriff am: 29. August 2020]. Verfügbar unter: <https://www.ewr-netze-remscheid.de/de/Stromnetz/Netzstrukturdaten/Lastprofile.html>

9. JOSEPH BERGNER und VOLKER QUASCHNING. *HTW\_2019\_Sinnvolle\_Dimensionierung*, 2019.
10. DR. HARRY WIRTH, FRAUNHOFER ISE. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland [online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>
11. DR. RÜDIGER PASCHOTTA. *Lastprofil* [online]. 2020 [Zugriff am: 29. Mai 2020]. Verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/lastprofil.html>
12. SCHELLONG, W. *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-48527-9.
13. VDEW. *Repräsentative VDEW Lastprofile* [online], 1999 [Zugriff am: 29. August 2020]. Verfügbar unter: [https://www.bdew.de/media/documents/1999\\_Repraesentative-VDEW-Lastprofile.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/1999_Repraesentative-VDEW-Lastprofile.pdf)
14. CO2ONLINE. *Jährlicher Stromverbrauch eines 4-Personen-Haushalts in Deutschland nach Gebäudetyp im Jahr 2019* [online]. (in Kilowattstunden), 2020 [Zugriff am: 28. August 2020]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/558288/umfrage/stromverbrauch-einen-4-personen-haushalts-in-deutschland/>
15. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. *Elektromobilität in Deutschland* [online] [Zugriff am: 29. September 2020]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>
16. KRAFTFAHRTBUNDESAMT, n.S. *Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2020* [online], 2020 [Zugriff am: 29. August 2020]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>
17. ADAC, n.S. *Mittlere Reichweiten ausgewählter alternativer Antriebe in Deutschland im Jahr 2018* [online]. (in Kilometern) [Zugriff am: 29. August 2020]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1061319/umfrage/mittlere-reichweiten-ausgewaehlter-alternativer-antriebe-in-deutschland/>

18. ADAC. *Stromverbrauch Elektroautos: Aktuelle Modelle im ADAC Test* [online], 2020 [Zugriff am: 30. August 2020]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>
19. DANIEL HEINZ. *Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland*, 2018.
20. WENIGER, J., J. BERGNER, T. TJADEN und V. QUASCHNING. *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*. Berlin: BWV Berliner Wissenschafts-Verlag. ISBN 3830535481.
21. FIGGENER, J., D. HABERSCHUSZ, K.-P. KAIRIES, O. WESSELS, B. TEPE und D.U. SAUER. *Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0. Jahresbericht 2018*.
22. ALCONA AUTOMATION GMBH. *Die Solarkopplung für Ihre Ladestation* [online] [Zugriff am: 19. September 2020]. Verfügbar unter: <https://www.alcona.info/files/alcona/downloads/alcona-automation-stromat-solarkopplung-de.pdf#page=1&zoom=auto,-20,10>
23. TIETZE, J. *Einführung in die Finanzmathematik. Klassische Verfahren und neuere Entwicklungen: Effektivzins- und Renditeberechnung, Investitionsrechnung, derivative Finanzinstrumente ; mit über 500 Übungsaufgaben*. 11., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. Studium. ISBN 3834815454.
24. RENAULT. *Technisches Datenblatt Renault Zoe* [online] [Zugriff am: 30. August 2020]. Verfügbar unter: <https://www.renault.de/elektrofahrzeuge/zoe/technische-daten.html>
25. CHECK24 VERGLEICHSPORTAL VERSICHERUNGEN AG. *Durchschnittliche Kfz-Versicherungskosten des Renault ZOE* [online] [Zugriff am: 30. August 2020]. Verfügbar unter: [https://www.autokostencheck.de/Renault/Renault-Zoe/Zoe/zoe-ag\\_38548/versicherungstypklassen/](https://www.autokostencheck.de/Renault/Renault-Zoe/Zoe/zoe-ag_38548/versicherungstypklassen/)
26. ADAC. *VW Golf 1.4 TSI BMT Comfortline (03/17 - 05/18)* [online] [Zugriff am: 30. August 2020]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/golf/vii-facelift/266223/#kosten>

27. CHECK24 VERGLEICHSPORTAL VERSICHERUNGEN AG. *Durchschnittliche Kfz-Versicherungskosten des VW Golf VII 1.4 TSI BMT* [online] [Zugriff am: 30. August 2020]. Verfügbar unter:  
[https://www.autokostencheck.de/VW/VW-Golf/Golf-VII/vw-golf-vii-1-4-tsi-bmt-au\\_37043/versicherung-typklassen/](https://www.autokostencheck.de/VW/VW-Golf/Golf-VII/vw-golf-vii-1-4-tsi-bmt-au_37043/versicherung-typklassen/)
28. UMWELTBUNDESAMT. *Entwicklung des spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019* [online], 2020 [Zugriff am: 12. September 2020]. Verfügbar unter:  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01\\_climate-change\\_13-2020\\_strommix\\_2020\\_fin.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01_climate-change_13-2020_strommix_2020_fin.pdf)

## **8 Supplementary Data**

01 2006\_2013\_Lastprofil\_E0

02 2013\_Lastprofil\_H0

03 Autarkie PV

04 Autarkie PV EAuto

05 Autarkie PV EAuto Speicher

06 Autarkie PV EAuto Speicher flexible Laderegelung

07 Kosten PVA

08 Kosten PVA Elektroauto

09 Kosten PVA mit Speicher

10 Kosten PVA mit Speicher und Elektroauto

11 Kosten PVA mit Speicher Elektroauto flexible Laderegelung

12 CO2 Einsparung PV

13 CO2 Einsparung PV EAuto

14 CO2 Einsparung PV Speicher

15 CO2 Einsparung PV Speicher EAuto

16 CO2 Einsparung PV Speicher EAuto flexible Laderegelung

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Wörtlich übernommene Sätze und Satzteile sind als Zitate belegt, andere Anlehnungen hinsichtlich Aussage und Umfang unter Quellenangabe kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und ist auch noch nicht veröffentlicht.

Oelde, 29.09.2020

Ort, Datum

K. J. J.

Unterschrift