5. Lastprofilgenerator für zukünftige Niederspannungsnetze

Für die Eingliederung von Sektorkopplungsmaßnahmen in dem oben genannten Versorgungsgebiet wird in Python ein Lastprofilgenerator erstellt. Zu diesem Zweck wird maßgeblich die Bibliothek „Pandas“ genutzt. Diese stellt für die Verarbeitung von Daten vorgefertigte Befehlsstrukturen bereit und sorgt für eine schnellere Verarbeitung, als dies mit einem Tabellenkalkulationsprogramm der Fall ist. Für die Erzeugung der Lastprofile wird ein so genanntes „pandas Dataframe-Objekt“ erstellt, das die Datenbank mit allen Lasten des Betrachteten Gebietes umfasst. Diese Datenbank beinhaltet in der Kopfzeile die Bezeichnung der jeweiligen Last. Für jede Last steht dementsprechend eine Spalte zur Verfügung. Die Spalten sind in die Zeiteinheiten unterteilt mit denen die Berechnungen stattfinden. Diese Zeiteinheit ist als Index in einer vorangestellten Spalte als „Time“ gekennzeichnet.
Da diese Datenbank für die spätere Verwendung in PyPSA optimiert ist, wird die Dimensionierung der Datenbank auf die Anforderungen von PyPSA angepasst. So entspricht der Name der jeweiligen Last dem Namen, der für diese Last auch in PyPSA hinterlegt ist. Dabei ist die Reihenfolge des Auftretens in der Datenbank nicht von Bedeutung. Da die Basiseinheit in PyPSA MWh ist, muss der Leistungsbedarf der generierten Lastprofile vor der Verrechnung mit der Datenbank dementsprechend umgerechnet werden. Beispielhaft ist der Aufbau der Datenbank in Abbildung 11 dargestellt.

	419	417	415	413	411	397	395	393	385
Time									
2017-01-01 00:00:00	0.035356	0.002356	0.002356	0.002356	0.002356	0.002260	0.002260	0.002260	0.002260
2017-01-01 00:15:00	0.036203	0.003203	0.003203	0.003203	0.003203	0.002173	0.002173	0.002173	0.002173
2017-01-01 00:30:00	0.036044	0.003044	0.003044	0.003044	0.003044	0.002044	0.002044	0.002044	0.002044
2017-01-01 00:45:00	0.036379	0.003379	0.003379	0.003379	0.003379	0.002003	0.002003	0.002003	0.002003
2017-01-01 01:00:00	0.031613	0.003038	0.003038	0.003038	0.003038	0.001866	0.001866	0.001866	0.001866
2017-01-01 01:15:00	0.003803	0.003803	0.003803	0.003803	0.003803	0.001771	0.001771	0.001771	0.001771

Abbildung 11: Beispielhafter Ausschnitt aus der Datenbank. Die Kopfzeile mit der Bezeichnung der Lasten, sowie der Index mit der Zeiteinteilung sind hervorgehoben.

Zu den Elementen des Lastprofilgenerators gehören, neben dem Grundlastprofil, die Photovoltaik Anlagen, elektrische Heimspeicher, batterieelektrische Fahrzeuge und Wärmepumpen. In Abbildung 12 ist schematisch ein Haus mit den entsprechenden Technologien dargestellt. Die weißen Pfeile geben die möglichen Energieflussrichtungen an. Am Hausanschluss-Kasten ist das erzeugte Lastprofil messbar.

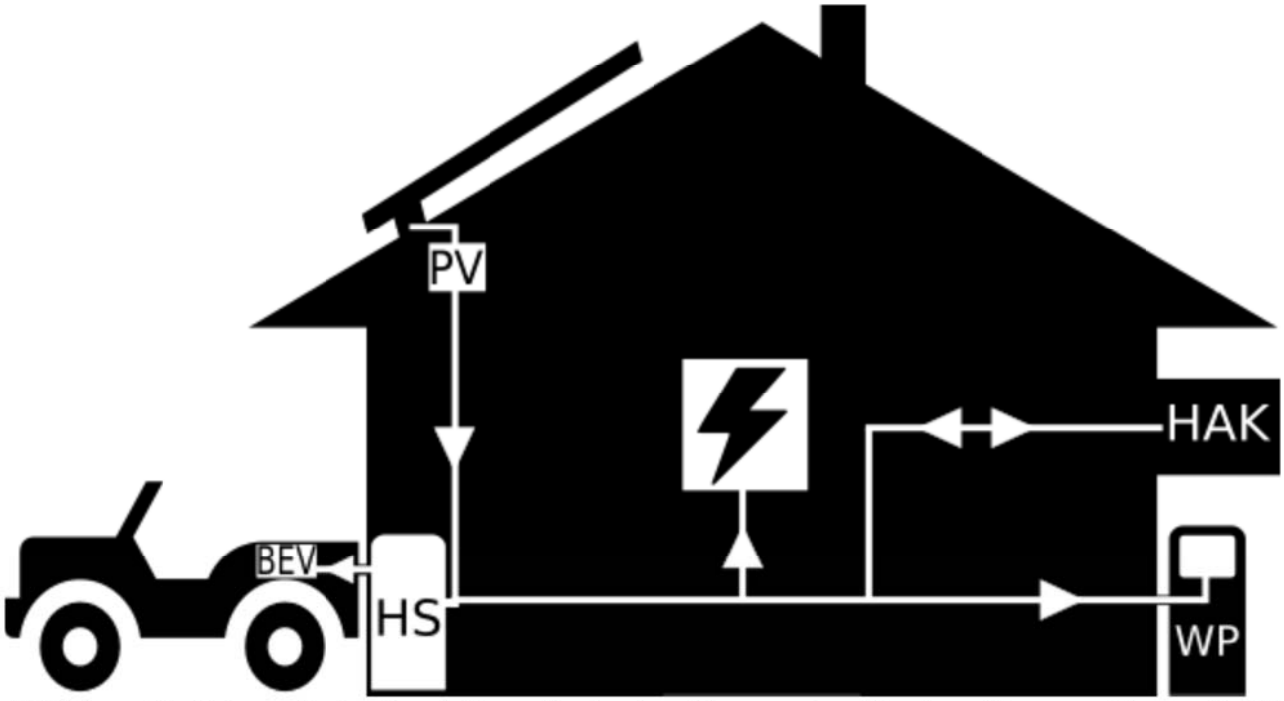

Abbildung 12: Schematische Darstellung des Lastprofilgenerators für einen Hausanschluss mit PV-Anlage, Heimspeicher (HS), batterieelektrischem Fahrzeug (BEV), Wärmepumpe (WP), der Grundlast des Hauses und dem Hausanschlusskasten (HAK)

Die Auswahl der Komponenten erfolgt prozentual, gemessen an der Anzahl der verfügbaren Lasten in der Datenbank. Dabei entspricht eine 100%ige Verteilung, einem Lastprofil pro Last. Wird für ein Szenario mehr als ein Lastprofil des selben Typs pro Last benötigt, Beispielsweise bei mehreren batterieelektrischen Fahrzeugen an einem Haus, so muss der Lastprofilgenerator mehrfach durchlaufen werden.

5.1. Ablauf des Lastprofilgenerators

In Abbildung 13 ist der Ablauf des Lastprofilgenerators vereinfacht als Flussdiagramm dargestellt. Als erster Schritt wird die Arbeitsumgebung für den Lastprofilgenerator eingestellt. Zu diesem Zweck wird ein Arbeitsverzeichnis festgelegt, in das die Ergebnisse des Lastprofilgenerators abgespeichert werden. Im Anschluss wird ein Grundlastprofil ausgewählt, das im Verlauf des Lastprofilgenerators als Grundlage für die Erstellung der Datenbank dient. Dieses Grundlastprofil muss im csv-Format vorliegen und die in Abbildung 11 dargestellte Form ausweisen.
Im Anschluss werden die erforderlichen Daten für das gewünschte Szenario definiert. Neben dem prozentualen Anteil der jeweiligen Technologie werden hier auch die für die Simulation relevanten technischen Parameter eingegeben. Bei den PV-Anlagen wird an dieser Stelle die kWp Leistung, sowie das Erzeugungsprofil festgelegt. Für batterieelektrische Fahrzeuge werden die Kapazität des Akkus, die Ladeleistung und der Wirkungsgrad der Ladeeinrichtung bestimmt. Es lässt sich zudem ein Faktor für die Entladung bei Abwesenheit und ein minimaler Ladestand einstellen, mit dem das Fahrzeug am Haus eintrifft. Außerdem können an dieser Stelle die Abfahrt- und Ankunftszeiten für Werktage und Wochenenden definiert werden. Für die Wärmepumpe wird die Leistung der Wärmepumpe, der Gebäudetyp und die Vorlauftemperatur des Wassers festgelegt. Wahlweise kann auch zwischen einer Luft- und einer Erdwärmepumpe unterschieden werden. Die genaue Verwendung dieser Parameter wird in den jeweiligen Unterkapiteln 5.2 bis 5.6 näher erläutert.
Nach dem Start des Lastprofilgenerators wird zunächst das ausgewählte Grundlastprofil eingelesen. Anhand der Kopfzeile dieses Grundlastprofils wird die Anzahl der Lasten ermittelt. Durch die Ver-

rechnung der eingestellten prozentualen Anteile der jeweiligen Technologien mit der gesamt Anzahl der Lasten erhält man die Anzahl der Lasten, die mit der entsprechenden Technologie ausgerüstet werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Ergebnisse dieser Berechnung auf ganzzahlige Werte gerundet werden.
Diese Ergebnisse werden einer Zufallsfunktion übergeben, die eine entsprechende Anzahl an Lasten auswählt und einer korrespondierenden Liste zuweist. Somit entstehen vier Listen, jeweils eine für PV-Anlagen, Wärmepumpen, batterieelektrische Fahrzeuge und Heimspeicher in denen die Lasten hinterlegt sind, bei denen diese Technologien zum Einsatz kommen. Bei den Heimspeichern ist des weiteren zu beachten, dass diese nur aus der Liste der Lasten mit PV-Anlagen ausgewählt werden, da eine Speicherung ohne eigene Erzeugung nicht sinnvoll ist. Dementsprechend bezieht sich der prozentuale Anteil der Heimspeicher auch nur auf die Lasten mit PV-Anlage und nicht auf die Gesamtheit der Lasten.
Der übergeordnete Ablauf des Lastprofilgenerators gestaltet sich ab diesem Punkt linear. Es werden nacheinander die Programmabschnitte der jeweiligen Technologie abgefragt, ob die Technologie im Szenario vorhanden ist. Ist dies der Fall, so wird die Datenbank an das Unterprogramm der Technologie übergeben. Die weitere Berechnung gestaltet sich iterativ indem nacheinander überprüft wird, ob die jeweilige Last in der Liste der Lasten mit dieser Technologie vorhanden ist. Ist dies wiederum der Fall, wird die entsprechende Spalte der Last aus der Datenbank an die nächste Iterationsstufe übergeben. Hier erfolgt wiederum iterativ die Berechnung für die Änderungen, die sich durch die Technologie auf jeden einzelnen Zeitabschnitt des zugehörigen Index ergeben. Ist das Ende der Spalte erreicht, so wird die Überprüfung der verbleibenden Lasten im übergeordneten Programmabschnitt fortgesetzt. Ist das Ende der Datenbank erreicht, so wird mit der Überprüfung der nächsten Technologie fortgesetzt. Nachdem alle Technologien behandelt wurden, wird die Datenbank als csv-Datei für die weitere Verwendung in PyPSA abgespeichert. Während des Programmablaufs werden auch Grafiken erzeugt, auf denen die Veränderungen des Lastprofils durch die jeweilige Technologie ersichtlich sind. Diese werden zusammen mit der csv-Datei zusätzlich in dem zu Beginn definierten Arbeitsverzeichnis gesichert.

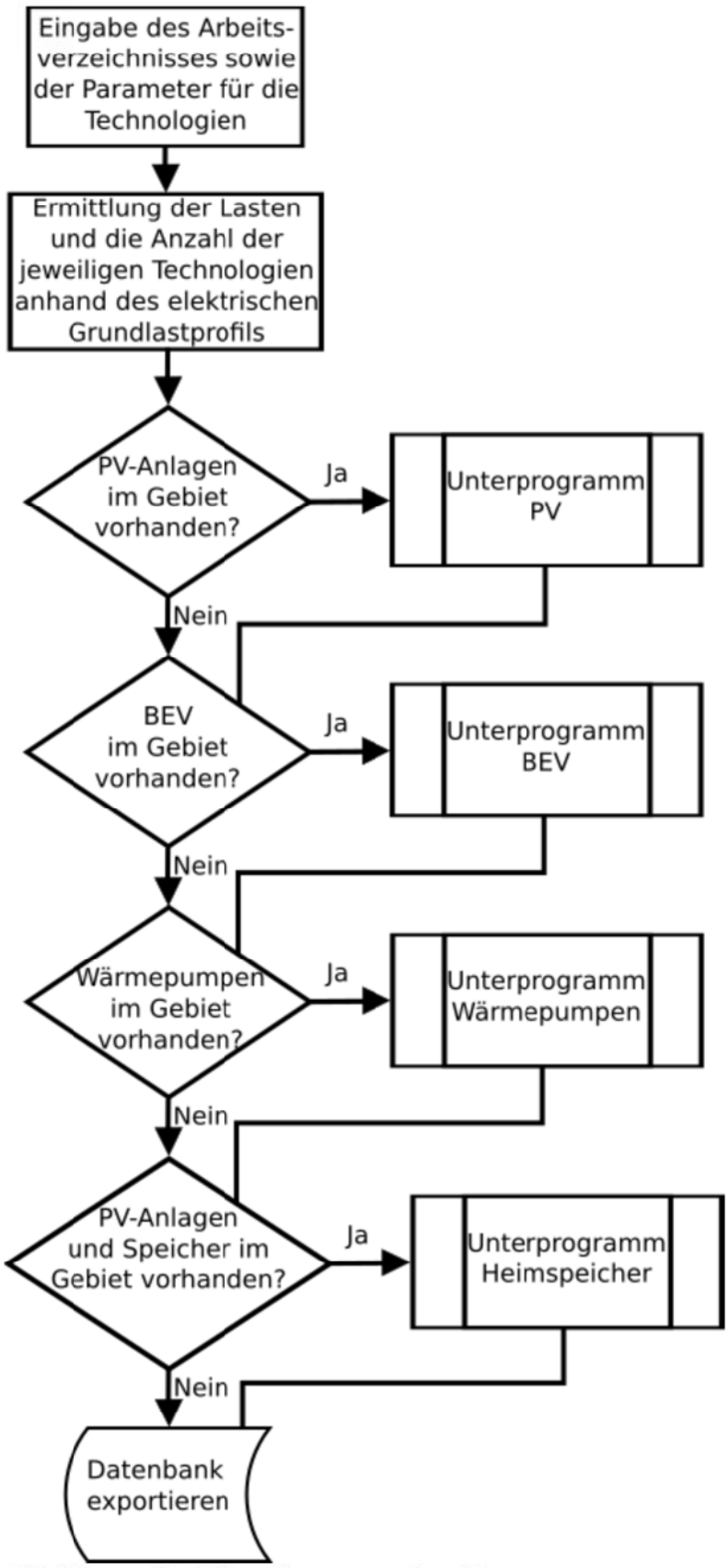

Abbildung 13: Flussdiagramm des Hauptprogramms des Lastprofilgenerators

Im weiteren Verlauf werden die jeweiligen Unterprogramme der Technologien beschrieben.

5.2. Die elektrische Grundlast des Hauses

Das Grundlastprofil wird auf Datengrundlage von Messungen der Rheinischen Netzgesellschaft berechnet. Die in Kapitel 4.3 erläuterten Messreihen werden durch die jeweils angeschlossenen Haushalte geteilt und diesen als Lastprofil zugeordnet. Bei der Erstellung des Basisszenarios in Kapitel 6.1 wird dies näher beschrieben.

5.3. Die Photovoltaik Anlage

Für die Photovoltaik Anlage wird ein Erzeugungsprofil verwendet, dass von der Firma SMA stammt [37]. Dieses beinhaltet die relative Erzeugungsleistung, die auf Daten von der Bundesnetzagentur und SMA Photovoltaik Anlagen im Postleitzahlgebiet mit der Startziffer 5 basiert [38]. Die Daten sind in per unit angegeben, wobei der Maximalwert bei 0.798 pu liegt. Es wird davon ausgegangen, dass hier bereits die „Sizing Ratio" des Wechselrichters mit einem Faktor von 0,8 berücksichtigt wurde. Dieser Faktor sorgt dafür, dass der Wechselrichter überwiegend in einem effizienten Arbeitsbereich gehalten werden kann. Der Verlauf des Erzeugungsprofils ist in Abbildung 14 dargestellt.

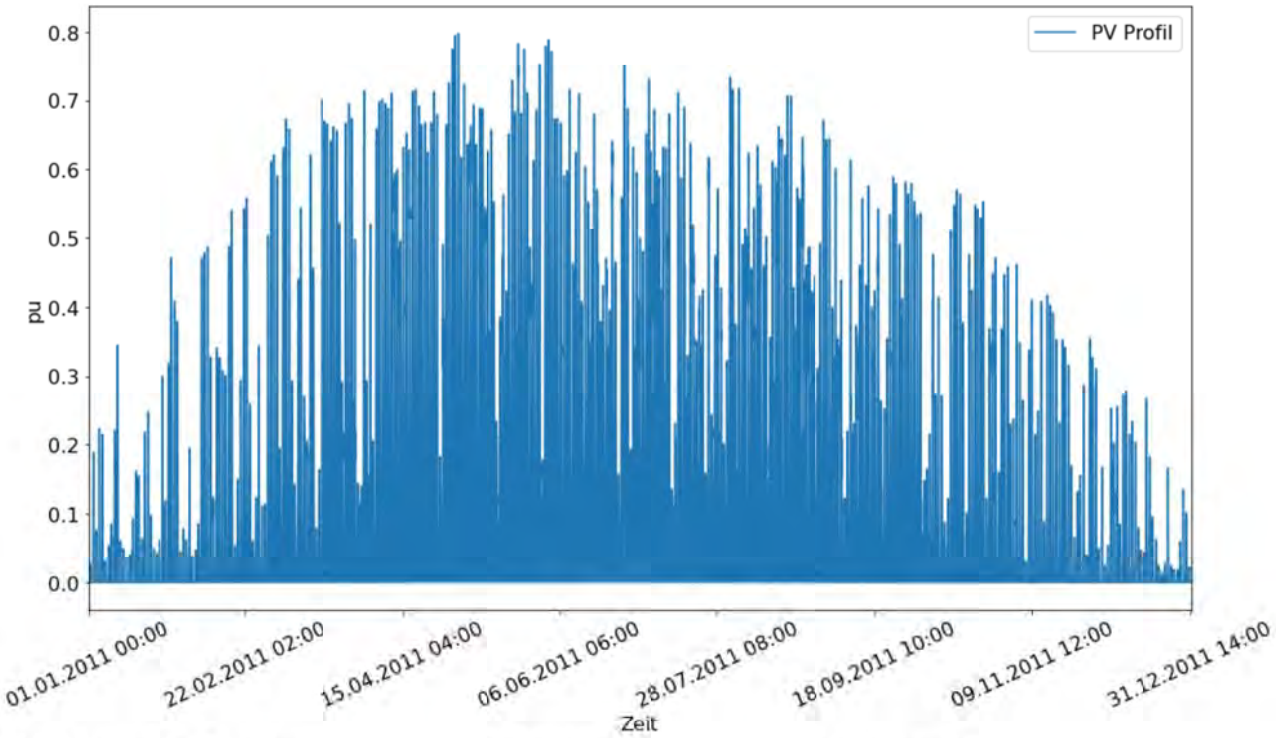

Abbildung 14: Erzeugungsprofil in pu der Firma SMA für PV-Anlagen im Postleitszahlgebiet mit der Startziffer fünf aus dem Jahre 2011

Durch die Multiplikation der Anlagenleistung mit dem Erzeugungsprofil von SMA entsteht ein Erzeugungsprofil $P_{PV}(t)$, welches von der Grundlast des Hauses subtrahiert wird.

5.4. Die Wärmepumpe

Für die Wärmepumpe, die in Kapitel 2.3 erläutert wurde, wird ein von Lukas Hoffmeier im Rahmen eines Masterprojekts an der TH Köln entwickeltes Wärmepumpentool in Python umgesetzt [39].

Dieses wiederum beruht in der Berechnung des Heizwärmebedarfs auf den Vorgaben des „Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.“ (BDEW) und deren Leitfaden [40].
Für das Verfahren wird zunächst der Wärmebedarf eines Gebäudes für einen Tag ermittelt. Dieser wird, abhängig von der Außentemperatur, mithilfe eines Tagesprofils stündlich über den Tag verteilt. Im Anschluss wird der COP der Wärmepumpe anhand der Außentemperatur errechnet um damit die benötigte elektrische Leistung zu erhalten. Im folgenden wird das Verfahren detaillierter beschrieben. In Abbildung 15 ist das Flussdiagramm für den im folgenden erklärten Programmabschnitt zu sehen.

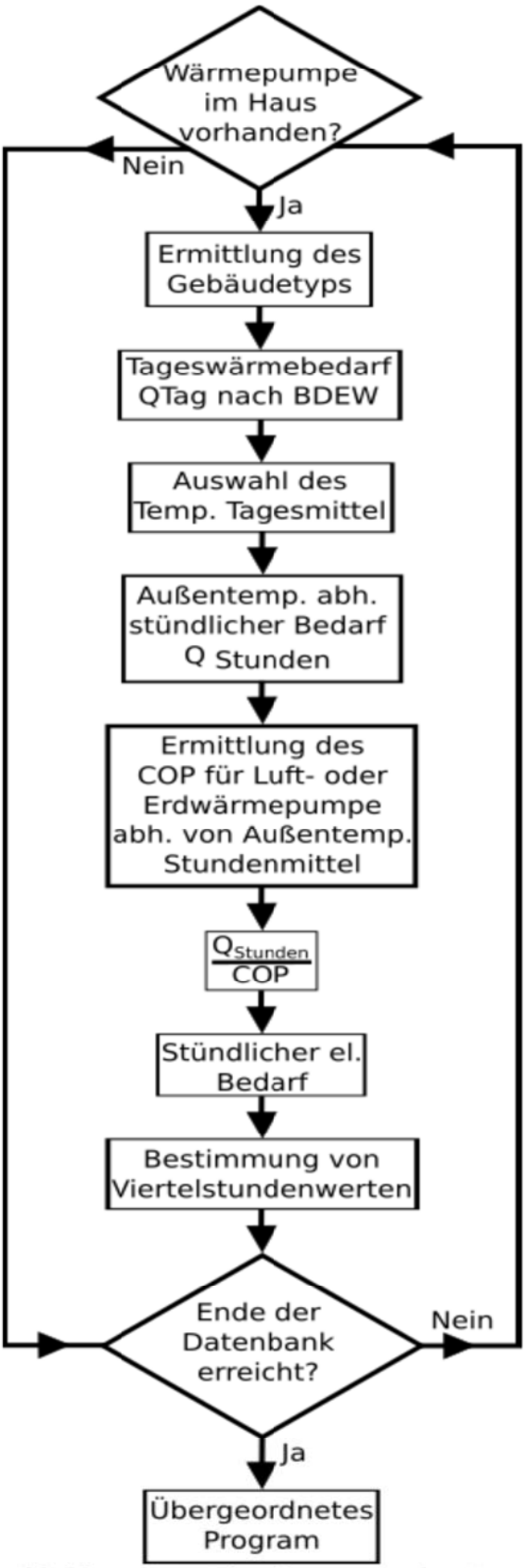

Abbildung 15: Flussdiagramm des Programmabschnittes für die Erzeugung der Lastprofile für Wärmepumpen

Im Leitfaden des BDEW wird für jeden Tag des Jahres eine Tagesmenge Q_{Tag} für den Heizbedarf ermittelt mit:

$$Q_{Tag} = KW * h(\vartheta) * F_{WT} \tag{4}$$

Wobei KW der Kundenwert ist, h(ϑ) ein temperaturabhängiger Profilfunktionswert eines Gebäudetyps und F_{WT} der Wochentagsfaktor. Für Wohngebäude ist $F_{WT} = 1$. Bei anderen Abnehmern kann F_{WT} über die Woche variieren, ergibt in Summe über alle Tage der Woche aber immer $\sum F_{WT} = 7$.
Der Profilfunktionswert h(ϑ) wird durch eine an der TH München entwickelte „SigLinDe“ Funktion bestimmt [40]. Sie setzt sich zusammen aus einer Sigmoid Funktion und einem Linear-Anteil, die additiv miteinander verknüpft werden:

$$h(\vartheta) = \underbrace{\left[\left(\frac{A}{1+\left(\frac{B}{\vartheta - \vartheta_0}\right)^C} + D\right)\right]}_{\text{Sigmoid Funktion}} + \underbrace{\left[max\left\langle\left(m_H * \vartheta + b_H\right) \vee \left(m_W * \vartheta + b_W\right)\right\rangle\right]}_{\text{Linear - Anteil}} \tag{5}$$

Die Koeffizienten A, B, C, D, m_H, b_H, m_W und b_W ergeben sich aus den vom BDEW veröffentlichten Datenblätter der Gebäudetypen. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 16 der Verlauf der Sigmoid Funktion mit den zugehörigen Koeffizienten dargestellt.

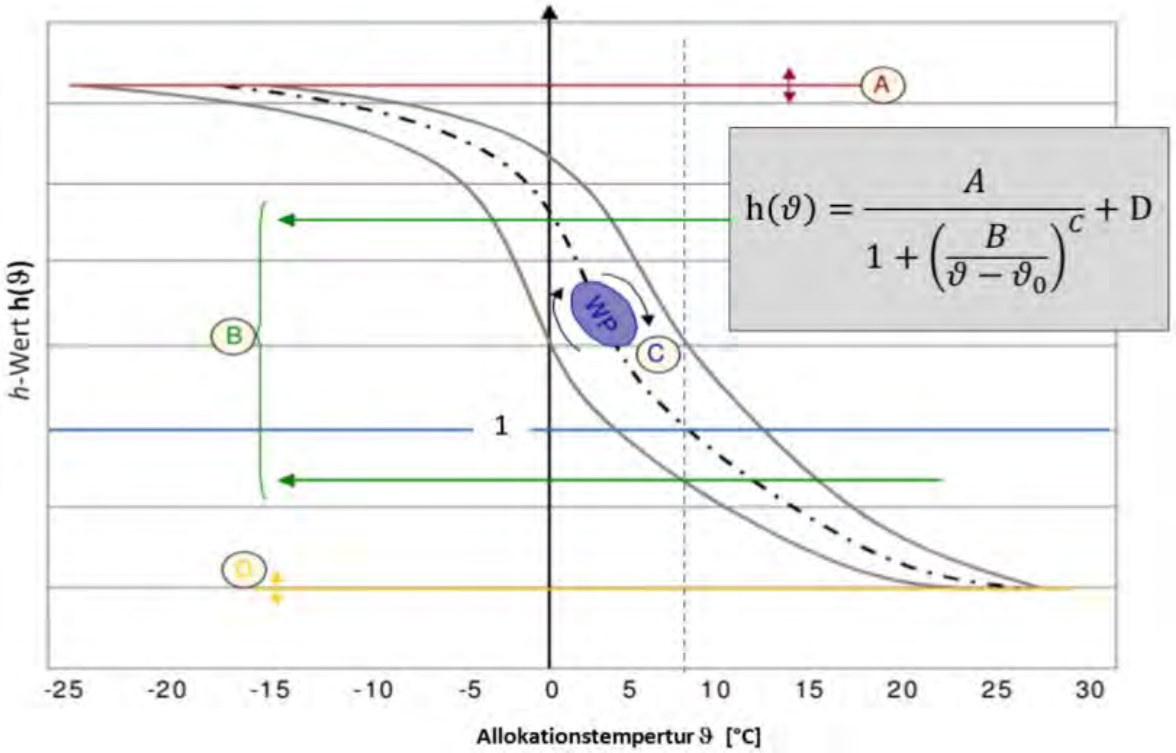

Abbildung 16: Verlauf der Sigmoid Funktion mit den Koeffizienten A, B, C und D aus [40] S.141

Dabei gibt A den reinen Verbrauch für Raumheizung bei Temperaturen unterhalb von -15 °C an. B markiert den Beginn der Heizphase. C gibt den Steigungsgrad der Funktion innerhalb der Heizphase und D einen temperaturunabhängigen Warmwasserverbrauch an.
In Abbildung 17 ist der Linear-Anteil der SigLinDe-Funktion mit den entsprechenden Koeffizienten zu sehen. Der Koeffizient b_H steht für den Aufsatzpunkt der Geraden bei 0 °C und m_H für die Steigung der Geraden. Die Koeffizienten b_W und m_W stehen analog für den Warmwasserverbrauch. Der Tagesmittelwert der Temperatur fließt mit ϑ ein und für die Klassifizierung des Grenzverhaltens bei hohen Temperaturen ist $\vartheta_0 = 40$ °C festgelegt.

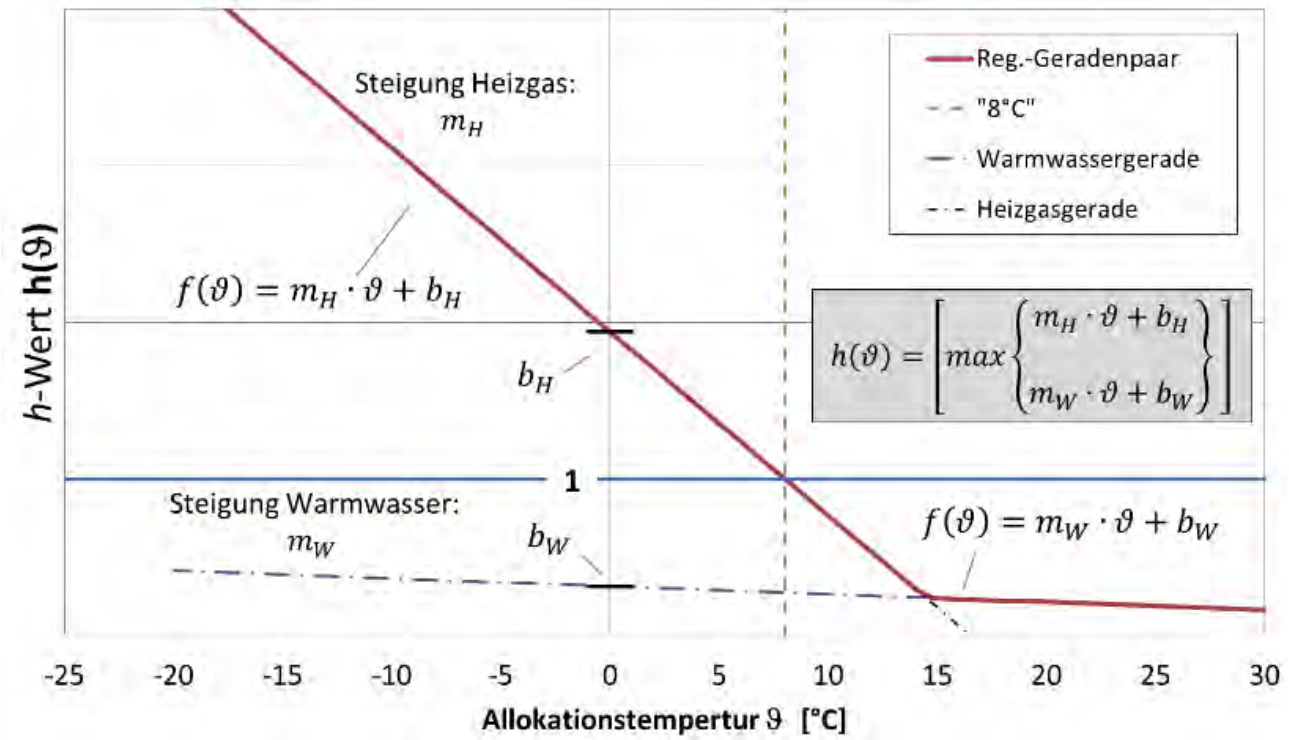

Abbildung 17: Verlauf des Linearanteils der Siglinde-Funktion mit den Parametern m_H, b_H, m_W und b_W aus [40] S.142

Der Kundenwert wird aus der Leistung des Wärmeerzeugers P, den Vollbenutzungsstunden V_{BH} und der Summe der Profilfunktionswerte über ein Jahr gebildet:

$$KW = \frac{P * V_{BH}}{\sum_{1}^{365} h(\vartheta)} \tag{6}$$

Im nächsten Schritt wird die ermittelte Tagesmenge Q_{Tag} prozentual über den Tag verteilt, um einen Wärmebedarf $Q_{Stunden}(t)$ für die einzelnen Tage auf Stundenbasis zu erhalten. Diese Aufteilung orientiert sich an der mittleren Tagestemperatur. Anhand einer Tabelle, die in 5 °C Schritten von <=-15 °C bis >25 °C reicht, wird die Tageslast einem der in Abbildung 18 dargestellten Profile zugeordnet. Diese Profile spiegeln das sich verändernde Verhältnis zwischen Heiz- und Brauchwasser bei steigender Außentemperatur wieder.

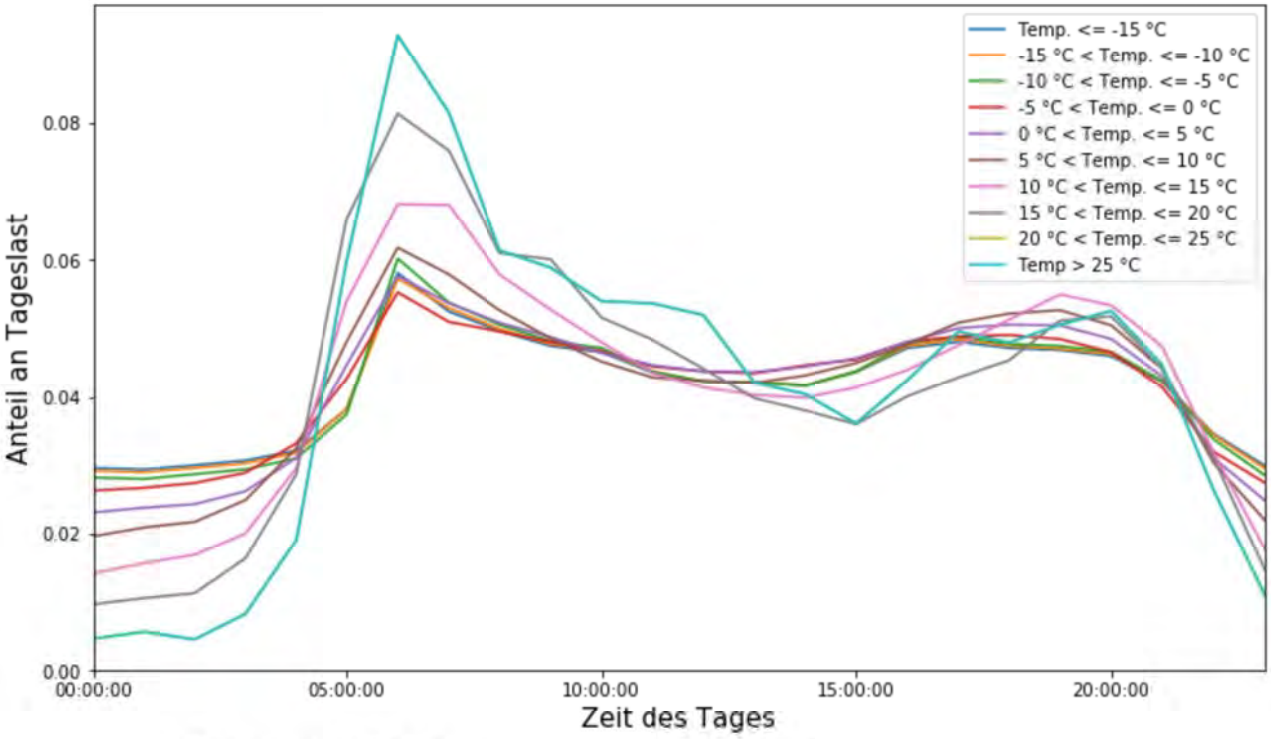

Abbildung 18: Temperaturabhängige Einteilung der Tageslast für einen Hausanschluss

Für den COP der Wärmepumpe wird ein temperaturabhängiger Mittelwert von am Markt verfügbaren Wärmepumpen ermittelt. Dieser bildet sich entsprechend [41] für Luftwärmepumpen nach:

$$COP_{Luft} = 6{,}81 - 0{,}121\,\Delta\vartheta + 0{,}00063\,\Delta\vartheta^2 \; bei \; 15 \leq \Delta\vartheta \leq 60 \tag{7}$$

und für Erdwärmepumpen nach:

$$COP_{Erd} = 8{,}77 - 0{,}15\,\Delta\vartheta + 0{,}000734\,\Delta\vartheta^2 \; bei \; 20 \leq \Delta\vartheta \leq 60 \tag{8}$$

Mittels des temperaturabhängigen COP und dem zuvor berechneten Wärmelastprofil, lässt sich ein elektrisches Lastprofil auf Stundenbasis für die Wärmeerzeugung im Haus berechnen:

$$P_W(t) = \frac{Q_{Stunden}(t)}{COP(t)} \tag{9}$$

Bei diesem Vorgehen wird eine Teillastfähigkeit der Wärmepumpe angenommen. Es ist zudem zu beachten, dass bei der Umrechnung auf die elektrische Leistung die Maximalleistung der Ausgewählten Wärmepumpe nicht mehr berücksichtigt wird und somit Überlastungen möglich sind. Für die Erzeugung eines Lastprofils mit Viertelstunden-Werten wird der jeweilige Stundenwert für die darauf folgenden drei Viertelstunden-Werte übernommen. In Abbildung 19 ist beispielhaft ein resultierendes Lastprofil für den Zeitraum vom 01.01.-14.07.2017 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Last sich trotz des erläuterten Fehlen eines Abgleichs mit der Maximalleistung von 14,5 kW überwiegend im Betriebsbereich der ausgewählten Wärmepumpe bewegt. Das kurzzeitige Erreichen der Maximallast wird für die Wärmepumpe als tolerierbar betrachtet.

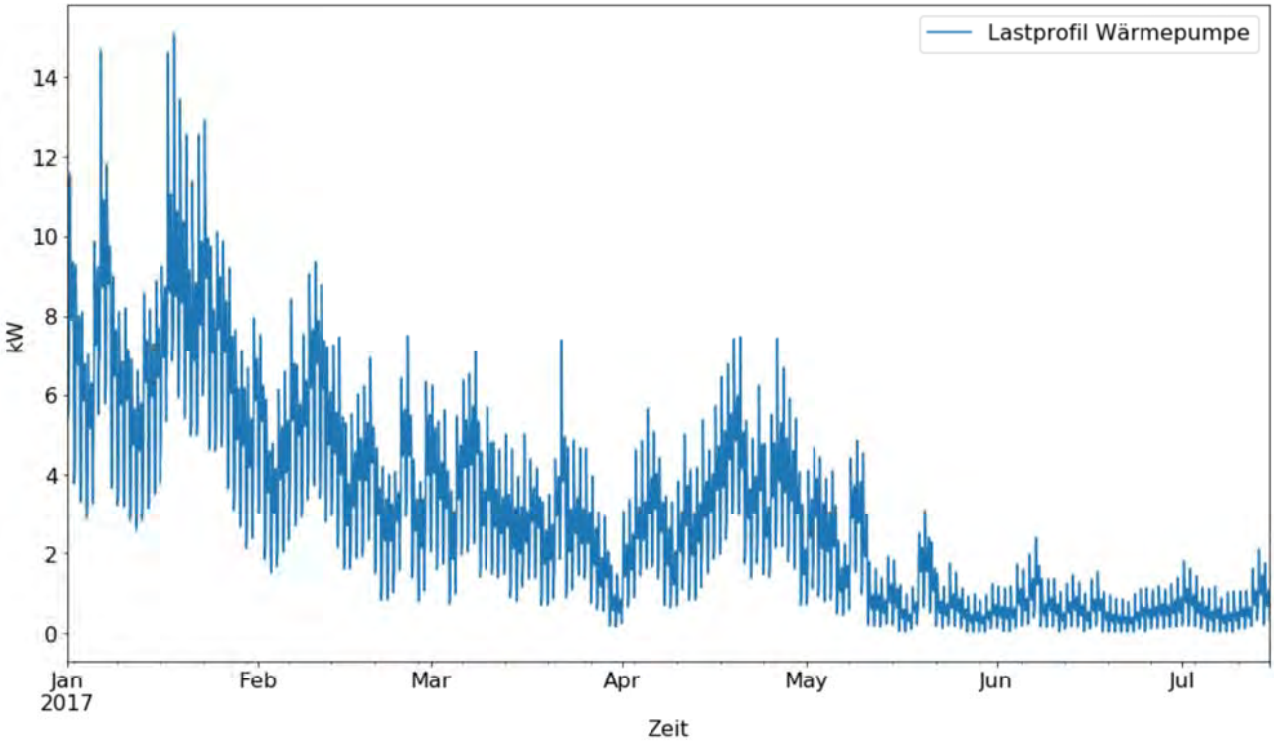

Abbildung 19: Lastprofil eines Mehrfamilienhauses des Typs "DE_HMF33" und einer Wärmepumpe mit einer Leistung von 14,5 kW

Aufsummiert und durch vier geteilt ergibt dieses Lastprofil den Jahresverbrauch der auf Basis der Stundenwerte ermittelt wurde. Das Lastprofil $P_W(t)$ wird auf das Grundlastprofil des Hauses aufaddiert.

5.5. Das batterieelektrische Fahrzeug

Für das batterieelektrische Fahrzeug wird ein Lastprofilgenerator auf Grundlage von [42] erstellt. In diesem Modell werden die Ankunftszeiten der Fahrzeuge auf Grundlage von real gemessenen Nutzerverhalten aus [22] ermittelt. Dies sorgt für eine realistischere Darstellung der Ergebnisse als sie durch die Nutzung von Standardlastprofilen möglich ist. In Abbildung 20 ist der Programmverlauf des Lastprofilgenerators als Flussdiagramm dargestellt.

Im ersten Schritt wird anhand des Datums der Wochentag ermittelt. Anhand des Wochentages wird aus einer Liste an Abfahrts- und Ankunftszeiten die Abwesenheit des Fahrzeugs aufgrund von Beruflichen- und Freizeittätigkeiten oder Wochenendausflügen zufällig ermittelt.

Die Abfahrt zur Arbeit variiert zwischen sieben und neun Uhr und die Rückkehr nach Hause zwischen 16 und 22 Uhr. Bei den Wochenendtrips variiert die Startzeit zwischen acht und zwölf Uhr und die Heimkehr zwischen 17 und 23 Uhr. Für jede Stunde der Abwesenheit wird der Akku des Fahrzeugs um 1 kWh bis zu einem wahlweise festzulegenden Minimum entladen. Durch dieses Verfahren kann ein Verbrauch bis zu 20 kWh pro Tag nachgestellt werden. Dies entspricht je nach Fahrzeugtyp einer Reichweite von maximal 100-200 km [43]. Dabei wird das Laden außerhalb des Hauses für die Erstellung dieses Lastprofils nicht betrachtet.

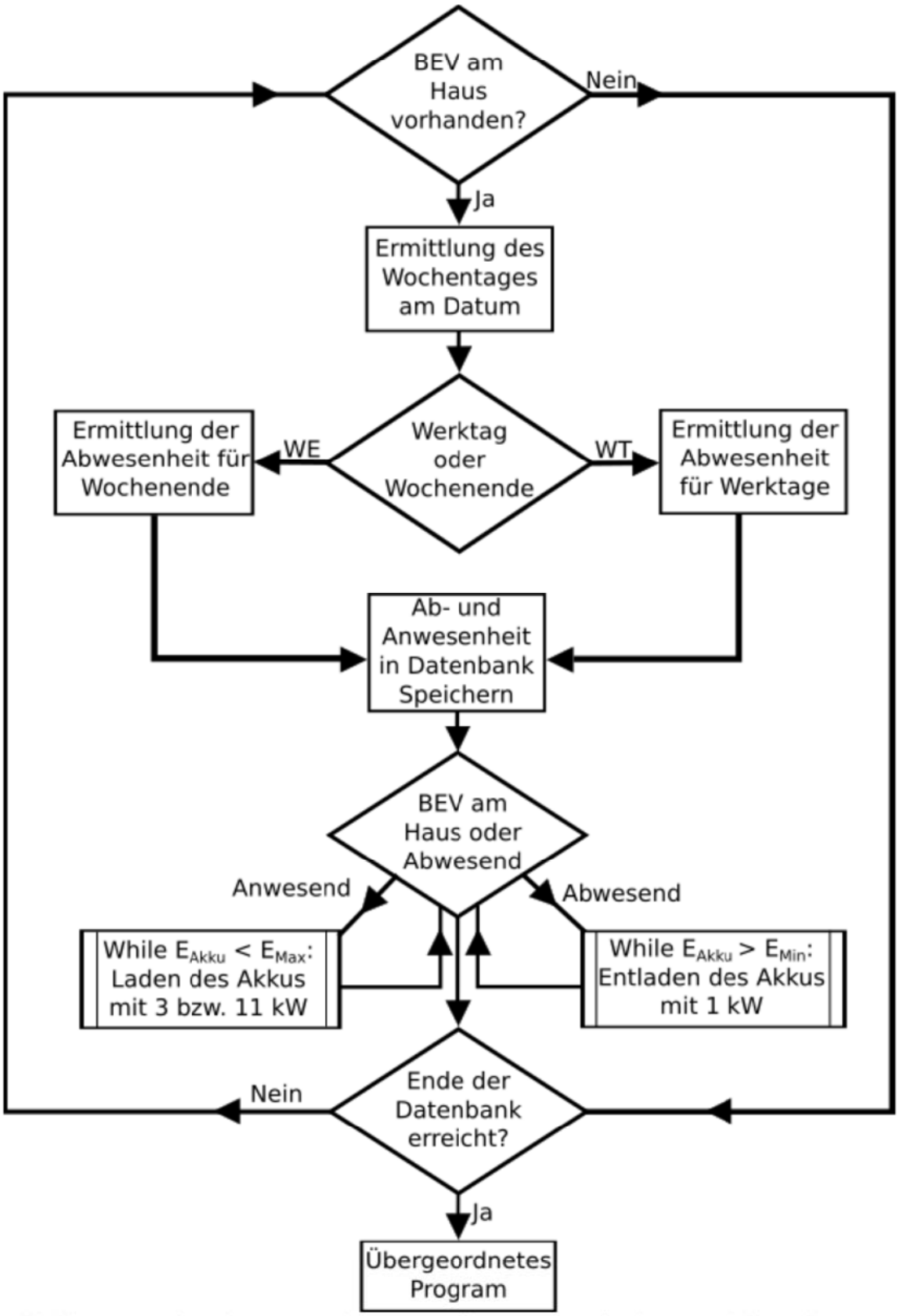

Abbildung 20: Flussdiagramm des Lastprofilgenerators für batterieelektrische Fahrzeuge

Während der Anwesenheitszeit am Haus, wird das Fahrzeug mit der maximalen Ladeleistung geladen, bis der Akku zu 100% gefüllt ist. In Abbildung 21 ist das Zusammenspiel von Lade- und Entladevorgang zu sehen. Der obere Verlauf zeigt den Ladezustand der batterieelektrischen Fahrzeuge an. Der untere Verlauf zeigt den Leistungsbezug der Ladestation. Aus Letzterem ergibt sich ein Lastprofil der Ladeeinrichtung $P_{BEV}(t)$, das auf das Grundlastprofil des jeweiligen Hauses aufaddiert wird.

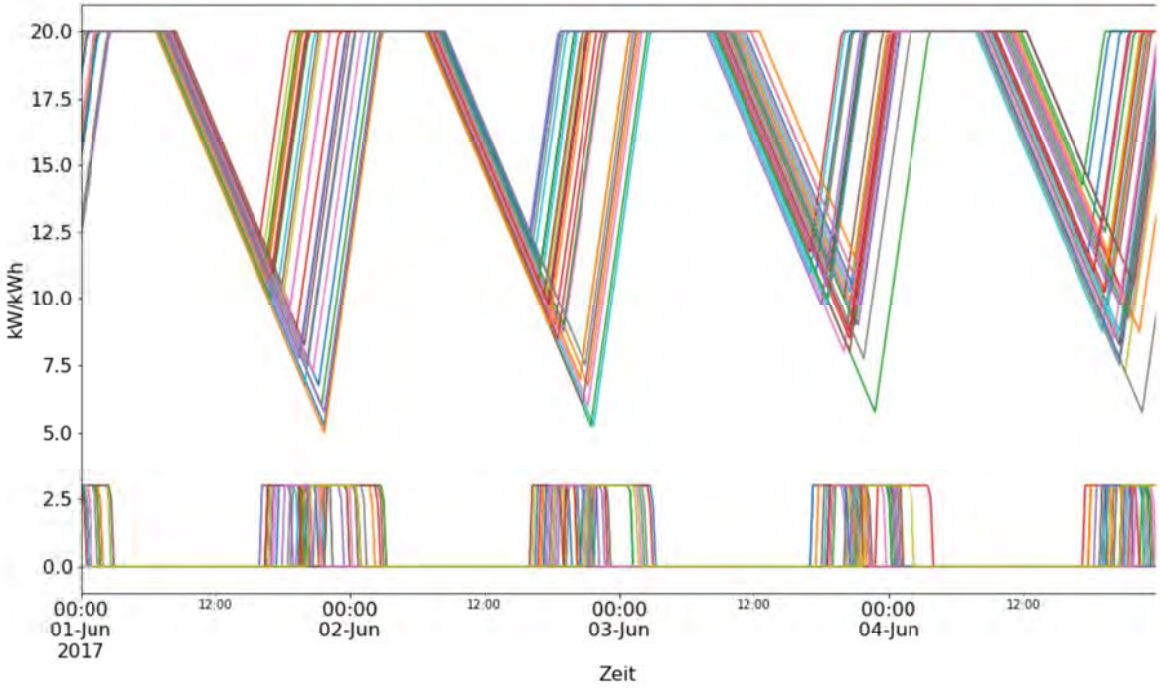

Abbildung 21: Auszug aus dem Lademuster der batterieelektrischen Fahrzeuge. Oben ist der Ladezustand des Fahrzeugs in kWh, unten der Leistungsbezug der Ladestation in kW dargestellt.

5.6. Der elektrische Heimspeicher

Für die Simulation des elektrischen Heimspeichers müssen alle bis hier hin erzeugten Lastprofile miteinander verrechnet sein. Zudem wird für die Vereinfachung der Berechnung das Vorzeichen geändert:

$$P_{Haus}(t) = (P_{Grundlast}(t) - P_{PV}(t) + P_W(t) + P_{BEV}(t)) - 1 \qquad (10)$$

In Abbildung 22 ist das Flussdiagramm für den Programmabschnitt des elektrischen Heimspeichers dargestellt. Wenn $P_{Haus}(t)$ positiv ist wird der Überschuss an elektrischer Energie in den Speicher eingespeichert. Wird $P_{Haus}(t)$ negativ, so wird der Speicher entladen. Dabei wird die einzuspeichernde oder auszuspeichernde Energie durch die Leistung des Wechselrichters begrenzt.
Ist der Speicher voll oder leer wird die elektrische Energie an das Netz abgegeben bzw. vom Netz aufgenommen. Dieser Restbetrag an elektrischer Energie resultiert in einem neuen Lastprofil $P_{Netz}(t)$, das am Hausanschlusskasten gemessen werden kann. Das Vorzeichen des Lastprofils wird vor der Rückgabe an die Datenbank erneut geändert. Die Datenbank mit diesem resultierenden Lastprofil wird exportiert, um in der Simulation des Niederspannungsnetzes genutzt werden zu können.

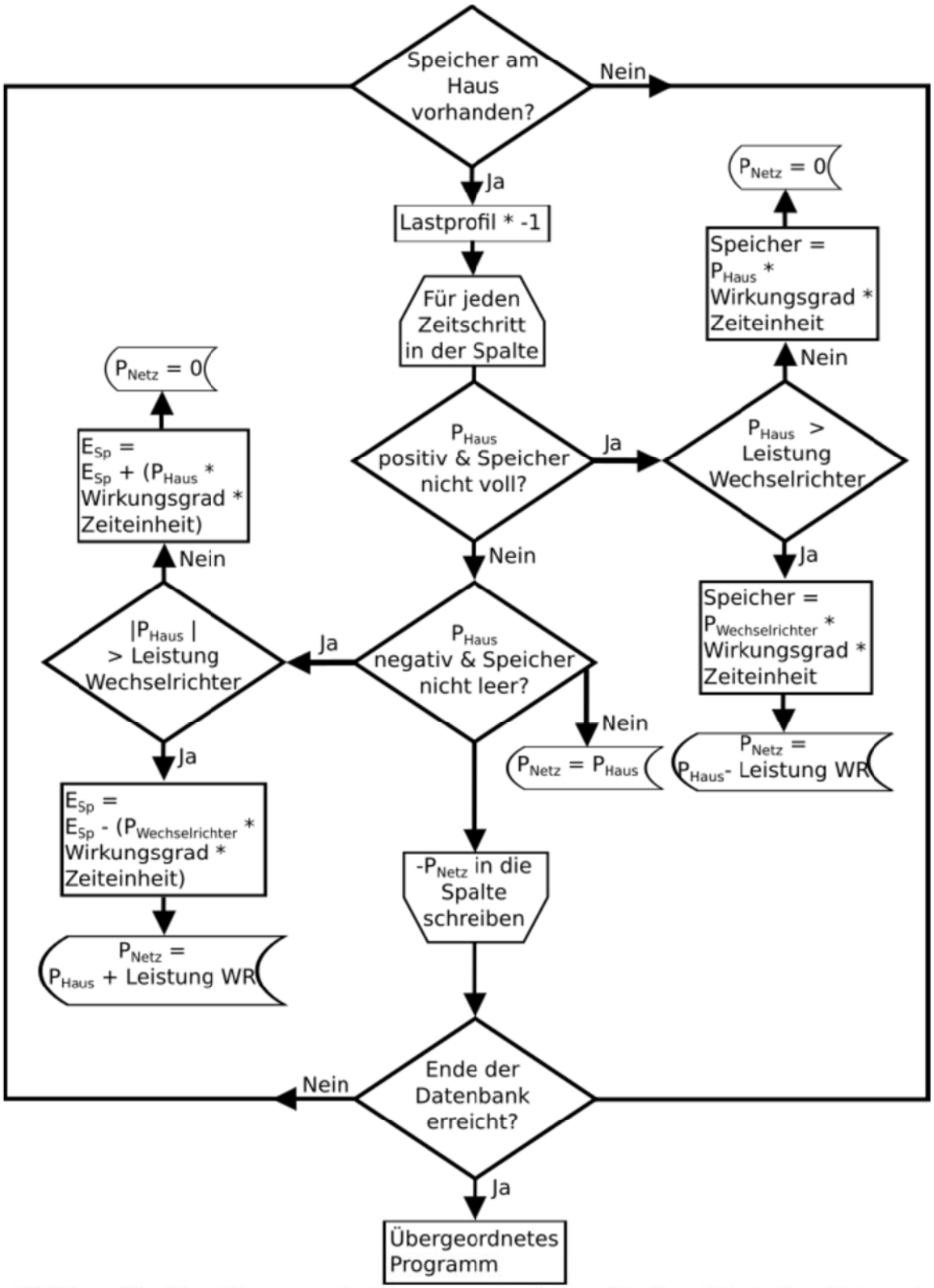

Abbildung 22: Flussdiagramm des Programmabschnittes für den elektrischen Heimspeicher