

## ÜBERSICHT

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist die Entwicklung eines auf dem Computeralgebrasystem Mathematica basierenden „Berechnungstools“ zur Kalkulation diverser Energiewende-Szenarien. Dieses wird durch jeweils eine auf Excel basierende Eingabe- und Ausgabemaske ergänzt.

Zur Aufnahme der Benutzereingaben wird ein dynamisches Flussdiagramm in Form einer Eingabemaske realisiert. Dieses teilt sich in die drei Hauptzweige der elektrischen, chemischen und kalorischen Energie (Wärmeenergie) auf. Dabei wird bei der chemischen Energie zwischen den Gasen Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) sowie bei kalorischer Energie zwischen Hoch- und Niedrigtemperatur unterschieden. Zur Realisierung der Funktionalität wird dabei die objektorientierte Programmiersprache „Visual Basic for Applications“ (VBA) verwendet.

Nach Abschluss der Eingabe werden die Benutzereingaben in Form einer Excel-Tabelle an das eigentliche Berechnungstool übergeben. Dort werden die Eingaben zunächst gefiltert, aufbereitet und mit zeitlich aufgelösten Daten zur elektrischen Last und regenerativ erzeugter sowie installierter Leistung ergänzt. Anschließend wird die installierte Leistung, welche sich in Windleistung an Land und auf See sowie Solarleistung aufteilt, in einem iterativen Prozess so angepasst, dass eine durch die Benutzereingaben abgesteckte regenerative Versorgung Deutschlands möglich wäre. Dabei gilt im Rahmen dieser Arbeit ein energetisches Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Energie als Definitionskriterium einer regenerativen Versorgung.

Nach erfolgter Berechnung werden die Ergebnisse durch Mathematica grafisch aufbereitet und in einer definierten Ordnerstruktur hinterlegt. Auf diese kann der Nutzer durch die Ausgabemaske, welche ebenfalls in Excel durch die Programmiersprache „Visual Basic for Applications“ (VBA) realisiert wird, zugreifen. Die Ausgabemaske wird ebenfalls als Flussdiagramm dargestellt und präsentiert die Berechnungsergebnisse auf eine intuitive und anwenderfreundliche Weise.

**Schlagwörter:** Energiewende, Mathematica, Excel, Berechnungstool, iterativ

**Zielsetzung und Abgrenzung:** Ziel dieser Arbeit ist es, die Energiewende in Zahlen zu fassen und greifbar zu machen. Dabei soll ein erster Überblick über die Kosten sowie die zu installierende, regenerative Leistung gegeben werden. Ebenfalls basieren sämtliche Berechnungen auf dem Prinzip einer verlustfreien Übertragung (Prinzip Kupferplatte). Trotz dieser Vereinfachung soll das Tool in der Lage sein, eine faktengestützte Aussage über die Umsetzbarkeit der Energiewende zu treffen.

## ABSTRACT

Subject of this thesis is the development of a "calculation tool" for a calculation of various energy transition scenarios, which is based on the computer-algebra-system Mathematica. An Excel-based input and output mask supplements this tool.

To record the user input, a dynamic flow chart is implemented. This flow chart represents the main part of the input mask and is divided into the three main branches (electrical-, chemical- and caloric-energy (heat energy)). Chemical energy is represented by the gases methane (CH<sub>4</sub>) and hydrogen (H<sub>2</sub>). Further the caloric energy is divided into high and low temperature. To implement the functionality, the object-oriented programming language "Visual Basic for Applications" (VBA) is used.

After completing the input, the user-entries are transferred to the actual calculation tool. This input will be filtered, processed and supplemented with time-resolved data of the electrical load as well as regenerative generated and installed power. Subsequently, the installed capacity, which is divided into wind power on land and at sea as well as solar power, is adjusted in an iterative process in such a way that it would be possible to provide Germany with a pure regenerative supply. In the context of this thesis, an energetic balance between generated and consumed energy defines the criterion of a regenerative supply.

As soon as the calculation is finished, the results are put into graphs by Mathematica and stored in a defined folder structure. Using the output mask, the user gets access to this structure. The mask is also designed as an "Visual Basic for Applications" (VBA) based flow chart and presents the calculation results in an intuitive and user-friendly way.

**Keywords:** energy transition, Mathematica, Excel, Calculation Tool, iterative

**Objectives and differentiation:** The aim of this thesis is to quantify the energy transition and to provide a first overview of the costs as well as the regenerative capacity that would need to be installed. All calculations are based on the principle of lossless transmission (copper plate principle). Despite this simplification, the tool should be able to make a fact-based statement about the feasibility of the Energiewende.

---

## DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Markus Löffler, welcher meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei all denen bedanken, welche mich während dieser Zeit durch fachbezogene Gespräche und Ratschläge bei der Durchführung der Arbeit unterstützt haben. Dazu gehört neben meinem Zweitprüfer M.Eng. Cristian Mutascu auch mein Kollege B.Eng. Jan Laubinger.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern Uwe und Bärbel Lux bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Mathematica	1
1.3	Entso-e	2
1.4	Netztransparenz	2
1.5	Datenbasis	2
1.5.1	Verläufe	2
1.5.2	Skalare Parameter	3
1.6	Gliederung der Arbeit	4
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Aufbau des Energiesystems	5
2.1.1	Der elektrische Zweig	6
2.1.2	Der chemische Zweig	7
2.1.3	Der kalorische Zweig	9
2.1.4	Der Abwärme-Zweig	11
2.2	Smart Grid	11
2.2.1	Grafische Erläuterung	12
2.2.2	Funktionstechnische Erläuterung	13
2.3	Kausalitätsproblem	16
2.3.1	Auftreten des Kausalitätsproblems	16
2.3.2	Lösen des Kausalitätsproblems	17
<b>3</b>	<b>Aufbau der Eingabemaske</b>	<b>19</b>
3.1	Flussdiagramm (Input_Mask)	19
3.2	Genereller Aufbau einer Eingabe-Oberfläche	22
3.3	Allgemeine Parameter der enthaltenen Komponenten	27
3.4	Hinzufügen / Löschen eines elektrischen Speichers / konventionellen Kraftwerks	30
3.5	Funktionsprinzip der Priorisierung	31
3.6	Der elektrische Zweig	32
3.6.1	E-Mobilität	33
3.6.2	Regenerative Anlagen	34
3.6.3	Regenerative Grundleistung	36
3.6.4	Erlaubte CO <sub>2</sub> -Emission pro Jahr	36

---

3.6.5	<i>Konventionelle Kraftwerke / Gaskraftwerke</i> .....	36
3.6.6	<i>Elektrische Speicher</i> .....	39
3.6.7	<i>Elektrische Last</i> .....	41
3.7	<b>Der Wasserstoff-Zweig</b> .....	42
3.7.1	<i>Gas-Mobilität (Wasserstoff)</i> .....	43
3.7.2	<i>Gas-to-Power (Wasserstoff)</i> .....	44
3.7.3	<i>Wasserstoffspeicher</i> .....	46
3.7.4	<i>Elektrolyse</i> .....	47
3.8	<b>Der Methan-Zweig</b> .....	48
3.8.1	<i>Gas-Mobilität (Methan)</i> .....	48
3.8.2	<i>Gas-to-Power (Methan)</i> .....	49
3.8.3	<i>Methanspeicher</i> .....	49
3.8.4	<i>Methanisierung</i> .....	49
3.9	<b>Der Niedrigtemperatur-Zweig</b> .....	50
3.9.1	<i>Direktwärme (zentral)</i> .....	51
3.9.2	<i>Direktwärme (dezentral)</i> .....	52
3.9.3	<i>Fernwärmespeicher</i> .....	53
3.9.4	<i>NT-Wärmespeicher</i> .....	54
3.9.5	<i>Gas-to-Heat (Methan)</i> .....	54
3.9.6	<i>Gas-to-Heat (Wasserstoff)</i> .....	56
3.9.7	<i>NT-Wärmebedarf</i> .....	56
3.10	<b>Der Hochtemperatur-Zweig</b> .....	58
3.10.1	<i>Direktwärme</i> .....	58
3.10.2	<i>HT-Wärmespeicher</i> .....	59
3.10.3	<i>Gas-to-Heat (Methan)</i> .....	59
3.10.4	<i>Gas-to-Heat (Wasserstoff)</i> .....	59
3.10.5	<i>HT-Wärmebedarf</i> .....	60
3.11	<b>Externe Schaltflächen</b> .....	61
3.11.1	<i>Grundeinstellungen Mobilität</i> .....	61
3.11.2	<i>Allgemeine Einstellungen</i> .....	62
3.11.3	<i>Kommerzielle Einstellungen</i> .....	65
3.11.4	<i>Zoom Schaltfläche</i> .....	66
3.11.5	<i>Reset Schaltfläche</i> .....	66
3.11.6	<i>Save &amp; Export Schaltfläche</i> .....	66

---

3.12	Weitere Tabellen der Eingabemaske .....	66
3.12.1	<i>Default_Parameter</i> .....	66
3.12.2	<i>User_Parameter</i> .....	67
3.12.3	<i>Settings</i> .....	67
3.12.4	<i>Hilfe Texte</i> .....	67
<b>4</b>	<b>Erläuterung des Mathematica Berechnungstools .....</b>	<b>68</b>
4.1	Masterprogramm .....	68
4.2	Unterprogramm: 1.Daten Import.nb .....	69
4.3	Unterprogramm: 2.Daten Aufbereitung und Anpassung.nb.....	71
4.3.1	<i>Speicher-Paket (StoragePack)</i> .....	74
4.3.2	<i>Speicherfüllstand-Paket (StorVIIPack)</i> .....	75
4.3.3	<i>Energiewandler-Paket (EnergyConverterPack)</i> .....	75
4.3.4	<i>Lasten-Paket (LoadPack)</i> .....	76
4.3.5	<i>Restleistungs-Paket (RestPowerPack)</i> .....	77
4.3.6	<i>Paket der konventionellen Anlagen (ConvPPlantPack)</i> .....	77
4.3.7	<i>Verluste-pro-Typ-Paket (LossesperTypePack)</i> .....	78
4.3.8	<i>Energiewandler Leistungs-Paket (EnergyConverterPowerPack)</i> .....	79
4.4	Unterprogramm: 3.Darstellung der Eingabeverläufe.nb .....	79
4.5	Unterprogramm: 4.Hauptprogramm.nb .....	80
4.5.1	<i>Iterationsschleife des Hauptprogramms</i> .....	81
4.6	Unterprogramm: 5.Ergebnisdarstellung.nb .....	88
4.7	Unterprogramm: 6.Export.nb .....	89
4.8	DeklarationsProgramm: Functions.nb.....	91
4.8.1	<i>Modul: UnitFactor</i> .....	91
4.8.2	<i>Modul: CalculateExpansion</i> .....	92
4.8.3	<i>Modul: CalculateDelta</i> .....	96
4.8.4	<i>Modul: ConvPPlantFit</i> .....	96
4.8.5	<i>Modul: SmartGrid</i> .....	98
4.8.6	<i>Modul: UseWasteHeat</i> .....	100
4.8.7	<i>Modul: CoverHeatGasLoad</i> .....	102
4.8.8	<i>Modul: GeneratingNeededH2</i> .....	104
4.8.9	<i>Modul: GeneratingNeededCH4</i> .....	107
4.8.10	<i>Modul: CoverDirectGasLoad</i> .....	109
4.8.11	<i>Modul: ChargeHeatStorage</i> .....	111

---

4.8.12	Modul: EHeating .....	113
4.8.13	Modul: ManageEStorCharge .....	115
4.8.14	Modul: GasToPower .....	117
4.8.15	Modul: StoreH2 .....	119
4.8.16	Modul: StoreCH4 .....	123
4.8.17	Modul: StoreWasteHeat.....	126
4.8.18	Modul: Selfdischarge .....	128
4.9	Inbetriebnahme des Berechnungstools.....	130
4.10	Exemplarische Berechnungsszenarien.....	131
4.10.1	Ausgangssituation .....	131
4.10.2	Berechnungsszenario 1 .....	137
4.10.3	Berechnungsszenario 2 .....	148
<b>5</b>	<b>Aufbau der Ausgabemaske.....</b>	<b>160</b>
5.1	Der elektrische Zweig .....	162
5.2	Die chemischen Zweige.....	163
5.3	Die kalorischen Zweige.....	165
5.4	Externe Schaltflächen.....	166
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblicke .....</b>	<b>168</b>
6.1	Zusammenfassung .....	168
6.2	Ausblicke .....	169

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Sankey-Diagramm des Gesamtsystems.....	5
Abbildung 2: Sankey-Diagramm des elektrischen Zweigs.....	6
Abbildung 3: Sankey-Diagramm des chemischen Zweigs.....	7
Abbildung 4: Sankey-Diagramm des kalorischen Zweigs.....	9
Abbildung 5: Residualleistung vor der Anwendung von Smart Grid .....	12
Abbildung 6: Residualleistung nach der Anwendung von Smart Grid.....	13
Abbildung 7: Smart Grid aus funktionstechnischer Sicht .....	14
Abbildung 8: Kreisprozess der Haupt-Iterationsschleife .....	17
Abbildung 9: Flussdiagramm der Eingabemaske .....	19
Abbildung 10: Exemplarischer Aufbau einer Parametrierungsoberfläche.....	22
Abbildung 11: Eingabe der seltenen Materialien .....	24
Abbildung 12: Eingabe eines nutzerdefinierten Namens .....	25
Abbildung 13: Auswahl einer Parametereinheit.....	25
Abbildung 14: Parametrierungsoberfläche vor dem Umblättern .....	26
Abbildung 15: Oberfläche zum Speichern vor dem Umblättern .....	26
Abbildung 16: Parametrierungsoberfläche nach dem Umblättern .....	26
Abbildung 17: Dynamische Komponenten des Flussdiagramms.....	30
Abbildung 18: Der elektrische Zweig (Flussdiagramm) .....	32
Abbildung 19: Parameter der Elektro-Mobilität.....	33
Abbildung 20: Parameter der regenerativen Erzeuger .....	34
Abbildung 21: Parameter der konventionellen Erzeuger .....	37
Abbildung 22: Parameter der elektrischen Speicher .....	39
Abbildung 23: Parameter der elektrischen Last.....	41
Abbildung 24: Der Wasserstoff-Zweig (Flussdiagramm) .....	42
Abbildung 25: Parameter der Gas-Mobilität .....	43
Abbildung 26: Parameter der Gas-to-Power & Power-to-Gas .....	44
Abbildung 27: Parameter der Gasspeicher .....	46
Abbildung 28: Der Methan-Zweig (Flussdiagramm) .....	48
Abbildung 29: Der Niedrigtemperatur-Zweig (Flussdiagramm).....	50
Abbildung 30: Parameter der Direktwärme .....	51
Abbildung 31: Parameter der Wärmespeicher .....	53

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 32: Parameter der Gas-to-Heat.....	55
Abbildung 33: Parameter der Niedrigtemperatur-Wärmelast.....	56
Abbildung 34: Der Hochtemperatur-Zweig (Flussdiagramm).....	58
Abbildung 35: Parameter der Hochtemperatur Wärmelast.....	60
Abbildung 36: Parameter der Grundeinstellungen zur Mobilität.....	61
Abbildung 37: Parameter der allgemeinen Einstellungen.....	62
Abbildung 38: Parameter der kommerziellen Einstellungen.....	65
Abbildung 39: Flussdiagramm der Iterationsschleife.....	82
Abbildung 40: Flussdiagramm des Containers: Datenreihen Initialisierung.....	83
Abbildung 41: Flussdiagramm des Containers: Gas Management.....	84
Abbildung 42: Flussdiagramm des Containers: Elektrische Speicher.....	85
Abbildung 43: Flussdiagramm des Containers: P2G/G2P.....	86
Abbildung 44: Flussdiagramm des Containers: Datenreihen Abschluss.....	87
Abbildung 45: Elektrischer Lastverlauf nach Smart Grid (Validierung).....	99
Abbildung 46: Endenergieverbrauch für Wärmezwecke [26].....	137
Abbildung 47: Allgemeine Informationen Berechnungsszenario 1.....	139
Abbildung 48: Regenerative Erzeuger Berechnungsszenario 1.....	139
Abbildung 49: Dauerlinie Berechnungsszenario 1.....	140
Abbildung 50: Verlauf des Energiegleichgewichts Berechnungsszenario 1.....	141
Abbildung 51: Verlauf der Elektrolyse Berechnungsszenario 1.....	142
Abbildung 52: Wasserstoff-Import Berechnungsszenario 1.....	143
Abbildung 53: Elektrischer Export Berechnungsszenario 1.....	144
Abbildung 54: Jährliche Investitionskosten Berechnungsszenario 1.....	145
Abbildung 55: Benötigte Flächen Berechnungsszenario 1.....	146
Abbildung 56: Gesamtübersicht der Energien Berechnungsszenario 1.....	147
Abbildung 57: Allgemeine Informationen Berechnungsszenario 2.....	150
Abbildung 58: Regenerative Erzeuger Berechnungsszenario 2.....	151
Abbildung 59: Dauerlinie Berechnungsszenario 2.....	151
Abbildung 60: Verlauf des Energiegleichgewichts Berechnungsszenario 2.....	152
Abbildung 61: Verlauf der Elektrolyse Berechnungsszenario 2.....	153
Abbildung 62: Wasserstoff-Importe Berechnungsszenario 2.....	154
Abbildung 63: Wasserstoff-Speicherverlauf Berechnungsszenario 2.....	155

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 64: Elektrischer Export Berechnungsszenario 2 .....	156
Abbildung 65: Jährliche Investitionskosten Berechnungsszenario 2.....	157
Abbildung 66: Benötigte Fläche Berechnungsszenario 2 .....	158
Abbildung 67: Gesamtübersicht der Energien Berechnungsszenario 2.....	159
Abbildung 68: Flussdiagramm der Ausgabemaske .....	160
Abbildung 69: Oberfläche der Ergebnisdarstellung .....	161
Abbildung 70: Der elektrische Zweig (Ausgabemaske) .....	162
Abbildung 71: Der chemische Zweig (Ausgabemaske) .....	163
Abbildung 72: Der kalorische Zweig (Ausgabemaske) .....	165

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Parameterblock der elektrischen Speicher .....	70
Tabelle 2: Ausgangssituation Validierung des Moduls: ConvPPlantFit .....	97
Tabelle 3: Jahresenergie konventionelles Kraftwerk (Validierung) .....	97
Tabelle 4: Ausgangssituation Validierung des Moduls: SmartGrid .....	98
Tabelle 5: Jahresenergien der elektrischen Last nach Smart Grid (Validierung) .....	98
Tabelle 6: Ausgangssituation Validierung des Moduls: UseWasteHeat.....	100
Tabelle 7: Validierung des Moduls: UseWasteHeat .....	101
Tabelle 8: Ausgangssituation Validierung des Moduls: CoverHeatGasLoad .....	102
Tabelle 9: Validierung des Moduls: CoverHeatGasLoad .....	103
Tabelle 10: Ausgangssituation Validierung des Moduls: GeneratingNeededH2 .....	104
Tabelle 11: Validierung des Moduls: GeneratingNeededH2.....	106
Tabelle 12: Ausgangssituation Validierung des Moduls: GeneratingNeededCH4.....	107
Tabelle 13: Validierung des Moduls: GeneratingNeededCH4 .....	109
Tabelle 14: Ausgangssituation Validierung des Moduls: CoverDirectGasLoad .....	109
Tabelle 15: Validierung des Moduls: CoverDirectGasLoad .....	110
Tabelle 16: Ausgangssituation Validierung des Moduls: ChargeHeatStorage .....	111
Tabelle 17: Validierung des Moduls: ChargeHeatStorage.....	113
Tabelle 18: Ausgangssituation Validierung des Moduls: EHeating.....	113
Tabelle 19: Validierung des Moduls: EHeating.....	114
Tabelle 20: Ausgangssituation Validierung des Moduls: ManageEStorCharge .....	115
Tabelle 21: Validierung des Moduls: ManageEStorCharge .....	116
Tabelle 22: Ausgangssituation Validierung des Moduls: GasToPower .....	117
Tabelle 23: Validierung des Moduls: GasToPower.....	119
Tabelle 24: Ausgangssituation Validierung des Moduls: StoreH2 .....	120
Tabelle 25: Validierung des Moduls: StoreH2 .....	122
Tabelle 26: Ausgangssituation Validierung des Moduls: StoreCH4.....	123
Tabelle 27: Validierung des Moduls: StoreCH4.....	125
Tabelle 28: Ausgangssituation Validierung des Moduls: StoreWasteHeat.....	126
Tabelle 29: Validierung des Moduls: StoreWasteHeat .....	127
Tabelle 30: Ausgangssituation Validierung des Moduls: Selfdischarge.....	128
Tabelle 31: Validierung des Moduls: Selfdischarge.....	129

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 32: Entwicklungsumgebung des Berechnungstools.....	130
Tabelle 33: Parametrierung der elektrischen Speicher (exemplarische Berechnungsszenarien)...	132
Tabelle 34: Parametrierung der Gasspeicher (exemplarische Berechnungsszenarien).....	132
Tabelle 35: Parametrierung der Wärme-Speicher (exemplarische Berechnungsszenarien).....	133
Tabelle 36: Parametrierung der Power-to-Gas Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien).	133
Tabelle 37: Parametrierung der Gas-to-Power Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien).	134
Tabelle 38: Parametrierung der Gas-to-Heat Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien) ...	134
Tabelle 39: Parametrierung der Power-to-Heat Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien)	135
Tabelle 40: Parametrierung der regenerativen Erzeuger (exemplarische Berechnungsszenarien)	136
Tabelle 41: Parametrierung der reg. Grundeinspeisung (exemplarische Berechnungsszenarien).	136
Tabelle 42: Parametrierung der konv. Kraftwerke (exemplarische Berechnungsszenarien) .....	136
Tabelle 43: Parametrierung der Last durch Mobilität (Berechnungsszenario 1) .....	137
Tabelle 44: Parametrierung der Niedrigtemperatur-Last (Berechnungsszenario 1) .....	138
Tabelle 45: Parametrierung der Hochtemperatur-Last (Berechnungsszenario 1).....	138
Tabelle 46: Parametrierung der Last durch Mobilität (Berechnungsszenario 2) .....	148
Tabelle 47: Parametrierung der Niedrigtemperatur-Last (Berechnungsszenario 2).....	149

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 MOTIVATION

Bereits im Jahr 2017 veröffentlichte das Energieinstitut der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen die erste Version des Energiewendeplaners. Durch diese sind Nutzer bereits in der Lage die Energieflüsse im deutschen Energiesystem 2050 nach ihren Vorstellungen zu planen.

Durch diverse Präsentationen und anschließende Diskussionen der ersten Version wurden Änderungs- sowie Verbesserungsvorschläge geäußert.

Motivationsgrundlage und somit auch Ziel dieser Arbeit ist die Umsetzung der angebrachten sowie selbsterbrachten Vorschläge und Anregungen. Dazu gehören neben einer Verbesserung der Eingabemaske und der Ergebnisdarstellungen auch die Berücksichtigung des Lastmanagements (Smart-Grid) sowie eine engere Sektorkopplung.

Ebenfalls erhält die zweite Version des Energiewendeplaners durch die Neuentwicklung der internen Routinen eine klare und leichter zu durchschauende Struktur. Dadurch sollen Entscheidungen und Abläufe klar erkenn- und nachvollziehbar sein.

Zuletzt wird die hier vorgestellte Version sowohl in ihrer Struktur als auch der Abarbeitungsreihenfolge eine maximale Modularität aufweisen, wodurch Änderungen leichter umsetzbar sind.

## 1.2 MATHEMATICA

Bei Mathematica handelt es sich um ein Softwarepaket des Unternehmens Wolfram Research, welches im Jahr 1998 in der Version „Mathematica 1.0“ veröffentlicht wurde. Kern dieser Software ist ein „Computeralgebrasystem“ zur symbolischen Verarbeitung von Gleichungen. Ebenfalls verfügt es über umfangreiche Möglichkeiten der grafischen Darstellung in 2D sowie in 3D [1].

Aufgrund dessen Fähigkeit große Datenmengen schnell und leistungsstark einzulesen und zu manipulieren bietet Mathematica die perfekte Grundlage für die, in dieser Arbeit angestrebte, Funktionalität. Ebenfalls besitzt Mathematica das weltweit größte integrierte Netzwerk von Algorithmen, welches die Realisierung des Berechnungstools übersichtlich und effizient gestaltet [2].

## 1.3 ENTSO-E

Das Synonym „Entso-e“ bedeutet „European Network of Transmission System Operators for Electricity“. Dabei handelt es sich um einen Verbund aus insgesamt 43 Übertragungsnetzbetreibern in 36 europäischen Ländern. Über die, durch diesen Zusammenschluss bereitgestellte, „Transparency Platform“ („Transparenzplattform“) werden der breiten Öffentlichkeit Informationen zu erzeugten und verbrauchten Energien zugänglich gemacht. Dabei können die gewünschten Daten sowohl manuell auf der Website eingesehen als auch automatisiert von einem SFTP-Server geladen werden [3].

Letzteres Verfahren wurde in diversen vorangegangenen Projekten genutzt, um die Rohdaten zur regenerativ erzeugten Leistung sowie die des Bruttostromverbrauchs über die Jahre 2015 bis 2019 für das hier vorgestellte Berechnungstool bereitzustellen.

## 1.4 NETZTRANSPARENZ

Netztransparenz bzw. die Website „Netztransparenz.de“ wird ähnlich wie die in Sektion 1.3 beschriebene Transparenzplattform durch einen Zusammenschluss von Übertragungsnetzbetreibern bereitgestellt. Dabei handelt es sich um die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber 50herz, Amprion, TenneT und TransnetBW. Daten dieser Website zur installierten Leistung der drei, in dieser Arbeit berücksichtigten, regenerativen Anlagentypen wurden für die Datenbasis des Berechnungstools herangezogen [4].

Ähnliche Datensätze wären auch über die Website der Entso-e verfügbar gewesen, jedoch stellt „Netztransparenz.de“ eine feinere Auflösung bereit.

## 1.5 DATENBASIS

Die Datenbasis der Berechnung besteht generell aus zwei Komponenten. Dabei wird zwischen Verläufen und skalaren Parametern unterschieden. Beide Arten werden folgend genauer betrachtet.

---

### 1.5.1 Verläufe

Bei den Verläufen handelt es sich um zeitlich aufgelöste Verläufe der regenerativ erzeugten Energie, der regenerativ installierten Leistungen und der Last des elektrischen Bruttostromverbrauchs. Abgesehen vom Verlauf der installierten Leistungen werden diese Daten durch die Entso-e Transparency Platform, welche bereits in Sektion 1.3 vorgestellt wurde, bereitgestellt. Die „Rohdaten“ weisen aufgrund von Ausfällen oder Unregelmäßigkeiten Lücken auf und wurden im Rahmen weiterer Projekte des Labors für Hochspannungs- und Hochleistungspulstechnik der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen aufbereitet. Die Daten der installierten Leistungen werden von der Website

„Netztransparenz.de“ bereitgestellt. (siehe Sektion 1.4). Analog zu den „Rohdaten“ von Entso-e werden auch die Daten zur installierten Leistung aufbereitet.

Die statischen Verläufe werden im Rahmen der Berechnungen genutzt, um das qualitative Verhalten einer Anlage bzw. das Verhalten des Bruttostromverbrauchs zu simulieren. Dabei werden die Verläufe je nach zu installierender Leistung bzw. geforderter Jahresenergie angepasst. Damit ist das Berechnungstool in der Lage das Energiesystem möglichst realitätsnah zu simulieren.

---

### 1.5.2 Skalare Parameter

Bei den skalaren Parametern handelt es sich um die Parameter der Eingabemaske, welche durch den Anwender variiert werden können. Das Berechnungstool stellt einen Satz aus Standardparametern, diese haben einen direkten Einfluss auf die Berechnungen und versuchen das Energiesystem möglichst gut zu beschreiben. Diese Parameter können durch die Eingabemaske verändert werden.

## 1.6 GLIEDERUNG DER ARBEIT

Nachdem in der Einleitung das Ziel der Arbeit und dessen Komponenten grob umrissen werden, befasst sich Kapitel 2 mit den theoretischen Grundlagen. Dazu gehört unter anderem der, in dieser Arbeit verwendete, angenäherte Aufbau des deutschen Energiesystems und die mathematischen Grundlagen der Berechnungen.

Das daran anschließende Kapitel 3 erläutert den Aufbau der Eingabemaske. Dazu gehört das, zur Parametereingabe realisierte, Flussdiagramm des betrachteten Energiesystems sowie die weiteren Untertabellen der Datei: „Input\_Mask.xlsx“. Im Laufe dieses Kapitels werden die einzelnen Zweige (elektrisch, chemisch und kalorisch) genau wie deren enthaltenen Komponenten einzeln betrachtet. Dies beinhaltet ebenfalls eine Erläuterung der Parametrierungsoberflächen wie auch deren zugeordneten Parameter.

Weiter befasst sich Kapitel 4 mit den Mathematica-basierten Berechnungen. Diese teilen sich neben einem Masterprogramm in sechs strukturierte Unterprogramme auf, deren Aufbau und Funktion einzeln erläutert wird. Ebenfalls werden an dieser Stelle die manuell definierten Funktionen des Berechnungstools auf Plausibilität geprüft. Dabei werden, basierend auf einer beispielhaft definierten Ausgangssituation, die internen Routinen in mathematischen Formeln zusammengefasst und deren Ergebnisse mit den realen Rückgabewerten der Funktionen verglichen. Das Ende des Kapitels bilden zwei exemplarische Berechnungsszenarien. Dabei simuliert das erste Szenario ein mögliches Energiesystem der Zukunft, welches die Lasten der Gegenwart decken soll. Im zweiten Szenario wird errechnet, wie das gleiche System auf die angenommenen Lasten des Jahres 2050 reagiert.

Anschließend erläutert Kapitel 5 den Aufbau der Ergebnisdarstellung. Dabei wird das in der Eingabemaske integrierte Flussdiagramm beschrieben. Weiter werden in diesem Kapitel die grafischen Darstellungen der Berechnung erörtert und aufgeführt, wie diese durch die Ausgabemaske einsehbar sind.

Zuletzt beinhaltet Kapitel 6 die Zusammenfassung wie auch die Ausblicke der hier vorgestellten Arbeit. Dabei werden die dargestellten Arbeiten zusammengefasst sowie potentielle Verbesserungen und Erweiterungen der Software aufgeführt.

## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 2.1 AUFBAU DES ENERGIESYSTEMS

Das Energiesystem eines Landes besteht aus einer komplexen Verknüpfung zwischen Erzeugern, Verteilern, Verbrauchern und Speichern. Um dieses System quantitativ möglichst genau nachzubilden, zeigt Abbildung 1 das Sankey-Diagramm des nachgebildeten Energiesystems. Weiter wird dieses im Rahmen dieser Arbeit in drei Hauptzweige unterteilt.

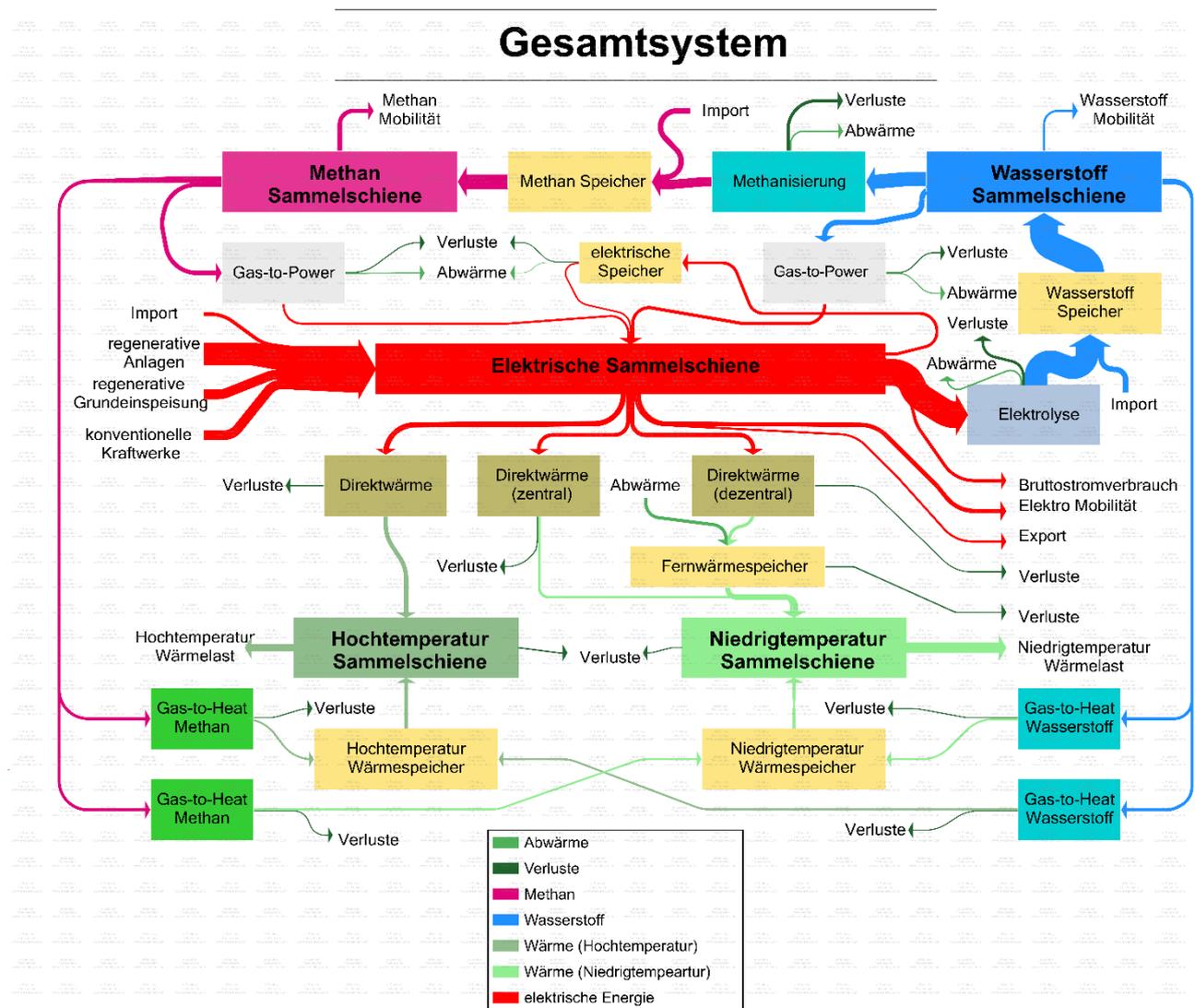


Abbildung 1: Sankey-Diagramm des Gesamtsystems

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es sich bei sämtlichen angegebenen Leistungen aufgrund der zeitlichen Auflösung des Berechnungstools um stündliche Mittelwerte handelt. Somit sind diese als „Energie/Stunde“ bzw. „Wh/h“ zu verstehen.

### 2.1.1 Der elektrische Zweig

Abbildung 2 zeigt das Sankey-Diagramm des elektrischen Zweigs. In ihm wird sämtliche Energie erzeugt und auf die weiteren Zweige verteilt. Dabei zeigt die linke Seite des Diagramms die Erzeuger und die rechte Seite sämtliche Verbraucher an elektrischer Energie.

Die erzeugte Energie wird sowohl zum Decken der direkten elektrischen Last, welche sich in Bruttostromverbrauch und Elektro-Mobilität aufteilt, als auch zur Versorgung der chemischen Zweige mittels Power-to-Gas und zur Versorgung der kalorischen Zweige mittels Power-to-Heat verwendet.

Auf der Erzeugerseite bilden die regenerativen Anlagen und die regenerative Grundeinspeisung den festen Bestandteil. Auf konventionelle Kraftwerke und Importe wird nur im akuten Bedarfsfall zurückgegriffen.

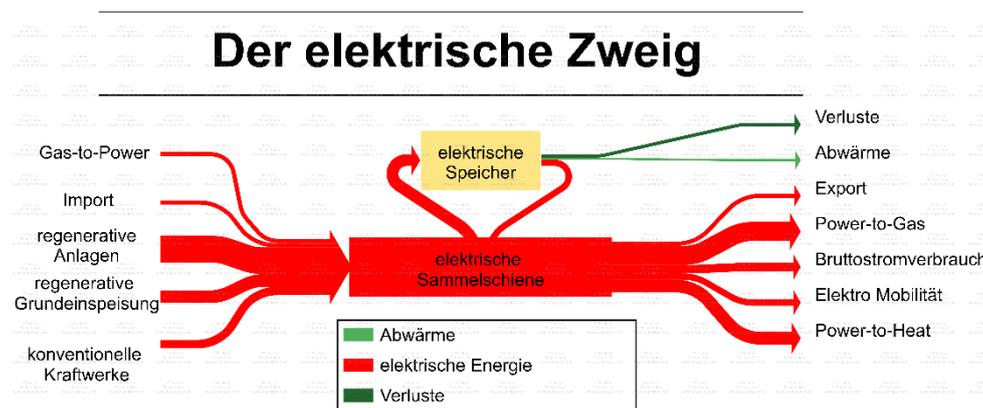


Abbildung 2: Sankey-Diagramm des elektrischen Zweigs

Die Differenz aus erzeugter Leistung und direkter elektrischer Last wird als Residualleistung bezeichnet. Diese kann dabei sowohl positive als auch negative Leistungen enthalten. Die negativen Leistungen sind dabei als „ungedeckte“ Last zu verstehen und müssen durch konventionelle Kraftwerke, elektrische Speicher, Gas-to-Power oder Importe gedeckt werden.

Zu den Erzeugern gehören neben den drei regenerativen Quellen (Windanlagen auf See, Windanlagen an Land und Solaranlagen) auch die konventionellen Kraftwerke. Diese müssen kein fester Bestandteil des Energiesystems sein und können durch den Benutzer frei hinzugefügt oder entfernt werden. Dies räumt dem Nutzer die Möglichkeit ein, einen Teil der benötigten Energie aus konventionellen Quellen zu beziehen. Diese Kraftwerke werden im Laufe der Berechnung genutzt, um die negativen Teile der Residualleistung zu beseitigen. Dabei sind die Kraftwerke sowohl durch ihre Leistung als auch durch ihre maximal erlaubte, jährliche CO<sub>2</sub>-Emmission begrenzt.

Den letzten Teil des elektrischen Zweigs bilden die elektrischen Speicher. Dabei ist die Anzahl der Speicher durch den Anwender im Wertebereich zwischen eins und fünf frei wählbar. Diese Speicher, deren Priorität untereinander ebenfalls dynamisch ist, stellen die erste Instanz zum Aufnehmen überschüssiger oder Abgeben fehlender Residualleistung dar.

### 2.1.2 Der chemische Zweig

Abbildung 3 zeigt das Sankey-Diagramm des chemischen Zweigs. Dieser teilt sich in zwei weitere miteinander verbundene Unterzweige auf, welche folgend getrennt betrachtet werden.

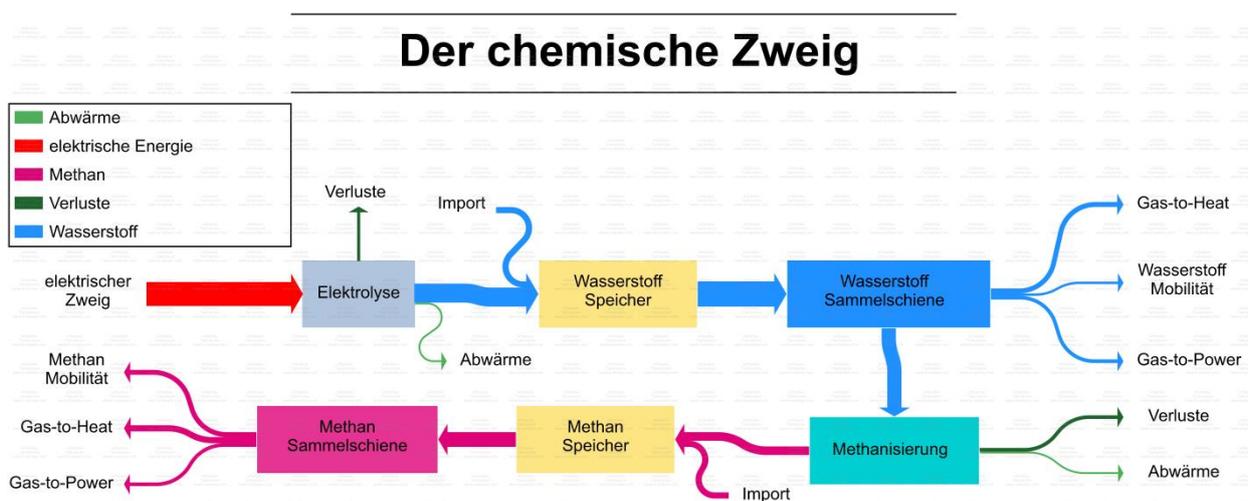


Abbildung 3: Sankey-Diagramm des chemischen Zweigs

#### 2.1.2.1 Der Wasserstoff-Zweig

Der Wasserstoff-Zweig wird direkt über die Elektrolyse aus dem elektrischen Zweig gespeist und speichert den erzeugten Wasserstoff zunächst im Wasserstoffspeicher. Aus diesem Speicher kann anschließend über die Wasserstoff-Sammelschiene die Wasserstoff-Last in Form der Wasserstoff-Mobilität, der kalorischen Wasserstoff-Last und des Methan-Zweigs gedeckt werden. Außerdem kann der gespeicherte Wasserstoff bei Bedarf durch Gaskraftwerke und Brennstoffzellen rückverstromt werden. Sollten die Lasten des Wasserstoff-Zweigs nicht durch die Elektrolyse gedeckt werden können, kann ebenfalls auf Importe zurückgegriffen werden. Gründe für einen Mangel an Wasserstoff können dabei die installierte Leistung der Elektrolyse oder ein Fehlen von elektrischer Residualleistung sein.

### 2.1.2.2 Der Methan-Zweig

Der Methan-Zweig wird direkt über die Methanisierung durch den Wasserstoff-Zweig gespeist und speichert das erzeugte Methan zunächst im Methanspeicher. Aus diesem Speicher kann anschließend die Methan-Last in Form der Methan-Mobilität und der kalorischen Methan-Last gedeckt werden. Sollte die Last des Methan-Zweigs nicht durch die Methanisierung gedeckt werden können, kann ebenfalls auf Importe zurückgegriffen werden. Gründe für einen Mangel an Methan können dabei die installierte Leistung der Methanisierung oder ein Fehlen von Wasserstoff darstellen. Dabei ist zu beachten, dass Wasserstoff-Importe, bei ausreichender Methanisierungsleistung, den Methan-Importen vorgezogen werden. Grund für diese Maßnahme sind die geringeren Verluste bei der Herstellung und die höhere Energiedichte des Wasserstoffs.

### 2.1.2.3 Importverhalten im chemischen Zweig

Eine Grundregel des chemischen Zweigs ist das Auslassen von Stromimporten zur Erzeugung von Wasserstoff oder Methan. Generell wäre es möglich, bei fehlendem Wasserstoff, ausreichender Elektrolyseleistung und fehlender elektrischer Residualleistung, Strom aus dem Ausland zu importieren, um den Bedarf zu decken. Dies wird aufgrund folgender Zusammenhänge vermieden:

- Ein Fehlen von nötiger elektrischer Leistung zum Betreiben der Elektrolyse oder der Methanisierung ist i.d.R. auf einen Mangel an regenerativer Energie zurückzuführen. Zu diesem Zeitpunkt gehen wir davon aus, dass in den Nachbarländern, welche für den nötigen Stromimport sorgen könnten, die regenerativen Quellen auch nicht verfügbar sind. So müsste entweder Energie aus ausländischen Speichern ausgespeichert oder Gas rückverstromt werden. Dies würde den Anlass der Importe ad absurdum führen.

### 2.1.3 Der kalorische Zweig

Abbildung 4 zeigt das Sankey-Diagramm des kalorischen Zweigs. Dieser teilt sich, wie der chemische Zweig (Abschnitt 2.1.2), in zwei separat zu betrachtende Unterzweige auf.

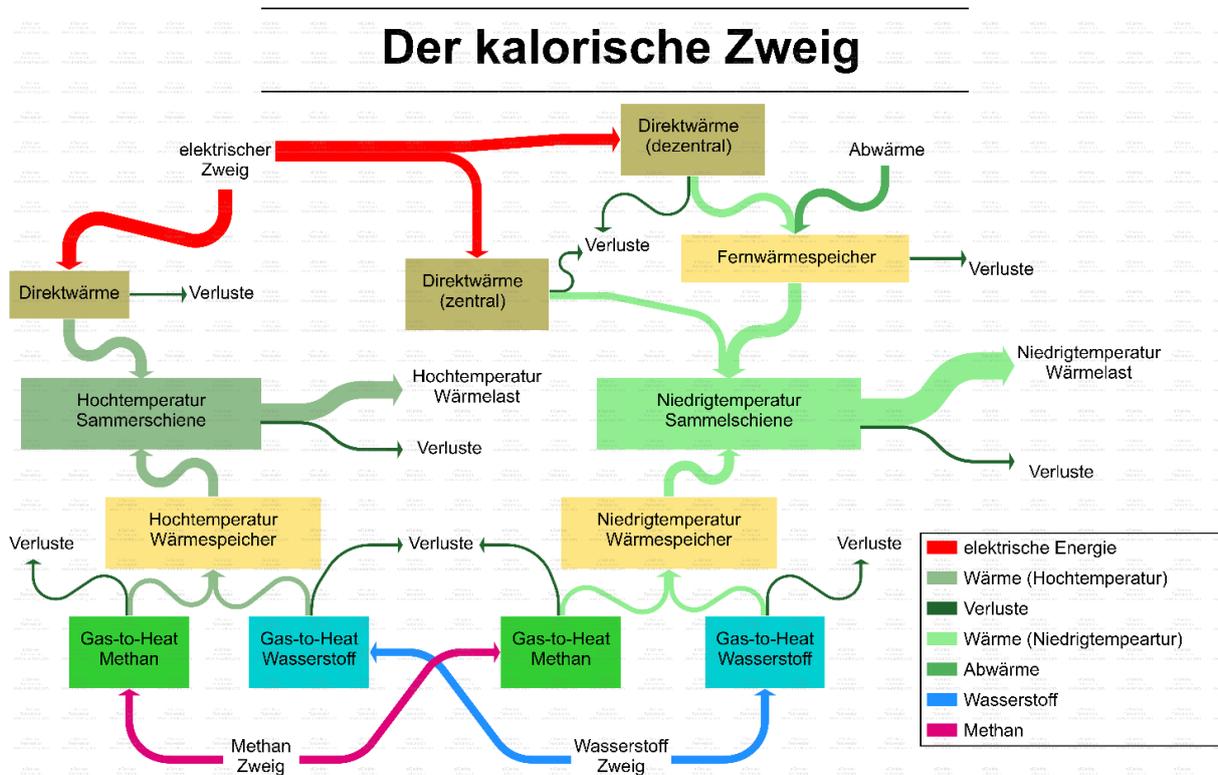


Abbildung 4: Sankey-Diagramm des kalorischen Zweigs

#### 2.1.3.1 Der Niedrigtemperatur-Zweig

Der Niedrigtemperatur-Zweig behandelt Temperaturniveaus von unter 300°C, welche sowohl zentral als auch dezentral erzeugt und durch Abwärme anderer Komponenten gedeckt werden können. Dabei durchläuft die dezentral erzeugte kalorische Energie sowie die erzeugte Abwärme zunächst das Fernwärmenetz, welches als Fernwärmespeicher fungiert und repräsentiert wird.

Abgesehen von der zentral erzeugten Leistung, muss auch die durch die Verbrennung von Gas erzeugte Leistung zunächst einen Wärmespeicher durchlaufen. Die Erläuterung für dieses Vorgehen ist dem Unterabschnitt 2.1.3.3 zu entnehmen.

### 2.1.3.2 *Der Hochtemperatur-Zweig*

Der Hochtemperatur-Zweig behandelt Temperaturniveaus von über 300°C. Dabei handelt es sich i.d.R. um Prozesswärme der Industrie oder ähnlichen Abnehmern. Der wichtigste Unterschied zum Niedrigtemperatur-Zweig besteht darin, dass die benötigte Wärme nicht dezentral erzeugt oder durch die Abwärme anderer Komponenten ergänzt werden kann. So kann die Hochtemperatur-Last entweder durch elektrische Direktwärme oder durch Gasverbrennung (Wasserstoff und Methan) gedeckt werden. Dabei muss die kalorische Energie aus Gas zunächst einen Speicher passieren. Diese Tatsache wird im folgenden Unterabschnitt genauer erläutert.

### 2.1.3.3 *Erläuterung der kalorischen Speicher*

Folgend soll die Funktion der kalorischen Speicher erörtert werden. Diese sind im Rahmen des hier betrachteten Systems nicht wirklich als Speicher, sondern eher als „Puffer“ zu verstehen. Auf Basis einer energieeffizienten Betrachtung macht es keinen Sinn kalorische Energie über einen größeren Zeitraum zu speichern, da die Selbstentladung der Speicher einen Großteil der enthaltenen Energie aufzehren würde. Dieses Verhalten führt zu dem Schluss, dass kalorische Energie nur dann erzeugt werden sollte, wenn sie auch gebraucht wird. Die Zeitkonstanten bei der Erzeugung kalorischer Energie aus Gas sind dabei, im Gegensatz zu den Zeitkonstanten der elektrischen Variante, nicht vernachlässigbar. Aus diesem Grund wurde folgende Definition getroffen:

- Die Anteile der kalorischen Lasten (Niedrig- und Hochtemperatur), welche durch Gas gedeckt werden sollen, können nur den vorgelagerten Speichern entnommen werden. Somit muss gewährleistet sein, dass die Speicher zu jedem Zeitpunkt ausreichend Energie enthalten, um die entsprechenden Lasten decken zu können.

### 2.1.4 Der Abwärme-Zweig

Beim Abwärme-Zweig handelt es sich, anders als bei den drei vorherigen Bereichen, nicht um einen klar abgegrenzten Zweig. Dieser repräsentiert die Abwärme, welche durch Komponenten wie Elektrolyse und Gas-to-Power des chemischen Zweigs oder konventionellen Kraftwerken und Speichern des elektrischen Zweigs, entsteht und gesammelt wird. Die entstandene Abwärme wird zunächst im Fernwärmespeicher, welcher die Kapazität des Fernwärmenetzes repräsentiert, gespeichert. Dieser kann durch die Komponente der dezentralen Direktwärme weiter aufgestockt werden. Aus dem Fernwärmespeicher kann anschließend ein Teil der Fernwärmelast des Niedrigtemperatur-Zweigs gedeckt werden. Im Weiteren wird zwischen nutzbarer Abwärme (Waste Heat) und genutzter Abwärme (Used Waste Heat) unterschieden.

Der Unterschied zwischen den beiden Wärmearten ist durch die Einhaltung des Energiegleichgewichts zu erklären. Abwärme, welche genutzt werden konnte, kann mit den Verlusten gegengerechnet werden. Abwärme gilt dann als „genutzt“, wenn diese zum Decken einer Last verwendet werden konnte. Abwärme, welche hingegen zwar in das Fernwärmenetz (Fernwärmespeicher) eingespeist wurde, dort aber durch z.B. die Selbstentladung verloren geht, wird als realer Verlust betrachtet und muss durch die regenerativen Anlagen kompensiert werden.

## 2.2 SMART GRID

Im Rahmen dieser Arbeit bedeutet „Smart Grid“ das zeitliche Verschieben von prozentualen Anteilen der resultierenden Last des Bruttostromverbrauchs + Last der Elektro-Mobilität. Die so entstandene Last wird folgend als „elektrische Last“ bezeichnet. Dabei hat der Nutzer die Entscheidungsfreiheit über die Höhe des Anteils sowie die Zeitperiode, innerhalb derer die Anteile verschoben werden können. Die Entscheidung, wann und wohin die Anteile verschoben werden bzw. werden können, wird über die elektrische Residualleistung getroffen. Im Zuge des Algorithmus durchläuft ein zeitliches Fenster mit der Breite der oben beschriebenen Zeitperiode die gesamte Datenreihe der Residualleistung. Innerhalb dieses Fensters können sich negative und positive Anteile gegenseitig kompensieren. Diese verschobenen Leistungsanteile werden, nach Durchlauf der Datenreihe, dem Verlauf der elektrischen Last zugeführt. Nachfolgend wird der verwendete Algorithmus sowohl grafisch, als auch aus funktionstechnischer Sicht veranschaulicht.

### 2.2.1 Grafische Erläuterung

Das Funktionsprinzip des Smart-Grid-Algorithmus wird anhand eines konkreten Beispiels erläutert.

Dazu wird ein exemplarischer Residualleistungsverlauf generiert. Diese Datenreihe durchläuft den Smart-Grid-Algorithmus mit einer maximalen Lastverschiebung von 5% über einen Zeitraum von höchstens 20 Stunden.

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Residualleistung vor Anwendung des Smart-Grid-Algorithmus. Das Berechnungsverfahren durchläuft dabei bereits die ersten 30 Stunden der Zeitreihe und agiert aktuell im Zeitraum: Stunde 30 bis Stunde 50. Zu erwarten ist, dass die positiven und negativen Anteile um bis zu 5% der aktuellen Last reduziert werden, wodurch eine Vergleichmäßigung der Residualleistung zu erwarten ist.

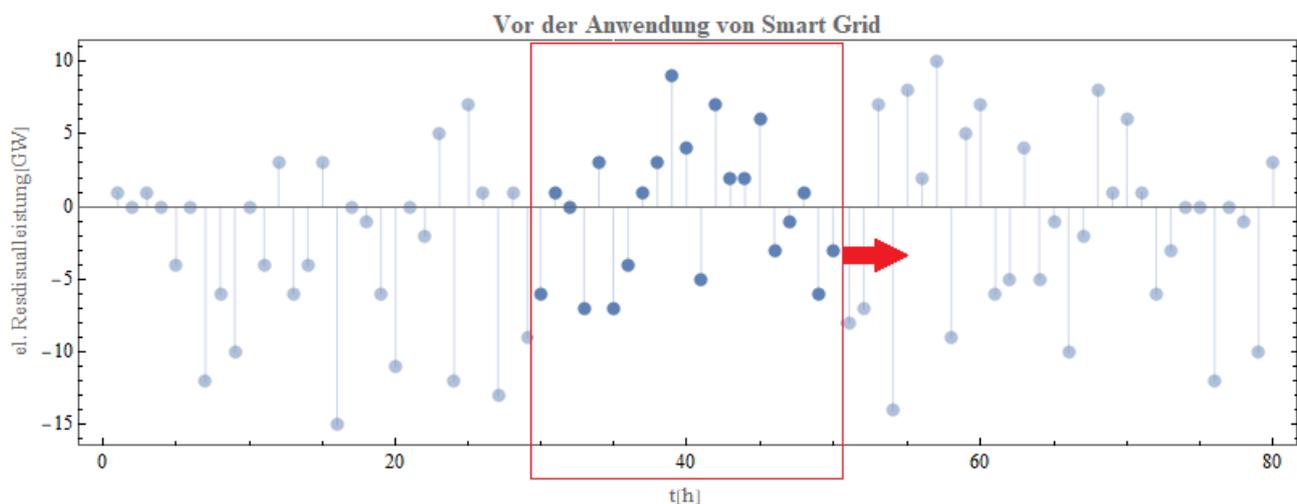


Abbildung 5: Residualleistung vor der Anwendung von Smart Grid

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Residualleistung nachdem der Smart-Grid-Algorithmus den Zeitraum Stunde 30 bis Stunde 50 bearbeitet hat. Der geglättete Verlauf nach Anwendung des Smart-Grid-Algorithmus ist in Grün und der unbearbeitete Verlauf in Blau dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Algorithmus die Spitzen der Residualleistung verringert und auf diese Weise den Verlauf der Residualleistung glättet.

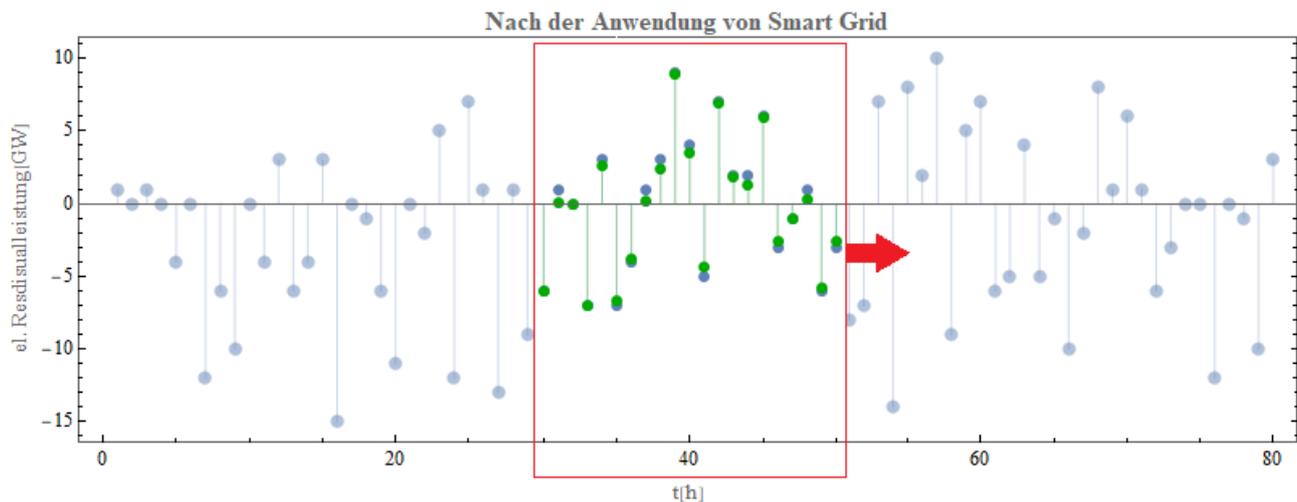


Abbildung 6: Residualleistung nach der Anwendung von Smart Grid

Die Glättung fällt bei den gewählten Werten (20-h-Fenster, 5% verschiebbare Energie allerdings auffällig gering aus.

## 2.2.2 Funktionstechnische Erläuterung

In folgender Abbildung 7 wird der entwickelte Smart-Grid-Algorithmus aus funktionstechnischer Sicht erläutert.

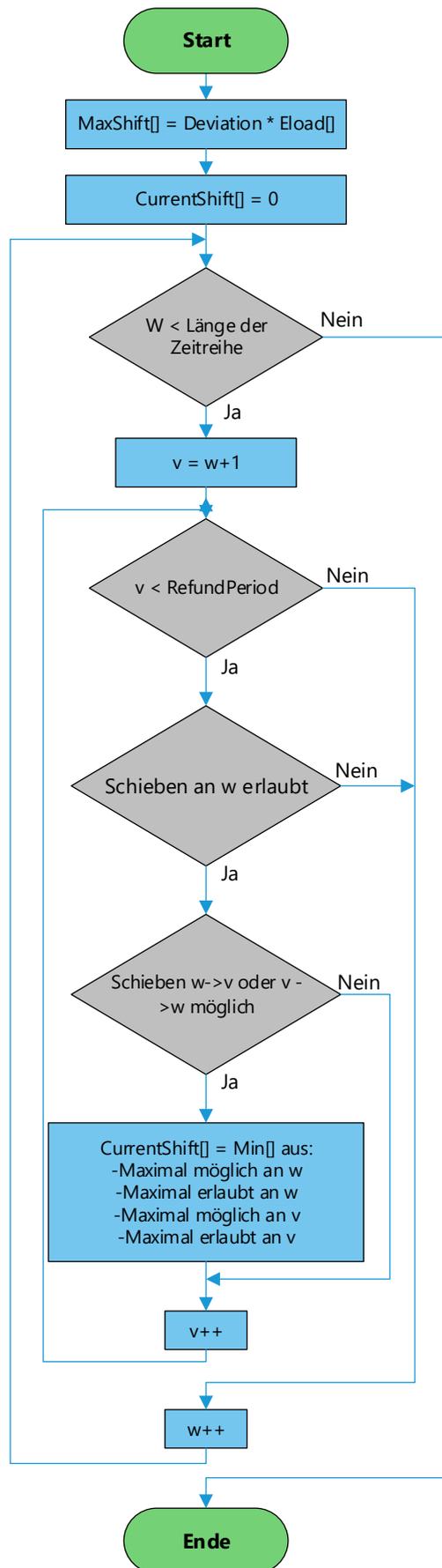


Abbildung 7: Smart Grid aus funktionstechnischer Sicht

Dabei wird aus dem Faktor „Deviation“, welcher den Prozentwert der zu verschiebenden Lastanteile enthält, sowie der Zeitreihe der elektrischen Last in „ELoad[]“, die Zeitreihe der maximal zu verschiebenden Lastanteile generiert. Dieses Array wird als „MaxShift“ bezeichnet.

Der Startpunkt des Zeitfensters wird im Flussdiagramm der Abbildung 7 als „w“ bezeichnet und durchwandert die gesamte Länge der Datenreihe. Die Variable „v“ beschreibt den Zeitpunkt im Zeitfenster. Er beginnt, nach jedem Inkrementieren von „w“, bei „w+1“ und durchläuft die Zeitperiode, in welcher die Lastanteile verschoben werden können. Die Zeitperiode wird dabei als „RefundPeriod“ bezeichnet. Innerhalb dieses Fensters wird zunächst geprüft, ob am Zeitpunkt „w“ noch Lasten verschoben werden dürfen. Ist dies nicht der Fall so wird „w“ weiter inkrementiert. Sollte der Zeitpunkt „w“ Lastanteile aufnehmen oder abgeben können wird nun an jedem möglichen Zeitpunkt „v“ geprüft, ob ein Lastanteil von „w“ zu „v“ oder von „v“ zu „w“ verschoben werden kann. Diese Leistung ist das Minimum aus:

- Der gesamten Leistung am Punkt „w“ (egal ob positiv oder negativ)
- Der maximalen Leistung, welche am Punkt „w“ noch verschoben werden darf (siehe „MaxShift“)
- Der gesamten Leistung am Punkt „v“ (egal ob positiv oder negativ)
- Der maximalen Leistung, welche am Punkt „v“ noch verschoben werden darf (siehe „MaxShift“)

Nachdem die zu verschiebende Leistung bestimmt wurde, wird diese in dem Array „CurrentShift“ hinterlegt. Dabei wird das Vorzeichen der Leistung nicht berücksichtigt. Dieses ergibt sich für jeden Zeitpunkt direkt aus dem Verlauf der Residualleistung. Ist die Residualleistung am Punkt „w“ beispielsweise negativ, so kann dieser Zeitpunkt in der elektrischen Last nur Leistung abgeben und nicht aufnehmen.

## 2.3 KAUSALITÄTSPROBLEM

Kausalität ist die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung. Dies bezieht sich beispielsweise auf die Abfolge von Ereignissen und Zuständen [5]. Ein einfaches Beispiel für den Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung bildet eine nasse Straße. Die Tatsache, dass die Straße nass ist, ist ein Zustand, welchem ein Ereignis vorrangegangen sein muss. Dies könnte beispielsweise ein Regenschauer gewesen sein. Dabei muss das Ereignis „Regenschauer“ vor dem Zustand „nass“ der Straße eingetroffen sein. Sollte dies nicht gegeben sein entsteht ein Widerspruch zwischen Ursache und Wirkung. Ein ähnliches Problem tritt im Laufe des Berechnungsszenarios auf.

---

### 2.3.1 Auftreten des Kausalitätsproblems

In diesem Kapitel wird das Kausalitätsproblem, welches es im Rahmen der Berechnungen zu lösen gilt, aufgeführt und die gewählte Lösung erläutert.

Zur Bestimmung der zu installierenden Leistung der drei regenerativen Anlagentypen (Wind an Land, Wind auf See und Solar) muss die absolute Last, welche durch diese Anlagen gedeckt werden soll, bekannt sein. Da das hier vorgestellte Berechnungstool ein Energiegleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Energie anstrebt, gehören zu der zu deckenden Last auch die bei Energiewandlungs- und –speicher-Prozessen zu erwartenden Verluste. Da die Verluste zu Beginn der Berechnungen, bei welcher die zu installierenden Leistungen bestimmt werden, noch nicht bekannt sind, steht der Algorithmus zwar vor keinem kausalen Widerspruch, jedoch vor einem Kausalitätsproblem, welches es zu lösen gilt.

### 2.3.2 Lösen des Kausalitätsproblems

Der gewählte Lösungsansatz ist das Erreichen einer Konvergenz der unbekanntenen Größen durch Iteration.

Laut Definition handelt es sich bei einer Iteration um eine mehrfache Wiederholung gleicher oder ähnlicher Handlungen zur Annäherung an eine Lösung [6]. Anwendung findet dieses Vorgehen im Kernprogramm des Energiewendeplaners und soll an dieser Stelle anhand der entstehenden Verluste erläutert werden. Abbildung 8 zeigt die vereinfachte Darstellung der Iterationsschleife. Der interne Ablauf dieser Schleife wird in Abbildung 39 nochmals genauer beschrieben.

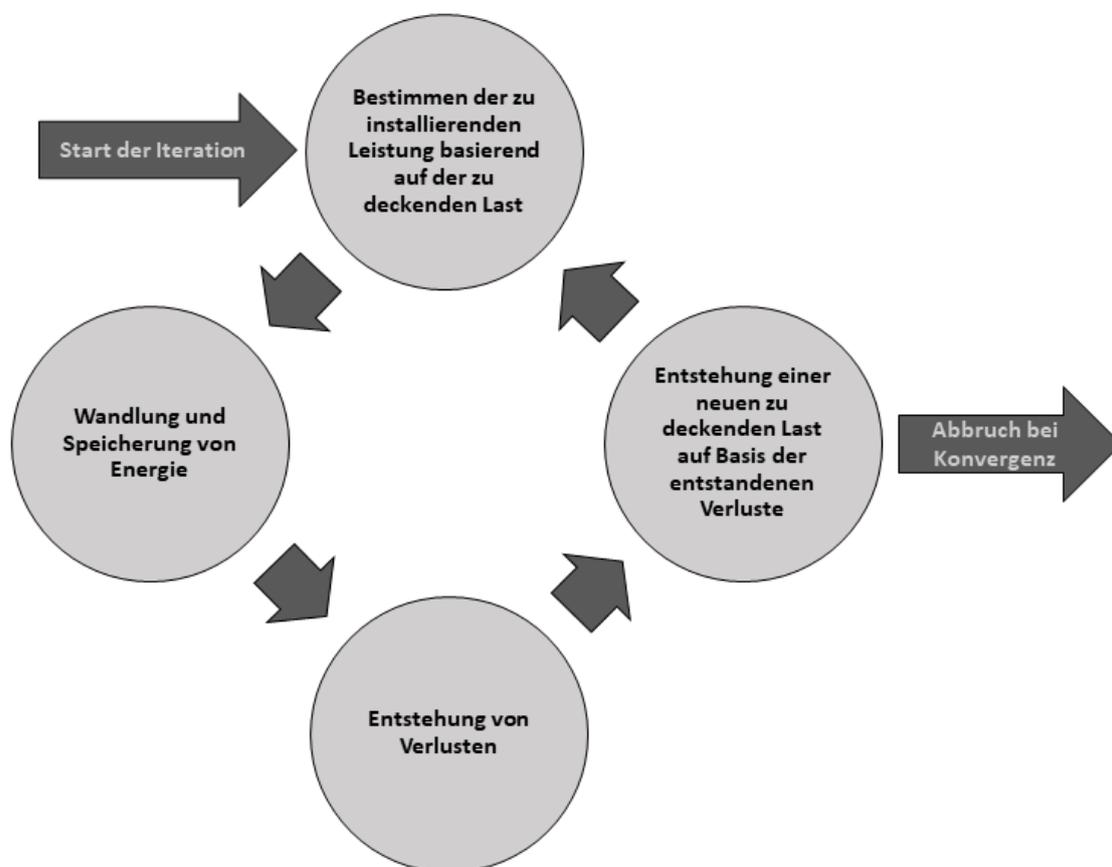


Abbildung 8: Kreisprozess der Haupt-Iterationsschleife

Die Abarbeitung der Zeitreihe beginnt beim ersten Durchlauf mit noch unbekanntenen Verlusten, die zu Beginn des Iterationsprozesses auf null gesetzt sind. Die tatsächlich auftretenden Verluste ergeben sich erst im Laufe der Berechnungen. Nach erstmaligem Durchlauf sind nun die Verluste bekannt und werden der absoluten Last hinzugefügt. Diese muss wiederum durch die regenerativen Anlagen erzeugt werden. Dadurch muss die zu installierende Leistung neu bestimmt werden, wodurch sich neue Ausgangsbedingungen für die Berechnung ergeben. Bei weiteren Durchläufen konvergieren die Änderungen der Verluste gegen null.

Im Zuge der Abarbeitung sind neben den Verlusten auch die erzeugte Abwärme und die konventionell erzeugte Energie von diesem Verhalten betroffen. Dabei wurde eine maximale Abweichung von 1‰ gewählt, um die Konvergenz als erfolgreich zu betrachten. Erst nach einer erfolgreichen Konvergenz aller drei Komponenten wird die Iteration beendet.

### 3 AUFBAU DER EINGABEMASKE

Im folgenden Abschnitt wird der grafische Aufbau der Eingabemaske erläutert. Diese beinhaltet neben dem Flussdiagramm, welches das Energiesystem Deutschlands widerspiegelt, auch die Tabellen der Benutzer- und Standardparameter. Dies wird durch eine Tabelle für generelle Einstellungen durch den Programmierer und die Tabelle der Hilfetexte erweitert. Nach einem zunächst groben Überblick über die drei Zweige des Energiesystems werden anschließend die Komponenten der Zweige einzeln beschrieben und erläutert. Außerdem beschäftigt sich Sektion 3.12 mit den weiteren, oben genannten, Tabellen.

#### 3.1 FLUSSDIAGRAMM (INPUT\_MASK)

Abbildung 9 zeigt das Flussdiagramm der Eingabemaske. Generell teilt sich diese in vier Bestandteile auf.

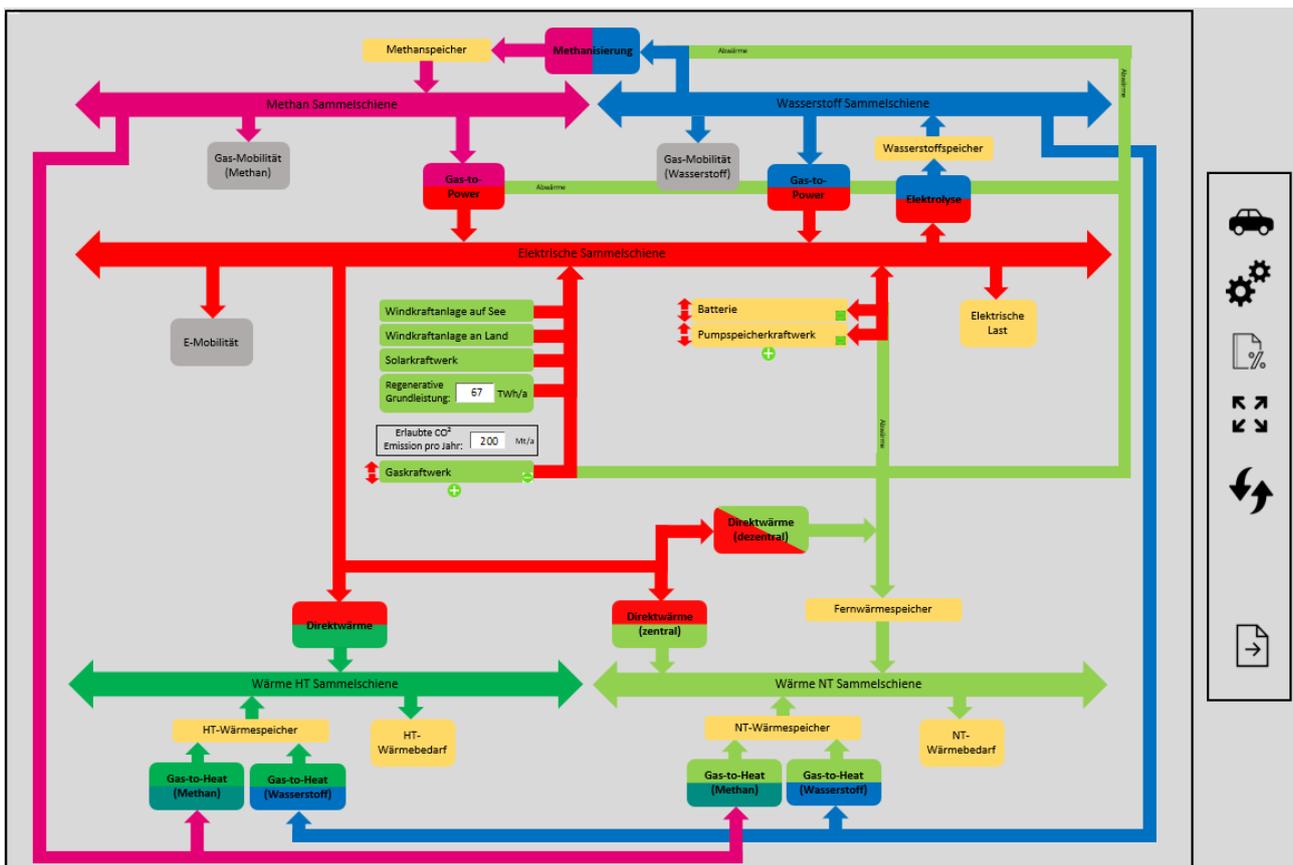


Abbildung 9: Flussdiagramm der Eingabemaske

## 1) Der elektrische Zweig:

Der elektrische Zweig (rot) ist der zentrale Zweig des Flussdiagramms. In ihm werden sämtliche Energien erzeugt und auf die weiteren Zweige verteilt. An dieser Stelle können elektrische Speicher sowie konventionelle Kraftwerke hinzugefügt werden. Außerdem werden dort die regenerativen Anlagen, die maximal erlaubten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Elektro-Mobilität und der Bruttostromverbrauch parametrisiert.

Eine detailliertere Beschreibung des elektrischen Zweigs ist der Sektion 0 zu entnehmen.

## 2) Der chemische Zweig:

Der chemische Zweig teilt sich in zwei Unterzweige auf.

### 2.1) Der Wasserstoff-Zweig (blau)

Der Wasserstoff-Zweig wird durch die Elektrolyse aus dem elektrischen Zweig gespeist und beinhaltet den Wasserstoffspeicher, die Anlagen zur Rückverstromung des Wasserstoffs, die Wasserstoff-Mobilität und die Abgriffe zur Methanisierung sowie zu den Gas-to-Heat Anlagen.

### 2.2) Der Methan-Zweig (magenta)

Der Methan-Zweig wird durch die Methanisierung aus dem Wasserstoff-Zweig gespeist und beinhaltet den Methanspeicher, die Anlagen zur Rückverstromung des Methans, die Methan-Mobilität und den Abgriff zu den Gas-to-Heat Anlagen.

Eine detailliertere Beschreibung des chemischen Zweigs ist den Sektionen 3.7 und 0 zu entnehmen.

### 3) Der kalorische Zweig:

Der kalorische Zweig teilt sich in zwei Unterzweige auf.

#### 3.1) Der Niedrigtemperatur-Zweig (hellgrün)

Der Niedrigtemperatur-Zweig wird sowohl aus dem elektrischen, als auch aus den beiden chemischen Zweigen gespeist und beinhaltet die Komponenten des Typs Gas-to-Heat und Direktwärme sowie den Niedrigtemperatur-Wärmespeicher und die Parametrierung der Niedrigtemperatur Wärmelast.

#### 3.2) Der Hochtemperatur-Zweig (dunkelgrün)

Der Hochtemperatur-Zweig wird sowohl aus dem elektrischen, als auch aus den beiden chemischen Zweigen gespeist und beinhaltet die Komponenten des Typs Gas-to-Heat und Direktwärme sowie den Hochtemperatur Wärmespeicher und die Parametrierung der Hochtemperatur-Wärmelast.

Eine detailliertere Beschreibung des kalorischen Zweigs ist den Sektionen 3.9 und 0 zu entnehmen.

### 4) Weitere Schaltflächen:

Am rechten Rand des Flussdiagramms befinden sich weitere Schaltflächen zur Parametrierung. Diese sind (v.o.n.u.)

- Parametrierung der generellen Informationen zur Mobilität
- Allgemeine Einstellungen (u.a. Smart Grid)
- Parametrierung der kommerziellen Informationen
- Größenanpassung des Flussdiagramms
- Rücksetzen sämtlicher Parameter auf Standard
- Abspeichern der Eingabemaske

Eine detailliertere Beschreibung der Schaltflächen ist der Sektion 3.11 zu entnehmen.

### 3.2 GENERELLER AUFBAU EINER EINGABE-OBERFLÄCHE

Folgend soll der generelle Aufbau einer Oberfläche zur Parametereingabe beschrieben werden. Dies erfolgt exemplarisch anhand der Parametrierungsoberfläche einer Power-to-Gas bzw. Gas-to-Power Anlage, welche in Abbildung 10 dargestellt ist.

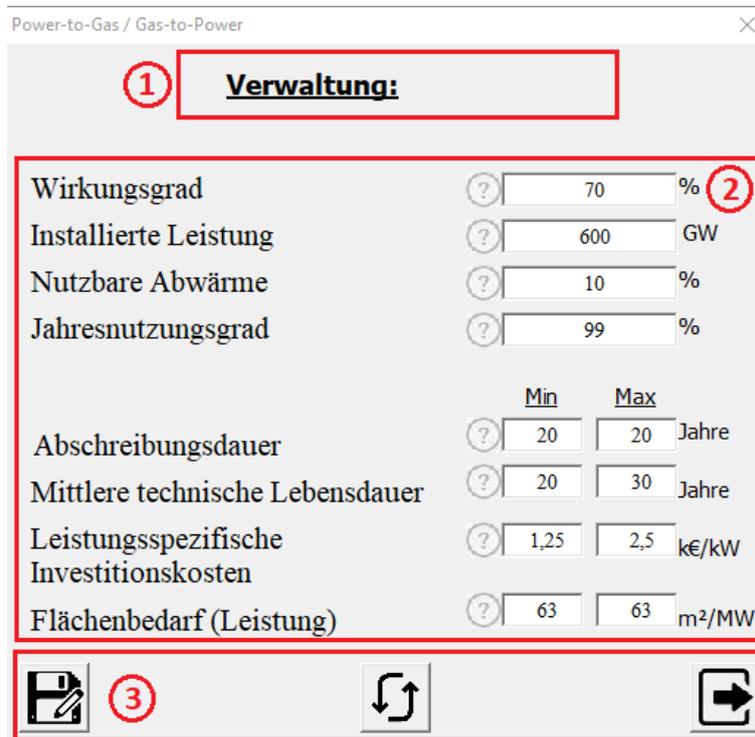


Abbildung 10: Exemplarischer Aufbau einer Parametrierungsoberfläche

Dabei ist die Oberfläche in drei einzeln zu betrachtende Bestandteile aufgeteilt.

#### 1) Überschrift / Titel:

Der Titel einer Parametrierungsoberfläche ist, sollte diese Oberfläche durch mehrere Anlagen genutzt werden, dynamisch gestaltet. Beispielsweise teilen sich alle Anlagen des Typs Power-to-Gas (Methanisierung und Elektrolyse) und Gas-to-Power (Methan und Wasserstoff) die gleiche Oberfläche zu Parametrierung. Aus diesem Grund wird, je nach aufrufendem Objekt, die entsprechende anlagenspezifische, Bezeichnung eingeblendet.

## **2) Parametereingabe:**

Im mittleren Bereich der Oberfläche sind die eigentlichen Eingabeelemente hinterlegt. Diese sind in Zeilen unterteilt und enthalten immer folgende Elemente: (v.l.n.r.)

- Den Namen des Parameters.
- Den Hilfe-Button zum Anzeigen und Aufrufen des Hilfe-Textes.
- Das Feld zur Werteingabe.
- Die Einheit, in welcher die Eingabe zu erfolgen hat.

Dabei kann das Feld zur Werteingabe in Minimal- und Maximal- Wert unterteilt sein.

## **3) Schaltflächenleiste:**

Die Schaltflächenleiste besteht aus folgenden Elementen:

### **3.1) Speichern:**

Über diese Schaltfläche können die aktuellen Eingaben gespeichert werden. Nach dem Speichern wird die Oberfläche automatisch geschlossen.

### **3.2) Zurücksetzen:**

Über diese Schaltfläche können die Standardwerte geladen, bzw. der Dialog zum Wählen eines Standard-Parametersatzes geöffnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die geladenen Standardwerte vorerst nur in die Oberfläche geladen und nicht abgespeichert werden. Wenn die Werte tatsächlich gespeichert werden sollen muss die Schaltfläche „Speichern“ aus Punkt 3.1) betätigt werden.

### **3.3) Schließen:**

Über diese Schaltfläche kann die Oberfläche geschlossen werden. Dabei werden die Eingaben nicht gespeichert.

Neben diesen drei Standardblöcken können die Oberflächen zur Parametrierung in speziellen Fällen Besonderheiten aufweisen. Diese sollen folgend erläutert werden.

### **-Seltene Materialien:**

Die Oberfläche der E-Mobilität, sowie die der elektrischen Speicher enthalten Sonderblöcke zum Definieren der benötigten seltenen Materialien. Ein solcher Block wird in Abbildung 11 dargestellt.

In diesem Extrablock, welcher im Weiteren „Multiseite“ genannt wird, hat der Nutzer die Möglichkeit die seltenen bzw. kritischen Materialien, welche zur Herstellung des elektrischen Speichers benötigt werden, aufzulisten. Über einen Klick auf das grüne Plus-Symbol neben dem Schriftzug: „Seltene Materialien“ können bis zu vier weitere Materialien hinzugefügt werden.

Abbildung 11: Eingabe der seltenen Materialien

Folgend werden die Parameter eines „seltenen Materials“ erläutert:

#### **-Name:**

Über diesen Parameter kann der Nutzer einen Namen für das hinzugefügte seltene Material vergeben. Dieser Name wird bei der Ergebnisausgabe in Kapitel 0 genutzt, um mit ihm den Gesamtbedarf des Materials aufzulisten.

#### **-Bedarf:**

Über diesen Parameter kann der Nutzer die Menge des benötigten Materials in „Gramm pro kWh“ angeben. Über die rechnerisch ermittelte Gesamtkapazität des elektrischen Speichers kann mittels dieses Parameters die benötigte Gesamtmenge eines seltenen Materials bestimmt werden.

#### **-Weltweit verf. Ressourcen:**

Entspricht dem geschätzten, weltweiten Vorkommen dieses Materials. Über diesem Parameter kann bei der Ergebnisdarstellung in Kapitel 0 der prozentual benötigte Anteil am Gesamtvorkommen angegeben werden.

**-Frei wählbare Namen:**

Die konventionellen Kraftwerke, wie auch die elektrischen Speicher sind, wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erwähnt, in ihrer Anzahl variabel. Da der Nutzer durch das Hinzufügen einer solchen Komponente ein beliebiges Kraftwerk, bzw. einen beliebigen elektrischen Speicher nachbilden kann ist auch der Name frei wählbar. Dieser wird bei der späteren Ergebnisdarstellung, welche in Kapitel 0 genauer beschrieben wird, zur Beschriftung der Leistungs- und Energieverläufe genutzt. Abbildung 12 zeigt die nutzerdefinierte Eingabe des Namens exemplarisch für den elektrischen Speicher „Batterie“.



Abbildung 12: Eingabe eines nutzerdefinierten Namens

**-Wählbare Einheiten:**

Bestimmte Parameter der elektrischen sowie der Gas- und Wärmespeicher sind in ihrer Einheit frei wählbar. Dazu gehört beispielsweise die Kapazität oder die Selbstentladung des Speichers. Diese Einheiten sind wählbar, da ihre Größenordnung stark variieren kann. Abbildung 13 zeigt dabei exemplarisch den Parameter der maximalen Kapazität eines elektrischen Speichers. Über das „Dropdown-Menü“ kann die Einheit zwischen „MWh“, „GWh“ und „TWh“ variiert werden.

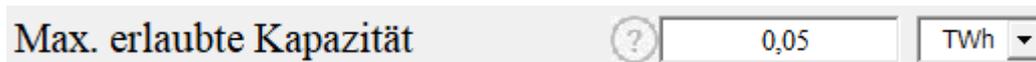


Abbildung 13: Auswahl einer Parametereinheit

**-Umblättern in einer Parametrierungsoberfläche:**

Oftmals teilen sich gleichartige Komponenten, wie beispielsweise die Gas-Mobilität im Methan- und im Wasserstoff-Zweig, die gleiche Oberfläche zur Parametrierung. Da diese in zwei unterschiedlichen Zweigen liegen und über zwei unterschiedlich Elemente aufgerufen werden, können beide unabhängig voneinander parametrierung werden. Doch gibt es sowohl im Wasserstoff-Zweig als auch im Niedrigtemperatur-Zweig Institutionen, welche in einem Element des Flussdiagramms zusammengefasst wurden. Dies sind die Brennstoffzelle und das Wasserstoff-Gaskraftwerk in dem Element „Gas-to-Power (Wasserstoff)“ sowie die Infrarotheizung und die Wärmepumpe in dem Element „Direktwärme (zentral)“.

Um diese beiden Komponenten parametrieren zu können wurde für diese Fälle eine Mechanik zum „Umblättern“ in der Oberfläche implementiert. Dies wird exemplarisch durch die betroffenen Institutionen des Elements „Gas-to-Power (Wasserstoff)“ erläutert.

Abbildung 14 zeigt die Titelzeile der Parametrierungsoberfläche nach dem Aufruf über das Element „Gas-to-Power (Wasserstoff)“. Initial wird die Parametrierung des Wasserstoff-Gaskraftwerks angezeigt. Zusätzlich wird in der rechten oberen Ecke ein Pfeil-Symbol, welches das umblättern auslöst, eingeblendet.



Abbildung 14: Parametrierungsoberfläche vor dem Umblättern

Nachdem das Umblättern ausgelöst wurde erscheint die, in Abbildung 15 dargestellte, Oberfläche. Da ein Umschalten zwischen zwei Institutionen mögliche Änderungen, welche an der Parametrierung vorgenommen und nicht gespeichert wurden, überschreiben würde, wird dem Nutzer so die Möglichkeit des vorherigen Speicherns geboten. Die soll ein ungewolltes Überschreiben verhindern.

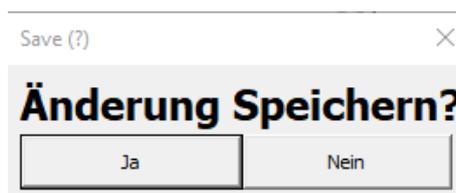


Abbildung 15: Oberfläche zum Speichern vor dem Umblättern

Nachdem der Nutzer über das mögliche Speichern entschieden hat, wird die zweite Komponente in der Parametrierungsoberfläche angezeigt. Dies ist in Abbildung 16 dargestellt. Über den Pfeil in der linken oberen Ecke kann wieder zu der vorherigen Komponente gewechselt werden.



Abbildung 16: Parametrierungsoberfläche nach dem Umblättern

Durch diese Mechanik können theoretisch beliebig viele Komponenten in einem Element des Flussdiagramms zusammengefasst werden.

### 3.3 ALLGEMEINE PARAMETER DER ENTHALTENEN KOMPONENTEN

Bestimmte Parameter wie beispielsweise der „Jahresnutzungsgrad“ oder die „Mittlere technische Lebensdauer“ besitzen eine komponentenübergreifende Definition. Diese „allgemein gültigen“ Erläuterungen werden im Folgenden aufgeführt und dienen in der Beschreibung der entsprechenden Oberflächen als Referenzquelle.

#### -Jahresnutzungsgrad:

Der Jahresnutzungsgrad beschreibt die relative Volllast-Nutzung der entsprechenden Anlage während eines Jahres. Angenommen eine Anlage kann basierend auf ihrer installierten Leistung im Volllastbetrieb mit Nennleistung eine Jahresenergie von 1 GWh erzeugen, so wird dies aufgrund von Wartungen, Reparaturen oder sonstigen Ausfallzeiten nicht erreicht. Repräsentativ für diese Ausfälle steht der Jahresnutzungsgrad. Bei einem Jahresnutzungsgrad von 90% werden, basierend auf der oben genannten Jahresenergie von 1 GWh lediglich 0,9 GWh erzeugt bzw. umgesetzt. Zur Simulation dieses Umstands wird die installierte Leistung der Anlage mit dem Faktor des Jahresnutzungsgrads multipliziert, um die durchschnittlich verfügbare Leistung zu ermitteln.

Zu beachten ist dabei, dass der Jahresnutzungsgrad keine Aussage über die tatsächliche Nutzungsdauer einer Anlage trifft. Er repräsentiert lediglich die im Jahresmittel theoretisch maximal nutzbare Leistung einer Anlage

Die Kapazität der Speicher sind dabei nicht von dieser ausfallbedingten Reduktion betroffen.

#### -Abschreibungsdauer:

Über die Abschreibungsdauer definiert der Nutzer die voraussichtliche bzw. gemäß dem Steuerrecht geschätzte minimale und maximale Nutzungsdauer. Das Berechnungstool verwendet diesen Parameter, um aus den gesamten Investitionskosten der entsprechenden Anlagen einen jährlichen minimalen und maximalen Investitionsbetrag anzugeben.

#### -Mittlere technische Lebensdauer:

Die mittlere technische Lebensdauer enthält die erwartete minimale und maximale technische Lebensdauer der Anlage. Dies entspricht der tatsächlich erwarteten Nutzungsdauer.

### -Selbstentladung:

Die Selbstentladung definiert jenen prozentualen Anteil der gespeicherten Energie, welche durch die Dauer der Speicherung während einer bestimmten Zeitperiode im Speicher oder durch sonstige Verlustmechanismen in dessen Umgebung verloren geht. Im Gegensatz zu den Verlusten bei der Ein- und Ausspeisung sind die Verluste der Selbstentladung nicht weiter nutzbar.

### -Anteil an Gesamtmenge:

Dieser Parameter bezieht sich auf den Parameter: „Anzahl der zugelassenen PKW“ bzw. „Anzahl der zugelassenen LKW“, welcher in Abschnitt 3.11.1 genauer beschrieben wird. Dabei kann hier der prozentuale Anteil der {Wasserstoff-, Methan-, Elektro-} PKW/LKW angegeben werden. Der Wertebereich liegt zwischen 0% und 100%.

Außerdem ist zu beachten, dass die Anteile an der Gesamtmenge der Mobilität durch Methan-, Wasserstoff- sowie der elektrischen Mobilität für PKW und LKW insgesamt 100% nicht übersteigen dürfen.

### -Leistungsspezifische & energiespezifische Investitionskosten:

Die leistungsspezifischen bzw. die energiespezifischen Investitionskosten umfassen die Kosten pro gewählter bzw. vorhandener Einheit, welche im Laufe der Lebensdauer für diese Anlage anfallen. Dazu gehören beispielsweise Finanzierungs-, Wartungs- und Reparaturkosten. Der hier angegebene minimale und maximale Wert wird dabei auf die installierte Leistung bzw. die installierte Kapazität bezogen. Bei Anlagen, welche über keinen Parameter zur installierten Leistung verfügen, handelt es sich um solche, welche in ihrer Leistung zunächst unbegrenzt sind. Die Investitionskosten ergeben sich dabei aus der maximalen Leistung, welche diese Anlage im Rahmen der Berechnung zur Verfügung stellen musste. Eine genauere Beschreibung ist dem Kapitel der entsprechenden Anlagen zu entnehmen. Ein Beispiel für eine solche Anlage ist der Niedrig- und Hochtemperatur-Wärmespeicher in Abschnitt 3.9.4 und 3.10.2

Sollte eine Anlage sowohl über leistungs- als auch energie-spezifische Investitionskosten verfügen, so wird bei der finalen Aufstellung der gesamten Kosten lediglich der Größere der beiden, sich ergebenden Investitionskosten, berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Kosten des günstigeren Aspektes in den höheren Kosten bereits enthalten sind.

### -Benötigte Fläche (Leistung) & (Kapazität):

Der Flächenbedarf umfasst die durch die Anlage blockierte Fläche pro gewählter bzw. vorhandener Einheit. Diese umfasst sämtliche durch den Bau dieser Anlage nicht mehr anderweitig nutzbarer Flächen. Dazu gehören unter anderem die Flächen für Zuwege oder Zusatzgeräte. Ebenfalls müssen Sicherheitsradien und funktionstechnische Mindestabstände berücksichtigt werden. Der hier angegebene minimale und maximale Wert wird dabei auf die installierte Leistung bzw. die installierte Kapazität bezogen. Bei Anlagen, welche über keinen Parameter zur installierten Leistung verfügen, handelt es sich um solche, welche in ihrer Leistung zunächst unbegrenzt sind. Die Investitionskosten ergeben sich dabei aus der maximalen Leistung, welche sie im Rahmen der Berechnung zur Verfügung stellen musste. Eine genauere Beschreibung ist dem Kapitel der entsprechenden Anlagen zu entnehmen. Ein Beispiel für eine solche Anlage sind die Niedrig- und Hochtemperatur-Wärmespeicher in Abschnitt 3.9.4 und 3.10.2.

Sollte es, beispielsweise wie bei Batterien, möglich sein, die Institution übereinander anzuordnen, so ist nur die Grundfläche, welche sich direkt auf dem Erdboden befindet, zu berücksichtigen. Sollte eine Anlage sowohl leistungs- als auch energiespezifische Investitionskosten aufweisen, wird bei der finalen Aufstellung lediglich die größere Summe des sich aus leistungs- und energiespezifischen Flächen ergebenden Wertes berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Flächenbedarf des kleineren Aspektes in der größeren Fläche bereits enthalten ist.

### 3.4 HINZUFÜGEN / LÖSCHEN EINES ELEKTRISCHEN SPEICHERS / KONVENTIONELLEN KRAFTWERKS

Im elektrischen Zweig des Flussdiagramms hat der Nutzer die Möglichkeit, eine begrenzte Anzahl konventioneller Kraftwerke bzw. elektrischer Speicher hinzuzufügen. Das Hinzufügen einer solchen Komponente wird über das grüne „Plus-Zeichen“ am unteren Rand des letzten Elements initialisiert.

Dies ist exemplarisch für den letzten elektrischen Speicher der Standard-Parametrierung in Abbildung 17 dargestellt.

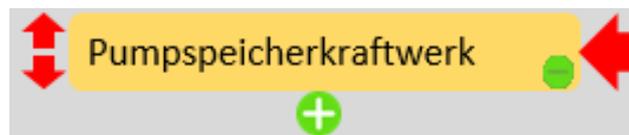


Abbildung 17: Dynamische Komponenten des Flussdiagramms

Die Anzahl der Kraftwerke ist dabei auf vier und die Anzahl der elektrischen Speicher auf fünf begrenzt. Nach dem Hinzufügen eines Speichers oder eines Kraftwerks sind diese mit den Standard-Namen (Kraftwerk, Speicher) und einem „leeren“ Parametersatz initialisiert. Durch das „Laden“ eines Standard-Parametersatzes [Sektion 3.2] oder durch eine direkte Eingabe des Nutzers kann die hinzugefügte Komponente parametrierbar werden.

Über das „Minus-Symbol“ in der rechten unteren Ecke eines elektrischen Speichers oder eines konventionellen Kraftwerks kann die entsprechende Komponente gelöscht werden. Dabei ist zu beachten, dass das letzte vorhandene konventionelle Kraftwerk sowie der letzte elektrische Speicher nicht gelöscht werden können.

### 3.5 FUNKTIONSPRINZIP DER PRIORISIERUNG

Anlagen der konventionellen Kraftwerke sowie die elektrischen Speicher sind sowohl in ihrer Anzahl, siehe [Abschnitt 2.1.1], als auch in ihrer Abarbeitungspriorität variabel. Bereits vorhandene wie auch durch den Nutzer hinzugefügte Komponenten des Flussdiagramms verfügen am linken Rand über zwei Pfeile zur Bestimmung ihrer Priorität. Diese nimmt von oben nach unten ab.

Die Pfeile zur Priorisierung sind exemplarisch durch den letzten elektrischen Speicher der Standard-Parametrierung in Abbildung 17 dargestellt.

Die Relevanz der Priorität ist dabei folgendermaßen definiert:

#### **-Konventionelle Kraftwerke:**

Die Priorität der konventionellen Kraftwerke bestimmt die Reihenfolge, in welcher sie zum Decken der negativen Residualleistungsanteile verwendet werden. So wird beispielsweise das Kraftwerk mit der höchsten Priorität, gemäß seiner anteiligen, maximalen CO<sub>2</sub>-Emmission und seiner installierten Leistung, als erstes zum Decken der negativen Residualleistungsanteile verwendet.

#### **-Elektrische Speicher**

Die Priorität eines elektrischen Speichers bestimmt die Abarbeitungsreihenfolge beim Ein- und Ausspeichern elektrischer Energie. So wird beispielsweise der Speicher mit der höchsten Priorität, gemäß seiner Leistungsbegrenzung sowie der maximalen Kapazität, als erstes zum Aufnehmen oder Abgeben elektrischer Energie verwendet. Dieses Prinzip wird in Unterabschnitt 0 genauer beschrieben.

### 3.6 DER ELEKTRISCHE ZWEIG

Im folgenden Abschnitt werden die Komponenten und Parameter des elektrischen Zweigs genauer betrachtet. Dabei werden die Eingabefelder und dessen Masken sowie die besonderen Mechaniken dieses Zweigs aufgeführt. Die Komponenten „Gas-to-Power (Methan)“ und „Gas-to-Power (Wasserstoff)“, welche mittig am oberen Bildrand der Abbildung 18 zu sehen sind, werden als Anlagen des chemischen Zweigs verstanden und an entsprechender Stelle beschreiben. Das Zentrum des elektrischen Zweigs bildet die „elektrische Sammelschiene“. Diese fungiert als Bindeglied aller Verbraucher und Erzeuger von elektrischen Energien. Außerdem wird über den grünen Abwärme-Zweig die nutzbare Abwärme der konventionellen Kraftwerke, sowie der elektrischen Speicher in das Fernwärmenetz, bzw. den Fernwärmespeicher eingespeist.

Die Pfeile, welche nach links und rechts aus dem Bild weisen, signalisieren einen möglichen Austausch von elektrischer Energie mit dem Ausland. Dieser wird im Laufe der Arbeit als Import/Export bezeichnet. Bei diesem Austausch ergibt sich, am Ende des Betrachtungszeitraums, ein Gleichgewicht zwischen Import und Export bzw. zwischen den Importen und den überschüssigen Energien, welche in den Speichern verbleiben. Dies ist wichtig, damit das Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Energie weiterhin eingehalten wird. Somit ist der Austausch von elektrischer Energie mit dem Ausland als eine Art zusätzlicher, unendlich großer, elektrischer Speicher zu verstehen. Dies ist bei den Berechnungen von äußerster Wichtigkeit, da die elektrischen Speicher durch ihre Begrenzung in Leistung und Kapazität keine unendlichen Energien aufnehmen können.

Im Weiteren werden die Objekte im Flussdiagramm als Elemente bezeichnet.

Abbildung 18 zeigt den elektrischen Zweig des Flussdiagramms.

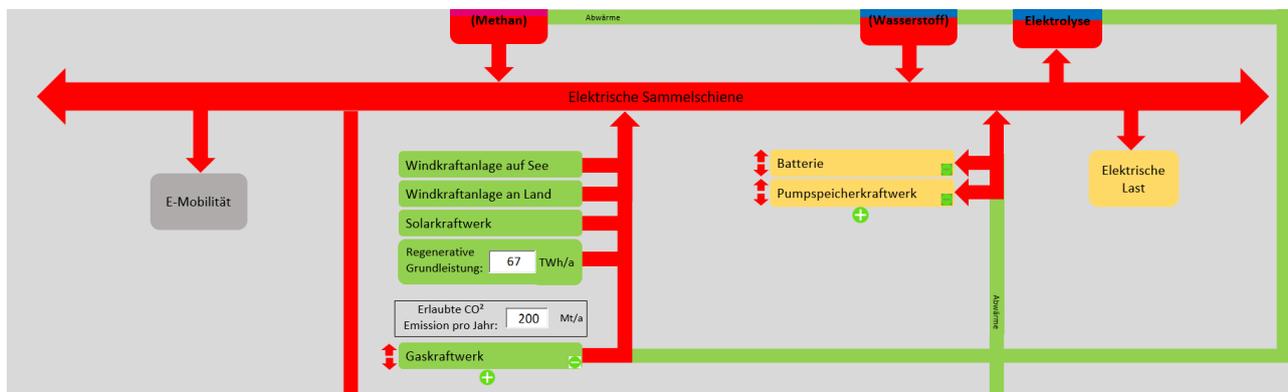


Abbildung 18: Der elektrische Zweig (Flussdiagramm)

Dessen Elemente werden im Folgenden genauer betrachtet (v.l.n.r.)

### 3.6.1 E-Mobilität

Abbildung 19 zeigt die Oberfläche zur Parametrierung der Elektro-Mobilität. Diese teilt sich in die zwei Abschnitte Elektro-PKWs und Elektro-LKWs auf. Folgend werden die Elektro-PKWs als exemplarisches Beispiel verwendet, da die Parameter der LKWs identisch sind.

Eine Besonderheit dieser Oberfläche stellen die „seltene Materialien“ da. Diese Mechanik wurde bereits in Sektion 3.2 genauer beschrieben.

The screenshot shows a software window titled 'E-Mobilität' with a close button (X) in the top right corner. The main heading is 'Verwaltung: Elektromobilität'. It is divided into two sections: 'Elektro PKW:' and 'Elektro LKW:'. Each section contains three input fields with question mark icons: 'Energieverbrauch' (kWh/100km), 'Anteil an Gesamtmenge' (%), and 'Durchschnittliche Batterie Kapazität' (kWh). Below each section is a 'Seltene Materialien:' section with a green plus icon and a question mark icon. This section includes a dropdown menu for 'Mat 1' (set to 'Lithium') and three input fields: 'Name:' (Lithium), 'Bedarf' (g/kWh), and 'Weltweit verf. Ressourcen' (t). At the bottom of the window are three icons: a save icon, a refresh icon, and a right-pointing arrow icon.

Parameter	Elektro PKW	Elektro LKW
Energieverbrauch	20 kWh/100km	85 kWh/100km
Anteil an Gesamtmenge	50 %	50 %
Durchschnittliche Batterie Kapazität	25 kWh	300 kWh
<b>Seltene Materialien:</b>		
Mat 1	Lithium	Lithium
Bedarf	140 g/kWh	150 g/kWh
Weltweit verf. Ressourcen	47000000 t	41000000 t

Abbildung 19: Parameter der Elektro-Mobilität

-Energieverbrauch:

Durchschnittlicher Energieverbrauch eines Elektro-PKWs in kWh pro 100 km

-Anteil an Gesamtmenge: Siehe Sektion 3.3

-Durchschnittliche Batteriekapazität:

Dieser Parameter entspricht der durchschnittlichen Kapazität der Batterie, die in einem elektrischen Fahrzeug verbaut ist. Basierend auf diesem Wert, dem Parameter „Anteil an Gesamtmenge“ und dem Parameter „Anzahl der zugelassenen PKW“ aus dem Abschnitt 3.11.1 kann die benötigte Gesamtkapazität der Elektro-PKWs bestimmt werden.

-Name (Seltene Materialien): Siehe Sektion 3.3

-Bedarf (Seltene Materialien): Siehe Sektion 3.3

-Weltweit verf. Ressourcen (Seltene Materialien): Siehe Sektion 3.3

3.6.2 Regenerative Anlagen

Zu den regenerativen Anlagen gehören die Objekte: „Windkraftanlagen auf See“, „Windkraftanlagen an Land“ und „Solarkraftwerk“. Diese drei Anlagentypen repräsentieren den Hauptenergieversorger aller drei Zweige. Alle Elemente dieses Kapitels werden über eine identische Oberfläche parametrisiert, welche exemplarisch für die Windkraftanlagen auf See in Abbildung 20 dargestellt wird.

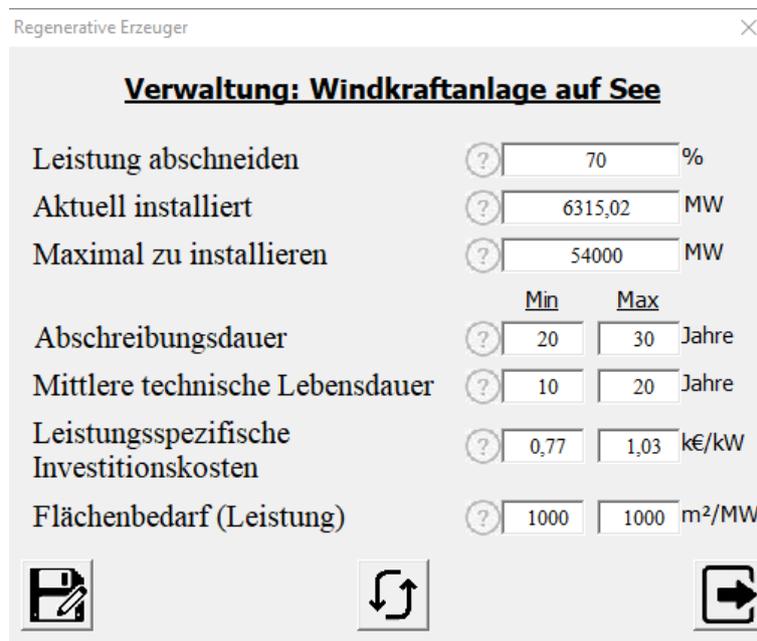


Abbildung 20: Parameter der regenerativen Erzeuger

-Leistung abschneiden:

Durch diesen Parameter kann der Nutzer die prozentuale Grenze zum Abschalten dieses Anlagentyps definieren. Dadurch wird der, auf die installierte Leistung normierte, Verlauf des Anlagentyps an dem entsprechenden prozentualen Wert „abgeschnitten“.

Dieser Parameter soll an einem Beispiel weiter veranschaulicht werden:

Es sei angenommen, dass für den Anlagentyp „Windkraftanlagen auf See“ eine Leistung von 10000 MW installiert wurde. Der Parameter „Leistung abschneiden“ wurde dabei durch den Nutzer auf 70% gesetzt. So ist die Maximalleistung, welche dieser Anlagentyp in Summe erbringen kann, 70% der installierten Leistung, also in diesem konkreten Beispiel 7000 MW.

-Aktuell installiert:

Dieser Parameter entspricht der aktuellen, in Deutschland installierten, Leistung dieses Anlagentyps. Dieser Wert wird benötigt damit der Faktor, um welchen die aktuell installierte Leistung erhöht werden muss, angegeben werden kann.

-Maximal zu installieren:

Über diesen Parameter kann der Nutzer eine maximal mögliche, zu installierende Leistung eines Anlagentyps definieren. Diese basiert beispielsweise auf dem verfügbaren Platz, welcher in Deutschland theoretisch für Solar- oder Windkraftanlagen zur Verfügung steht.

Sollte der Nutzer eine Parameterkombination wählen, in welcher die maximal zu installierenden Leistungen der regenerativen Anlagen nicht ausreichen, um die von ihm definierten Lasten zu decken, so werden die maximalen Leistungen um einen symmetrischen Faktor angehoben. Diese Maßnahme ist notwendig, da sonst das angestrebte Energiegleichgewicht nicht eingehalten werden kann.

Bei der Ergebnisdarstellung wird der Nutzer über diese Maßnahme und die Höhe des Faktors informiert.

-Abschreibungsdauer: Siehe Sektion 3.3

-Mittlere technische Lebensdauer: Siehe Sektion 3.3

-Leistungsspezifische Investitionskosten: Siehe Sektion 3.3

-Flächenbedarf (Leistung): Siehe Sektion 3.3

---

### 3.6.3 Regenerative Grundleistung

Unter der regenerativen Grundleistung werden im Rahmen dieser Arbeit alle weiteren, nicht einzeln aufgelisteten, regenerativen Energiequellen zusammengefasst. Diese Jahresenergie der Grundleistung kann dabei direkt im Flussdiagramm eingetragen werden. Der Verlauf wird dabei als konstante Grundeinspeisung verstanden.

---

### 3.6.4 Erlaubte CO<sub>2</sub>-Emission pro Jahr

Die erlaubte CO<sub>2</sub>-Emission pro Jahr beschreibt die Menge an CO<sub>2</sub>, welche alle konventionellen Kraftwerke in Summe pro Jahr emittieren dürfen. Über den Parameter „Max. anteilige CO<sub>2</sub>-Emission“ eines konventionellen Kraftwerks, welcher in Abschnitt 3.6.5 genauer beschrieben wird, kann der prozentuale Anteil, welchen dieses Kraftwerk im Jahr von dieser maximalen Emission erzeugen darf, bestimmt werden. Die Summe der „Max. anteilige CO<sub>2</sub>-Emission“ aller Kraftwerke darf dabei den Wert von 100% nicht überschreiten.

---

### 3.6.5 Konventionelle Kraftwerke / Gaskraftwerke

Die Standardparametrierung des Energiewendeplaners enthält ein konventionelles Kraftwerk, welches als Gaskraftwerk parametrierbar ist. Über das grüne „Plus-Symbol“ können weitere konventionelle Kraftwerke hinzugefügt und über die roten Pfeile priorisiert werden. Beide Mechanismen wurden in Sektion 3.4 und 0 bereits genauer erläutert. Die Oberfläche zur Parametrierung eines konventionellen Kraftwerks wird in Abbildung 21 exemplarisch am Parametersatz des Gaskraftwerks dargestellt.

Eine Besonderheit bei der Parametrierung der konventionellen Kraftwerke stellt der frei definierbare Name des Kraftwerks da. Dieser wird bei der Ergebnisdarstellung in Kapitel 0 als Beschriftung des entsprechenden Leistungsverlaufs genutzt.

The screenshot shows a software interface for configuring a 'Gaskraftwerk' (gas power plant). The parameters and their values are as follows:

Parameter	Value	Unit
Installierte Leistung	30	GW
Nutzbare Abwärme	100	%
Jahresnutzungsgrad	90	%
Max. anteilige CO2-Emission	100	%
Spezifische CO2-Produktion	600	g CO <sub>2</sub> -eq/kWh
Abschreibungsdauer	10 - 30	Jahre
Mittlere technische Lebensdauer	10 - 30	Jahre
Leistungsspezifische Investitionskosten	0,36 - 0,55	k€/kW
Flächenbedarf (Leistung)	153 - 153	m <sup>2</sup> /MW

At the bottom of the window, there are three icons: a save icon, a refresh icon, and a next step icon.

Abbildung 21: Parameter der konventionellen Erzeuger

-Installierte Leistung:

Dieser Parameter entspricht der installierten Leistung (Nennleistung) des konventionellen Kraftwerks.

-Nutzbare Abwärme:

Basierend auf der erzeugten Leistung des konventionellen Kraftwerks kann der Nutzer hier die nutzbare Abwärme des konventionellen Kraftwerks bestimmen. Anders als beispielsweise bei den elektrischen Speichern [Abschnitt 0] wird die nutzbare Abwärme nicht an den Verlusten bemessen, sondern direkt an der erzeugten Leistung. Erzeugt das konventionelle Kraftwerk beispielsweise zu einem Zeitpunkt „x“ eine Leistung von 15 GW bei einer Nutzbaren Abwärme von 50 % so entsteht am Zeitpunkt x eine nutzbare Wärmeleistung von 7,5 GW.

-Jahresnutzungsgrad: Siehe Sektion 3.3

-Max. anteilige CO<sub>2</sub>-Emission:

Diese entspricht dem prozentualen Anteil der „Erlaubte CO<sub>2</sub>-Emission pro Jahr“, welcher durch das konventionelle Kraftwerk emittiert werden darf. Der Parameter der „Erlaubte CO<sub>2</sub>-Emission pro Jahr“ wurde bereits in Abschnitt 3.6.4 genauer beschrieben.

-Spezifische CO<sub>2</sub>-Produktion:

Die spezifische CO<sub>2</sub>-Produktion definiert die Menge an freigesetzter CO<sub>2</sub>-Emission in Gramm pro erzeugter kWh. Basierend auf diesem Wert und der „Max. anteilige CO<sub>2</sub>-Emission“ wird die maximal erzeugbare Jahresenergie bestimmt.

-Abschreibungsdauer: Siehe Sektion 3.3

-Mittlere technische Lebensdauer: Siehe Sektion 3.3

-Leistungsspezifische Investitionskosten: Siehe Sektion 3.3

-Flächenbedarf (Leistung): Siehe Sektion 3.3

### 3.6.6 Elektrische Speicher

Die Standardparametrierung des Energiewendeplaners beinhaltet zwei elektrische Speicher. Diese beiden sind als Batterie und als Pumpspeicherkraftwerk parametrierbar. Über das grüne „Plus-Symbol“ können weitere elektrische Speicher hinzugefügt und über die roten Pfeile priorisiert werden. Beide Mechaniken wurden in Sektion 3.4 und 0 bereits genauer erläutert. Die Oberfläche zur Parametrierung eines elektrischen Speichers wird in Abbildung 22 exemplarisch am Parametersatz der Batterie dargestellt.

Eine Besonderheit bei der Parametrierung der elektrischen Speicher stellt der frei definierbare Name des Speichers und der Block zum Hinzufügen der seltenen Materialien da. Der Name wird dabei in der Ergebnisdarstellung [Kapitel 0] als Beschriftung des entsprechenden Leistungs- und Energieverlaufs genutzt. Außerdem sind die Einheiten bestimmter Parameter wählbar, was in Sektion 3.2 genauer beschrieben wurde.

**Speicherverwaltung:**  
**Batterie**

Max. erlaubte Kapazität	?	0,05	TWh
Max. erlaubte Leistung	?	100	GW
Jahresnutzungsgrad	?	99	%
Wirkungsgrad Einspeisung	?	90	%
Wirkungsgrad Ausspeisung	?	90	%
Selbstentladung	?	4	%/Jahr

**Seltene Materialien:** + ?

Mat 1		
Name:	?	Lithium
Bedarf	?	150 g/kWh
Weltweit verf. Ressourcen	?	41000000 t

Nutzbare Abwärme	?	0	%
Abschreibungsdauer	?	12	20 Jahre
Mittlere technische Lebensdauer	?	99	99 Jahre
Leistungsspezifische Investitionskosten	?	0,8	1,34 k€/kW
Energiespezifische Investitionskosten	?	0,5	1,34 k€/kWh
Benötigte Fläche (Leistung)	?	100	1000 m <sup>2</sup> /MW
Benötigte Fläche (Kapazität)	?	30	30 m <sup>2</sup> /MWh

Buttons:

Abbildung 22: Parameter der elektrischen Speicher

-Max. erlaubte Kapazität:

Die maximal erlaubte Kapazität bestimmt die maximal verfügbare Speicherkapazität des elektrischen Speichers.

-Max. erlaubte Leistung:

Die maximal erlaubte Leistung definiert die Größe der installierten Leistung (Nennleistung) des elektrischen Speichers.

-Jahresnutzungsgrad: Siehe Sektion 3.3-Wirkungsgrad Einspeisung / Ausspeisung:

Der Wirkungsgrad bestimmt den Anteil der eingespeisten bzw. ausgespeisten Energie, welcher tatsächlich und unter Berücksichtigung der Verluste in den bzw. aus dem Speicher ein- bzw. ausgespeichert werden kann. Dabei handelt es sich bei dem Wirkungsgrad der Einspeisung sowie Ausspeisung um einen Teil des Ladewirkungsgrades. Ist der Wirkungsgrad nicht bekannt so kann er aus der Wurzel des Ladewirkungsgrades bestimmt werden.

-Selbstentladung: Siehe Sektion 3.3.-Name (Seltene Materialien): Siehe Sektion 3.3.-Bedarf (Seltene Materialien): Siehe Sektion 3.3.-Weltweit verf. Ressourcen (Seltene Materialien): Siehe Sektion 3.3.-Nutzbare Abwärme:

Die nutzbare Abwärme bestimmt den Teil der Verluste, welcher bei der Ein- und Ausspeisung entsteht und in Form von Wärme weiter genutzt werden kann. Wird beispielsweise elektrische Energie bei einem Wirkungsgrad von 90% und einer Leistung von 10 GW in den Speicher eingespeist so entsteht eine Verlustleistung von 1 GW. Bei einer nutzbaren Abwärme von beispielsweise 50% könnten 0,5 GW der Verlustleistung in Form von Wärmeleistung dem Fernwärmenetz zugeführt werden.

-Abschreibungsdauer: Siehe Sektion 3.3.-Mittlere technische Lebensdauer: Siehe Sektion 3.3.-Leistungsspezifische & energiespezifische Investitionskosten: Siehe Sektion 3.3.-Benötigte Fläche (Leistung) & (Kapazität): Siehe Sektion 3.3.

### 3.6.7 Elektrische Last

Über das Element der „elektrischen Last“ lässt sich der Mittelwert des Bruttostromverbrauchs parametrieren. Des Weiteren kann bestimmt werden, ob die Last als konstanter oder als, auf dem in Abschnitt 1.5.1 beschriebenen, Verlauf der elektrischen Last, simuliert werden soll. Zuletzt kann der Nutzer bestimmen ob die Verläufe der Datenbasis aus Abschnitt 1.5.1 grafisch aufbereitet und angezeigt werden sollen. Abbildung 23 zeigt die Oberfläche zur Parametrierung der elektrischen Last.

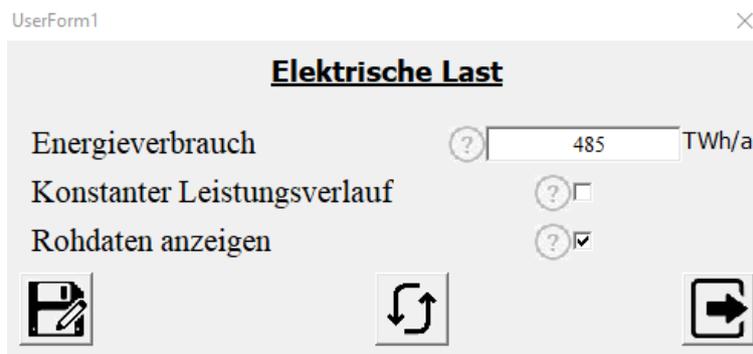


Abbildung 23: Parameter der elektrischen Last

#### -Energieverbrauch:

Dieser Parameter definiert die mittlere Jahresenergie des Bruttostromverbrauchs. Er beinhaltet ebenfalls die Übertragungsverluste sowie den Eigenbedarf der Stromerzeuger.

#### -Konstanter Leistungsverlauf:

Über diesen Bool'schen Parameter kann der Nutzer die Form des Bruttostromverbrauchs bestimmen. Dabei entstehen folgende Szenarien:

→ True:

Der Verlauf des Bruttostromverbrauchs wird als konstante Last, mit einer Jahresenergie gemäß des Parameters „Energieverbrauch“, angesehen.

→ False:

Die Basis des Verlaufs des Bruttostromverbrauchs bildet der gemessene Lastverlauf der Jahre 2012 bis 2018. Dieser wird dabei zunächst auf sein Leistungsmaximum normiert und so angepasst, dass er im Mittel der Jahresenergie, welche über den Parameter „Energieverbrauch“ definiert wurde, entspricht.

-Rohdaten Anzeigen:

Hierüber wird bestimmt, ob die in Eingangsverläufe grafische aufbereitet und dargestellt werden sollen.

### 3.7 DER WASSERSTOFF-ZWEIG

Im folgenden Abschnitt werden die Elemente und Parameter des Wasserstoff-Zweigs genauer betrachtet. Dabei werden die Eingabefelder und dessen Masken aufgeführt. Der Wasserstoff-Zweig, welcher in Abbildung 24 dargestellt ist, wird über die Elektrolyse direkt aus dem elektrischen Zweig gespeist. Dieser speist wiederum durch die Methanisierung den Methan-Zweig. Das Element der Methanisierung wird als Teil des Methan-Zweigs verstanden und an entsprechender Stelle genauer beschrieben. Das Zentrum des Wasserstoff-Zweigs bildet die Wasserstoff-Sammelschiene. Diese fungiert als Bindeglied aller Verbraucher und Erzeuger von Energie in Form von Wasserstoff. Über den blauen Abzweig, welcher die Abbildung 24 am mittleren rechten Rand verlässt, werden die Anlagen des Typs „Gas-to-Heat (Wasserstoff)“ des Niedrig- und Hochtemperatur-Zweigs gespeist. Außerdem wird über den grünen Abwärme-Zweig die nutzbare Abwärme der „Elektrolyse“ und der "Gas-to-Power (Wasserstoff)“ in das Fernwärmenetz bzw. den Fernwärmespeicher eingespeist.

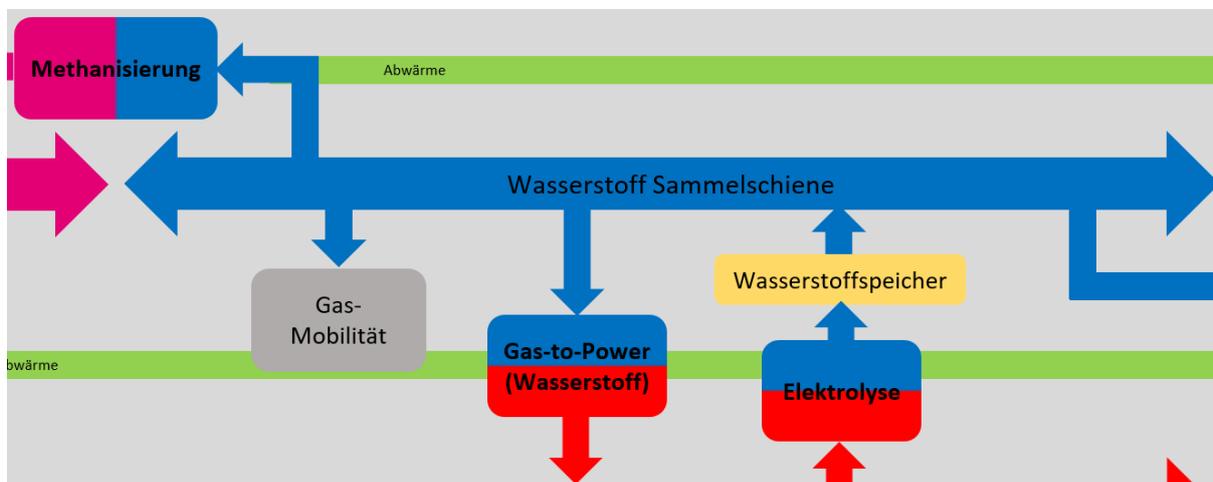


Abbildung 24: Der Wasserstoff-Zweig (Flussdiagramm)

Folgend werden die Elemente des Wasserstoff-Zweigs genauer betrachtet (v.l.n.r.).

### 3.7.1 Gas-Mobilität (Wasserstoff)

Abbildung 25 zeigt die Oberfläche zur Parametrierung der Gas-Mobilität. Aufgrund ihrer gleichen Parameter teilen sich sowohl die Wasserstoff-, als auch Methan-Mobilität die gleiche Oberfläche zur Parametrierung. Folgend wird die Oberfläche sowie deren Parameter am Beispiel der Gas-Mobilität durch Wasserstoff erläutert. Bei der Gas-Mobilität durch Methan, in Abschnitt 3.8.1, wird auf diesen Abschnitt verwiesen.

Die Oberfläche teilt sich, genau wie die der Elektro-Mobilität [Abschnitt 3.6.1], in zwei identische Abschnitte für PKW und LKW auf. Ebenso werden an dieser Stelle die Parameter allgemeingültig beschrieben.

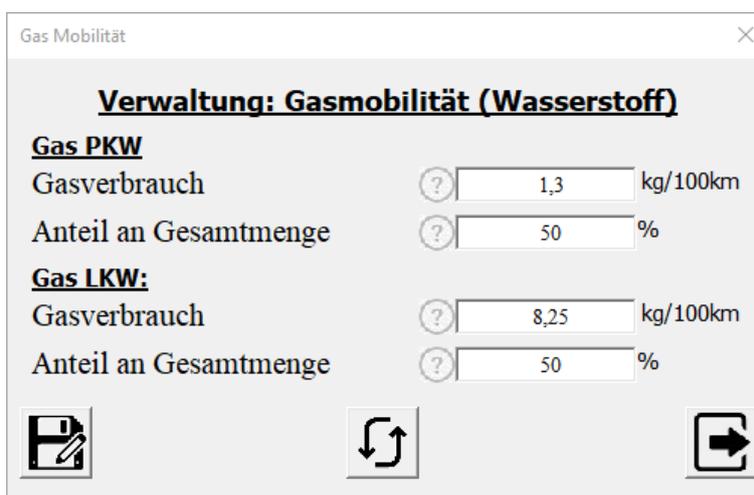


Abbildung 25: Parameter der Gas-Mobilität

-Gasverbrauch:

Über diesem Parameter wird der durchschnittlichen Gasverbrauch der Gas PKW/LKW in kg pro 100 km definiert.

-Anteil an Gesamtmenge: Siehe Sektion 3.3

### 3.7.2 Gas-to-Power (Wasserstoff)

Abbildung 26 zeigt die Oberfläche zur Parametrierung des Anlagentyps Gas-to-Power sowie Power-to-Gas. Dazu gehören neben den Elementen „Gas-to-Power (Methan)“ und „Gas-to-Power (Wasserstoff)“ auch die Objekte „Elektrolyse“ und „Methanisierung“.

Folgend wird die Oberfläche und deren Parameter exemplarisch durch die Gas-to-Power Anlage „Wasserstoff Gaskraftwerk“ erläutert. In den Beschreibungen der oben genannten Komponenten wird auf diesen Abschnitt verwiesen.

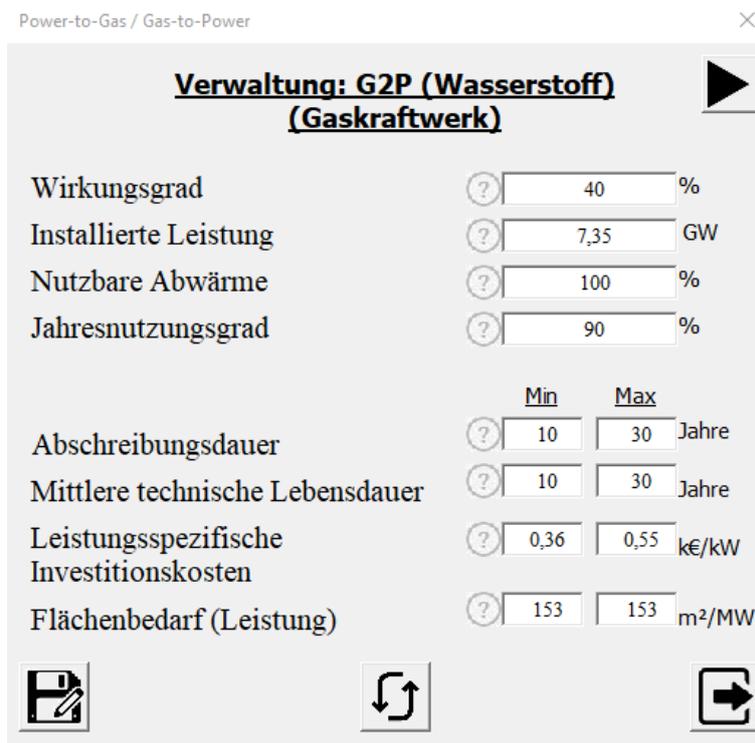


Abbildung 26: Parameter der Gas-to-Power & Power-to-Gas

#### -Wirkungsgrad:

Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von tatsächlich abgegebener elektrischer Energie zur eingesetzten Energie in Form von Gas. Die Differenz der beiden Energien wird als Verluste bezeichnet, welche sich wiederum in nutzbare Verluste, in Form der nutzbaren Abwärme und nicht nutzbare Verluste aufteilen. Für Institutionen des Typs Power-to-Gas ist die Wirkungsrichtung der aufgenommenen und abgegebenen Energieformen umgekehrt.

**-Installierte Leistung:**

Die installierte Leistung beschreibt jene Leistung (Nennleistung), mit welcher die Gas-to-Power bzw. Power-to-Gas Anlage ohne dessen Schädigung dauerhaft betrieben werden kann. Darunter wird die Ausgangsleistung der Anlage verstanden.

**-Nutzbare Abwärme:**

Die nutzbare Abwärme definiert den, in der Beschreibung des Wirkungsgrades erwähnten, Teil der nutzbaren Verluste in Form von Abwärme. Dabei ist der Teil der Verlustleistung, welcher in das Fernwärmenetz eingespeist werden kann, als nutzbare Verlustleistung zu verstehen.

**-Jahresnutzungsgrad:** Siehe Sektion 3.3

**-Abschreibungsdauer:** Siehe Sektion 3.3

**-Mittlere technische Lebensdauer:** Siehe Sektion 3.3

**-Leistungsspezifische Investitionskosten:** Siehe Sektion 3.3

**-Flächenbedarf (Leistung):** Siehe Sektion 3.3

### 3.7.3 Wasserstoffspeicher

Abbildung 27 zeigt die Oberfläche zur Parametrierung der Speicher des Typs Gasspeicher anhand des Wasserstoffspeichers. Diese wird ebenfalls durch den Speicher („Methanspeicher“) des Methan-Zweigs zur Parametrierung genutzt.

Sämtlicher erzeugter und importierter Wasserstoff wird zunächst in diese Komponente eingespeichert und von dort auf die Verbraucher aufgeteilt.

Folgend wird die Oberfläche und deren Parameter exemplarisch durch den Wasserstoffspeicher erläutert. In der Beschreibung des Methanspeichers wird auf diesen Abschnitt verwiesen.

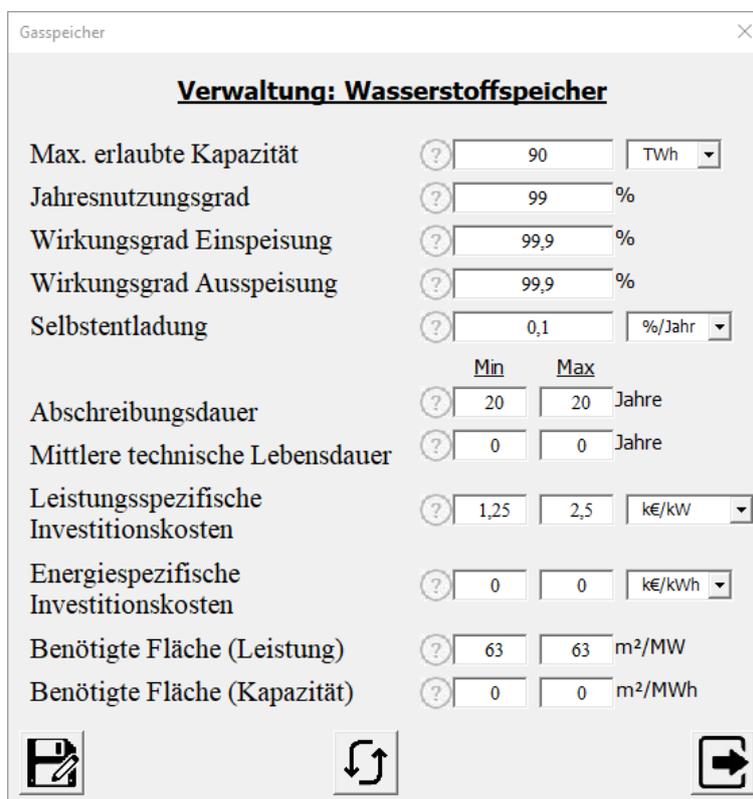


Abbildung 27: Parameter der Gasspeicher

-Max. erlaubte Kapazität:

Die maximal erlaubte Kapazität bestimmt die maximal verfügbare Speicherkapazität des Gasspeichers.

-Jahresnutzungsgrad: Siehe Sektion 3.3

-Wirkungsgrad Einspeisung / Ausspeisung:

Anders als bei den elektrischen Speichern, in Abschnitt 0, bestimmt der Wirkungsgrad der Einspeisung bzw. der Ausspeisung bei den Gasspeichern nicht den tatsächlich eingespeicherten oder ausgespeicherten Teil der Energie, sondern jene elektrische Leistung, welche aufgebracht werden muss, um die entsprechende Gasleistung ein- bzw. ausspeichern zu können. Dies kann beispielsweise durch elektrische Pumpen geschehen.

Soll beispielsweise eine Gasleistung von 1 GW bei einem Wirkungsgrad von 90% umgespeichert werden, so werden 0,1 GW an elektrischer Energie benötigt, um dies zu ermöglichen.

-Selbstentladung: Siehe Sektion 3.3

-Abschreibungsdauer: Siehe Sektion 3.3

-Mittlere technische Lebensdauer: Siehe Sektion 3.3

-Leistungsspezifische & energiespezifische Investitionskosten: Siehe Sektion 3.3

-Benötigte Fläche (Leistung) & (Kapazität): Siehe Sektion 3.3

---

### 3.7.4 Elektrolyse

Bei der Elektrolyse handelt es sich um eine Anlage des Typs Power-to-Gas. Sie wandelt elektrische Energie in gasförmige Energie und speist damit sowohl den Wasserstoff-, als auch den Methan-Zweig.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Element „Gas-to-Power (Wasserstoff)“ in Abschnitt 0 beschrieben und in Abbildung 26 dargestellt.

### 3.8 DER METHAN-ZWEIG

In diesem Abschnitt werden die Elemente und Parameter des Methan-Zweigs genauer betrachtet. Dabei werden die Eingabefelder und dessen Masken aufgeführt. Der Methan-Zweig, Abbildung 28, wird über die Methanisierung aus dem Wasserstoff-Zweig gespeist. Das Zentrum des Methan-Zweigs bildet die Methan-Sammelschiene. Diese fungiert als Bindeglied aller Verbraucher und Erzeuger von Energie in Form von Methan. Über den Abzweig, welcher die Abbildung 28 am linken Rand verlässt, werden die Anlagen des Typs „Gas-to-Heat (Methan)“ des Niedrig- und Hochtemperatur-Zweigs gespeist. Außerdem wird über den grünen Abwärme-Zweig die nutzbare Abwärme der Methanisierung sowie der Komponente „Gas-to-Power (Methan)“ in das Fernwärmenetz bzw. den Fernwärmespeicher eingespeist.

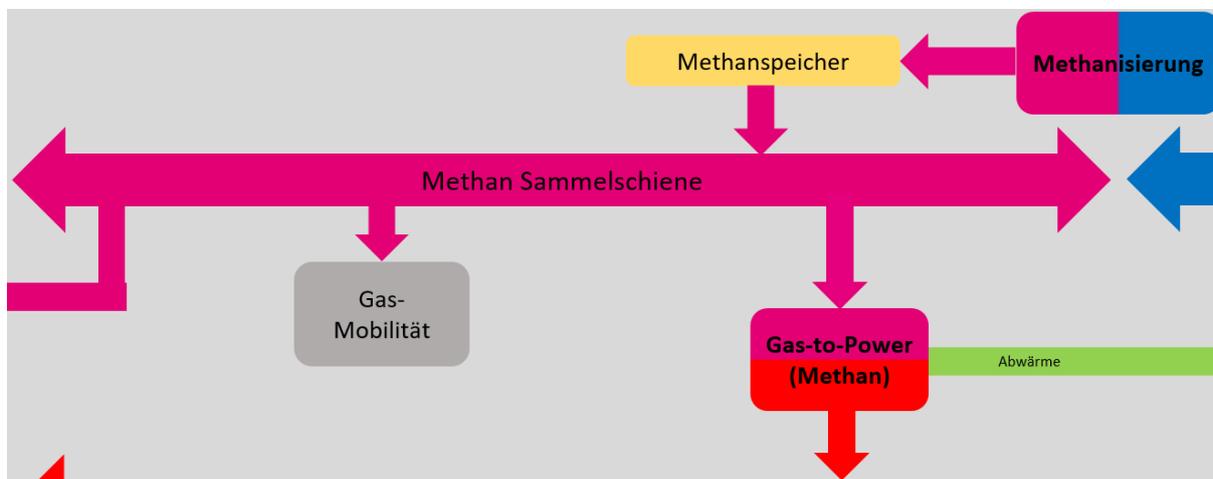


Abbildung 28: Der Methan-Zweig (Flussdiagramm)

Folgend werden die Elemente des Methan-Zweigs genauer betrachtet (v.l.n.r.).

#### 3.8.1 Gas-Mobilität (Methan)

Über das Element „Gas-Mobilität (Methan)“ können die Parameter der Gas-Mobilität durch Methan verwaltet werden. Die Oberfläche teilt sich, genau wie die der Elektro-Mobilität in Abschnitt 3.6.1, in zwei identische Abschnitte für PKW und LKW auf.

Die Oberfläche wie auch dessen Parameter wurden bereits exemplarisch durch die „Gas-Mobilität (Wasserstoff)“ in Abschnitt 3.7.1 beschrieben. Die Oberfläche ist in Abbildung 25 dargestellt.

### 3.8.2 Gas-to-Power (Methan)

Durch die Komponenten des Elements „Gas-to-Power (Methan)“ kann Methan zur Deckung von negative Residualleistung rückverstromt werden. Aufgrund des vergleichsweise geringen Wirkungsgrades bei der regenerativen Gewinnung von Methan, wird dies nur als letzte Möglichkeit durchgeführt.

Die Oberfläche und dessen Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Gas-to-Power (Wasserstoff)“ in Abschnitt 0 beschrieben und in Abbildung 26 dargestellt.

---

### 3.8.3 Methanspeicher

Über das Objekt „Methanspeicher“ können die Parameter des Gasspeichers „Methanspeicher“ verwaltet werden. Sämtliches erzeugtes und importiertes Methan wird zunächst in dieser Institution eingespeichert und von dort auf die Verbraucher aufgeteilt.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Wasserstoffspeicher“ in Abschnitt 0 beschrieben und in Abbildung 27 dargestellt.

---

### 3.8.4 Methanisierung

Bei der Methanisierung handelt es sich um eine Anlage des Typs Power-to-Gas, welche man in diesem Fall auch als „Gas-to-Gas“ bezeichnen könnte. Sie wandelt gasförmige Energie, in Form von Wasserstoff, in Methan um, wodurch der Methan-Zweig und seine Verbraucher mit Energie versorgt werden.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Gas-to-Power (Wasserstoff)“ in Abschnitt 0 beschrieben und in Abbildung 26 dargestellt.

### 3.9 DER NIEDRIGTEMPERATUR-ZWEIG

Im folgenden Abschnitt werden die Elemente und Parameter des Niedrigtemperatur-Zweigs genauer betrachtet. Dabei werden die Eingabefelder und dessen Masken aufgeführt. Der Niedrigtemperatur-Zweig, Abbildung 29, wird sowohl durch die zentrale und dezentrale Direktwärme aus dem elektrischen Zweig, als auch durch die Gas-to-Heat Anlagen der beiden chemischen Zweige „Wasserstoff“ und „Methan“ gespeist. Das Zentrum des Niedrigtemperatur-Zweigs bildet zum einen die Wärme-NT-Sammelschiene und zum anderen der „Fernwärmespeicher“. Während erstere als Bindeglied aller Verbraucher und Erzeuger von Energie in Form von Niedrigtemperatur Wärme fungiert, laufen im „Fernwärmespeicher“ alle Abwärme-Zweige des elektrischen sowie der beiden chemischen Zweige zusammen. Dieser wird außerdem durch die dezentrale Direktwärme aufgestockt.

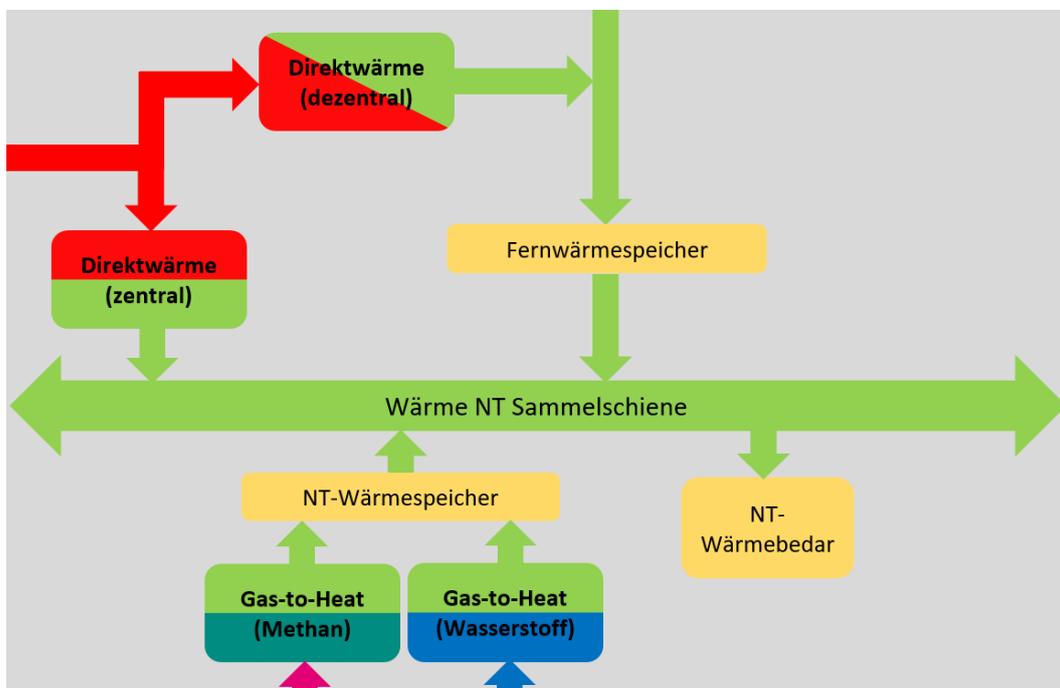


Abbildung 29: Der Niedrigtemperatur-Zweig (Flussdiagramm)

Die Elemente des Niedrigtemperatur-Zweigs sollen genauer betrachtet werden (v.l.n.r.):

### 3.9.1 Direktwärme (zentral)

Im Element der zentralen Direktwärme werden die Anlagen, welche sich lokal beim Verbraucher befinden, zusammengefasst. Aktuell beinhaltet dies die Infrarotheizung, wie auch die Wärmepumpe. Diese beiden Anlagen können durch die in Sektion 3.2 beschriebene Mechanik des „Umblätterns“ in einer Oberfläche verwaltet werden. Die Oberfläche, welche in Abbildung 30 dargestellt ist, wird ebenfalls zur Parametrierung der dezentralen Direktwärme des Niedrigtemperatur-Zweigs sowie durch das Element der Direktwärme im Hochtemperatur-Zweig genutzt. Aus diesem Grund wird an entsprechender Stelle auf diese Erläuterung verwiesen.

Direkt Wärme

**Verwaltung: Infrarot Heizung  
(Niedrigtemperatur) (Zentral)**

Wirkungsgrad	?	99	%
Jahresnutzungsgrad	?	90	%
Abschreibungsdauer	?	10	30
Mittlere technische Lebensdauer	?	0	0
Leistungsspezifische Investitionskosten	?	0,36	0,55
Flächenbedarf (Leistung)	?	153	153

Min Max Jahr Jahr k€/kW m²/MW

Abbildung 30: Parameter der Direktwärme

Folgend wird die Oberfläche und dessen Parameter exemplarisch durch die Verwaltung der Infrarotheizung erläutert.

#### -Wirkungsgrad:

Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von abgegebener Energie in Form von Wärme, zu aufgenommener elektrischer Energie. Die Differenz der beiden Energien wird als nicht mehr weiternutzbare Verluste betrachtet. Bei der Institution „Wärmepumpe“ ist der Wirkungsgrad als „Coefficient of Performance“ (COP-Faktor) zu verstehen und muss ebenfalls in Prozent angegeben werden.

-Jahresnutzungsgrad: Siehe Sektion 3.3

-Abschreibungsdauer: Siehe Sektion 3.3

-Mittlere technische Lebensdauer: Siehe Sektion 3.3

-Leistungsspezifische Investitionskosten: Siehe Sektion 3.3

-Benötigte Fläche (Leistung): Siehe Sektion 3.3

---

### 3.9.2 Direktwärme (dezentral)

Hierbei handelt es sich bei der dezentralen Direktwärme um eine elektrische Anlage, welche die nicht durch nutzbare Abwärme deckbaren Anteile der Fernwärmelast deckt. Da Wärmelasten nicht durch Importe gedeckt werden können und nach Definition auch nicht ungedeckt bleiben dürfen, muss es eine Anlage geben, welche das Fernwärmenetz bzw. den Fernwärmespeicher mit ausreichender Wärmeenergie versorgt, um die, durch den Nutzer angegebene, Fernwärmelast decken zu können.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Element „Direktwärme (zentral)“ in Abschnitt 3.9.1 beschrieben. Die Oberfläche ist in Abbildung 30 dargestellt.

### 3.9.3 Fernwärmespeicher

Der Fernwärmespeicher repräsentiert die Kapazität des Fernwärmenetzes und ist auch als diese zu verstehen. Die Energie, welche durch die nutzbare Abwärme und die dezentrale Direktwärme eingespeichert wird, deckt die, durch den Nutzer definierte Fernwärmelast. Abbildung 31 zeigt die Parametrierungsoberfläche der Wärmespeicher, zu welcher neben dem Fernwärmespeicher auch die Wärmespeicher des Niedrig- und Hochtemperatur-Zweigs gehören. Die Oberfläche und dessen Parameter werden an dieser Stelle exemplarisch durch den Fernwärmespeicher beschrieben und dienen in der Beschreibung der anderen Wärmespeicher als Referenzquelle.

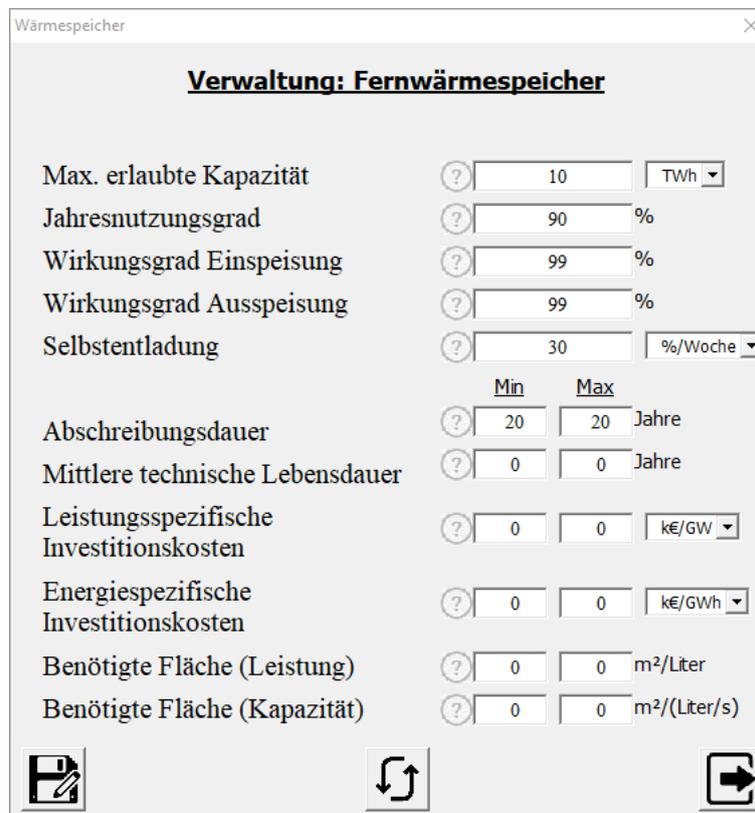


Abbildung 31: Parameter der Wärmespeicher

-Max. erlaubte Kapazität:

Die maximal erlaubte Kapazität bestimmt die maximal verfügbare Speicherkapazität des Wärmespeichers

-Jahresnutzungsgrad: Siehe Sektion 3.3

### -Wirkungsgrad Einspeisung / Ausspeisung:

Anders als bei den elektrischen Speichern in Abschnitt 0 bestimmt der Wirkungsgrad der Einspeisung, bzw. der Ausspeisung bei den Wärmespeichern nicht den tatsächlich eingespeicherten oder ausgespeicherten Teil der Energie, sondern jene elektrische Leistung, welche aufgebracht werden muss, um die entsprechenden Wärmeleistung ein- bzw. ausspeichern zu können. Dies könnte beispielsweise durch elektrische Pumpen geschehen.

Soll beispielsweise eine Wärmeleistung von 1 GW bei einem Wirkungsgrad von 90% umgespeichert werden, so werden 0,1 GW an elektrischer Energie benötigt, um dies zu ermöglichen.

-Selbstentladung: Siehe Sektion 3.3

-Abschreibungsdauer: Siehe Sektion 3.3

-Mittlere technische Lebensdauer: Siehe Sektion 3.3

-Leistungsspezifische & energiespezifische Investitionskosten: Siehe Sektion 3.3

-Benötigte Fläche (Leistung) & (Kapazität): Siehe Sektion 3.3

---

### 3.9.4 NT-Wärmespeicher

Wie bereits einleitend in Unterabschnitt 2.1.3.3 beschrieben, wird der Niedrigtemperatur-Wärmespeicher weniger als Speicher, sondern eher als „zeitlicher Puffer“ verstanden. Dieser wird durch die Anlagen des Typs Gas-to-Heat des Wasserstoffs- und Methan-Zweig mit ausreichend Energie geladen, um seine Selbstentladung zu kompensieren und die Last des nächsten Zeitschrittes decken zu können. Ein langfristiges Speichern von Energie ist in diesem Speicher nicht vorgesehen.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Fernwärmespeicher“ in Abschnitt 3.9.3 beschrieben, dessen Oberfläche in Abbildung 30 dargestellt ist.

---

### 3.9.5 Gas-to-Heat (Methan)

Über das Element „Gas-to-Heat (Methan)“ im Niedrigtemperatur-Zweig wird der Niedrigtemperatur-Wärmespeicher mit ausreichend Wärmeenergie versorgt, um den in Abschnitt 3.9.7 prozentualen Anteil der Niedrigtemperatur-Wärmelast durch Methan decken zu können. Abbildung 32 zeigt die Parametrierungsoberfläche der Anlagen des Typs Gas-to-Heat, zu welcher neben den entsprechenden Methan- und Wasserstoff-Institutionen des Niedrigtemperatur-Zweigs, auch die des Hochtemperatur-Zweigs zählen.

Die Oberfläche und deren Parameter werden an dieser Stelle exemplarisch durch das Element „Gas-to-Heat (Methan)“ des Hochtemperatur-Zweigs beschrieben und dienen in der Beschreibung der anderen Institutionen als Referenzquelle.

Parameter	Min	Max	Einheit
Wirkungsgrad	96		%
Jahresnutzungsgrad	99		%
Abschreibungsdauer	10	30	Jahre
Mittlere technische Lebensdauer	0	0	Jahre
Leistungsspezifische Investitionskosten	0,36	0,55	k€/kW
Flächenbedarf (Leistung)	153	153	m <sup>2</sup> /MW

Abbildung 32: Parameter der Gas-to-Heat

#### -Wirkungsgrad:

Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von abgegebener Energie, in Form von Wärme, zu aufgenommener Energie in Form von Gas. Die Differenz der beiden Energien wird als nicht mehr weiter nutzbare Verluste betrachtet.

-Jahresnutzungsgrad: Siehe Sektion 3.3

-Abschreibungsdauer: Siehe Sektion 3.3

-Mittlere technische Lebensdauer: Siehe Sektion 3.3

-Leistungsspezifische Investitionskosten: Siehe Sektion 3.3

-Benötigte Fläche (Leistung): Siehe Sektion 3.3

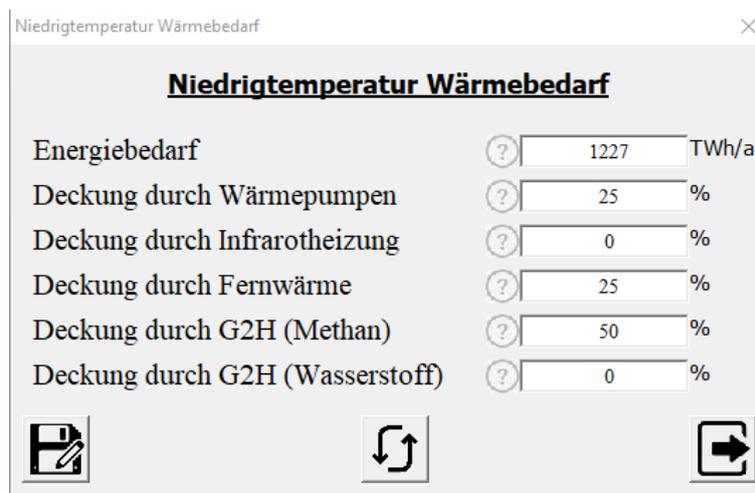
### 3.9.6 Gas-to-Heat (Wasserstoff)

Über das Element „Gas-to-Heat (Wasserstoff)“ im Niedrigtemperatur-Zweig wird der Niedrigtemperatur-Wärmespeicher mit ausreichender Wärmeenergie versorgt, um den in Abschnitt 3.9.7 prozentualen Anteil der Niedrigtemperatur-Wärmelast durch Wasserstoff decken zu können.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Gas-to-Heat (Methan)“ in Abschnitt 3.9.5 beschrieben und in Abbildung 32 dargestellt.

### 3.9.7 NT-Wärmebedarf

Über die Oberfläche zur Parametrierung der Niedrigtemperatur-Wärmelast, welche in Abbildung 33 dargestellt ist, bestimmt der Nutzer die geforderte Jahresenergie dieser Last. Außerdem wird diese an dieser Stelle in die anteilig zu deckenden Lasten aufgeteilt. Die Niedrigtemperatur-Wärmelast kann dabei durch Wärmepumpen, Infrarotheizungen, Fernwärme oder durch Gas-to-Heat mittels Wasserstoff und Methan gedeckt werden.



Parameter	Wert	Einheit
Energiebedarf	1227	TWh/a
Deckung durch Wärmepumpen	25	%
Deckung durch Infrarotheizung	0	%
Deckung durch Fernwärme	25	%
Deckung durch G2H (Methan)	50	%
Deckung durch G2H (Wasserstoff)	0	%

Abbildung 33: Parameter der Niedrigtemperatur-Wärmelast

#### -Energiebedarf:

Der Energiebedarf bestimmt die benötigte mittlere Jahresenergie des Niedrigtemperatur-Zweigs.

#### -Deckung durch Wärmepumpen:

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Niedrigtemperatur-Wärmebedarfs, welcher durch Erdwärmepumpen gedeckt werden muss.

-Deckung durch Infrarotheizung:

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Niedrigtemperatur-Wärmebedarfs, welcher durch Infrarotheizungen gedeckt werden muss.

-Deckung durch Fernwärme:

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Niedrigtemperatur-Wärmebedarfs, welcher durch Fernwärmeheizungen gedeckt werden muss.

-Deckung durch G2H (Methan):

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Niedrigtemperatur-Wärmebedarfs, welcher durch Methan-Gasheizungen gedeckt werden muss.

-Deckung durch G2H (Wasserstoff):

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Niedrigtemperatur-Wärmebedarfs, welcher durch Wasserstoff-Gasheizungen gedeckt werden muss.

### 3.10 DER HOCHTEMPERATUR-ZWEIG

Im folgenden Abschnitt werden die Elemente und Parameter des Hochtemperatur-Zweigs genauer betrachtet. Dabei werden die Eingabefelder und dessen Masken aufgeführt. Der Hochtemperatur-Zweig, welcher in Abbildung 34 dargestellt ist, wird sowohl durch die Direktwärme aus dem elektrischen, als auch durch die Gas-to-Heat Anlagen der beiden chemischen Zweige Wasserstoff- und Methan- gespeist. Das Zentrum des Hochtemperatur-Zweigs bildet die Wärme-HT-Sammelschiene, welche als Bindeglied aller Verbraucher und Erzeuger von Energie in Form von Hochtemperatur-Wärme fungiert.

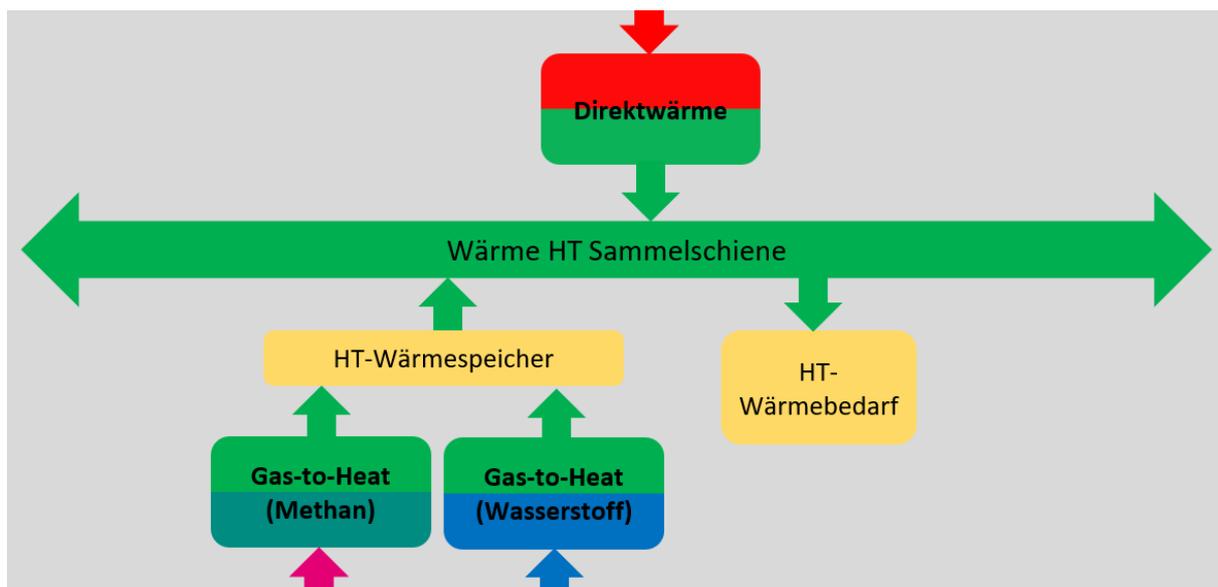


Abbildung 34: Der Hochtemperatur-Zweig (Flussdiagramm)

Folgend werden die Elemente des Hochtemperatur-Zweigs genauer betrachtet (v.o.n.u.).

#### 3.10.1 Direktwärme

Als Direktwärme im Hochtemperatur-Zweig werden alle elektrischen Anlagen, welche Wärme mit einer Temperatur  $>300^{\circ}\text{C}$  erzeugen, zusammengefasst.

Die Oberfläche, sowie deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Direktwärme (zentral)“ in Abschnitt 3.9.1 beschrieben. Die Oberfläche ist in Abbildung 30 dargestellt.

---

### 3.10.2 HT-Wärmespeicher

Wie einleitend in Unterabschnitt 2.1.3.3 beschrieben, wird der Hochtemperatur-Wärmespeicher weniger als Speicher, sondern als „zeitlicher Puffer“ verstanden. Dieser wird durch die Anlagen des Typs Gas-to-Heat des Wasserstoff- und Methan-Zweigs mit ausreichend Energie geladen, um seine Selbstentladung zu kompensieren und die Last des nächsten Zeitschrittes decken zu können. Ein langfristiges Speichern von Energie ist in diesem Speicher nicht vorgesehen.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Fernwärmespeicher“ in Abschnitt 3.9.3 beschrieben, dessen Oberfläche in Abbildung 30 dargestellt ist.

---

### 3.10.3 Gas-to-Heat (Methan)

Über das Element „Gas-to-Heat (Methan)“ im Hochtemperatur-Zweig wird der Hochtemperatur-Wärmespeicher mit ausreichend Wärmeenergie versorgt, um den in Abschnitt 3.10.5 prozentualen Anteil der Hochtemperatur-Wärmelast durch Methan decken zu können.

Die Oberfläche und deren Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Gas-to-Heat (Methan)“ in Abschnitt 3.9.5 beschrieben und in Abbildung 32 dargestellt ist.

---

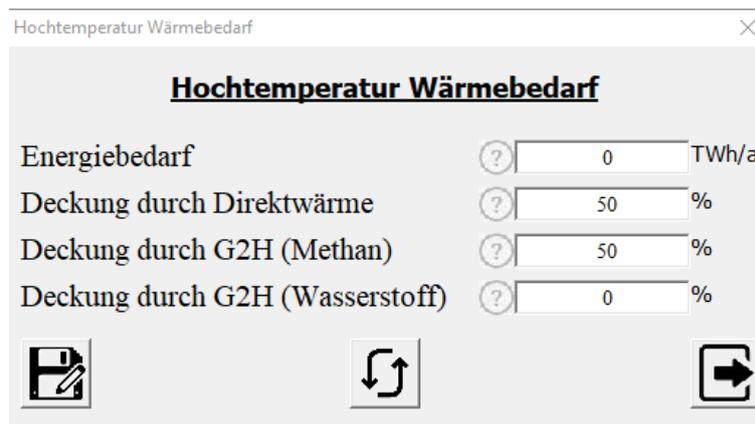
### 3.10.4 Gas-to-Heat (Wasserstoff)

Über das Element „Gas-to-Heat (Wasserstoff)“ im Hochtemperatur-Zweig wird der Hochtemperatur-Wärmespeicher mit ausreichend Wärmeenergie versorgt, um den in Abschnitt 3.10.5 prozentual Anteil der Hochtemperatur Wärmelast durch Wasserstoff decken zu können.

Die Oberfläche sowie dessen Parameter wurden bereits exemplarisch durch das Objekt „Gas-to-Heat (Methan)“ in Abschnitt 3.9.5 beschrieben, dessen Oberfläche in Abbildung 32 dargestellt ist.

### 3.10.5 HT-Wärmebedarf

Über die Oberfläche zur Parametrierung der Hochtemperatur-Wärmelast, welche in Abbildung 35 dargestellt ist, bestimmt der Nutzer die geforderte Jahresenergie dieser Last. Außerdem wird diese an dieser Stelle in die anteilig zu deckenden Lasten aufgeteilt. Die Hochtemperatur-Wärmelast kann dabei durch elektrische Direktwärme oder durch Gas-to-Heat mittels Wasserstoff und Methan gedeckt werden.



Parameter	Value	Unit
Energiebedarf	0	TWh/a
Deckung durch Direktwärme	50	%
Deckung durch G2H (Methan)	50	%
Deckung durch G2H (Wasserstoff)	0	%

Abbildung 35: Parameter der Hochtemperatur Wärmelast

#### -Energiebedarf:

Der Energiebedarf bestimmt die benötigte, mittlere Jahresenergie des Hochtemperatur Zweigs.

#### -Deckung durch Direktwärme:

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Hochtemperatur Wärmebedarfs, welcher durch elektrische Direktwärme gedeckt werden muss.

#### -Deckung durch G2H (Methan):

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Hochtemperatur Wärmebedarfs, welcher durch Methanverbrennung gedeckt werden muss.

#### -Deckung durch G2H (Wasserstoff):

Dieser Parameter bestimmt den prozentualen Anteil des Hochtemperatur Wärmebedarfs, welcher durch Wasserstoffverbrennung gedeckt werden muss.

### 3.11 EXTERNE SCHALTFLÄCHEN

Im folgenden Abschnitt werden die externen Schaltflächen, welche nicht direkt im Flussdiagramm enthalten sind, genauer betrachtet. Dabei handelt es sich sowohl um Schaltflächen zum Öffnen von Parametrierungsoberflächen, wie beispielsweise die zum Verwalten der allgemeinen Mobilitätseinstellungen, als auch um Schaltflächen, welche bestimmte Aktionen auslösen. Eine dieser Aktionen ist beispielsweise das Speichern der gesamten Eingabemaske.

Folgend werden die Schaltflächen anhand ihrer Symbole ausgeführt und einzeln erläutert.

#### 3.11.1 Grundeinstellungen Mobilität



Durch einen Klick auf die Schaltfläche der „Grundeinstellungen Mobilität“ wird die Parametrierungsoberfläche zur Verwaltung der zweigübergreifenden Mobilitätseinstellungen, welche in Abbildung 36 dargestellt ist, geöffnet. Sowohl die Elektro-, als auch die beiden Varianten der Gas-Mobilität greifen auf diesen Parametersatz zurück, um beispielsweise die absolute Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge zu bestimmen.

Grundeinstellungen Mobilität	
Anzahl der zugelassenen PKW	22900000
Anzahl der zugelassenen LKW	1500000
Durchschnittliche Fahrleistung (PKW)	13922 km/a
Durchschnittliche Fahrleistung (LKW)	96915 km/a
Energiedichte Methan	14 kWh/kg
Energiedichte Wasserstoff	33,33 kWh/kg

Abbildung 36: Parameter der Grundeinstellungen zur Mobilität

#### -Anzahl der zugelassenen PKW / LKW:

Dieser Parameter enthält die Anzahl aller in Deutschland zugelassenen PKW/LKW. Dazu gehören Elektro-, Hybrid-, Benzin-, Brennstoffzellen- und Methan- PKW/LKW. Diese Angabe wird benötigt, um die prozentualen Angaben im Parameter „Anteil an Gesamt“ der einzelnen Mobilitätstypen in absolute Zahlen zu fassen.

-Durchschnittliche Fahrleistung (PKW) / (LKW):

Diese Angabe entspricht der mittleren Fahrleistung, die ein durchschnittlicher PKW/LKW pro Jahr zurücklegt. Über diesen Parameter und den Parameter „Energieverbrauch“ der einzelnen Mobilitätstypen wird die benötigte Jahresenergie definiert.

-Energiedichte Methan/Wasserstoff:

Über die Energiedichte eines Gases kann aus der Masse auf die darin enthaltene Energie geschlossen werden. So kann der Gasverbrauch der Gas-Mobilität in eine benötigte Energie umgerechnet werden

3.11.2 Allgemeine Einstellungen

 Durch einen Klick auf die Schaltfläche der „Allgemeinen Einstellungen“ wird die Parametrierungsoberfläche zur Verwertung allgemeiner, das Verhalten des Berechnungstools beeinflussender, Einstellungen geöffnet. Diese ist in Abbildung 37 dargestellt.

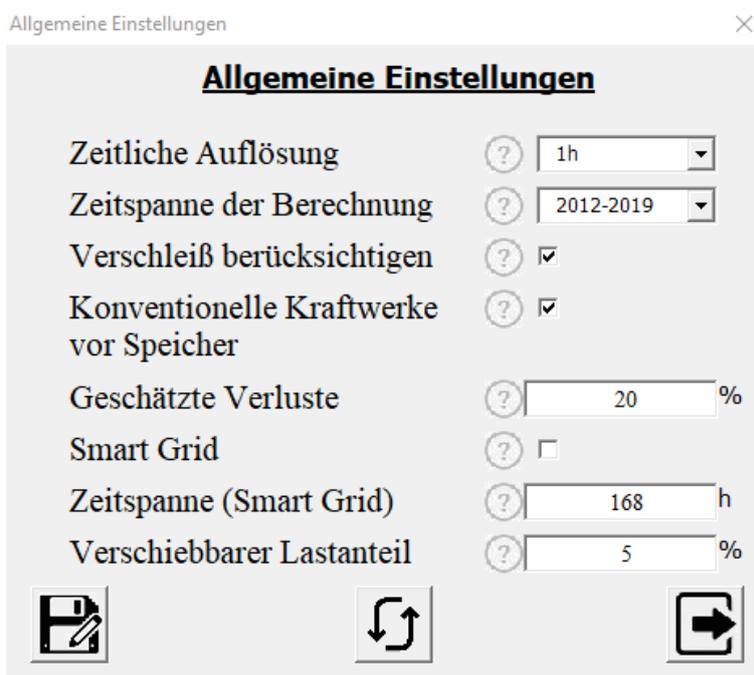


Abbildung 37: Parameter der allgemeinen Einstellungen

### -Zeitliche Auflösung:

Über diesen Parameter kann der Nutzer über die zeitliche Auflösung der in Abschnitt 1.5.1 beschriebenen Eingangsverläufe bestimmen. In der Datenbank des Berechnungstools sind Verläufe mit einem Messintervall von 15 und 60 Minuten hinterlegt. Die Verläufe mit einer feineren Auflösung von 15 Minuten sind dabei die real gemessenen Daten. Die 60-minütigen wurden jeweils über vier Datenpunkte gemittelt. Durch die verringerte Auflösung kann eine bis zu viermal schnellere Abarbeitung des Berechnungsszenarios erreicht werden, wodurch die Genauigkeit der Ergebnisse – wie Tests gezeigt haben – nur geringfügig reduziert wird.

### -Zeitspanne der Berechnung:

Über diesen Parameter kann der Nutzer die Zeitspanne, über welche die Berechnungen durchgeführt werden soll, bestimmen. Diese kann die Jahre 2012-2019 oder 2015-2019 umfassen. Dabei haben beide Vor- sowie Nachteile.

- 2012 - 2019: Je länger der Berechnungszeitraum, desto aussagekräftiger sind die Berechnungsergebnisse. Jedoch liegen für die Zeitspanne von 2012 bis 2015 keine installierten Leistungen der „Windenergie aus See“ vor, weswegen die normierten Verläufe für diesen Zeitraum künstlich erzeugt werden.
- 2015 - 2019: Die Zeitspanne der Berechnung ist in diesem Fall zwar kürzer und damit weniger aussagekräftig als die vorherige, doch beruht dabei die Datenbasis auf vollkommen realen Daten. Außerdem kann über eine kürzere Zeitspanne eine schnellere Abarbeitung realisiert werden.

### -Verschleiß berücksichtigen:

Bei der Normierung der erzeugten, regenerativen Leistungsverläufe werden standardmäßig die zeitlichen Verläufe der installierten Leistung verwendet. Dabei handelt es sich um den akkumulierten Zubau bzw. Abbau von regenerativen Anlagen. Jedoch verlieren Anlagen, wie zum Beispiel eine Solaranlage, im Jahr trotz Wartung und Reparatur durchschnittlich 2% [7] ihrer installierten Leistung. Dies führt auf längere Sicht zu einer Verfälschung der normierten Verläufe. Durch das Aktivieren dieser Option werden die Verläufe der installierten Leistung, basierend auf den entsprechenden durchschnittlichen Verschleißwerten, korrigiert.

### -Konventionelle Kraftwerke vor Speicher:

Bei der zeitlichen Abarbeitung eines Berechnungsszenarios können die konventionellen Kraftwerke an zwei Stellen zum Decken negativer Anteile der Residualleistung genutzt werden. Dabei können diese vor oder nach den elektrischen Speichern in Aktion treten. Durch das Vorschalten der konventionellen Kraftwerke kann die in den elektrischen Speichern vorhandene, regenerative Energie geschont werden, was zu einer geringeren „zu installierenden Leistung“ der regenerativen Anlagen führt. Dies resultiert jedoch in einem höheren, durch die maximal erlaubte Emission begrenzten, Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch die konventionellen Kraftwerke.

### -Geschätzte Verluste:

Wie bereits in Sektion 2.3 beschrieben, wird eine Iteration zum Lösen des Kausalitätsproblems der unbekanntenen Verluste verwendet. Dies erfolgt i.d.R. innerhalb von vier bis sechs Iterationsdurchläufen, wobei die Verluste gegen einen finalen Wert konvergieren. Je genauer man diesen Wert zu Beginn des ersten Durchlaufs schätzen kann, desto weniger Iterationsdurchläufe werden bis zum finalen Wert benötigt. Über diesen Parameter kann der Nutzer, basierend auf der angegebenen Jahresenergie des Bruttostromverbrauchs in Abschnitt 3.6.7, diese Verluste schätzen und die Abarbeitungszeit damit reduzieren.

### -Smart Grid:

Über diesen Parameter kann der Nutzer die Verwendung des in Sektion 2.2 beschriebenen Smart-Grid-Algorithmus aktivieren. Dies verdoppelt die Abarbeitungszeit eines Berechnungsszenarios.

### -Zeitspanne (Smart Grid):

Dieser Parameter definiert die in Sektion 2.2 beschriebene Zeitperiode („RefundPeriod“), in welcher begrenzte Teile der elektrischen Last verschoben werden können. Dieser Parameter findet nur bei einer Aktivierung des Smart-Grid-Algorithmus Verwendung.

### -Verschiebbarer Lastanteil:

Hierüber wird der in Sektion 2.2 beschriebene prozentuale Lastanteil („Deviation“) definiert, welcher innerhalb der elektrischen Last verschoben werden darf. Dieser Parameter findet nur bei einer Aktivierung des Smart Grid Algorithmus Verwendung.

### 3.11.3 Kommerzielle Einstellungen



Durch einen Klick auf die Schaltfläche „Kommerzielle Einstellungen“ wird die Parametrierungsoberfläche zur Verwaltung der, für die kommerziellen Aspekte der Ergebnisdarstellung benötigten, Parameter geöffnet. Diese ist in Abbildung 38 dargestellt.

Kommerzielle Einstellungen	
Einwohnerzahl	81430000
Anzahl der Haushalte	41378000
Pro-Kopf Einkommen	2860 €/Month
Fläche BRD	357582 km <sup>2</sup>
Fläche NRW	34110 km <sup>2</sup>

Abbildung 38: Parameter der kommerziellen Einstellungen

-Einwohnerzahl:

Dieser Parameter definiert die Einwohnerzahl der Bundesrepublik Deutschland.

-Anzahl der Haushalte:

Dieser Parameter bestimmt die Anzahl der aktuellen Haushalte in der Bundesrepublik Deutschland.

-Pro-Kopf Einkommen:

Dieser Parameter entspricht dem „Pro-Kopf“ Einkommen eines Bürgers der Bundesrepublik Deutschland.

-Fläche BRD:

Dieser Parameter definiert die Fläche der Bundesrepublik Deutschland.

-Fläche NRW:

Dieser Parameter definiert die Fläche des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen.

---

### 3.11.4 Zoom Schaltfläche

 Durch einen Klick auf diese Schaltfläche wird das Flussdiagramm auf eine passende Größe skaliert und zentriert. Dabei wurde versucht die Größe so anzupassen, dass alle Komponenten des Flussdiagramms sichtbar sind.

---

### 3.11.5 Reset Schaltfläche

 Durch einen Klick auf diese Schaltfläche werden sämtliche, durch den Nutzer getroffene, Einstellungen durch den Standard-Parametersatz überschrieben. Dies beinhaltet ebenfalls das Löschen von hinzugefügten Speichern und konventionellen Kraftwerken.

---

### 3.11.6 Save & Export Schaltfläche

 Durch einen Klick auf diese Schaltfläche wird die Eingabemaske gespeichert und dem Nutzer die Möglichkeit geboten diese direkt zu schließen. Erst nachdem die Eingabemaske geschlossen wurde, ist das Berechnungstool in der Lage auf die Nutzerparameter zuzugreifen.

## 3.12 WEITERE TABELLEN DER EINGABEMASKE

Neben der Haupttabelle des Excel Dokuments „Input\_Mask“, welche das Flussdiagramm des Energiesystems und alle zuvor beschriebenen Komponenten beinhaltet, enthält das Dokument weitere Untertabellen. Diese werden zwar nicht direkt durch den Nutzer eingesehen, sind jedoch essenziell für die Funktionalität der Haupttabelle. Diese Untertabellen werden folgend genauer beschrieben.

---

### 3.12.1 Default\_Parameter

Die Tabelle „Default\_Parameter“ enthält den Standard-Parametersatz des Energiewendeplaners. Dieser wird zum Laden der Standardeinstellungen der Komponenten des Flussdiagramms sowie zum Zurücksetzen des gesamten Flussdiagramms verwendet.

Der Standard-Parametersatz repräsentiert ein Versorgungssystem, wie es nach Planung der Bundesregierung für die Jahre bis 2050 aussehen könnte. Komponenten des Energiesystems, welche nicht durch konkrete Zahlen parametrisiert werden können, werden dabei durch literaturgestützte Annahmen dimensioniert. Das so definierte System entspricht somit einer Mischung aus klar geplanten und realistisch angenommenen Größen.

Die Lasten, welche in diesem System zu decken sind, entsprechen den Lasten des aktuellen Energiesystems.

---

### 3.12.2 User\_Parameter

Die Tabelle „User\_Parameter“ enthält die durch den Nutzer definierte Parameter. Durch das Zurücksetzen des Flussdiagramms werden die Einträge dieser Tabelle durch die der „Default\_Parameter“ ersetzt. Änderungen, welche durch die in Sektion 0 bis 0 beschriebenen Eingabemasken getätigt werden, werden in dieser Tabelle gespeichert und definieren so das erstellte Szenario des Anwenders.

Weiter bildet diese Tabelle die Grundlage für die in Kapitel 4 beschriebenen Berechnungen.

---

### 3.12.3 Settings

Die Tabelle „Settings“ enthält statische Parameter und Einstellungen der Eingabemaske. Um den Programmcode der Eingabemaske übersichtlich und allgemeingültig zu gestalten, wurden die Positionsangaben der Parameterblöcke für die Standard- sowie die Benutzereingaben in dieser Tabelle definiert. Ebenfalls beinhaltet diese Tabelle die Objektnamen der dynamischen Komponenten des Flussdiagramms und deren maximal zulässige Anzahl.

Sollten in zukünftigen Versionen der Eingabemaske Änderungen an Position oder Anzahl der Parameter vorgenommen werden müssen, ist es lediglich erforderlich die Positionsangaben in dieser Tabelle anzupassen. Durch diese Maßnahme können größere Änderungen am eigentlichen Programmcode umgangen werden.

---

### 3.12.4 Hilfe Texte

Die Tabelle „Hilfe Texte“ enthält die in Sektion 3.2 erwähnten Erläuterungen der einzelnen Parameter. Die Position eines solchen Textes in der Tabelle „Hilfe Texte“ entspricht dabei der Position des entsprechenden Parameters in der Tabelle „User\_Parameter“ bzw. „Default\_Parameter“. Dadurch kann der Text über die in Abschnitt 3.12.3 beschriebenen Positionsangaben zugeordnet werden.

## 4 ERLÄUTERUNG DES MATHEMATICA BERECHNUNGSTOOLS

Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau und die Funktionsweise des Mathematica-basierten Berechnungstools erläutert. Dieses besteht aus sechs Unterprogrammen, einem Masterprogramm, aus welchem die Unterprogramme aufgerufen werden und einem Notebook, in welchem Funktionen definiert werden. Zunächst wird das Masterprogramm sowie dessen Unterprogramme einzeln beschrieben. Dabei sind die Programme in Sektionen und diese wiederum in Kapitel unterteilt. Anhand dieser Sektionen erfolgt der Ablauf der Erläuterung. Anschließend werden die verwendeten Funktionen genauer betrachtet, wobei diese auf Plausibilität geprüft werden.

### 4.1 MASTERPROGRAMM

Zu Beginn des Masterprogramms werden alle Variablen, welche durch vorherige Berechnungen definiert wurden, gelöscht, wodurch eine sichere und fehlerfreie Abarbeitung erfolgen kann.

Anschließend wird der Hauptpfad „MainDir“ des Berechnungstools definiert. Dieser bestimmt den Pfad bis zum Hauptordner des Berechnungstools. Die internen Strukturen dieses Ordners sind statisch und per Definition bekannt. Weiter wird ebenfalls der absolute Pfad „ProgramDir“, in welchem sich die sechs Unterprogramme des Masterprogramms befinden, bestimmt.

Nachdem nun die absoluten Pfade des Berechnungstools bekannt sind, werden die benötigten Funktionen durch einen Aufruf des entsprechenden Notebooks bekannt gemacht. Anschließend werden die Unterprogramme gemäß ihrer Reihenfolge aufgerufen und abgearbeitet. Dies wird in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben. Zuletzt erhält der Anwender des Berechnungstools eine Übersicht der Ergebnisse. Dies ermöglicht es dem Anwender des Masterprogramms, welcher nicht unbedingt der Nutzer der Eingabemaske und somit der Auftraggeber der Berechnung sein muss, die Ergebnisse einzusehen ohne die Ausgabemaske, welche in Kapitel 0 beschrieben wird, benutzen zu müssen.

## 4.2 UNTERPROGRAMM: 1.DATEN IMPORT.NB

In diesem Unterprogramm werden sämtliche Importe von Verläufen und Benutzereingaben abgewickelt. Dazu werden zunächst die Tabellen „User\_Parameter“, in welcher die Benutzereingaben gespeichert sind sowie die Tabelle „Settings“ aus dem Excel-Dokument „Input\_Mask“, importiert. Durch die Positionsangaben der einzelnen Parameterblöcke, welche in der Tabelle „Settings“ hinterlegt sind, können die Benutzereingaben in eben jene Parameterblöcke aufgeteilt werden.

Dabei werden die Einträge der „Wert-Spalte“ für alle Institutionen des Parameterblocks mit den Einträgen der „Name-Spalte“ assoziiert. Dadurch entfällt zum einen die Notwendigkeit einer umständlichen Variablendeklaration für sämtliche Parameter der Eingabemaske und zum anderen werden automatisch die Bezeichnungen der Parameter aus der Eingabemaske übernommen.

Die Mechanik hinter dem Aufteilen und Assoziieren wird folgend durch den Parameterblock der „Elektrischen Speicher“ veranschaulicht.

Tabelle 1 zeigt exemplarisch die ersten beiden Einträge des Parameterblocks der elektrischen Speicher. Dieser beinhaltet zwei Einträge und somit auch zwei „Wert-Spalten“.

Elektrische Speicher								
Name	Batterie				Pumpspeicherkraftwerk			
	Wert	Einheit	Kommentar	Quelle	Wert	Einheit	Kommentar	Quelle
Max_Kapazitaet	0,050	TWh			0,050	TWh		
Max_Leistung	100,000	GW			7,000	GW		
Jahresnutzungsgrad	99,000	%			90,000	%		
Wirkungsgrad_Ein	90,000	%			88,000	%		
Wirkungsgrad_Aus	90,000	%			88,000	%		
Selbstentladung	4,000	%/Jahr			0,000	%/Jahr		
Nutz_Abwaerme	0,000	%			0,000	%		
Abschreibungsdauer_Min	12,000	Jahr			40,000	Jahr		
Abschreibungsdauer_Max	20,000	Jahr			80,000	Jahr		
Mittlere_technische_Lebensdauer_Min	99,000	Jahr			99,000	Jahr		
Mittlere_technische_Lebensdauer_Max	99,000	Jahr			99,000	Jahr		
Leistungssp_kosten_Min	0,800	k€/kW			0,440	k€/kW		
Leistungssp_kosten_Max	1,340	k€/kW			1,000	k€/kW		
Energiesp_kosten_Min	0,500	k€/kWh			0,073	k€/kWh		
Energiesp_kosten_Max	1,340	k€/kWh			0,400	k€/kWh		
Ben_Flaeche_Leistung_Min	100,000	m <sup>2</sup> /MW			0	m <sup>2</sup> /MW		
Ben_Flaeche_Leistung_Max	1000,000	m <sup>2</sup> /MW			0	m <sup>2</sup> /MW		
Ben_Flaeche_Kapazitaet_Min	30,000	m <sup>2</sup> /MWh			100,000	m <sup>2</sup> /MWh		
Ben_Flaeche_Kapazitaet_Max	30,000	m <sup>2</sup> /MWh			100,000	m <sup>2</sup> /MWh		

Tabelle 1: Parameterblock der elektrischen Speicher

Der Parameterblock wird während des Imports in die Variable „EStorages“ geschrieben, welche in diesem Fall wieder aus zwei Elementen besteht.

EStorages [[1]] = „Wert-Spalte“ Batterie

EStorages [[2]] = „Wert-Spalte“ Pumpspeicherkraftwerk

Durch die Assoziation wird jeder Eintrag der „Wert-Spalte“ eines jeden Elements der Variable „EStorages“ mit dem dazugehörigen Eintrag in der „Name-Spalte“ in Verbindung gesetzt.

So beinhaltet die Variable *EStorages* [[1]] [„Max\_Kapazitaet“] beispielsweise den Wert 0,05 usw.

Durch das Modul „UnitFactor“, welches in Abschnitt 4.8.1 genauer beschrieben wird, werden die Parameter anschließend auf die internen Einheiten genormt. Neben den

Eingaben des Benutzers werden ebenfalls relevante Größen wie beispielsweise die Anzahl der elektrischen Speicher aus der Tabelle entnommen.

Nachdem die Eingaben des Nutzers importiert und kategorisiert wurden, werden anschließend die zeitlichen Verläufe importiert. Dabei werden der Pfad und somit auch der genaue, zu importierende Verlauf durch die Wahl der zeitlichen Auflösung als auch der gewählten Länge des Betrachtungszeitraums definiert. Beide Parameter wurden in Abschnitt 3.11.2 genauer beschrieben.

Zu den importierten Verläufen gehören: die installierten, erzeugten und normierten Leistungen der drei regenerativen Anlagentypen „Windanlagen an Land“, „Windanlagen auf See“ und „Solaranlagen“ sowie der Verlauf des Bruttostromverbrauchs und einer Referenzzeitreihe.

Durch die Positionen eines Wertes in einer beliebigen Datenreihe kann mithilfe der Referenzzeitreihe das genaue Datum dieses Wertes bestimmt werden.

### 4.3 UNTERPROGRAMM: 2.DATEN AUFBEREITUNG UND ANPASSUNG.NB

In diesem Unterprogramm werden die Benutzereingaben wie auch die zuvor importierten Verläufe weiter angepasst. Dabei werden folgende Aufbereitungen und Anpassungen getroffen:

- Die normierten Verläufe der regenerativen Anlagen werden an ihren durch den Parameter „Leistung abschneiden“ definierten prozentualen Grenzen abgeschnitten.
- Aus der definierten, jährlichen, regenerativen Grundeinspeisung [Abschnitt 3.6.3] wird ein zeitlicher Verlauf generiert.
- Der zeitliche Lastverlauf der Elektro- und Gas-Mobilität (PKW & LKW) wird auf Basis der Einstellungen zur Elektro- und Gas-Mobilität [Abschnitt 3.6.1, 3.7.1 und 3.8.1] und den generellen Einstellungen zur Mobilität [Abschnitt 3.11.1] generiert.

Dabei ergibt sich die Jahresenergie eines Elektrofahrzeugs (PKW & LKW) aus Gleichung 1.

$$E_{Jahr} = \frac{AanGes}{100} \cdot AnzGesamt \cdot \overline{Fahrleistung} \cdot Energieverbrauch$$

**Gleichung 1: Jahresenergie der Elektrofahrzeuge PKW & LKW**

mit:

$E_{Jahr}$  = Jahresenergie der Elektro PKW / LKW

$AanGes$  = Parameter „Anteil an Gesamt“ [3.6.1]

$AnzGesamt$  = Parameter „Anzahl der zugelassenen PKW/LKW“ [3.11.1]

$\overline{Fahrleistung}$  = Parameter „Durchschnittliche Fahrleistung (PKW/LKW)“ [3.6.1]

$Energieverbrauch$  = Parameter „Energieverbrauch“ [3.6.1]

Die Jahresenergie der Gasfahrzeuge ergibt sich aus Gleichung 2.

$$E_{Jahr} = \frac{AanGes}{100} \cdot AnzGesamt \cdot \overline{Fahrleistung} \cdot Gasverbrauch \cdot Energiedichte$$

**Gleichung 2: Jahresenergie der Gasfahrzeuge PKW & LKW**

mit:

$E_{Jahr}$  = Jahresenergie der Gas PKW / LKW

$AanGes$  = Parameter „Anteil an Gesamt“ [3.7.1, 3.8.1]

$AnzGesamt$  = Parameter „Anzahl der zugelassenen PKW/LKW“ [3.11.1]

$\overline{Fahrleistung}$  = Parameter „Durchschnittliche Fahrleistung (PKW/LKW)“ [3.7.1, 3.8.1]

$Gasverbrauch$  = Parameter „Gasverbrauch“ [3.11.1]

$Energiedichte$  = Parameter „Energiedichte Methan / Wasserstoff“ [3.11.1]

- Der zeitliche Verlauf der zu deckenden Wärmelasten wird erzeugt und über die prozentualen Anteile [Abschnitt 3.9.7 und 3.10.5] auf die Anlagen der kalorischen Zweige aufgeteilt.
- Der zeitliche Verlauf des Bruttostromverbrauchs wird auf die definierte, mittlere Jahresenergie [Abschnitt 3.6.7] normiert.

Zuletzt werden die sogenannten „Assoziativen Variablenpakete“ definiert. Diese verwenden die in Sektion 4.2 definierten Assoziationen und erweitern diese um eine weitere assoziative Ebene.

Basierend auf dem in Sektion 4.2 verwendeten Beispiel zur Assoziation wird an dieser Stelle jenes Beispiel aufgegriffen und fortgesetzt.

Resultat der ersten Assoziationsebene war das Zugreifen auf Variablen einer Anlage durch die

*Blocknummer: {EStorages [[1]], EStorages [[2]]}*

und eines konkreten

*Variablennamen: {„Max\_Kapazitaet“, „Max\_Leistung“, etc.}*

Da der Zugriff über die „Blocknummer“ nur in Kombination mit der Tabelle „User\_Parameter“, in welcher die Reihenfolge und damit die Blocknummer einer regenerativen Anlage ersichtlich wird, nachvollziehbar ist, wird diese ebenfalls durch eine Assoziation ersetzt. Dabei wird jeder Eintrag eines Parameterblocks mittels der Blocknummer und einer Bezeichnung assoziativ in einem neuen Array zusammengefasst. Dabei werden in den „Assoziativen Variablenpaketen“ mehrere Parameterblöcke mit gleichen Eigenschaften zusammengefasst. So werden beispielsweise alle Speicher in dem Variablenpaket „StoragePack“ vereint. Hierbei kann nun mittels:

*StoragePack [„EStorage1“] [„Max\_Kapazitaet“]*

auf die Kapazität des ersten elektrischen Speichers zugegriffen werden.

Folgend werden die deklarierten Variablenpakete genauer betrachtet. Dabei wird zwischen „Informationspaketen“ und „Verlaufspaketen“ unterschieden. Diese haben unterschiedliche Eigenschaften:

- Informationspakete: In diesen Paketen werden skalare Parameter aus den Benutzereingaben in einem zweistufigen, assoziativen Array zusammengefasst.
- Verlaufspakete: Einstufiges, assoziatives Array, in welchem zeitliche Verläufe zusammengefasst werden. Da Einträge eines assoziativen Arrays nicht veränderbar sind, müssen diese auf ein normales „Hilfsarray“ zurückgreifen. So erfolgt beispielsweise der Zugriff auf einen Zeitpunkt der elektrischen Mobilitätslast durch:

$$\text{LoadPack}[[\text{LPP}[\text{„EMLoad“}]]][[i]]$$

Dabei enthält das Array „LPP“ die Assoziation der Bezeichnung zu einem Element des Arrays „LoadPack. Ein Beispiel für ein solches Array ist das Paket „LossesperTypePack“, in welchem alle entstehenden Verluste differenziert aufgeführt werden.

Die Ebenen der assoziativen Informationspakete werden folgend als „Blockebene“ (äußere Assoziationsebene) und „Parameterebene“ (innere Assoziationsebene) bezeichnet.

---

#### 4.3.1 Speicher-Paket (StoragePack)

Bei dem Variablenpaket „StoragePack“ handelt es sich um ein Informationspaket, in welchem die Parameter sämtlicher Speicher zusammengefasst werden. Folgend werden die vertretenen Speicher gemeinsam mit ihrer Definition der Blockebene aufgelistet:

*"CH4Storage"* → Methanspeicher

*"H2Storage"* → Wasserstoffspeicher

*"NTStorage"* → Niedrigtemperatur-Speicher

*"HTStorage"* → Hochtemperatur-Speicher

*"DistrictHeatStorage"* → Fernwärmespeicher

---

### 4.3.2 Speicherfüllstand-Paket (StorIvIPack)

Bei dem Variablenpaket (StorIvIPack) handelt es sich um ein Verlaufspaket, in welchem die zeitlich aufgelösten Füllstände sämtlicher Speicher zusammengefasst werden. Aus dem Verlauf des Füllstands und der bekannten, zeitlichen Auflösung kann ebenfalls die Umspeicherleistung bestimmt werden. Die Differenzierung dieses Pakets orientiert sich dabei an dem Paket „StoragePack“. Die Beschreibungen sind diesem Paket sinngemäß zu entnehmen.

---

### 4.3.3 Energiewandler-Paket (EnergyConverterPack)

Bei dem Variablenpaket „EnergyConverterPack“ handelt es sich um ein Informationspaket, in welchem die Parameter sämtlicher, energiewandelnden Anlagen zusammengefasst werden. Folgend werden die vertretenen Energiewandler gemeinsam mit ihrer Definition der Blockebene aufgelistet:

"*Electrolysis*" → Elektrolyse

"*Methanation*" → Methanisierung

"*H2PowerPl*" → Wasserstoff-Gaskraftwerk

"*FuelCell*" → Brennstoffzelle

"*CH4PowerPl*" → Methan-Gaskraftwerk

"*NTCH4G2H*" → Gas-to-Heat (Methan) (Niedrigtemperatur)

"*NTH2G2H*" → Gas-to-Heat (Wasserstoff) (Niedrigtemperatur)

"*HTCH4G2H*" → Gas-to-Heat (Methan) (Hochtemperatur)

"*HTH2G2H*" → Gas-to-Heat (Wasserstoff) (Hochtemperatur)

"*NTInfraRed*" → Infrarotheizung, "*NTHeatPump*" → Wärmepumpe

"*NTDirHeat*" → Direktwärme (Niedrigtemperatur) (dezentral)

"*HTDirHeat*" → Direktwärme (Hochtemperatur)

#### 4.3.4 Lasten-Paket (LoadPack)

Bei dem Variablenpaket „LoadPack“ handelt es sich um ein Verlaufspaket, in welchem die zeitlichen Verläufe sämtlicher Lasten zusammengefasst werden. Nachdem eine Last zu einem Zeitpunkt ganz oder teilweise gedeckt wurde, wird der Verlauf in diesem Array angepasst. So kann am Ende eines Berechnungsszenarios geprüft werden, ob sämtliche Lasten gedeckt wurden. Folgend werden die vertretenen Lasten gemeinsam mit ihrer Definition der Blockebene aufgelistet:

"EMLoad" → Lastverlauf der Elektro-Mobilität

"H2MLoad" → Lastverlauf der Gas-Mobilität (Wasserstoff)

"CH4MLoad" → Lastverlauf der Gas-Mobilität (Methan)

"NTDistLoad" → Lastverlauf der Fernwärme

"NTHPLoad" → Lastverlauf der Wärmepumpen

"NTInfRLoad" → Lastverlauf der Infrarotheizung

"NTH2Load" → Lastverlauf der Gas-Wärme (Niedrigtemperatur) (Wasserstoff)

"NTCH4Load" → Lastverlauf der Gas-Wärme (Niedrigtemperatur) (Methan)

"HTDirHLoad" → Lastverlauf der Direktwärme (Hochtemperatur)

"HTH2Load" → Lastverlauf der Gas-Wärme (Hochtemperatur) (Wasserstoff)

"HTCH4Load" → Lastverlauf der Gas-Wärme (Hochtemperatur) (Methan)

#### 4.3.5 Restleistungs-Paket (RestPowerPack)

Bei dem Variablenpaket „RestPowerPack“ handelt es sich um ein Verlaufspaket, in welchem die zu jedem Zeitpunkt verfügbaren Leistungen der leistungsbegrenzten Anlagen zusammengefasst werden. So kann beispielsweise bei der Elektrolyse, nachdem die Lasten gedeckt wurden, bestimmt werden wie viel „Restleistung“ noch zum Erzeugen und Einspeichern von Wasserstoff zur Verfügung steht. Folgend werden die vertretenen, leistungsbegrenzten Anlagen gemeinsam mit ihrer Definition der Blockebene aufgelistet:

*"Electrolysis"* → Elektrolyse

*"Methanation"* → Methanisierung

*"H2PowerPI"* → Gaskraftwerk (Wasserstoff)

*"FuelCell"* → Brennstoffzelle

*"CH4PowerPI"* → Gaskraftwerk (Methan)

---

#### 4.3.6 Paket der konventionellen Anlagen (ConvPPlantPack)

Bei dem Variablenpaket „ConvPPlantPack“ handelt es sich um ein Verlaufspaket, in welchem die Leistungsverläufe der konventionellen Kraftwerke differenziert aufgeführt werden. So können die Verläufe der Kraftwerke bei der Ergebnisdarstellung getrennt aufgelistet werden. Die Anzahl der Elemente dieses Arrays hängt von der Anzahl der, durch den Nutzer definierten, konventionellen Kraftwerke ab. Dabei wird folgende Bezeichnungsstruktur verwendet:

„*ConvPPI1 - x*“ → konventionellen Kraftwerk (Priorität 1 bis Priorität x)

---

#### 4.3.7 Verluste-pro-Typ-Paket (LossesperTypePack)

Bei dem Variablenpaket „LossesperTypePack“ handelt es sich um ein Verlaufspaket, in welchem die entstehenden, zeitlich aufgelösten Verluste differenziert aufgelistet werden. So kann bei der Ergebnisdarstellung exakt dargestellt werden wann und an welcher Stelle Verluste entstehen. Dabei wird die Elektrolyse sowie die Methanisierung jeweils in „Verluste durch direktes Decken der Last“ und in „Verluste durch Erzeugung zur Einspeicherung“ aufgeteilt. Folgend werden die vertretenen Verlustquellen gemeinsam mit ihrer Definition der Blockebene aufgelistet:

*"Electrolysis\_Load"* → Verluste der Elektrolyse durch Lastdeckung

*"Electrolysis\_Stor"* → Verluste der Elektrolyse durch Erzeugung zur Einspeicherung

*"Methanation\_Load"* → Verluste der Methanisierung durch Lastdeckung

*"Methanation\_Stor"* → Verluste der Methanisierung durch Erzeugung zur Einspeicherung

*"H2PowerPI"* → Verluste des Gaskraftwerks (Wasserstoff)

*"FuelCell"* → Verluste der Brennstoffzelle

*"CH4PowerPI"* → Verluste des Gaskraftwerks (Methan)

*"NTCH4G2H"* → Verluste der Gas-to-Heat (Niedrigtemperatur) (Methan)

*"NTH2G2H"* → Verluste der Gas-to-Heat (Niedrigtemperatur) (Wasserstoff)

*"HTCH4G2H"* → Verluste der Gas-to-Heat (Hochtemperatur) (Methan)

*"HTH2G2H"* → Verluste der Gas-to-Heat (Hochtemperatur) (Wasserstoff)

*"NTInfraRed"* → Verluste der Infrarotheizung

*"NTHeatPump"* → Verluste der Wärmepumpe

*"NTDirHeat"* → Verluste der Direktwärme (Niedrigtemperatur) (dezentral)

*"HTDirHeat"* → Verluste der Direktwärme (Hochtemperatur)

*„EStorage1 - x“* → Verluste des elektrischen Speichers (Priorität 1 bis Priorität x)

#### 4.3.8 Energiewandler Leistungs-Paket (EnergyConverterPowerPack)

Bei dem Variablenpaket „EnergyConverterPowerPack“ handelt es sich um ein Verlaufspaket, in welchem die gewandelten, zeitlich aufgelösten Leistungen der energiewandelnden Anlagen zusammengefasst werden. So kann bei der Ergebnisdarstellung differenziert dargestellt werden, welche Anlage wann wie viel Energie umgewandelt hat. Dabei bezieht sich der Verlauf auf die Ausgangsleistung. Genau wie bei den Verlusten wird bei der Elektrolyse und Methanisierung zwischen „Gewandelte Leistung zur Lastdeckung“ und „Gewandelte Leistung durch Erzeugen zum Einspeichern“ unterschieden. Die Differenzierung dieses Pakets orientiert sich dabei an dem Paket „LossesperTypePack“. Die Beschreibungen sind diesem sinngemäß zu entnehmen.

### 4.4 UNTERPROGRAMM: 3.DARSTELLUNG DER EINGABEVERLÄUFE.NB

In diesem Unterprogramm werden die in Abschnitt 1.5.1 erwähnten Eingangsverläufe grafisch aufbereitet. Es wird nur ausgeführt, wenn dies durch den Nutzer in der Parametrierung eingestellt wurde. Dabei besitzt das Unterprogramm folgende Struktur:

- Anpassungen der generellen Einstellung zur grafischen Einstellung.
  - Position der Jahresumbrüche (Frameticks).
  - Bildgröße, Seitenverhältnis, Rahmen etc.
- Grafische Darstellung der Erzeuger:
  - regenerativ erzeugte Leistung (Wind auf See, Wind an Land, Solar) (Entso-e).
- Grafische Darstellung der Lasten:
  - Bruttostromverbrauch.
  - Mobilitätslasten (Wasserstoff, Methan, Elektro).
  - Wärmelasten (Niedrig-, Hochtemperatur).

## 4.5 UNTERPROGRAMM: 4.HAUPTPROGRAMM.NB

Dieses Unterprogramm kann als „Kernprogramm“ des Berechnungstools verstanden werden. Neben diversen Deklarationen und Initialisierungen findet hier die zeitlich aufgelöste Abarbeitung im Inneren der Iterationsschleife statt. Dabei weist das Unterprogramm folgende interne Struktur auf:

- Deklaration und Initialisierung der schleifeninternen Variablen
  - Deklaration der Arrays u.a. Residualleistung, Importe, regenerativ erzeugte Leistung
  - Deklaration skalarer Größen u.a. Ausbaufaktoren, Fortschrittsindikatoren,  $\Delta$ -Werte
- Erzeugen der Fortschrittübersicht
  - Durch die Fortschrittsübersicht wird der Anwender des Berechnungstools über den Fortschritt der Iteration informiert. Dazu gehört beispielsweise die Größe der „ $\Delta$ -Werte“ oder die aktuelle Position in der Zeitreihe. Ebenfalls wird dort die durchschnittliche Berechnungszeit einer Iteration sowie die aktuelle Gesamtrechenzeit angezeigt.
- Start der Iteration
  - Die internen Mechanismen der Iteration werden durch das in Abbildung 39 dargestellte Flussdiagramm erläutert. Weiter erörtert Abschnitt 0 die Funktionalität der Schleife.

### 4.5.1 Iterationsschleife des Hauptprogramms

Im folgenden Kapitel wird die Iterationsschleife des Unterprogramms „4.Hauptprogramm“ beschrieben. Dies bildet den Kern der Berechnungen und wird in Abbildung 39 als Flussdiagramm dargestellt. Aufgrund der Länge und Komplexität der Schleife wurden Unterroutinen der Schleife in Container ausgelagert. Diese werden ebenfalls einzeln erläutert.

Die interne Abarbeitung der Iterationsschleife beginnt mit der Initialisierung der Datenreihen. Dort werden unter anderem einzelne Verläufe definiert oder der, in Sektion 2.2 beschriebene, Smart-Grid Algorithmus angewendet.

Der daran anschließende grau hinterlegte Bereich beinhaltet die Abfolge an Routinen, welche jeden Zeitpunkt der Datenreihen durchläuft. Dabei wird zunächst der Anteil der Wärmelast, welcher durch Gas gedeckt werden muss, aus den Wärmespeichern ausgespeichert. Dort wird gegebenenfalls die „nutzbare Abwärme“ zur „genutzten Abwärme“. Nachdem im Gas-Management das benötigte Gas für den entsprechenden Zeitpunkt erzeugt oder importiert wurde, werden anschließend die direkten Gaslasten gedeckt, die Wärmespeicher für den nächsten Zeitschritt geladen und die Power-to-Heat Anteile der Wärmelasten gedeckt. Im Weiteren erfolgt das Management der elektrischen Speicher. Dabei werden diese ge- bzw. entladen. Im darauffolgenden Container „P2G/G2P“ wird entweder negative Residualleistung durch Rückverstromung gedeckt oder bei positiver Leistung Energie durch Power-to-Gas eingespeichert. Anschließend wird die im Zeitpunkt „i“ erzeugte Abwärme in das Fernwärmenetz eingespeist und die Selbstentladung der Speicher bis zum nächsten Zeitpunkt bestimmt. Zuletzt wird der Zeitpunkt „i“ inkrementiert, so dass der nächste Datenpunkt die Routine durchläuft.

Nachdem die Zeitreihe abgearbeitet wurde, erfolgt der Abschluss eines Iterationsdurchlaufs. Dabei werden gegebenenfalls verbliebene negative Residualleistungsanteile durch konventionelle Kraftwerke kompensiert und die Abweichungen der Verluste, der konventionell erzeugten Energie und der genutzten Abwärme bestimmt. Sobald jeder einzelne der drei „ $\Delta$ -Werte“ die interne Grenze von 1 ‰ unterschreitet gilt die Berechnung als beendet und es wird keine weitere Iteration mehr initialisiert.

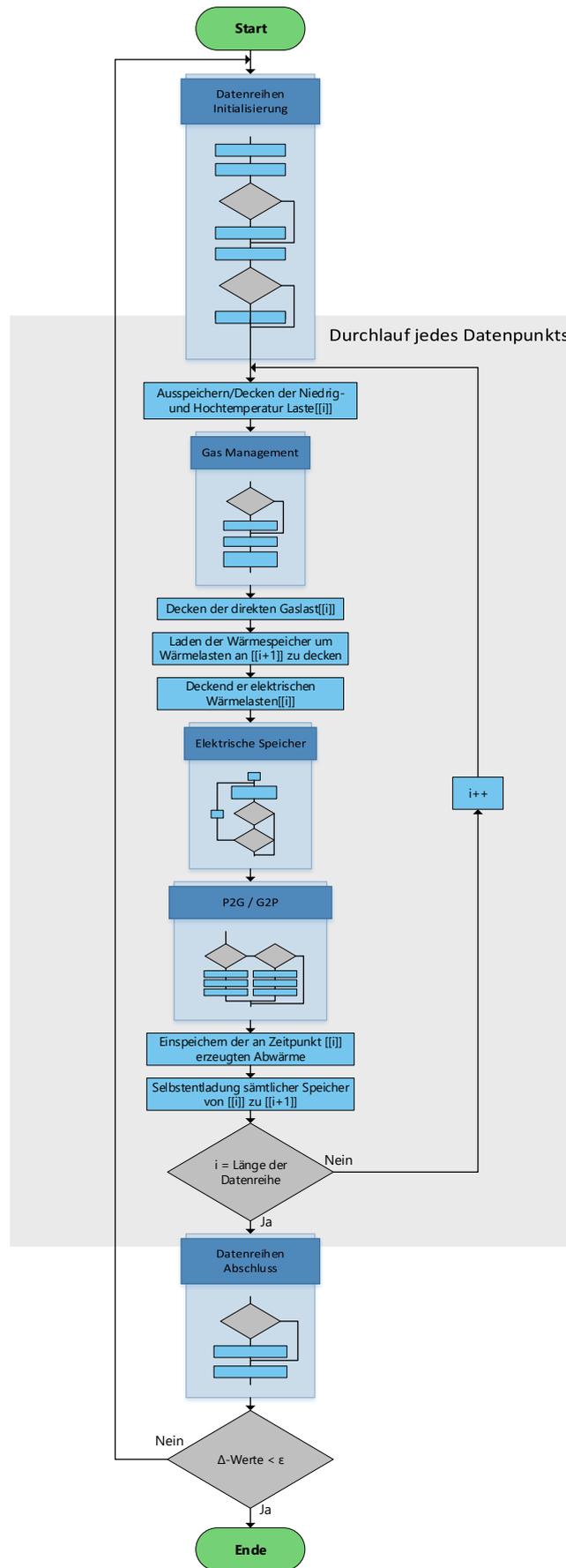
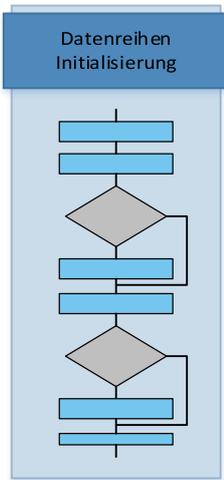


Abbildung 39: Flussdiagramm der Iterationsschleife

In den folgenden Abschnitten werden die Routinen der in Abbildung 39 enthaltenen Container genauer betrachtet.

### 4.5.1.1 Datenreihen Initialisierung



Der Container „Datenreihen Initialisierung“, dessen Inhalt in Abbildung 46 dargestellt ist, beinhaltet sämtliche Abarbeitungsschnitte, welche zu Beginn eines Iterationsdurchlaufs und vor dem Einzeldurchlauf der Zeitpunkte durchlaufen werden.

Dabei werden zunächst auf der Basis der gesamten Last die zu installierenden Leistungen der drei regenerativen Anlagentypen bestimmt. Anschließend folgt bei entsprechender Parametrierung der Smart-Grid-Algorithmus sowie die Errechnung des Leistungsverlaufs der durch den Nutzer definierten konventionellen Kraftwerke.

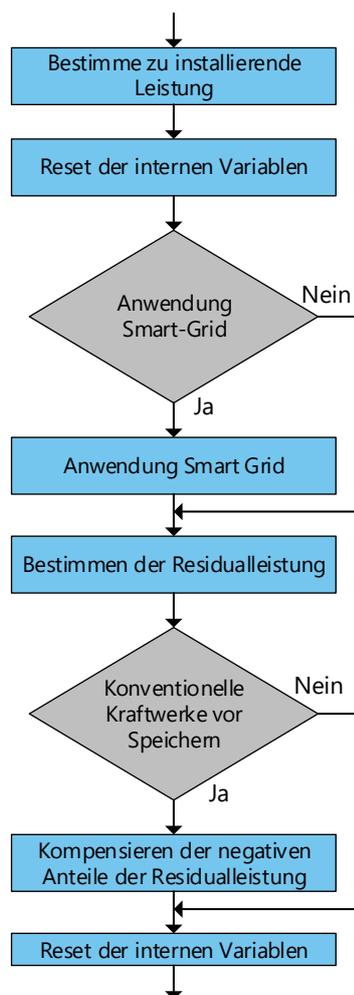
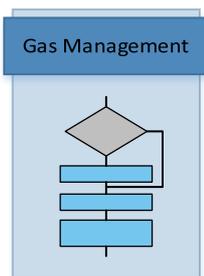


Abbildung 40: Flussdiagramm des Containers: Datenreihen Initialisierung

### 4.5.1.2 Gas-Management



Der Container „Gas-Management“ beinhaltet die Routinen, welche den Gasbedarf des jeweiligen Zeitschritts mittels Elektrolyse, Methanisierung oder Importen decken. Dessen Inhalt wird in Abbildung 41 detaillierter dargestellt.

Dabei wird zunächst ausreichend Wasserstoff erzeugt, um sowohl den Bedarf zu decken, als auch genug Wasserstoff bereitzustellen, um das benötigte Methan zu erzeugen. Sollte keine positive Residualleistung in diesem Zeitschritt verfügbar sein oder nicht genug Wasserstoff erzeugt werden können, wird der Speicher zunächst ins Negative entleert und anschließend durch Importe wieder aufgefüllt.

Sollte selbst durch importierten Wasserstoff nicht ausreichend Methan erzeugt werden, wird die benötigte Menge Gas ebenfalls durch Importe gedeckt. Eine Ursache für diesen Umstand kann eine Unterdimensionierung der Methanisierungsanlage darstellen.

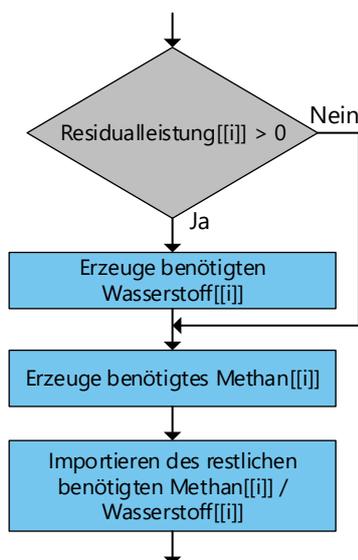
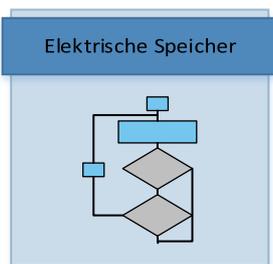


Abbildung 41: Flussdiagramm des Containers: Gas Management

### 4.5.1.3 Elektrische Speicher



Der Container „Elektrische Speicher“ beinhaltet die Routinen, welche das Laden bzw. Entladen sämtlicher durch den Nutzer definierter elektrischer Speicher koordiniert. Dessen Inhalt wird in Abbildung 42 detaillierter dargestellt.

Dabei durchläuft die Variable „n“ inkrementell die vorhandenen elektrischen Speicher. Mit steigendem „n“ sinkt gleichzeitig die Priorität des behandelten Speichers. Innerhalb dieser Routine kann ein elektrischer Speicher bei negativer Residualleistung und positivem Füllstand entladen oder bei positiver Residualleistung in Kombination mit einem leeren oder nicht vollständig gefüllten Speicher geladen werden.

Die Abarbeitung der elektrischen Speicher endet, sobald alle elektrischen Speicher die Routine durchlaufen haben oder die elektrische Residualleistung auf null gesunken bzw. gestiegen ist.

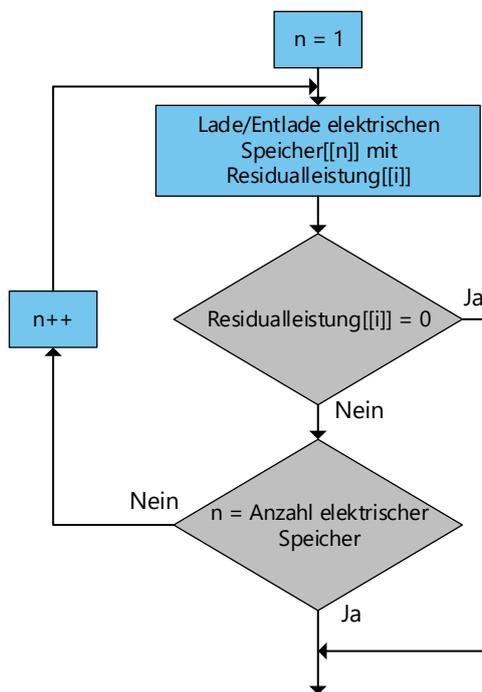
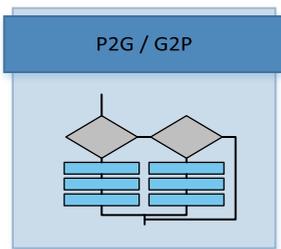


Abbildung 42: Flussdiagramm des Containers: Elektrische Speicher

### 4.5.1.4 P2G/G2P



Der Container „P2G/G2P“ beinhaltet die Routinen, welche das Rückverstromen des erzeugten Gases bzw. das Erzeugen von Gas zum Abbau positiver Residualleistung koordiniert. Dessen Inhalt wird in Abbildung 43 detaillierter dargestellt.

Der abzuarbeitende Container teilt sich dabei in zwei Stränge auf.

Der erste Strang (links) wird abgearbeitet, wenn der Zeitpunkt „i“ eine negative Residualleistung sowie ausreichend Gas zur Rückverstromung aufweist. Dabei werden zunächst die Institutionen des Wasserstoff-Zweigs und anschließend die des Methan-Zweigs berücksichtigt. Diese Abarbeitungsreihenfolge beruht auf wirtschaftlichen Betrachtungen. Daraus geht hervor, dass Methan aufgrund seiner hohen Verluste bei der Erzeugung als letzte Option zur Rückverstromung in Betracht gezogen werden sollte.

Der zweite Zweig des Containers (rechts) findet Anwendung, wenn der betrachtete Zeitpunkt „i“ eine positive Residualleistung sowie nicht vollständig gefüllte Gasspeicher aufweist. In diesem Fall werden die beiden Gasspeicher auf Basis ihres aktuellen Füllstands gleichberechtigt geladen. Eine Erläuterung der errechneten Ladeleistung ist dem [Abschnitt 4.8.15 und 0] zu entnehmen. Da die definierte Leistung der maximalen Ladeleistung entspricht und diese nicht in jedem Fall durch die Anlagen umgesetzt werden kann, wird zuletzt nochmals die Elektrolyse mit der maximal umsetzbaren Leistung betrieben.

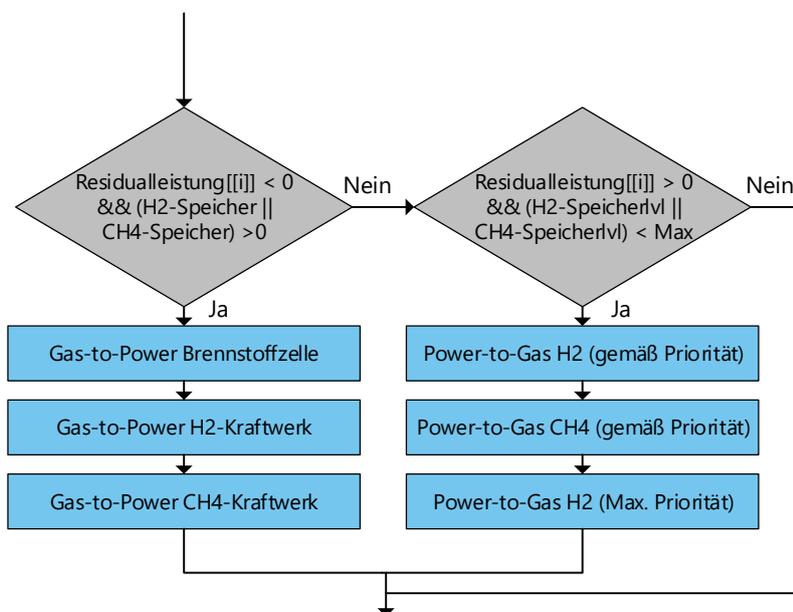
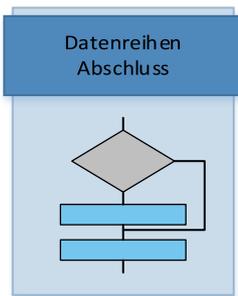


Abbildung 43: Flussdiagramm des Containers: P2G/G2P

#### 4.5.1.5 Datenreihen Abschluss



Der Container „Datenreihen Abschluss“, dessen Inhalt in Abbildung 44 dargestellt ist, beinhaltet sämtliche Abarbeitungsschritte, welche vor dem Ende eines Iterationsdurchlaufs und nach dem Einzeldurchlauf der Zeitpunkte ausgeführt werden.

Analog zu Container „Datenreihen Initialisierung“ können hier, bei entsprechender Parametrierung, die konventionellen Kraftwerke genutzt werden, um die negativen Anteile der Residualleistung zu kompensieren.

Zuletzt werden die Abweichungen ( $\Delta$ -Werte) zum vorherigen Iterationsdurchlauf berechnet.

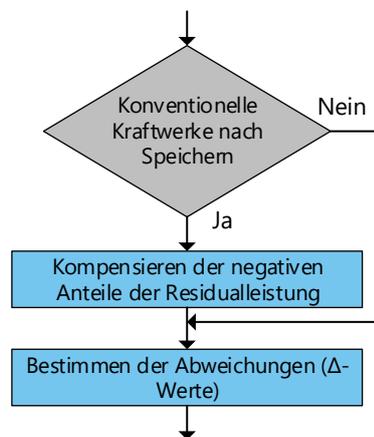


Abbildung 44: Flussdiagramm des Containers: Datenreihen Abschluss

## 4.6 UNTERPROGRAMM: 5.ERGEBNISDARSTELLUNG.NB

In diesem Unterprogramm werden die Ergebnisse des Berechnungsszenarios grafisch aufbereitet. Dabei weist das Unterprogramm folgende interne Struktur auf:

- Anpassungen der generellen Einstellung zur grafischen Einstellung
  - Position der Jahresumbrüche (Frameticks)
  - Bildgröße, Seitenverhältnis, Rahmen etc.
- Grafische Darstellung: Generelle Informationen
  - Zusammenfassung der Fortschrittsübersicht [Sektion 4.5]
  - Regenerativ erzeugte Energien
  - Energiegleichgewicht, Dauerlinie etc.
- Grafische Darstellung: Erzeuger
  - Leistungsverlauf: Wind auf See, Wind an Land, Solar, konventionelle Kraftwerke
- Grafische Darstellung: Speicher („StorlviPack“ [Abschnitt 4.3.2]):
  - Leistungs & Energieverlauf: Wärme-, Gas-, elektrische Speicher
- Grafische Darstellung: Verluste pro Typ („LossesperTypePack“ [Abschnitt 4.3.7])
  - Verluste durch: Power-to-Gas, Gas-to-Power, Gas-to-Heat, Speicher etc.
- Grafische Darstellung: Gewandelte Energien („EnergyConverterPowerPack“ [Abschnitt 4.3.8])
  - Leistungsverlauf: Energiewandler (Power-to-Gas, Gas-to-Power, Gas-to-Heat etc.)
- Grafische Darstellung: Import / Export
  - Leistungsverlauf: elektrische Leistung (Import & Export), Wasserstoff-, Methan-Import

→ Grafische Darstellung: Kommerzielle Informationen

- Jährliche Investitionskosten (insgesamt, pro Bürger, pro Haushalt)
- Kosten pro kWh
- Benötigte Flächen
- Kritische Materialien
- Tabelle: Energiegleichgewicht

Zuletzt werden alle erzeugten grafischen Darstellungen in einer assoziativen Struktur zusammengefasst. Dabei wird, genau wie bei den Informationspaketen [Sektion 4.3], eine zweistufige Struktur implementiert. Die äußere Assoziation bestimmt dabei die Kategorie, welche sich an den Titel der einzelnen Sektionen orientiert. Die innere Assoziation entspricht dem der Grafik zugewiesenen Namen. So kann beispielsweise mittels:

```
AllPlotsAsso ["Import Export"] ["Wasserstoff"]
```

auf die grafische Darstellung der Wasserstoff-Importe zugegriffen werden.

Auch an dieser Stelle erspart die assoziative Struktur unnötige Variablendeklarationen.

## 4.7 UNTERPROGRAMM: 6.EXPORT.NB

In diesem Unterprogramm werden sämtliche Ergebnisse, darunter die grafischen Darstellungen sowie kommerzielle Informationen in Tabellenform exportiert. Ebenfalls werden Informationen über den Ablageort, wie auch die Namen der grafischen Darstellungen in Tabellenform exportiert. Dadurch ist die Ausgabemaske (Output\_Mask) [Kapitel 0] in der Lage die grafischen Darstellungen der Ergebnisse selbstständig zu lokalisieren. So können Erweiterungen oder Änderungen an der Ergebnisdarstellung leichter in beiden Instanzen implementiert werden. Dabei weist das Unterprogramm folgende interne Struktur auf:

→ Anlegen des Ergebnisordners im Ordner „Results“

- Sämtliche Ergebnisse eines Berechnungsszenarios werden in einem neu angelegten Ordner exportiert. Der Name des Ordners ist dabei an das Datum der Berechnung gekoppelt. Dieser ist folgendermaßen aufgebaut:

*Tag.Monat.Jahr Stunde\$Minute*

Das \$-Zeichen wird bei der Darstellung in der Ausgabemaske (Output\_Mask) durch einen Doppelpunkt ersetzt, da dieser durch Windows nicht als gültiger Bestandteil einer Ordnerbezeichnung akzeptiert wird.

In diesem Ordner werden weitere Unterordner erstellt, in welchen die grafischen Darstellungen abgelegt werden. Die Namen der Unterordner entsprechen dabei den Sektionen des Unterprogramms „5.Ergebnisdarstellung.nb“ [Kapitel 0] und repräsentieren die äußere Assoziationsebene der in [Sektion 0] erwähnten Struktur.

→ Export der grafischen Darstellungen

- Folgend werden die grafischen Darstellungen in die dafür angelegte Ordnerstruktur exportiert.

→ Zuordnung der Darstellungen

-Die Ausgabemaske, welche in Kapitel 0 genauer beschrieben wird, besteht genau wie die Eingabemaske aus einem Flussdiagramm. Die Anzahl der Elemente wurde dabei zur besseren Übersicht reduziert. An dieser Stelle wird eine statische Zuordnung der einzelnen grafischen Darstellungen zu den jeweiligen Elementen des Flussdiagramms definiert. Diese wird in den Ordner des Berechnungsszenarios exportiert und durch die Ausgabemaske aufgegriffen.

→ Export der Bilanzierungstabellen

- Die grafischen Darstellungen der Kategorie „Kommerzielle Informationen“ werden gesondert als Excel-Tabelle exportiert. Dadurch ist der Nutzer des Berechnungstools in der Lage diese Daten für weitere Berechnungen zu verwenden. Nach der Wahl eines Berechnungsszenarios in der Ausgabemaske werden Tabellen ebenfalls in die Datei der Ausgabemaske geladen.

Gesondert können diese aus der Datei „Accounting.xls“ im Ergebnisordner des Berechnungsszenarios entnommen werden.

## 4.8 DEKLARATIONSPROGRAMM: FUNCTIONS.NB

Wie in Kapitel 4 erwähnt, werden diverse Routinen in separate Funktionen bzw. Module ausgelagert. Dies betrifft hauptsächlich Routinen der Iterationsschleife des Kernprogramms „4. Hauptprogramm“, welche in Abschnitt 0 genauer beschrieben werden. Ebenfalls wurden Routinen zur grafischen Darstellung von Ergebnisverläufen in verschiedenen Funktionen generalisiert. Folgend werden diese Funktionen genauer betrachtet und erläutert. Außerdem werden relevante Funktionen auf Plausibilität geprüft.

Dabei soll nachgewiesen werden, dass sämtliche Energien gemäß dem Flussdiagramm korrekt aufgeteilt und zugeordnet werden. Dazu dient eine Testumgebung, in welcher die Module autark getestet werden. Anfangs wird zu einem konkreten Zeitpunkt „i“ eine Startenergie definiert. Diese Startenergie ist dabei auf relevante Komponenten der zu testenden Funktion verteilt. Weiter wird eine Prognose über das Verhalten der Funktion getroffen, welche es zu bestätigen gilt. Anschließend wird die Funktion ausgeführt und die Endenergie im System bestimmt. Eine Funktion gilt dabei als valide, wenn sowohl die Verteilung als auch die Endenergie der Prognose bestätigt werden konnte.

---

### 4.8.1 Modul: UnitFactor

Durch die unterschiedlichen oder teilweise auch wählbaren Einheiten der Eingabemaske würden die internen Berechnungen komplexe und intransparente Ausmaße annehmen, da Fallunterscheidungen auf Basis der gewählten Einheit implementiert werden müssten.

Aus diesem Grund durchlaufen sämtliche eingelesene Parameter die Routinen dieses Moduls. Dabei wird auf Basis der eingelesenen Einheit ein Faktor bestimmt, welcher den eingelesenen Wert auf die internen Einheiten des Berechnungstools normt.

Dabei werden Leistungen und Energien auf MW und MWh, Zeiten auf Stunden, Kosten auf Euro und Massen auf Gramm genormt.

So erhält beispielsweise eine Speicherkapazität von 0,05 TWh den Faktor:  $10^6$  oder eine Selbstentladung von %/Jahr den Faktor:  $(1/365*24)$ .

---

## 4.8.2 Modul: CalculateExpansion

Zu Beginn eines Durchlaufs der Iterationsschleife werden die zu installierenden Leistungen der drei regenerativen Anlagen „Wind auf See“, „Wind an Land“ sowie „Solar“ auf Basis der zu deckenden Leistung bzw. Energie neu bestimmt. Dabei wird die interne Mathematica-Funktion „FindMinimum“ verwendet.

Ziel des Algorithmus ist die Optimierung bzw. die Minimierung der benötigten Speicherleistungen und der damit verbundenen Speicherkapazität. Sollte es gelingen die installierten Leistungen der regenerativen Anlagen so zu wählen, dass sich der daraus ergebene Verlauf mit dem gesamten Lastverlauf deckt, so würde keine Speicherleistung und somit keine Speicher benötigt werden. Diese Minimierung ist jedoch an zwei entscheidenden Einschränkungen bzw. Bedingungen geknüpft.

### 1) Leistungsbedingung:

Die installierten Leistungen der regenerativen Anlagen dürfen ihre maximal zu installierende Leistung, welche durch den Nutzer im Parameter „Maximal zu installieren“ definiert wurde, nicht überschreiten. Außerdem dürfen die installierten Leistungen in Bezug auf ihre aktuell installierte Leistung (Parameter: „Aktuell installiert“) nicht reduziert werden. Daraus ergibt sich folgende, in Gleichung 3 definierte Bedingung:

$$\text{Aktuell Installiert} \leq \text{Zu installieren} \leq \text{Maximal zu installieren}$$

Gleichung 3: Leistungsbedingung der Minimierung

**2) Energiebedingung:**

Wie in Sektion 2.3 erwähnt, strebt das Berechnungstool ein Energiegleichgewicht zwischen regenerativ erzeugter und verbrauchter Energie an. Dies wird durch folgende, in Gleichung 4 definierte, Bedingung realisiert:

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{last},i} = \sum_{i=1}^n (x_1 P_{\text{norm,wind,on},i} + x_2 P_{\text{norm,wind,off},i} + x_3 P_{\text{norm,solar},i})$$

Gleichung 4: Energiebedingung der Minimierung

mit:

$x_1$	=	zu installierende Windleistung an Land
$x_2$	=	zu installierende Windleistung auf See
$x_3$	=	zu installierende Solarleistung
$n$	=	Anzahl der Elemente der Datenreihe
$P_{\text{norm,wind,on}}$	=	normierter Verlauf der Windleistung an Land
$P_{\text{norm,wind,off}}$	=	normierter Verlauf der Windleistung auf See
$P_{\text{norm,solar}}$	=	normierter Verlauf der Solarleistung
$P_{\text{last}}$	=	Verlauf der gesamten Primärlast

Dabei ergibt sich die normierte Leistung einer regenerativen Anlage im Zeitpunkt „j“ durch:

$$P_{\text{norm},j} = \frac{P_{\text{gen},j}}{P_{\text{inst},j}}$$

mit:

$P_{\text{gen}}$	=	Verlauf der regenerativ erzeugten Leistung [1.5.1]
$P_{\text{inst}}$	=	Verlauf der regenerativ installierten Leistung [1.5.1]

Die gesamte Primärlast ergibt sich dabei aus:

$$P_{last} = P_{Emob} + P_{Brutto} + P_{H2mob} + P_{CH4mob} + P_{NT} + P_{HT} + P_{Verl} - P_{conv} - P_{usedH}$$

mit:

$P_{Emob}$	=	Last der Elektro-Mobilität
$P_{Brutto}$	=	Last des Bruttostromverbrauchs
$P_{H2mob}$	=	Last der Gas-Mobilität (Wasserstoff)
$P_{CH4mob}$	=	Last der Gas-Mobilität (Methan)
$P_{NT}$	=	Last des Niedrigtemperatur-Wärmebedarfs
$P_{HT}$	=	Last des Hochtemperatur-Wärmebedarfs
$P_{Verl}$	=	gesamte Verlustleistung
$P_{conv}$	=	Leistung der konventionellen Kraftwerke
$P_{usedH}$	=	Leistung der genutzten Abwärme

Wie bereits einleitend erläutert, wird durch die Funktion „CalculateExpansion“ die zu installierende Leistung, unter Einhaltung aller Bedingungen so definiert, dass die Speicherleistung minimiert wird.

Dabei ergibt sich eine Speicherleistung im Zeitpunkt „j“ von:

$$P_{speicher,j} = x_1 P_{norm,wind,on,j} + x_2 P_{norm,wind,off,j} + x_3 P_{norm,solar,j} - P_{last,j},$$

welche zu einer im Speicher enthaltenen Energie von:

$$W_{speicher,j} = x_1 \cdot \sum_{i=1}^j P_{norm,wind,on,i} + x_2 \cdot \sum_{i=1}^j P_{norm,wind,off,i} + x_3 \cdot \sum_{i=1}^j P_{norm,solar,i} - \sum_{i=1}^j P_{last,i}$$

führt.

Dieser Zusammenhang lässt sich in der Matrixschreibweise folgendermaßen ausdrücken:

$$\vec{W}_{speicher} = \begin{pmatrix} W_{speicher,1} \\ W_{speicher,2} \\ \vdots \\ W_{speicher,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{norm,wind,on,1} & W_{norm,wind,off,1} & W_{norm,solar,1} \\ W_{norm,wind,on,2} & W_{norm,wind,off,2} & W_{norm,solar,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{norm,wind,on,n} & W_{norm,wind,off,n} & W_{norm,solar,n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} W_{last,1} \\ W_{last,2} \\ \vdots \\ W_{last,n} \end{pmatrix}$$

Folgend wird dieser Zusammenhang vereinfacht durch:

$$\vec{W}_{speicher} = \mathfrak{B} \cdot \mathfrak{x} - \mathfrak{w}$$

ausgedrückt.

Idealerweise sollte die zu speichernde Energie minimal bzw. null sein,

$$\vec{W}_{speicher} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

was zu einem Betrag von:

$$W_{speicher} = \left\| \vec{W}_{speicher} \right\| = \left\| \mathfrak{B} \cdot \mathfrak{x} - \mathfrak{w} \right\| = 0$$

führt.

Da eine Minimierung der Speicherenergie auf null in der Realität nicht umsetzbar ist, soll diese möglichst nah bei null liegen. Dies kann durch eine Minimierung erreicht werden. Daraus folgt:

$$W_{speicher} = \left\| \vec{W}_{speicher} \right\| = \left\| \mathfrak{B} \cdot \mathfrak{x} - \mathfrak{w} \right\| \rightarrow \min$$

Dieser Zusammenhang bildet gemeinsam mit der Leistungs- und der Energiebedingung das „Funktional“, welches der Funktion „FindMinimum“ übergeben wird. Dieser Algorithmus basiert auf dem „Innere-Punkte-Verfahren“, welches an dieser Stelle nicht weiter erläutert wird. Eine Beschreibung des Verfahrens ist der Quelle [8] zu entnehmen.

Ergebnis der Minimierung sind dabei optimierte Lösungen für die unbekannt, zu installierenden Leistungen  $x_1, x_2, x_3$ , welche gemeinsam mit den normierten Verläufen im weiteren Ablauf den Verlauf der regenerativ erzeugten Leistung bestimmen.

#### 4.8.3 Modul: CalculateDelta

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, ist das Ziel der Iteration eine Konversion der Abweichungen der Verluste, der konventionell erzeugten Leistung sowie der genutzten Abwärme. Diese Abweichungen werden nach jedem Durchlauf der Iterationsschleife durch das Modul „CalculateDelta“ bestimmt.

Vor dem ersten Durchlauf der Iterationsschleife existieren keine Referenzwerte des vorherigen Durchlaufs. Diese vorherigen Werte werden, sobald diese bekannt sind, in Variablen mit dem Suffix „Old“ abgespeichert. Ab dem zweiten Schleifendurchlauf wird die Differenz der alten und neuen Werte bestimmt. Um die Abweichungen in Prozent bzw. Promille angeben zu können, werden diese auf den aktuellen Wert genormt.

Nach der Beendigung jedes Schleifendurchlaufs wird geprüft, ob alle drei normierten Abweichungen unterhalb der geforderten 1‰ Grenze liegen. Sobald dies erreicht wurde, gelten alle Werte als konvergiert und die Iteration als erfolgreich beendet.

---

#### 4.8.4 Modul: ConvPPlantFit

Wie in Abschnitt 3.6.5 erwähnt, werden die konventionellen Kraftwerke genutzt, um die negativen Anteile der elektrischen Residualleistung zu kompensieren. Da der Leistungsverlauf eines konventionellen Kraftwerks direkt auf dem Verlauf der Residualleistung basiert, welcher wiederum direkt mit den zu installierenden Leistungen korreliert, müssen die Leistungsverläufe der konventionellen Kraftwerke zu Beginn jedes Schleifendurchlaufs neu bestimmt werden. Dies erfolgt gemäß der Priorisierung einzeln für jedes Kraftwerk.

Grundlage der Berechnung sind dabei die negativen Anteile der Residualleistung. Diese werden auf die installierte Leistung des Kraftwerks begrenzt. Anschließend wird dieser Verlauf soweit herabgesetzt, dass die anteiligen, maximalen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Kraftwerks nicht überschritten werden.

Der so entstehende Verlauf wird mit der Residualleistung verrechnet und bildet dessen neuen Verlauf. Sollte ein weiteres konventionelles Kraftwerk vorhanden sein, wird die neue Residualleistung zur Basis der Berechnung des nächsten Kraftwerks.

Folgend wird geprüft, ob der errechnete Verlauf eines konventionellen Kraftwerks die den Anforderungen der maximal erlaubten CO<sub>2</sub>-Emission gerecht wird.

Ausgangssituation:

<b>Name:</b>	<b>Bezeichnung:</b>	<b>Wert:</b>
Erlaubte CO <sub>2</sub> -Emission pro Jahr	$CO2_{max,jahr}$	100 MT
Anteil durch Kraftwerk	$\rho_{Kraftwerk}$	5%
Installierte Leistung	$P_{inst}$	30 GW
Spezifische CO <sub>2</sub> -Produktion	$CO2_{spez}$	600 g/kWh

Tabelle 2: Ausgangssituation Validierung des Moduls: ConvPPlantFit

Prognose:

Die mittlere Jahresenergie des Kraftwerks darf:

$$\bar{W}_{jahr} = \frac{CO2_{max,jahr} \cdot 10^9 \cdot \rho_{Kraftwerk}}{CO2_{spez} \cdot 10^{-3}} = 0,83 \cdot 10^{10} kWh = 8,33 TWh$$

nicht überschreiten.

Realität:

Tabelle 3 zeigt die Jahresenergien des getesteten konventionellen Kraftwerks in TWh. Dieser ist zu entnehmen, dass die mittlere Jahresenergie den maximal erlaubten Wert von 8,33 TWh nicht überschreitet. Ebenfalls wurde die Leistungsgrenze von 30 GW eingehalten. Damit gilt das Modul „ConvPPlantFit“ als valide.

<u>2012</u>	<u>2013</u>	<u>2014</u>	<u>2015</u>	<u>2016</u>	<u>2017</u>	<u>2018</u>	<u>P<sub>Peak</sub></u>	<u><math>\bar{W}_{jahr}</math></u>
4.69 TWh	4.43 TWh	5.34 TWh	4.2 TWh	3.57 TWh	2.57 TWh	2.31 TWh	30. GW	3.87 TWh

Tabelle 3: Jahresenergie konventionelles Kraftwerk (Validierung)

#### 4.8.5 Modul: SmartGrid

Sollte die Anwendung des Smart-Grid-Algorithmus durch den Nutzer gewünscht sein, wird dieser durch das Modul „SmartGrid“ durchgeführt. Ergebnis dieses Moduls ist der modifizierte Verlauf der elektrischen Last. Die Funktionsweise des Algorithmus wird in Sektion 2.2 bereits beschrieben.

Folgend wird geprüft, ob der verwendete Algorithmus einen energetischen Fehler im Verlauf der elektrischen Last verursacht.

##### Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Jahresenergie (Bruttostrom):	$W_{brutto}$	485 TWh
Regenerative Grundleistung:	$W_{reg,grund}$	0 TWh/a
Anteil Elektro-Mobilität:	$\rho_{elektro,mobilität}$	0 %
Zeitspanne (Smart Grid):	$T_{smart\ grid}$	168 h
Verschiebbarer Lastanteil (Smart Grid):	$\rho_{smart\ grid}$	10 %

Tabelle 4: Ausgangssituation Validierung des Moduls: SmartGrid

##### Resultat:

Tabelle 5 zeigt die Jahresenergien der elektrischen Last sowohl vor, als auch nach der Anwendung des Smart-Grid-Algorithmus. Zu erkennen ist, dass sowohl die einzelnen Jahresenergien als auch deren Mittelwert durch den Algorithmus nicht verfälscht werden.

	<u>2012</u>	<u>2013</u>	<u>2014</u>	<u>2015</u>	<u>2016</u>	<u>2017</u>	<u>2018</u>	$\bar{W}_{jahr}$
Vorher:	468.15 TWh	462.77 TWh	505.61 TWh	477.54 TWh	479.38 TWh	492.8 TWh	508.75 TWh	485. TWh
Nachher:	468.15 TWh	462.77 TWh	505.61 TWh	477.54 TWh	479.38 TWh	492.8 TWh	508.67 TWh	484.99 TWh

Tabelle 5: Jahresenergien der elektrischen Last nach Smart Grid (Validierung)

Des Weiteren zeigt Abbildung 45 die Verläufe der elektrischen Last vor (blau) und nach (grün) Anwendung des Algorithmus. Es ist zu erkennen, dass die Lastanteile bei den gewählten Daten minimal verschoben werden. Dies hat jedoch keinen größeren Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnung.

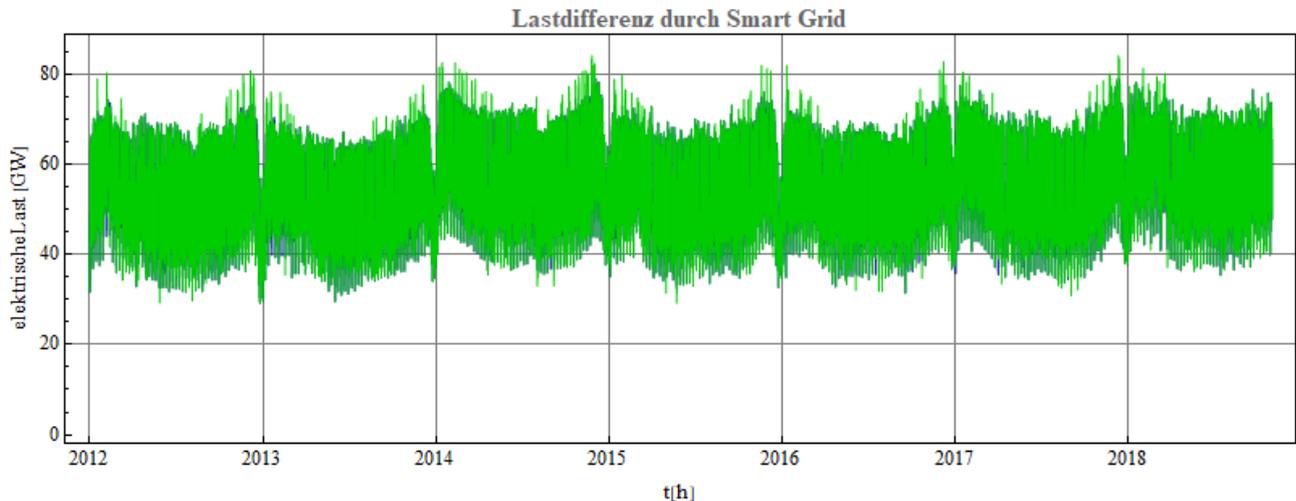


Abbildung 45: Elektrischer Lastverlauf nach Smart Grid (Validierung)

Durch die Resultate der beispielhaften Berechnung gilt das Modul „SmartGrid“ als valide.

#### 4.8.6 Modul: UseWasteHeat

Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, wird bei der Abwärme zwischen „nutzbarer Abwärme“ und „genutzter Abwärme“ unterschieden. Wobei die genutzte Abwärme eine Teilmenge der erzeugten Abwärme darstellt. In diesem Modul wird das Ausspeichern von Wärmeenergie aus dem Fernwärmenetz des Niedrigtemperatur-Zweigs zur Deckung der Fernwärmelast simuliert. Die dabei entnommene Wärmeenergie wird als „genutzte Abwärme“ bezeichnet.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft:

##### Ausgangssituation:

<b>Name:</b>	<b>Bezeichnung:</b>	<b>Wert:</b>
Energiebedarf (Niedrigtemperatur):	$W_{niedrigtemp,jahr}$	1227 TWh/a
Deckung durch Fernwärme:	$\rho_{fernwärme}$	25 %
Wirkungsgrad Aus (Fernwärmespeicher):	$\eta_{fernwärmespeicher,aus}$	99 %
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h
Füllstand (Fernwärmespeicher):	$W_{fernwärmespeicher}$	15 GWh

Tabelle 6: Ausgangssituation Validierung des Moduls: UseWasteHeat

##### Prognose:

Die zu deckende Fernwärmelast am Zeitpunkt „i“ beträgt:

$$P_{fern} = \frac{P_{niedrigtemp,jahr} \cdot 10^3 \cdot \rho_{fernwärme}}{100 \cdot 8760} = 35,017 \text{ GW}$$

Die maximal mögliche Ausspeicherleistung von  $P_{ausspeicher} = 15 \text{ GW}$  ergibt sich durch den Füllstand.

Der neue Füllstand des Fernwärmespeichers beträgt:

$$W_{fern,peicher,neu} = W_{fernwärmespeicher} - P_{ausspeicher} \cdot \alpha = 0 \text{ GWh}$$

Die genutzte Abwärme am Zeitpunkt „i“ beträgt:

$$P_{abwärme} = \frac{\eta_{fernwärmespeicher,aus}}{100} \cdot P_{ausspeicher} = 14,85 \text{ GW}$$

Die weiterhin zu deckende Fernwärmelast beträgt somit:

$$P_{fern,neu} = P_{fern} - \frac{\eta_{fernwaermspeicher,aus}}{100} \cdot P_{ausspeicher} = 20,167 \text{ GW}$$

### Realität:

Tabelle 7 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „UseWasteHeat“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

<u>W<sub>fern,speicher,neu</sub></u>	<u>P<sub>fern,neu</sub></u>	<u>P<sub>abwärme</sub></u>
0. GWh	20.17 GW	14.85 GW

Tabelle 7: Validierung des Moduls: UseWasteHeat

#### 4.8.7 Modul: CoverHeatGasLoad

Dieses Modul simuliert das Ausspeichern von durch Gas erzeugter Wärme aus einem entsprechenden Speicher. Mit dieser Wärme wird anschließend die Gas-Wärme-Last gedeckt. Wie in Abschnitt 4.8.6 beschrieben, wird durch das Modul „ChargeHeatStorage“, welches in Abschnitt 0 genauer beschrieben ist, sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichend Wärmeenergie zum Decken der Lasten in den Speichern enthalten ist.

Dabei wird vorausgesetzt, dass das Modul: „ChargeHeatStorage“ am Zeitpunkt „i-1“ ausreichend Wärmeenergie in den Wärmespeicher eingespeichert hat, um sowohl die Selbstentladung als auch den Ausspeicherwirkungsgrad zu kompensieren. Dies wird in der Beschreibung des entsprechenden Moduls [Abschnitt 0] genauer untersucht.

Dieses Modul wird sowohl für den Niedrig-, als auch für den Hochtemperatur-Zweig genutzt.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft:

##### Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Energiebedarf (Niedrigtemperatur):	$W_{niedrigtemp,jahr}$	1227 TWh/a
Deckung durch Methan:	$\rho_{ch4}$	50 %
Deckung durch Wasserstoff:	$\rho_{h2}$	0 %
Selbstentladung:	$\eta_{selbstentladung}$	50 %/Woche
Wirkungsgrad Aus (Wärmespeicher):	$\eta_{speicher,aus}$	99,9 %
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h
Füllstand (Wärmespeicher):	$W_{speicher}$	ausreichend (s.o.)

Tabelle 8: Ausgangssituation Validierung des Moduls: CoverHeatGasLoad

Prognose:

Die zu deckende Wärmelast am Zeitpunkt „i“ beträgt:

$$P_{\text{wärme}} = \frac{W_{\text{niedrigtemp,jahr}} \cdot 10^3 \cdot \rho_{\text{ch4}}}{100 \cdot 8760 \text{ h}} + \frac{W_{\text{niedrigtemp,jahr}} \cdot 10^3 \cdot \rho_{\text{h2}}}{100 \cdot 8760 \text{ h}} = 70,034 \text{ GW}.$$

Somit wird vorausgesetzt, dass zum Zeitpunkt „i“:

$$W_{\text{wärme,speicher}} = P_{\text{wärme}} \cdot \frac{100}{\eta_{\text{speicher,aus}}} \cdot \frac{1}{\alpha - \frac{\eta_{\text{selbstentladung}}}{7 \cdot 24 \text{ h} \cdot 100}} = 70,313 \text{ GWh}.$$

Die entstandenen Verluste belaufen sich unter dieser Annahme auf:

$$P_{\text{verluste}} = \left(1 - \frac{\eta_{\text{speicher,aus}}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{\text{speicher,aus}}} \cdot P_{\text{wärme}} = 0,07 \text{ GW}.$$

Realität:

Tabelle 9 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach Anwendung des Moduls „CoverHeatGasLoad“. Unter der Annahme, dass das Modul „ChargeHeatStorage“ zum Zeitpunkt „i-1“ die errechnete Energie:  $P_{\text{Speicher},i-1}$  in den Wärmespeicher einspeichert, gilt dieses Modul auf Basis der getroffenen Prognose als valide.

$W_{\text{wärme,speicher,neu}}$	$P_{\text{wärme,neu}}$	$P_{\text{verluste}}$
0. GWh	0. GW	0.07 GW

Tabelle 9: Validierung des Moduls: CoverHeatGasLoad

#### 4.8.8 Modul: GeneratingNeededH2

Basierend auf dem bekannten, zeitlichen Verlauf der gesamten Wasserstofflast (durch Mobilität, Gas-Wärme und Methanlast inklusive aller Wirkungsgrade) und den aktuellen Füllständen der Gasspeicher lässt sich für jeden Zeitpunkt eine benötigte Wasserstoffladeleistung für den Wasserstoffspeicher bestimmen um den minimal benötigten Füllstand des Speichers zu erreichen. So wie bei den Wärmespeichern wird sämtliches erzeugte Gas zunächst in einen Speicher geleitet. Aus diesem Grund ist hier die Rede von einer Ladeleistung. Sollte diese Leistung durch Begrenzungen (mangelnde elektrische Residualleistung oder nicht ausreichende Elektrolyseleistung) nicht erreicht werden, muss zusätzlich Wasserstoff aus dem Ausland importiert werden. Dieser Zusammenhang wird in Unterabschnitt 2.1.2.3 genauer erläutert.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft:

##### Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Gesamte H <sub>2</sub> -Last am Zeitpunkt „i“:	$P_{h2,last}$	35 GW
Füllstand des H <sub>2</sub> -Speichers:	$W_{h2,speicher}$	20 GW
Residualleistung:	$P_{res}$	30 GW
Wirkungsgrad der Elektrolyse:	$\eta_{elektrolyse}$	70 %
Installierte Leistung der Elektrolyse:	$P_{elektrolyse,inst}$	600 GW
Wirkungsgrad Ein (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,ein}$	99,9 %
Nutzbare Abwärme der Elektrolyse:	$\eta_{h2,abwärme}$	10 %
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 10: Ausgangssituation Validierung des Moduls: GeneratingNeededH2

Prognose:

Um die geforderte Wasserstofflast am Zeitpunkt „i“ decken zu können, wird folgende Ladeleistung benötigt:

$$P_{\text{erzeugen,gas}} = \frac{P_{\text{h2,last}} \cdot \alpha - W_{\text{h2,speicher}}}{\alpha} = 15 \text{ GW}.$$

Diese führt zu einem neuen Füllstand des Wasserstoffspeichers von:

$$W_{\text{h2,speicher,neu}} = W_{\text{h2,speicher}} + P_{\text{erzeugen,gas}} \cdot \alpha = 35 \text{ GW}.$$

Nachdem der Wasserstoffspeicher geladen wurde, verbleibt am Zeitpunkt „i“ eine Elektrolyseleistung von:

$$P_{\text{elektrolyse,neu}} = P_{\text{elektrolyse,inst}} - P_{\text{erzeugen,gas}} = 585 \text{ GW}.$$

Durch den Wirkungsgrad der Elektrolyse wird eine elektrische Leistung von:

$$P_{\text{benötigt,elektrisch}} = P_{\text{erzeugen,gas}} \cdot \frac{100}{\eta_{\text{elektrolyse}}} = 21,43 \text{ GW}$$

benötigt.

Um den erzeugten Wasserstoff einzuspeichern, muss folgende elektrische Leistung aufgebraucht werden:

$$P_{\text{einspeichern,elektrisch}} = \left(1 - \frac{99,9}{100}\right) \cdot 15 \text{ GW} = 0,015 \text{ GW}.$$

Durch das Erzeugen und Einspeichern des Wasserstoffs ergibt sich eine neue elektrische Residualleistung von:

$$P_{\text{res,neu}} = P_{\text{res}} - \left[ \left(1 - \frac{\eta_{\text{h2,speicher,ein}}}{100}\right) + \frac{100}{\eta_{\text{elektrolyse}}} \right] \cdot P_{\text{erzeugen,gas}} = 8,56 \text{ GW}.$$

Die gesamten Verluste belaufen sich dabei auf:

$$P_{\text{verluste,gesamt}} = \left[ \left(1 - \frac{\eta_{\text{h2,speicher,ein}}}{100}\right) + \left(1 - \frac{\eta_{\text{elektrolyse}}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{\text{elektrolyse}}} \right] \cdot P_{\text{erzeugen,gas}} \\ = 6,44 \text{ GW}.$$

Weiter wird durch die Elektrolyse Abwärme in Höhe von:

$$P_{abwärme} = \frac{\eta_{h2,abwärme}}{100} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{elektrolyse}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{elektrolyse}} \cdot P_{erzeugen,gas} = 0,643 \text{ GW}$$

erzeugt.

### Realität:

Tabelle 11 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „GeneratingNeededH2“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

<u>P<sub>erzeugen,gas</sub></u>	<u>W<sub>h2,speicher,neu</sub></u>	<u>P<sub>res,neu</sub></u>	<u>P<sub>elektrolyse,neu</sub></u>	<u>P<sub>verluste,gesamt</sub></u>	<u>P<sub>abwärme</sub></u>
15. GW	35. GWh	8.56 GW	585. GW	6.44 GW	0.64 GW

Tabelle 11: Validierung des Moduls: GeneratingNeededH2

#### 4.8.9 Modul: GeneratingNeededCH4

Basierend auf dem bekannten, zeitlichen Verlauf der gesamten Methanlast (durch Mobilität und Gas-to-Heat inklusive aller Wirkungsgrade) und dem aktuellen Füllstand des Methanspeichers lässt sich für jeden Zeitpunkt eine benötigte Methanladeleistung für den Methanspeicher bestimmen. So wie bei den Wärmespeichern fließt sämtliches erzeugte Gas zunächst in einen Speicher. Aus diesem Grund ist hier die Rede von einer Ladeleistung. Sollte diese Leistung durch Begrenzungen (Mangel an Wasserstoff oder nicht ausreichende Methanisierungsleistung) nicht erreicht werden können, muss zusätzlich Methan oder Wasserstoff aus dem Ausland importiert werden. Dabei gilt, dass bevorzugt Wasserstoff zur Methanisierung importiert wird, bevor man auf Methanimporte zurückgreift. Dieser Zusammenhang wird in Unterabschnitt 2.1.2.3 genauer erläutert.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft:

##### Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Gesamte CH <sub>4</sub> -Last am Zeitpunkt „i“:	$P_{ch4,last}$	8 GW
Füllstand des H <sub>2</sub> -Speichers:	$W_{h2,speicher}$	35 GW
Füllstand des CH <sub>4</sub> -Speichers:	$W_{ch4,speicher}$	0 GW
Residualleistung:	$P_{res}$	10 GW
Wirkungsgrad der Methanisierung:	$\eta_{methanisierung}$	80 %
Installierte Leistung der Methanisierung:	$P_{methanisierung,inst}$	400 GW
Wirkungsgrad Ein (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,ein}$	99,9 %
Wirkungsgrad Aus (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,aus}$	99,9 %
Wirkungsgrad Ein (CH <sub>4</sub> -Speicher):	$\eta_{ch4,speicher,ein}$	99,9 %
Nutzbare Abwärme der Elektrolyse:	$\eta_{h2,abwärme}$	10 %
Nutzbare Abwärme der Methanisierung:	$\eta_{ch4,abwärme}$	10 %
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 12: Ausgangssituation Validierung des Moduls: GeneratingNeededCH4

Prognose:

Um die geforderte Methanlast am Zeitpunkt „i“ decken zu können, wird folgende Ladeleistung benötigt:

$$P_{\text{erzeugen,gas}} = \frac{P_{\text{ch4,last}} \cdot \alpha - W_{\text{ch4,speicher}}}{\alpha} = 8 \text{ GW}.$$

Nach Laden des Methanspeichers, verbleibt am Zeitpunkt „i“ eine Methanisierungsleistung von:

$$P_{\text{methanisierung,neu}} = P_{\text{methanisierung,inst}} - P_{\text{erzeugen,gas}} = 392 \text{ GW}.$$

Durch das Laden des Methanspeichers sinkt der Füllstand des Wasserstoffspeichers auf:

$$W_{\text{h2,speicher,neu}} = W_{\text{h2,speicher}} - \frac{100}{\eta_{\text{methanisierung}}} \cdot P_{\text{erzeugen,gas}} \cdot \alpha = 25 \text{ GW}.$$

Dabei erzeugt die Methanisierung eine Abwärmeleistung von:

$$P_{\text{abwärme}} = \frac{\eta_{\text{ch4,abwärme}}}{100} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{methanisierung}}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{\text{methanisierung}}} \cdot P_{\text{erzeugen,gas}} = 0,2 \text{ GW}.$$

Für das Ausspeichern des Wasserstoffs und das Einspeichern des erzeugten Methans ergibt sich eine neue elektrische Residualleistung von:

$$P_{\text{res,neu}} = P_{\text{res}} - \left[ \left(1 - \frac{\eta_{\text{ch4,speicher,ein}}}{100}\right) + \left(1 - \frac{\eta_{\text{h2,speicher,aus}}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{\text{methanisierung}}} \right] \cdot P_{\text{erzeugen,gas}} = 9,982 \text{ GW}.$$

Ebenfalls entstehen durch den Prozess der Methanisierung und das Umspeichern der Gase Verluste in Höhe von:

$$P_{\text{verluste,gesamt}} = \left[ \left(1 - \frac{\eta_{\text{ch4,speicher,ein}}}{100}\right) + \left(1 - \frac{\eta_{\text{methanisierung}}}{100} + 1 - \frac{\eta_{\text{h2,speicher,aus}}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{\text{methanisierung}}} \right] \cdot P_{\text{erzeugen,gas}} = 2,018 \text{ GW}.$$

Realität:

Tabelle 13 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „GeneratingNeededCH4“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

<u>P<sub>erzeugen, gas</sub></u>	<u>P<sub>methanisierung, neu</sub></u>	<u>W<sub>h2, speicher, neu</sub></u>	<u>P<sub>res, neu</sub></u>	<u>P<sub>verluste, gesamt</sub></u>	<u>P<sub>abwärme</sub></u>
8. GW	392. GW	25. GWh	9.98 GW	2.02 GW	0.2 GW

Tabelle 13: Validierung des Moduls: GeneratingNeededCH4

4.8.10 Modul: CoverDirectGasLoad

Dieses Modul simuliert das Ausspeichern von Gas (Wasserstoff u. Methan) zum Decken der direkten Gas-Last. Unter der direkten Gas-Last werden im Rahmen dieser Arbeit alle Gas-Lasten verstanden, welche direkt im entsprechenden Zweig entstehen. Aktuell sind dies die Mobilitätslasten des Wasserstoff- und Methan-Zweigs.

Dieses Modul wird sowohl für den Wasserstoff- als auch für den Methan-Zweig genutzt.

Folgend wird das Modul anhand des Wasserstoff-Zweigs auf Plausibilität geprüft:

Ausgangssituation:

<u>Name:</u>	<u>Bezeichnung:</u>	<u>Wert:</u>
Direkte H <sub>2</sub> -Last am Zeitpunkt „i“:	$P_{h2,last,direkt}$	50 GW
Füllstand des H <sub>2</sub> -Speichers:	$W_{h2,speicher}$	80 GW
Residualleistung:	$W_{res}$	10 GW
Wirkungsgrad Aus (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,aus}$	99,9 %
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 14: Ausgangssituation Validierung des Moduls: CoverDirectGasLoad

Prognose:

Durch das Ausspeichern des benötigten Wasserstoffs sinkt der Füllstand des Speichers auf:

$$W_{h2,speicher,neu} = W_{h2,speicher} - P_{h2,last,direkt} \cdot \alpha = 30 \text{ GW}.$$

Weiter entstehen dabei elektrische Verluste in Höhe von:

$$P_{verluste} = \left(1 - \frac{\eta_{h2,speicher,aus}}{100}\right) \cdot P_{h2,last,direkt} = 0,05 \text{ GW},$$

wodurch die elektrische Residualleistung auf:

$$P_{res,neu} = P_{res} - \left(1 - \frac{\eta_{h2,speicher,aus}}{100}\right) \cdot P_{h2,last,direkt} = 9,95 \text{ GW}$$

sinkt.

Realität:

Tabelle 15 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach Anwendung des Moduls „CoverDirectGasLoad“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

$W_{h2,speicher,neu}$	$P_{res,neu}$	$P_{verluste}$
30. GWh	9.95 GW	0.05 GW

Tabelle 15: Validierung des Moduls: CoverDirectGasLoad

#### 4.8.11 Modul: ChargeHeatStorage

Dieses Modul simuliert das Erzeugen und Speichern von Gas-Wärme. Wie in der Funktionsbeschreibung zu Modul: "CoverHeatGasLoad" erwähnt, muss durch dieses Modul im Zeitpunkt „i-1“ ausreichend Wärmeenergie in den Wärmespeicher eingespeichert werden, um die Wärmelast am Zeitpunkt „i“ decken zu können. Dabei müssen sowohl Wirkungsgrade als auch die Selbstentladung kompensiert werden.

Dieses Modul wird sowohl für den Niedrig-, als auch für den Hochtemperatur-Zweig genutzt.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Dabei basiert die Ausgangssituation auf dem Szenario des Moduls „CoverHeatGasLoad“ [Abschnitt 0].

##### Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Wärmelast (CH <sub>4</sub> ) zum Zeitpunkt „i“:	$P_{w\ddot{a}rme,last}$	70,034 GW
Benötigter Füllstand des Wärmespeichers:	$W_{w\ddot{a}rme,speicher,neu}$	70,313 GWh
Residualleistung:	$P_{res}$	10 GW
Wirkungsgrad (Gas-to-Heat Methan):	$\eta_{g2h}$	96 %
Selbstentladung:	$\eta_{selbstentladung}$	50 %/Woche
Wirkungsgrad Ein (Wärmespeicher):	$\eta_{w\ddot{a}rme,speicher,ein}$	99,9 %
Wirkungsgrad Aus (Wärmespeicher):	$\eta_{w\ddot{a}rme,speicher,aus}$	99,9 %
Wirkungsgrad Aus (Gasspeicher):	$\eta_{ch_4,speicher,aus}$	99,9 %
Füllstand (Methanspeicher):	$W_{ch_4,speicher}$	250 GWh
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 16: Ausgangssituation Validierung des Moduls: ChargeHeatStorage

Prognose:

Um die geforderte Wärmeenergie zum Zeitpunkt „i+1“ bereit stellen zu können, muss folgende Gasleistung ausgespeichert werden:

$$P_{\text{ausspeichern,gas}} = P_{\text{wärme,last}} \cdot \frac{100}{\eta_{g2h}} \cdot \frac{100}{\eta_{\text{wärme,speicher,ein}}} \cdot \frac{100}{\eta_{\text{wärme,speicher,aus}}} \cdot \frac{1}{\alpha - \frac{\eta_{\text{selbstentladung}}}{7 \cdot 24 \cdot 100}} = 73,316 \text{ GW}.$$

Dabei entlädt sich der Gasspeicher auf:

$$W_{\text{ch4,speicher,neu}} = W_{\text{ch4,speicher}} - P_{\text{ausspeichern,gas}} \cdot \alpha = 176,68 \text{ GWh}.$$

Durch das Ausspeichern ergibt sich folgende, neue Residualleistung:

$$P_{\text{res,neu}} = W_{\text{res}} - \left(1 - \frac{\eta_{\text{ch4,speicher,aus}}}{100}\right) \cdot P_{\text{ausspeichern,gas}} = 9,927 \text{ GW}.$$

Die benötigte Leistung wird als Verlust behandelt und beläuft sich auf:

$$P_{\text{verlust}} = \left(1 - \frac{\eta_{\text{ch4,speicher,aus}}}{100}\right) \cdot P_{\text{ausspeichern,gas}} = 0,0733 \text{ GW}.$$

Durch den Wirkungsgrad der Gas-to-Heat Anlage und dem Wirkungsgrad der Einspeicherung, wird folgende Energie in den Wärmespeicher eingespeichert:

$$W_{\text{wärme,speicher}} = P_{\text{ausspeichern,gas}} \cdot \frac{\eta_{g2h}}{100} \cdot \frac{\eta_{\text{wärme,speicher,ein}}}{100} \cdot \alpha = 70,313 \text{ GWh}.$$

Die Verluste, die bei der Energiewandlung entstehen sowie die benötigte Leistung zum Einspeichern, werden ebenfalls als Verluste betrachtet. Dadurch addieren sich die gesamten Verluste zu:

$$P_{\text{verlust}} = P_{\text{verlust}} + \left[\left(1 - \frac{\eta_{g2h}}{100}\right) + \left(1 - \frac{\eta_{\text{wärme,speicher,ein}}}{100}\right) \cdot \frac{\eta_{g2h}}{100}\right] \cdot P_{\text{ausspeichern,gas}} = 3,076 \text{ GW}.$$

Realität:

Tabelle 17 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „ChargeHeatStorage“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide. Ebenfalls konnte durch die eingespeicherte Wärmeenergie von  $W_{w\ddot{a}rme,speicher} = 70,313 \text{ GWh}$  das Modul „CoverHeatGasLoad“ validiert werden.

<u>W<sub>wärme,speicher</sub></u>	<u>W<sub>ch4,speicher,neu</sub></u>	<u>P<sub>res,neu</sub></u>	<u>P<sub>verluste</sub></u>
70.31 GWh	176.68 GWh	9.93 GW	3.08 GW

Tabelle 17: Validierung des Moduls: ChargeHeatStorage

---

4.8.12 Modul: EHeating

Dieses Modul simuliert das Umwandeln von elektrischer Energie zu Wärmeenergie. Dabei werden, anders als im Modul „ChargeHeatStorage“, die Lasten der elektrischen Wärme direkt am Entstehungszeitpunkt „i“ durch die Anlagen gedeckt und müssen nicht erst einen Speicher durchlaufen. Wie in Abschnitt 0 erwähnt, müssen sämtliche Wärmelasten gedeckt werden. Sollte die elektrische Residualleistung nicht ausreichen, um dies zu ermöglichen, wird diese zunächst negativ und muss durch elektrische Speicher, Anlagen des Typs Gas-to-Power oder Importe elektrischer Energie aufgestockt werden.

Dieses Modul findet Anwendung sowohl im Hoch-, als auch im Niedrigtemperatur-Zweig bei den Anlagen: „Infrarotheizung“, „Wärmepumpe“, „Direktwärme (zentral) (Niedrigtemperatur)“ und „Direktwärme (Hochtemperatur)“.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Dies erfolgt exemplarisch mit der Anlage „Infrarotheizung“.

Ausgangssituation:

<u>Name:</u>	<u>Bezeichnung:</u>	<u>Wert:</u>
Wärmelast zum Zeitpunkt „i“	$P_{w\ddot{a}rme,last}$	50 GW
Wirkungsgrad	$\eta_{infrarotheizung}$	86 %
Residualleistung	$P_{res}$	100 GW

Tabelle 18: Ausgangssituation Validierung des Moduls: EHeating

Prognose:

Durch das Decken der Wärmelast zum Zeitpunkt „i“ sinkt die elektrische Residualleistung auf:

$$P_{res,neu} = P_{res} - \frac{100}{\eta_{infrarotheizung}} \cdot P_{w\u00e4rme,last} = 41,86 \text{ GW.}$$

Dabei entstehen Verluste in H\u00f6he von:

$$P_{verlust} = \left(1 - \frac{\eta_{infrarotheizung}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{infrarotheizung}} \cdot P_{w\u00e4rme,last} = 8,14 \text{ GW.}$$

Realit\u00e4t:

Tabelle 19 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „EHeating“. Durch die \u00dcbereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

$P_{w\u00e4rme,last,neu}$	$P_{res,neu}$	$P_{verluste}$
0. GW	41.86 GW	8.14 GW

Tabelle 19: Validierung des Moduls: EHeating

#### 4.8.13 Modul: ManageEStorCharge

Dieses Modul simuliert das Laden und Entladen eines elektrischen Speichers. Dabei wird durch das Laden elektrische Residualleistung aufgenommen und durch das Entladen negative Residualleistung kompensiert.

Es findet bei allen, durch den Nutzer definierten, elektrischen Speichern Anwendung. Dabei ist die Reihenfolge, in welcher die Speicher ge- oder entladen werden direkt an die Priorisierung der elektrischen Speicher geknüpft. Mit sinkender Priorität sinkt somit auch potentiell die aufgenommene und abgegebene Energie. Dadurch gilt im Allgemeinen, dass die Energie in einem Speicher mit hoher Priorität stärker fluktuiert, als in einem Speicher mit geringer Priorität.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Dies erfolgt exemplarisch mit der Anlage „Batterie“.

Ausgangssituation:

<u>Name:</u>	<u>Bezeichnung:</u>	<u>Wert:</u>
Residualleistung am Zeitpunkt „i“	$P_{res}$	150 GW
Installierte Leistung (Batterie)	$P_{batterie,max}$	100 GW
Füllstand (Batterie)	$W_{batterie}$	0 GWh
Wirkungsgrad Ein (Batterie)	$\eta_{batterie, ein}$	90 %
Nutzbare Abwärme (Batterie):	$\eta_{batterie, abwärme}$	20 %
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 20: Ausgangssituation Validierung des Moduls: ManageEStorCharge

Prognose:

Durch die Leistungsbegrenzung der Batterie kann nicht die volle elektrische Residualleistung aufgenommen werden. Dadurch ergibt sich eine Ladeleistung von:

$$P_{lade} = P_{batterie,max} = 100 \text{ GW}$$

und somit eine neue Residualleistung von

$$P_{res,neu} = P_{res} - P_{lade} = 50 \text{ GW}.$$

Durch das Laden und den Wirkungsgrad der Batterie ergibt sich ein neuer Füllstand von:

$$W_{batterie,neu} = W_{batterie} + P_{lade} \cdot \frac{\eta_{batterie,ein}}{100} \cdot \alpha = 90 \text{ GWh}.$$

Dabei entsteht eine Verlustleistung von:

$$P_{verlust} = \left(1 - \frac{\eta_{batterie,ein}}{100}\right) \cdot P_{lade} = 10 \text{ GW}.$$

Durch die Nutzung von Abwärme kann dabei eine Leistung von:

$$P_{abwärme} = \left(1 - \frac{\eta_{batterie,ein}}{100}\right) \cdot \frac{\eta_{batterie,abwärme}}{100} \cdot P_{lade} = 2 \text{ GW}$$

in das Fernwärmenetz eingespeist werden.

Realität:

Tabelle 21 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach Anwendung des Moduls „ManageEStorCharge“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

$W_{batterie,neu}$	$P_{res,neu}$	$P_{verluste}$	$P_{abwärme}$
90. GWh	50. GW	10. GW	2. GW

Tabelle 21: Validierung des Moduls: ManageEStorCharge

#### 4.8.14 Modul: GasToPower

In diesem Modul wird das Ausspeichern und Rückverstromen von Gas simuliert. Ziel ist es dabei negative elektrische Residualleistung zu kompensieren. Die Gegenstücke dieser Funktion sind die Funktionen StorH2 [Abschnitt 4.8.15] und StorCH4 [Abschnitt 0], durch welche elektrische Residualleistung in Gas gespeichert wird.

Bei der Rückverstromung wird zunächst versucht die negative Residualleistung durch Anlagen des Wasserstoff-Zweigs zu kompensieren. Erst wenn der vorhandene Wasserstoff nicht mehr ausreicht oder die Anlagen an ihre Leistungsgrenzen stoßen, wird auf Anlagen des Methan-Zweigs zurückgegriffen.

Diese Maßnahme ist durch wirtschaftliche Aspekte zu erklären und wurde in Unterabschnitt 2.1.2.3 bereits erläutert.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Dies erfolgt exemplarisch mit der Anlage „Brennstoffzelle“.

##### Ausgangssituation:

<b>Name:</b>	<b>Bezeichnung:</b>	<b>Wert:</b>
Residualleistung am Zeitpunkt „i“	$P_{res}$	-20 GW
Installierte Leistung	$P_{brennstoffzelle,max}$	7 GW
Wirkungsgrad	$\eta_{brennstoffzelle}$	38 %
Wirkungsgrad Aus (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,aus}$	99,9 %
Nutzbare Abwärme (Batterie):	$\eta_{brennstoffzelle,abwärme}$	84 %
Füllstand (Wasserstoffspeicher):	$W_{h2.speicher}$	100 GWh
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 22: Ausgangssituation Validierung des Moduls: GasToPower

Prognose:

Durch die Leistungsbegrenzung der Brennstoffzelle kann nicht die volle elektrische Residualleistung kompensiert werden. Dadurch ergibt sich eine Leistung von:

$$P_{\text{brennstoffzelle}} = P_{\text{brennstoffzelle,max}} = 7 \text{ GW.}$$

Dadurch ergibt sich eine neue Residualleistung von

$$P_{\text{res,neu}} = P_{\text{res}} + P_{\text{brennstoffzelle}} = -13 \text{ GW.}$$

Ebenfalls ergibt sich durch die Umwandlung des Wasserstoffs ein neuer Füllstand des Speichers von:

$$W_{\text{h2,speicher,neu}} = W_{\text{h2,speicher}} - P_{\text{brennstoffzelle}} \cdot \frac{100}{\eta_{\text{brennstoffzelle}}} \cdot \alpha = 81,58 \text{ GWh.}$$

Da das Ausspeichern des Wasserstoffs über elektrische Pumpen wiederum elektrische Energie verbraucht, sinkt die Residualleistung auf:

$$P_{\text{res,neu}} = P_{\text{res,neu}} - \left(1 - \frac{\eta_{\text{h2,speicher,aus}}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{\text{brennstoffzelle}}} \cdot P_{\text{brennstoffzelle}} = -13,018.$$

Durch das Umwandeln und Ausspeichern entsteht dabei eine gesamte Verlustleistung von:

$$P_{\text{verlust,gesamt}} = \left[ \left(1 - \frac{\eta_{\text{h2,speicher,aus}}}{100}\right) + \left(1 - \frac{\eta_{\text{brennstoffzelle}}}{100}\right) \right] \cdot \frac{100}{\eta_{\text{brennstoffzelle}}} \cdot P_{\text{brennstoffzelle}} = 11,44 \text{ GW.}$$

Durch die Nutzung von Abwärme kann dabei eine Leistung von:

$$P_{\text{abwärme}} = \frac{\eta_{\text{brennstoffzelle,abwärme}}}{100} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{brennstoffzelle}}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{\text{brennstoffzelle}}} \cdot P_{\text{brennstoffzelle}} = 9,6 \text{ GW}$$

in das Fernwärmenetz eingespeist werden.

Realität:

Tabelle 23 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach Anwendung des Moduls „GasToPower“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

$W_{h2,speicher,neu}$	$P_{res,neu}$	$P_{verluste,gesamt}$	$P_{abwärme}$
81.58 GWh	-13.02 GW	11.44 GW	9.59 GW

Tabelle 23: Validierung des Moduls: GasToPower

## 4.8.15 Modul: StoreH2

In diesem Modul wird das Umwandeln und Speichern von elektrischer Residualleistung in Wasserstoff realisiert.

Ähnlich wie im Modul „GeneratingNeededH2“ in Abschnitt 0, wird dabei der erzeugte Wasserstoff direkt in den Wasserstoffspeicher eingespeichert. Der Unterschied zum oben genannten Modul besteht dabei in der Intention hinter der Umwandlung. Während im Modul „GeneratingNeededH2“ ausreichend Wasserstoff zur Lastdeckung erzeugt werden soll, wird in diesem Modul überschüssige Residualleistung abgebaut. Dazu wird die restliche Elektrolyseleistung, welche nach dem Erzeugen des benötigten Wasserstoffs übrig ist, genutzt.

Dabei steht dieses Modul im direkten Zusammenhang mit dem Modul „StoreCH4“, welches in Abschnitt 0 beschrieben wird. Basierend auf der überschüssigen Residualleistung und den Füllständen des Wasserstoff- und Methanspeichers, wird zu jedem Zeitpunkt entschieden, wie viel Wasserstoff und wie viel Methan erzeugt werden soll.

Die Anteile der Leistungen, welche zur Erzeugung des Gases verwendet werden sollen, werden dabei durch die Parameter „H2Priorität“ bzw. „CH4Priorität“ bestimmt. Diese ergeben sich durch:

$$H2Priorität = \frac{W_{h2,speicher,max} - W_{h2,speicher,i}}{(W_{h2,speicher,max} - W_{h2,speicher,i}) + (W_{ch4,speicher,max} - W_{ch4,speicher,i})}$$

Gleichung 5: Wasserstoff-Priorität im Modul "StoreH2" &amp; „StoreCH4“

und

$$CH4Priorität = 1 - H2Priorität$$

Gleichung 6: Methan-Priorität im Modul "StoreH2" & „StoreCH4“

mit:

$W_{h2,speicher,max}$  = Maximale Kapazität des Wasserstoffspeichers

$W_{ch4,speicher,max}$  = Maximale Kapazität des Methanspeichers

$W_{h2,speicher,i}$  = Füllstand des Wasserstoffspeichers zum Zeitpunkt „i“

$W_{ch4,speicher,i}$  = Füllstand des Methanspeichers zum Zeitpunkt „i“

Durch dieses Vorgehen soll gewährleistet werden, dass die Füllstände der beiden Gasspeicher, bezogen auf ihre Kapazitäten, gleichmäßig befüllt werden.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Das dabei angenommene Szenario wird in der Beschreibung des Moduls „StoreCH4“ aufgegriffen und fortgesetzt.

Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Residualleistung am Zeitpunkt „i“	$P_{res}$	1000 GW
Restleistung (Elektrolyse)	$P_{elektrolyse}$	585 GW
Wirkungsgrad	$\eta_{elektrolyse}$	70 %
Wirkungsgrad Ein (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,ein}$	99,9 %
Nutzbare Abwärme	$\eta_{elektrolyse,abwärme}$	10 %
Kapazität (Wasserstoffspeicher)	$W_{h2.speicher,max}$	90 TWh
Kapazität (Methanspeicher)	$W_{ch4.speicher,max}$	90 TWh
Füllstand (Wasserstoffspeicher):	$W_{h2.speicher}$	50 TWh
Füllstand (Methanspeicher):	$W_{ch4.speicher}$	40 TWh
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 24: Ausgangssituation Validierung des Moduls: StoreH2

Prognose:

Gemäß Gleichung 5 zur Priorisierung ergibt sich eine anteilig umzuwandelnde elektrische Leistung von:

$$P_{res,elektrolyse} = P_{res} \cdot H2Priorität = 444,44 \text{ GW}.$$

Dabei ergibt sich durch das Umwandeln der elektrischen Leistung und das Einspeichern des Wasserstoffes ein neuer Füllstand des Wasserstoffspeichers von:

$$W_{h2,speicher,neu} = W_{h2,speicher} + P_{res,elektrolyse} \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \cdot \alpha = 50,31 \text{ TWh}.$$

Außerdem sinkt die elektrische Residualleistung durch Umwandlung und Einspeicherung auf:

$$P_{res,neu} = P_{res} - \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\eta_{h2,speicher,ein}}{100} \right) \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \right] \cdot P_{res,elektrolyse} = 555,24 \text{ GW}$$

und die verbliebene Elektrolyseleistung auf:

$$P_{elektrolyse,neu} = P_{elektrolyse} - P_{res,elektrolyse} \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} = 273,89 \text{ GW}.$$

Die gesamten dabei entstandenen Verluste belaufen sich auf:

$$P_{verlust,gesamt} = \left[ \left( 1 - \frac{\eta_{h2,speicher,ein}}{100} \right) + \left( 1 - \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \right) \cdot \frac{100}{\eta_{elektrolyse}} \right] \cdot P_{res,elektrolyse} \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} = 133,64 \text{ GW}.$$

Ebenfalls entsteht durch die Elektrolyse eine nutzbare Wärmeleistung von:

$$P_{abwärme} = \frac{\eta_{elektrolyse,abwärme}}{100} \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \right) \cdot P_{res,elektrolyse} = 13,33 \text{ GW}.$$

Realität:

Tabelle 25 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach Anwendung des Moduls „StoreH2“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

<u>W<sub>h2,speicher,neu</sub></u>	<u>P<sub>res,neu</sub></u>	<u>P<sub>e</sub>lektrolyse,neu</u>	<u>P<sub>verluste,gesamt</sub></u>	<u>P<sub>abwärme</sub></u>
50.31 TWh	555.24 GW	273.89 GW	133.64 GW	13.33 GW

Tabelle 25: Validierung des Moduls: StoreH2

#### 4.8.16 Modul: StoreCH4

In diesem Modul wird das Umwandeln und Speichern von elektrischer Residualleistung in Methan realisiert.

Wie bereits in der Beschreibung des Moduls „StoreCH4“ in Abschnitt 0 beschrieben, wird durch dieses Modul überschüssige elektrische Residualleistung in Methan umgewandelt und gespeichert. Der Anteil der Residualleistung, welcher in Methan gespeichert werden soll, ergibt sich durch Gleichung 6. Dieser Anteil wird zunächst durch die Elektrolyseanlage in Wasserstoff gewandelt, in den Wasserstoffspeicher eingespeichert und nach dem Ausspeichern der Methanisierungsanlage zugeführt, welche das erzeugte Gas in den Methanspeicher einspeichert.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Das dabei angenommene Szenario basiert auf den Ergebnissen des Szenarios in Abschnitt 4.8.15.

Ausgangssituation:

<u>Name:</u>	<u>Bezeichnung:</u>	<u>Wert:</u>
Residualleistung am Zeitpunkt „i“	$P_{res}$	555,24 GW
Restleistung (Elektrolyse)	$P_{elektrolyse}$	273,89 GW
Wirkungsgrad (Elektrolyse)	$\eta_{elektrolyse}$	70 %
Restleistung (Methanisierung)	$P_{methanisierung}$	392 GW
Wirkungsgrad(Methanisierung)	$\eta_{methanisierung}$	80 %
Wirkungsgrad Ein (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,ein}$	99,9 %
Wirkungsgrad Aus (H <sub>2</sub> -Speicher):	$\eta_{h2,speicher,aus}$	99,9 %
Wirkungsgrad Ein (CH <sub>4</sub> -Speicher):	$\eta_{ch4,speicher,ein}$	99,9 %
Nutzbare Abwärme (Elektrolyse)	$\eta_{elektrolyse,abwärme}$	10 %
Nutzbare Abwärme (Methanisierung)	$\eta_{methanisierung,abwärme}$	10 %
Füllstand (Methanspeicher):	$W_{ch4.speicher}$	40 TWh
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 26: Ausgangssituation Validierung des Moduls: StoreCH4

Prognose:

Gemäß Gleichung 6 zur Priorisierung und dem in Abschnitt 4.8.15 beschriebenen Szenario ergibt sich eine umzuwandelnde elektrische Leistung von:

$$P_{res, methanisierung} = 555,24 \text{ GW}.$$

Aufgrund der Restleistung der Elektrolyseanlage von 273,89 GW kann jedoch lediglich eine elektrische Leistung von:

$$P_{res, umwandeln, max} = W_{elektrolyse} \cdot \frac{100}{\eta_{elektrolyse}} = 391,27 \text{ GW}$$

umgewandelt werden.

Folgend ergibt sich durch den Prozess der Elektrolyse sowie der Methanisierung ein neuer Füllstand des Methanspeichers von:

$$\begin{aligned} W_{ch4, speicher, neu} &= W_{ch4, speicher} + P_{res, umwandeln, max} \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \cdot \frac{\eta_{methanisierung}}{100} \cdot \alpha \\ &= 40,219 \text{ TWh}. \end{aligned}$$

Die gesamten dabei entstandenen Verluste belaufen sich auf:

$$\begin{aligned} P_{verlust, gesamt} &= \\ &\left[ \left(1 - \frac{\eta_{elektrolyse}}{100}\right) \cdot \frac{100}{\eta_{elektrolyse}} + \left(1 - \frac{\eta_{h2, speicher, ein}}{100}\right) + \left(1 - \frac{\eta_{h2, speicher, aus}}{100}\right) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{\eta_{methanisierung}}{100}\right) + \left(1 - \frac{\eta_{ch4, speicher, ein}}{100}\right) \cdot \frac{\eta_{methanisierung}}{100} \right] \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \\ &\quad \cdot P_{res, methanisierung} = 172,93 \text{ GW}. \end{aligned}$$

Ebenfalls sinkt die verbliebene elektrische Residualleistung auf:

$$P_{res, neu} = P_{res} - P_{verlust, gesamt} - \frac{(W_{ch4, speicher, neu} - W_{ch4, speicher})}{\alpha} = 163,2 \text{ GW}$$

Weiter entsteht eine nutzbare Wärmeleistung von:

$$P_{abw\u00e4rme} = \left[ \frac{\eta_{elektrolyse,abw\u00e4rme}}{100} \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \right) + \frac{\eta_{methanisierung,abw\u00e4rme}}{100} \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{methanisierung}}{100} \right) \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \right] \cdot P_{res,umwandeln,max} = 17,22 \text{ GW}.$$

Die verbliebenen Leistungen der Elektrolyse sowie der Methanisierung belaufen sich auf:

$$P_{elektrolyse,neu} = P_{elektrolyse} - P_{res,umwandeln,max} \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} = 0 \text{ GW}$$

und

$$P_{methanisierung,neu} = P_{methanisierung} - P_{res,umwandeln,max} \cdot \frac{\eta_{elektrolyse}}{100} \cdot \frac{\eta_{methanisierung}}{100} = 172,89 \text{ GW}.$$

### Realit\u00e4t:

Tabelle 27 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „StoreCH4“. Durch die \u00dcbereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

<u>W<sub>ch4,speicher,neu</sub></u>	<u>P<sub>res,neu</sub></u>	<u>P<sub>elektrolyse,neu</sub></u>	<u>P<sub>methanisierung,neu</sub></u>	<u>P<sub>verluste,gesamt</sub></u>	<u>P<sub>abw\u00e4rme</sub></u>
40.22 TWh	163.2 GW	0. GW	172.89 GW	172.93 GW	17.22 GW

Tabelle 27: Validierung des Moduls: StoreCH4

#### 4.8.17 Modul: StoreWasteHeat

In diesem Modul wird das Einspeichern, der zum Zeitpunkt „i“ erzeugten nutzbaren Abwärmeleistung in den Fernwärmespeicher, simuliert. Wie bereits in Abschnitt 4.8.6 beschrieben, wird die Wärmeleistung „nutzbare Abwärme“ erst durch das erneute Ausspeichern zur „genutzten Abwärme“ und kann so zum Decken der Fernwärmelast genutzt werden.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Das hierbei verwendete Szenario basiert auf den entstandenen Abwärmeleistungen der vorangegangenen Szenarien.

##### Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Abwärme (GeneratingNeededH2)	$P_{abwärme,generatingNeededH2}$	0,64 GW
Abwärme (GeneratingNeededCH4)	$P_{abwärme,generatingNeededCH4}$	0,2 GW
Abwärme (ManageEStorCharge)	$P_{abwärme,manageEStorCharge}$	2 GW
Abwärme (GasToPower)	$P_{abwärme,gastoPower}$	9,6 GW
Abwärme (StoreH2)	$P_{abwärme,storeH2}$	13,33 GW
Abwärme (StoreCH4)	$P_{abwärme,storeCH4}$	17,22 GW
Füllstand des Fernwärmespeichers	$W_{fernwärmespeicher}$	0 GW
Wirkungsgrad Ein (Fernwärmespeicher):	$\eta_{fernwärmespeicher,ein}$	99 %
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 28: Ausgangssituation Validierung des Moduls: StoreWasteHeat

Prognose:

Die gesamte Abwärmeleistung, welche dem Fernwärmenetz in Zeitpunkt „i“ zugeführt wurde, beläuft sich auf:

$$\begin{aligned}
 P_{abwärme,gesamt} &= \\
 &P_{abwärme,generatingNeededH2} + P_{abwärme,generatingNeededCH4} + P_{abwärme,manageEStorCharge} \\
 &+ P_{abwärme,gastoPower} + P_{abwärme,storeH2} + P_{abwärme,storeCH4} \\
 &= 42,99 \text{ GW}.
 \end{aligned}$$

Der Füllstand des Fernwärmespeichers steigt dabei auf:

$$\begin{aligned}
 W_{fernwärmespeicher,neu} &= W_{fernwärmespeicher} + P_{abwärme,gesamt} \cdot \frac{\eta_{fernwärmespeicher,ein}}{100} \cdot \alpha \\
 &= 42,56 \text{ GWh}.
 \end{aligned}$$

Realität:

Tabelle 29 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „StoreWasteHeat“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

<u>W<sub>fernwärmespeicher,neu</sub></u>
42.56 GWh

Tabelle 29: Validierung des Moduls: StoreWasteHeat

#### 4.8.18 Modul: Selfdischarge

In diesem Modul wird die Selbstentladung sämtlicher Speicher simuliert. Basis der dabei entstehenden Verluste ist der Parameter „Selbstentladung“, welcher bereits in Sektion 3.3 beschrieben wurde. Dieser wird durch das Modul „UnitFactor“, welches in Abschnitt 4.8.1 beschrieben wird, auf die Selbstentladung pro Zeitschritt (Auflösungsfaktor  $\alpha$ ) genormt.

Durch den Aufruf dieses Moduls wird der Füllstand sämtlicher Speicher gemäß ihrer genormten Selbstentladung pro Zeitschritt für den anschließenden Zeitpunkt angepasst.

Beispielsweise wird im Zeitpunkt „i“ errechnet, welche Energie zum Zeitpunkt „i+1“ noch im Speicher enthalten ist.

Die dabei entladene Energie wird den Verlusten hinzugefügt. Eine Ausnahme bildet die Selbstentladung des Fernwärmespeichers, da die durch Selbstentladung verlorene Energie zum Zeitpunkt der Selbstentladung lediglich als „nutzbare“ Energie betrachtet wird.

Folgend wird das Modul auf Plausibilität geprüft. Dies erfolgt exemplarisch durch die Anlage „Batterie“.

##### Ausgangssituation:

<b><u>Name:</u></b>	<b><u>Bezeichnung:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Füllstand des Speichers zum Zeitpunkt „i“	$W_{\text{speicher},i}$	100 GWh
Selbstentladung	$\eta_{\text{selbstentladung}}$	4 %/Jahr
Zeitliche Auflösung:	$\alpha$	1 h

Tabelle 30: Ausgangssituation Validierung des Moduls: Selfdischarge

Prognose:

Durch das Modul „UnitFactor“ wurde eine Selbstentladung von:

$$\eta_{selbstentladung,\alpha} = \left( 1 - \left( 1 - \frac{\eta_{selbstentladung}}{100} \right)^{\frac{1}{\alpha \cdot 356 \cdot 24 \cdot h}} \right) * 100 = 0,00048 \% / h$$

errechnet.

Dadurch ergibt sich zum Zeitpunkt „i+1“ ein Füllstand von:

$$W_{speicher,i+1} = W_{speicher,i} \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{selbstentladung}}{100 \cdot \alpha} \right) = 99,99954 \text{ GW.}$$

Ebenfalls ergibt sich so eine Verlustleistung von:

$$P_{verlust} = W_{speicher,i} \cdot \frac{\eta_{selbstentladung}}{100 \cdot \alpha} = 0,46 \text{ MW.}$$

Realität:

Tabelle 31 zeigt die realen Werte der entsprechenden Leistungen und Energien nach der Anwendung des Moduls „Selfdischarge“. Durch die Übereinstimmung mit der getroffenen Prognose gilt es als valide.

$W_{speicher,i+1}$	$P_{verluste}$
99.9995 GWh	0.456621 MW

Tabelle 31: Validierung des Moduls: Selfdischarge

## 4.9 INBETRIEBNAHME DES BERECHNUNGSTOOLS

Folgend wird die Inbetriebnahme des bereitgestellten Berechnungstools erläutert. Nach dem Entpacken der „.zip-Dabei“, welche dem Umfang dieser Arbeit beiliegt, enthält der Ordner „Energiewendepplaner“ alle benötigten Dateien und Unterordner. Relevant für den Nutzer ist dabei die Datei: „Input\_Mask.xlsx“, welche die in Kapitel 3 beschriebene Eingabemaske enthält sowie die Datei: „Output\_Mask.xlsx“, welche die in Kapitel 0 beschriebene Ausgabemaske enthält.

Sollte der Nutzer des Berechnungstools über eine Lizenz des in Sektion 1.2 beschriebenen Programms „Mathematica“ verfügen, so kann dieser nach dem Parametrieren der Eingabemaske die Berechnung starten, indem er das im Ordner „Mathematica“ enthaltene Notebook „Energiewendepplaner.nb“ ausführt.

Nach Beendigung der Berechnung können die Ergebnisse des Szenarios über die in Kapitel 0 beschriebenen Funktionalitäten eingesehen werden.

Tabelle 32 umreißt die Entwicklungsumgebung des Berechnungstools. Dabei ist grade die Mathematica-Versionsnummer zu beachten, da nicht garantiert werden kann, dass die Funktionalität des Tools in älteren und neueren Versionen erhalten bleibt.

Betriebssystem	Windows 10
Prozessor	Intel i7-7700
RAM	16 GB
Mathematica (Version)	11.3
Excel (Version)	Excel 2016

Tabelle 32: Entwicklungsumgebung des Berechnungstools

Je nach Parametrierung des Szenarios kann die Anzahl der Iterationsschritte zwischen 4 und 20 liegen. Die durchschnittliche Berechnungszeit liegt dabei zwischen 38 und 95 Sekunden.

Dabei beeinflusst die Anwendung des Smart-Grid-Algorithmus [Sektion 2.2] als auch die Anzahl der elektrischen Speicher bzw. die Anzahl der konventionellen Kraftwerke die Abarbeitungsdauer.

Während die zusätzlich benötigte Rechenzeit für einen elektrischen Speicher oder ein konventionelles Kraftwerk nur wenige Sekunden beträgt, so benötigt der Smart-Grid-Algorithmus ca. 35 Sekunden.

Während diverser Rechendurchläufe lag die RAM-Auslastung bei durchschnittlich 125 MB. Jedoch waren auch Auslastungen von über 750 MB messbar.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass eine Anwendung des Tools auf Rechnern, welche mit dem Betriebssystem: „MacOS“ laufen, nicht möglich ist.

## 4.10 EXEMPLARISCHE BERECHNUNGSSZENARIEN

In den folgenden beiden Abschnitten werden exemplarisch zwei Berechnungsszenarien vorgestellt, die sich grundlegend in den zu deckenden Lasten unterscheiden.

Das betrachtete Energiesystem der Standard-Parameter entspricht dabei einer Mischung aus konkreten Aussagen der Bundesregierung bzw. literaturgestützter Annahmen.

Die Last des ersten Szenarios entspricht den aktuellen Lasten des deutschen Energiesystems, während die Lasten des zweiten Szenarios einer Prognose des „Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit“ [9] für das Jahr 2050 entsprechen.

Folgend werden einige essenzielle, die Berechnung stark beeinflussende, Parametrierungen des Energiesystems dargelegt und erläutert.

In den darauffolgenden Abschnitten werden die Lasten der beiden Szenarien genauer betrachtet.

---

### 4.10.1 Ausgangssituation

Zunächst wird die Ausgangssituation des betrachteten Energiesystems beschrieben. Dabei werden die Speicher, die Energiewandler und die Erzeuger separat betrachtet.

Alle weiteren, nicht beschriebenen Parameter, sind dem im Anhang enthaltenen Standard-Parametersatz zu entnehmen.

#### 4.10.1.1 Speicher

Die Speicher des Energiesystems umfassen die elektrischen sowie die Gas- und Wärmespeicher. Gemäß des Standard-Parametersatzes existieren im betrachteten Szenario zwei elektrische Speicher (Batterie und Pumpspeicherkraftwerk).

##### 4.10.1.1.1 Elektrische Speicher:

Die Kapazität des Batteriespeichers sowie dessen installierte Leistung entsprechen einer Prognose des Fraunhofer-Instituts für Windenergie, welches in [10] für das Jahr 2050 aufgegriffen wird.

Aus dieser Quelle gehen ebenfalls die Kapazität und installierte Leistung des Pumpspeicherkraftwerks hervor. Diese ergeben sich aus dem aktuellen Zustand von insgesamt 40 GWh mit 6,6 GW, welcher sich durch Modernisierungen auf 41,645 GWh mit 6,93 GW erhöhen lässt. Durch Neubauten an den drei Standorten Atdorf (Baden-Württemberg), Einöden (Salzburg, Österreich) und Blautal (Baden-Württemberg) kann die Kapazität auf 55 GWh und die installierte Leistung auf 8,6 GW erhöht werden.

Die Parameter: Jahresnutzungsgrad, Ein- und Ausspeicherwirkungsgrad [10] sowie die Selbstentladung [11] der Batterie und des Pumpspeicherkraftwerks [12] sind durch konkrete Quellen belegt.

<b>Parameter:</b>	<b>Batterie:</b>	<b>Pumpspeicherkraftwerk:</b>
Kapazität	0,08 TWh	0.055 TWh
Installierte Leistung	10 GW	8,6 GW
Jahresnutzungsgrad	80 %	90 %
Einspeicherwirkungsgrad	90 %	88 %
Ausspeicherwirkungsgrad	90 %	88 %
Selbstentladung	4 %/Monat	4,46 %/Jahr

Tabelle 33: Parametrierung der elektrischen Speicher (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.1.2 Gasspeicher

Die Parametrierung der betrachteten Gasspeicher entspricht weitestgehend der Prognose durch [10] für das Jahr 2050. Lediglich der Parameter „Jahresnutzungsgrad“ kann nicht durch diese Quelle belegt werden. Dieser wurde zu Gunsten einer optimistischen Betrachtung mit 99% angenommen.

<b>Parameter:</b>	<b>Methanspeicher:</b>	<b>Wasserstoffspeicher:</b>
Kapazität	514 TWh	110 TWh
Jahresnutzungsgrad	99 %	99 %
Einspeicherwirkungsgrad	99 %	99 %
Ausspeicherwirkungsgrad	99 %	99 %
Selbstentladung	6 %/Jahr	6 %/Jahr

Tabelle 34: Parametrierung der Gasspeicher (exemplarische Berechnungsszenarien)

Die Kapazität der Speicher entspricht dabei nicht dem prognostizierten Bedarf, sondern der maximalen Kapazität der Kavernenspeicher für das Jahr 2050. Somit besitzen diese Speicher keinen oberirdischen Flächenbedarf für deren Kapazität.

#### 4.10.1.1.3 Wärme-Speicher:

Genau wie die Parametrierung der Gasspeicher entspricht die Dimensionierung der Wärmespeicher weitestgehend dem in [10] angenommenen Prognosen für das Jahr 2050. Ebenfalls konnte der Parameter „Jahresnutzungsgrad“ nicht belegt werden und beruht somit auf einer freien Annahme.

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>Niedrigtemperatur:</u></b>	<b><u>Hochtemperatur:</u></b>	<b><u>Fernwärme:</u></b>
Kapazität	320.5 GWh	320.5 GWh	20 TWh
Jahresnutzungsgrad	90 %	90 %	90 %
Einspeicherwirkungsgrad	99,9 %	99,9 %	99,9 %
Ausspeicherwirkungsgrad	99,9 %	99,9 %	99,9 %
Selbstentladung	80 %/Jahr	55 %/Monat	50 %/Monat

Tabelle 35: Parametrierung der Wärme-Speicher (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.2 Wandler

Die Energiewandler des in dieser Arbeit betrachteten Energiesystems lassen sich allgemein in Power-to-Gas, Gas-to-Power, Gas-to-Heat und Power-to-Heat aufteilen.

##### 4.10.1.2.1 Power-to-Gas

Als Energiewandler des Typs Power-to-Gas werden die Anlagen der Elektrolyse und Methanisierung verstanden.

Die Wirkungsgrade der beiden Anlagen entsprechen den aktuellen Wirkungsgraden, welche den Quellen [13] und [14] zu entnehmen sind. Die installierten Leistungen der beiden Anlagen entsprechen dem durch [15] prognostizierten Bedarf an Power-to-Gas Anlagen für das Jahr 2050.

Bei den Parametern der „nutzbaren Abwärme“ sowie des „Jahresnutzungsgrads“ handelt es sich um getroffene Annahmen.

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>Elektrolyse:</u></b>	<b><u>Methanisierung:</u></b>
Wirkungsgrad	70 %	80 %
Installierte Leistung	54 GW	54 GW
Nutzbare Abwärme	10 %	10 %
Jahresnutzungsgrad	99 %	99 %

Tabelle 36: Parametrierung der Power-to-Gas Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.2.2 Gas-to-Power

Zu den Anlagen des Typs Gas-to-Power zählen das Wasserstoff-Kraftwerk, die Brennstoffzelle und das Methan-Kraftwerk. Der Wirkungsgrad sowie die nutzbare Abwärme und der Jahresnutzungsgrad sind dabei durch [12] gestützt. Die Summe der drei installierten Leistungen entspricht dabei einer in [15] getroffenen Annahme. Dabei wird prognostiziert, dass für das Jahr 2050 eine Ausgleichsleistung in Form von Gaskraftwerken, welche regenerativ erzeugtes Gas rückverstromen, benötigt wird.

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>H<sub>2</sub>-Kraftwerk:</u></b>	<b><u>Brennstoffzelle:</u></b>	<b><u>CH<sub>4</sub>-Kraftwerk:</u></b>
Wirkungsgrad	40 %	47 %	40 %
Installierte Leistung	21.6 GW	21.6 GW	21.6 GW
Nutzbare Abwärme	80 %	84%	80 %
Jahresnutzungsgrad	90 %	99 %	90 %

Tabelle 37: Parametrierung der Gas-to-Power Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.2.3 Gas-to-Heat

Zu den Anlagen des Typs Gas-to-Heat zählen die Wasserstoff- und Methan-Anlagen des Hoch- (HT) und Niedrigtemperatur-Zweigs (NT).

Die Angabe über den „Jahresnutzungsgrad“ wird dabei durch [12] gestützt, während der Wirkungsgrad einer optimistischen Schätzung entspricht.

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>H<sub>2</sub> (NT):</u></b>	<b><u>CH<sub>4</sub> (NT):</u></b>	<b><u>H<sub>2</sub> (HT):</u></b>	<b><u>CH<sub>4</sub> (HT):</u></b>
Wirkungsgrad	96 %	96 %	96 %	96 %
Jahresnutzungsgrad	90 %	90 %	99 %	99 %

Tabelle 38: Parametrierung der Gas-to-Heat Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.2.4 Power-to-Heat:

Zu den Anlagen des Typs Power-to-Heat zählen die Wärmepumpe, die Infrarotheizung sowie die Direktwärme-Anlage des Hochtemperatur-Zweigs und die dezentrale Direktwärme-Anlage des Niedrigtemperatur-Zweigs.

Die Parameter der Infrarotheizung werden dabei durch [16] und [17] bereitgestellt. Weiter sind die Parameter der Wärmepumpe den Quellen [18] und [19] zu entnehmen.

Bei den Angaben der Direktwärme-Anlagen handelt es sich um getroffene Annahmen.

<u>Parameter:</u>	<u>Infrarotheizung:</u>	<u>Wärmepumpe:</u>	<u>Dezentrale Direktwärme(NT):</u>	<u>Direktwärme(HT):</u>
Wirkungsgrad	86 %	470 %	99 %	99 %
Jahresnutzungsgrad	99 %	90 %	90 %	90 %

Tabelle 39: Parametrierung der Power-to-Heat Anlagen (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.3 Erzeuger

Zu den Erzeugern des betrachteten Systems zählen neben den drei regenerativen Anlagen ebenfalls die zusammengefassten Erzeuger der regenerativen Grundeinspeisung sowie die vorhandenen konventionellen Kraftwerke. Der Standard-Parametersatz enthält dabei ein konventionelles Kraftwerk.

##### 4.10.1.3.1 Wind an Land, Wind auf See und Solar

Während die aktuell installierten Leistungen aus den in Abschnitt 1.5.1 beschriebenen Verläufen gemäß [3] hervorgehen, sind die Angaben zur „Maximal zu installierenden Leistung“ den Quellen [20] für die Windenergie an Land, [21] für die Windenergie auf See und [22] für Solar zu entnehmen.

Aufgrund ihres enormen Flächenbedarfs werden die spezifischen Flächen der drei regenerativen Anlagen ebenfalls angegeben. Dies sind den Quellen: [23] für Windanlagen und [24] für Solaranlagen zu entnehmen.

Der spezifische Flächenbedarf der Windanlagen ergibt sich dabei aus der Annahme, dass diese in einem Windpark aufgestellt werden. Dadurch spielen gerade die funktionstechnischen Mindestabstände eine große Rolle und sorgen somit für den enormen Flächenbedarf.

Bei den Angaben zur Leistungsbegrenzung handelt es sich um Annahmen.

<b>Parameter:</b>	<b>Wind an Land:</b>	<b>Wind auf See:</b>	<b>Solar:</b>
Leistungsbegrenzung	70 %	70 %	70 %
Aktuell installierte Leistung	52931 MW	6382 MW	45277 MW
Maximal zu installierende Leistung	1188000 MW	85000 MW	544382.72 MW
Spezifischer Flächenbedarf (min)	50000 m <sup>2</sup> /MW	50000 m <sup>2</sup> /MW	6000 m <sup>2</sup> /MW
Spezifischer Flächenbedarf (max)	200000 m <sup>2</sup> /MW	200000 m <sup>2</sup> /MW	8000 m <sup>2</sup> /MW

Tabelle 40: Parametrierung der regenerativen Erzeuger (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.3.2 Regenerative Grundeinspeisung

Die jährliche Grundeinspeisung an regenerativ erzeugter Energie ist dem in [10] prognostizierten Szenario für das Jahr 2050 zu entnehmen.

Regenerative Grundeinspeisung	67 TWh/a
-------------------------------	----------

Tabelle 41: Parametrierung der reg. Grundeinspeisung (exemplarische Berechnungsszenarien)

#### 4.10.1.3.3 Konventionelles Kraftwerk

Das im Standard-Parametersatz enthaltene konventionelle Kraftwerk repräsentiert durch seine installierte Leistung die Gesamtleistung aller konventioneller Gaskraftwerke. Dies geht aus den Daten der Quelle [3] hervor. Die Angaben zur nutzbaren Abwärme und Jahresnutzungsgrad wurden gemäß [12] parametrisiert.

Installierte Leistung	31.6 GW
Nutzbare Abwärme	80 %
Jahresnutzungsgrad	90 %

Tabelle 42: Parametrierung der konv. Kraftwerke (exemplarische Berechnungsszenarien)

## 4.10.2 Berechnungsszenario 1

Wie in Sektion 0 erwähnt, repräsentiert das in diesem Abschnitt beschriebene Szenario das Energiesystem des Jahres 2050, welches die Lasten der Gegenwart decken soll. Die Lasten teilen sich dabei in die Last durch Mobilität, Wärmelasten und die Last des Bruttostromverbrauchs auf. Diese Verbrauchertypen werden folgend separat betrachtet.

### 4.10.2.1 Last durch Mobilität

In diesem Szenario ergibt sich die Last der Mobilität durch die Anzahl der zugelassenen PKW und LKW. Diese Zahlen ergeben sich aus der Jahresbilanz des Kraftfahrt-Bundesamtes [25]. Zugunsten einer optimistischen Betrachtung wird angenommen, dass 50% der Mobilität elektrisch und 50% durch Wasserstoff betrieben wird.

Daraus ergibt sich folgende Parameterkonstellation:

<u>Parameter:</u>	<u>PKW:</u>	<u>LKW:</u>
Anzahl zugelassener Teilnehmer	47095784	3149263
Anteil elektrisch	50 %	50 %
Anteil Wasserstoff	50 %	50 %
Anteil Methan	0 %	0 %

Tabelle 43: Parametrierung der Last durch Mobilität (Berechnungsszenario 1)

### 4.10.2.2 Wärmelasten

Abbildung 46 zeigt den Energieverbrauch für Wärmezwecke des Jahres 2016 in Petajoule. Dabei werden im hier betrachteten Energiesystem die Raumwärme sowie Warmwasser dem Niedrigtemperatur-Zweig und die Prozesswärme dem Hochtemperatur-Zweig zugeordnet.

#### Energieverbrauch des gesamten EEV-Sektors für Wärmezwecke

Petajoule	2016			
	Raumwärme	Warmwasser	Prozesswärme	Wärme gesamt
Industrie	159,4	16,4	1.713,1	1.888,9
Verkehr	12,7	0,0	0,0	12,7
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	720,8	68,0	102,8	891,6
Haushalte	1.664,3	345,3	142,2	2.151,8
<b>Gesamt</b>	<b>2.557,2</b>	<b>429,7</b>	<b>1.958,1</b>	<b>4.945,0</b>

Abbildung 46: Endenergieverbrauch für Wärmezwecke [26]

Daraus ergibt sich ein jährlicher Energiebedarf von 2987 PJ bzw. 830 TWh für den Niedrigtemperatur-Zweig sowie ein jährlicher Energiebedarf von 1958 PJ bzw. 544 TWh für den Hochtemperatur-Zweig.

Die Aufteilung der Lasten nach Energieträgern beruht dabei auf frei getroffenen Annahmen.

Daraus ergibt sich folgende Parameterkonstellation für den Niedrigtemperatur-Zweig:

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Energiebedarf (Niedrigtemperatur)	830 TWh/a
Deckung durch G2H (Methan)	20 %
Deckung durch G2H (Wasserstoff)	25 %
Deckung durch Wärmepumpen	17.5 %
Deckung durch Infrarotheizung	17.5 %
Deckung durch Fernwärme	20 %

Tabelle 44: Parametrierung der Niedrigtemperatur-Last (Berechnungsszenario 1)

Und folgende für den Hochtemperatur-Zweig:

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Energiebedarf (Hochtemperatur)	544 TWh/a
Deckung durch G2H (Methan)	20 %
Deckung durch G2H (Wasserstoff)	40 %
Direktwärme	40 %

Tabelle 45: Parametrierung der Hochtemperatur-Last (Berechnungsszenario 1)

#### 4.10.2.3 *Bruttostromverbrauch*

Gemäß dem in Abschnitt 1.5.1 beschriebenen Verlauf des Bruttostromverbrauchs [3] ergibt sich eine durchschnittliche Jahresenergie von 485 TWh.

Dieser geforderte Wert lässt sich direkt als Parameter eintragen und bedarf keiner qualitativen Nachbildung.

### 4.10.2.4 Ergebnis

Folgend wird das Ergebnis des ersten Berechnungsszenarios zusammengefasst.

Abbildung 47 zeigt die Grafik „Allgemeine Informationen zur Berechnung“ des ersten Berechnungsszenarios.

<b>Basic Calculation-Results Energiewendeplaner 2.0</b>	
Calculation Time: 2. min. 41. sec. (Ø 32.3176 sec.)	
<b>Smart-Grid Progress:</b>	
NO Smart Grid	
Leistung nicht ausreichend. Anhebung der maximalen Offshore Leistung um: 5 %	
<b>Installed Power:</b>	
Solar: 544.4 GW (Factor: 12.)	
Wind Onshore: 1188. GW (Factor: 22.4)	
Wind Offshore: 89.4 GW (Factor: 14.)	
<b>Delta between Iterations:</b>	
ΔLosses: 0.0004 %	
ΔConvGenPower: 0.0092 %	
ΔWasteHeat: 0.0007 %	
Iteration Steps: 5	

Abbildung 47: Allgemeine Informationen Berechnungsszenario 1

Dieser Grafik sind neben der gesamten Berechnungszeit von 2 Minuten und 41 Sekunden auch die Anzahl der Iterationsdurchläufe und die Ausbaufaktoren der drei regenerativen Anlagen zu entnehmen. Ebenfalls wird der Nutzer an dieser Stelle über die Tatsache informiert, dass seine angegebenen maximal zu installierenden Leistungen nicht ausreichen. Aus diesem Grund musste die maximal zu installierende Offshore-Windleistung um 5% angehoben werden, um das Energiegleichgewicht einhalten zu können.

Abbildung 48 zeigt die Leistungen der drei regenerativen Anlagentypen.

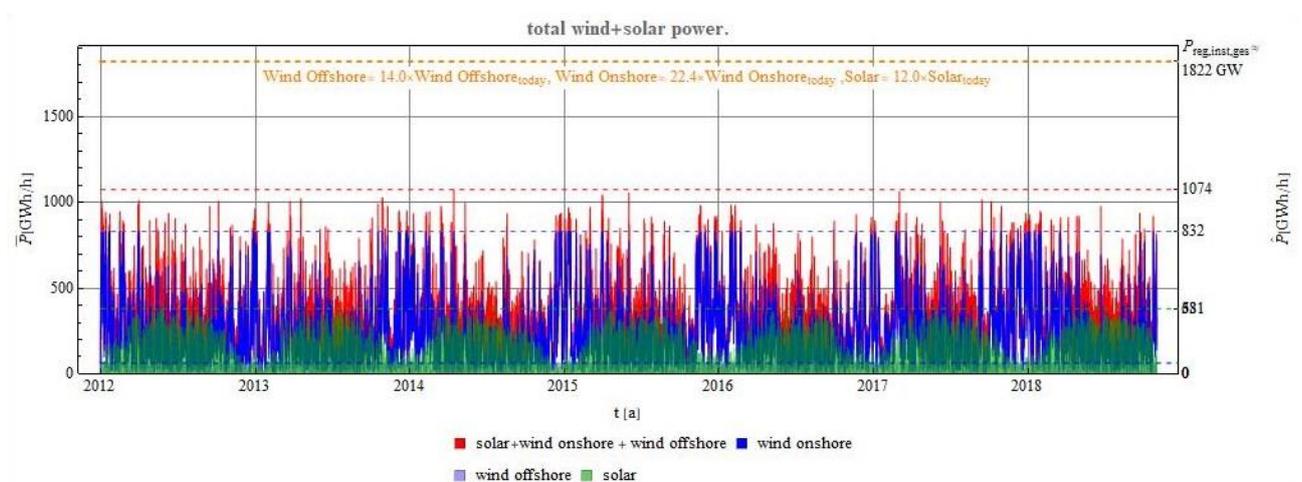


Abbildung 48: Regenerative Erzeuger Berechnungsszenario 1

Die maximale Leistung, welche in Summe maximal ins Netz eingespeist wurde, liegt bei 1074 GW. Weiter ergibt sich durch die Ausbaufaktoren in Höhe von 14 für Wind auf See, 22,4 für Wind an Land und 12 für Solaranlagen eine regenerativ installierte Gesamtleistung von 1822 GW.

Abbildung 49 zeigt die Lastdauerlinie des ersten Berechnungsszenarios, aus welcher sich statistische Informationen zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung ablesen lassen.

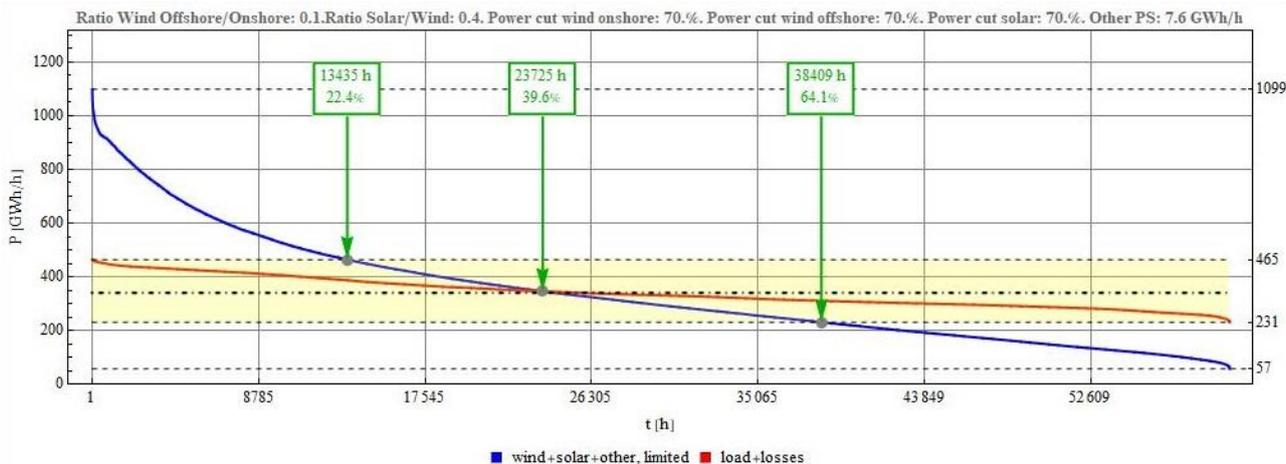


Abbildung 49: Dauerlinie Berechnungsszenario 1

In dieser Dauerlinie wird die Summenleistung der Energieerzeuger und die gesamte Last, inklusive der Verluste, der Größe nach sortiert dargestellt. Der gelb hinterlegte Bereich kennzeichnet den Wertebereich der Last.

Aus der Abbildung geht hervor, dass 22,4 % der gesamten Zeitreihe (13435 Stunden) mehr Leistung erzeugt als maximal verbraucht wird. Weiter ist abzulesen, dass 39,6 % der Zeit (23725 Stunden) mehr Leistung erzeugt, als im Mittel verbraucht und 64,1 % (38409 Stunden) mehr erzeugt, als minimal verbraucht wird.

Abbildung 50 zeigt den Verlauf des Energiegleichgewichts des ersten Berechnungsszenarios.



Abbildung 50: Verlauf des Energiegleichgewichts Berechnungsszenario 1

Würde man davon ausgehen, dass zu jedem Zeitpunkt genauso viel Leistung erzeugt wie inklusive aller Verluste verbraucht wird, so würde der Verlauf des Energiegleichgewichts einer Nulllinie entsprechen. Somit ist aus dieser Grafik allgemein abzulesen, zu welchen Zeitpunkten Deutschland mit seiner benötigten Energieproduktion den Lasten voraus (positiv) bzw. hinterher (negativ) ist.

Durch die Tatsache, dass der Verlauf des Energiegleichgewichts bei null beginnt und auch wieder dort endet, ist abzulesen, dass über den betrachteten Zeitpunkt die gleiche Menge Energie erzeugt wie verbraucht wurde.

Ein essenzielles Problem des ersten Berechnungsszenarios zeigen die Verläufe der Abbildung 51 und Abbildung 52.

Abbildung 51 zeigt den Leistungs- und Energieverlauf der Elektrolyseanlage. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass diese zu großen Teilen durch ihre maximale Leistung begrenzt wird. Ebenfalls zu erkennen ist, dass pro Jahr in etwa 420 TWh Wasserstoff erzeugt werden.

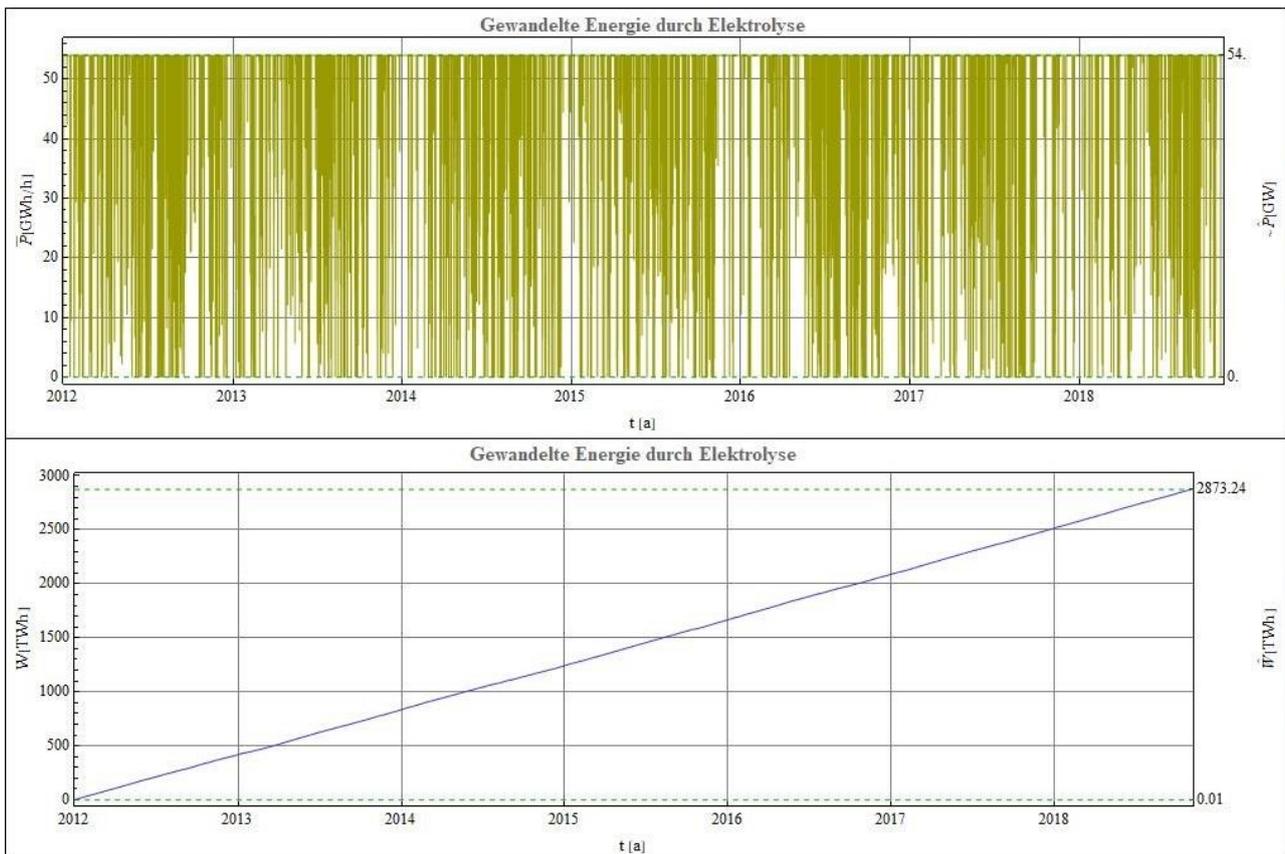


Abbildung 51: Verlauf der Elektrolyse Berechnungsszenario 1

Abbildung 52 zeigt den Verlauf des Wasserstoff-Imports und somit die Konsequenz o.g. Leistungsbegrenzung. Dabei ist abzulesen, dass ca. 1000 TWh Wasserstoff pro Jahr importiert werden, um die Last, welche durch Wasserstoff gedeckt werden soll, zu decken.

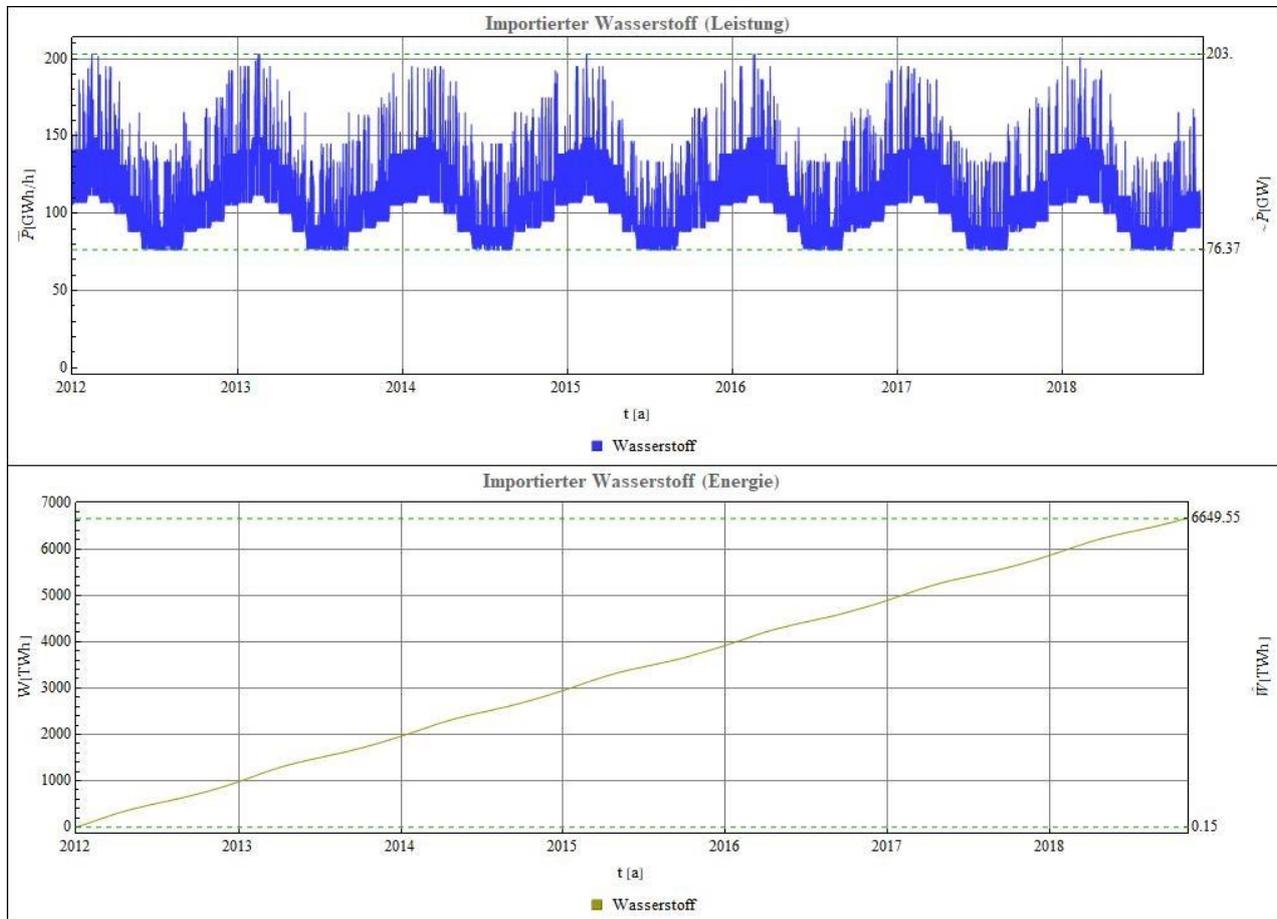


Abbildung 52: Wasserstoff-Import Berechnungsszenario 1

Eine weitere Konsequenz der Unterdimensionierung der Elektrolyse wird durch Abbildung 53 verdeutlicht, welche den Export an elektrischer Leistung zeigt.

Dabei muss zu Spitzenzeiten eine Leistung von rund 850 TW exportiert werden, was zu einem jährlichen Export von ca. 1000 TWh führt. Dies liegt an der mangelnden Möglichkeit diese Leistung in andere Energieformen zu wandeln.

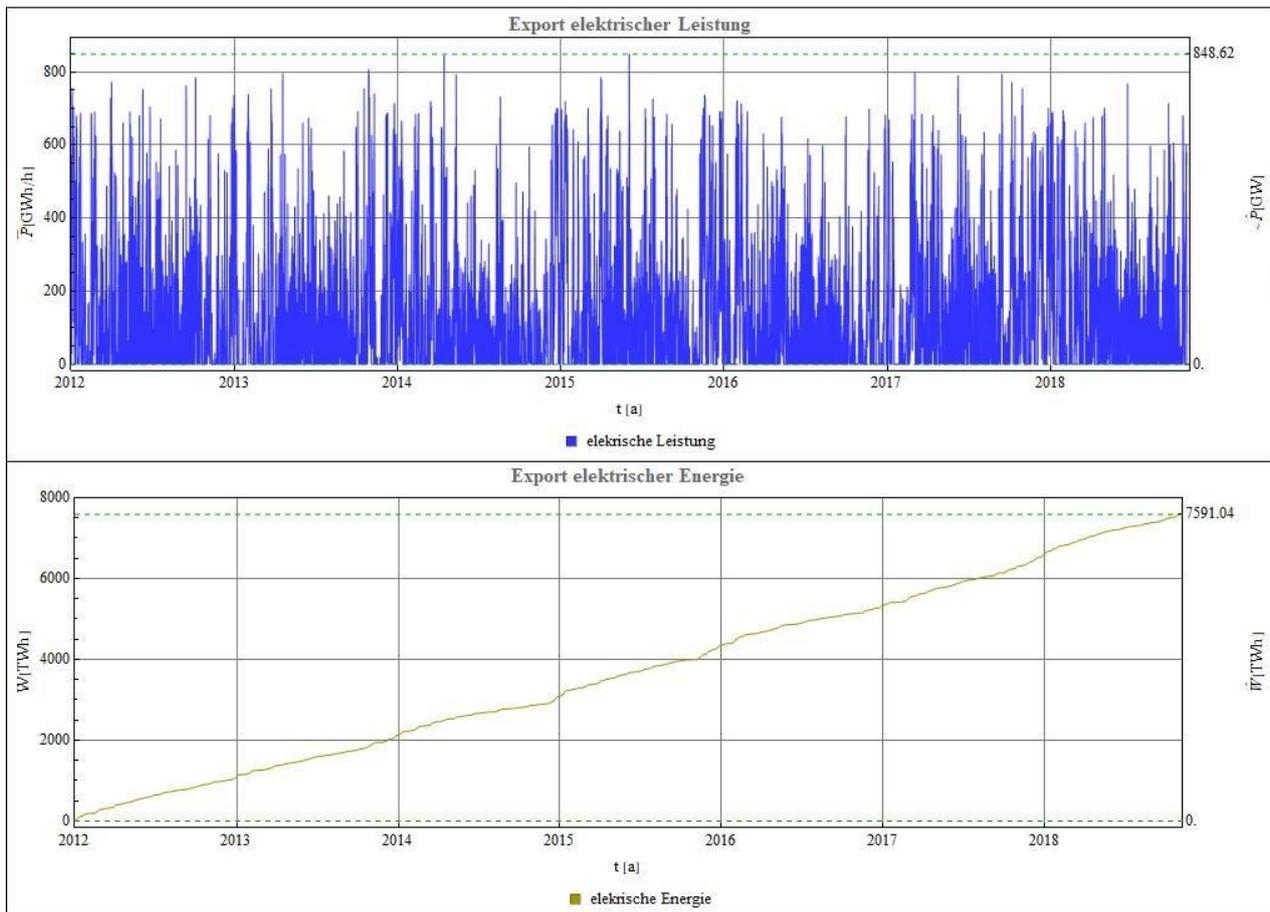


Abbildung 53: Elektrischer Export Berechnungsszenario 1

Deutlich zu erkennen ist dabei, dass die 1000 TWh, welche jährlich in Form elektrischer Energie exportiert werden, im Wasserstoff-Zweig importiert werden müssen.

Somit wird deutlich, dass die Elektrolyse ein Nadelöhr im Energiesystem darstellt. Eine Unterdimensionierung dieser Anlage führt unweigerlich zu massiven Exporten an elektrischer Energie sowie einer äquivalenten Menge an Wasserstoff-Importen.

Weiter werden die kommerziellen Ergebnisse des Berechnungsszenarios betrachtet.

Abbildung 54 zeigt die jährlichen Investitionskosten des ersten Berechnungsszenarios unter der Annahme eines kompletten Neubaus aller Anlagen und Speicher.

	min. inv.	max. inv.	unit
Wind auf See (Initial Intallation)	2.296	4.607	GE/a
Wind auf See (Durch Instandsetzung)	0.344	0.461	GE/a
Wind an Land (Initial Intallation)	30.492	61.182	GE/a
Wind an Land (Durch Instandsetzung)	18.295	24.473	GE/a
Solar (Initial Intallation)	12.702	46.273	GE/a
Solar (Durch Instandsetzung)	7.621	18.509	GE/a
Batterie (power)	0.364	1.015	GE/a
Pumpspeicherkraftwerk (power)	0.049	0.222	GE/a
Methanspeicher (power)	2.593	5.186	GE/a
Wasserstoffspeicher (power)	5.126	8.202	GE/a
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (power)	0.175	0.52	GE/a
Hochtemperatur Tagesspeicher (power)	0.081	0.241	GE/a
Fernwärmespeicher (power)	0.684	1.139	GE/a
Batterie (Capacity)	2.	8.933	GE/a
Pumpspeicherkraftwerk (Capacity)	0.05	0.55	GE/a
Methanspeicher (Capacity)	0.	0.	GE/a
Wasserstoffspeicher (Capacity)	0.	0.	GE/a
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.03	0.201	GE/a
Hochtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.015	0.097	GE/a
Fernwärmespeicher (Capacity)	0.014	0.018	GE/a
Gaskraftwerk (power)	0.341	1.564	GE/a
Elektrolyse (power)	1.091	4.091	GE/a
Methanisierung (power)	1.556	2.593	GE/a
Wasserstoff-Kraftwerk (power)	0.	0.	GE/a
Brennstoffzelle (power)	0.	0.	GE/a
Methan-Kraftwerk (power)	0.	0.	GE/a
Niedrigtemperatur Methan-to-Heat (power)	0.477	1.458	GE/a
Niedrigtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	0.597	2.734	GE/a
Hochtemperatur Methan-to-Heat (power)	0.164	0.5	GE/a
Hochtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	0.327	1.499	GE/a
Infrarotheizung (power)	0.003	0.008	GE/a
Wärmepumpe (power)	0.347	2.257	GE/a
Niedrigtemperatur-Direktwärme (power)	0.255	2.486	GE/a
Hochtemperatur-Direktwärme (power)	0.184	1.794	GE/a
Total	87.8	201.26	GE/a

Abbildung 54: Jährliche Investitionskosten Berechnungsszenario 1

Markante Größen dieser Auflistung sind die Investitionskosten der regenerativen Anlagen. Neben den Kosten, welche durch den Bau der Anlagen entstehen, fallen ebenfalls nicht zu vernachlässigende Kosten durch Instandhaltungen an.

Bei der Berechnung wird angenommen, dass die installierte Leistung der beiden Windanlagentypen durch Verschleiß jährlich um 2 % und die Solaranlagen um 0,5 % sinken. Da die Berechnung auf konstanten installierten Leistungen beruht, muss dieser Verschleiß durch Neubauten kompensiert werden.

Analog zu den jährlichen Investitionskosten bilden die regenerativen Anlagen die markanten Größen des Flächenbedarfs, welcher in Abbildung 55 dargestellt ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass der kapazitätsbedingte Flächenbedarf der beiden Gasspeicher entfallen, da sich diese unterirdisch befinden. Der leistungsbedingte Flächenbedarf dieser Speicher entspricht dabei der Fläche, welche durch die Anlagen zum Ein- bzw. Ausspeichern des Gases belegt wird.

Type	Area (min) km <sup>2</sup>	Area (max) km <sup>2</sup>	%DE (min) %	%DE (max) %	%NRW (min) %	%NRW (max) %
Wind auf See	4472.47	17889.9	1.251	5.003	13.112	52.448
Wind an Land	59400.	237600.	16.612	66.446	174.142	696.57
Solar	3266.3	4355.06	0.913	1.218	9.576	12.768
Batterie (power)	0.9	9.	0.	0.003	0.003	0.026
Pumpspeicherkraftwerk (power)	0.005	0.005	0.	0.	0.	0.
Methanspeicher (power)	0.234	0.325	0.	0.	0.001	0.001
Wasserstoffspeicher (power)	0.925	1.286	0.	0.	0.003	0.004
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (power)	8.929	17.857	0.002	0.005	0.026	0.052
Hochtemperatur Tagesspeicher (power)	4.14	8.28	0.001	0.002	0.012	0.024
Fernwärmespeicher (power)	0.1	0.1	0.	0.	0.	0.
Batterie (Capacity)	3.76	3.76	0.001	0.001	0.011	0.011
Pumpspeicherkraftwerk (Capacity)	5.5	5.5	0.002	0.002	0.016	0.016
Methanspeicher (Capacity)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Wasserstoffspeicher (Capacity)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.06	0.08	0.	0.	0.	0.
Hochtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.029	0.039	0.	0.	0.	0.
Fernwärmespeicher (Capacity)	0.133	0.133	0.	0.	0.	0.
Gaskraftwerk (power)	1.28	2.844	0.	0.001	0.004	0.008
Elektrolyse (power)	3.436	10.396	0.001	0.003	0.01	0.03
Methanisierung (power)	3.267	9.884	0.001	0.003	0.01	0.029
Wasserstoff-Kraftwerk (power)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Brennstoffzelle (power)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Methan-Kraftwerk (power)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Niedrigtemperatur Methan-to-Heat (power)	2.506	7.556	0.001	0.002	0.007	0.022
Niedrigtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	3.132	9.445	0.001	0.003	0.009	0.028
Hochtemperatur Methan-to-Heat (power)	0.859	2.589	0.	0.001	0.003	0.008
Hochtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	1.717	5.179	0.	0.001	0.005	0.015
Infrarotheizung (power)	0.316	1.263	0.	0.	0.001	0.004
Wärmepumpe (power)	0.694	3.472	0.	0.001	0.002	0.01
Niedrigtemperatur-Direktwärme (power)	0.765	3.825	0.	0.001	0.002	0.011
Hochtemperatur-Direktwärme (power)	0.552	2.76	0.	0.001	0.002	0.008
Total	67180.9	259947.	18.79	72.7	196.95	762.08

Abbildung 55: Benötigte Flächen Berechnungsszenario 1

Um die benötigten Flächen zu veranschaulichen, werden die minimal und maximal benötigten Flächen mit den Flächen der Bundesrepublik Deutschland und der Fläche des Bundeslandes NRW in Relation gesetzt.

Daraus geht hervor, dass in diesem Szenario wenigstens 18,79 % der Fläche Deutschlands bzw. 196,95 % des Bundeslandes NRW für den Bau der Anlagen und Speicher benötigt werden.

Die finale Übersicht des Berechnungsszenarios bildet die in Abbildung 56 dargestellte energetische Übersichtstabelle.

Energetische Übersichtstabelle										
Lasten										
Typ	Last [TWh/a]	Benötigte Energie [TWh/a]	Verluste [TWh/a]	Jahresmittelwert [TWh]						
				2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Bruttostromverbrauch	484	484	0	468	463	506	478	479	493	509
<b>Mobilitäts-Last</b>										
Elektro-Mobilität	195	195	0	195	195	195	195	195	195	195
Wasserstoff-Mobilität	562	675	113	674	674	672	676	675	676	677
Methan-Mobilität	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Wärme-Last (Niedrigtemperatur)</b>										
elektrisch	454	479	25	482	482	482	482	482	482	482
Wasserstoff	206	257	51	258	258	257	259	258	259	259
Methan	165	220	55	222	222	222	222	222	222	222
<b>Wärme-Last (Hochtemperatur)</b>										
elektrisch	218	220	2	220	220	220	220	220	220	220
Wasserstoff	218	290	72	290	290	289	290	290	291	291
Methan	109	155	46	155	155	155	155	155	155	155
<b>Verluste durch Speicherung und Wandlung</b>										
Speichern (elektrisch)	/	5	5	5	5	6	5	5	5	4
Speichern (Wasserstoff)	/	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Speichern (Methan)	/	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rückverstromung (Wasserstoff)	/	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rückverstromung (Methan)	/	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	2610	2980	369	2968	2962	3001	2980	2981	2996	3013
Checksumme der Verluste	/	369	369	369	368	365	372	370	372	373
<b>Erzeuger [TWh/a]</b>										
<b>Parametrierte Erzeuger</b>										
Solar		500		520	467	485	495	474	476	518
Wind an Land		1963		1921	1849	1801	2154	1842	2159	2190
Wind auf See		302		285	320	311	285	320	311	302
regenerative Grundleistung		67		67	67	67	67	67	67	67
konventionelle Kraftwerke		5		6	6	6	5	5	4	3
<b>energetische (Rück-) Gewinnung</b>										
genutzte Abwärme		29		30	30	30	30	29	29	28
thermische Energie (Wärmepumpe)		114		114	114	114	114	114	114	114
Σ		2980		2943	2852	2814	3151	2852	3160	3221
<b>Import / Export [TWh/a]</b>										
Wasserstoff (Import)		972		977	979	987	970	974	968	966
Methan (Import)		0		0	0	0	0	0	0	0
elektrische Energie (Import)		138		144	162	156	124	141	124	114
elektrische Energie (Export)		1110		1096	1031	956	1265	986	1256	1289
<b>Durchschnittliche im System gespeicherte Energie [TWh/a]</b>										
Speicher		0		0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 56: Gesamtübersicht der Energien Berechnungsszenario 1

Den oberen Teil der Tabelle bilden die zu deckenden Lasten des Szenarios. Dabei werden die mittleren jährlichen Lasten, die dabei benötigte Primärenergie sowie die dabei entstandenen Verluste angegeben.

Weiter werden die in Summe entstandenen Verluste aufgeführt. Wichtig dabei ist, dass die Checksumme der Verluste der Summe der einzelnen, durch die Lastdeckung entstandenen, Verluste entsprechen.

Anschließend folgen die durchschnittlichen Jahresenergien der Erzeuger. An dieser Stelle ist erkennbar, dass diese im Mittel die mittlere Jahresenergie der Lasten inklusive deren Verluste erzeugen.

Daran anschließend folgen die Importe bzw. Exporte und zuletzt die durchschnittliche, im System gespeicherte, Energie. Dabei ist zu beachten, dass sich entweder die Importe und Exporte gegenseitig aufheben oder die Differenz dieser beiden der im System verbliebenen Energie entspricht.

Sämtliche Angaben werden dabei durch ihre tatsächlichen Jahresenergien ergänzt.

---

### 4.10.3 Berechnungsszenario 2

Wie einleitend in Sektion 0 erwähnt, repräsentiert das in diesem Abschnitt beschriebene Szenario das Energiesystem des Jahres 2050, welches die gemäß [9] prognostizierten Lasten des Jahres 2050 decken soll. Die Lasten teilen sich dabei in die Last durch Mobilität, Wärmelasten und die Last des Bruttostromverbrauchs auf. Diese Verbrauchstypen werden folgend separat betrachtet.

#### 4.10.3.1 Last durch Mobilität

Der Endenergieverbrauch im Verkehr beträgt 369 TWh/a [9].

Um dieses Ziel qualitativ nachzubilden, wird folgende Parametrierung des Mobilitätssektors gewählt:

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>PKW:</u></b>	<b><u>LKW:</u></b>
Anzahl zugelassener Teilnehmer	22.9 Mio.	1.5 Mio.
Anteil elektrisch	50 %	50 %
Anteil Wasserstoff	50 %	50 %
Anteil Methan	0 %	0 %

Tabelle 46: Parametrierung der Last durch Mobilität (Berechnungsszenario 2)

Um die geforderte Endenergie von 369 TWh/a zu erreichen, wird in diesem Szenario angenommen, dass sich die Anzahl der zugelassenen PKW & LKW halbiert. Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, die Fahrleistung oder die Effizienz der Fahrzeuge zu variieren.

Die Aufteilung der Mobilität nach Energieträger entspricht dabei der Annahme des in Unterabschnitt 4.10.2.1 beschriebenen Berechnungsszenarios.

#### 4.10.3.2 Wärmelasten

Der Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte beträgt 306 TWh/a [9].

Um dieses Ziel qualitativ nachzubilden, wurde folgende Parametrierung der Wärmelasten gewählt:

<b><u>Parameter:</u></b>	<b><u>Wert:</u></b>
Energiebedarf (Niedrigtemperatur)	306 TWh/a
Energiebedarf (Hochtemperatur)	0 TWh/a
Deckung durch G2H (Methan)	20 %
Deckung durch G2H (Wasserstoff)	25 %
Deckung durch Wärmepumpen	17.5 %
Deckung durch Infrarotheizung	17.5 %
Deckung durch Fernwärme	20 %

Tabelle 47: Parametrierung der Niedrigtemperatur-Last (Berechnungsszenario 2)

Die Aufteilung der Wärmelast entspricht einem elektrischen Anteil von bis zu 55% sowie einem Gasanteil von 45 %.

Die Aufteilung der Energieträger entspricht dabei der Annahme des in Unterabschnitt 4.10.2.2 beschriebenen Berechnungsszenarios.

#### 4.10.3.3 Bruttostromverbrauch

Der Bruttostromverbrauch beträgt 412 TWh/a [9].

Dieser geforderte Wert lässt sich direkt als Parameter eintragen und bedarf keiner qualitativen Nachbildung.

#### 4.10.3.4 Ergebnis

Folgend werden die Ergebnisse des zweiten Berechnungsszenarios erläutert.

Abbildung 57 zeigt hierzu die Grafik „Allgemeine Informationen zur Berechnung“.

<b><u>Basic Calculation-Results Energiewendeplaner 2.0</u></b>
Calculation Time: 2. min. 30. sec. (Ø 30.0536 sec.)
<b><u>Smart-Grid Progress:</u></b>
NO Smart Grid
Maximal zu installierende Leistung war ausreichend
<b><u>Installed Power:</u></b>
Solar: 258. GW (Factor: 5.7)
Wind Onshore: 355.7 GW (Factor: 6.7)
Wind Offshore: 85. GW (Factor: 13.3)
<b><u>Delta between Iterations:</u></b>
ΔLosses: 0.0047 %
ΔConvGenPower: 0.017 %
ΔWasteHeat: 0.0016 %
Iteration Steps: 5

Abbildung 57: Allgemeine Informationen Berechnungsszenario 2

Aus dieser geht hervor, dass in diesem Fall die maximal zu installierenden Leistungen ausreichend waren. Ebenfalls sind die Ausbaufaktoren der Windanlagen an Land, sowie der Solaranlagen, deutlich kleiner als im ersten Szenario. Lediglich die zu installierende Leistung der Windanlagen auf See wird nicht maßgeblich reduziert. Während der Ausbaufaktor in ersten Szenario bei 14 liegt, wird er im zweiten lediglich auf 13,3 reduziert. Dies ist auf den Leistungsverlauf der Windanlagen auf See zurückzuführen. Aufgrund dessen geringer Fluktuation wird der Leistungsverlauf durch den Algorithmus als zuverlässigere Energiequelle erkannt und präferiert.

Abbildung 58 zeigt die Leistungsverläufe der drei regenerativen Anlagentypen.

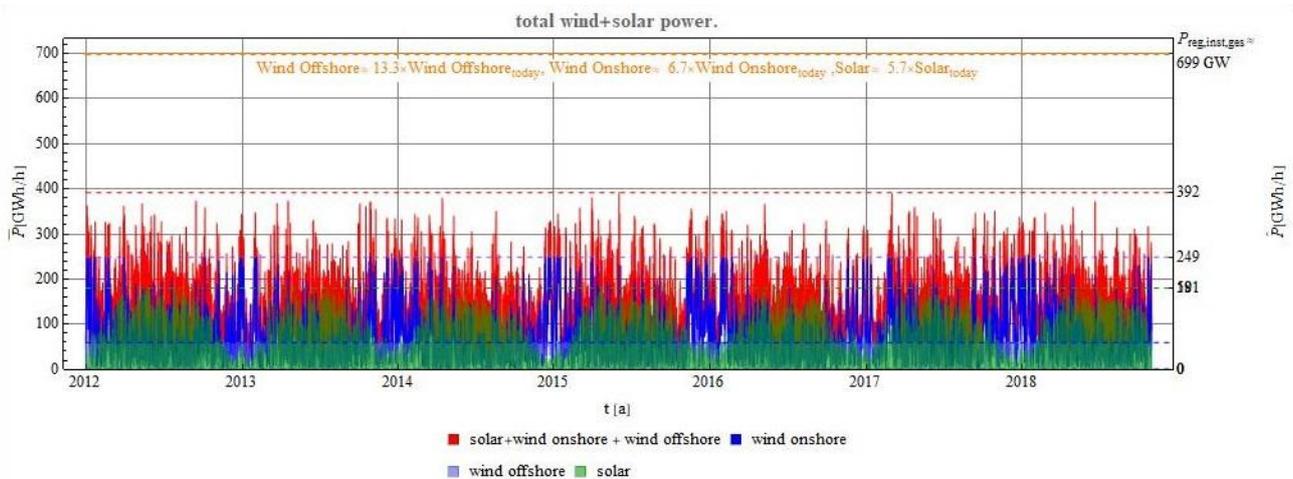


Abbildung 58: Regenerative Erzeuger Berechnungsszenario 2

Daraus geht hervor, dass sowohl die Summe der installierten Leistungen als auch die maximal ins Netz eingespeiste Leistung im Vergleich zum ersten Szenario um 60 % reduziert wird.

Abbildung 59 zeigt die Lastdauerlinie des zweiten Berechnungsszenarios.

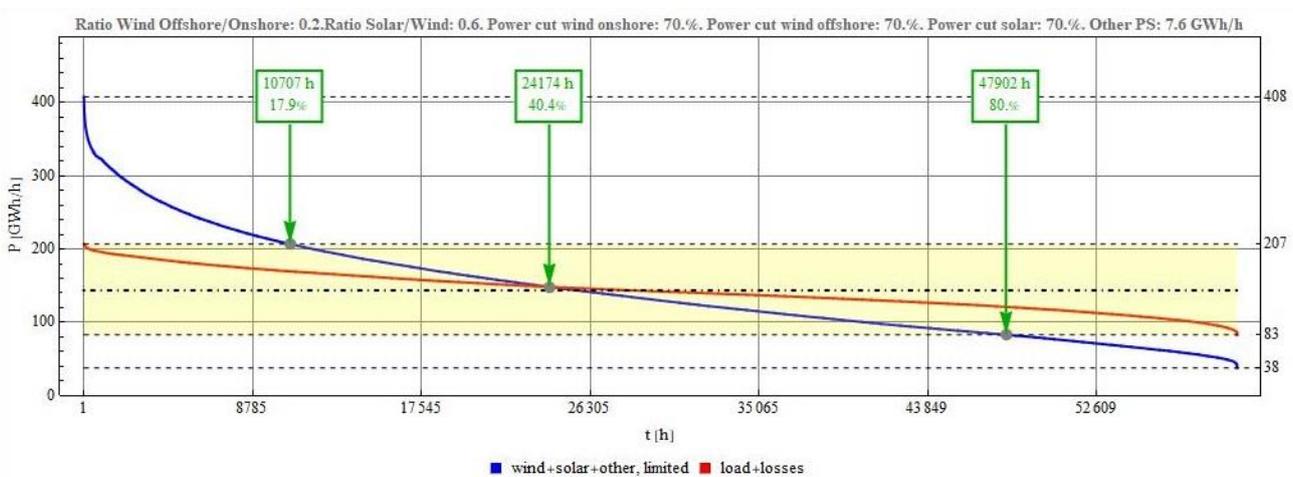


Abbildung 59: Dauerlinie Berechnungsszenario 2

Dabei ist abzulesen, dass die mittlere Last im Vergleich zum ersten Szenario um ca. 60 % reduziert ist. Dies deckt sich mit der 60 prozentigen Reduktion der installierten und im Mittel eingespeisten Leistung.

Ebenfalls wird im Vergleich zum ersten Szenario deutlich, dass die Zeit in der mehr Leistung erzeugt als maximal verbraucht wird um 4,5 % reduziert und die Zeit in der mehr erzeugt als minimal verbraucht wird um 15,9 % verlängert ist.

Dies entspricht einer statistischen Reduktion der aus- bzw. einzuspeichernden Energie.

Abbildung 60 zeigt den Verlauf des Energiegleichgewichts des zweiten Szenarios.

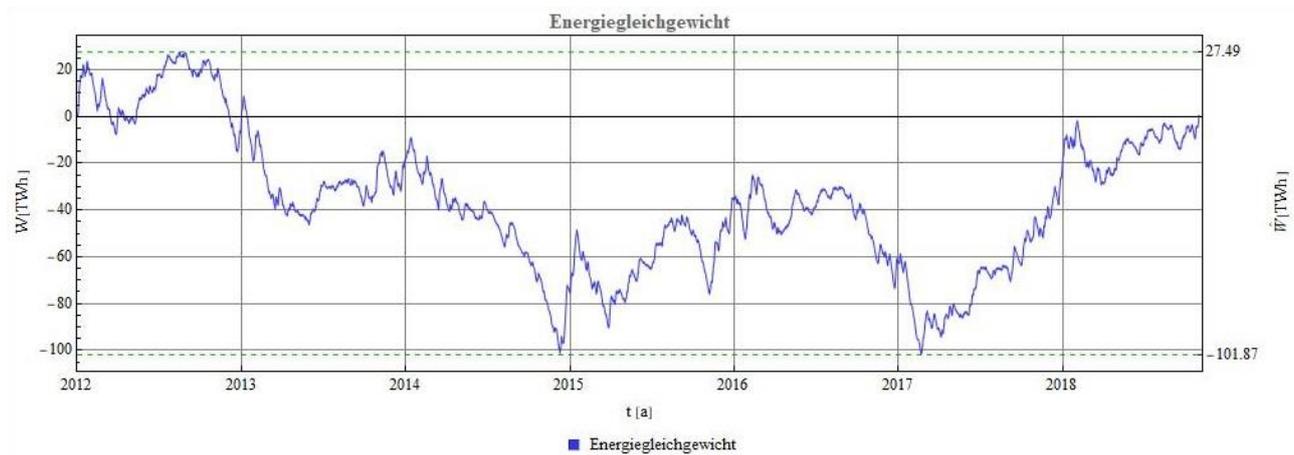


Abbildung 60: Verlauf des Energiegleichgewichts Berechnungsszenario 2

Analog zum ersten Szenario ist daraus abzulesen, dass die regenerative Versorgung Deutschlands über die betrachtete Zeitperiode eingehalten wird. Durch den Vergleich der beiden Verläufe geht hervor, dass die maximale Überproduktion um 69 TWh und die maximale Unterproduktion um 319 TWh reduziert sind.

Abbildung 61 zeigt den Leistungs- und Energieverlauf der Elektrolyseanlage im zweiten Berechnungsszenario.

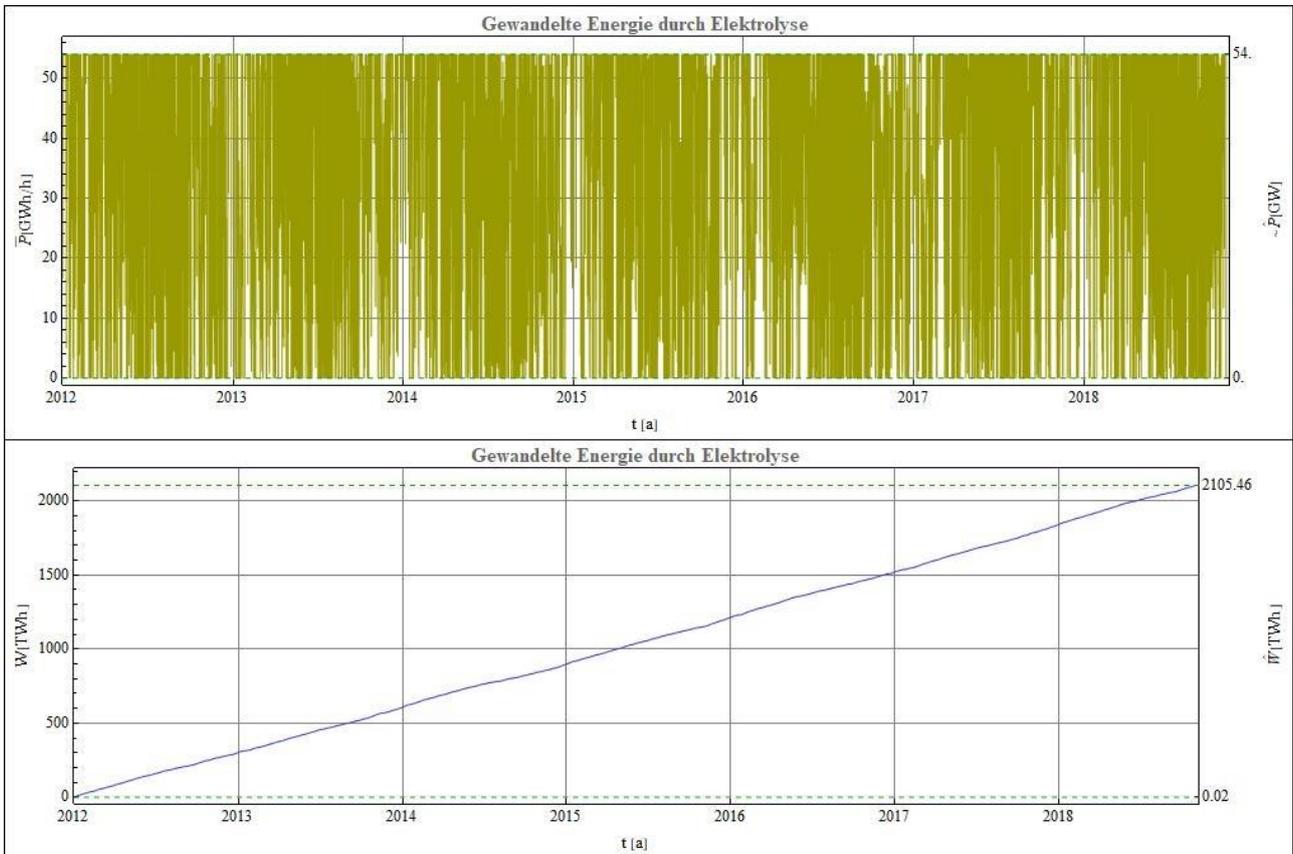


Abbildung 61: Verlauf der Elektrolyse Berechnungsszenario 2

Wie bereits im ersten Szenario ist zu erkennen, dass die gewandelte Leistung dieser Anlage überwiegend durch die maximal installierte Leistung begrenzt wird.

Weiter ist zu erkennen, dass pro Jahr im Schnitt 100 TWh weniger Wasserstoff erzeugt werden. Dies erklärt sich durch die reduzierte Wärme- und Mobilitätslast.

Abbildung 62 zeigt den Verlauf der Wasserstoff-Importe des zweiten Berechnungsszenarios.

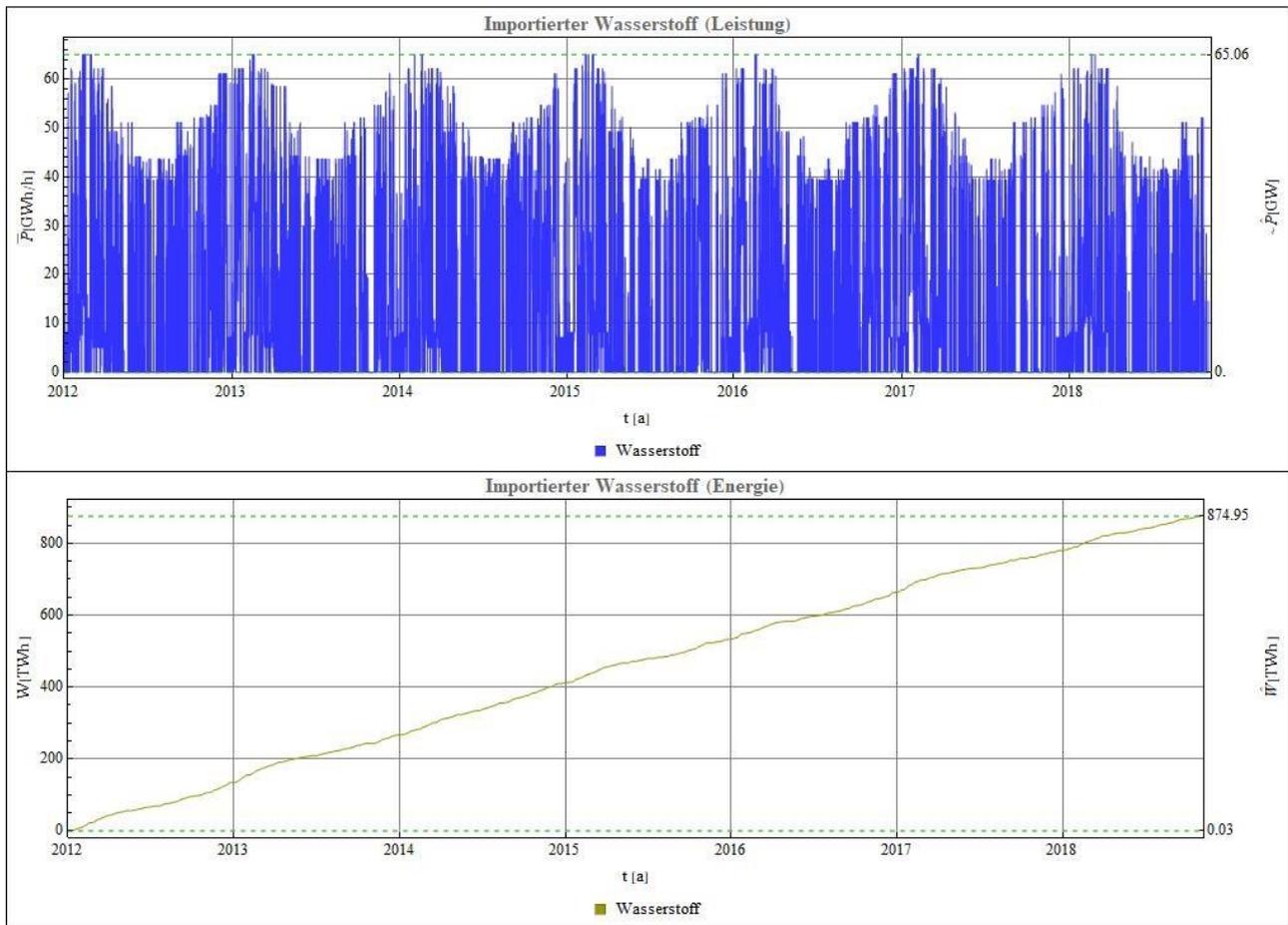


Abbildung 62: Wasserstoff-Importe Berechnungsszenario 2

Im Vergleich zum ersten Szenarios wird dabei die Reduktion der jährlichen Importe deutlich. Diese konnten um 85 % gesenkt werden. Ebenfalls bedarf es keiner konstanten Leistungsimporte mehr.

Somit ist das Energiesystem des zweiten Szenarios teilweise in der Lage seine Gaslasten ohne Importe zu decken.

Weiter ist durch Abbildung 63, welche den Energie- und Leistungsverlauf des Wasserstoffspeichers darstellt, ersichtlich, dass dieser in den Sommermonaten geladen wird.

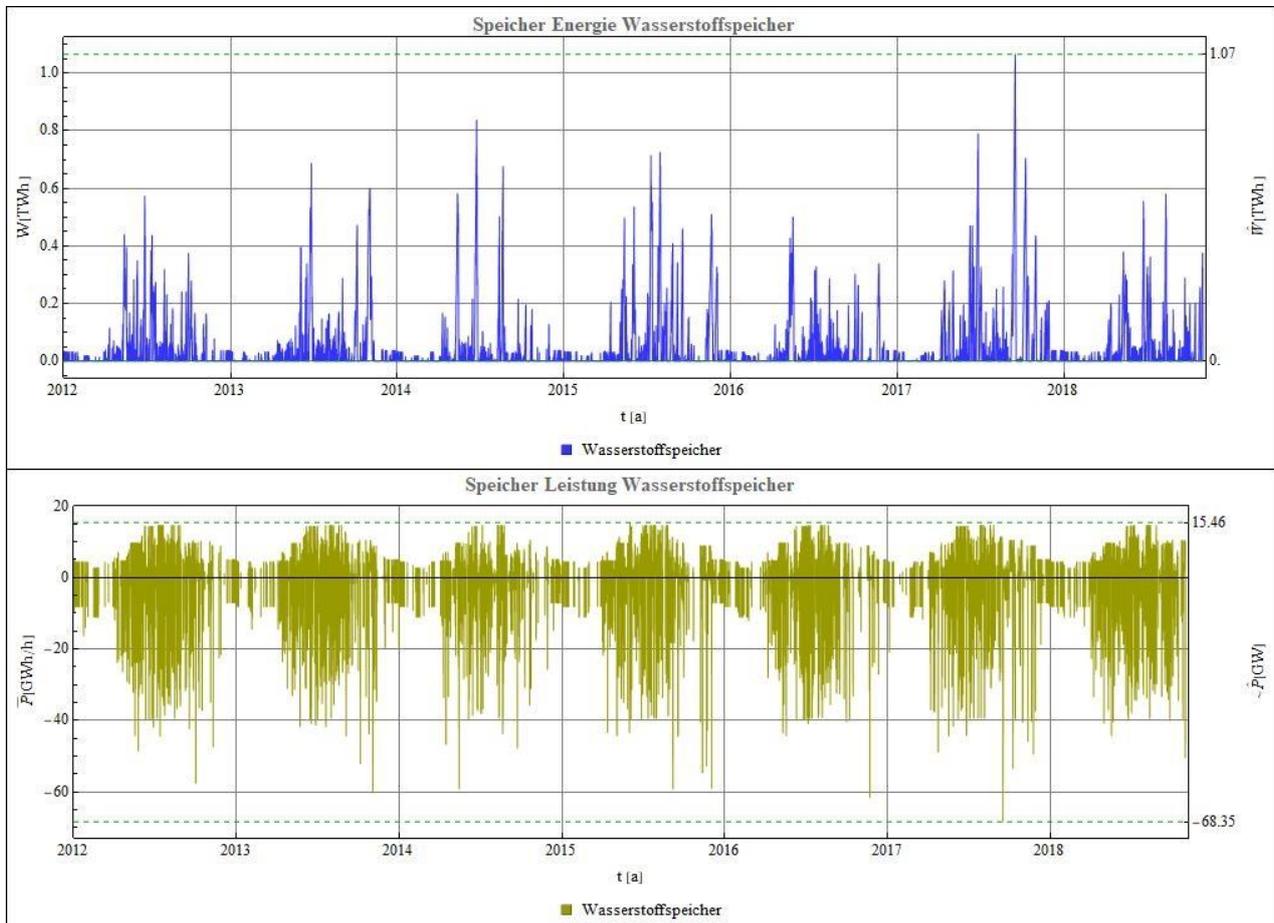


Abbildung 63: Wasserstoff-Speicherverlauf Berechnungsszenario 2

Dabei fungiert der Wasserstoffspeicher jedoch lediglich als Puffer und nicht als Langzeitspeicher.

Weiter geht aus Abbildung 64, welche den Export der elektrischen Leistung darstellt, hervor, dass der Wasserstoffspeicher bei einer größeren Dimensionierung der Elektrolyseanlage weiter und vor allem langfristiger geladen wird.

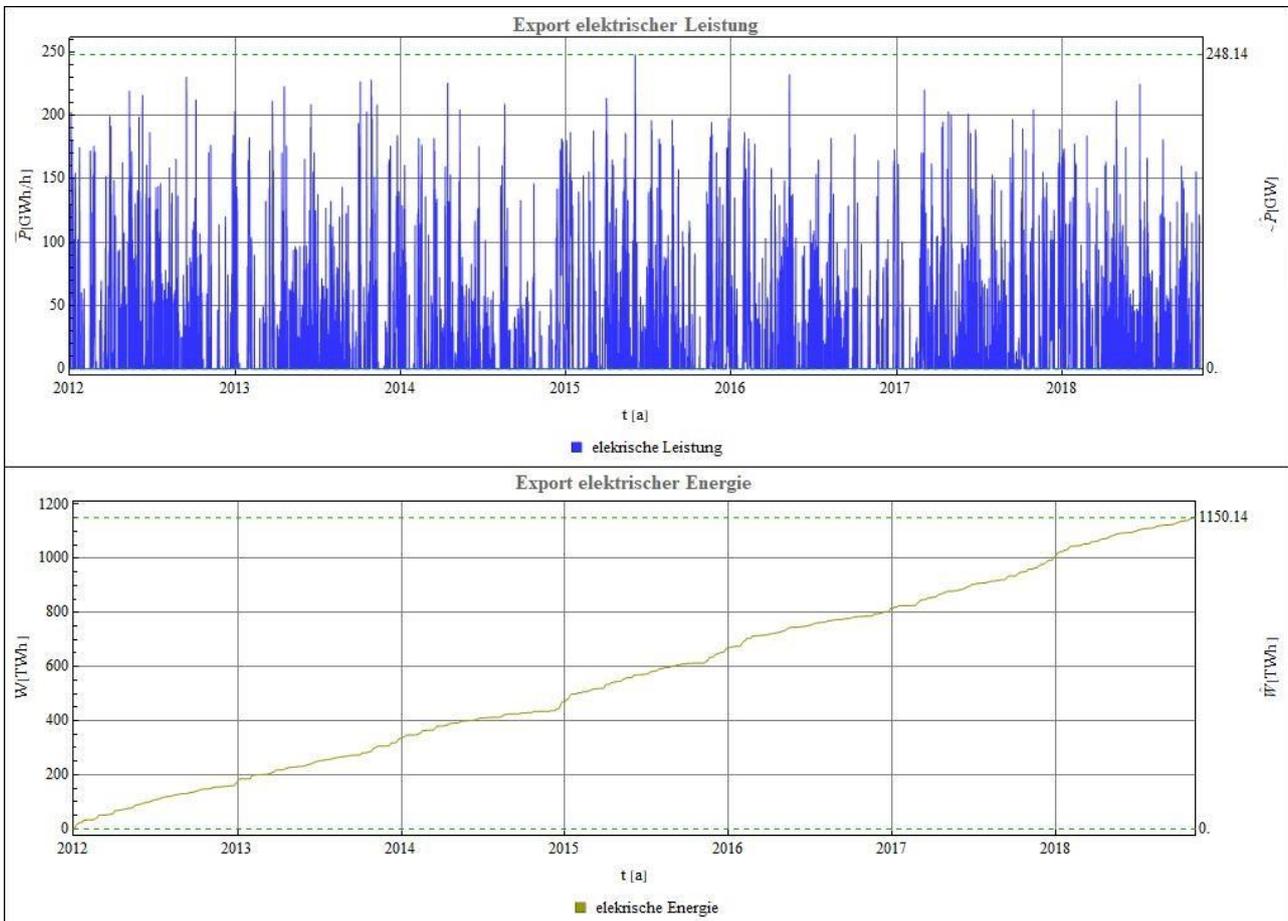


Abbildung 64: Elektrischer Export Berechnungsszenario 2

Die 60 prozentige Reduktion der installierten Leistung von Solaranlagen und Windanlagen an Land spiegelt sich ebenfalls in den jährlichen Investitionskosten des zweiten Szenarios, welche in Abbildung 65 aufgeführt sind, wider.

	min. inv.	max. inv.	unit
Wind auf See (Initial Intallation)	2.182	4.377	GE/a
Wind auf See (Durch Instandsetzung)	0.327	0.438	GE/a
Wind an Land (Initial Intallation)	9.129	18.317	GE/a
Wind an Land (Durch Instandsetzung)	5.477	7.327	GE/a
Solar (Initial Intallation)	6.02	21.931	GE/a
Solar (Durch Instandsetzung)	3.612	8.772	GE/a
Batterie (power)	0.364	1.015	GE/a
Pumpspeicherkraftwerk (power)	0.049	0.222	GE/a
Methanspeicher (power)	2.728	5.455	GE/a
Wasserstoffspeicher (power)	1.726	2.761	GE/a
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (power)	0.065	0.192	GE/a
Hochtemperatur Tagesspeicher (power)	0.	0.	GE/a
Fernwärmespeicher (power)	1.158	1.93	GE/a
Batterie (Capacity)	2.	8.933	GE/a
Pumpspeicherkraftwerk (Capacity)	0.05	0.55	GE/a
Methanspeicher (Capacity)	0.051	0.102	GE/a
Wasserstoffspeicher (Capacity)	0.016	0.032	GE/a
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.011	0.074	GE/a
Hochtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.	0.	GE/a
Fernwärmespeicher (Capacity)	0.13	0.162	GE/a
Gaskraftwerk (power)	0.341	1.564	GE/a
Elektrolyse (power)	1.091	4.091	GE/a
Methanisierung (power)	0.417	0.694	GE/a
Wasserstoff-Kraftwerk (power)	11.401	74.625	GE/a
Brennstoffzelle (power)	7.256	18.14	GE/a
Methan-Kraftwerk (power)	0.288	0.88	GE/a
Niedrigtemperatur Methan-to-Heat (power)	0.176	0.538	GE/a
Niedrigtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	0.22	1.008	GE/a
Hochtemperatur Methan-to-Heat (power)	0.	0.	GE/a
Hochtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	0.	0.	GE/a
Infrarotheizung (power)	0.001	0.003	GE/a
Wärmepumpe (power)	0.128	0.832	GE/a
Niedrigtemperatur-Direktwärme (power)	0.095	0.925	GE/a
Hochtemperatur-Direktwärme (power)	0.	0.	GE/a
Total	55.89	184.28	GE/a

Abbildung 65: Jährliche Investitionskosten Berechnungsszenario 2

Die gesamten jährlichen Investitionskosten werden dabei um 38 % reduziert. Dies liegt daran, dass zwar die Kosten durch Wartung und Installation der regenerativen Anlagen reduziert werden, jedoch die restlichen Kosten konstant blieben.

Weiter geht aus Abbildung 66 hervor, dass gerade durch die Reduktion der installierten Solarleistung der Flächenbedarf im Vergleich zum ersten Szenario um 64 % reduziert ist.

Type	Area (min) km <sup>2</sup>	Area (max) km <sup>2</sup>	%DE (min) %	%DE (max) %	%NRW (min) %	%NRW (max) %
Wind auf See	4250.	17000.	1.189	4.754	12.46	49.839
Wind an Land	17783.7	71134.7	4.973	19.893	52.136	208.545
Solar	1548.05	2064.07	0.433	0.577	4.538	6.051
Batterie (power)	0.9	9.	0.	0.003	0.003	0.026
Pumpspeicherkraftwerk (power)	0.005	0.005	0.	0.	0.	0.
Methanspeicher (power)	0.246	0.342	0.	0.	0.001	0.001
Wasserstoffspeicher (power)	0.311	0.433	0.	0.	0.001	0.001
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (power)	3.292	6.584	0.001	0.002	0.01	0.019
Hochtemperatur Tagesspeicher (power)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Fernwärmespeicher (power)	0.169	0.169	0.	0.	0.	0.
Batterie (Capacity)	3.76	3.76	0.001	0.001	0.011	0.011
Pumpspeicherkraftwerk (Capacity)	5.5	5.5	0.002	0.002	0.016	0.016
Methanspeicher (Capacity)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Wasserstoffspeicher (Capacity)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Niedrigtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.022	0.03	0.	0.	0.	0.
Hochtemperatur Tagesspeicher (Capacity)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Fernwärmespeicher (Capacity)	1.231	1.231	0.	0.	0.004	0.004
Gaskraftwerk (power)	1.28	2.844	0.	0.001	0.004	0.008
Elektrolyse (power)	3.436	10.396	0.001	0.003	0.01	0.03
Methanisierung (power)	0.875	2.646	0.	0.001	0.003	0.008
Wasserstoff-Kraftwerk (power)	20.729	93.282	0.006	0.026	0.061	0.273
Brennstoffzelle (power)	2.424	14.512	0.001	0.004	0.007	0.043
Methan-Kraftwerk (power)	1.08	2.4	0.	0.001	0.003	0.007
Niedrigtemperatur Methan-to-Heat (power)	0.924	2.786	0.	0.001	0.003	0.008
Niedrigtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	1.155	3.482	0.	0.001	0.003	0.01
Hochtemperatur Methan-to-Heat (power)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Hochtemperatur Wasserstoff-to-Heat (power)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Infrarotheizung (power)	0.116	0.466	0.	0.	0.	0.001
Wärmepumpe (power)	0.256	1.28	0.	0.	0.001	0.004
Niedrigtemperatur-Direktwärme (power)	0.285	1.423	0.	0.	0.001	0.004
Hochtemperatur-Direktwärme (power)	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Total	23628.6	90357.4	6.61	25.27	69.27	264.9

Abbildung 66: Benötigte Fläche Berechnungsszenario 2

In Summe ergibt sich somit ein Flächenbedarf, der wenigstens 6,61 % der Fläche Deutschlands, bzw. 69,27 % der Fläche des Bundeslandes NRW entspricht. Dies entspricht einer Reduktion von 64 %.

Abbildung 67 zeigt die Gesamtübersicht der Energien für das zweite Berechnungsszenario.

Energetische Übersichtstabelle										
Lasten										
Typ	Last [TWh/a]	Benötigte Energie [TWh/a]	Verluste [TWh/a]	Jahresmittelwert [TWh]						
				2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Bruttostromverbrauch	411	411	0	398	393	430	406	407	419	432
<b>Mobilitäts-Last</b>										
Elektro-Mobilität	94	94	0	94	94	94	94	94	94	94
Wasserstoff-Mobilität	269	371	102	369	370	366	373	371	375	376
Methan-Mobilität	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Wärme-Last (Niedrigtemperatur)</b>										
elektrisch	167	176	9	177	177	177	177	177	177	177
Wasserstoff	76	108	32	108	108	107	109	109	110	110
Methan	61	81	20	81	81	81	81	81	81	81
<b>Wärme-Last (Hochtemperatur)</b>										
elektrisch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wasserstoff	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Methan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Verluste durch Speicherung und Wandlung</b>										
Speichern (elektrisch)	/	4	4	5	4	4	4	4	4	5
Speichern (Wasserstoff)	/	9	9	9	9	7	9	8	9	9
Speichern (Methan)	/	2	2	2	2	1	2	2	2	2
Rückverstromung (Wasserstoff)	/	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rückverstromung (Methan)	/	4	4	3	4	3	4	3	4	4
Σ	1078	1260	182	1245	1243	1271	1259	1256	1274	1290
Checksumme der Verluste	/	182	182	179	181	173	185	180	187	189
<b>Erzeuger [TWh/a]</b>										
<b>Parametrierte Erzeuger</b>										
Solar		237		246	221	230	234	225	226	245
Wind an Land		588		575	553	539	645	552	646	656
Wind auf See		287		271	304	296	271	304	296	287
regenerative Grundleistung		67		67	67	67	67	67	67	67
konventionelle Kraftwerke		12		13	12	14	12	13	10	10
<b>energetische (Rück-) Gewinnung</b>										
genutzte Abwärme		27		28	27	27	27	27	26	26
thermische Energie (Wärmepumpe)		42		42	42	42	42	42	42	42
Σ		1260		1243	1227	1215	1299	1229	1312	1333
<b>Import / Export [TWh/a]</b>										
Wasserstoff (Import)		128		135	132	145	121	131	116	113
Methan (Import)		0		0	0	0	0	0	0	0
elektrische Energie (Import)		40		41	45	47	38	43	38	33
elektrische Energie (Export)		168		174	161	135	199	147	192	190
<b>Durchschnittliche im System gespeicherte Energie [TWh/a]</b>										
Speicher		0		0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 67: Gesamtübersicht der Energien Berechnungsszenario 2

Genau wie im ersten Szenario ist dabei zu erkennen, dass die gesamten Verluste der Summe der einzelnen Verluste entsprechen, die mittlere Jahresenergie der Erzeuger der mittleren Last inklusive deren Verluste entspricht und der mittlere jährliche Energieexport der Summe aus Import und der Endenergie der Speicher entspricht.

Weiter ist im Vergleich zum ersten Szenario zu erkennen, dass sich die mittlere jährliche Primärenergie um 57%, die Verluste um 50 % und die jährlichen Importe um 85 % verringern.

## 5 AUFBAU DER AUSGABEMASKE

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Ausgabemaske erläutert. Diese beinhaltet neben einer Vereinfachung des Flussdiagramms der Eingabemaske, welche in Kapitel 3 beschrieben wurde, weitere Schaltflächen zur Darstellung kommerzieller oder sonstiger Ergebnisse.

Neben dem Flussdiagramm zur grafischen Darstellung der Ergebnisse enthält die Ausgabemaske weitere Tabellen, in welchen Ergebnisse der kommerziellen Berechnungen hinterlegt sind. Diese können als Basis für weitere Berechnungen fungieren.

Abbildung 68 zeigt die Oberfläche der Ausgabemaske. Diese enthält neben dem oben erwähnten Flussdiagramm und dessen zusätzlichen Schaltflächen auch eine Auswahlmöglichkeit des gewünschten Berechnungsszenarios (oben rechts).

Wie bereits in Sektion 4.7 erwähnt, werden die Ergebnisse einer Berechnung in einer fest definierten Ordnerstruktur abgelegt. Die Elemente des Wahlmenüs entsprechen dabei den vorhandenen Ergebnisordnern. Durch die Wahl eines Szenarios wird der Ordnerpfad der Ausgabemaske so angepasst, dass durch einen Klick auf eine beliebige Schaltfläche die grafischen Darstellungen der entsprechenden Komponente angezeigt werden. Die Auswahl muss dabei durch einen Klick auf das „Aktualisieren Symbol“, welches sich rechts neben dem Wahlmenü befindet, bestätigt werden.

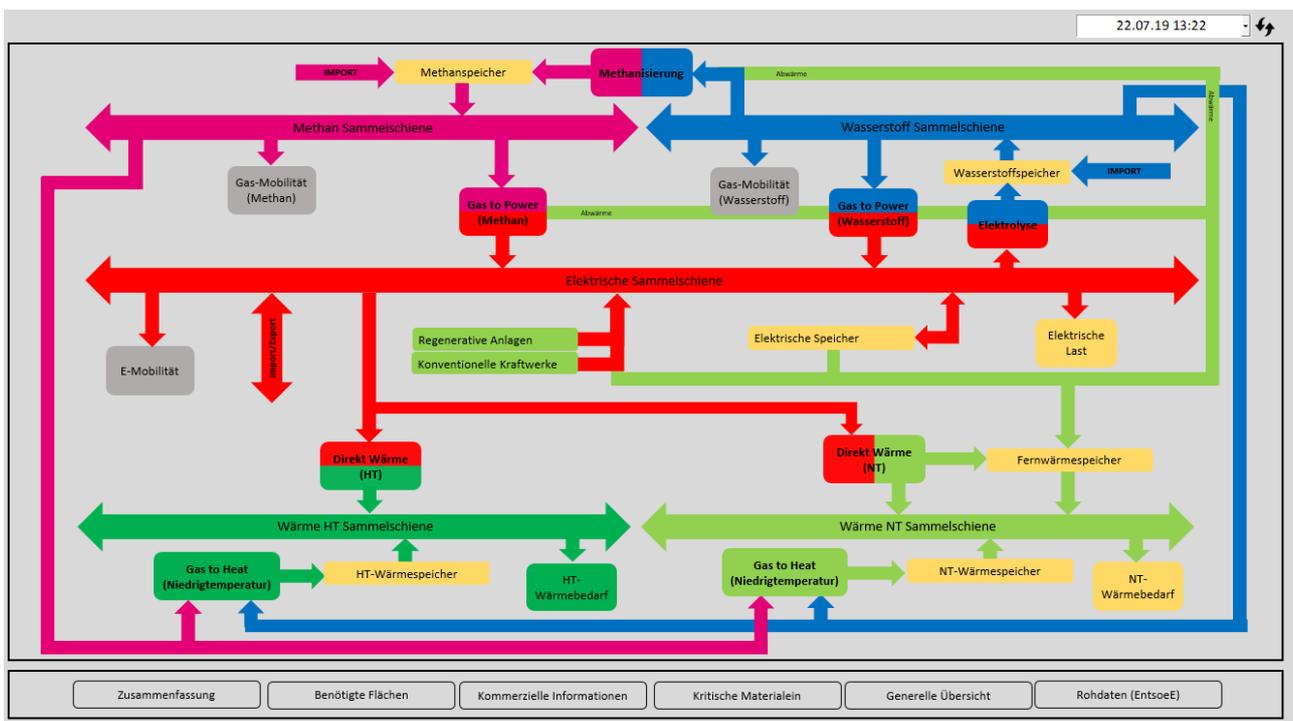


Abbildung 68: Flussdiagramm der Ausgabemaske

Um die Ergebnisse des Berechnungsszenarios einsehen zu können, ist die Ausgabemaske, ähnlich wie die Eingabemaske klickbar gestaltet. Durch einen Klick auf eine Komponente des Flussdiagramms oder eine der darunterliegenden Schaltflächen wird ein Fenster geöffnet, in welchem eine oder mehrere grafische Ergebnisdarstellungen angezeigt werden.

Abbildung 69 zeigt die Oberfläche der Ergebnisdarstellung exemplarisch für die Komponente „Elektrische Speicher“. Im Zentrum der Oberfläche befindet sich dabei die Ergebnisgrafik.

Diese besteht i.d.R. aus einem Leistungs- und dem dazugehörigen Energieverlauf. Beide Verläufe werden um statistische Informationen wie beispielsweise Minima, Maxima oder Jahresenergien ergänzt. Zusätzlich erhalten beide Grafiken eine Bildbeschreibung, welche rechts neben den Verläufen angezeigt wird.

Über die Pfeiltasten, welche sich links und rechts der Darstellung befinden, kann zwischen den einzelnen, dieser Komponente zugeordneten, Darstellungen gewechselt werden. Dabei wird die Seitenzahl in der rechten unteren Ecke angezeigt.

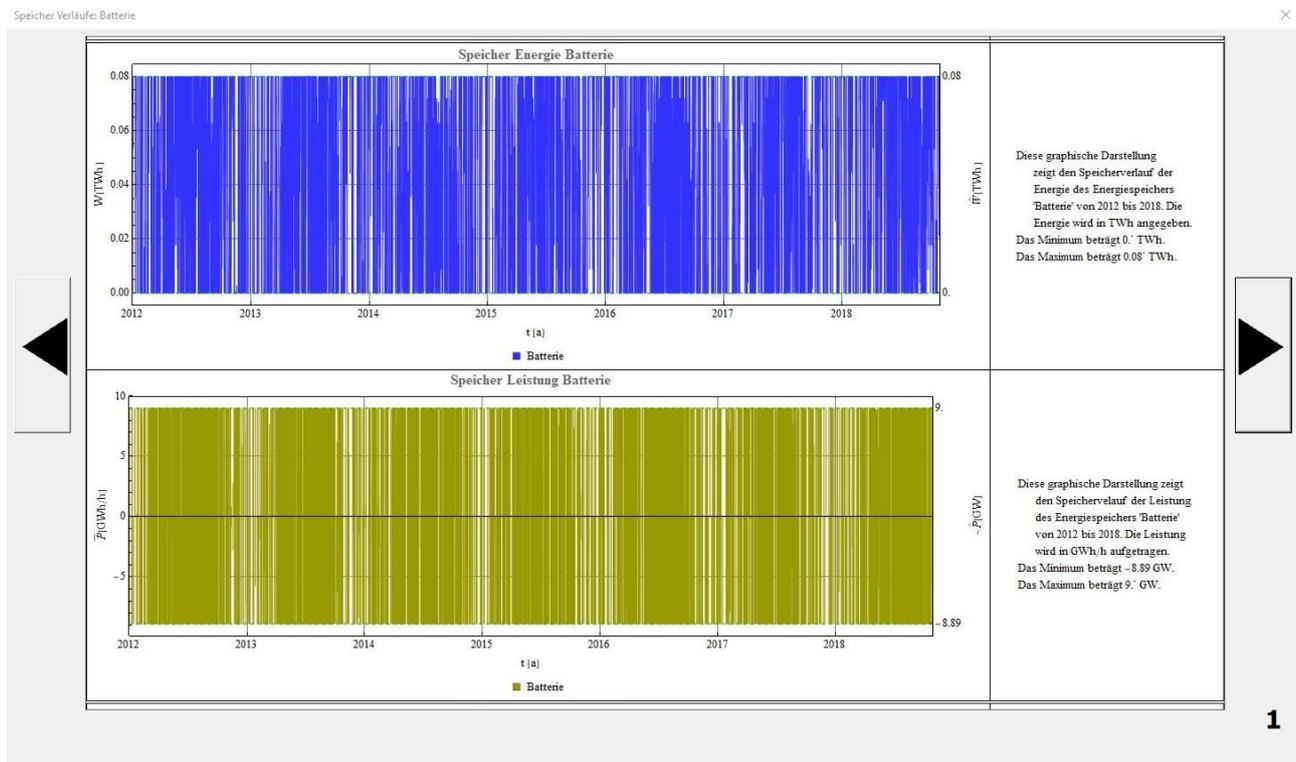


Abbildung 69: Oberfläche der Ergebnisdarstellung

In den folgenden Kapiteln werden die Komponenten der einzelnen Zweige sowie deren zugeordneten Darstellungen genauer beschrieben.

## 5.1 DER ELEKTRISCHE ZWEIG

Abbildung 70 zeigt den elektrischen Zweig der Ausgabemaske. Folgend werden die Komponenten und deren zugehörige grafische Darstellungen benannt und aufgeführt.

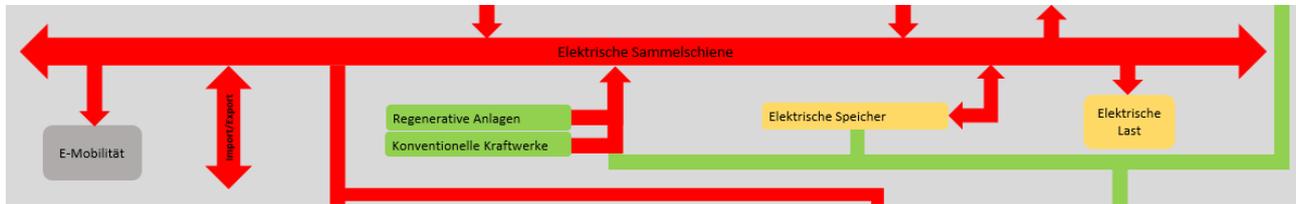


Abbildung 70: Der elektrische Zweig (Ausgabemaske)

### E-Mobilität:

Enthält den:

- aufbereiteten Lastverlauf der Elektro-Mobilität (PKW & LKW). Diese Verläufe basieren auf den Parametern der Elektro- sowie generellen Mobilitätseinstellungen, welche in Abschnitt 3.6.1 und 3.11.1 beschrieben wurden. Die Berechnung der Verläufe wurde bereits in Sektion 4.3 erläutert.

### Import/Export:

Enthält die:

- Importe (negativ) und Exporte (positiv) der elektrischen Last. Dieser Verlauf entspricht der elektrischen Residualleistung, welche nicht durch Speicher oder andere Anlagen gedeckt bzw. aufgenommen werden konnte.

### Regenerative Anlagen:

Enthält die:

- aufbereiteten und angepassten Verläufe der drei regenerativen Anlagen (Windanlagen an Land, Windanlagen auf See, Solaranlagen).

### Konventionelle Kraftwerke:

Enthält die:

- Leistungs- und Energieverläufe der, im Energiesystem vorhandenen, konventionellen Kraftwerke. Die Anzahl der Grafiken wird dabei durch die Anzahl der konventionellen Kraftwerke bestimmt.

Elektrische Speicher:

Enthält die:

- Leistungs- und Energieverläufe der elektrischen Speicher. Die Anzahl der Grafiken wird dabei durch die Anzahl der elektrischen Speicher bestimmt.
- Verluste, welche durch die elektrischen Speicher entstanden sind.
- Verläufe aller elektrischen Speicher in Relation (gemeinsame Darstellung in einem Bild).

Elektrische Last:

Enthält die:

- grafische Aufbereitung des Bruttostromverbrauchs, basierend auf dem Parameter „Energieverbrauch“ [Abschnitt 3.6.7] und den durch Entso-e bereitgestellten Verlauf der elektrischen Last [Abschnitt 1.5.1].

**5.2 DIE CHEMISCHEN ZWEIGE**

Abbildung 71 zeigt die beiden chemischen Zweige der Ausgabemaske. Folgend werden die Komponenten und deren zugehörige grafische Darstellungen benannt und aufgeführt.

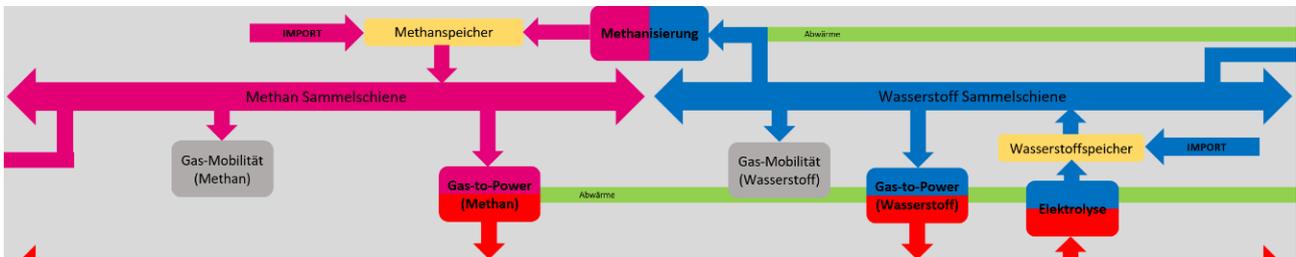


Abbildung 71: Der chemische Zweig (Ausgabemaske)

Gas-Mobilität (Methan / Wasserstoff):

Enthält die:

- aufbereiteten Lastverläufe der Gas-Mobilität (PKW & LKW) basierend auf den Angaben zur Gas-Mobilität der beiden Zweige sowie den generellen Angaben zur Mobilität. Die Berechnung der Verläufe wird in Sektion 4.3 erläutert.

Import (Methan / Wasserstoff):

Enthält den:

- Verlauf der Importleistung und -Energie des entsprechenden Gases. Die Notwendigkeit von Importen werden in Unterabschnitt 2.1.2.3 erläutert.

Methan- Wasserstoff- Speicher:

Enthält den/die:

- Leistungs- und Energieverlauf des entsprechenden Gasspeichers. Dabei wurde zwischen der Einspeicherung zur Lastdeckung und der Einspeicherung zum Abbau der überschüssigen Residualleistung unterschieden.
- Verluste, welche durch den entsprechenden Gasspeicher entstanden sind.
- Verläufe des Methan- und Wasserstoffspeichers in Relation (gemeinsame Darstellung in einem Bild).

Methanisierung / Elektrolyse:

Enthält die:

- Verluste durch Methanisierung bzw. Elektrolyse. Diese sind ähnlich wie bei den Gasspeichern in Verluste durch Erzeugung zur Lastdeckung und Verluste durch Erzeugung zur Einspeicherung differenziert.
- Verläufe der gesamten durch Methanisierung bzw. Elektrolyse gewandelten Leistung und Energie.

Gas-to-Power (Methan / Wasserstoff):

Enthält die:

- Verläufe der gewandelten Leistung/Energie pro Anlage.
- Leistungs- / Energieverluste der jeweiligen Anlagen.

### 5.3 DIE KALORISCHEN ZWEIGE

Abbildung 72 zeigt die beiden kalorischen Zweige der Ausgabemaske. Folgend werden die Komponenten und deren zugehörige grafische Darstellungen benannt und aufgeführt.

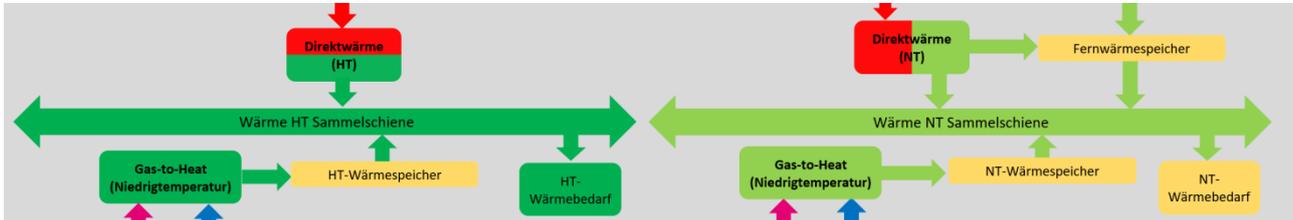


Abbildung 72: Der kalorische Zweig (Ausgabemaske)

Gas-to-Heat:

Enthält die:

- Verläufe der gewandelten Leistung/Energie pro Anlage (Methan / Wasserstoff).
- Leistungs- / Energieverluste der jeweiligen Anlagen (Methan / Wasserstoff).

Direktwärme:

Enthält die:

- Verläufe der gewandelten Leistung/Energie pro Anlage.
- Leistungs- / Energieverluste der jeweiligen Anlagen.

Wärmespeicher:

Enthält den/die:

- Leistungs- und Energieverlauf des entsprechenden Wärmespeichers.
- Verluste, welche durch den entsprechenden Wärmespeicher entstanden sind.
- Verläufe sämtlicher Wärmespeicher in Relation (gemeinsame Darstellung in einem Bild).

Wärmebedarf:

Enthält die:

- Grafische Aufbereitung der entsprechenden Wärmelast, basierend auf dem Parameter „Energiebedarf“ [Abschnitt 3.9.7 und 3.10.5].

## 5.4 EXTERNE SCHALTFLÄCHEN

Folgend werden die externen Schaltflächen und deren zugehörige grafische Darstellungen benannt und aufgeführt.

### Zusammenfassung:

Enthält die:

- Leistungs-/ Energieverläufe sämtlicher Speicher in Summe.
- Übersicht der gewandelten Leistung-/ Energie durch Power-to-Gas sowie deren Verluste.
- Übersicht der gewandelten Leistung-/ Energie durch Power-to-Heat sowie deren Verluste.
- Übersicht der gewandelten Leistung-/ Energie durch Gas-to-Power sowie deren Verluste.
- Übersicht der gewandelten Leistung-/ Energie durch Gas-to-Heat sowie deren Verluste.
- Leistungs-/ Energieverläufe sämtlicher Verluste in Summe.

### Benötigte Fläche:

Enthält die:

- Auflistung sämtlicher benötigter Flächen sowie deren benötigter prozentualer Anteil an der Fläche NRWs bzw. Deutschlands.

### Kommerzielle Informationen:

Enthält die:

- Auflistung sämtlicher Investitionskosten jeder kostenbehafteten Komponente.
- Auflistung der, auf den Investitionskosten basierenden, Kosten pro Bürger.
- Auflistung der, auf den Investitionskosten basierenden, Kosten pro Haushalt.
- Auflistung der, auf den Investitionskosten basierenden, Kosten pro kWh.

### Kritische Materialien:

Enthält die:

- Auflistung der benötigten kritischen Materialien durch Elektro-Mobilität sowie elektrische Speicher.

Generelle Übersicht:

Enthält die / den:

- Endergebnisdarstellung der Fortschrittsübersicht. Diese enthält die gesamte Abarbeitungsdauer, die finalen Ausbaufaktoren der regenerativen Anlagen und die verbliebenen „Delta-Werte“.
- Übersichtstabelle der gesamten erzeugten und verbrauchten Energien (Bilanzierungstabelle).
- Leistungsverläufe der regenerativen Anlagen basierend auf der zu installierenden Leistung.
- Energieverläufe sämtlicher Erzeuger sowie der absoluten Last.
- Verlauf der Differenz zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung und Energie (Bilanzierung des Energiegleichgewichts).
- Dauerlinien der regenerativ erzeugten Energie sowie der gesamten Last inklusive der Verluste.

Rohdaten (Entso-e):

Enthält die:

- grafische Aufbereitung der durch Entso-e bereitgestellten Verläufe zur installierten wie auch erzeugten Leistung der drei regenerativen Anlagen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICKE

### 6.1 ZUSAMMENFASSUNG

Im folgenden Abschnitt werden die geleisteten Arbeiten zusammengefasst.

Basierend auf dem Parameterpool des Energiewendeplaners wurde eine erweiterte Parametrierung implementiert. Dabei wurden besonders die Parametersätze der Komponenten der Sektorkopplung sowie der Gas- und Wärmespeicher überarbeitet und erweitert. Dies beinhaltet ebenfalls die Unterteilung des chemischen Zweigs in Methan und Wasserstoff wie auch die Unterteilung des kalorischen Zweigs in Hoch- und Niedrigtemperatur.

Zur benutzerfreundlichen Parametrierung des Szenarios wurde eine interaktive Eingabemaske erstellt. Durch diese ist der Nutzer intuitiv in der Lage das von ihm ersonnene Szenario in Form von Parametern zu beschreiben.

Weiterhin ist die Art der Berechnung auf Basis einer zeitaktuellen Betrachtung neu entworfen. Dabei durchläuft, anders als zur vorherigen Version (Version 1.0) des Energiewendeplaners, jeder Zeitpunkt bzw. Residualleistungswert einen Entscheidungsbaum an möglichen Umwandlungen bzw. Ein- oder Ausspeicherungen. Ebenfalls wird durch die, im Rahmen dieser Arbeit, entwickelte Version die Sektorkopplung genauer und realitätsnah berücksichtigt.

Dazu kommen funktionale Erweiterungen, wie beispielsweise die Anwendung des Smart-Grid Algorithmus oder das Kompensieren des geschätzten Verschleißes der regenerativen Anlagen.

Zuletzt wurde die Ergebnisdarstellung auf Basis der benutzerfreundlicheren Eingabemaske neu entwickelt. Wie in Kapitel 0 beschrieben, basiert diese auf der Struktur der Eingabemaske und stellt die Ergebnisse der Berechnung in Form eines klickbaren Flussdiagramms dar.

## 6.2 AUSBLICKE

Im folgenden Abschnitt werden Aspekte aufgeführt, die über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgehen.

Bei der Entwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten Programme wurden hohe Anforderungen an die Modularität der Routinen gestellt.

So wäre es beispielsweise denkbar weitere bis jetzt nicht berücksichtigte Komponenten des Energiesystems in die Eingabemaske aufzunehmen. Ein Beispiel dafür wäre die Berücksichtigung von Geothermieranlagen in den kalorischen Zweigen.

Weiter kann die Funktionalität der Eingabemaske problemlos auf weitere Länder übertragen werden. Dazu müsste lediglich ein Auswahlmenü implementiert und entsprechende Verläufe hinterlegt werden. Außerdem könnten somit Länderverbände definiert werden, welche aus Sicht der Berechnung als ein einzelnes System fungieren.

Ebenfalls kann die Abarbeitungsreihenfolge der Iterationsschleife überdacht und optimiert werden. Dies beinhaltet beispielsweise die Definition wann und wie viel Gas zur langfristigen Speicherung erzeugt werden soll. Ebenfalls könnten die Gasspeicher um Mindestfüllstände erweitert werden, welche als Reserve dauerhaft vorhanden sein müssen.

Außerdem könnte eine Berücksichtigung der Zeitkonstanten bzw. Totzeiten der einzelnen Anlagen und Speicher noch genauere Ergebnisse liefern.

Zuletzt ist erneut anzumerken, dass das nachgebildete Energiesystem dieser Arbeit auf dem „Prinzip Kupferplatte“ basiert. Somit können interne Übertragungsverluste des Systems nicht berücksichtigt werden. Für eine genauere Annäherung des nachgebildeten Systems an die Realität müsste diese Betrachtungsweise weiter optimiert werden.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Wikipedia, „de.wikipedia.org/wiki/Mathematica,“ 01 09 2019. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Mathematica>.
- [2] Wolfram , „<http://www.wolfram.com>,“ 01 09 2019. [Online]. Available: <http://www.wolfram.com/mathematica/?source=nav>.
- [3] entsoe, „[transparency.entsoe.eu](https://transparency.entsoe.eu),“ August 2019. [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show>.
- [4] netztransparenz, „[netztransparenz.de](https://www.netztransparenz.de/),“ 01 09 2019. [Online]. Available: <https://www.netztransparenz.de/>.
- [5] Wikipedia, „de.wikipedia.org/wiki/Kausalität,“ 01 09 2019. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kausalität>.
- [6] Wikipedia, „de.wikipedia.org/wiki/Iteration,“ 01 09 2019. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Iteration>.
- [7] Christian Münch GmbH, „<https://www.photovoltaiik.org>,“ [Online]. Available: <https://www.photovoltaiik.org/photovoltaikanlagen/solarmodule/degradation-von-solarmodulen>. [Zugriff am 12 09 2019].
- [8] Wikipedia, „de.wikipedia.org/wiki/Innere-Punkte-Verfahren,“ 01 09 2019. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Innere-Punkte-Verfahren>.
- [9] BMU, BMWi und P. D.-I. M. J. Löffler, „BMU 2050,“ 2019.
- [10] M. Sterner und I. Stadler, Energiespeicher Bedarf. Technologien. Integration, Regensburg, Bayern: Springer Vieweg, 2017.
- [11] Umweltbundesamt, „Batterien und Akkus Ihre Fragen - Unsere Antworten zu Batterien, Akkus und Umwelt,“ Dessau, 2012.

## Literaturverzeichnis

- [12] D. R. Paschotta, „RP-Energie-Lexikon,“ 03 November 2018. [Online]. Available: <https://www.energie-lexikon.info/pumpspeicherkraftwerk.html>.
- [13] A. Stubinitzky, Ökoeffizienzanalyse technischer Pfade für die regenerative Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff, München: VDI Verlag, 2019.
- [14] Deutsche Energie-Agentur, „Power to X: Technologien“.
- [15] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, „herkulesprojekt.de,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.herkulesprojekt.de/de/Barometer/barometer\\_2017](https://www.herkulesprojekt.de/de/Barometer/barometer_2017).
- [16] T. Hilsenbeck, „infrartheizung-test.net,“ 2017. [Online]. Available: <https://infrartheizung-test.net/>.
- [17] I. T. Reitmair, „heizkostenrechner.eu,“ 2013. [Online]. Available: <http://heizkostenrechner.eu/infrartheizung.html>.
- [18] T. Estermann, S. Pichlmaier, A. Guminski und C. Pellinger, „ffe.de,“ November 2017. [Online]. Available: <https://www.ffe.de/attachments/article/761/Kurzstudie%20Power-to-X.pdf>.
- [19] E.ON Energie AG, Kommunikation, „passivbau-gmbh.de,“ [Online]. Available: [http://www.passivbau-gmbh.de/Download/248\\_EON\\_Heizungswaermepumpen.pdf](http://www.passivbau-gmbh.de/Download/248_EON_Heizungswaermepumpen.pdf).
- [20] Agentur für Erneuerbare Energien e.V., „unendlich-viel-energie.de,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbare-energie/wind/onshore/potenziale-der-windenergie>.
- [21] I. Lütkehus, H. Salecker und K. Adlunger, „umweltbundesamt.de,“ Juni 2013. [Online]. Available: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial\\_der\\_windenergie.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf).
- [22] D. H. Wirth, „ise.fraunhofer.de,“ 31 Juli 2019. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.

## Literaturverzeichnis

- [23] S. Kopp, „windenergie-im-binnenland.de,“ 06 06 2015. [Online]. Available: <http://www.windenergie-im-binnenland.de/flaechenverbrauch.php>. [Zugriff am 20 29 2019].
- [24] E. Hau, Windkraftanlagen – Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit., Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2016.
- [25] Kraftfahrt-Bundesamt, „kba.de,“ 01 Januar 2019. [Online]. Available: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b\\_jahresbilanz.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html).
- [26] Umweltbundesamt, „umweltbundesamt.de,“ 15 März 2019. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#textpart-1>.
- [27] B. f. W. u. Energie, „Die Energiewende der Zukunft,“ 2019.
- [28] B. f. W. u. Energie, „www.bmwi.de,“ 2019. [Online]. Available: [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de).