

Anwendungsbaustein Energiedatenanalyse

Lukas Arnold

Matthias Baitsch

Simone Arnold

Marc Fehr

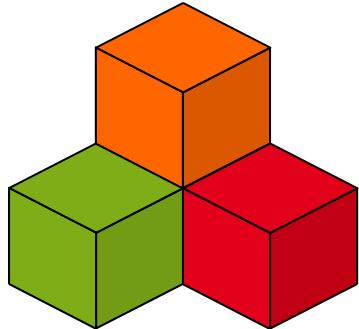
Sebastian Seipel

Florian Bagemihl

Maik Poetzsch

2025-09-25

Anwendungsbaustein Energiedatenanalyse



BCD

Bausteine Computergestützter Datenanalyse

Preamble	3
Voraussetzungen	4
Lernziele	5
1 Energiedatenanalyse	6
2 Hintergrund	7
3 Daten einlesen	8
4 Daten organisieren	10
5 Beschreibende Datenanalyse	14
6 Explorative Datenanalyse	26
7 Schließende Datenanalyse	70
8 Das Wichtigste	132
9 Lernzielkontrolle	133

Preamble



Bausteine Computergestützter Datenanalyse von Lukas Arnold, Simone Arnold, Florian Bagemihl, Matthias Baitsch, Marc Fehr, Franca Hollmann, Maik Poetzsch und Sebastian Seipel. Anwendungsbaustein Energiedatenanalyse von Maik Poetzsch ist lizenziert unter [CC BY 4.0](#). Das Werk ist abrufbar auf [GitHub](#). Ausgenommen von der Lizenz sind alle Logos und anders gekennzeichneten Inhalte. 2025

Zitiervorschlag

Arnold, Lukas, Simone Arnold, Florian Bagemihl, Matthias Baitsch, Marc Fehr, Franca Hollmann, Maik Poetzsch, und Sebastian Seipel. 2025. „Bausteine Computergestützter Datenanalyse. Anwendungsbaustein Energiedatenanalyse“. <https://github.com/bausteine-der-datenanalyse/a-energiedatenanalyse>.

BibTeX-Vorlage

```
@misc{BCD-a-ernergiedatenanalyse-2025,  
  title={Bausteine Computergestützter Datenanalyse. Anwendungsbaustein Energiedatenanalyse},  
  author={Arnold, Lukas and Arnold, Simone and Bagemihl, Florian and Baitsch, Matthias and Fehr, Franca and Poetzsch, Maik and Seipel, Sebastian},  
  year={2025},  
  url={https://github.com/bausteine-der-datenanalyse/a-energiedatenanalyse}}
```

Voraussetzungen

Die Bearbeitungszeit dieses Bausteins beträgt circa 10 Stunden. Für die Bearbeitung dieses Bausteins werden folgende Bausteine vorausgesetzt und die genannten Bibliotheken verwendet:

- Werkzeugbaustein Python
 - Modul [random](#)
 - Modul [Pandas](#)
 - Modul [NumPy](#)
 - Modul [matplotlib.pyplot](#)
- Methodenbaustein Einlesen strukturierter Datensätze

Im Baustein werden Strommarktdaten für das Jahr 2023 verwendet. Daten für Deutschland werden von der Bundesnetzagentur bereitgestellt und sind unter <https://www.smard.de/> abrufbar. Daten für Österreich werden von der Austrian Power Grid AG bereitgestellt und sind unter <https://markttransparenzapg.at/> abrufbar.

Lernziele

In diesen Baustein lernen Sie Methoden und Werkzeuge für die Energiedatenanalyse kennen. Dabei bilden Prinzipien und Verfahren zur Auslegung eines Stromspeichers einen inhaltlichen Schwerpunkt.

Die behandelten Methoden umfassen:

- beschreibende Datenanalyse
- explorative Datenanalyse
- schließende Datenanalyse
- ergänzender Einsatz kennzahlenbasierter und visualisierender Methoden

Zu den vorgestellten Werkzeugen gehören:

- Visualisierung einer sortierten Jahresdauerlinie
- Berechnung der Residual- und Restlast
- Grenzstromanalyse
- Größenbestimmung eines Stromspeichers unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads und der Kappung von Erzeugungsspitzen, Berechnung der realisierten Zyklenzahl, Jahresgänge und des Potenzials auf dem Ausbaupfad erneuerbarer Energien

Schlagworte: vergleichende Analyse von Strommarktdaten, Daten visualisieren, Speicherauslegung

1 Energiedatenanalyse

2 Hintergrund

Elektrischer Strom wird in Kraftwerken erzeugt und über das Stromnetz zu den Stromverbrauchern transportiert. Stromerzeugung und -verbrauch müssen dabei immer ausgeglichen sein. Der Anteil wetterabhängiger erneuerbarer Einspeisung steigt, Strom kann bislang aber nicht (kostengünstig) großtechnisch gespeichert werden. 2023 speisten die Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland bei einer Kapazität von 37,4 GWh (Heimerl und Kohler 2017, S. 77) 11,1 TWh Strom ein, was 2,4 Prozent des deutschen Stromverbrauchs von 458,3 TWh entsprach (Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE 2024). Die Kraftwerkseinsatzplanung und Speicherauslegung auf Basis von Erzeugungs- und Verbrauchsdaten ist deshalb ein relevantes Anwendungsfeld für die Datenanalyse.

Die Bundesnetzagentur veröffentlicht auf <https://www.smard.de/> unter anderem Daten zu Stromerzeugung, -verbrauch und Großhandelspreisen. (Hinweis: Kraftwerksdaten liegen für Erzeugungseinheiten mit einer installierten Erzeugungsleistung von mindestens 100 MW vor.)

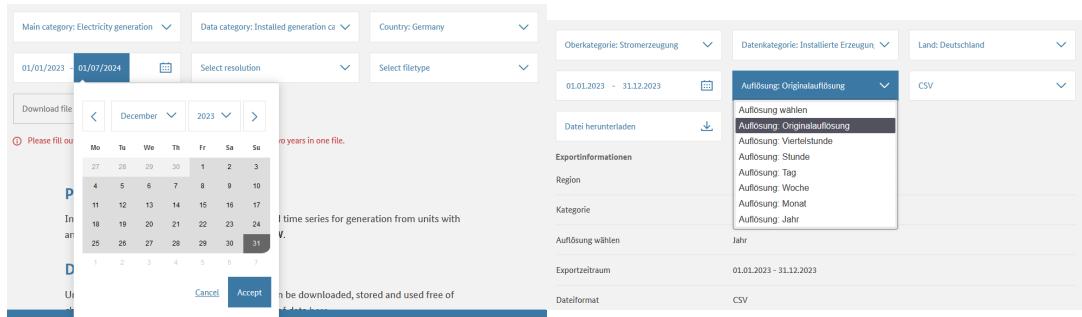
3 Daten einlesen

Die Strommarktdaten der Bundesnetzagentur müssen manuell auf <https://www.smard.de/> heruntergeladen werden. In diesem Skript werden Daten für das Jahr 2023 benutzt.

Daten	Dateiname
Installierte Erzeugungsleistung 2023	Installierte_Erzeugungsleistung_202301010000_202401010000
Realisierte Stromerzeugung 2023	Realisierte_Erzeugung_202301010000_202401010000_Viertel
Realisierter Stromverbrauch 2023	Realisierter_Stromverbrauch_202301010000_202401010000_V

⚠ Warning 1: SMARD Daten herunterladen

Beim der Auswahl des Zeitraums auf Ak-Daten zur installierten Leistung in Originallauflösung (Jahresbasis) auswählen.



(a)

(a)

Das Datumsformat der Dateien ist abhängig von der auf der Internetseite eingestellten Sprache (Deutsch/English).

Die semikolonseparierten Dateien werden als DataFrame mit dem Python Modul Pandas eingelesen, das mit dem Kürzel pd importiert wird. Dazu wird die Funktion `pd.read_csv()` verwendet. Dabei werden:

- das Wert-, Tausender- und Dezimaltrennzeichen spezifiziert.
`sep = ";"`, `thousands = ","`, `decimal = ","`

- die Spalten mit Datums- und Zeitangaben sowie das Datumsformat bestimmt.

```
parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y %H:%M"
```

```
import pandas as pd
pd.set_option("display.precision", 2) # Anzahl Nachkommastellen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

installierte_leistung0 = pd.read_csv(filepath_or_buffer = \
"01-daten/Installierte_Erzeugungsleistung_202301010000_202401010000_Jahr.csv", \
sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", \
parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y")

erzeugung0 = pd.read_csv(filepath_or_buffer = \
"01-daten/Realisierte_Erzeugung_202301010000_202401010000_Viertelstunde.csv", \
sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", \
parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y %H:%M")

verbrauch0 = pd.read_csv(filepath_or_buffer = \
"01-daten/Realisierter_Stromverbrauch_202301010000_202401010000_Viertelstunde.csv", \
sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", \
parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y %H:%M")
```

Sehen Sie sich die Zeichenkette zur Spezifikation des Datumsformats an: "%d.%m.%Y %H:%M". Können Sie anhand der [Dokumentation](#) bestimmen, welches Format die Datumsangaben in der Datei haben? Welches Format hat der 14. April 2023 um Viertel nach zwei nachmittags?

Tipp 1: Lösung Datumsformat

Kürzel	Bedeutung
%d.	Tag als zweistellige Ganzzahl mit Trennzeichen “.”
%m.	Monat (ggf. mit führender Null) mit Trennzeichen “.”
%Y	Jahr als vierstellige Ganzzahl mit Trennzeichen “ ”
%H:	Stunde als zweistellige Ganzzahl mit Trennzeichen “:”
%M	Minute als zweistellige Ganzzahl

Lösung: 14.04.2023 14:15

4 Daten organisieren

Vor der Datenanalyse sollte überprüft werden, ob die Daten korrekt eingelesen wurden. Dies bedeutet zum einen, zu kontrollieren, ob der Datentyp aller Spalten richtig erkannt wurde. Ob die Spaltentypen einer Datei korrekt eingelesen wurden, können Sie in Python mit dem Befehl `df.dtypes` überprüfen. Hier der Output des Befehls für den DataFrame `erzeugung0`.

```
print(f"Spalten:\n{erzeugung0.dtypes}")
```

```
Spalten:
Datum von                               datetime64[ns]
Datum bis                                datetime64[ns]
Biomasse [MWh] Originalauflösungen        float64
Wasserkraft [MWh] Originalauflösungen     float64
Wind Offshore [MWh] Originalauflösungen    float64
Wind Onshore [MWh] Originalauflösungen     float64
Photovoltaik [MWh] Originalauflösungen      float64
Sonstige Erneuerbare [MWh] Originalauflösungen float64
Kernenergie [MWh] Originalauflösungen       float64
Braunkohle [MWh] Originalauflösungen        float64
Steinkohle [MWh] Originalauflösungen        float64
Erdgas [MWh] Originalauflösungen           float64
Pumpspeicher [MWh] Originalauflösungen      float64
Sonstige Konventionelle [MWh] Originalauflösungen float64
dtype: object
```

Viele der Spaltennamen enthalten die Zeichenkette "Originalauflösungen", die der Übersichtlichkeit wegen entfernt werden kann (führendes Leerzeichen beachten). Auf diese Weise könnte auch die Einheitenangabe [MWh] entfernt werden, falls diese als störend empfunden wird.

```
# Zeichenkette "Originalauflösungen" entfernen
installierte_leistung0.columns = installierte_leistung0.columns.str.replace(pat = " Originalauflösungen", repl = "")
```



```
erzeugung0.columns = erzeugung0.columns.str.replace(pat = " Originalauflösungen", repl = "")
```

```

print(f"Spalten:\n{erzeugung0.dtypes}")

verbrauch0.columns = verbrauch0.columns.str.replace(pat = " Originalauflösungen", repl = "")

```

Spalten:

Datum von	datetime64[ns]
Datum bis	datetime64[ns]
Biomasse [MWh]	float64
Wasserkraft [MWh]	float64
Wind Offshore [MWh]	float64
Wind Onshore [MWh]	float64
Photovoltaik [MWh]	float64
Sonstige Erneuerbare [MWh]	float64
Kernenergie [MWh]	float64
Braunkohle [MWh]	float64
Steinkohle [MWh]	float64
Erdgas [MWh]	float64
Pumpspeicher [MWh]	float64
Sonstige Konventionelle [MWh]	float64
dtype: object	

Zum anderen sollten die eingelesenen Daten betrachtet werden, um Fehler etwa bei der Umwandlung von Dezimal- und Tausender trennzeichen, des Datumsformats oder eine unerwartete Anzahl fehlender Werte und sonstige Auffälligkeiten zu identifizieren. Dazu sollten nicht nur die ersten Zeilen des Datensatzes, sondern auch Ausschnitte aus der Mitte und dem Ende kontrolliert werden. Dafür ist der Befehl `pd.concat([a, b, c])` nützlich, dem eine Liste von Indexbereichen übergeben werden kann (siehe zweiter und dritter Reiter im folgenden Panel).

4.1 installierte Leistung

```

# der DataFrame installierte_leistung0 hat nur 1 Zeile
installierte_leistung0

```

	Datum von	Datum bis	Biomasse [MW]	Wasserkraft [MW]	Wind Offshore [MW]	Wind Onshore [MW]
0	2023-01-01	2024-01-01	8467.0	5049.0	8129.0	57590.0

4.2 realisierte Erzeugung

```
pd.concat([erzeugung0.head(2), \
erzeugung0.iloc[len(erzeugung0)//2:(len(erzeugung0)//2+2)], \
erzeugung0.tail(2)])
```

	Datum von	Datum bis	Biomasse [MWh]	Wasserkraft [MWh]	Wind Offshore [MWh]	Pumpsp. [MWh]
0	2023-01-01 00:00:00	2023-01-01 00:15:00	1094.25	320.0	684.25	424.75
1	2023-01-01 00:15:00	2023-01-01 00:30:00	1091.25	317.5	743.50	443.50
17520	2023-07-02 13:00:00	2023-07-02 13:15:00	955.25	317.5	736.00	1147.75
17521	2023-07-02 13:15:00	2023-07-02 13:30:00	956.75	321.5	693.75	1223.25
35038	2023-12-31 23:30:00	2023-12-31 23:45:00	1053.25	412.5	1479.25	470.00
35039	2023-12-31 23:45:00	2024-01-01 00:00:00	1051.50	404.0	1469.00	528.00

4.3 realisierter Verbrauch

```
pd.concat([verbrauch0.head(2), \
verbrauch0.iloc[len(verbrauch0)//2:(len(verbrauch0)//2+2)], \
verbrauch0.tail(2)])
```

	Datum von	Datum bis	Gesamt (Netzlast) [MWh]	Residuallast [MWh]	Pumpsp. [MWh]
0	2023-01-01 00:00:00	2023-01-01 00:15:00	9720.75	1890.25	424.75
1	2023-01-01 00:15:00	2023-01-01 00:30:00	9641.25	1739.25	443.50
17520	2023-07-02 13:00:00	2023-07-02 13:15:00	11564.00	-233.25	1147.75
17521	2023-07-02 13:15:00	2023-07-02 13:30:00	11536.25	-4.00	1223.25
35038	2023-12-31 23:30:00	2023-12-31 23:45:00	10495.75	1471.75	470.00
35039	2023-12-31 23:45:00	2024-01-01 00:00:00	10289.25	1339.25	528.00

Schließlich ist eine Plausibilitätskontrolle der Daten sinnvoll. Einleitend wurde der deutsche Gesamtstromverbrauch im Jahr 2023 genannt, der 458,3 TWh beträgt. Der Stromverbrauch und die Summe der Stromerzeugung sollten diesem Wert ungefähr entsprechen.

```
# exclude columns with datetime
print("Stromverbrauch in Millionen MWh:\n",
      verbrauch0.sum(numeric_only = True) // (1000 * 1000), sep = "")
```

```
print("\nStromerzeugung in Millionen MWh", \
erzeugung0.sum(numeric_only = True).sum() // (1000 * 1000))
```

```
Stromverbrauch in Millionen MWh:  
Gesamt (Netzlast) [MWh] 458.0  
Residuallast [MWh] 260.0  
Pumpspeicher [MWh] 14.0  
dtype: float64
```

```
Stromerzeugung in Millionen MWh 448.0
```

Wenn alle Dateien korrekt eingelesen wurden, können Arbeitsdateien mit dem Befehl `df.copy()` angelegt werden. Dadurch bleiben die Rohdaten immer verfügbar und können bei Bedarf, beispielsweise nach einem versehentlichen Überschreiben der Arbeitsdateien, erneut geladen werden.

```
erzeugung = erzeugung0.copy()  
verbrauch = verbrauch0.copy()  
installierte_leistung = installierte_leistung0.copy()
```

5 Beschreibende Datenanalyse

Mit Methoden der beschreibenden Statistik kann ein Überblick über die Datensätze und die Daten gewonnen werden. Dieser Schritt dient insbesondere auch dazu, mögliche Fehler und Auffälligkeiten im Datensatz zu identifizieren. Hierbei gewonnene Befunde können im der folgenden explorativen und schließenden Datenanalyse vertieft werden.

Einen ersten Überblick über die Daten liefert die Methode `pd.DataFrame.describe()`, die die Verteilung der Daten beschreibt. Durch das Argument `include = [np.number]` kann die Ausgabe auf Spalten mit numerischen Daten beschränkt werden, das heißt, die Spalten mit Datumsinformationen werden ausgeschlossen.

```
print(f"Der DataFrame erzeugung hat {erzeugung.shape[0]} Zeilen und {erzeugung.shape[1]} Spalten")
erzeugung.describe(include = [np.number])
```

Der DataFrame erzeugung hat 35040 Zeilen und 14 Spalten.

	Biomasse [MWh]	Wasserkraft [MWh]	Wind Offshore [MWh]	Wind Onshore [MWh]	Photovoltaik [MWh]
count	35040.00	35040.00	35040.00	35040.00	35040.00
mean	1079.50	411.50	671.23	3389.91	1590.11
std	80.16	83.08	457.65	2627.46	2470.00
min	892.50	249.75	0.00	30.25	0.25
25%	1017.50	334.00	259.00	1237.25	0.50
50%	1066.75	420.50	612.25	2657.00	24.88
75%	1133.25	481.00	1040.56	5017.19	2466.50
max	1293.25	618.25	1910.00	12039.50	10361.25

Aus der beschreibenden Statistik der Daten kann beispielsweise entnommen werden, dass Onshore Wind den größten Beitrag zur Stromerzeugung lieferte. Ebenfalls ist auffällig, dass weder Onshore Wind noch Photovoltaik eine minimale Erzeugung von 0 aufweisen, was jedoch für Wind Offshore und Kernenergie der Fall ist.

5.1 Visualisieren

Die Auswertung der beschreibenden Statistik für 12 verschiedene Erzeugungsformen erfordert jedoch Konzentration. Komplexe Informationen sollten deshalb grafisch aufbereitet werden.

Einen schnellen Überblick beispielsweise über die Verteilung der Gesamterzeugungsleistung nach Erzeugungsart verschafft ein Kreis- bzw. Ringdiagramm. Allerdings hat dieser Diagrammtyp den Nachteil, dass dieser mit steigender Anzahl von Merkmalsausprägungen (bzw. hier darzustellenden Merkmalen) schnell unübersichtlich wird und Winkel kaum exakt abgelesen werden können.

Im folgenden, mit der Methode `pd.DataFrame.plot.pie()` erstellten Ringdiagramm wurde deshalb zum einen die automatische Annotation der Anteilswerte mit dem entsprechenden Formatierungsstring `autopct='%.1f%%'` aktiviert. Zum anderen wurde die Reihenfolge der Spalten im DataFrame getauscht, da sich die Prozentangaben und Beschriftungen kleiner Kreissegmente andernfalls überlappen. Außerdem wurde für die Beschriftung der Segmente die Zeichkette ”[MWh]” aus den Spaltennamen gekürzt. Dies verbessert zwar die Lesbarkeit des Diagramms. Das ist aber nicht der Grund, weshalb die Zeichenkette entfernt wurde.

Was denken Sie, was der Grund dafür ist?

 Tipp 2: Lösung Kreisdiagramm

Das Kreis- bzw. Ringdiagramm stellt Anteilswerte dar und ist deshalb einheitenlos.

Die Details der Ploterstellung können Sie dem zweiten Reiter entnehmen.

5.2 Plotten mit Pandas

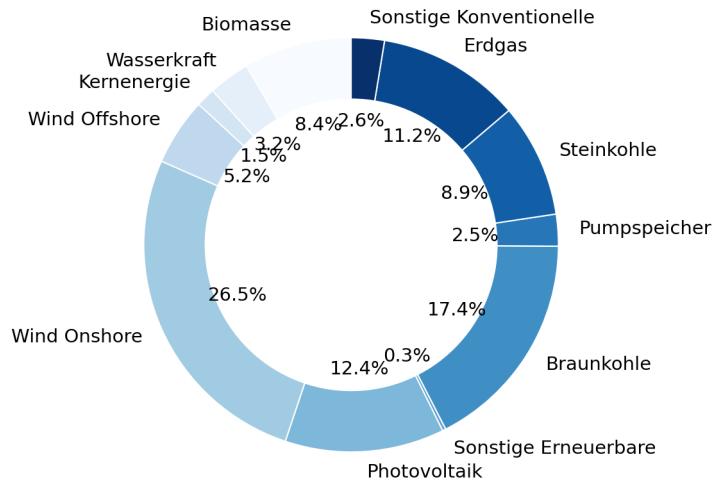


Abbildung 5.1: Anteil an der Stromerzeugung

5.3 Code für Pandas

```
# plot the pie first try - Sonstige Erneuerbare [MWh] overlaps with Kernenergie [MWh] and P
# erzeugung.sum(numeric_only = True).plot.pie(colormap = "Blues", startangle = 90, rotatelab
# rearrange columns, remove " [MWh]"
plotting_data = erzeugung.copy()
column_to_move = plotting_data.pop("Kernenergie [MWh]")
plotting_data.insert(4, "Kernenergie [MWh]", column_to_move)

column_to_move = plotting_data.pop("Pumpspeicher [MWh]")
plotting_data.insert(10, "Pumpspeicher [MWh]", column_to_move)

plotting_data.columns = plotting_data.columns.str.replace(pat = " [MWh]", repl = "")

# plot the pie
ax = plotting_data.sum(numeric_only = True).plot.pie(colormap = "Blues", startangle = 90, ro
# make a donut
circle = plt.Circle((0, 0), radius = 0.7, color = "white")
```

```
ax.add_patch(circle)  
plt.show()
```

5.3.1 Daten aggregieren

Aufgrund der zahlreichen Merkmale erschließt sich aus der deskriptiven und visuellen Beschreibung der Erzeugungsleistung nicht unbedingt ein prägnanter Befund. Eine Möglichkeit, um Daten besser zu verstehen, besteht darin, ähnliche Merkmale zusammenzufassen. Im Folgenden werden erneuerbare und konventionelle (mit fossilen Brennstoffen betriebene) Erzeugungsarten für die Darstellung der Anteilswerte in einem Ringdiagramm zusammengefasst. Beide Gruppen werden zusätzlich in einem Balkendiagramm dargestellt. Für die Darstellung wird das Modul `matplotlib.pyplot` verwendet. Die Details der Ploterstellung können Sie dem zweiten Reiter entnehmen.

5.4 Plotten mit matplotlib

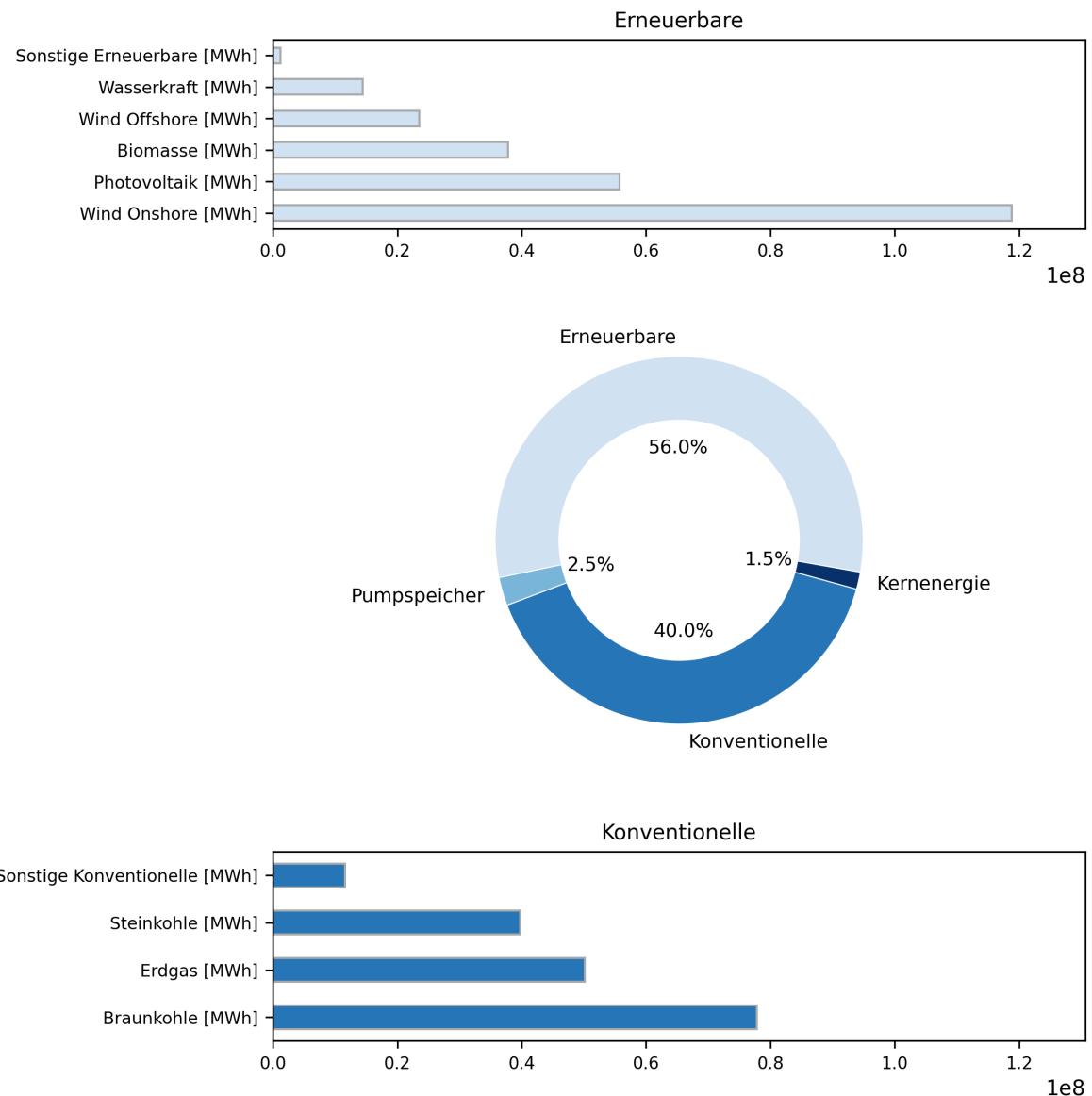


Abbildung 5.2: Absolute Stromerzeugung und relative Anteile nach Erzeugungstyp

5.5 Code für matplotlib

```
# Erneuerbare und Konventionelle bestimmen, jeweils summieren

## Erneuerbare
plotting_data = erzeugung.copy()
plotting_data.drop(columns = ['Datum von', 'Datum bis', 'Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]',
'Wind Onshore [MWh]', 'Photovoltaik [MWh]', 'Sonstige Erneuerbare [MWh]'], inplace = True) # Datumsspalten entfernen, inplace = False liefert neue DataFrame
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]', 'Sonstige Erneuerbare [MWh]']
plotting_data["Erneuerbare"] = erzeugung[erneuerbare].sum(axis = 'columns')

## Konventionelle
plotting_data.drop(columns = ['Braunkohle [MWh]', 'Steinkohle [MWh]', 'Erdgas [MWh]', 'Sonstige Konventionelle'],
konventionelle = ['Braunkohle [MWh]', 'Steinkohle [MWh]', 'Erdgas [MWh]', 'Sonstige Konventionelle'],
plotting_data["Konventionelle"] = erzeugung[konventionelle].sum(axis = 'columns')

# rearrange columns, remove " [MWh]"
plotting_data = plotting_data[['Erneuerbare', 'Pumpspeicher [MWh]', 'Konventionelle', 'Kernenergie [MWh]']]
plotting_data.columns = plotting_data.columns.str.replace(pat = " [MWh]", repl = "")

# zur Kontrolle - axis = columns addiert die Spalten zeilenweise
## print(erneuerbare)
## print(erzeugung[erneuerbare].sum(axis = 'columns'))
## print(plotting_data.columns)
## print(plotting_data[0:3])

# Grafik mit drei subplots erzeugen
plt.figure(figsize = (7.5, 7.5))

nrows = 4
ncols = 2
font_size = 8

# value for shared x-axis on barplots
x_lim = erzeugung.sum(numeric_only = True).max() * 1.1

# array of colors
my_colors = plt.get_cmap('Blues')(np.linspace(0.2, 1, len(plotting_data.sum())))

# plot the pie, use 4 out of 8 panels = middle 2 rows
```

```

ax = plt.subplot(nrows, ncols, (3, 6))
plt.pie(x = plotting_data.sum(), colors = my_colors, startangle = 350, labels = list(plotting_
    _data.index))

# make a donut
circle = plt.Circle((0, 0), radius = 0.65, color = "white")
ax.add_patch(circle)

# top row unstacked barplot
plt.subplot(nrows, ncols, (1, 2))
erzeugung[erneuerbare].sum().sort_values(ascending = False).plot.barh(fontsize = font_size, 
    title("Erneuerbare", fontsize = font_size + 2))

# bottom row unstacked barplot
plt.subplot(nrows, ncols, (7, 8))
erzeugung[konventionelle].sum().sort_values(ascending = False).plot.barh(fontsize = font_size, 
    title("Konventionelle", fontsize = font_size + 2))

plt.tight_layout()
plt.show()

```

Durch die Aggregation ähnlicher Stromerzeugungsarten wurde das Ringdiagramm auf vier Erzeugungsarten reduziert. Die mit nur geringen Anteilen an der Gesamtstromerzeugung beteiligten Erzeugungsarten Pumpspeicher und Kernenergie treten dadurch gegenüber der Einzeldarstellung aller Erzeugungsarten deutlich hervor. Auf dieser Grundlage kann diskutiert werden, ob die gezeigte Aggregation zweckmäßig ist. So könnte einerseits die Kernenergie den Konventionellen zugeschlagen werden, wenn für diese Gruppe nicht auf das Merkmal einer Erzeugung mit fossilen Brennstoffen, sondern auf das Prinzip thermischer Dampfexpansion abgestellt wird. Andererseits sollte die Erzeugung durch Pumpspeicher kritisch hinterfragt werden. Dieser Aspekt wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

⚠ Warning 2: Hinweis

Komplexe Grafiken, wie die hier gezeigte, sollten im Allgemeinen sparsam eingesetzt werden, da sie schwer zu erfassen und zu interpretieren sind. Die Zweck der Grafik und die wesentlichen Schlussfolgerungen sollten deshalb im Text erläutert werden.

Tipp: Stellen Sie sich vor, Sie würden die Grafik spontan einem: einer Freund:in zeigen, die Ihre Arbeit nicht gelesen hat. Wie würden Sie Ihrer:Ihrem Freund:in die Grafik erklären? Schreiben Sie es in Ihrer Arbeit auf.

5.5.1 Erzeugung, Speicherung, Einspeisung

Pumpspeicherkraftwerke sind Energiespeicher, die keine Primärenergie erzeugen, sondern den von anderen Erzeugern produzierten Strom speichern und bei Bedarf wieder ins Netz einspeisen. Welche Erzeuger Strom zum Befüllen der Pumpspeicher lieferten, wird in Kapitel 6 untersucht. Die realisierte Netzeinspeisung von Pumpspeicherkraftwerken entspricht der um die Verluste beim Ein- und Ausspeichern (sowie ggf. Speicherverluste wie Verdunstung, Versickerung) vermindernden Energieerzeugung anderer Stromerzeuger. Der Wirkungsgrad der Pumpspeicherkraftwerke kann mit den vorliegenden Daten für das Jahr 2023 berechnet werden.

Wie hoch war der Wirkungsgrad der Pumpspeicherkraftwerke 2023?

 Tipp 3: Lösung Wirkungsgrad Pumpspeicher

```
print(f"Summe Erzeugung Pumpspeicher: {erzeugung['Pumpspeicher [MWh]'].sum():,.2f}\n"
      f"Summe Verbrauch Pumpspeicher: {verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].sum():,.2f}\n"
      f"{41 * "="}\n"
      f"Wirkungsgrad in Prozent: \t\t\t{((erzeugung['Pumpspeicher [MWh]'].sum() / verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].sum()) * 100):,.2f} %")
```

```
Summe Erzeugung Pumpspeicher: 11,149,398.50
Summe Verbrauch Pumpspeicher: 14,095,632.75
=====
Wirkungsgrad in Prozent: 79.10
```

Die tatsächlich realisierte Stromerzeugung ist deshalb die von der Bundesnetzagentur veröffentlichte kumulierte Stromerzeugung der Pumpspeicherkraftwerke zuzüglich der Speicherverluste. Die Bundesnetzagentur führt diesen Wert im Datensatz Stromverbrauch. Im folgenden Programmcode wird der “Walross”-Operator `:=` benutzt, der Objektzuweisungen innerhalb von Anweisungen (hier die Anweisung `print()`) erlaubt. Dadurch Code knapper gefasst werden (die Lesbarkeit nimmt aber ab). Mit dem Walross-Operator durchgeführte Zuweisungen müssen in runde Klammern eingefasst werden:

```
print(f"Speicherverluste:\t\t\t{ (speicherverluste := (verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].sum() - kumulierte_stromerzeugung := verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].sum(numeric_only = True))) * 1000 ) :,.2f} TWh\n")
      f"Kumulierte Stromerzeugung:\t\t{kumulierte_stromerzeugung :,.2f} TWh\n"
      f"Summe:\t\t\t\t\t{speicherverluste + kumulierte_stromerzeugung :,.2f} TWh\n")
```

```
Speicherverluste: 2.95 TWh
kumulierte Stromerzeugung: 448.00 TWh
Summe: 450.95 TWh
```

Die Differenz zwischen tatsächlich realisierter und von der Bundesnetzagentur veröffentlichter Stromerzeugung beträgt knapp 3 TWh, also weniger als 1 Prozent der Gesamtstromerzeugung.

In anderen Ländern ist die korrekte Zuordnung der Daten auch betragsmäßig relevant. In Österreich spielen Pumpspeicherkraftwerke eine bedeutende Rolle im Strommix.

5.6 Aufgabe beschreibende Datenanalyse



Abbildung 5.3:

Blick vom Schlegeisspeicher von Höhenweg aus. von Klaus Kettner steht unter der Lizenz [CC BY-SA 3.0](#) und ist abrufbar auf [Wikimedia](#). Das Bild wurde zugeschnitten und im Format PNG gespeichert. 2012.

Wie die Bundesnetzagentur veröffentlicht auch die Austrian Power Grid AG (APG) Strommarktdaten unter <https://markttransparenz.apg.at/>. Unter dem Link können Erzeugungsdaten für das Jahr 2023 heruntergeladen werden.

Diesem Skript ist folgende Datei angefügt.

Daten	Dateiname
Realisierte Stromerzeugung 2023	AGPT_2022-12-31T23_00_00Z_2023-12-31T23_00_00Z_15M_de_2024-06-10T09_32_38Z.csv

Lesen Sie die österreichischen Erzeugungsdaten ein und visualisieren Sie die Anteile der Erzeugungstypen. Was fällt Ihnen im Datensatz auf?

⚠ Warning 3: Markttransparenzdaten Österreich herunterladen

Nach der Auswahl des Zeitraums auf Exportieren klicken, dann erscheint die Schaltfläche Download.

The screenshot shows a user interface for exporting market transparency data. At the top, there are three tabs: 'Diagramm', 'Tabelle' (selected), and 'Export'. Below the tabs, there are input fields for 'Datum von' (01.01.2023), 'Datum bis' (31.12.2023), 'Auflösung' (15 Min.), and 'Jahr' (2023). There is also a dropdown for 'Monat' and a 'Wählen:' button. At the bottom are two red buttons: 'Exportieren' and 'Download'.

Abbildung 5.4:

This screenshot shows a similar export interface to Abbildung 5.4. It includes tabs for 'Chart', 'Table' (selected), and 'Export'. The date range is set from '01/01/2023' to '12/31/2023' with a resolution of '15 Min.' and year '2023'. A 'Month' dropdown is present, and at the bottom are 'Choose', 'Export', and 'Download' buttons.

Abbildung 5.5:

Das Datumsformat der Dateien ist abhängig von der auf der Internetseite eingestellten Sprache (Deutsch/English).

💡 Tipp 4: Tipp Erzeugungsdaten und Musterlösung

Der österreichische Datensatz unterscheidet sich zum einen dadurch, dass die Leistung statt der erzeugten Energie angegeben wird. (Das ist für die Visualisierung der Erzeu-

gungsanteile unerheblich.) Der Datensatz unterscheidet sich aber noch in einer anderen Hinsicht.

Tipp: Wenn Ihnen in der Ausgabe der Methode `.describe()` nicht alle Spalten angezeigt werden, versuchen Sie, den DataFrame in zwei oder mehr Teilen auszugeben. Beispielsweise:

```
print(df.iloc[ :, 0:5].describe(include = np.number))
print(df.iloc[ :, 5:10].describe(include = np.number))
print(df.iloc[ :, 10:15].describe(include = np.number))
```


6 Explorative Datenanalyse

Explorative Datenanalyse bedeutet, Fragen an die vorliegenden Daten zu stellen und diese mittels datenanalytischer Methoden zu beantworten. Die so gewonnenen Erkenntnisse können helfen, die Fragen zu verfeinern oder neue Fragen zu generieren. Es handelt sich also um einen iterativen Prozess. Dadurch soll vor allem ein tieferes Verständnis der Daten gewonnen werden. (Wickham, Çetinkaya-Rundel und Grolemund 2023, Kapitel 10 Exploratory data analysis)

6.1 Hintergrund: Grenzstromanalyse

Im vorliegenden Fall wird die explorative Auseinandersetzung mit dem Datensatz von der Frage strukturiert, welche Erzeuger Strom lieferten, um *zusätzlich* zur Netzlast die Pumpspeicher zu befüllen. Es soll also bestimmt werden, welche Stromerzeuger an den Zeitpunkten, an denen die Pumpspeicher befüllt wurden, in der Lage waren, zusätzliche Leistung bereitzustellen. Dieser zusätzliche Strom kann kurz als Grenzstrom bezeichnet werden.

! Wichtig 1: Grenzstrom

Grenzbetrachtungen untersuchen die Bedingungen, die bei der Produktion oder dem Verbrauch einer zusätzlichen Einheit herrschen. Eine Grenzbetrachtung unterscheidet sich dadurch von einer Durchschnittsbetrachtung, die den Effekt einer Mengenänderung auf alle Einheiten untersucht. Der Grenzstrom bezeichnet eine zusätzliche Einheit Strom. Beispielsweise bestehe die momentane Stromerzeugung in Höhe von 100 Einheiten aus 60 Einheiten Solarstrom und, weil die solare Produktion nicht ausreicht, zusätzlich aus 40 Einheiten Kohlestrom. In diesem Fall enthält jede Einheit Strom durchschnittlich 0,4 Anteile Kohlestrom. Werden nun weitere 20 Einheiten Strom nachgefragt, so müssen diese durch eine zusätzliche Kohleverstromung bedient werden. In der Durchschnittsbetrachtung beträgt der Strommix nun aus 60 Einheiten Solarstrom und $40 + 20 = 60$ Einheiten Kohlestrom. Dadurch verändert sich der durchschnittliche Anteil der Kohle an der Stromproduktion von 0,4 auf 0,5.

In der Grenzbetrachtung beträgt der Kohleanteil des zusätzlich verbrauchten Stroms 20 von 20 Einheiten, also 1.

6.2 Hintergrund: Einspeisevorrang erneuerbarer Energien

In Deutschland gilt seit dem Jahr 2000 das Erneuerbare-Energien-Gesetz, das ursprünglich als Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien eingeführt wurde [Dokumentations- und Informationssystem für Parlamentsmaterialien](#). Dieses regelte in § 3 den Einspeisevorrang erneuerbarer Energien:

Abnahme- und Vergütungspflicht

(1) Netzbetreiber sind verpflichtet, Anlagen zur Erzeugung von Strom nach § 2 an ihr Netz anzuschließen, den gesamten angebotenen Strom aus diesen Anlagen vorrangig abzunehmen und den eingespeisten Strom nach §§ 4 bis 8 zu vergüten.

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2000 Teil I Nr. 13, ausgegeben zu Bonn am 31. März 2000. [Bundesanzeiger](#)

Als erneuerbare Energien klassifizierte Erzeuger speisen vorrangig in das Netz ein. Dies sind nach der aktuellen Fassung des Gesetztes:

- a) Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie,
- b) Windenergie,
- c) solare Strahlungsenergie,
- d) Geothermie,
- e) Energie aus Biomasse einschließlich Biogas, Biomethan, Deponegas und Klärgas sowie aus dem biologisch abbaubaren Anteil von Abfällen aus Haushalten und Industrie

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023). § 3 Begriffsbestimmungen. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/_3.html

Die nicht erneuerbaren Erzeuger arbeiten im Lastfolgebetrieb zur Deckung der Restlast, das heißt der Netzlast abzüglich der erneuerbaren Erzeugungsleistung. Dies bedeutet, dass zwei Szenarien zu unterscheiden sind:

1. Überschuss an erneuerbaren Energien: Der Stromverbrauch wird vollständig durch die Erzeugung erneuerbarer Energien gedeckt und es besteht ein Erzeugungsüberschuss (bzw. Erzeuger wurden abgeregelt), aus dem zusätzlicher Stromverbrauch bedient werden kann.
2. Strommix aus erneuerbarer Einspeisung und Lastfolgebetrieb nicht erneuerbarer Erzeuger: Erneuerbare Energien speisen mit voller Leistung ein, die Restlast und zusätzlicher Stromverbrauch wird von nicht erneuerbaren Erzeugern gedeckt.

Welches Szenario im Stromnetz zu einem bestimmten Zeitpunkt besteht, lässt sich also an der Restlast ablesen.

6.3 Residual- und Restlast bestimmen

Die Bundesnetzagentur veröffentlicht im Datensatz zum realisierten Stromverbrauch Netzlast, Residuallast und den Stromverbrauch durch Pumpspeicherkraftwerke.

```
print(verbrauch.sum(numeric_only = True))
```

```
Gesamt (Netzlast) [MWh]      4.58e+08
Residuallast [MWh]           2.60e+08
Pumpspeicher [MWh]          1.41e+07
dtype: float64
```

! Wichtig 2: Residuallast

“Die Residuallast [...] entspricht dem gesamten Realisierten Stromverbrauch, abzüglich der Einspeisung von Photovoltaik-, Wind Onshore- und Wind Offshore-Anlagen.” [SMARD.de Benutzerhandbuch \(S. 53\)](#)

Die nicht durch erneuerbare Energien bediente Restlast ist die Differenz aus Stromverbrauch und der Erzeugung durch erneuerbare Energien. Die Restlast ist folglich kleiner als die von der Bundesnetzagentur veröffentlichte Residuallast. Residual- und Restlast können aus der Differenz von Netzlast und der entsprechenden erneuerbaren Stromerzeugung berechnet werden.

```
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]', 'PV_WindOnshore_WindOffshore = ['Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]', 'Photovoltaik [MWh]']

plotting_data = pd.DataFrame()
plotting_data["Netzlast [MWh]"] = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
plotting_data["volatile EE [MWh]"] = erzeugung[PV_WindOnshore_WindOffshore].sum(axis = "columns")
plotting_data["Erneuerbare [MWh]"] = erzeugung[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()

plotting_data["Residuallast BNetza [MWh]"] = verbrauch["Residuallast [MWh]"].copy()
plotting_data["Residuallast [MWh]"] = plotting_data["Netzlast [MWh]"] - plotting_data["volatile EE [MWh]"]
plotting_data["Restlast [MWh]"] = plotting_data["Netzlast [MWh]"] - plotting_data["Erneuerbare [MWh]"]

plotting_data.head()
```

	Netzlast [MWh]	volatile EE [MWh]	Erneuerbare [MWh]	Residuallast BNetzA [MWh]	Residuallast [MWh]
0	9720.75	7830.50	9277.00	1890.25	1890.25
1	9641.25	7902.00	9343.00	1739.25	1739.25
2	9609.50	8119.50	9559.50	1490.00	1490.00
3	9565.00	7919.00	9362.25	1646.00	1646.00
4	9473.50	8107.75	9540.50	1365.75	1365.75

Die von der Bundesnetzagentur veröffentlichte Residuallast `Residuallast BNetzA [MWh]` entspricht nach der Betrachtung der ersten Zeilen der selbst berechneten Residuallast `Residuallast [MWh]`. Ob dies für die gesamte Zeitreihe gilt, kann leicht mit der Methode `pd.Series.equals()` überprüft werden, die einen boolschen Wahrheitswert, d. h. True oder False, zurückgibt.

```
plotting_data['Residuallast BNetzA [MWh]'].equals(plotting_data['Residuallast [MWh]'])
```

True

Somit kann die redundante Spalte entfernt werden.

```
plotting_data.drop(['Residuallast BNetzA [MWh]'], axis = 'columns', inplace = True)
```

6.4 Jahresgang grafisch darstellen

Die Netzlast, die Erzeugung durch erneuerbare Energien sowie die Residual- und Restlast sollen im Jahresgang dargestellt werden. Zur besseren Darstellung wird nur jeder 100. Wert eingezeichnet.

6.5 Netzlast im Jahresgang

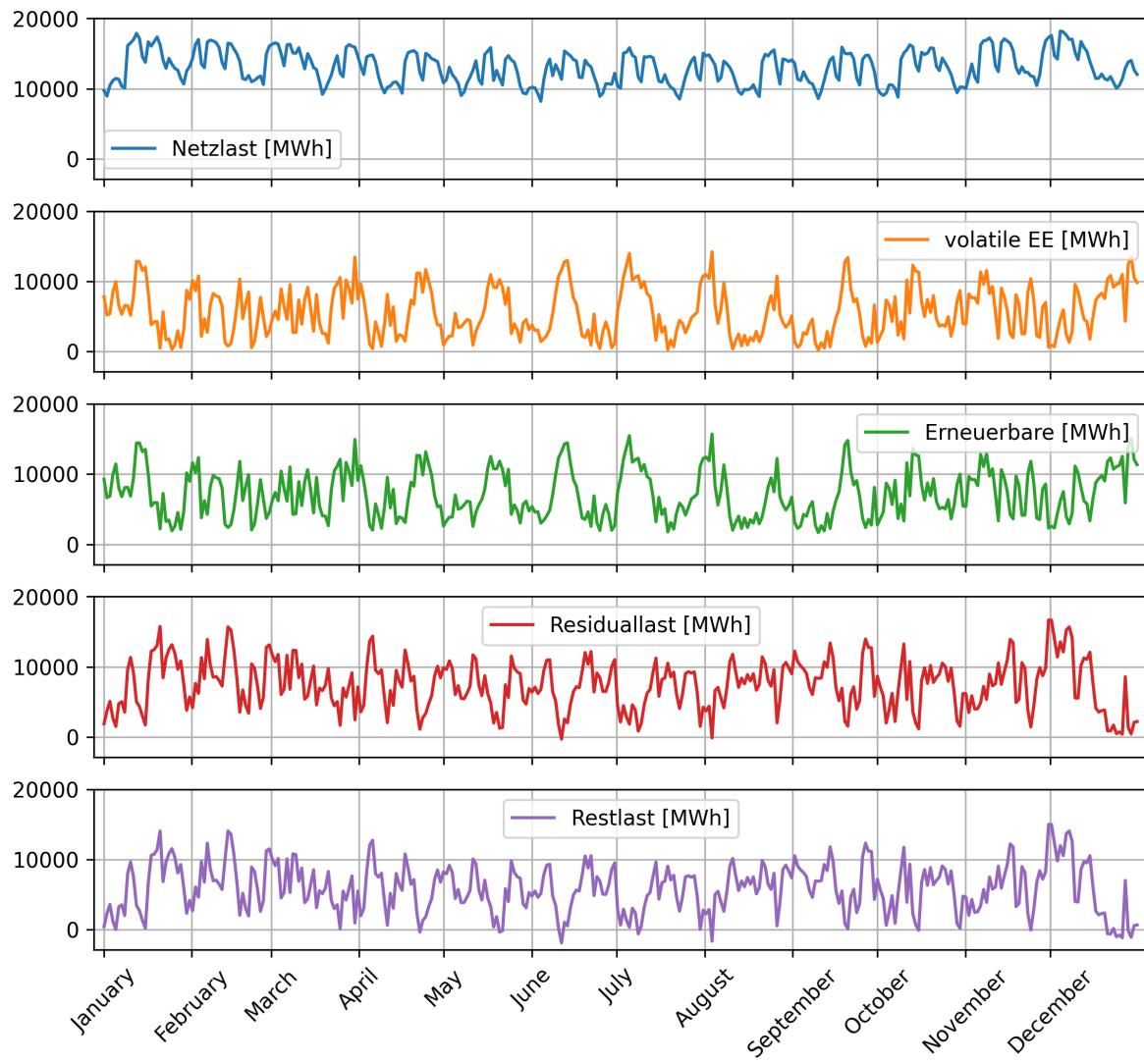


Abbildung 6.1: Netzlast im Jahresgang

6.6 Code für den Plot

```
# Position und Inhalt der x-Achsenbeschriftung finden
monate = erzeugung["Datum von"].dt.month.unique().tolist() # gibt die Zahlen 1-12 aus
```

```

## mit Pandas
monate_index = erzeugung[~erzeugung["Datum von"].dt.month.duplicated()].index
monatsnamen = erzeugung["Datum von"].iloc[monate_index].dt.strftime("%B")

## alternativ mit einer Listenoperation
# monate_index = []
# monatsnamen = []

# for i in monate:
#     monate_index.append(erzeugung.index[erzeugung["Datum von"].dt.month == i].min())
#     monatsnamen.append(erzeugung["Datum von"].iloc[monate_index[i - 1]].strftime("%B"))

# plotten jedes 100. Werts
plotting_data[::100].plot(figsize = (9, 8), subplots = True, sharey = True, xlim = (plotting_data.index[0], plotting_data.index[-1]))
plt.ylim(top = 20000)
plt.minorticks_off()
plt.xticks(monate_index, monatsnamen);

plt.show()

```

Es ist zu erkennen, dass die Netzlast dauerhaft oberhalb von 9.000 MWh liegt. Darüber hinausgehend schwankt die Netzlast im Monatsgang stark und erreicht Werte von bis zu 19.000 MWh. In jedem Monat werden Leistungen nahe des absoluten Minimums und Maximums erreicht. Im Sommer ist die Netzlast im Allgemeinen etwas niedriger als im Winter.

Die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien, die im zweiten subplot (volatile EE [MWh]) dargestellt ist, ist stark volatil. Phasen hoher Produktion wechseln sich mit Phasen geringerer Produktion ab und dauern jeweils nur einige Tage und höchstens für zwei Wochen an. Dies geht maßgeblich auf die Stromerzeugung durch Photovoltaik und Off- und Onshore Wind zurück, deren deutschlandweit kombinierte Erzeugungsleistung häufig nahe Null liegt, um anschließend ein (lokales) Produktionsmaximum zu erreichen. Im dritten subplot (Erneuerbare [MWh]) ist zu erkennen, dass die zusätzliche Einspeisung weniger volatiler erneuerbarer Energien wie Biomasse und Wasserkraft vergleichsweise gering ist. Dadurch ist die über alle erneuerbaren Erzeugungsformen summierte Stromerzeugung zwar nie Null, erreicht aber häufig eine geringe Gesamtleistung. Gleichwohl gibt es auch kurze Phasen erneuerbarer Vollversorgung bzw. Überschussproduktion, wie am Jahresgang der nicht erneuerbaren Restlast abzulesen ist.

Für die Frage nach der Herkunft des in den Pumpspeicherwerkten gespeicherten Stroms kann bereits durch die graphische Darstellung gefolgert werden, dass dieser überwiegend durch nicht erneuerbare Stromerzeuger erzeugt wurde, da die Restlast nur selten Null oder negativ ist.

Der Jahresgang der Restlast gleicht dem Erzeugungsverlauf der volatilen erneuerbaren Energien. Dies stellt für die konventionellen Kraftwerke eine Herausforderung dar. Dieser Aspekt

wird im nächsten Abschnitt vertieft.

Zunächst aber eine kleine Aufgabe:

Wie würde sich eine Verdopplung der erneuerbaren Erzeugung auf die Restlast auswirken? Stellen Sie den Effekt auf vergleichbare Weise grafisch dar (z. B. durch eine zusätzliche Spalte ‘Netzlast - 2x EE’).

💡 Tipp 5: Musterlösung Verdopplung EE

6.7 Plot

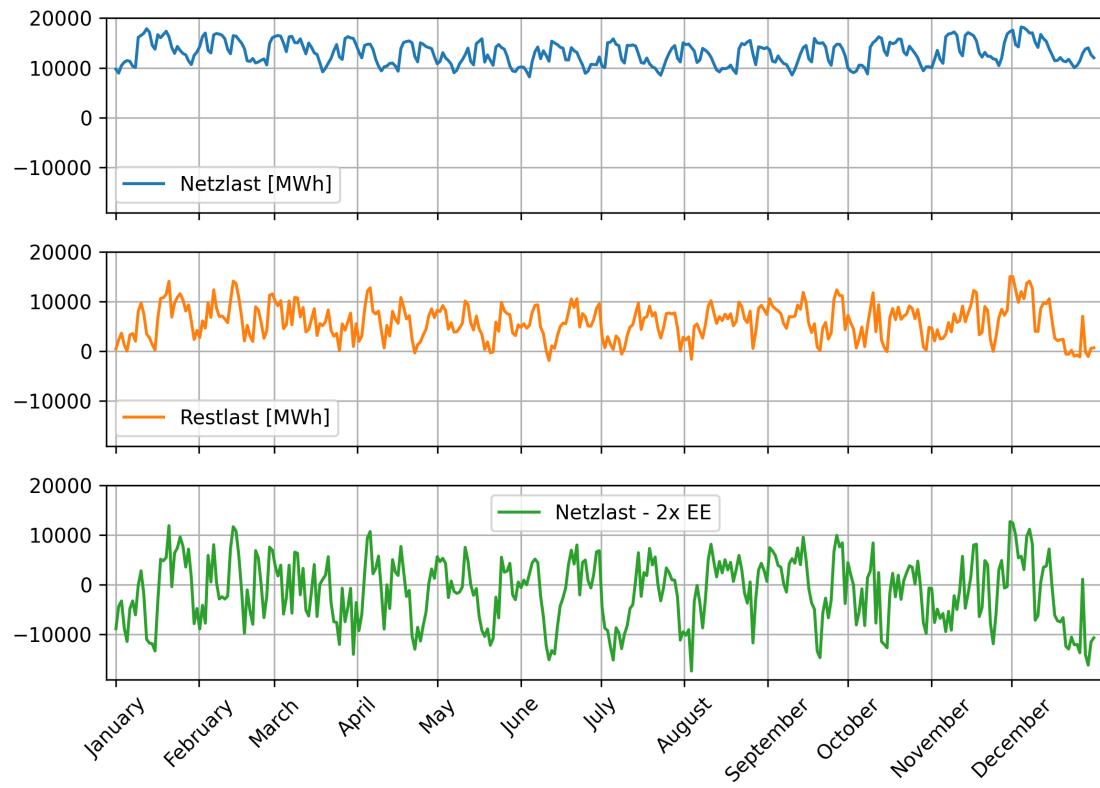


Abbildung 6.2: Musterlösung Verdopplung EE

6.8 Code

```

plotting_data_2EE = plotting_data.copy()
plotting_data_2EE["2x EE"] = plotting_data_2EE["Erneuerbare [MWh]"] * 2
plotting_data_2EE["Netzlast - 2x EE"] = plotting_data_2EE["Netzlast [MWh]"] - plotting_data_2EE["2x EE"]
plotting_data_2EE = plotting_data_2EE[["Netzlast [MWh]", "Netzlast - 2x EE"]]

# plotten jedes 100. Werts
plotting_data_2EE[::100].plot(figsize = (9, 6), subplots = True, sharey = True, xlim = (plotting_data_2EE.index[0], plotting_data_2EE.index[-1]))
plt.minorticks_off()
plt.xticks(monate_index, monatsnamen);

plt.show()

```

6.9 Mögliche Interpretation

Die Netzlast abzüglich der verdoppelten erneuerbaren Stromerzeugung nähert sich einer symmetrischen Verteilung um die Nulllinie an. Das heißt, Phasen erneuerbarer Über- und Unterproduktion halten sich ungefähr die Waage.

6.10 Hintergrund: Grund-, Mittel und Spitzenlast

Nicht alle Erzeuer sind aus technischen oder aus wirtschaftlichen Gründen gleichermaßen für den Lastfolgebetrieb geeignet. Beispielsweise sind Kohlekraftwerke weniger flexibel regelbar als Gaskraftwerke. Kernkraftwerke werden aufgrund ihrer hohen Fix- und geringen variablen Kosten bevorzugt im Grundlastbetrieb betrieben. Im Stromnetz werden drei Einsatzprofile für Kraftwerke unterschieden: Grundlast, Mittellast und Spitzenlast.

! Wichtig 3: Grund-, Mittel- und Spitzenlast

- Grundlast: Die im Jahresgang dauerhaft nachgefragte Leistung.
Kraftwerkstypen: Braunkohle, Kernkraft, Laufwasser
- Mittellast: Über die Grundlast hinausgehende, im Tages- und Jahresgang planbar nachgefragte Leistung.
Kraftwerkstypen: Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk, Steinkohle
- Spitzenlast: Über die Mittellast hinausgehende, im Tages- und Jahresgang nur kurzzeitig oder ungeplant nachgefragte Leistung.
Kraftwerkstypen: Gaskraftwerke, Pumpspeicherkraftwerke

ISPEX AG: [Grundlast](#), [Mittellast](#), [Spitzenlast](#)

Grünwald, Reinhart / Caviezel, Claudio 2017: Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke. Monitoring. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). doi: [10.5445/IR/1000102277](https://doi.org/10.5445/IR/1000102277). Seite 16.

Für die Frage, welche Kraftwerke den Grenzstrom zur Befüllung der Pumpspeicherkraftwerke liefern, ist insbesondere die Unterscheidung von im Grundlastbetrieb operierenden Kraftwerken einerseits sowie von im Mittellast- und Spitzenlastbetrieb arbeitenden Kraftwerken andererseits relevant. In Grundlast operierende Kraftwerke fahren 24 Stunden am Tag in Volllast. Beispielsweise erreichte Kernenergie im Jahr 2021 mit 8.070 Jahresvolllaststunden beinahe einen durchgehenden Volllastbetrieb [statista](#). In Volllast betriebene Kraftwerke können nicht mehr auf zusätzliche Stromnachfrage reagieren. Dies bleibt im Mittel- und Spitzenlastbetrieb arbeitenden Kraftwerken überlassen.

Somit können durch die Unterscheidung von in Grundlast und von in Mittel- bzw. Spitzenlast betriebenen Kraftwerkstypen die Kraftwerkstypen, die den zur Befüllung der Pumpspeicherkraftwerken erforderlichen Strom lieferten, eingegrenzt werden.

Die Auslastung eines Kraftwerks (bzw. einer Gruppe von Kraftwerken) kann mittels seiner Jahresvolllaststunden quantifiziert werden.

! Wichtig 4: Jahresvolllaststunden

Die Jahresvolllaststunden geben an, wie viel der 8.760 Stunden eines Jahres ein Kraftwerk bei maximaler Leistung laufen müsste, um seine Jahresproduktion zu erzeugen. [statista](#)

$$\text{Jahresvolllaststunden in h} = \frac{\text{Summe erzeugten Stroms in MWh}}{\text{installierte Leistung in MW}}$$

Die Jahresvolllaststunden können wie folgt berechnet werden. Die Anwendung der Methode `.sum` auf den Datensatz `installierte_leistung` ist nicht erforderlich, da dieser nur eine Zeile hat. Die Methode `.sum` erlaubt es aber, über den Parameter `numeric_only = True` die Datums- spalten auszuschließen.

```
# print(f"\{erzeugung.sum(numeric_only = True)}\n")
# print(installierte_leistung.sum(numeric_only = True), "\n")

# Für die Division müssen die Indizes zurückgesetzt werden
jahresvolllaststunden = erzeugung.sum(numeric_only = True).reset_index(drop = True).divide(installierte_leistung.sum(numeric_only = True))

# Index neu setzen
jahresvolllaststunden.index = erzeugung.sum(numeric_only = True).index.str.replace(pat = " [0-9]", repl = "", regex = True)

print(f"\n\nJahresvolllaststunden\n\n{jahresvolllaststunden.sort_values(ascending = False)}")
```

Jahresvolllaststunden

```
Biomasse [h]           4467.41
Braunkohle [h]         4399.96
Wind Offshore [h]      2893.34
Wasserkraft [h]        2855.83
Sonstige Erneuerbare [h] 2653.47
Steinkohle [h]          2192.86
Wind Onshore [h]        2062.55
Kernenergie [h]         1661.92
Erdgas [h]              1576.42
Sonstige Konventionelle [h] 1293.98
Pumpspeicher [h]        1188.76
Photovoltaik [h]        883.48
dtype: float64
```

Die Berechnung der Jahresstunden zeigt, dass kein Kraftwerkstyp auch nur annähernd in Vollast lief. Die höchste Auslastung weisen Biomasse und Braunkohle auf. Biomasse ist umgerechnet in 51 Prozent der 8760 Jahresstunden in Vollast gelaufen, Braunkohle in 50 Prozent. Demgegenüber erreichte der klassische Grundlasterzeuger Kernenergie nur 25 Prozent. Die in Deutschland hauptsächlich für den Mittellastbetrieb eingesetzte Steinkohle erreichte 19 Prozent. Das Jahr 2023 war insbesondere für die Kernenergie ein ungewöhnliches Jahr.

Deshalb wird der Jahrestag ausgewählter konventioneller Erzeuger dargestellt. Um eine hohe Auflösung zu erreichen, wird eine Darstellung auf Monatsbasis gewählt.

6.11 Beispiel-Code Kernenergie

```
plotting_data = erzeugung.copy()

erzeuger = "Kernenergie"

fig = plt.figure(figsize = (8, 12))
fig.suptitle(erzeuger, fontsize = 12)
for i in range(1, 13):
    plotting_data_monthly = plotting_data[plotting_data['Datum von'].dt.month == i]
    ax = fig.add_subplot(12, 1, i)
    ax.plot(plotting_data_monthly[erzeuger + " [MWh]"])
    plt.margins(x = 0.01)
```

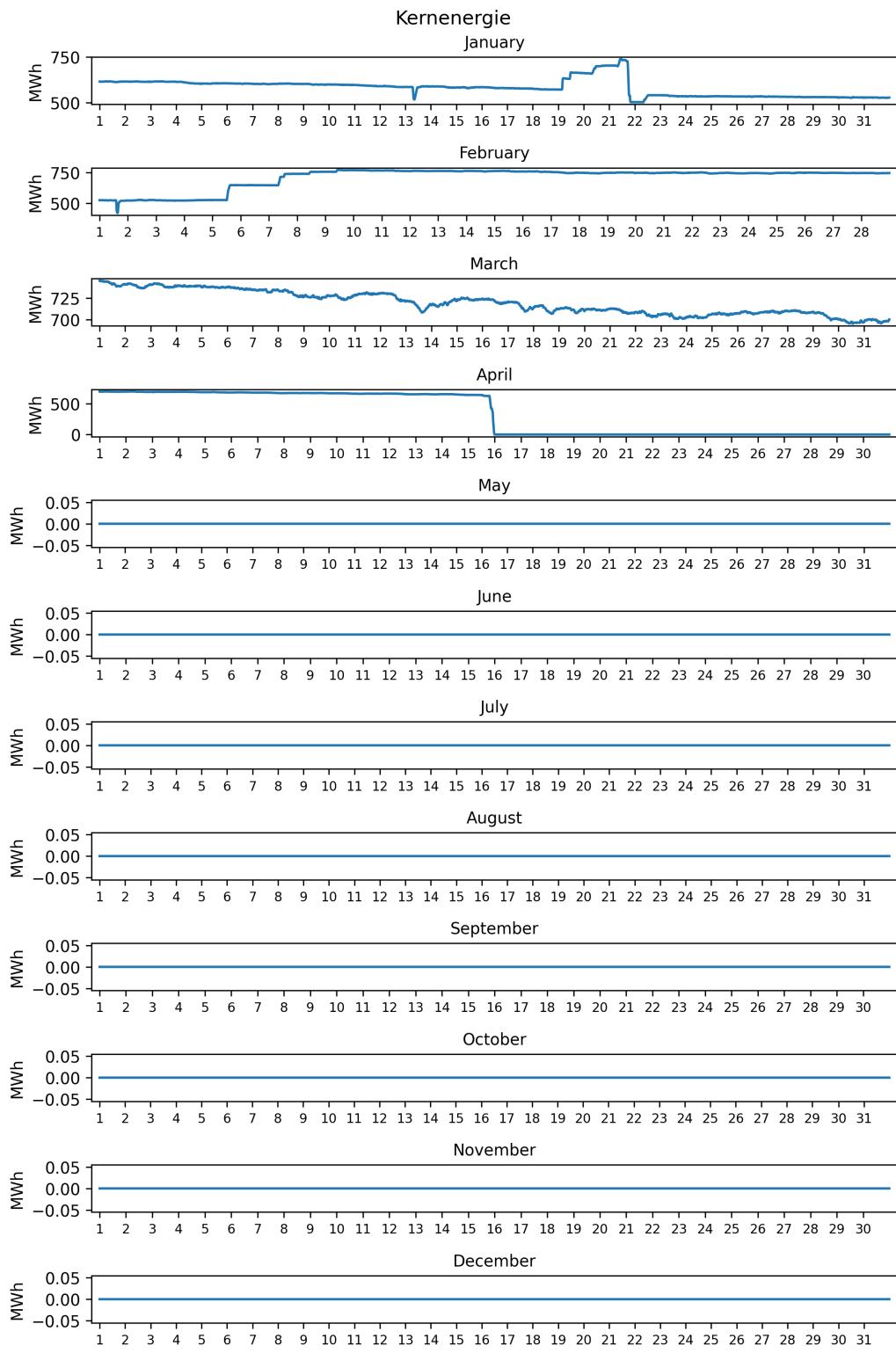
```
ax.set_ylabel(ylabel = "MWh")

# Titel erzeugen
plt.title(label = plotting_data_monthly['Datum von'].head(1).dt.strftime('%B').item(), fontweight = 'bold')

# xticks erzeugen
tage_index = plotting_data_monthly[~plotting_data_monthly["Datum von"].dt.day.duplicated()]
tagesnamen = plotting_data_monthly["Datum von"].dt.day.unique()
plt.xticks(tage_index, tagesnamen, fontsize = 8)

plt.tight_layout()
plt.show()
```


6.12 Kernenergie



38
Abbildung 6.3: Jahresgang Kernenergie

6.13 Braunkohle

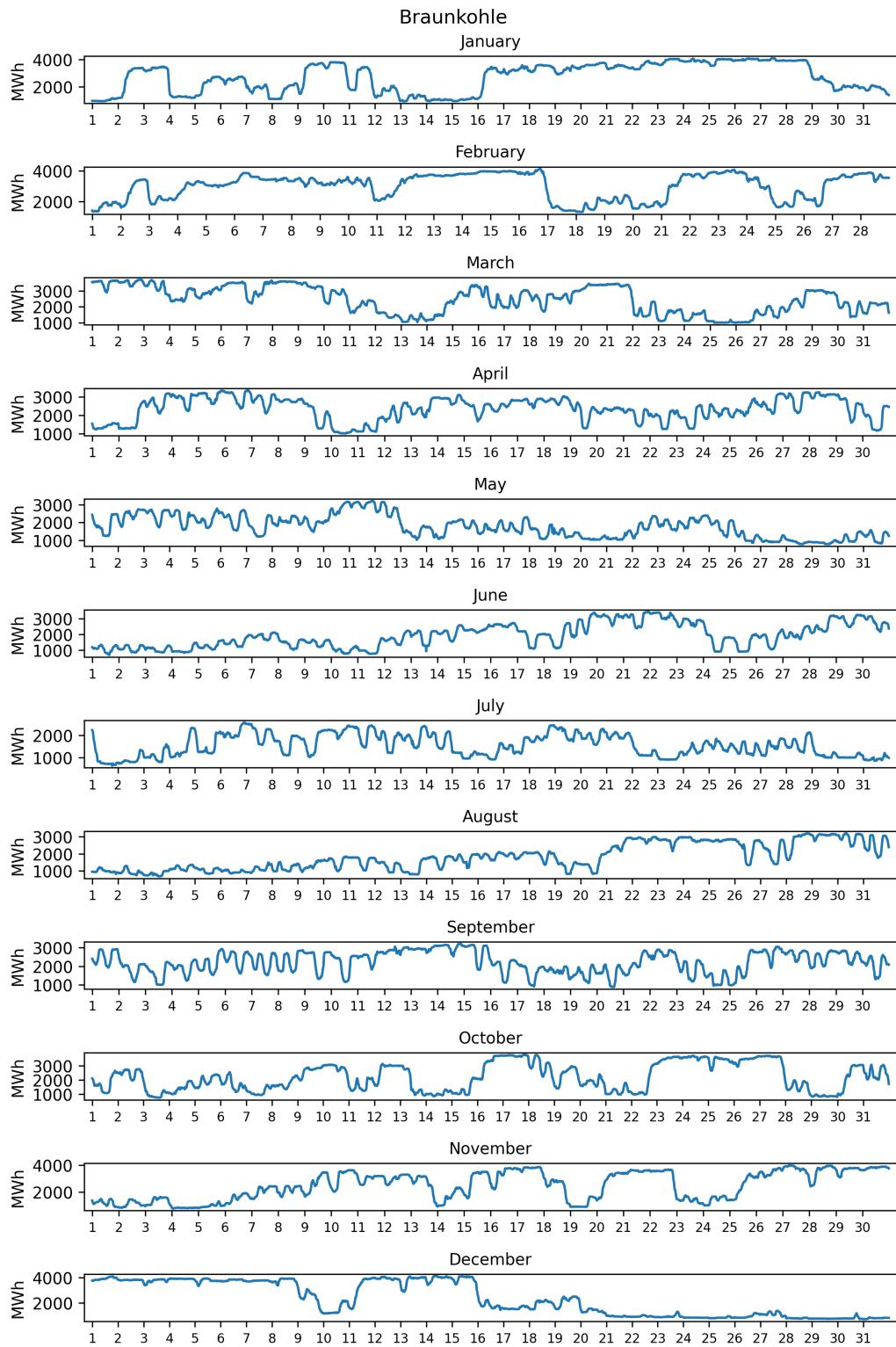


Abbildung 6.4: Jahresgang Braunkohle ⁴⁰

6.14 Steinkohle

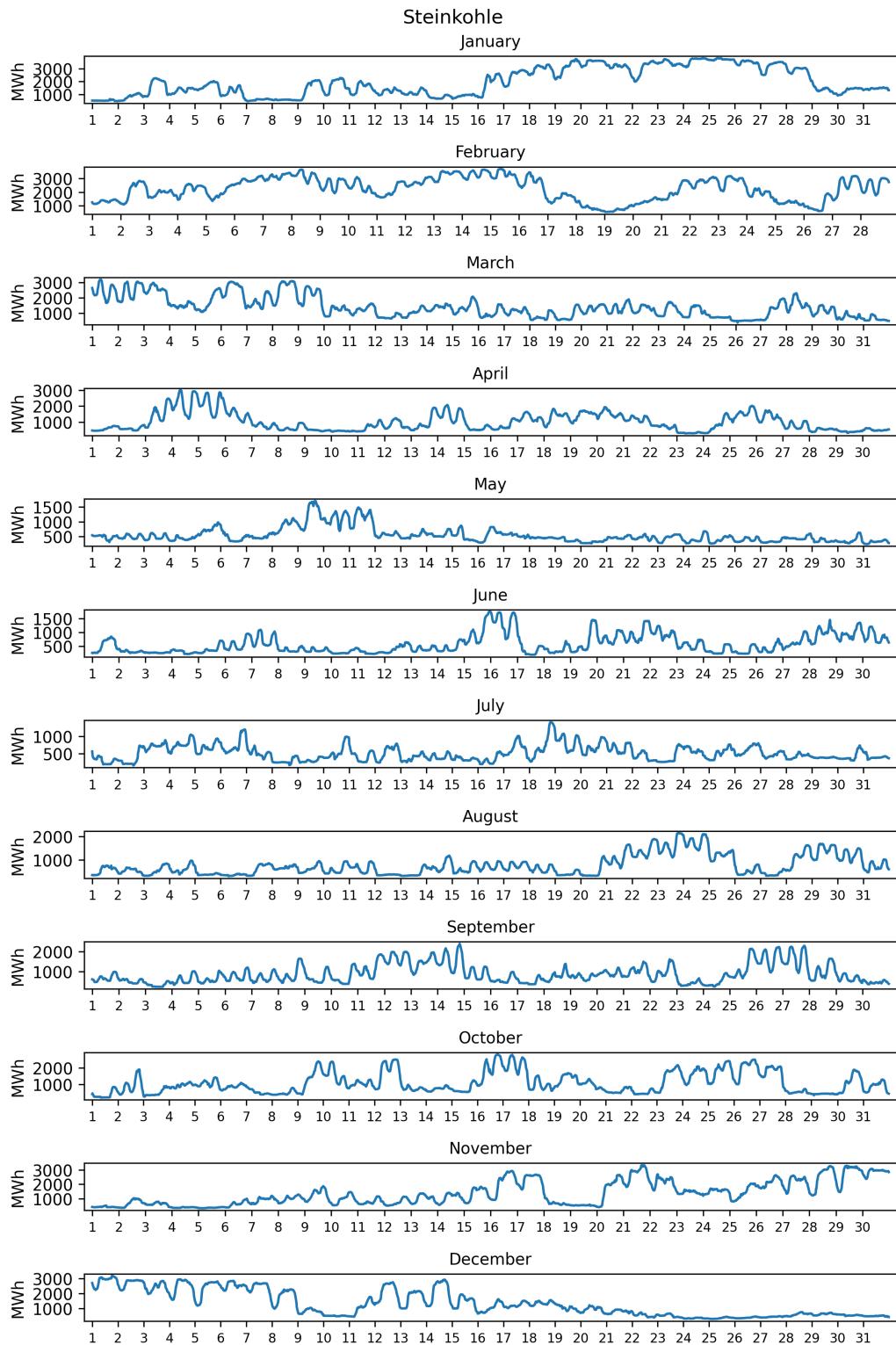
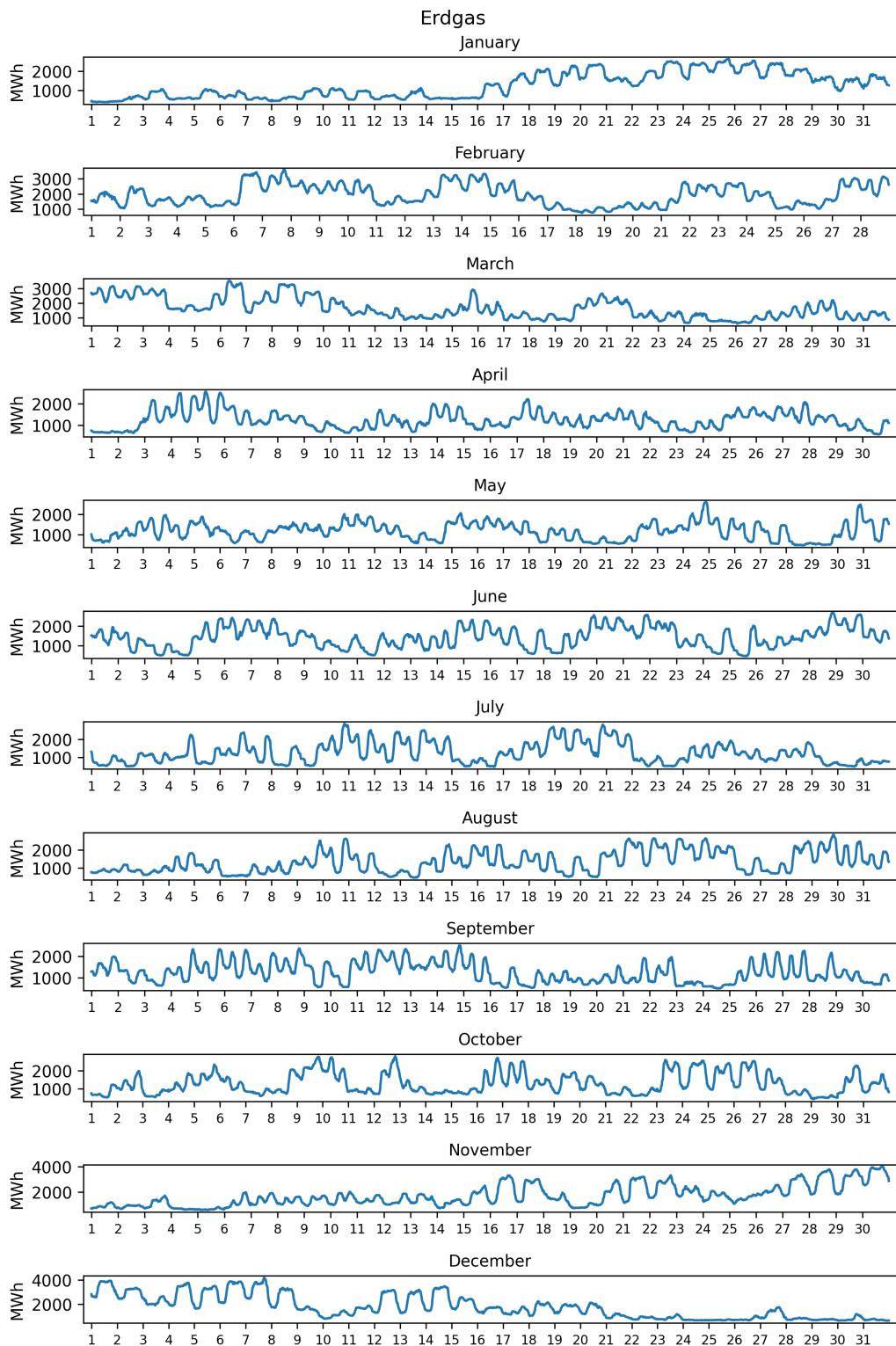


Abbildung 6.5: Jahresgang Steinkohle 42

6.15 Erdgas



44
Abbildung 6.6: Jahresgang Erdgas

Im Reiter Kernenergie ist zu erkennen, dass 2023 die letzten deutschen Atomkraftwerke Emsland, Isar 2 und Neckarwestheim 2 vom Netz genommen wurden. Für diese wurde im Herbst 2022 aufgrund der Energiekrise ein über den ursprünglichen Abschalttermin zum 31. Dezember 2022 hinausgehender Streckbetrieb beschlossen. [BMWK](#)

Bis zu welchem Tag wurde der Streckbetrieb genehmigt? Bestimmen Sie den Zeitpunkt der Abschaltung anhand des Datensatzes erzeugung. Geben Sie den Zeitpunkt über die Spalte ‘Datum bis’ in deutscher Datumsformierung ‘TT. Monat YYYY um HH:MM Uhr’ aus.

 Tipp 7: Lösungshinweis und Musterlösung

Mit der Abschaltung erreichte die Stromproduktion durch Kernenergie den Wert 0. Die Abschaltung wurde in der Periode vollendet, die der ersten Periode mit der Stromproduktion durch Kernenergie mit dem Wert 0 vorausging.

Die Ausgabe einer als datetime formatierten Spalten können Sie mit der Methode [pandas.Series.dt.strftime](#) formatieren.

Tipp 7: Musterlösung

In der graphischen Darstellung des Jahresgangs wurde nur jeder 100. Wert geplottet, sodass es möglich ist, dass die Stromerzeugung bereits vor der endgültigen Abschaltung den Wert Null erreichte. Es ist deshalb zuverlässiger, den Datensatz rückwärts zu durchsuchen.

In der Vorwärtssuche wird mit der Methode `.eq()` die Position des ersten Auftretens des Werts 0 bestimmt und 1 subtrahiert. In der Rückwärtssuche wird mit der Methode `.gt()` die Position des ersten Werts bestimmt, der größer als 0 ist.

```
print(f"Vorwärtssuche: erzeugung['Kernenergie [MWh]'].eq(0).idxmax() - 1\n{erzeugung['Kernenergie [MWh]'].tail(1)}\n\n# rückwärts\nprint(f"Rückwärtssuche: position := erzeugung['Kernenergie [MWh]'].iloc[::-1].gt(0).idxmax()\n\nprint(f"erzeugung['Datum bis'].iloc[position].strftime('%d. %B %Y um %H:%M Uhr')\n{erzeugung['Datum bis'].tail(1)}
```

Vorwärtssuche: erzeugung['Kernenergie [MWh]'].eq(0).idxmax() - 1
10075

Rückwärtssuche: position := erzeugung['Kernenergie [MWh]'].iloc[::-1].gt(0).idxmax()
10075

erzeugung['Datum bis'].iloc[position].strftime('%d. %B %Y um %H:%M Uhr')
16. April 2023 um 00:00 Uhr

Die Berechnung der Jahresvollaststunden und die Visualisierung der Jahresgänge zeigen, dass es durch den hohen Anteil volatiler erneuerbarer Stromerzeugung im deutschen Stromsystem keine Grundlast mehr gibt, die von konventionellen Erzeugern bedient werden kann. Dies bedeutet, dass alle nicht erneuerbaren Erzeuger im Lastfolgebetrieb arbeiten. Dies kann am Beispiel der Steinkohle verdeutlicht werden, deren erzielte Jahresvollaststunden näher an der klassischen Spitzenlasterzeugung aus Erdgas als an der Mittellasterzeugung durch Braunkohle liegt. Die Auslastung eines Stromerzeugers kann mit einer sortierten Jahresdauerlinie dargestellt werden.

Wichtig 5: sortierte Jahresdauerlinie

Die sortierte Jahresdauerlinie ist ein Diagramm der absteigend sortierten Daten.

<https://www.youtube.com/watch?v=rMxYJuGqR4s>

Energietechnik. 2 Einführung. 2.13 Sortierte Jahresdauerlinie von Henrik te Heesen ist

6.16 Plot

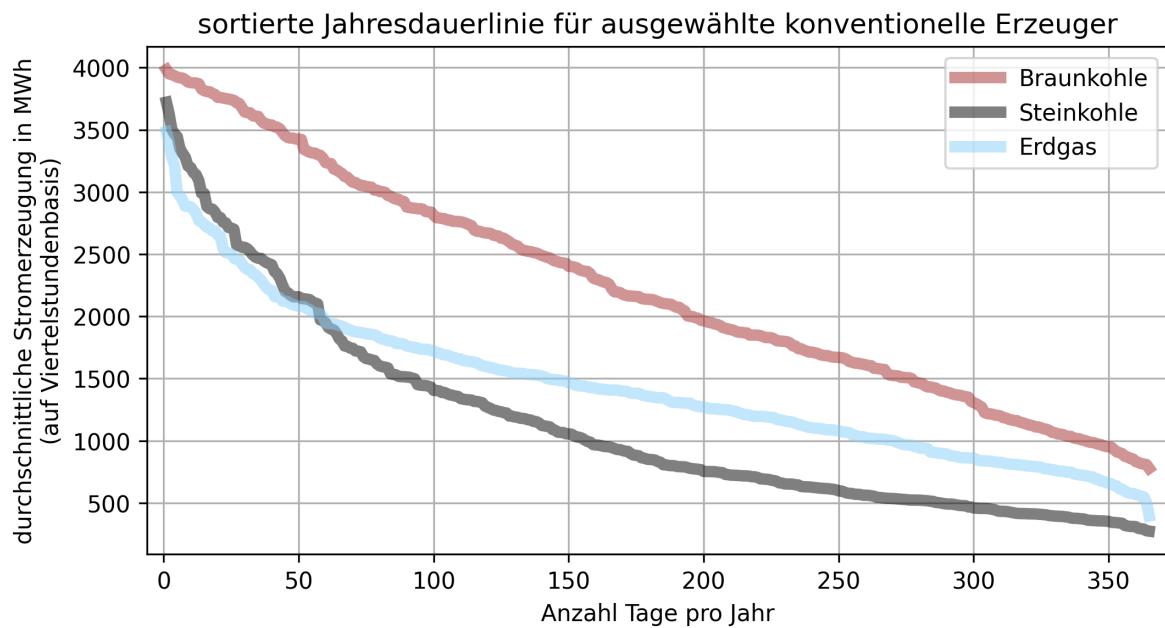


Abbildung 6.7: sortierte Jahresdauerlinie ausgewählter konventioneller Erzeuger

6.17 Code für den Plot

```
# Daten nach Tag gruppieren und durch Mittelwertbildung auf Tagesbasis aggregieren.
braunkohle_daily = erzeugung['Braunkohle [MWh]'].groupby(erzeugung["Datum von"].dt.dayofyear)
steinkohle_daily = erzeugung['Steinkohle [MWh]'].groupby(erzeugung["Datum von"].dt.dayofyear)
erdgas_daily = erzeugung['Erdgas [MWh]'].groupby(erzeugung["Datum von"].dt.dayofyear).mean()

## Zur Kontrolle
## print(erzeugung["Datum von"].dt.dayofyear)
## print(f"\n\nbraunkohle_daily.head()\n{braunkohle_daily.head()}\n\n")
##     f"Zum Vergleich:\nerzeugung['Braunkohle [MWh]'].iloc[[0, 1, 95, 96]]\n{erzeugung['Braunkohle [MWh]'].iloc[[0, 1, 95, 96]]}"
##     f"erzeugung['Braunkohle [MWh]'].iloc[0:96].mean()\n{erzeugung['Braunkohle [MWh]'].iloc[0:96].mean()}\n\n"

# Liniendiagramm plotten
```

```

# Index um 1 verschieben, weil Index mit 0 beginnt, aber die Anzahl der Tage dargestellt wird
linienstärke = 5
plt.figure(figsize = (8, 4))

braunkohle_daily = braunkohle_daily.sort_values(ascending = False, ignore_index = True)
braunkohle_daily.index += 1
braunkohle_daily.plot.line(lw = linienstärke, color = 'brown', alpha = 0.5, label = 'Braunkohle')

steinkohle_daily = steinkohle_daily.sort_values(ascending = False, ignore_index = True)
steinkohle_daily.index += 1
steinkohle_daily.plot.line(lw = linienstärke, color = 'black', alpha = 0.5, label = 'Steinkohle')

erdgas_daily = erdgas_daily.sort_values(ascending = False, ignore_index = True)
erdgas_daily.index += 1
erdgas_daily.plot.line(lw = linienstärke, color = 'lightskyblue', alpha = 0.5, label = 'Erdgas')

plt.title(label = "sortierte Jahresdauerlinie für ausgewählte konventionelle Erzeuger")
plt.grid()
plt.legend()
plt.ylabel('durchschnittliche Stromerzeugung in MWh\n(auf Viertelstundenbasis)')
plt.xlabel('Anzahl Tage pro Jahr')

plt.margins(x = 0.02)
plt.show()

```

Beim Vergleich der erzielten Jahresvollaststunden konnte festgestellt werden, dass die Auslastung der Steinkohle eher der des Spitzenlasterzeugers Erdgas als des Mittellasterzeugers Braunkohle entspricht. In der grafischen Darstellung der sortierten Jahresdauerlinien wird darüber hinaus deutlich, dass das Erzeugungsprofil der Steinkohle dem der Braunkohle sogar weniger ähnelt als dem von Erdgas.

Bisher wurde ausschließlich die Erzeugung durch konventionelle Kraftwerke betrachtet. Biomasse und Braunkohle erreichen vergleichbare Jahresvollaststunden, sodass ein Vergleich bei der Erzeuger interessant sein könnte.

Stellen Sie den Jahresgang und die Jahresdauerlinien für Biomasse und Braunkohle dar.

 Tipp 8: Musterlösung Erzeugungsprofile von Biomasse und Braunkohle

6.18 Code

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Deklarieren der Anzahl der Nachkommastellen
pd.set_option("display.precision", 2)

# Datensätze werden eingelesen

# !
# Für die eigene Anwendung muss der Dateipfad an den korrekten Speicherort der runtergeladenen Datei angepasst werden
# !

erzeugung0_ms = pd.read_csv("01-daten/Realisierte_Erzeugung_202301010000_202401010000_Viertelstundenbasis.csv",
                            sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y %H:%M")

# Zeichenkette " Originalauflösungen" entfernen
erzeugung0_ms.columns = erzeugung0_ms.columns.str.replace(pat = " Originalauflösungen", replace = "")

print(erzeugung0_ms.head(10))

# Daten der zu betrachtenden Erzeugungsarten nach Tag gruppieren und durch Mittelwertbildung zusammenführen
braunkohle_daily_ms = erzeugung0_ms['Braunkohle [MWh]'].groupby(erzeugung0_ms["Datum von"]).mean()
biomasse_daily_ms = erzeugung0_ms['Biomasse [MWh]'].groupby(erzeugung0_ms["Datum von"]).dt.mean()

# Liniendiagramm plotten
linienstärke = 5
plt.figure(figsize = (8, 4))

braunkohle_daily_ms = braunkohle_daily_ms.sort_values(ascending = False, ignore_index = True)
braunkohle_daily_ms.index += 1
braunkohle_daily_ms.plot.line(lw = linienstärke, color = 'brown', alpha = 0.5, label = 'Braunkohle')

biomasse_daily_ms = biomasse_daily_ms.sort_values(ascending = False, ignore_index = True)
biomasse_daily_ms.index += 1
biomasse_daily_ms.plot.line(lw = linienstärke, color = 'greenyellow', alpha = 0.5, label = 'Biomasse')

plt.title(label = "sortierte Jahressdauerlinie für ausgewählte Erzeuger")
plt.grid()
plt.legend()
plt.ylabel('durchschnittliche Stromerzeugung in MWh\n(auf Viertelstundenbasis)')
plt.xlabel('Anzahl Tage pro Jahr')

plt.margins(x = 0.02)

# Lastgang: Hier den Erzeugungstyp auswählen, je nachdem, welcher Lastgang geplottet werden soll
erzeuger = "Biomasse"          50
#erzeuger = "Braunkohle"

fig = plt.figure(figsize = (8, 12))
fig.suptitle(erzeuger, fontsize = 12)
for i in range(1, 13):
    plotting_data_monthly = erzeugung0_ms[erzeugung0_ms['Datum von'].dt.month == i]
    ax = fig.add_subplot(12, 1, i)

```

6.19 Text-Output

	Datum von	Datum bis	Biomasse [MWh]	Wasserkraft [MWh]	\
0	2023-01-01 00:00:00	2023-01-01 00:15:00	1094.25	320.00	
1	2023-01-01 00:15:00	2023-01-01 00:30:00	1091.25	317.50	
2	2023-01-01 00:30:00	2023-01-01 00:45:00	1090.25	317.25	
3	2023-01-01 00:45:00	2023-01-01 01:00:00	1089.25	321.50	
4	2023-01-01 01:00:00	2023-01-01 01:15:00	1085.25	315.25	
5	2023-01-01 01:15:00	2023-01-01 01:30:00	1087.75	304.75	
6	2023-01-01 01:30:00	2023-01-01 01:45:00	1086.50	303.50	
7	2023-01-01 01:45:00	2023-01-01 02:00:00	1085.25	304.25	
8	2023-01-01 02:00:00	2023-01-01 02:15:00	1080.25	308.25	
9	2023-01-01 02:15:00	2023-01-01 02:30:00	1084.25	305.50	
	Wind Offshore [MWh]	Wind Onshore [MWh]	Photovoltaik [MWh]		\
0	684.25	7145.75	0.50		
1	743.50	7158.25	0.25		
2	817.00	7302.25	0.25		
3	814.50	7104.25	0.25		
4	785.50	7322.00	0.25		
5	898.50	7332.75	0.25		
6	943.75	7259.75	0.25		
7	958.25	7390.50	0.25		
8	1009.75	7229.00	0.50		
9	967.00	7421.75	0.25		
	Sonstige Erneuerbare [MWh]	Kernenergie [MWh]	Braunkohle [MWh]		\
0	32.25	615.25	962.75		
1	32.25	614.75	963.25		
2	32.50	615.00	966.50		
3	32.50	614.50	966.75		
4	32.25	614.50	969.00		
5	32.25	614.75	965.75		
6	32.25	614.75	967.50		
7	32.25	614.75	964.25		
8	32.25	615.00	963.00		
9	32.25	614.75	967.00		
	Steinkohle [MWh]	Erdgas [MWh]	Pumpspeicher [MWh]		\
0	517.00	429.75	13.50		
1	518.00	429.50	9.75		

2	517.00	432.00	9.75
3	515.50	430.50	9.75
4	513.25	391.25	26.50
5	514.00	389.50	45.00
6	513.75	393.75	50.50
7	511.00	393.50	50.50
8	509.75	391.50	41.25
9	509.00	394.50	40.75

Sonstige Konventionelle [MWh]

0	307.25
1	307.25
2	308.25
3	306.00
4	306.75
5	305.00
6	302.00
7	304.50
8	303.00
9	303.75

6.20 Jahresgang Biomasse

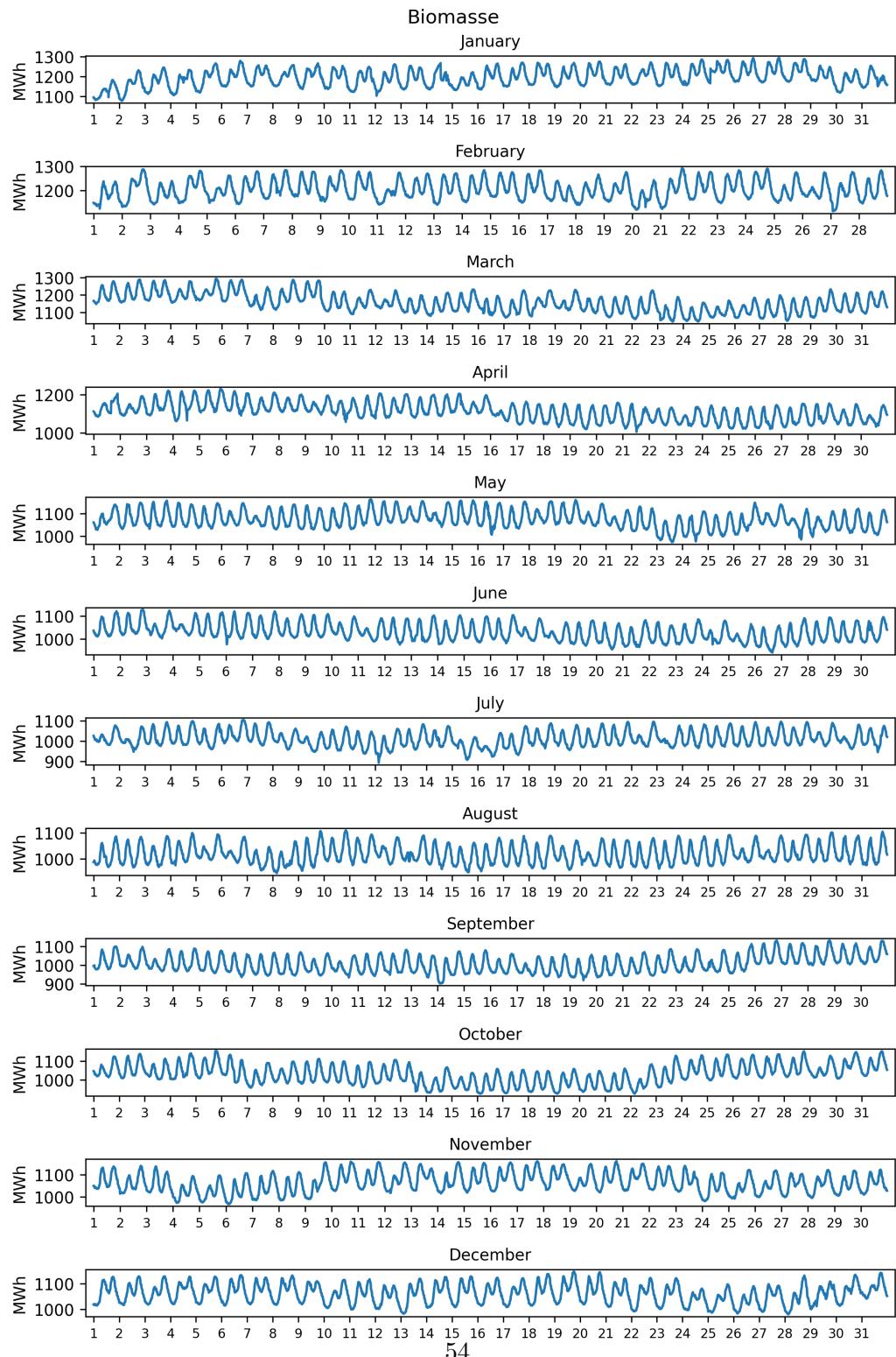


Abbildung 6.8: Jahresgang Biomasse

6.21 Jahresgang Braunkohle

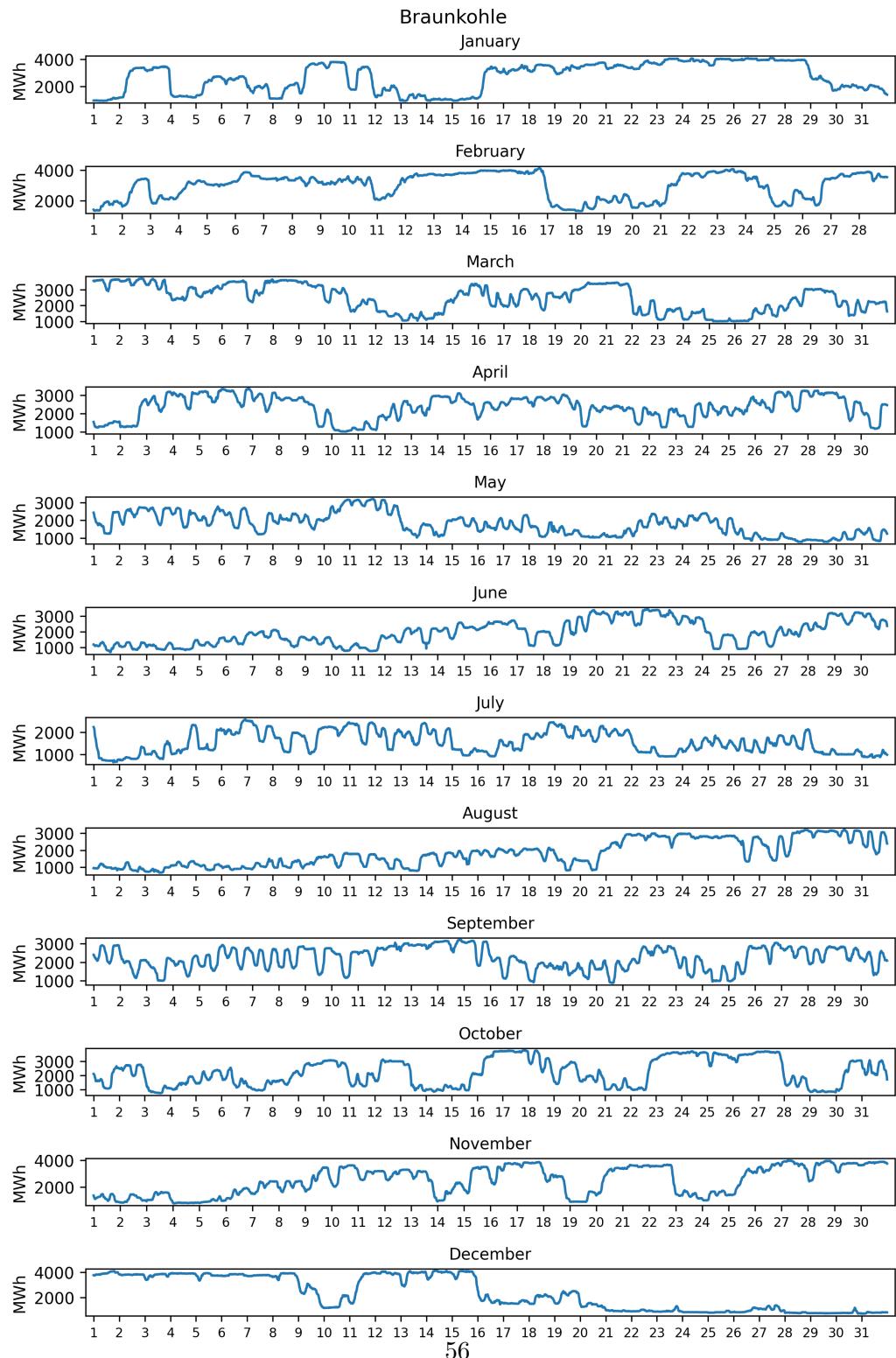


Abbildung 6.9: Jahresgang Biomasse

6.22 Sortierte Jahresdauerlinien

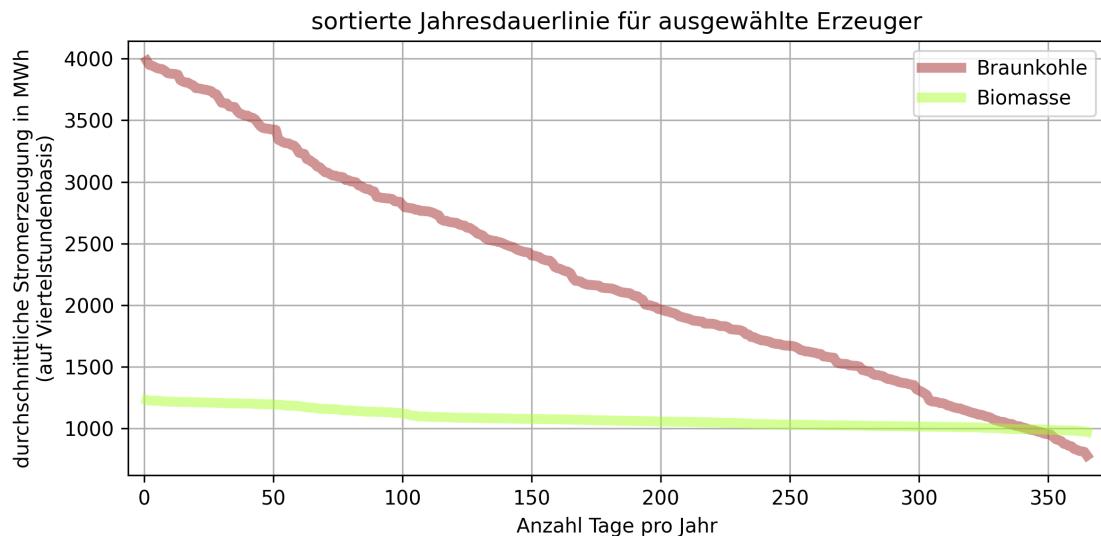


Abbildung 6.10: Sortierte Jahresdauerlinien für ausgewählte Erzeuger

Musterlösung von Marc Sönnecken. Der Code und die durch Abschnitte des Codes erzeugten Outputs wurden in Reiter aufgeteilt. Für die Kompatibilität mit diesem Skript wurden der Dateipfad und die Objektbezeichnungen angepasst. Für die Barrierefreiheit wurden die verwendeten Farben angepasst.

6.23 Bestimmung des in den Pumpspeichern gespeicherten Stroms

In den bisherigen Betrachtungen wurde gezeigt, dass zwei grundsätzliche Szenarien im Stromnetz zu unterscheiden sind:

1. Restlast Null oder negativ: Grenzstrom wird von erneuerbaren Energien produziert.
2. Restlast positiv: Grenzstrom wird von konventionellen Energien im Lastfolgebetrieb produziert.

Den Jahresgang des Stromverbrauchs durch Pumpspeicher und das jeweils bestehende Szenario zeigt folgender Graph, der jeden 100. Wert der Datenreihe `verbrauch['Pumpspeicher [MWh]']` darstellt.

6.24 Plot

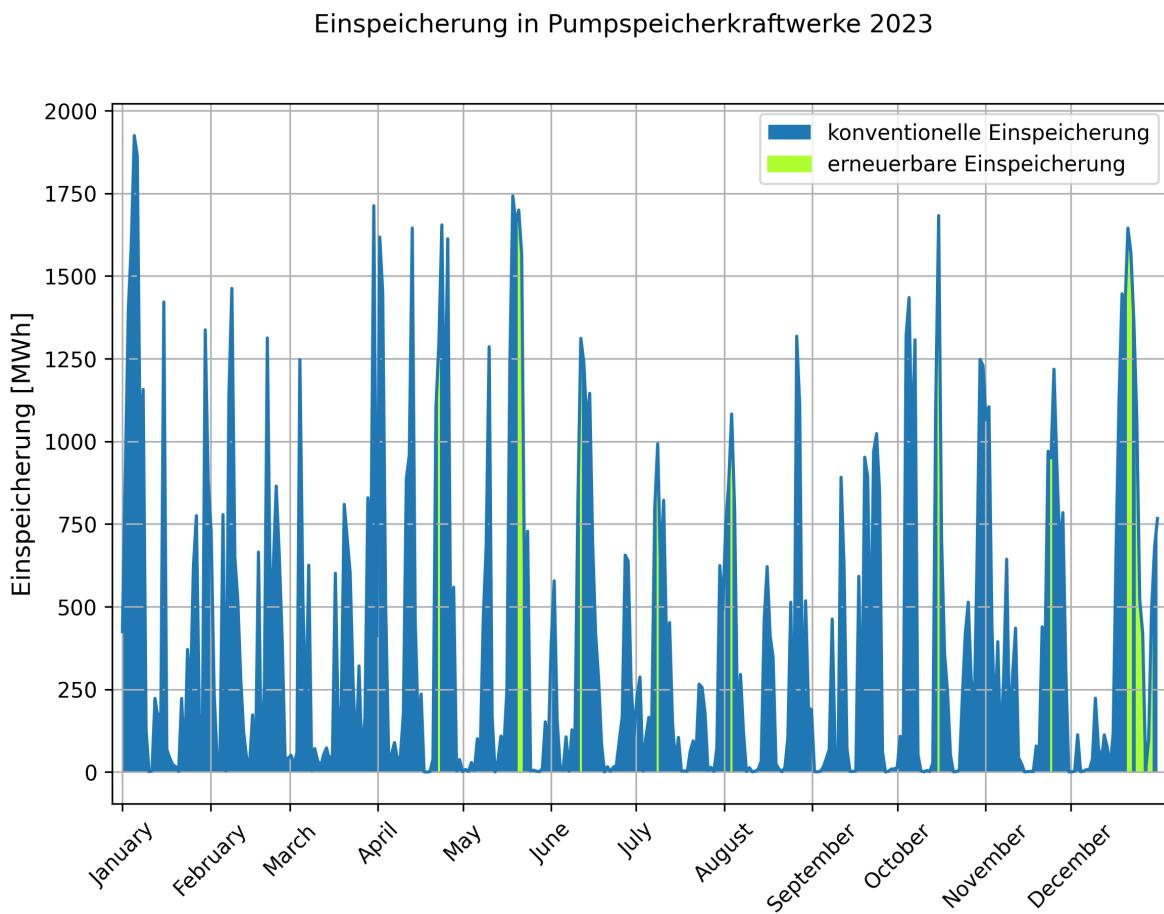


Abbildung 6.11: Einspeicherung in Pumpspeicherkraftwerke 2023

6.25 Code für den Plot

```
# Restlast berechnen
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]']

restlast = pd.DataFrame()
restlast["Netzlast [MWh]"] = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
restlast["Erneuerbare [MWh]"] = erzeugung[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()
restlast["Restlast [MWh]"] = restlast["Netzlast [MWh]"] - restlast["Erneuerbare [MWh]"]
restlast = restlast["Restlast [MWh]"]
```

```

# xticks berechnen
monate_index = erzeugung[~erzeugung["Datum von"].dt.month.duplicated()].index
monatsnamen = erzeugung["Datum von"].iloc[monate_index].dt.strftime("%B")

# plotten jedes n. Werts
schritt = 100
verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'][::schritt].plot(figsize = (9, 6), xlim = (verbrauch.index.min(),
plt.ylabel('Einspeicherung [MWh]', fontsize = 12)
plt.suptitle('Einspeicherung in Pumpspeicherkraftwerke 2023')

# xticks eintragen
plt.minorticks_off()
plt.xticks(monate_index, monatsnamen);

# Kurve unterlegen: plt.fill_between bietet einen praktischen Parameter where
plt.fill_between(x = verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].index[::schritt], y1 = verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].min(), y2 = verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].max(), alpha = 0.5)
plt.fill_between(x = verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].index[::schritt], y1 = verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].min(), y2 = verbrauch['Pumpspeicher [MWh]'].max(), alpha = 0.5)

plt.legend()
plt.show()

```

Die Grafik spiegelt die bei der Bestimmung der Residual- und Restlast gewonnene Erkenntnis wider, dass mit dem im Jahr 2023 realisierten Strommix zusätzliche Stromnachfrage vorwiegend konventionell bedient wird.

Wie sähe die Grafik aus, wenn die Einspeisung aus erneuerbaren Energien doppelt so hoch ausgefallen wäre?

💡 Tipp 9: Musterlösung Einspeicherung bei doppelter erneuerbarer Erzeugung

Für die Berechnung genügt es, die summierte Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit 2 zu multiplizieren.

```

restlast = pd.DataFrame()
restlast["Netzlast [MWh]"] = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
restlast["Erneuerbare [MWh]"] = erzeugung[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()
restlast["Restlast [MWh]"] = restlast["Netzlast [MWh]"] - 2 * restlast["Erneuerbare [MWh]"]
restlast = restlast["Restlast [MWh]"]

```

Einspeicherung in Pumpspeicherkraftwerke 2023
bei Verdopplung der erneuerbaren Stromerzeugung

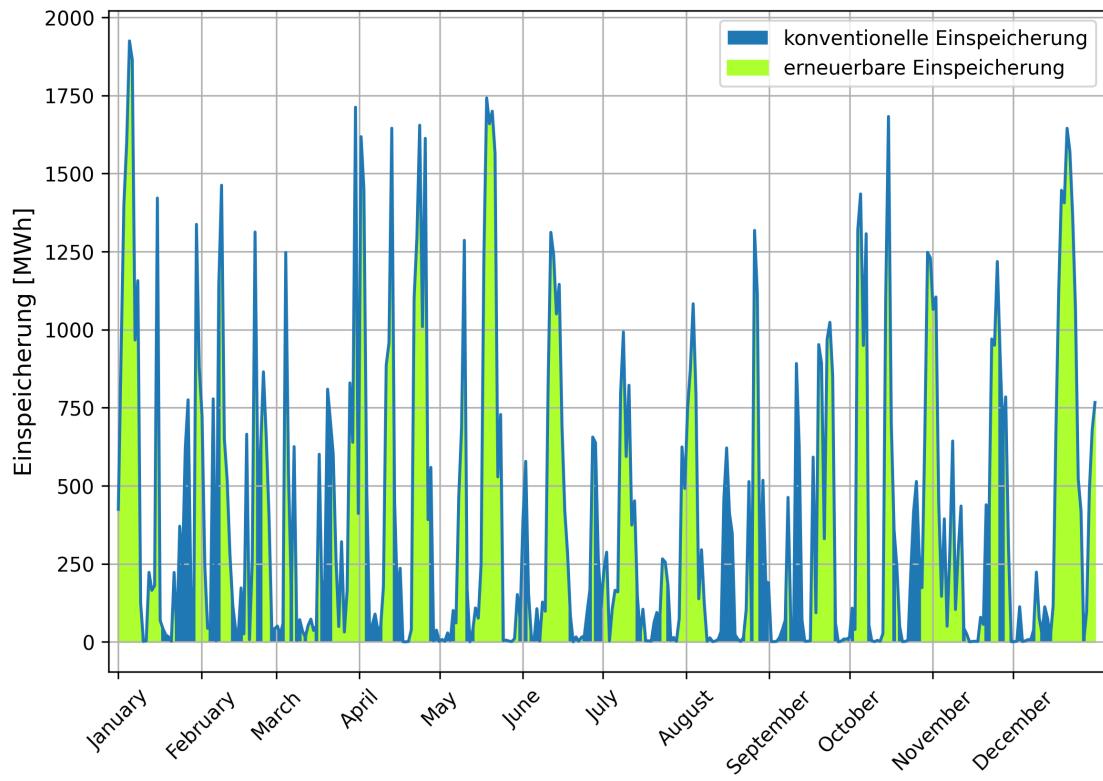


Abbildung 6.12: Einspeicherung in Pumpspeicherkraftwerke 2023

6.26 Aufgabe explorative Datenanalyse

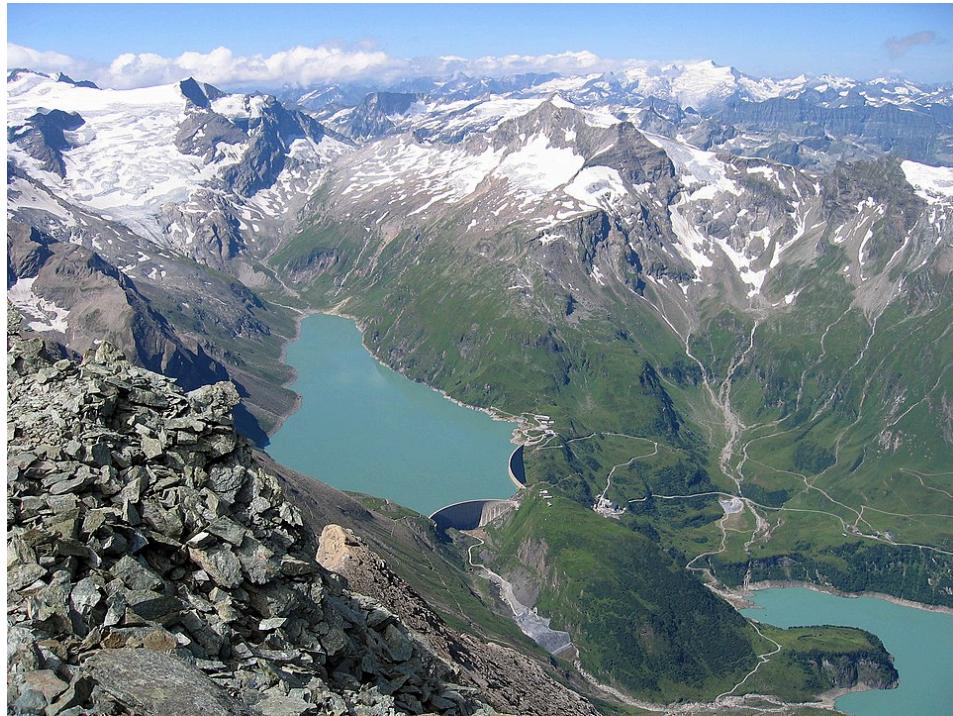


Abbildung 6.13:

Ober- und Hauptstufe der Kraftwerksgruppe: Mooser- und Wasserfallboden mit Karlingerkees links oben, im Hintergrund rechts der Großvenediger von Tigerente ist lizenziert unter CC BY-SA 3.0 und abrufbar auf [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org). 2008

Stellen Sie den Jahresgang der Pumpspeicher in Österreich 2023 dar. Hinweise zum Herunterladen der Daten finden Sie in Abschnitt Kapitel 5.6.



⚠ Warning 4: Zeitumstellung im österreichischen Datensatz

Im österreichischen Datensatz wird durch die Umstellung von Sommer- auf Winterzeit am letzten Sonntag im Oktober die Stunde 2 Uhr morgens doppelt eingetragen (dafür fehlt eine Stunde bei der Umstellung von Winter- auf Sommerzeit am letzten Sonntag im März). Die doppelte Stunde wird im Datensatz mit 2A bzw. 2B gekennzeichnet. (Mitteilung Austrian Power Grid AG vom 13.08.2024)

	A	B	C	D	E
1	Zeit von [CET/CEST]	Zeit bis [CET/CEST]	Wind [MW]	Solar [MW]	Biom
28899	29.10.2023 01:15:00	29.10.2023 01:30:00	396	0	
28900	29.10.2023 01:30:00	29.10.2023 01:45:00	360	0	
28901	29.10.2023 01:45:00	29.10.2023 2A:00:00	308	0	
28902	29.10.2023 2A:00:00	29.10.2023 2A:15:00	300	0	
28903	29.10.2023 2A:15:00	29.10.2023 2A:30:00	296	0	
28904	29.10.2023 2A:30:00	29.10.2023 2A:45:00	288	0	
28905	29.10.2023 2A:45:00	29.10.2023 2B:00:00	272	0	
28906	29.10.2023 2B:00:00	29.10.2023 2B:15:00	264	0	
28907	29.10.2023 2B:15:00	29.10.2023 2B:30:00	260	0	
28908	29.10.2023 2B:30:00	29.10.2023 2B:45:00	252	0	
28909	29.10.2023 2B:45:00	29.10.2023 03:00:00	240	0	
28910	29.10.2023 03:00:00	29.10.2023 03:15:00	244	0	

Abbildung 6.14: Zeitumstellung im österreichischen Datensatz

Damit die Datumsspalten korrekt eingelesen werden können, müssen die Einträge bereinigt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Zeichenfolgen “2A” und “2B” mit der Methode `str.replace()` durch “02” zu ersetzen (wodurch eine Dublette im Datensatz erzeugt wird).

 Musterlösung Aufgabe explorative Datenanalyse

6.27 Code

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Deklarieren der Anzahl der Nachkommastellen
pd.set_option("display.precision", 2)

# Datensatz wird eingelesen und in der Variable erzeugung0_austria_ms gespeichert

# !
# Für die eigene Anwendung muss der Dateipfad an den korrekten Speicherort der runtergeladenen Datei geändert werden
# !
erzeugung0_austria_ms = pd.read_csv("01-daten/AGPT_2022-12-31T23_00_00Z_2023-12-31T23_00_00Z.csv",
                                     sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", parse_dates = True)

# string replace & als Datum einlesen
## Spalte Zeit von [CET/CEST]
erzeugung0_austria_ms['Zeit von [CET/CEST]'] = erzeugung0_austria_ms['Zeit von [CET/CEST]'].str.replace('&', ' ')
erzeugung0_austria_ms['Zeit von [CET/CEST]'] = erzeugung0_austria_ms['Zeit von [CET/CEST]'].str.replace(';', ':')

erzeugung0_austria_ms['Zeit von [CET/CEST]'] = pd.to_datetime(erzeugung0_austria_ms['Zeit von [CET/CEST]'])

## Spalte Zeit bis [CET/CEST]
erzeugung0_austria_ms['Zeit bis [CET/CEST]'] = erzeugung0_austria_ms['Zeit bis [CET/CEST]'].str.replace('&', ' ')
erzeugung0_austria_ms['Zeit bis [CET/CEST]'] = erzeugung0_austria_ms['Zeit bis [CET/CEST]'].str.replace(';', ':')

erzeugung0_austria_ms['Zeit bis [CET/CEST]'] = pd.to_datetime(erzeugung0_austria_ms['Zeit bis [CET/CEST]'])

print(erzeugung0_austria_ms.dtypes)
print(erzeugung0_austria_ms.head(10))

# Kopie des Datensatzes wird angelegt
erzeugung_c_austria_ms = erzeugung0_austria_ms.copy()

plotting_data_ms = erzeugung_c_austria_ms.copy()

erzeuger = "Pumpspeicher"

fig = plt.figure(figsize = (7.5, 12))
fig.suptitle(erzeuger, fontsize = 12)

for i in range(1, 13):
    plotting_data_monthly_ms = plotting_data_ms[plotting_data_ms["Zeit von [CET/CEST]"].dt.month == i]
    ax = fig.add_subplot(12, 1, i)
    ax.plot(plotting_data_monthly_ms[erzeuger + " [MW]"])
    plt.margins(x = 0.01)
    ax.set_ylabel(ylabel = "MW")      65

    # Titel erzeugen
    plt.title(label = plotting_data_monthly_ms["Zeit von [CET/CEST]"].head(1).dt.strftime('%B %Y'))

    # xticks erzeugen
    tage_index = plotting_data_monthly_ms[~plotting_data_monthly_ms["Zeit von [CET/CEST]"].dt.date.unique()]
    tagesnamen = plotting_data_monthly_ms["Zeit von [CET/CEST]"].dt.date.unique()

```

6.28 Plot

```
Zeit von [CET/CEST]           datetime64[ns]
Zeit bis [CET/CEST]           datetime64[ns]
Wind [MW]                     float64
Solar [MW]                     float64
Biomasse [MW]                   float64
Gas [MW]                      float64
Kohle [MW]                     float64
Öl [MW]                       float64
Geothermie [MW]                 float64
Pumpspeicher [MW]                float64
Lauf- und Schwellwasser [MW]    float64
Speicher [MW]                   float64
Sonstige Erneuerbare [MW]       float64
Müll [MW]                      float64
Andere [MW]                     float64
dtype: object

Zeit von [CET/CEST] Zeit bis [CET/CEST] Wind [MW] Solar [MW] \
0 2023-01-01 00:00:00 2023-01-01 00:15:00 1000.0 0.0
1 2023-01-01 00:15:00 2023-01-01 00:30:00 964.0 0.0
2 2023-01-01 00:30:00 2023-01-01 00:45:00 956.0 0.0
3 2023-01-01 00:45:00 2023-01-01 01:00:00 992.0 0.0
4 2023-01-01 01:00:00 2023-01-01 01:15:00 880.0 0.0
5 2023-01-01 01:15:00 2023-01-01 01:30:00 888.0 0.0
6 2023-01-01 01:30:00 2023-01-01 01:45:00 948.0 0.0
7 2023-01-01 01:45:00 2023-01-01 02:00:00 968.0 0.0
8 2023-01-01 02:00:00 2023-01-01 02:15:00 956.0 0.0
9 2023-01-01 02:15:00 2023-01-01 02:30:00 952.0 0.0

Biomasse [MW] Gas [MW] Kohle [MW] Öl [MW] Geothermie [MW] \
0      240.0   27.6     0.0   0.0      0.07
1      240.0   27.6     0.0   0.0      0.07
2      240.0   28.0     0.0   0.0      0.07
3      240.0   27.6     0.0   0.0      0.07
4      240.0   27.6     0.0   0.0      0.07
5      240.0   28.4     0.0   0.0      0.07
6      240.0   28.8     0.0   0.0      0.07
7      240.0   28.0     0.0   0.0      0.07
8      240.0   28.8     0.0   0.0      0.07
9      240.0   28.4     0.0   0.0      0.07
```

	Pumpspeicher [MW]	Lauf- und Schwellwasser [MW]	Speicher [MW]	\
0	-1404.8	2291.6	70.4	
1	-1532.8	2283.2	66.8	
2	-1544.4	2240.0	100.4	
3	-1579.6	2199.6	77.6	
4	-1590.8	2234.8	63.2	
5	-1602.8	2229.2	73.6	
6	-1572.0	2211.2	69.2	
7	-1579.2	2194.8	70.8	
8	-1649.6	2202.8	75.2	
9	-1702.0	2172.4	65.6	
	Sonstige Erneuerbare [MW]	Müll [MW]	Andere [MW]	
0	0.0	100.0	22.0	
1	0.0	100.0	22.0	
2	0.0	100.0	22.0	
3	0.0	100.0	22.0	
4	0.0	100.0	22.0	
5	0.0	100.0	22.0	
6	0.0	100.0	22.0	
7	0.0	100.0	22.0	
8	0.0	100.0	22.0	
9	0.0	100.0	22.0	

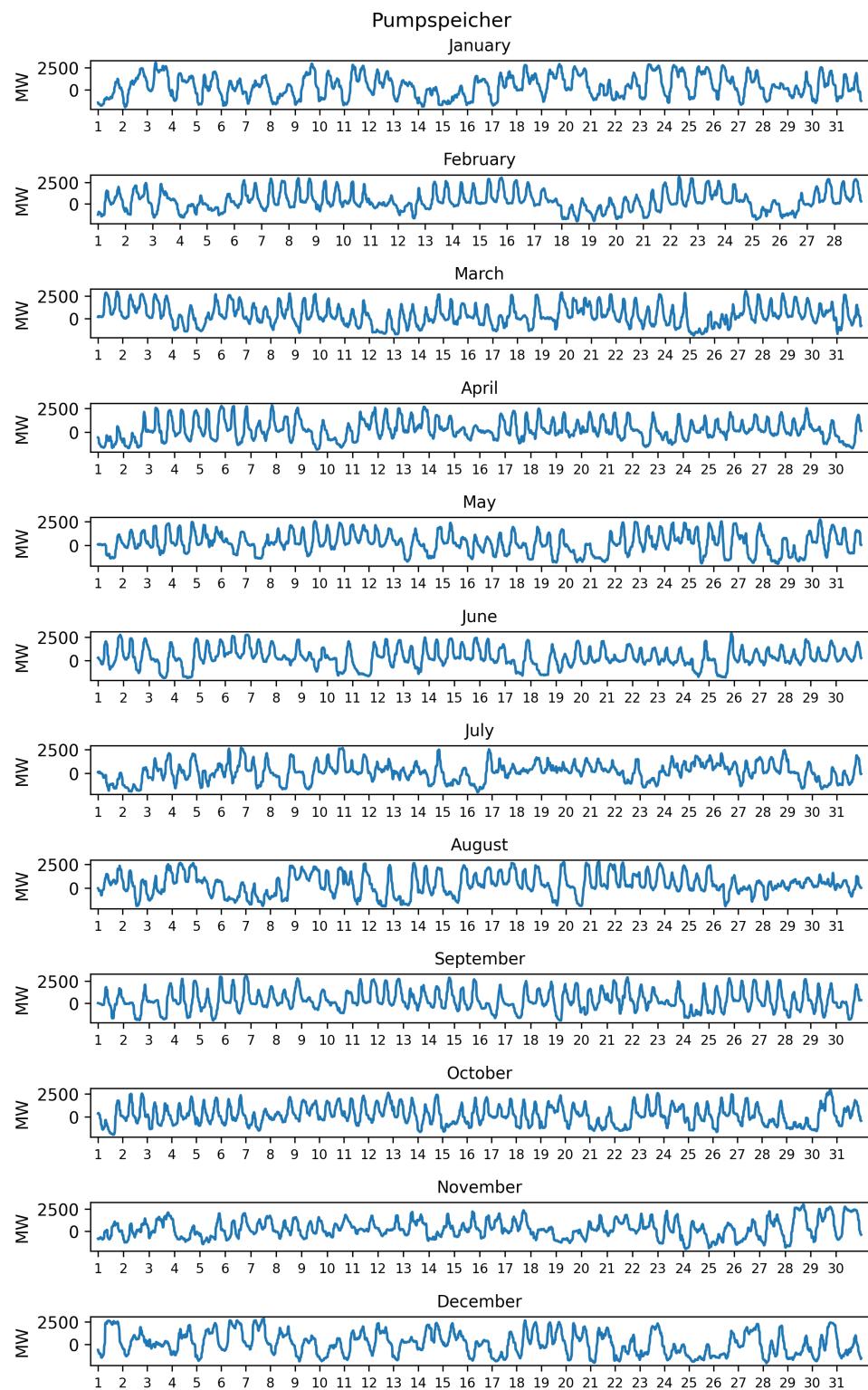


Abbildung 6.15: Jahresgang der Pumpspeicher in Österreich 2023

Musterlösung von Marc Sönnecken. Für die Kompatibilität mit diesem Skript wurden der Dateipfad und die Objektbezeichnungen angepasst sowie die Grafikbreite reduziert.

7 Schließende Datenanalyse

Schließende Datenanalyse bedeutet, auf Grundlage der Daten Rückschlüsse zu ziehen. Die schließende Datenanalyse unterscheidet sich von der beschreibenden und explorativen Datenanalyse dadurch, dass Daten nicht nur betrachtet und zueinander ins Verhältnis gesetzt werden, sondern neue Daten erzeugt werden.

Bei der explorativen Analyse der Erzeugungsdaten konnte festgestellt werden, dass im Jahr 2023 punktuell bereits eine Vollversorgung aus erneuerbaren Energien erreicht wird. Aus der Betrachtung der verdoppelten erneuerbaren Stromerzeugung des Jahres 2023 (siehe Tip 5) kann geschlussfolgert werden, dass mit zunehmenden Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion Phasen erneuerbarer Überproduktion immer häufiger der Fall sein werden. Die Perspektive regelmäßiger erneuerbarer Produktionsüberschüsse begründet einen Bedarf für Stromspeicher, um Strom aus Phasen der Überproduktion in Phasen mit positiver Restlast nutzbar zu machen.

In diesem Abschnitt wird der daraus resultierende Speicherbedarf betrachtet.

Hinweis

Die folgenden Rechnungen finden im sogenannten „Kupferplattenmodell“ auf der Grundlage der von der Bundesnetzagentur veröffentlichten Aggregatdaten zur Stromerzeugung und zum Stromverbrauch statt. In der Realität spielen die verfügbaren Kapazitäten zum Stromtransport eine wichtige Rolle bei der Auslegung eines Stromsystems. Diese werden hier aber nur insoweit berücksichtigt, als dass die Daten die tatsächlich realisierte Stromerzeugung im deutschen Stromsystem widerspiegeln. So wird auch die Abregelung erneuerbarer Stromerzeugung vernachlässigt. Diese betrug im Rahmen des Netzengpassmanagements im ersten Quartal 2023 5,29 Prozent der erneuerbaren Erzeugung ([Deutscher Bundestag Drucksache 20/9016, S. 2](#)).

Ebenfalls bleibt der Stromhandel zum Ausland unberücksichtigt (siehe Differenz Netzzlast und Stromerzeugung).

7.1 Hintergrund: Ausbaupfad erneuerbarer Energien

In Deutschland begann der Ausbau erneuerbarer Energien in den 1990er Jahren. Seit dem Beginn der 2000er Jahre stieg die erneuerbare Stromerzeugung weitgehend kontinuierlich an.

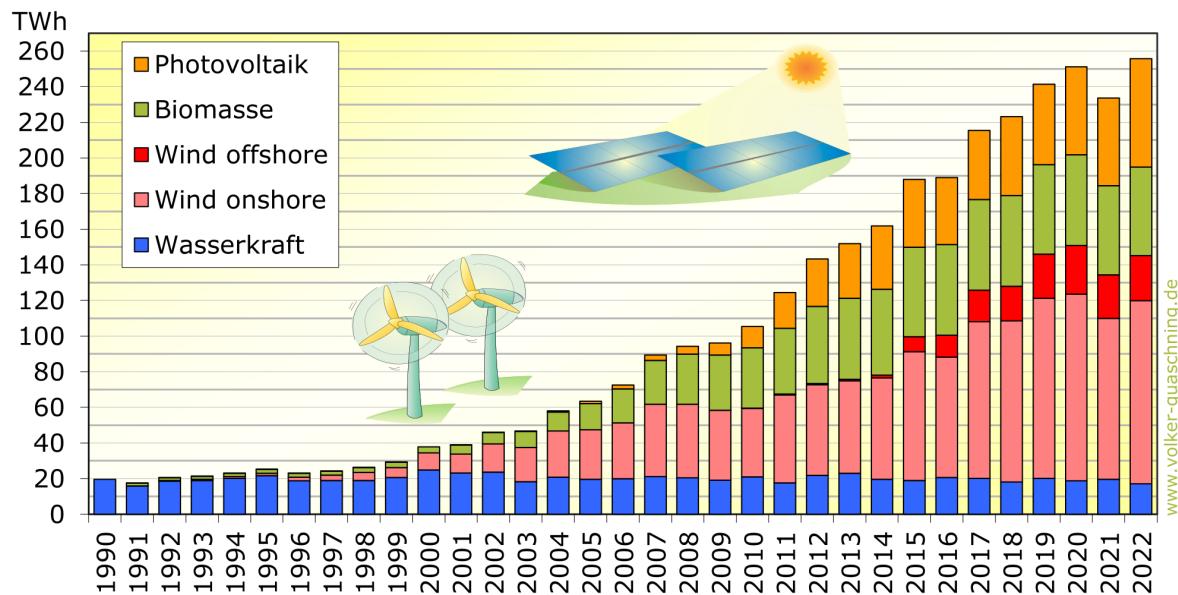


Abbildung 7.1: Regenerative Stromerzeugung in Deutschland seit 1990

Regenerative Stromerzeugung in Deutschland seit 1990 von Volker Quaschning nach Daten der AG Energiebilanzen ([Stromerzeugung nach Energieträgern \(Strommix\) von 1990 bis 2022 \(in TWh\) Deutschland insgesamt \(XLSX\)](#)) ist lizenziert unter CC BY-SA 4.0 und abrufbar unter <https://www.volker-quaschning.de/datserv/ren-Strom-D/index.php>. 2023

Das Erneuerbare-Energien Gesetz legt in Paragraph 4 Ausbaupfade für die installierte Leistung von Solarenergie, Windenergie an Land sowie für Biomasse fest. Der Ausbaupfad für Windenergie auf See ist in Paragraph 1 des Windenergie-auf-See-Gesetzes geregelt.

⚠️ Gesetzliche Grundlagen des erneuerbaren Ausbaupfads

§ 4 Ausbaupfad

[...]

1. eine Steigerung der installierten Leistung von Windenergieanlagen an Land auf

- a) 69 Gigawatt im Jahr 2024,
- b) 84 Gigawatt im Jahr 2026,
- c) 99 Gigawatt im Jahr 2028,
- d) 115 Gigawatt im Jahr 2030,
- e) 157 Gigawatt im Jahr 2035 und
- f) 160 Gigawatt im Jahr 2040

[...]

2. eine Steigerung der installierten Leistung von Windenergieanlagen auf See nach Maßgabe des Windenergie-auf-See-Gesetzes,

3. eine Steigerung der installierten Leistung von Solaranlagen auf

- a) 88 Gigawatt im Jahr 2024,
- b) 128 Gigawatt im Jahr 2026,
- c) 172 Gigawatt im Jahr 2028,
- d) 215 Gigawatt im Jahr 2030,
- e) 309 Gigawatt im Jahr 2035 und
- f) 400 Gigawatt im Jahr 2040

[...]

4. eine installierte Leistung von Biomasseanlagen von 8 400 Megawatt im Jahr 2030.

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023) [Bundesministerium der Justiz](#)

§ 1 Zweck und Ziel des Gesetzes

[...]

(2) Ziel dieses Gesetzes ist es, die installierte Leistung von Windenergieanlagen auf See, die an das Netz angeschlossen werden, auf insgesamt mindestens 30 Gigawatt bis zum Jahr 2030, auf insgesamt mindestens 40 Gigawatt bis zum Jahr 2035 und auf insgesamt mindestens 70 Gigawatt bis zum Jahr 2045 zu steigern.

Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz - WindSeeG) [Bundesministerium der Justiz](#)

Die Ausbauziele der Bundesregierung legen für das Jahr 2030 bzw. 2035 eine installierte Leistung fest in Höhe von:

- 115 GW Wind an Land bis 2030, 157 GW bis 2035,
- 30 GW Wind auf See bis 2030, 40 GW bis 2035,

- 215 GW Solar bis 2030, 309 GW bis 2035 sowie
- 8,4 GW Biomasse.

Dies bedeutet einen geplanten Zubau der installierten Leistung gemessen an der installierten Leistung im Jahr 2023 von:

Listing 7.1

```
print(f"Wind an Land 2030:\t{('zubaufaktor_windonshore_2030 := 115 / (installierte_leistung['Wind an Land [MW]'].sum() / 1000) :,.2f}")

print(f"\n\nWind auf See 2030:\t{('zubaufaktor_windoffshore_2030 := 30 / (installierte_leistung['Wind auf See [MW]'].sum() / 1000) :,.2f}

print(f"\n\nSolar 2030:\t\t{('zubaufaktor_solar_2030 := 215 / (installierte_leistung['Photovoltaik [MW]'].sum() / 1000) :,.2f}

print(f"\n\nBiomasse 2030:\t\t{('8.4 / (installierte_leistung['Biomasse [MW]'].sum() / 1000) :,.2f}

Wind an Land 2030: 2.00
Wind auf See 2030: 3.69
Solar 2030:         3.41
Biomasse 2030:      0.99

Wind an Land 2035: 2.73
Wind auf See 2035: 4.92
Solar 2035:        4.90
Biomasse 2035:      0.99
```

Bis 2030 soll die Produktion durch Windkraftanlagen an Land verdoppelt sowie durch Windkraftanlagen auf See und durch Photovoltaik verdreieinhalbacht werden. Bis 2035 soll Windkraft an Land fast verdreifacht, Wind auf See und Photovoltaik verfünfacht werden. Biomasse soll nicht weiter ausgebaut werden. Die Zubaufaktoren werden jeweils in einem Objekt gespeichert.

⚠ Netzentwicklungsplan Strom

Neben der Erzeugungsleistung soll auch das Stromübertragungsnetz ausgebaut werden. Die Planungen werden im Netzentwicklungsplan Strom festgehalten, der alle zwei Jahre von den vier Übertragungsnetzbetreibern in Abstimmung mit der Bundesnetzagentur aktualisiert wird.

Der aktuelle und die bisherigen Netzentwicklungspläne können unter <https://www.netzentwicklungsplan.de/> abgerufen werden.

7.2 Hintergrund: Stromspeicher

Stromspeicher speichern die Stromerzeugung in Überschussphasen, um die Energie in Phasen der Unterdeckung wieder abzugeben. Verschiedene Arten von Stromspeichern und ihre Einsatzgebiete werden im folgenden Video vorgestellt. Die Speichertypen unterscheiden sich grundlegend hinsichtlich ihrer Kapazität sowie der Lade- bzw. Entladeleistung.

<https://www.youtube.com/watch?v=yiJ1vAAJnVA>

Energietechnik. 14 Energiespeicherung. 14.02 Kennzahlen von Henrik te Heesen ist lizenziert unter [CC BY-SA 3.0](#) und abrufbar auf [YouTube](#). 2020

❗ Wichtig 6: Ausgewählte Kenngrößen von Stromspeichern

- Nominale Speicherkapazität: Energiemenge, die dem Stromspeicher entnommen werden kann.
- Nutzbare Speicherkapazität: Beschädigungsfrei nutzbarer Anteil der nominalen Speicherkapazität.
- Entladetiefe (Depth of Discharge, DoD): Differenz zwischen maximal und minimal erlaubten Ladezustand.
- Ladezustand (State of Charge, SoC): Verhältnis der aktuell gespeicherten Energie zur nominalen Kapazität, i. d. R. in Prozent angegeben.
- Effizienz: Wirkungsgrad bei der Speicherung (Be- und Entladen und Speicherverluste wie Selbstentladung)

Weitere Kenngrößen werden im folgenden Video vorgestellt:

<https://www.youtube.com/watch?v=0-PRS2naETE>

Energietechnik. 14 Energiespeicherung. 14.03 Kenngrößen und Begriffsdefinitionen von Henrik te Heesen ist lizenziert unter [CC BY-SA 3.0](#) und abrufbar auf [YouTube](#). 2020

7.3 Speichergröße berechnen

Im Folgenden werden Grundprinzipien der Speicherauslegung und die entsprechenden Verfahren zu ihrer Berechnung entwickelt. Grundlage aller Überlegungen ist die Restlastkurve. Werte kleiner als Null entsprechen einer erneuerbaren Überschussproduktion, Werte größer als Null einer durch Lastfolgekraftwerke oder Speicher zu bedienenden Netzlast. Die Restlast wird wie folgt bestimmt:

```
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]']

restlast = pd.DataFrame()
restlast["Netzlast [MWh]"] = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
restlast["Erneuerbare [MWh]"] = erzeugung[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()
restlast["Restlast [MWh]"] = restlast["Netzlast [MWh]"] - restlast["Erneuerbare [MWh]"]
restlast = restlast["Restlast [MWh]"]
```

Um die Größenordnung der Berechnungen besser einordnen zu können, wird die Speichergröße zur bestehenden Pumpspeicherkapazität von 37,4 GWh ins Verhältnis gesetzt.

```
pumpspeicherkapazität_MWh = 37.4 * 1000
```

💡 Tipp 10: Funktionsentwicklung mit Testdaten

Die im Folgenden entwickelten Funktionen bieten in der Regel eine Option zur Ausgabe der Rechenergebnisse, die aber aufgrund der Länge der vorliegenden Datenreihe zur Restlast nicht sinnvoll darstellbar sind. Dadurch sind die Datenreihe selbst wie auch die Zwischen- und Endergebnisse durchgeführter Berechnungen sowie vorhandene Fehler nicht zu überblicken. Für die Funktionsentwicklung empfiehlt es sich daher, mit Testdaten zu arbeiten. Auf diese Weise werden Berechnungen schneller durchgeführt und Zwischenergebnisse und Ergebnisse können bei Bedarf zur Überprüfung ausgegeben werden. Die nachfolgenden Funktionen wurden mit zufällig generierten Testdaten entwickelt.

Im folgenden Code-Block wird eine Restlastkurve aus zehn zufälligen Werten erzeugt. Durch Anpassen der Werte für a und b kann das Ergebnis gesteuert werden. In der Ausgabe ist die Summe der Datenreihe festgehalten. Ein negativer Wert bedeutet, dass über die simulierte Restlastkurve eine Überschussproduktion erneuerbarer Energien herrscht. Ein positiver Wert bedeutet, dass über die simulierte Restlastkurve die positive Restlast größer als die erneuerbare Überschussproduktion ist.

Im Code-Block wird außerdem eine statische Datenreihe angelegt. Diese dient dazu, Testdaten festzuhalten, die zu Fehlern geführt haben. Dazu wird die Datenreihe random_data in Listenform ausgegeben, sodass diese durch Kopieren und Einfügen in die statische Da-

tenreihe eingesetzt werden kann.

```
import random as rd

random_data = []
for i in range(10):
    random_data.append(rd.randint(a = -20, b = 20))

random_data = pd.Series(random_data, dtype = 'float')
print(f"random_data: {list(random_data)}\nSumme random_data: {random_data.sum()}\n")

static_data = pd.Series([8, -14, -7, 1, 3, -6, 5, -20, -2, 12], dtype = 'float')

random_data: [-3.0, 10.0, -1.0, 9.0, 10.0, -20.0, 18.0, 12.0, -20.0, -15.0]
Summe random_data: 0.0
```

7.3.1 Überschuss oder Defizit erneuerbarer Energien

Die erforderliche Größe des Stromspeichers ist einerseits abhängig von dem Verhältnis aus der Menge der erneuerbaren Überschussproduktion und der aus dem Speicher zu bedienenden Restlast. Andererseits spielt der Wirkungsgrad (griechischer Buchstabe Eta) des Speichers beim Ein- und Ausspeichern von Strom eine Rolle.

Berechnung

Ob im Jahresgang Phasen erneuerbarer Überproduktion oder Phasen positiver Restlast vorherrschen, kann mit den folgenden Funktionen bestimmt werden.

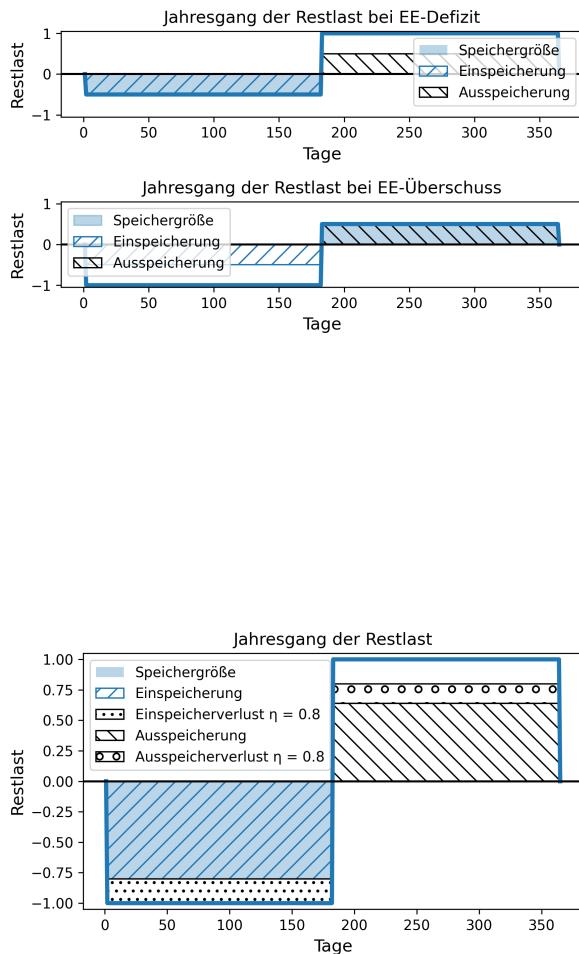
7.4 ohne Wirkungsgrad

```
# EE-Überschuss feststellen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float')
## Verarbeitung: über die pd.Series wird die Summe gebildet
## Ausgabe: zurückgegeben wird der Wahrheitswert von data.sum() < 0

def prüfe_EE_Überschuss(data):

    return data.sum() < 0
```

Erneuerbare Stromproduktion: Überschuss oder Defizit?



Ist die Summe der erneuerbaren Über-
schussproduktion kleiner als die aus
dem Speicher zu bedienende Restlast,
entspricht die erforderliche Speicher-
größe der Summe der erneuerbaren
Überschussproduktion.

Ist die Summe der erneuerbaren Über-
schussproduktion größer als die aus dem
Speicher zu bedienende Restlast, ent-
spricht die erforderliche Speichergröße der
Summe der zu bedienenden Restlast.

Ob ein Überschuss oder ein Defizit erneuer-
barer Stromproduktion vorliegt, kann
am Vorzeichen der summierten Restlast
abgelesen werden. Ein negatives Vor-
zeichen entspricht einem erneuerbaren
Stromüberschuss, ein positives Vorzei-
chen einem erneuerbaren Stromdefizit.

Wirkungsgrad Der Einspeicherwirkungsgrad
vermindernd den verfügbaren Überschuss-
strom. Ist die Summe der erneuerbaren
Überschussproduktion kleiner als die aus
dem Speicher zu bedienende Restlast,
kann der Speicher um den Einspei-
cherwirkungsgrad kleiner dimensioniert
werden.

Der Ausspeicherwirkungsgrad (inklusive
Speicherverluste) erhöht die durch den
Speicher zu bedienende Last. Ist die Sum-
me der erneuerbaren Überschussproduk-
tion größer als die aus dem Speicher zu
bedienende Restlast, muss der Speicher
um den Ausspeicherwirkungsgrad größer
dimensioniert werden.

```
prüfe_EE_Überschuss(restlast)
```

```
np.False_
```

7.5 mit Wirkungsgrad

```
# EE-Überschuss feststellen, gegeben einen Ein- und Ausspeicherungswirkungsgrad
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 0.9
## Verarbeitung: Werte kleiner 0 werden mit dem Einspeicherwirkungsgrad multipliziert
## Verarbeitung: Werte größer 0 werden durch den Ausspeicherwirkungsgrad geteilt
## Verarbeitung: über die pd.Series wird die Summe gebildet
## Ausgabe: zurückgegeben wird der Wahrheitswert von data_wirkungsgrad_bereinigt.sum() < 0

def prüfe_EE_Überschuss(data, einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 0.9):
    data_wirkungsgrad_bereinigt = data.copy()

    data_wirkungsgrad_bereinigt[data_wirkungsgrad_bereinigt < 0] = data_wirkungsgrad_bereinigt[data_wirkungsgrad_bereinigt < 0] * einspeicherwirkungsgrad
    data_wirkungsgrad_bereinigt[data_wirkungsgrad_bereinigt > 0] = data_wirkungsgrad_bereinigt[data_wirkungsgrad_bereinigt > 0] / ausspeicherwirkungsgrad

    return data_wirkungsgrad_bereinigt.sum() < 0

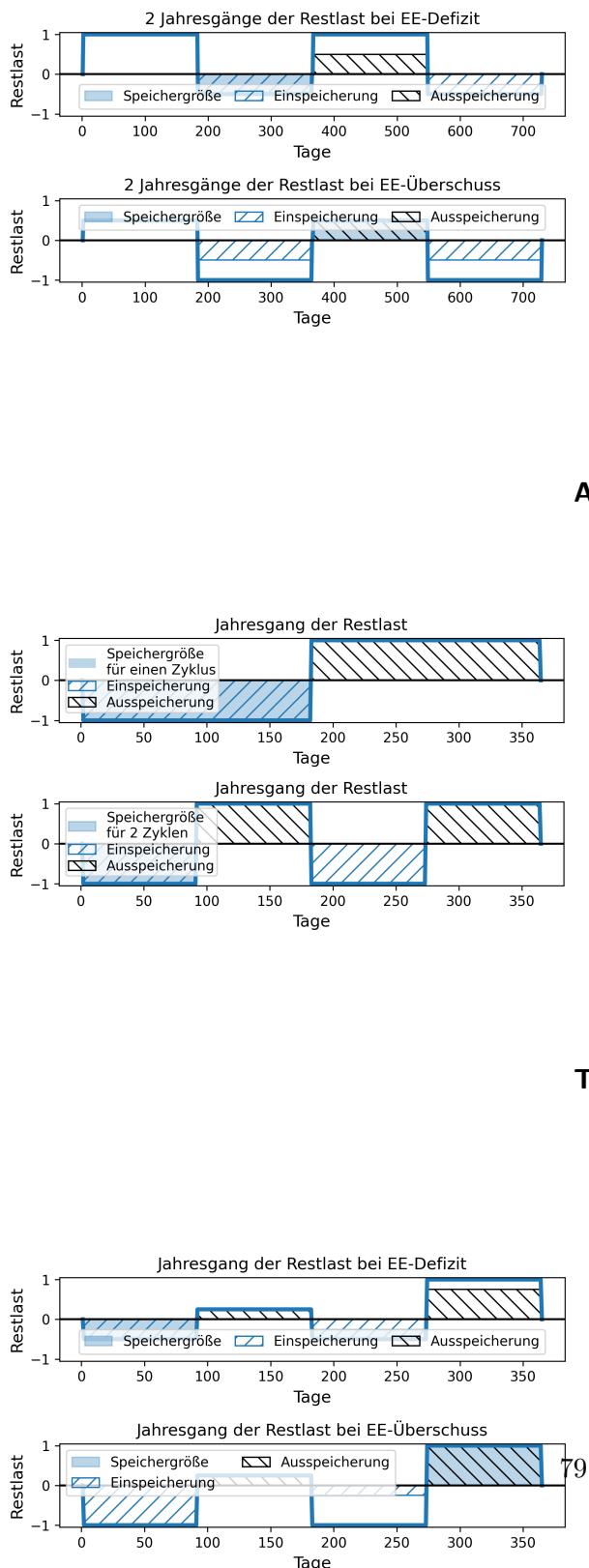
prüfe_EE_Überschuss(restlast, einspeicherwirkungsgrad = 0.9, ausspeicherwirkungsgrad = 0.9)

np.False_
```

Wie aus der Grenzstromanalyse im Abschnitt Kapitel 6.23 bekannt, herrschte im Jahr 2023 kein Überschuss an erneuerbarer Stromproduktion.

7.5.1 Zyklus

Im Zeitraum eines Jahres beeinflusst die Reihenfolge von Phasen mit erneuerbaren Überschüssen und mit positiver Restlast, wie groß ein Speicher ausgelegt werden muss.



Reihenfolgeabhängigkeit Wird nur ein einzelnes Jahr betrachtet, entscheidet die Reihenfolge von erneuerbarer Über- und Unterproduktion, wie viel Strom eingespeichert werden kann. Im ungünstigsten Fall liegt im ersten Halbjahr eine positive Restlast vor (der Speicher ist aber noch leer) und im zweiten Halbjahr herrscht erneuerbare Überproduktion (die im zweiten Halbjahr nicht mehr abgenommen werden würde).

Die Reihenfolgeabhängigkeit kann aufgelöst werden, indem zwei aufeinanderfolgende Jahresgänge betrachtet werden. Im ersten Jahr wird der Speicher leer ans Netz angeschlossen. Das zweite Jahr beginnt der Speicher gefüllt durch die Überschussproduktion aus dem Vorjahr.

Anzahl Vollzyklen Die erforderliche Größe des Stromspeichers ist abhängig von der Verteilung der Restlast und der realisierten Anzahl Vollzyklen. Ein Vollzyklus bedeutet, dass ein Speicher vollständig geladen und wieder entladen wird.

Im ungünstigsten Fall wird nur ein einziger Lade- / Entladezyklus gefahren. In diesem Fall entspricht die erforderliche Speichergröße der Summe der erneuerbaren Überschussproduktion.

Je häufiger sich Lade- und Entladezyklen abwechseln, desto geringer ist die erforderliche Speichergröße. Diese entspricht der Summe der erneuerbaren Überschussproduktion geteilt durch die Anzahl der Vollzyklen.

Teilzyklen Auch die Verteilung auftretender Teilzyklen reduziert die erforderliche Speichergröße.

Ist die Summe der erneuerbaren Überschussproduktion kleiner als die durch den Speicher zu bedienende Restlast, entspricht die erforderliche Speichergröße dem Minimum der kummulierten Summe der Restlast, wenn diese niemals größer 0 gesetzt wird (das Überschreiten wäre der Moment, in dem der Speicher leer ist).

Ist die Summe der erneuerbaren Überschussproduktion größer als die durch den Speicher zu bedienende Restlast, entspricht die erforderliche Speichergröße dem Maximum der kummulierten Summe der Restlast, wenn diese niemals kleiner 0 gesetzt wird (das Unterschreiten wäre der Moment, in dem der Speicher überdimensioniert wäre).

Berechnung

Die Speichergröße wird aus dem Jahresgang der Restlast berechnet. Um nicht vom Zeitpunkt abhängig zu sein, an dem der Speicher an das Netz angeschlossen wird, wird der Datensatz zwei mal durchlaufen (auflösen der Reihenfolgeabhängigkeit). Die erforderliche Speichergröße wird mittels der kummulierten Summe der Restlast berechnet. Wenn die Summe der erneuerbaren Überschussproduktion kleiner als die Summe der durch den Speicher zu bedienenden Restlast ist, wird die kummulierte Summe niemals größer 0 gesetzt. Denn das Überschreiten dieser oberen Grenze wäre der Moment, in dem der Speicher leer ist und positive Restlast nicht mehr bedient werden kann. Ist dagegen die Summe der erneuerbaren Überschussproduktion größer als die Summe der durch den Speicher zu bedienenden Restlast, wird die kummulierte Summe niemals kleiner 0 gesetzt. Denn das Unterschreiten dieser Grenze wäre der Moment, in dem der Speicher überdimensioniert ist und Energie vorgehalten wird, die im Jahresgang niemals durch eine positive Restlast verbraucht wird.

7.6 ohne Wirkungsgrad

```
# Speichergröße berechnen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), output = False
## Verarbeitung: aufrufen der Funktion prüfe_EE_Überschuss, um zwischen oberer Grenze = 0 (Sp
## Verarbeitung: data wird zwei mal zu data_x2 verkettet. Für data_x2 wird die bei 0 gekappte
## Ausgabe: wenn output = False wird die Speichergröße (float) zurückgegeben, wenn output = T

def berechne_speichergröße(data, output = False):

    data_x2 = pd.concat([data, data])

    überschuss = prüfe_EE_Überschuss(data)

    if überschuss:

        # gekappte kumulierte Summe berechnen
        capped_cumsum = []
        summe = 0

        for i in data_x2:
            summe += i

            # Untergrenze prüfen
            if summe < 0:
                summe = 0
```

```

capped_cumsum.append(summe)

speichergröße = max(capped_cumsum)

else:

    # gekappte kumulierte Summe berechnen
    capped_cumsum = []
    summe = 0

    for i in data_x2:
        summe += i

        # Obergrenze prüfen
        if summe > 0:
            summe = 0

    capped_cumsum.append(summe)

    speichergröße = abs(min(capped_cumsum))

if output: # output = True

    print(f"\nSumme data: {data.sum()}\nSpeichergröße: {speichergröße}")

else: # output = False
    return speichergröße

speicher_2023 = berechne_speichergröße(restlast, output = False)

print(f"erforderliche Speichergröße 2023: {speicher_2023:.1f} MWh\nDies entspricht {speicher_2023:.1f} kWh")

```

erforderliche Speichergröße 2023: 119,667.0 MWh
Dies entspricht 3.2 Pumpspeicheräquivalenten.

7.7 mit Wirkungsgrad

```

# Speichergröße berechnen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 0.95

```

```

## Verarbeitung: aufrufen der Funktion prüfe_EE_Überschuss, um zwischen oberer Grenze = 0 (Spalte 1)
## Verarbeitung: data wird zwei mal zu data_x2 verkettet. Für data_x2 wird die bei 0 gekappten Werte
## Ausgabe: wenn output = False wird die Speichergröße (float) zurückgegeben, wenn output = True wird
## die gesamte Zeile zurückgegeben

def berechne_speichergröße(data, einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 1, output = False):
    data_x2 = pd.concat([data, data])

    überschuss = prüfe_EE_Überschuss(data, einspeicherwirkungsgrad, ausspeicherwirkungsgrad)

    if überschuss:
        # gekappte kumulierte Summe berechnen
        capped_cumsum = []
        summe = 0

        for i in data_x2:
            if i < 0:
                summe += i * einspeicherwirkungsgrad
            else:
                summe += i / ausspeicherwirkungsgrad

            # Untergrenze prüfen
            if summe < 0:
                summe = 0

        capped_cumsum.append(summe)

        speichergröße = max(capped_cumsum)

    else: # Unterproduktion

        # gekappte kumulierte Summe berechnen
        capped_cumsum = []
        summe = 0

        for i in data_x2:
            if i < 0:
                summe += i * einspeicherwirkungsgrad
            else:
                summe += i / ausspeicherwirkungsgrad

```

```

# Obergrenze prüfen
if summe > 0:
    summe = 0

capped_cumsum.append(summe)

speichergröße = abs(min(capped_cumsum))

if output: # output = True

    print(f"\nSumme data: {data.sum()}\nSpeichergröße: {speichergröße}")

else: # output = False
    return speichergröße

speicher_2023 = berechne_speichergröße(restlast, einspeicherwirkungsgrad = 0.9, ausspeicherwirkungsgrad = 0.9, ladestand_anfang = 0, speichergröße_max = 100000, max_durchlauf = 1000000)

print(f"erforderliche Speichergröße 2023: {speicher_2023:.1f} MWh\nDies entspricht {speicher_2023 / 1000} kWh")

```

erforderliche Speichergröße 2023: 102,674.5 MWh
Dies entspricht 2.7 Pumpspeicheräquivalenten.

Jahresgang des Speichers

Nachdem die Speichergröße bestimmt wurde, kann der Jahresgang des Speichers für das erste und das zweite Jahr berechnet sowie grafisch dargestellt werden. Der Jahresgang des Speichers für das zweite Jahr ist das stabile Gleichgewicht, mit dem eine gegebene Restlastkurve beliebig oft durchlaufen werden kann.

- Eingabe: Der Funktion wird eine Restlastkurve übergeben. Außerdem kann eine Speichergröße übergeben werden, andernfalls wird diese durch Aufruf der Funktion `berechne_speichergröße()` ermittelt.
- Verarbeitung: Beginnend mit einem leeren Speicher wird die Restlastdatenreihe zwei mal elementweise durchlaufen. Negative Werte werden in den Speicher übertragen, bis die Speicherkapazität erreicht wurde. Positive Werte werden dem Speicher entnommen, bis der Ladestand des Speichers Null beträgt. In der um Ein- und Ausspeicherwirkungsgrade erweiterten Funktion werden eingespeicherte Werte mit dem Einspeicherwirkungsgrad (0.9) multipliziert und ausgespeicherte Werte durch den Ausspeicherwirkungsgrad (0.9) geteilt.

- Ausgabe: Die Funktion gibt, wenn `output = False` ist, ein Tupel zurück. An Position 0 ist die Speichergröße gespeichert, an Position 1 der Jahresgang in Jahr 1 als pd.Series, an Position 2 der Jahresgang in Jahr 2 als pd.Series. Die Jahresgänge werden im Folgenden Panel grafisch dargestellt. Wenn ‘`output = True`’, werden die kumulierte Summe der Restlast und die Speichergröße sowie die übergebene Restlastkurve, die Ladestände und freie Kapazität des Speichers im Jahresgang für Jahr 1 und Jahr 2 mit `print()` ausgegeben - dies ist in der Regel nur für Testdaten sinnvoll.

7.8 ohne Wirkungsgrad

```
# Jahresgang des Speichers berechnen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), speichergröße = -1, output = False
## Verarbeitung: Wenn speichergröße = -1 wird die Speichergröße mit der Funktion berechne_speicher
## Verarbeitung: data wird zwei mal zu data_x2 verkettet.
## Verarbeitung: Anhand der Speichergröße werden der Ladestand und die freie Kapazität des Speichers berechnet
## Ausgabe: Wenn output False ist, wird ein Tupel aus speichergröße (float), Ladestand Jahr1 (pd.Series) und Ladestand Jahr2 (pd.Series)
## Ausgabe: Wenn output True, werden die kumulierte Summe der Restlast, die Speichergröße, die Restlastkurve und die Ladestände für Jahr 1 und Jahr 2 mit print() ausgegeben

def jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, output = False):
    data_x2 = pd.concat([data, data])

    if speichergröße == -1:
        speichergröße = berechne_speichergröÙe(data)

    # Jahresgang des Speichers berechnen
    jahresgang_speicher = []
    ladestand_speicher = []
    freie_speicherkapazität = speichergröße # der speicher ist leer
    for i in data_x2:

        if (speichergröße - freie_speicherkapazität) - i < 0: # last ohne vorherige Einspeicherung
            freie_speicherkapazität = speichergröße

        elif freie_speicherkapazität + i < 0: # wenn der Speicher voll ist, muss Überschuss verworfen werden
            freie_speicherkapazität = 0

        else: # Ein-/Ausspeicherung
            freie_speicherkapazität += i

        jahresgang_speicher.append(freie_speicherkapazität)
```

```
ladestand_speicher.append(speichergröße - freie_speicherkapazität)

if output: # output = True

dataset = pd.DataFrame({'Restlast': data, 'Ladestand Jahr1': ladestand_speicher[ : len(jahresgang_speicher) // 2]})

print(f"\nSumme data: {data.sum()}\nSpeichergröße: {speichergröße}")
print(dataset)

else: # output = False
    return speichergröße, pd.Series(ladestand_speicher[ : len(jahresgang_speicher) // 2]), jahresgang_speicher

speicher_2023 = jahresgang_speicher_berechnen(restlast, output = False)
```

7.9 Plot ohne Wirkungsgrad

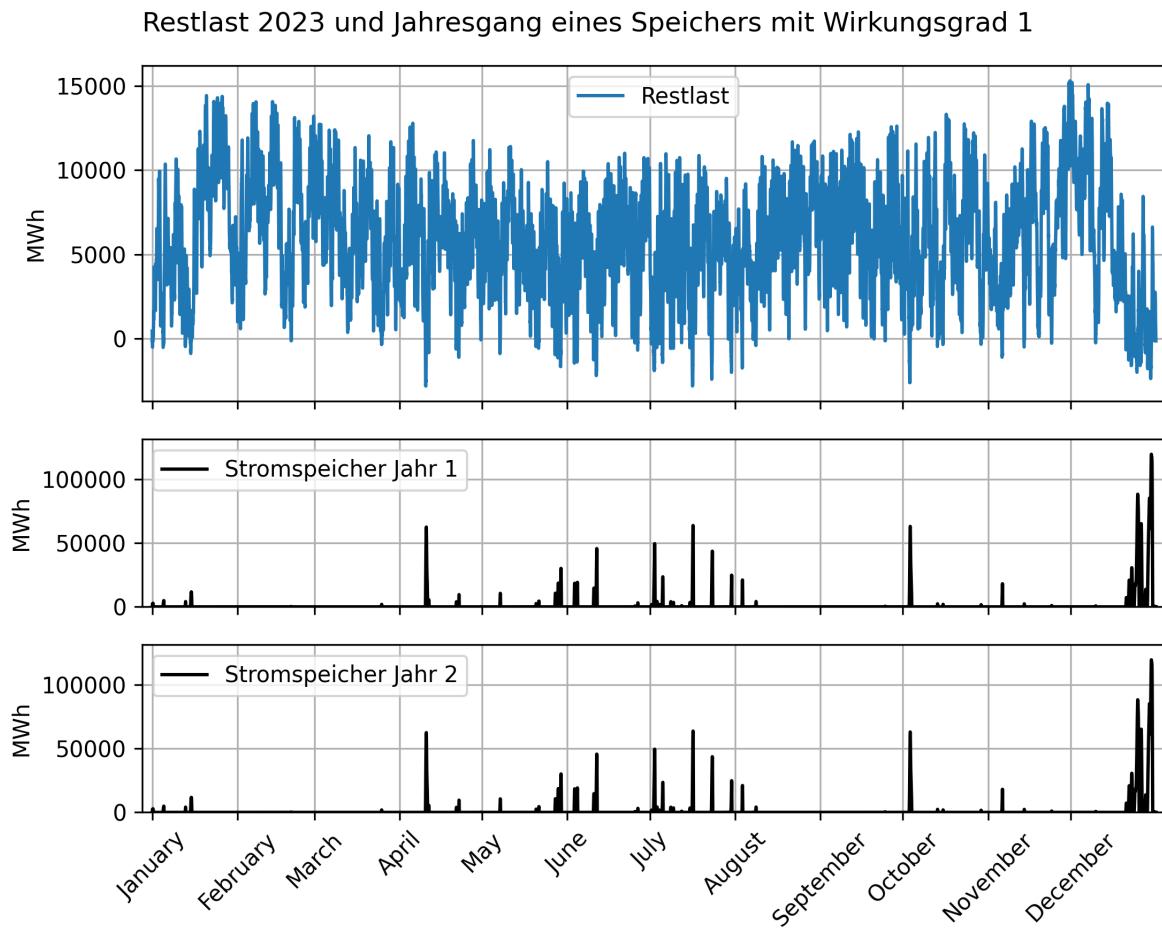


Abbildung 7.2: Restlast 2023 und Jahresgang eines Speichers mit Wirkungsgrad 1

7.10 Code für den Plot ohne Wirkungsgrad

```
# Daten einlesen
jahresgang_speicher_jahr1 = speicher_2023[1]
jahresgang_speicher_jahr2 = speicher_2023[2]

# xticks erzeugen
monate_index = erzeugung[~erzeugung["Datum von"].dt.month.duplicated()].index
monatsnamen = erzeugung["Datum von"].iloc[monate_index].dt.strftime("%B")
```

```

# Grafik mit drei subplots erzeugen
font_size = 10

fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(3, 1, figsize = (7.5, 6), height_ratios = [2, 1, 1], sharex=True)
plt.suptitle('Restlast 2023 und Jahresgang eines Speichers mit Wirkungsgrad 1')
plt.xticks(monate_index, monatsnamen, rotation = 45);
plt.minorticks_off()
plt.setp([ax1, ax2, ax3], xlim = (restlast.index.min() - len(restlast.index) / 100, restlast.index.max()))
plt.setp([ax2, ax3], ylim = (0, max(max(jahresgang_speicher_jahr1), max(jahresgang_speicher_jahr2)) * 1.1))

## plot restlast
ax1.plot(restlast, label = "Restlast")
ax1.grid()
ax1.set_ylabel('MWh')
ax1.legend()

## plot jahresgang_speicher_jahr1
ax2.plot(jahresgang_speicher_jahr1, color = 'black', linestyle = '--', label = 'Stromspeicher')
ax2.grid()
ax2.set_ylabel('MWh')
ax2.legend()

## plot jahresgang_speicher_jahr2
ax3.plot(jahresgang_speicher_jahr2, color = 'black', linestyle = '--', label = 'Stromspeicher')
ax3.tick_params(axis = 'x', rotation = 45)
ax3.set_ylabel('MWh')
ax3.grid()
ax3.legend()

plt.show()

```

7.11 mit Wirkungsgrad

```

# Jahresgang des Speichers berechnen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), speichergröße = -1, einspeicherwirkungsgang = 1
## Verarbeitung: Wenn speichergröße = -1 wird die Speichergröße mit der Funktion berechne_speichergröe
## Verarbeitung: data wird zwei mal zu data_x2 verkettet.
## Verarbeitung: Anhand der Speichergröße werden der Ladestand und die freie Kapazität des Speichers berechnet
## Ausgabe: Wenn output False ist, wird ein Tupel aus speichergröße (float), Ladestand Jahr1 (float) und freie Kapazität Jahr1 (float)
## Ausgabe: Wenn output True, werden die kumulierte Summe der Restlast, die Speichergröße, die Ladestand und die freie Kapazität

```

```

def jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 0):
    data_x2 = pd.concat([data, data])

    if speichergröße == -1:
        speichergröße = berechne_speichergröße(data, einspeicherwirkungsgrad, ausspeicherwirkungsgrad)

    jahresgang_speicher = []
    ladestand_speicher = []
    freie_speicherkapazität = speichergröße # der speicher ist leer
    for i in data_x2:

        if i > 0: # Restlast

            # last ohne entsprechende vorherige Einspeicherung kann nicht vollständig bedient werden
            if (speichergröße - freie_speicherkapazität) - i / ausspeicherwirkungsgrad < 0:
                freie_speicherkapazität = speichergröße

        else: # Ausspeicherung
            freie_speicherkapazität += i / ausspeicherwirkungsgrad # hier kann zu viel ausgespeichert werden
            if freie_speicherkapazität > speichergröße:
                freie_speicherkapazität = speichergröße

        else: # i <= 0 EE-Überschuss

            # wenn der Speicher voll ist, muss Überschuss verworfen werden.
            if freie_speicherkapazität + i * einspeicherwirkungsgrad < 0:
                freie_speicherkapazität = 0

            else: # Einspeicherung
                freie_speicherkapazität += i * einspeicherwirkungsgrad

    jahresgang_speicher.append(freie_speicherkapazität)
    ladestand_speicher.append(speichergröße - freie_speicherkapazität)

    if output: # output = True

        dataset = pd.DataFrame({'Restlast': data, 'Ladestand Jahr1': ladestand_speicher[ : len(jahresgang_speicher)]})

        print(f"\nSumme data: {data.sum()}\nSpeichergröße: {speichergröße}")
        print(dataset)

```

```

else: # output = False
    return speichergröße, pd.Series(ladestand_speicher[ : len(jahresgang_speicher) // 2 ]),
speicher_2023_wirkungsgrad_90_90 = jahresgang_speicher_berechnen(restlast, einspeicherwirkung)

```

7.12 Plot mit Wirkungsgrad

Restlast 2023 und Jahresgang eines Speichers mit Ein- und Ausspeicherwirkungsgrad 0.9

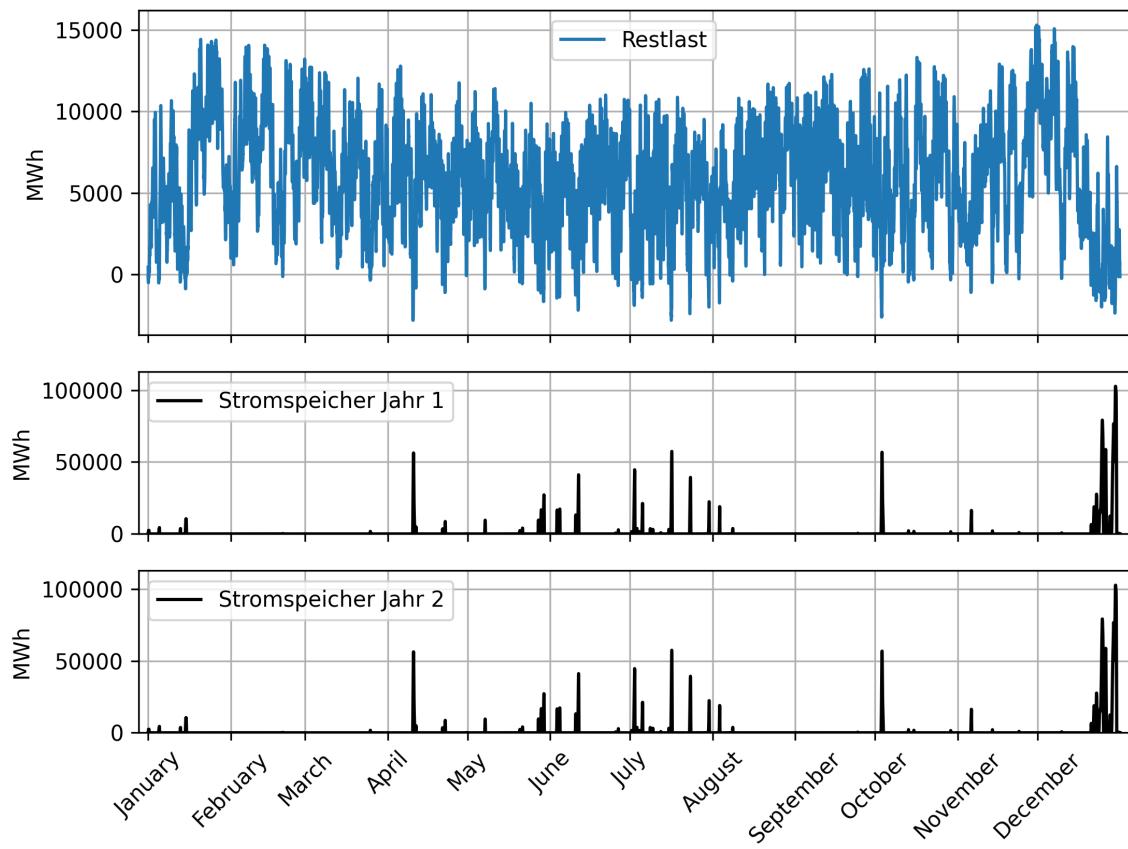


Abbildung 7.3: Restlast 2023 und Jahresgang eines Speichers mit Ein- und Ausspeicherwirkungsgrad 0.9

7.13 Code für den Plot mit Wirkungsgrad

```
# Daten einlesen
jahresgang_speicher_jahr1 = speicher_2023_wirkungsgrad_90_90[1]
jahresgang_speicher_jahr2 = speicher_2023_wirkungsgrad_90_90[2]

# xticks erzeugen
monate_index = erzeugung[~erzeugung["Datum von"].dt.month.duplicated()].index
monatsnamen = erzeugung["Datum von"].iloc[monate_index].dt.strftime("%B")

# Grafik mit drei subplots erzeugen
font_size = 10

fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(3, 1, figsize = (7.5, 6), height_ratios = [2, 1, 1], sharex=True)
plt.suptitle('Restlast 2023 und Jahresgang eines Speichers mit Ein- und Ausspeicherwirkungsgesetz')
plt.xticks(monate_index, monatsnamen, rotation = 45);
plt.minorticks_off()
plt.setp([ax1, ax2, ax3], xlim = (restlast.index.min() - len(restlast.index) / 100, restlast.index.max()))
plt.setp([ax2, ax3], ylim = (0, max(max(jahresgang_speicher_jahr1), max(jahresgang_speicher_jahr2)) * 1.1))

## plot restlast
ax1.plot(restlast, label = "Restlast")
ax1.grid()
ax1.set_ylabel('MWh')
ax1.legend()

## plot jahresgang_speicher_jahr1
ax2.plot(jahresgang_speicher_jahr1, color = 'black', linestyle = '-', label = 'Stromspeicher')
ax2.grid()
ax2.set_ylabel('MWh')
ax2.legend()

## plot jahresgang_speicher_jahr2
ax3.plot(jahresgang_speicher_jahr2, color = 'black', linestyle = '-', label = 'Stromspeicher')
ax3.tick_params(axis = 'x', rotation = 45)
ax3.set_ylabel('MWh')
ax3.grid()
ax3.legend()

plt.show()
```

Die benötigte Kapazität des Speichers ergibt sich aus den erneuerbaren Erzeugungsüberschüssen

während der Weihnachtsfeiertage. Diese Kapazitäten werden im übrigen Jahr kaum genutzt, der Speicher ist die meiste Zeit des Jahres leer. Der Jahresgang für das erste und das zweite Jahr ist optisch identisch. Dies kann mit `pd.Series1.equals(pd.Series2)` leicht überprüft werden. Werden Ein- und Ausspeicherwirkungsgrade berücksichtigt, reduzieren sich die ein- und ausgespeicherte Energie und somit die erforderliche Speichergröße.

Zyklenzahl berechnen

Anhand der Speichergröße und des Jahresgangs des Speichers kann die Zyklenzahl im ersten und in allen Folgejahren berechnet werden. Ein Zyklus entspricht der vollständigen Ladung und Entladung des Speichers bzw. einer entsprechenden Anzahl von Teilladezyklen. Die Zyklenzahl ergibt sich somit aus der Summe der im Jahresgang des Speichers ein- bzw. ausgespeicherten Energie, die durch die Speichergröße und durch 2 geteilt wird.

- Eingabe: Der Funktion kann ein Tupel bestehend aus einer Speichergröße an Position 0 und Speicherjahresgängen für Jahr 1 und Jahr 2 an den Positionen 1 und 2 übergeben werden. Andernfalls werden diese durch Aufruf der Funktion `jahresgang_speicher_berechnen` ermittelt (ohne bzw. mit Ein- und Ausspeicherwirkungsgrad).
- Verarbeitung: Um die ein- und ausgespeicherte Energie zu bestimmen, wird für die Speicherjahresgänge mit der Methode `pd.Series.diff()` elementweise die Differenz jedes Werts zu seinem Vorgänger gebildet (gleitende Differenz). Beispielsweise ist für die Zahlreihe 1, 4, -6, 2 die elementweise Differenz NaN, 3, -10, 8. Da der erste Wert keinen Vorgänger hat, ist die Differenz NaN. Deshalb wird für die gleitende Differenzberechnung dem Jahresgang in Jahr 1 eine Null vorangestellt (weil der Speicher leer ans Netz geht), dem Jahresgang in Jahr 2 der letzte Wert aus Jahr 1 (weil der Speicher mit diesem Ladestand ins zweite Jahr geht). Die Zahlreihe für Jahr 2 sähe beispielsweise so aus: 2, 1, 4, -6, 2. Die elementweise Differenz wäre: NaN, -1, 3, -10, 8. Anschließend werden die Werte absolut gesetzt und summiert. Die Anweisung lautet somit: `pd.Series.diff().abs().sum()`. Zur Ermittlung der Zyklenzahl wird die Summe der ein- und ausgespeicherten Energie durch die Speichergröße und durch 2 geteilt.
- Ausgabe: Die Funktion gibt, wenn `output = False` ist, ein Tupel der Zyklenzahl für Jahr 1 und Jahr 2 zurück. Ist `output = True`, erfolgt die Ausgabe mit `print()`

7.14 ohne Wirkungsgrad

```
# Zyklenzahl berechnen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), output = False
## Eingabe: Wenn die Eingabe ein Tupel {'Speichergröße': float, 'jahresgang_speicher_jahr1':
```

```

## Eingabe: Wenn die Eingabe data = pd.Series(data, dtype = 'float') ist, wird jahresgang_speicher_2023 berechnet
## Verarbeitung: Elementweise wird für Jahr 1 und Jahr 2 die Differenz aufeinanderfolgender Werte berechnet
## Verarbeitung: Für die gleitende Differenzberechnung muss dem Jahresgang in Jahr 1 eine Null voranstellen
## Verarbeitung: Die Summe der Speicherladungen und -entladungen wird durch die Speichergröße dividiert
## Ausgabe: Zyklenzahl für Jahr 1 und Jahr 2 - wenn output = False als Rückgabewert (Tupel), andernfalls als String

def zyklenzahl_berechnen(data, output = False):

    if type(data) is tuple: # Speichergröße und Jahresgänge wurden übergeben
        speichergröße = data[0]
        jahresgang_speicher_jahr1 = data[1]
        jahresgang_speicher_jahr2 = data[2]

    else: # Restlast wurde übergeben
        ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, output = False)
        speichergröße = ergebnis[0]
        jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
        jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
    jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series(0), jahresgang_speicher_jahr1])
    jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

    # Zyklenzahl berechnen
    zyklenzahl_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().abs().sum() / (speichergröße * 2) # ein Jahr
    zyklenzahl_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().abs().sum() / (speichergröße * 2) # ein Jahr

    if output:
        print(f"Zyklenzahl Jahr 1: {zyklenzahl_jahr1:.2f}\n"
              f"Zyklenzahl Jahr 2: {zyklenzahl_jahr2:.2f}")

    else:
        return zyklenzahl_jahr1, zyklenzahl_jahr2

zyklenzahl_berechnen(speicher_2023, output = True)

```

Zyklenzahl Jahr 1: 8.38
 Zyklenzahl Jahr 2: 8.38

7.15 mit Wirkungsgrad

```
# Zyklenzahl berechnen mit Wirkungsgrad
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 0.9
## Eingabe: Wenn die Eingabe ein Tupel {'Speichergröße': float, 'jahresgang_speicher_jahr1': float} ist, wird jahresgang_speicher_jahr1 als Speichergröße übergeben
## Eingabe: Wenn die Eingabe data = pd.Series(data, dtype = 'float') ist, wird jahresgang_speicher_jahr1 aus dem Series-Objekt abgelesen
## Verarbeitung: Elementweise wird für Jahr 1 und Jahr 2 die Differenz aufeinanderfolgender Werte berechnet
## Verarbeitung: Für die gleitende Differenzberechnung muss dem Jahresgang in Jahr 1 eine Null voranstellen
## Verarbeitung: Die Summe der Speicherladungen und -entladungen wird durch die Speichergröße dividiert
## Ausgabe: Zyklenzahl für Jahr 1 und Jahr 2 - wenn output = False als Rückgabewert (Tupel), sonst als String

def zyklenzahl_berechnen(data, einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 0.9, output = False):
    if type(data) is tuple: # Speichergröße und Jahresgänge wurden übergeben
        speichergröße = data[0]
        jahresgang_speicher_jahr1 = data[1]
        jahresgang_speicher_jahr2 = data[2]

    else: # Restlast wurde übergeben
        ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, einspeicherwirkungsgrad = 1)
        speichergröße = ergebnis[0]
        jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
        jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
    jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series(0), jahresgang_speicher_jahr1])
    jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

    # Zyklenzahl berechnen
    zyklenzahl_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().abs().sum() / (speichergröße * 2) # ein Jahr hat zwei Werte
    zyklenzahl_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().abs().sum() / (speichergröße * 2) # ein Jahr hat zwei Werte

    if output:
        print(f"Zyklenzahl Jahr 1: {zyklenzahl_jahr1:.2f}\n"
              f"Zyklenzahl Jahr 2: {zyklenzahl_jahr2:.2f}")
    else:
        return zyklenzahl_jahr1, zyklenzahl_jahr2

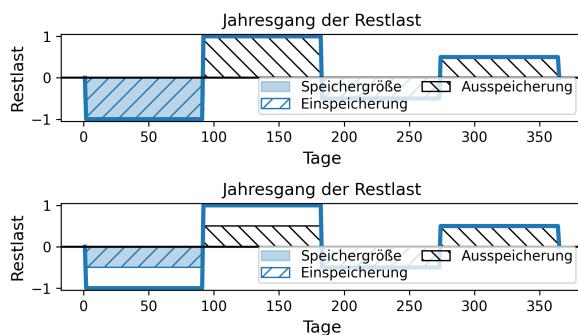
zyklenzahl_berechnen(restlast, einspeicherwirkungsgrad = 0.9, ausspeicherwirkungsgrad = 0.9, output = True)
```

Zyklenzahl Jahr 1: 8.79

Zyklenzahl Jahr 2: 8.79

Aufgrund der geringen erneuerbaren Erzeugungsschüsse im Jahr 2023 ist die Zyklenzahl in Jahr 1 und Jahr 2 identisch. Wenn der Wirkungsgrad berücksichtigt wird, steigt die Zyklenzahl, weil der Speicher kleiner dimensioniert ist.

7.15.1 Kappung



Kappung von Erzeugungsspitzen Die Kappung von Erzeugungsspitzen ist eine Möglichkeit, die benötigte Speichergröße zu reduzieren. Die Kappung der Einspeicherung führt zu einer besseren Auslastung der Speicherkapazität und einer höheren Zyklenzahl.

Im oberen Beispiel wird die Speichergröße entsprechend der maximalen erneuerbaren Überschussproduktion ausgelegt. Der Speicher erreicht damit 1,5 Zyklen.

Im unteren Beispiel wird der Speicher kleiner dimensioniert. Der Speicher erreicht 2 Zyklen.

Berechnung

Auf Grundlage des Jahresgangs des Speichers kann der Effekt der Kappung von Erzeugungsspitzen auf die eingespeicherte Strommenge und die erreichte Zyklenzahl des Stromspeichers berechnet werden. Dafür werden der Jahresgang des Speichers für verschiedene reduzierte Speichergrößen, die so erreichte Zyklenzahl und die Menge nicht eingespeicherten Stroms berechnet.

- **Eingabe:** Der Funktion ist eine Restlastdatenreihe als pd.Series und optional eine Liste reduzierter Speichergrößen, ausgedrückt als relative Bruchteile von 1, zu übergeben. Wird keine Liste übergeben, erfolgt die Berechnung für die relativen Speichergrößen [0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5].
- **Verarbeitung:** Für die Restlast werden durch Aufruf der Funktion `jahresgang_speicher_berechnen` die ungekapppte Speichergröße und Jahresgänge in Jahr 1 und in Jahr 2 berechnet. Anschließend wird durch Aufruf der Funktion `zyklenzahl_berechnen` die erreichte Zyklenzahl bestimmt. Anhand der Jahresgänge wird die eingespeicherte Strommenge berechnet. Dazu wird mit der Methode `pd.Series.diff()` elementweise die Differenz

jedes Werts zu seinem Vorgänger gebildet (gleitende Differenz). Wie auch bei der Berechnung der Zyklenzahl wird dazu dem Jahresgang in Jahr 1 eine Null vorangestellt, dem Jahresgang in Jahr 2 der letzte Wert aus Jahr 1. Die eingespeicherte Strommenge ist die Summe aller positiven Werte dieser Reihe. Negative Werte bedeuten eine Reduzierung des Ladestands zwischen zwei Zeitpunkten, zeigen also Phasen der Ausspeicherung an. Deshalb werden negative Werte mit der Methode `.clip(0)` gesetzt. Die Anweisung lautet: `pd.Series.diff().clip(lower = 0).sum()`.

Diese Schritte werden für alle übergebenen Elemente in der Variablen `neue_speichergrößen` wiederholt. Dazu wird die Speichergröße ohne Kappung mit jeweils einer der relativen Speichergrößen multipliziert und die erreichte Zyklenzahl sowie die eingespeicherte Strommenge berechnet. Aus der Differenz der eingespeicherten Strommenge für jede neue Speichergröße zum Basisjahr wird die gekappte Strommenge bestimmt.

- Ausgabe: Wenn `output = False`, wird ein DataFrame mit drei Spalten zurückgegeben. Die Spalte mit Index 0 enthält die relative Speichergröße, Die Spalten 1 und 2 die gekappten Strommengen in Jahr 1 und Jahr 2. Wenn `'output = True'` wird dieser DataFrame mit `print()` ausgegeben. Zusätzlich wird ein fünfspaltiger DataFrame mit den Zwischenergebnissen (inklusive Basisjahr in Zeile 0) mit `print()` ausgegeben. Dieser enthält in der Spalte mit Index 0 die absolute Speichergröße sowie in den folgenden Spalten die eingespeicherte Strommenge in Jahr 1 (Spalte mit Index 1), die Zyklenzahl in Jahr 1 (Spalte mit Index 2), die eingespeicherte Strommenge in Jahr 2 (Spalte mit Index 3), die Zyklenzahl in Jahr 2 (Spalte mit Index 4).

7.16 ohne Wirkungsgrad

```
# Kappung berechnen: Wie viel EE wird verworfen, wenn die Speichergröße begrenzt wird?
## Eingabe: Restlastkurve data = pd.Series(data, dtype = 'float', neue_speichergrößen = [0.9
## Verarbeitung: Für data werden mit der Funktion jahresgang_speicher_berechnen() die Speichergrößen
## Verarbeitung: Für data wird mit der Funktion zyklenzahl_berechnen() die Zyklenzahl in Jahren berechnet
## Verarbeitung: Anhand der Jahresgänge wird die eingespeicherte Strommenge ohne zusätzliche Kappung berechnet
## Verarbeitung: Die Verarbeitungsschritte werden für alle übergebenen Elemente in der Variablen neue_speichergrößen wiederholt
## Verarbeitung: Die Speichergröße der Basisrestlastkurve data wird dafür mit den in neue_speichergrößen
## Verarbeitung: Aus der Differenz der eingespeicherten Strommengen für jede neue Speichergröße wird die Strommenge im Basisjahr bestimmt
## Ausgabe: Wenn output = False wird ein DataFrame mit drei Spalten zurückgegeben. Die Spalte 0 enthält die absolute Speichergröße, die Spalten 1 und 2 die gekappten Strommengen in Jahr 1 und Jahr 2
## Ausgabe: Wenn output = True wird der dreispaltige DataFrame mit print() ausgegeben.
## Ausgabe: Zusätzlich wird ein fünfspaltiger DataFrame mit den Zwischenergebnissen (inklusive Basisjahr in Zeile 0) mit print() ausgegeben.
## Ausgabe: (Indexangaben): 0 = absolute Speichergröße, 1 = eingespeicherte Strommenge Jahr 1, 2 = eingespeicherte Strommenge Jahr 2, 3 = Zyklenzahl Jahr 1, 4 = Zyklenzahl Jahr 2

def effekt_kappung_berechnen(data, neue_speichergrößen = [0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5], output = False):
    # Speichergröße im Basisjahr bestimmen
    # ... (rest of the function code)

```

```

ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, output = False)
speichergröße0 = ergebnis[0]
jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

# Zyklenzahl im Basisjahr bestimmen, Tupel übergeben
zyklen = zyklenzahl_berechnen(ergebnis, output = False)
zyklen_jahr1 = zyklen[0]
zyklen_jahr2 = zyklen[1]

# Jahressang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahressang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

# eingespeicherte Strommenge im Basisjahr bestimmen
einspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(lower = 0).sum()
einspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(lower = 0).sum()

# Ergebnisse in DataFrame speichern
dataframe = pd.DataFrame({'Speichergröße': [speichergröße0], 'Einspeicherung Jahr1': [einspeicherung_jahr1], 'Einspeicherung Jahr2': [einspeicherung_jahr2]})

# eingespeicherte Strommenge bei alternativen Speichergrößen bestimmen
count = 1

for i in range(len(neue_speichergrößen)):

    speichergröße_neu = speichergröße0 * neue_speichergrößen[i]

    ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = speichergröße_neu, output = False)
    jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
    jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Zyklenzahl im Basisjahr bestimmen, Tupel übergeben
    zyklen = zyklenzahl_berechnen(ergebnis, output = False)
    zyklen_jahr1 = zyklen[0]
    zyklen_jahr2 = zyklen[1]

    # Jahressang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahressang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
    jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
    jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

    # eingespeicherte Strommenge mit neuer Speichergröße bestimmen
    dataframe.loc[i, 'Einspeicherung Jahr1'] = einspeicherung_jahr1
    dataframe.loc[i, 'Einspeicherung Jahr2'] = einspeicherung_jahr2

```

```

einspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(lower = 0).sum()
einspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(lower = 0).sum()

neue_Zeile = [speichergröße_neu, einspeicherung_jahr1, zyklen_jahr1, einspeicherung_jahr2]
dataframe.loc[count] = neue_Zeile

count += 1

# gekappte Menge berechnen data.sub(data[0]).drop(0)
gekappte_einspeicherung_jahr1 = dataframe['Einspeicherung Jahr1'].sub(dataframe['Einspeicherung Jahr2'])
gekappte_einspeicherung_jahr2 = dataframe['Einspeicherung Jahr2'].sub(dataframe['Einspeicherung Jahr1'])
dataset = pd.DataFrame({'relative Speichergröße': pd.Series(neue_speichergrößen), 'gekappte Menge': kappte_Menge})

if output:

    print(dataframe)
    print("\n")
    print(dataset)

else:
    return dataset

effekt_kappung_berechnen(restlast, output = True)

```

	Speichergröße	Einspeicherung Jahr1	Zyklen Jahr1	Einspeicherung Jahr2	\
0	119667.0	1.00e+06	8.38	1.00e+06	
1	107700.3	9.91e+05	9.20	9.91e+05	
2	95733.6	9.79e+05	10.23	9.79e+05	
3	83766.9	9.63e+05	11.49	9.63e+05	
4	71800.2	9.39e+05	13.07	9.39e+05	
5	59833.5	8.99e+05	15.03	8.99e+05	

	Zyklen Jahr2
0	8.38
1	9.20
2	10.23
3	11.49
4	13.07
5	15.03

relative Speichergröße gekappte Einspeicherung Jahr1 \

0	0.9	11966.7
1	0.8	23933.4
2	0.7	40443.7
3	0.6	64377.1
4	0.5	103619.5

gekappte Einspeicherung Jahr2		
0	11966.7	
1	23933.4	
2	40443.7	
3	64377.1	
4	103619.5	

7.17 mit Wirkungsgrad

```
# Kappung berechnen: Wie viel EE wird verworfen, wenn die Speichergröße begrenzt wird?
## Eingabe: Restlastkurve data = pd.Series(data, dtype = 'float', einspeicherwirkungsgrad = 1)
## Verarbeitung: Für data werden mit der Funktion jahresgang_speicher_berechnen() die Speichergrößen
## Verarbeitung: Für data wird mit der Funktion zyklenzahl_berechnen() die Zyklenzahl in Jahren berechnet
## Verarbeitung: Anhand der Jahresgänge wird die eingespeicherte Strommenge ohne zusätzliche Kappung berechnet
## Verarbeitung: Die Verarbeitungsschritte werden für alle übergebenen Elemente in der Variablen data durchgeführt
## Verarbeitung: Die Speichergröße der Basisrestlastkurve data wird dafür mit den in neue_speichergrößen gesetzten Werten aktualisiert
## Verarbeitung: Aus der Differenz der eingespeicherten Strommengen für jede neue Speichergröße wird der zu verworfenen Strom berechnet
## Ausgabe: Wenn output = False wird ein DataFrame mit drei Spalten zurückgegeben. Die Spalte 0 enthält die Speichergröße, Spalte 1 die eingespeicherte Strommenge und Spalte 2 die zu verworfenen Strommenge
## Ausgabe: Wenn output = True wird der dreispaltige DataFrame mit print() ausgegeben.
## Ausgabe: Zusätzlich wird ein fünfspaltiger DataFrame mit den Zwischenergebnissen (inklusive der zu verworfenen Strommenge) für jeden Speichergrad ausgedruckt
## Ausgabe: (Indexangaben): 0 = absolute Speichergröße, 1 = eingespeicherte Strommenge Jahr 1, 2 = zu verworfenen Strommenge Jahr 1, 3 = absolute Speichergröße Jahr 2, 4 = eingespeicherte Strommenge Jahr 2, 5 = zu verworfenen Strommenge Jahr 2

def effekt_kappung_berechnen(data, einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkungsgrad = 1, output = False):
    # Speichergröße im Basisjahr bestimmen
    ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, einspeicherwirkungsgrad = einspeicherwirkungsgrad)
    speichergröße0 = ergebnis[0]
    jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
    jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Zyklenzahl im Basisjahr bestimmen, Tupel übergeben
    zyklen = zyklenzahl_berechnen(ergebnis, einspeicherwirkungsgrad = einspeicherwirkungsgrad, zyklen_jahr1 = zyklen[0], zyklen_jahr2 = zyklen[1])
```

```

# Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[ - 1: ], jahresgang_speicher_jahr2])

# eingespeicherte Strommenge im Basisjahr bestimmen
einspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(lower = 0).sum()
einspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(lower = 0).sum()

# Ergebnisse in DataFrame speichern
dataframe = pd.DataFrame({'Speichergröße': [speichergröße0], 'Einspeicherung Jahr1': [einspeicherung_jahr1], 'Einspeicherung Jahr2': [einspeicherung_jahr2]})

# eingespeicherte Strommenge bei alternativen Speichergrößen bestimmen
count = 1

for i in range(len(neue_speichergrößen)):

    speichergröße_neu = speichergröße0 * neue_speichergrößen[i]

    ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = speichergröße_neu, einspeicherwirkungsgrad = einspeicherwirkungsgrad)
    jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
    jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Zyklenzahl im Basisjahr bestimmen, Tupel übergeben
    zyklen = zyklenzahl_berechnen(ergebnis, einspeicherwirkungsgrad = einspeicherwirkungsgrad)
    zyklen_jahr1 = zyklen[0]
    zyklen_jahr2 = zyklen[1]

    # Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
    jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
    jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[ - 1: ], jahresgang_speicher_jahr2])

    # eingespeicherte Strommenge mit neuer Speichergröße bestimmen
    einspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(lower = 0).sum()
    einspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(lower = 0).sum()

    neue_Zeile = [speichergröße_neu, einspeicherung_jahr1, zyklen_jahr1, einspeicherung_jahr2]
    dataframe.loc[count] = neue_Zeile

    count += 1

# gekappte Menge berechnen data.sub(data[0]).drop(0)
gekappte_einspeicherung_jahr1 = dataframe['Einspeicherung Jahr1'].sub(dataframe['Einspeicherung Jahr2'])

```

```

gekappte_einspeicherung_jahr2 = dataframe['Einspeicherung Jahr2'].sub(dataframe['Einspeicherung Jahr1'])
dataset = pd.DataFrame({'relative Speichergröße': pd.Series(neue_speichergrößen), 'gekappte Einspeicherung Jahr2': kappe})

if output:
    print(dataframe)
    print("\n")
    print(dataset)

else:
    return dataset

effekt_kappung_berechnen(restlast, einspeicherwirkungsgrad = 0.9, ausspeicherwirkungsgrad = 0.8)

```

	Speichergröße	Einspeicherung Jahr1	Zyklen Jahr1	Einspeicherung Jahr2
0	102674.54	902678.40	8.79	902678.40
1	92407.08	892410.95	9.66	892410.95
2	82139.63	882143.49	10.74	882143.49
3	71872.18	864601.21	12.03	864601.21
4	61604.72	844066.30	13.70	844066.30
5	51337.27	799701.77	15.58	799701.77

	Zyklen Jahr2
0	8.79
1	9.66
2	10.74
3	12.03
4	13.70
5	15.58

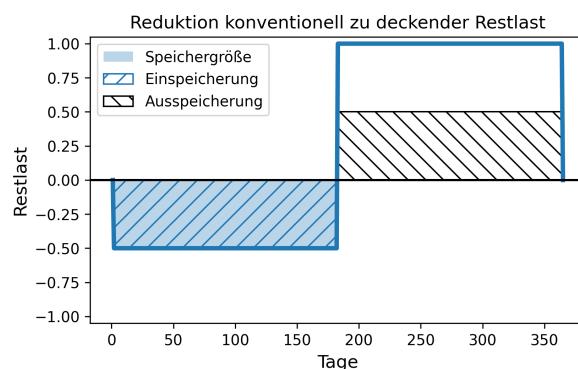
	relative Speichergröße	gekappte Einspeicherung Jahr1
0	0.9	10267.45
1	0.8	20534.91
2	0.7	38077.19
3	0.6	58612.10
4	0.5	102976.63

	gekappte Einspeicherung Jahr2
0	10267.45
1	20534.91
2	38077.19

3	58612.10
4	102976.63

7.18 Anteil erneuerbarer Stromerzeugung bestimmen

Durch die Integration eines Stromspeichers in das Stromsystem kann erneuerbare Überschussproduktion in Phasen mit einer positiven Restlast verschoben werden, die andernfalls durch Lastfolgekraftwerke zu decken wäre. Dadurch sinkt der Anteil konventioneller Stromerzeugung und steigt der Anteil erneuerbarer Stromerzeugung.



Anteil erneuerbarer Stromproduktion bestimmen

Die Ausspeicherung von Strom vermindert die positive Restlast

Wird der ausgespeicherte Strom von der positiven Restlast abgezogen (in Summe oder im Jahresgang), entspricht der Anteil konventionell zu deckender Last dem Quotienten aus der summierten positiven Restlast und der summierten Netzauslast bzw. aus der summierten positiven Restlast und der summierten Stromerzeugung.

Der Anteil erneuerbarer Stromproduktion entspricht $1 - \text{Anteil konventionell zu deckender Last}$.

Der Anteil erneuerbarer Stromproduktion kann deshalb wie folgt berechnet werden:

```
restlast.clip(lower = 0).sum() / verbrauch['Gesamt (Netzlast) [MWh]'].sum()

print(f"Summe positive Restlast [MWh]: {restlast.clip(lower = 0).sum()}\n"
      f"Summe Netzauslast: {verbrauch['Gesamt (Netzlast) [MWh]'].sum()}\n"
      f"Quotient positive Restlast / Netzauslast: {restlast.clip(lower = 0).sum() / verbrauch['Gesamt (Netzlast) [MWh]'].sum()}\n"
      f"Anteil erneuerbarer Erzeugung: {1 - (restlast.clip(lower = 0).sum() / verbrauch['Gesamt (Netzlast) [MWh]'].sum())}\n"

      f"Summe Erzeugung: {erzeugung.sum(numeric_only = True).sum()}\n"
      f"Quotient positive Restlast / Erzeugung: {restlast.clip(lower = 0).sum() / erzeugung.sum(numeric_only = True).sum()}\n"
      f"Anteil erneuerbarer Erzeugung: {1 - (restlast.clip(lower = 0).sum() / erzeugung.sum(numeric_only = True).sum())}
```

```
Summe positive Restlast [MWh]: 207842228.25
Summe Netzauslast: 458271100.75
```

Quotient positive Restlast / Netzlast: 0.45
Anteil erneuerbarer Erzeugung: 0.55

Summe Erzeugung: 448650448.25
Quotient positive Restlast / Erzeugung: 0.46
Anteil erneuerbarer Erzeugung: 0.54

Die Netzlast aus dem Datensatz `verbrauch` weicht mit 458 TWh geringfügig von der summierten Stromerzeugung aus dem Datensatz `erzeugung` in Höhe von 448 TWh ab. Dadurch unterscheiden sich die berechneten Anteile leicht.

Berechnung

Grundlage für die Berechnung des Anteils erneuerbarer Stromerzeugung nach Ausspeicherung erneuerbarer Überschussproduktion ist der Jahresgang des Speichers. Die Ausspeicherung von Strom bedeutet eine Verminderung des Ladestands zwischen zwei Zeitpunkten. Der ausgespeicherte Strom vermindert die positive Restlast zu diesem Zeitpunkt. Dadurch nimmt der Quotient aus der positiven Restlast und der Netzlast ab und der Anteil erneuerbarer Stromerzeugung steigt. Dies ist in der folgenden Funktion umgesetzt.

- Eingabe: Der Funktion wird eine Restlastdatenreihe übergeben. Optional kann zusätzlich eine Netzlastdatenreihe übergeben werden. Ebenso kann optional eine Liste reduzierter Speichergrößen, ausgedrückt als relative Bruchteile von 1, übergeben werden. Wird keine Liste übergeben, erfolgt die Berechnung für die relativen Speichergrößen [0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5].
- Verarbeitung: Durch Aufruf der Funktion `jahresgang_speicher_berechnen()` werden für die Restlastdatenreihe die Jahresgänge des Stromspeichers mit relativer Größe 1 berechnet. Mit den Jahresgängen wird die ausgespeicherte Strommenge im Jahresgang mit der Methode `pd.Series.diff().clip(upper = 0)` bestimmt. Auch für diese gleitende Differenzberechnung wird dem Jahresgang in Jahr 1 eine Null vorangestellt, dem Jahresgang in Jahr 2 der letzte Wert aus Jahr 1. Der erste Wert im Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge ist NaN, weshalb dieser Wert entfällt und der Index zurückgesetzt wird. Der vollständige Befehl lautet: `pd.Series.diff().clip(upper = 0)[1:] .reset_index(drop = True)`. Die Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge wird von der Restlastkurve abgezogen und so die Restlastkurve nach Ausspeicherung bestimmt. Da die Ausspeicherung im Jahresgang durch negative Werte angezeigt wird, erfolgt die Differenzbildung durch Addition.

Wenn eine Netzlastdatenreihe übergeben wurde, wird auf der Grundlage der Restlastkurve nach Ausspeicherung der realisierte Anteil erneuerbarer Erzeugung berechnet: $1 - (\text{Summe positive Restlast} / \text{Summe Netzlast})$. Die Berechnungen werden für kleiner dimensionierte Speicher wiederholt.

- Ausgabe: Wenn `output = False`, werden die Restlastkurven nach Ausspeicherung als DataFrame zurückgeben. Der DataFrame besteht aus je einer Spalte für die relative Speichergröße 1 sowie für alle übergebenen relativ reduzierten Speichergrößen. Die Restlastkurven in Jahr 1 und Jahr 2 sind in Zeile 0 bzw. 1 gespeichert. Wenn `output = True`, werden die summierte Netzlast, die summierte positive & negative Restlast, der Anteil erneuerbarer Erzeugung ohne Speicher sowie der realisierter Anteil erneuerbarer Erzeugung mit der Speichergröße im Basisjahr und für alle übergebenen Speichergrößen jeweils für Jahr 1 und Jahr 2 mittels `print()` ausgegeben.

7.19 ohne Wirkungsgrad

```
# Anteil EE berechnen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), netzlast = -1, neue_speichergrößen = [0]
## Verarbeitung: Aufruf der Funktion jahresgang_speicher_berechnen(data) zur Bestimmung von Speichergrößen
## Verarbeitung: Im Jahresgang des Stromspeichers wird die ausgespeicherte Strommenge bestimmt
## Verarbeitung: Wenn netzlast = pd.Series(netzlast, dtype = 'float') übergeben wurde, wird diese verarbeitet
## Verarbeitung: Die Berechnungen werden für kleiner dimensionierte Speicher wiederholt, defautlweise für Speichergröße 1
## Ausgabe: output = False: DataFrame der Restlastkurve(n) nach Ausspeichern wird zurückgegeben
## Ausgabe: output = True, Ausgabe Summe Netzlast, positive / negative Restlast, Anteil EE oder Speichergrößen

def anteil_ee_berechnen(data, netzlast = -1, neue_speichergrößen = [0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5]):

    # Jahresgang im Basisjahr bestimmen
    ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, output = False)
    speichergröße0 = ergebnis[0]
    jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
    jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
    jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
    jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

    # Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge, erster Wert ist NaN und entfällt
    ausspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index(drop = True)
    ausspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index(drop = True)

    # Restlast nach Ausspeicherung berechnen, Werte in ausspeicherung_jahr1 und ausspeicherung_jahr2
    restlast_jahr1 = data + ausspeicherung_jahr1
    restlast_jahr2 = data + ausspeicherung_jahr2

    # Restlast in DataFrame speichern
```

```

restlast_nach_ausspeichern = pd.DataFrame({'Speichergröße 1': [ list(restlast_jahr1), list(restlast_jahr2) ] })

if type(netzlast) is int: # Anteil EE kann nicht ermittelt werden
    if output:
        print("Netzlast wurde nicht übergeben. Anteil erneuerbarer Energien kann nicht ermittelt werden")
    else:
        output = False

else: # Anteil EE berechnen

    # Anteil Anteil EE berechnen = 1 - Summe positive Restlast / Summe Netzlast
    ## Jahr1
    anteil_ee_jahr1 = 1 - (restlast_jahr1.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

    ## Jahr2
    anteil_ee_jahr2 = 1 - (restlast_jahr2.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

    # Anteil EE in DataFrame speichern
    dataframe_anteil_ee = pd.DataFrame({'relative Speichergröße': pd.concat([ pd.Series([1]), pd.Series([0]) ])})

    # Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge und Anteil EE bei alternativen Speichergrößen
    count = 1

    for i in range(len(neue_speichergrößen)):

        speichergröße_neu = speichergröße0 * neue_speichergrößen[i]

        ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = speichergröße_neu, output = True)
        jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
        jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

        # Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
        jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
        jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

        # Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge, erster Wert ist NaN und entfällt
        ausspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index()
        ausspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index()

        # Restlast nach Ausspeicherung berechnen, Werte in ausspeicherung_jahr1 und ausspeicherung_jahr2
        restlast_jahr1 = data + ausspeicherung_jahr1
        restlast_jahr2 = data + ausspeicherung_jahr2

```

```

# Spalte in DataFrame restlast_nach_ausspeichern einfügen
restlast_nach_ausspeichern['Speichergröße ' + str(speichergröße_neu)] = [ list(restlast_)

# Anteil EE berechnen = 1 - Summe positive Restlast / Summe Netzlast
if type(netzlast) is not int:

    ## Jahr1
    anteil_ee_jahr1 = 1 - (restlast_jahr1.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

    ## Jahr2
    anteil_ee_jahr2 = 1 - (restlast_jahr2.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

    # Anteil EE in DataFrame speichern, value assignment: df.loc[row_indexer, "col"] = value
    dataframe_anteil_ee.loc[count, 'Anteil EE Jahr1'] = anteil_ee_jahr1
    dataframe_anteil_ee.loc[count, 'Anteil EE Jahr2'] = anteil_ee_jahr2

    count += 1

if output: # Anteil EE ausgeben

    print(f"Summe Netzlast: {netzlast.sum():,.2f}\nSumme positive Restlast: {data.clip(lower = 0).sum():,.2f}")
    print(dataframe_anteil_ee)

else: # Restlastkurven zurückgeben
    return restlast_nach_ausspeichern

```

```
anteil_ee_berechnen(restlast, netzlast = verbrauch['Gesamt (Netzlast) [MWh]'], neue_speichergrö
```

Summe Netzlast: 458,271,100.75

Summe positive Restlast: 207,842,228.25 Summe negative Restlast: -1,002,976.00

Speichergröße 1: 119,667.00 Anteil EE ohne Speicher: 0.55

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.0	0.55	0.55
1	0.9	0.55	0.55
2	0.8	0.55	0.55
3	0.7	0.55	0.55
4	0.6	0.55	0.55
5	0.5	0.55	0.55

7.20 mit Wirkungsgrad

```
# Anteil EE berechnen
## Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), netzlast = -1, einspeicherwirkungsgrad =
## Verarbeitung: Aufruf der Funktion jahresgang_speicher_berechnen(data) zur Bestimmung von Speichergrößen
## Verarbeitung: Im Jahresgang des Stromspeichers wird die ausgespeicherte Strommenge bestimmt
## Verarbeitung: Wenn netzlast = pd.Series(netzlast, dtype = 'float') übergeben wurde, wird auf den Wert verzweigt
## Verarbeitung: Die Berechnungen werden für kleiner dimensionierte Speicher wiederholt, defautlweise für den gesamten Speicher
## Ausgabe: output = False: DataFrame der Restlastkurve(n) nach Ausspeichern wird zurückgegeben
## Ausgabe: output = True, Ausgabe Summe Netzlast, positive / negative Restlast, Anteil EE oder Speichergrößen

def anteil_ee_berechnen(data, netzlast = -1, einspeicherwirkungsgrad = 1, ausspeicherwirkung = 1, output = False):
    # Jahresgang im Basisjahr bestimmen
    ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = -1, einspeicherwirkungsgrad = einspeicherwirkung)
    speichergröße0 = ergebnis[0]
    jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
    jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
    jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
    jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

    # Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge, erster Wert ist NaN und entfällt
    ausspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index(drop = True)
    ausspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index(drop = True)

    # Restlast nach Ausspeicherung berechnen, Werte in ausspeicherung_jahr1 und ausspeicherung_jahr2
    restlast_jahr1 = data + ausspeicherung_jahr1
    restlast_jahr2 = data + ausspeicherung_jahr2

    # Restlast in DataFrame speichern
    restlast_nach_ausspeichern = pd.DataFrame({'Speichergröße 1': [list(restlast_jahr1), list(restlast_jahr2)]})

    if type(netzlast) is int: # Anteil EE kann nicht ermittelt werden
        if output:
            print("Netzlast wurde nicht übergeben. Anteil erneuerbarer Energien kann nicht ermittelt werden")
    else: # Anteil EE berechnen
        # Anteil EE berechnen
        # Eingabe: data = pd.Series(data, dtype = 'float'), netzlast = -1, einspeicherwirkungsgrad =
        # Verarbeitung: Aufruf der Funktion jahresgang_speicher_berechnen(data) zur Bestimmung von Speichergrößen
        # Verarbeitung: Im Jahresgang des Stromspeichers wird die ausgespeicherte Strommenge bestimmt
        # Verarbeitung: Wenn netzlast = pd.Series(netzlast, dtype = 'float') übergeben wurde, wird auf den Wert verzweigt
        # Verarbeitung: Die Berechnungen werden für kleiner dimensionierte Speicher wiederholt, defautlweise für den gesamten Speicher
        # Ausgabe: output = False: DataFrame der Restlastkurve(n) nach Ausspeichern wird zurückgegeben
        # Ausgabe: output = True, Ausgabe Summe Netzlast, positive / negative Restlast, Anteil EE oder Speichergrößen
```

```

# Anteil Anteil EE berechnen = 1 - Summe positive Restlast / Summe Netzlast
## Jahr1
anteil_ee_jahr1 = 1 - (restlast_jahr1.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

## Jahr2
anteil_ee_jahr2 = 1 - (restlast_jahr2.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

# Anteil EE in DataFrame speichern
dataframe_anteil_ee = pd.DataFrame({'relative Speichergröße': pd.concat([ pd.Series([1]) ]))

# Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge und Anteil EE bei alternativen Speichergrößen
count = 1

for i in range(len(neue_speichergrößen)):

    speichergröße_neu = speichergröße0 * neue_speichergrößen[i]

    ergebnis = jahresgang_speicher_berechnen(data, speichergröße = speichergröße_neu, einspeisung = 0)
    jahresgang_speicher_jahr1 = ergebnis[1]
    jahresgang_speicher_jahr2 = ergebnis[2]

    # Jahresgang Jahr 1 eine Null voranstellen, Jahresgang Jahr 2 den letzten Wert aus Jahr 1
    jahresgang_speicher_jahr1 = pd.concat([pd.Series([0]), jahresgang_speicher_jahr1])
    jahresgang_speicher_jahr2 = pd.concat([jahresgang_speicher_jahr1[-1:], jahresgang_speicher_jahr2])

    # Jahresgang der ausgespeicherten Strommenge, erster Wert ist NaN und entfällt
    ausspeicherung_jahr1 = jahresgang_speicher_jahr1.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index()
    ausspeicherung_jahr2 = jahresgang_speicher_jahr2.diff().clip(upper = 0)[1:].reset_index()

    # Restlast nach Ausspeicherung berechnen, Werte in ausspeicherung_jahr1 und ausspeicherung_jahr2
    restlast_jahr1 = data + ausspeicherung_jahr1
    restlast_jahr2 = data + ausspeicherung_jahr2

    # Spalte in DataFrame restlast_nach_ausspeichern einfügen
    restlast_nach_ausspeichern['Speichergröße ' + str(speichergröße_neu)] = [ list(restlast_nach_ausspeichern['Speichergröße ' + str(speichergröße_neu)]) ]

# Anteil EE berechnen = 1 - Summe positive Restlast / Summe Netzlast
if type(netzlast) is not int:

    ## Jahr1
    anteil_ee_jahr1 = 1 - (restlast_jahr1.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

```

```

## Jahr2
anteil_ee_jahr2 = 1 - (restlast_jahr2.clip(lower = 0).sum() / netzlast.sum() )

# Anteil EE in DataFrame speichern, value assignment: df.loc[row_indexer, "col"] = value
dataframe_anteil_ee.loc[count, 'Anteil EE Jahr1'] = anteil_ee_jahr1
dataframe_anteil_ee.loc[count, 'Anteil EE Jahr2'] = anteil_ee_jahr2

count += 1

if output: # Anteil EE ausgeben

    print(f"Summe Netzlast: {netzlast.sum():,.2f}\nSumme positive Restlast: {data.clip(lower = 0).sum():,.2f}\nSumme negative Restlast: {-data.clip(lower = 0).sum():,.2f}")
    print(dataframe_anteil_ee)

else: # Restlastkurven zurückgeben
    return restlast_nach_ausspeichern

anteil_ee_berechnen(restlast, netzlast = verbrauch['Gesamt (Netzlast) [MWh]'], einspeicherwerte = einspeicherwerte)

```

Summe Netzlast: 458,271,100.75
 Summe positive Restlast: 207,842,228.25 Summe negative Restlast: -1,002,976.00
 Speichergröße 1: 102,674.54 Anteil EE ohne Speicher: 0.55

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.0	0.55	0.55
1	0.9	0.55	0.55
2	0.8	0.55	0.55
3	0.7	0.55	0.55
4	0.6	0.55	0.55
5	0.5	0.55	0.55

Für das Jahr 2023 ergäbe sich durch die Netzintegration eines Stromspeichers zur (teilweisen) Deckung der Restlast aus erneuerbarer Überschussproduktion eine nur unmerkliche Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Strommix. Das liegt daran, dass die einzuspeichernden erneuerbaren Überschüsse mit 1.002.976 MWh, also rund 1 TWh, erheblich kleiner als die zu deckende positive Restlast mit 207.842.228 MWh, also rund 208 TWh, sind. Die durch den Stromspeicher verschiebbare erneuerbare Überschussproduktion entspricht weniger als einem halben Prozent der zu deckenden Restlast.

Mit steigendem Anteil erneuerbarer Erzeugung wird die Speicherung überschüssiger Stromerzeugung jedoch immer relevanter werden. Die Dimension der erforderlichen Stromspeicher

können mit den entwickelten Funktionen für den Ausbaupfad erneuerbarer Energien abgeschätzt werden.

7.21 Aufgabe schließende Datenanalyse

Berechnen Sie entsprechend des von der Bundesregierung vorgegebenen Ausbaupfads den Anteil erneuerbarer Stromerzeugung für das Jahr 2030 und für das Jahr 2035 (siehe Listing 7.1).

- Wie groß ist der maximal benötigte Speicher?
- Welcher Anteil erneuerbarer Stromerzeugung wird erreicht, wenn der Speicher halb so groß, ein Zehntel so groß oder ein Hundertstel so groß dimensioniert wird?
- Als Netzlast verwenden Sie die Projektionen des Stromverbrauchs für das Jahr 2030 und 2035 (siehe untenstehender Hinweis).
- Für den Wirkungsgrad können die bestehenden Pumpspeicherkraftwerke als Orientierung dienen. Der Gesamtwirkungsgrad wurde mit 79.10 Prozent berechnet. Diesem Wirkungsgrad entspricht näherungsweise eine Aufteilung von Einspeicherwirkungsgrad = 0.9, Ausspeicherwirkungsgrad = 0.88.

⚠️ Projektionen des Stromverbrauchs

Der künftige Stromverbrauch wird wahrscheinlich nicht dem des Jahres 2023 entsprechen. Projektionen lassen einen Stromverbrauch von 658 TWh (Kemmler, Wünsch, und Burret 2021, S. 4) für das Jahr 2030 und von 670,4 TWh im Jahr 2035 (Szenario B nach Nahmmacher et al. 2021, S. 54) erwarten. Die Steigerung des Stromverbrauchs gegenüber 2023 kann leicht berechnet werden:

```
lastfaktor_2030_MWh = (658 * 1000 * 1000) / verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].sum()
lastfaktor_2035_MWh = (670.4 * 1000 * 1000) / verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].sum()

print(f"Steigerung des Stromverbrauchs 2030 gegenüber 2023 Faktor: {lastfaktor_2030_MWh}
      f"Steigerung des Stromverbrauchs 2035 gegenüber 2023 Faktor: {lastfaktor_2035_MWh}

Steigerung des Stromverbrauchs 2030 gegenüber 2023 Faktor: 1.44
Steigerung des Stromverbrauchs 2035 gegenüber 2023 Faktor: 1.46
```

Kemmler, Andreas, Aurel Wünsch, und Heiko Burret. 2021. "Entwicklung des Bruttostromverbrauchs bis 2030. Kurzstudie." https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/prognos-bruttostromverbrauch-2018-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Nahmmacher, Paul, Christian Paris, Martin Ruge, Sebastian Spieker, Thomas Anderski, Sebastian Bohlen, Robin Kaiser, Caroline Podewski, Jürgen Apfelbeck, Timo Kahl, Fabian Lukas, Sven Schäfer, Paul-Steven Ganer, Max Muller und Daniel Stützle. 2021. "Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber." https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bedarfsermittlung/2035/SR/Szenariorahmen_2035_Entwurf.pdf?__blob=publicationFile

💡 Tipp 11: Musterlösung Aufgabe schließende Datenanalyse

7.22 vollständige Musterlösung

```

import pandas as pd

# Deklarieren der Anzahl der Nachkommastellen
pd.set_option("display.precision", 2)

# Datensätze werden eingelesen
# !
# Für die eigene Anwendung muss der Dateipfad an den korrekten Speicherort der runtergeladenen Dateien geändert werden
# !

installierte_leistung_ms = pd.read_csv("01-daten/Installierte_Erzeugungsleistung_202301010000.csv", sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y")

erzeugung_ms = pd.read_csv("01-daten/Realisierte_Erzeugung_202301010000_202401010000_Vierteljahr.csv", sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y")

verbrauch_ms = pd.read_csv("01-daten/Realisierter_Stromverbrauch_202301010000_202401010000_Vierteljahr.csv", sep = ";", thousands = ".", decimal = ",", parse_dates = [0, 1], date_format = "%d.%m.%Y")

# Zeichenkette " Originalauflösungen" entfernen
erzeugung_ms.columns = erzeugung_ms.columns.str.replace(pat = " Originalauflösungen", replace = "")
installierte_leistung_ms.columns = installierte_leistung_ms.columns.str.replace(pat = " Originalauflösungen", replace = "")
verbrauch_ms.columns = verbrauch_ms.columns.str.replace(pat = " Originalauflösungen", replace = "")

# Zusammenfassen der erneuerbaren Erzeugung in einer Liste
erneuerbare_ms = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]']

pumpspeicherkapazität_MWh_ms = 37.4 * 1000

# Projizierte Erzeugung und Stromverbrauch 2030 & 2035:
print(f"Wind an Land 2030:\t{zubaufaktor_windonshore_2030_ms := 115 / (installierte_leistung_ms['Wind Onshore [MWh]'].sum() / 1000)}")
print(f"Wind auf See 2030:\t{zubaufaktor_windoffshore_2030_ms := 30 / (installierte_leistung_ms['Wind Offshore [MWh]'].sum() / 1000)}")
print(f"Solar 2030:\t\t\t{zubaufaktor_solar_2030_ms := 215 / (installierte_leistung_ms['Solar [MWh]'].sum() / 1000)}")
print(f"Biomasse 2030:\t\t\t{8.4 / (installierte_leistung_ms['Biomasse [MW]'].sum() / 1000)}")

print(f"\n\nWind an Land 2035:\t{zubaufaktor_windonshore_2035_ms := 157 / (installierte_leistung_ms['Wind Onshore [MWh]'].sum() / 1000)}")
print(f"Wind auf See 2035:\t{zubaufaktor_windoffshore_2035_ms := 40 / (installierte_leistung_ms['Wind Offshore [MWh]'].sum() / 1000)}")
print(f"Solar 2035:\t\t\t{zubaufaktor_solar_2035_ms := 309 / (installierte_leistung_ms['Solar [MWh]'].sum() / 1000)}")
print(f"Biomasse 2035:\t\t\t{8.4 / (installierte_leistung_ms['Biomasse [MW]'].sum() / 1000)}")

lastfaktor_2030_MWh_ms = (658 * 1000 * 1000) / verbrauch_ms["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].sum()
lastfaktor_2035_MWh_ms = (670.4 * 1000 * 1000) / verbrauch_ms["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].sum()

print(f"\nSteigerung des Stromverbrauchs 2030 gegenüber 2023 Faktor: {lastfaktor_2030_MWh_ms}")
print(f"Steigerung des Stromverbrauchs 2035 gegenüber 2023 Faktor: {lastfaktor_2035_MWh_ms}")

# Definieren der Restlast
restlast_ms = pd.DataFrame()
restlast_ms["Netzlast [MWh]"] = verbrauch_ms["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
restlast_ms["Erneuerbare [MWh]"] = erzeugung_ms[erneuerbare_ms].sum(axis = "columns").copy()
restlast_ms["Restlast [MWh]"] = restlast_ms["Netzlast [MWh]"] - restlast_ms["Erneuerbare [MWh]"]
restlast_ms = restlast_ms["Restlast [MWh]"]

```

Wind an Land 2030: 2.00
Wind auf See 2030: 3.69
Solar 2030: 3.41
Biomasse 2030: 0.99

Wind an Land 2035: 2.73
Wind auf See 2035: 4.92
Solar 2035: 4.90
Biomasse 2035: 0.99

Steigerung des Stromverbrauchs 2030 gegenüber 2023 Faktor: 1.44
Steigerung des Stromverbrauchs 2035 gegenüber 2023 Faktor: 1.46

2030

erforderliche Speichergröße in 2030: 6,170,038.0 MWh

Summe Netzlast: 658,000,000.00

Summe positive Restlast: 175,897,072.30 Summe negative Restlast: -85,250,478.82

Speichergröße 1: 6,170,038.04 Anteil EE ohne Speicher: 0.73

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.00	0.83	0.84
1	0.50	0.83	0.83
2	0.10	0.81	0.81
3	0.01	0.75	0.75

2035

erforderliche Speichergröße in 2035: 23,829,823.9 MWh

Summe Netzlast: 670,400,000.00

Summe positive Restlast: 125,949,558.61 Summe negative Restlast: -221,510,407.41

Speichergröße 1: 23,829,823.85 Anteil EE ohne Speicher: 0.81

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.00	0.98	1.00
1	0.50	0.97	0.97
2	0.10	0.94	0.94
3	0.01	0.87	0.87

Musterlösung von Marc Sönnecken. Für die Kompatibilität mit diesem Skript wurden der Dateipfad und die Objektbezeichnungen angepasst. Die Definition der verwendeten Funktionen wurde ausgeschnitten (identisch zu den im Skript gezeigten). Der Code wurde so ergänzt, dass in der Ausgabe einige zusätzliche Leerzeilen und Markierungen für das Jahr 2030 und das Jahr 2035 erscheinen.

7.23 Referenz 2030

```

meine_speichergrößen = [0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.08, 0.06, 0.04, 0.02]
mein_einspeicherwirkungsgrad = 0.9
mein_ausspeicherwirkungsgrad = 0.88

# Datensatz 2030 erzeugen
## zubaufaktor_windonshore_2030
## zubaufaktor_windoffshore_2030
## zubaufaktor_solar_2030

erzeugung_2030 = erzeugung.copy()
erzeugung_2030['Wind Onshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windonshore_2030
erzeugung_2030['Wind Offshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windoffshore_2030
erzeugung_2030['Photovoltaik [MWh]'] *= zubaufaktor_solar_2030

erneuerbare_2030 = pd.Series()
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]', 'Sonstige Erneuerbare [MWh]']
erneuerbare_2030 = erzeugung_2030[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()

netzlast_2023 = pd.Series()
netzlast_2023 = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
netzlast_2030 = netzlast_2023 * lastfaktor_2030_MWh

restlast_2030 = pd.Series()
restlast_2030 = netzlast_2030 - erneuerbare_2030

# Ausgabe
speicher_2030 = berechne_speichergröße(restlast_2030, einspeicherwirkungsgrad = mein_einspeicherwirkungsgrad)
print(f"maximal erforderliche Speichergröße 2030: {speicher_2030:.1f} MWh\nDies entspricht {speicher_2030 / 1000000} GWh")
print("\n")

effekt_kappung_berechnen(restlast_2030, einspeicherwirkungsgrad = mein_einspeicherwirkungsgrad)
print("\n")

anteil_ee_berechnen(restlast_2030, netzlast = netzlast_2030, einspeicherwirkungsgrad = mein_einspeicherwirkungsgrad)
print("\n")

```

maximal erforderliche Speichergröße 2030: 6,170,038.0 MWh
Dies entspricht 165.0 Pumpspeicheräquivalenten.

Speichergröße Einspeicherung Jahr1 Zyklen Jahr1 Einspeicherung Jahr2 \

0	6.17e+06	7.67e+07	11.99	7.67e+07
1	5.55e+06	7.67e+07	13.32	7.61e+07
2	4.94e+06	7.61e+07	14.92	7.55e+07
3	4.32e+06	7.55e+07	16.98	7.49e+07
4	3.70e+06	7.49e+07	19.73	7.43e+07
5	3.09e+06	7.43e+07	23.58	7.36e+07
6	2.47e+06	7.35e+07	29.29	7.29e+07
7	1.85e+06	7.17e+07	38.23	7.12e+07
8	1.23e+06	6.79e+07	54.56	6.76e+07
9	6.17e+05	5.90e+07	95.05	5.86e+07
10	4.94e+05	5.59e+07	112.65	5.55e+07
11	3.70e+05	5.13e+07	137.99	5.09e+07
12	2.47e+05	4.28e+07	172.79	4.25e+07
13	1.23e+05	2.66e+07	215.36	2.65e+07
14	6.17e+04	1.51e+07	243.93	1.50e+07

Zyklen Jahr2

0	12.44
1	13.71
2	15.29
3	17.34
4	20.06
5	23.87
6	29.53
7	38.45
8	54.76
9	94.96
10	112.41
11	137.51
12	172.29
13	214.86
14	243.43

relative Speichergröße gekappte Einspeicherung Jahr1 \

0	0.90	1.49e-08
1	0.80	5.95e+05
2	0.70	1.21e+06
3	0.60	1.83e+06
4	0.50	2.45e+06
5	0.40	3.21e+06

6	0.30	5.04e+06
7	0.20	8.78e+06
8	0.10	1.78e+07
9	0.08	2.09e+07
10	0.06	2.55e+07
11	0.04	3.40e+07
12	0.02	5.01e+07
13	0.01	6.16e+07

gekappte Einspeicherung Jahr2		
0	6.17e+05	
1	1.23e+06	
2	1.85e+06	
3	2.47e+06	
4	3.09e+06	
5	3.85e+06	
6	5.55e+06	
7	9.15e+06	
8	1.81e+07	
9	2.12e+07	
10	2.58e+07	
11	3.42e+07	
12	5.02e+07	
13	6.17e+07	

Summe Netzlast: 658,000,000.00

Summe positive Restlast: 175,897,072.30 Summe negative Restlast: -85,250,478.82

Speichergröße 1: 6,170,038.04 Anteil EE ohne Speicher: 0.73

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.00	0.83	0.84
1	0.90	0.83	0.83
2	0.80	0.83	0.83
3	0.70	0.83	0.83
4	0.60	0.83	0.83
5	0.50	0.83	0.83
6	0.40	0.83	0.83
7	0.30	0.83	0.83
8	0.20	0.82	0.82
9	0.10	0.81	0.81

10	0.08	0.81	0.81
11	0.06	0.80	0.80
12	0.04	0.79	0.79
13	0.02	0.77	0.77
14	0.01	0.75	0.75

7.24 Referenz 2035

```
# Datensatz 2035 erzeugen
# ## zubaufaktor_windonshore_2035
# ## zubaufaktor_windonshore_2035
# ## zubaufaktor_solar_2035

erzeugung_2035 = erzeugung.copy()
erzeugung_2035['Wind Onshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windonshore_2035
erzeugung_2035['Wind Offshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windoffshore_2035
erzeugung_2035['Photovoltaik [MWh]'] *= zubaufaktor_solar_2035

erneuerbare_2035 = pd.Series()
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]', 'Sonstige Erneuerbare [MWh]']
erneuerbare_2035 = erzeugung_2035[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()

netzlast_2023 = pd.Series()
netzlast_2023 = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
netzlast_2035 = netzlast_2023 * lastfaktor_2035_MWh

restlast_2035 = pd.Series()
restlast_2035 = netzlast_2035 - erneuerbare_2035

# Ausgabe
speicher_2035 = berechne_speichergröße(restlast_2035, einspeicherwirkungsgrad = mein_einspeicherwirkungsgrad)
print(f"maximal erforderliche Speichergröße 2035: {speicher_2035:.1f} MWh\nDies entspricht {speicher_2035 / netzlast_2035 * 100:.1f} % der Netzlast")
print("\n")

effekt_kappung_berechnen(restlast_2035, einspeicherwirkungsgrad = mein_einspeicherwirkungsgrad)
print("\n")

anteil_ee_berechnen(restlast_2035, netzlast = netzlast_2035, einspeicherwirkungsgrad = mein_einspeicherwirkungsgrad)
print("\n")

maximal erforderliche Speichergröße 2035: 23,829,823.9 MWh
```

Dies entspricht 637.2 Pumpspeicheräquivalenten.

	Speichergröße	Einspeicherung Jahr1	Zyklen Jahr1	Einspeicherung Jahr2	\
0	2.38e+07	1.49e+08	5.84	1.43e+08	
1	2.14e+07	1.47e+08	6.44	1.41e+08	
2	1.91e+07	1.44e+08	7.17	1.38e+08	
3	1.67e+07	1.42e+08	8.05	1.33e+08	
4	1.43e+07	1.39e+08	9.19	1.29e+08	
5	1.19e+07	1.34e+08	10.73	1.24e+08	
6	9.53e+06	1.29e+08	12.99	1.19e+08	
7	7.15e+06	1.21e+08	16.49	1.14e+08	
8	4.77e+06	1.13e+08	23.15	1.08e+08	
9	2.38e+06	1.01e+08	41.76	9.83e+07	
10	1.91e+06	9.72e+07	50.47	9.53e+07	
11	1.43e+06	9.18e+07	63.73	9.04e+07	
12	9.53e+05	8.23e+07	85.86	8.14e+07	
13	4.77e+05	6.58e+07	137.54	6.53e+07	
14	2.38e+05	4.29e+07	179.40	4.26e+07	

	Zyklen Jahr2
0	6.01
1	6.56
2	7.24
3	7.99
4	8.99
5	10.39
6	12.49
7	15.99
8	22.65
9	41.26
10	49.97
11	63.23
12	85.36
13	137.04
14	178.90

	relative Speichergröße	gekappte Einspeicherung Jahr1	\
0	0.90	2.38e+06	
1	0.80	4.77e+06	

2	0.70	7.15e+06
3	0.60	1.07e+07
4	0.50	1.55e+07
5	0.40	2.07e+07
6	0.30	2.78e+07
7	0.20	3.65e+07
8	0.10	4.86e+07
9	0.08	5.21e+07
10	0.06	5.74e+07
11	0.04	6.69e+07
12	0.02	8.35e+07
13	0.01	1.06e+08

gekappte Einspeicherung Jahr2	
0	2.38e+06
1	5.01e+06
2	9.77e+06
3	1.45e+07
4	1.93e+07
5	2.41e+07
6	2.88e+07
7	3.52e+07
8	4.48e+07
9	4.79e+07
10	5.27e+07
11	6.18e+07
12	7.78e+07
13	1.00e+08

Summe Netzlast: 670,400,000.00

Summe positive Restlast: 125,949,558.61 Summe negative Restlast: -221,510,407.41

Speichergröße 1: 23,829,823.85 Anteil EE ohne Speicher: 0.81

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.00	0.98	1.00
1	0.90	0.98	1.00
2	0.80	0.98	0.99
3	0.70	0.98	0.99
4	0.60	0.98	0.98
5	0.50	0.97	0.97

6	0.40	0.97	0.97
7	0.30	0.96	0.96
8	0.20	0.95	0.95
9	0.10	0.94	0.94
10	0.08	0.94	0.94
11	0.06	0.93	0.93
12	0.04	0.92	0.92
13	0.02	0.90	0.90
14	0.01	0.87	0.87

7.24.1 Grafische Darstellung ausgewählter Speicherauslegungen

Eine grafische Darstellung des Jahresgangs des Speichers kann für verschiedene Auslegungen relativ zur maximal benötigten Speichergröße (C_{max}) mit Hilfe der Funktion `jahresgang_speicher_berechnen(output = False)` erzeugt werden. Dazu wird zunächst aus der prognostizierten Netzlast und dem geplanten erneuerbaren Zubau eine Restlastkurve für das Jahr 2030 und das Jahr 2035 berechnet.

```
# Restlast 2030 berechnen
## zubaufaktor_windonshore_2030
## zubaufaktor_windoffshore_2030
## zubaufaktor_solar_2030

erzeugung_2030 = erzeugung.copy()
erzeugung_2030['Wind Onshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windonshore_2030
erzeugung_2030['Wind Offshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windoffshore_2030
erzeugung_2030['Photovoltaik [MWh]'] *= zubaufaktor_solar_2030

erneuerbare_2030 = pd.Series()
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]']
erneuerbare_2030 = erzeugung_2030[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()

netzlast_2023 = pd.Series()
netzlast_2023 = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
netzlast_2030 = netzlast_2023 * lastfaktor_2030_MWh

restlast_2030 = pd.Series()
restlast_2030 = netzlast_2030 - erneuerbare_2030

# Restlast 2035 berechnen
## zubaufaktor_windonshore_2035
```

```

## zubaufaktor_windonshore_2035
## zubaufaktor_solar_2035

erzeugung_2035 = erzeugung.copy()
erzeugung_2035['Wind Onshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windonshore_2035
erzeugung_2035['Wind Offshore [MWh]'] *= zubaufaktor_windoffshore_2035
erzeugung_2035['Photovoltaik [MWh]'] *= zubaufaktor_solar_2035

erneuerbare_2035 = pd.Series()
erneuerbare = ['Biomasse [MWh]', 'Wasserkraft [MWh]', 'Wind Offshore [MWh]', 'Wind Onshore [MWh]']
erneuerbare_2035 = erzeugung_2035[erneuerbare].sum(axis = "columns").copy()

netzlast_2023 = pd.Series()
netzlast_2023 = verbrauch["Gesamt (Netzlast) [MWh]"].copy()
netzlast_2035 = netzlast_2023 * lastfaktor_2035_MWh

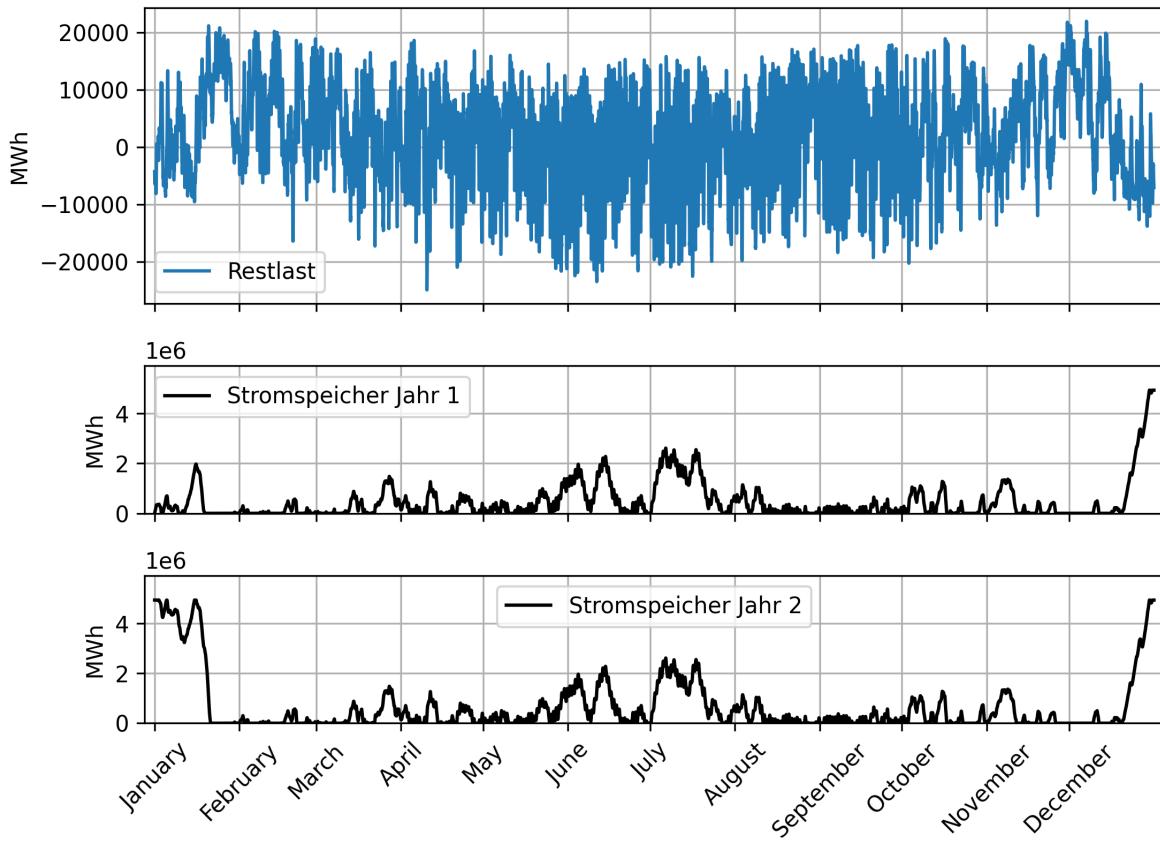
restlast_2035 = pd.Series()
restlast_2035 = netzlast_2035 - erneuerbare_2035

```

Auf der Grundlage der berechneten Restlastkurven werden eine 80-prozentige, eine 20-prozentige und eine 4-prozentige Auslegung der maximal benötigten Speicherkapazität berechnet und dargestellt.

7.25 80 % 2030

Restlast 2030 und Jahresgang eines Speichers mit
 $C_{max} = 0.8$, $\eta_{ein} = 0.9$ und $\eta_{aus} = 0.88$



Zyklenzahl Jahr 1: 14.92

Zyklenzahl Jahr 2: 15.29

Summe Netzlast: 658,000,000.00

Summe positive Restlast: 175,897,072.30 Summe negative Restlast: -85,250,478.82

Speichergröße 1: 6,170,038.04 Anteil EE ohne Speicher: 0.73

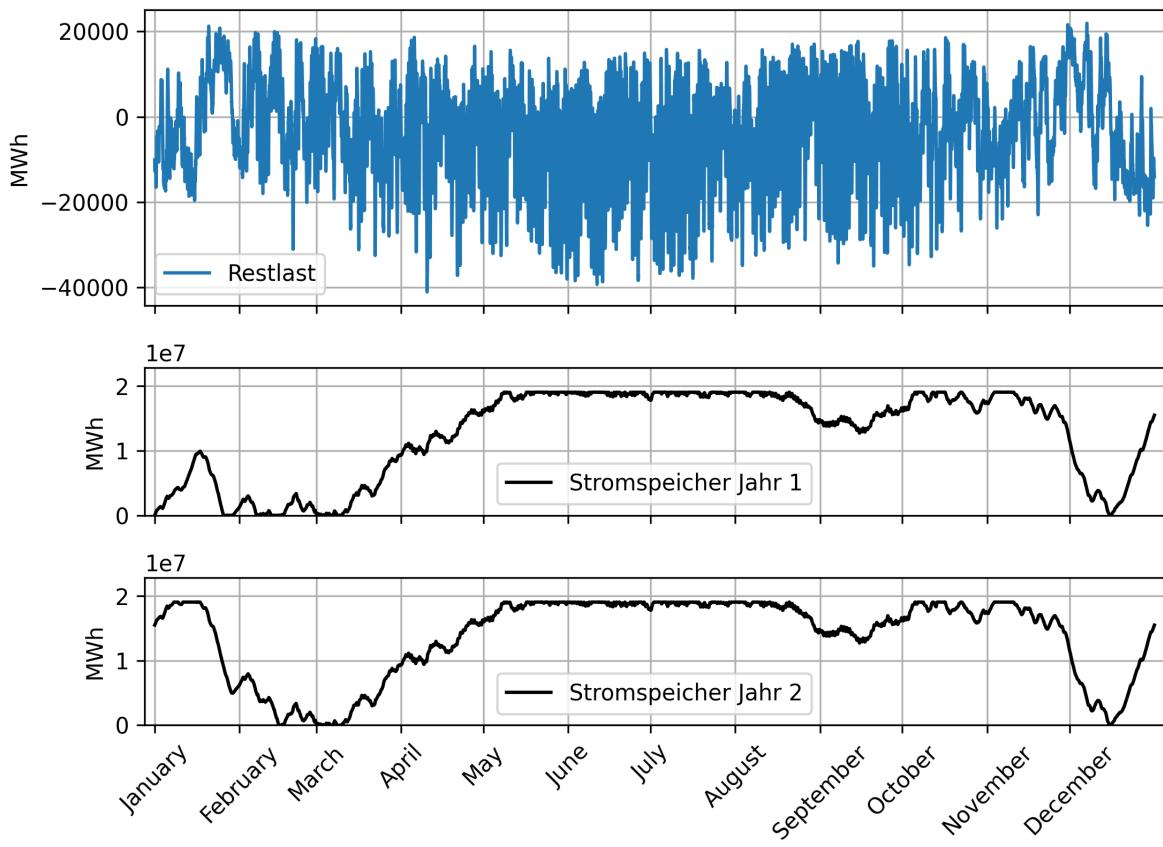
	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.0	0.83	0.84
1	0.8	0.83	0.83

Die Speichergröße beträgt 4,936,030.4 MWh

Dies entspricht 132.0 Pumpspeicheräquivalenten.

7.26 80 % 2035

Restlast 2035 und Jahresgang eines Speichers mit
 $C_{max} = 0.8$, $\eta_{ein} = 0.9$ und $\eta_{aus} = 0.88$



Zyklenzahl Jahr 1: 7.17

Zyklenzahl Jahr 2: 7.24

Summe Netzlast: 670,400,000.00

Summe positive Restlast: 125,949,558.61 Summe negative Restlast: -221,510,407.41

Speichergröße 1: 23,829,823.85 Anteil EE ohne Speicher: 0.81

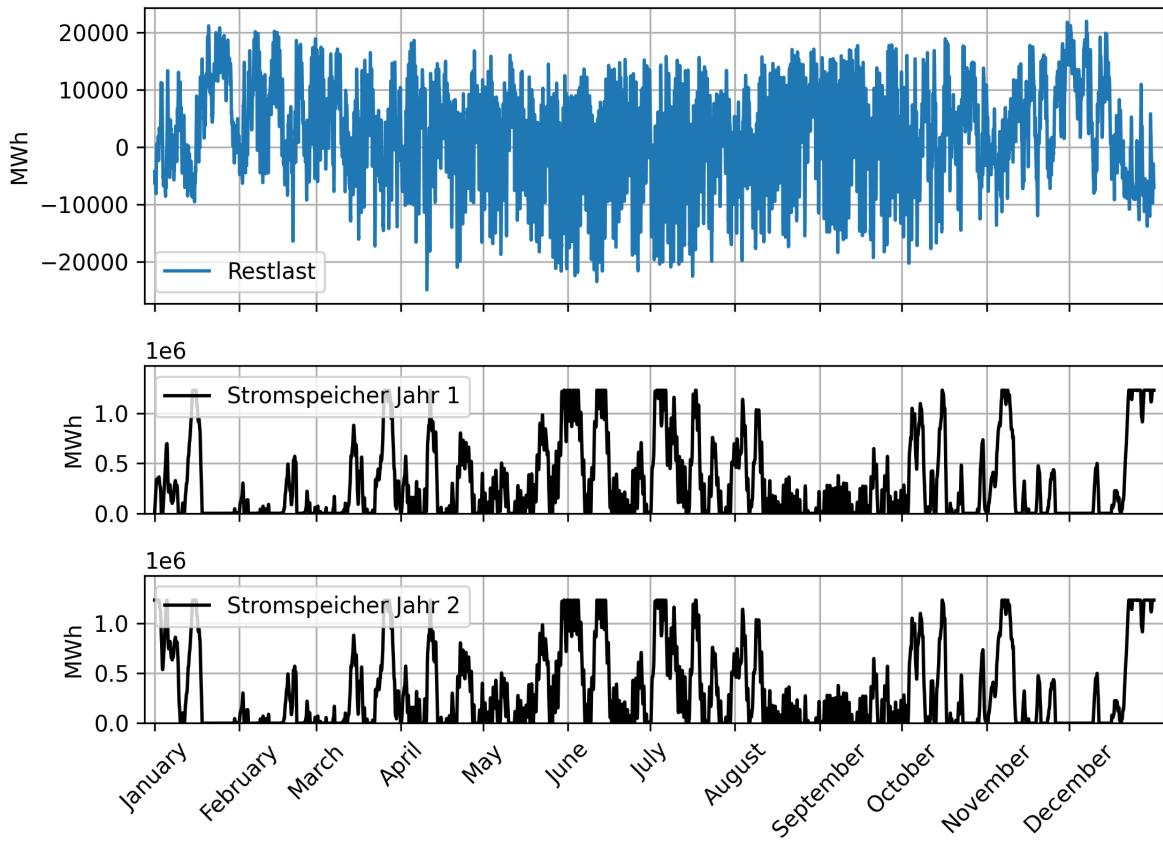
	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.0	0.98	1.00
1	0.8	0.98	0.99

Die Speichergröße beträgt 19,063,859.1 MWh

Dies entspricht 509.7 Pumpspeicheräquivalenten.

7.27 20 % 2030

Restlast 2030 und Jahresgang eines Speichers mit
 $C_{max} = 0.2$, $\eta_{ein} = 0.9$ und $\eta_{aus} = 0.88$



Zyklenzahl Jahr 1: 54.56

Zyklenzahl Jahr 2: 54.76

Summe Netzlast: 658,000,000.00

Summe positive Restlast: 175,897,072.30 Summe negative Restlast: -85,250,478.82

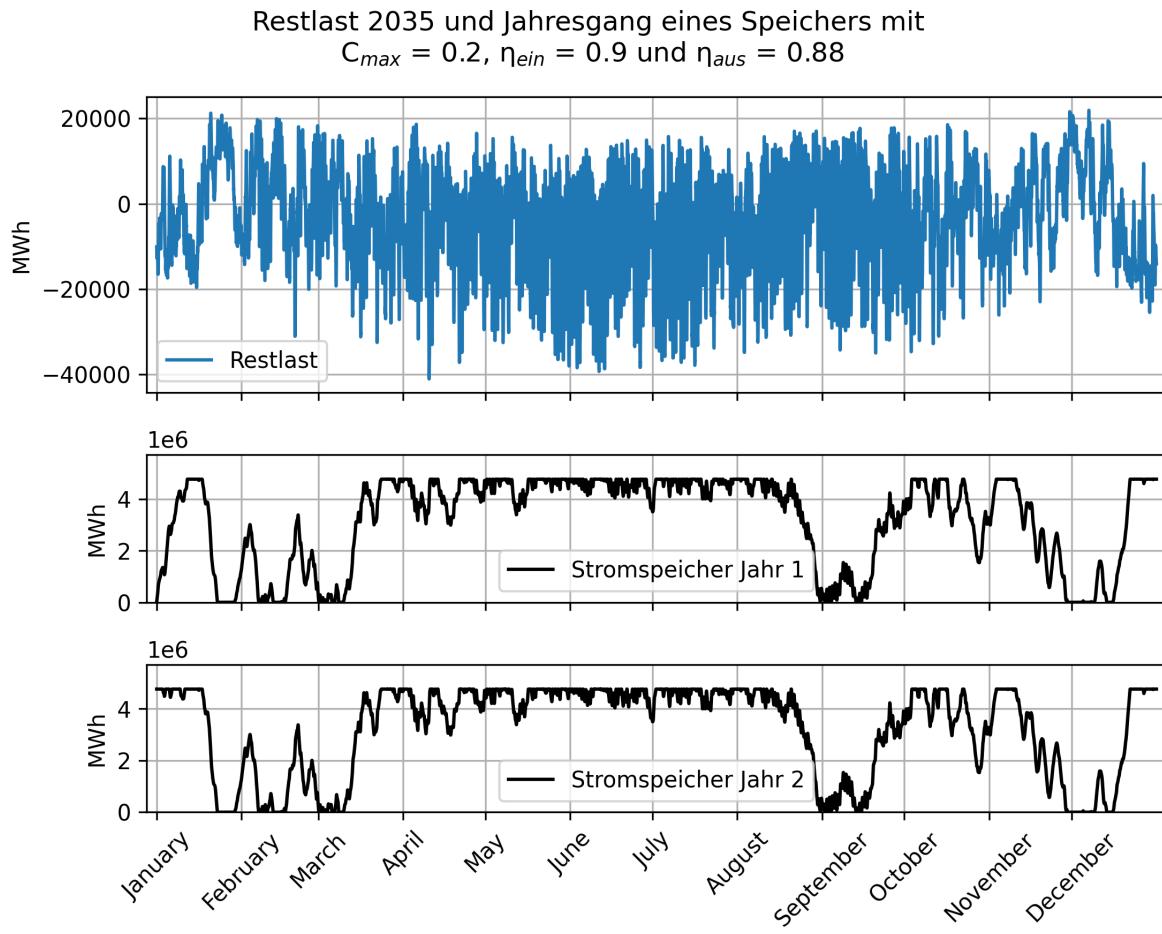
Speichergröße 1: 6,170,038.04 Anteil EE ohne Speicher: 0.73

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.0	0.83	0.84
1	0.2	0.82	0.82

Die Speichergröße beträgt 1,234,007.6 MWh

Dies entspricht 33.0 Pumpspeicheräquivalenten.

7.28 20 % 2035



Zyklenzahl Jahr 1: 23.15

Zyklenzahl Jahr 2: 22.65

Summe Netzlast: 670,400,000.00

Summe positive Restlast: 125,949,558.61 Summe negative Restlast: -221,510,407.41

Speichergröße 1: 23,829,823.85 Anteil EE ohne Speicher: 0.81

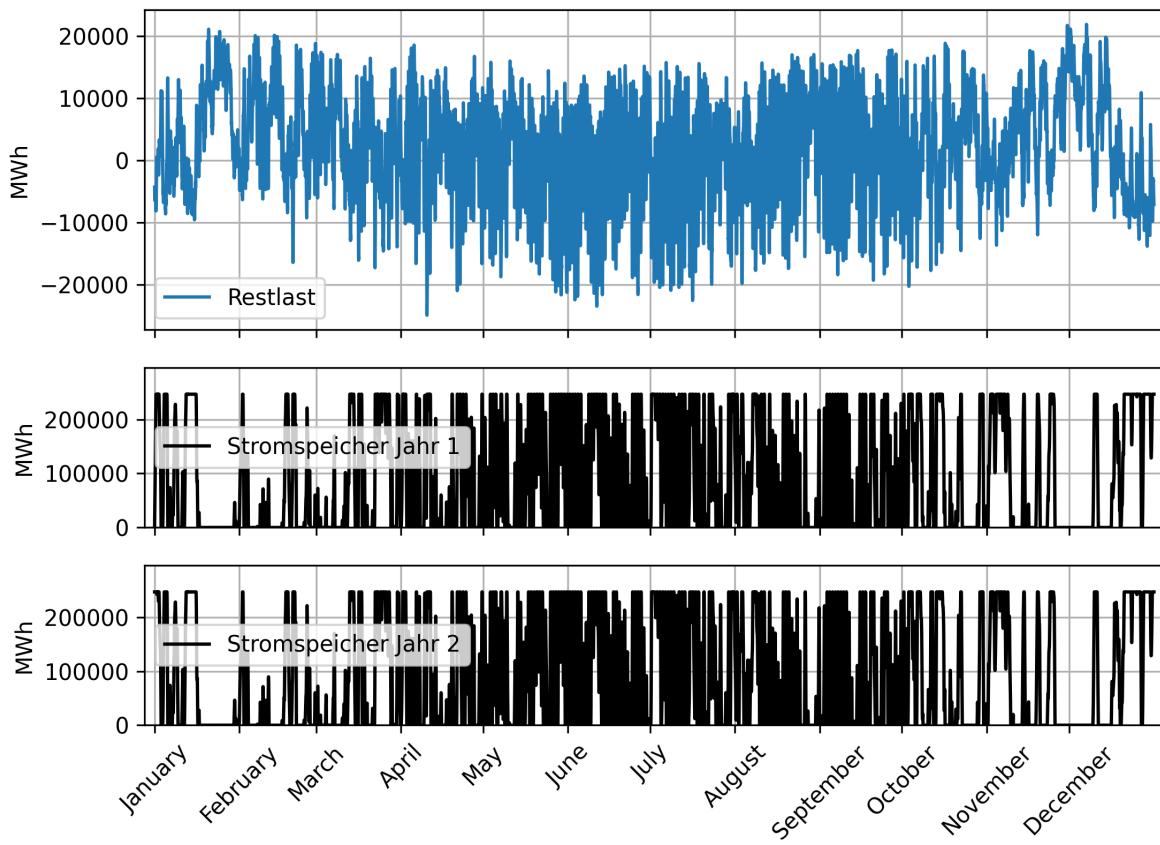
	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.0	0.98	1.00
1	0.2	0.95	0.95

Die Speichergröße beträgt 4,765,964.8 MWh

Dies entspricht 127.4 Pumpspeicheräquivalenten.

7.29 4 % 2030

Restlast 2030 und Jahresgang eines Speichers mit
 $C_{max} = 0.04$, $\eta_{ein} = 0.9$ und $\eta_{aus} = 0.88$



Zyklenzahl Jahr 1: 172.79

Zyklenzahl Jahr 2: 172.29

Summe Netzlast: 658,000,000.00

Summe positive Restlast: 175,897,072.30 Summe negative Restlast: -85,250,478.82

Speichergröße 1: 6,170,038.04 Anteil EE ohne Speicher: 0.73

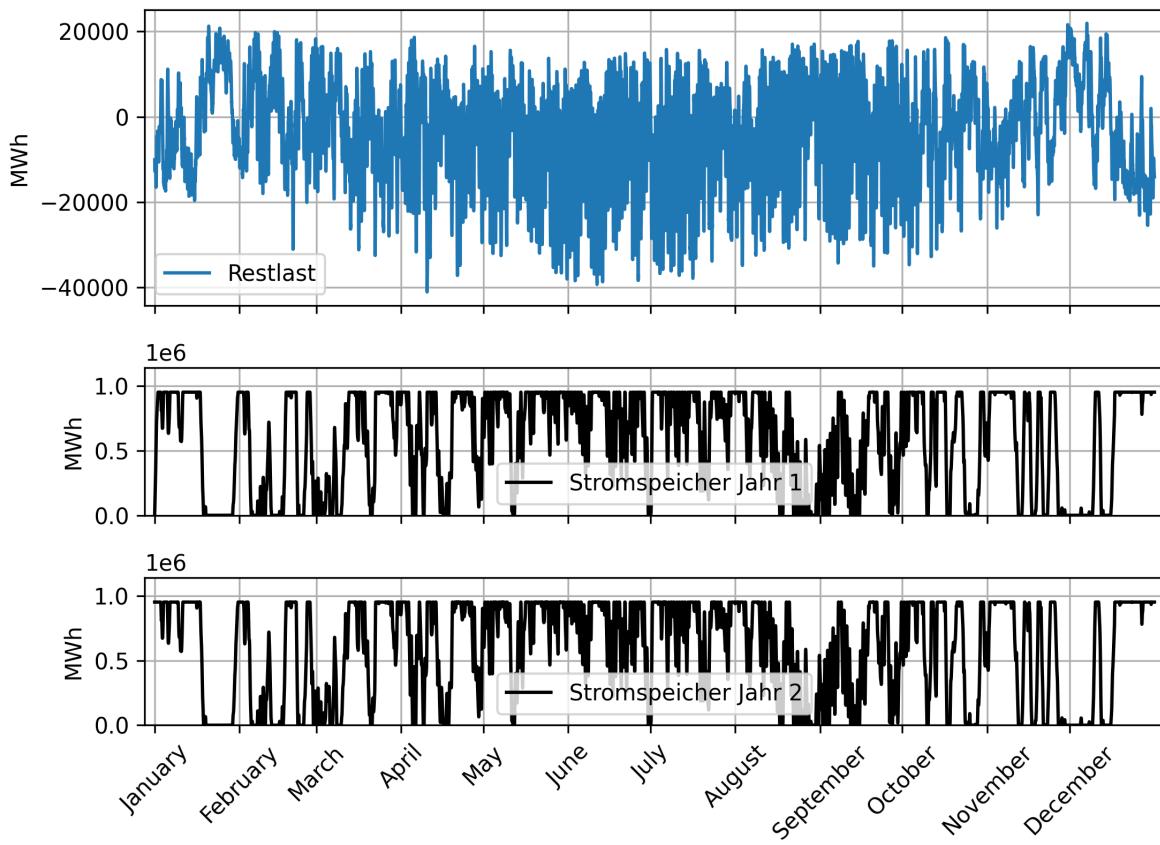
	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.00	0.83	0.84
1	0.04	0.79	0.79

Die Speichergröße beträgt 246,801.5 MWh

Dies entspricht 6.6 Pumpspeicheräquivalenten.

7.30 4 % 2035

Restlast 2035 und Jahresgang eines Speichers mit
 $C_{max} = 0.04$, $\eta_{ein} = 0.9$ und $\eta_{aus} = 0.88$



Zyklenzahl Jahr 1: 85.86

Zyklenzahl Jahr 2: 85.36

Summe Netzlast: 670,400,000.00

Summe positive Restlast: 125,949,558.61 Summe negative Restlast: -221,510,407.41

Speichergröße 1: 23,829,823.85 Anteil EE ohne Speicher: 0.81

	relative Speichergröße	Anteil EE Jahr1	Anteil EE Jahr2
0	1.00	0.98	1.00
1	0.04	0.92	0.92

Die Speichergröße beträgt 953,193.0 MWh

Dies entspricht 25.5 Pumpspeicheräquivalenten.

7.31 Code-Beispiel

```
# Daten generieren
## Speichergröße bestimmen und 80 Prozent berechnen
speichergröÙe_2030_80 = berechne_speichergröße(restlast_2030, einspeicherwirkungsgrad = 0.9,
                                                speichergröÙe_2030_80)

## Jahresgang des Speichers bestimmen
speicher_2030_80_wirkungsgrad_90_88 = jahresgang_speicher_berechnen(restlast_2030, speichergröÙe_2030_80)

jahresgang_speicher_jahr1 = speicher_2030_80_wirkungsgrad_90_88[1]
jahresgang_speicher_jahr2 = speicher_2030_80_wirkungsgrad_90_88[2]

# xticks erzeugen
monate_index = erzeugung[~erzeugung["Datum von"].dt.month.duplicated()].index
monatsnamen = erzeugung["Datum von"].iloc[monate_index].dt.strftime("%B")

# Grafik mit drei subplots erzeugen
fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(3, 1, figsize = (7.5, 6), height_ratios = [2, 1, 1], sharex = True)
plt.suptitle('Restlast 2030 und Jahresgang eines Speichers mit\nC$_{max} = 0.8, $_{ein} = 0.8')
plt.xticks(monate_index, monatsnamen, rotation = 45);
plt.minorticks_off()
plt.setp([ax1, ax2, ax3], xlim = (restlast.index.min() - len(restlast.index) / 100, restlast.index.max()))
plt.setp([ax2, ax3], ylim = (0, max(max(jahresgang_speicher_jahr1), max(jahresgang_speicher_jahr2))

## plot restlast
ax1.plot(restlast_2030, label = "Restlast")
ax1.grid()
ax1.set_ylabel('MWh')
ax1.legend()

## plot jahresgang_speicher_jahr1
ax2.plot(jahresgang_speicher_jahr1, color = 'black', linestyle = '-', label = 'Stromspeicher')
ax2.grid()
ax2.set_ylabel('MWh')
ax2.legend()

## plot jahresgang_speicher_jahr2
ax3.plot(jahresgang_speicher_jahr2, color = 'black', linestyle = '-', label = 'Stromspeicher')
ax3.tick_params(axis = 'x', rotation = 45)
ax3.set_ylabel('MWh')
ax3.grid()
ax3.legend()
```

```

plt.show()

# Zyklenzahl berechnen, Übergabe von Tupel = Wirkungsgrade werden nicht benötigt
zyklenzahl_berechnen(speicher_2030_80_wirkungsgrad_90_88, output = True)

# Anteil EE berechnen
anteil_ee_berechnen(restlast_2030, netzlast = netzlast_2030, einspeicherwirkungsgrad = 0.9, a

# Speichergröße ausgeben
print(f"\nDie Speichergröße beträgt {speicher_2030_80_wirkungsgrad_90_88[0]:,.1f} MWh\n"
      f"Dies entspricht {speicher_2030_80_wirkungsgrad_90_88[0]} / pumpspeicherkapazität_MWh:")

```

Mit einer 80-prozentigen Auslegung der Speichergröße wirkt der Speicher überdimensioniert. Im Jahr 2030 kann der Speicher seine Kapazität über das Jahr kaum ausschöpfen. Der Speicher erreicht nur selten Ladestände im Bereich von 50 Prozent. Lediglich über den Jahreswechsel wird die maximale Kapazität in Anspruch genommen. Umgekehrt ist der Speicher im Jahr 2035 überwiegend voll geladen und es findet eine nur geringe Ein- und Ausspeicherung statt. Der Speicher erreicht insbesondere im Jahr 2035 nur wenige Vollyzklen.

Die 2030 erforderliche Speicherkapazität von 4.936 GWh entspricht dem 132-Fachen der bestehenden Pumpspeicherkraftwerke oder 99 Jahresproduktionen der Tesla Gigafactory Berlin-Brandenburg in der ersten Ausbaustufe mit 50 GWh/a ([Wikipedia](#)). Die im Jahr 2035 erforderliche Speicherkapazität von 19.064 GWh entspricht dem 510-Fachen der bestehenden Pumpspeicherkraftwerke oder 381 Jahresproduktionen der Tesla Gigafactory Berlin-Brandenburg. **Hinweis:** Die Referenz auf die Tesla Gigafactory Berlin-Brandenburg dient lediglich zur Einordnung. Die Fabrik in Grünheide produziert aktuell keine Batteriezellen. Planungen für weitere Batteriefabriken in Deutschland wurden jüngst eingestellt.

Mit einer 20-prozentigen Auslegung werden mehr Vollzyklen und umfangreichere Teilzyklen erreicht. Dennoch sind im Jahr 2035 von April bis Ende August konstant hohe Ladestände zu beobachten. 2030 würden 1.234 GWh Speicherkapazität benötigt, 2035 4.766 GWh. Dies entspricht dem 33- bzw. 127-Fachen der bestehenden Pumpspeicherkapazität oder 25 bzw. 95 Jahresproduktionen der Tesla Gigafactory Berlin-Brandenburg in der ersten Ausbaustufe.

Die 4-Prozentige Auslegung zeigt ein ständiges Auf und Ab. In dieser Dimension könnte ein Stromspeicher wirtschaftlich zu betreiben sein. Dafür würden 2030 247 GWh und 2035 953 GWh Speicherkapazität benötigt. 247 GWh entsprechen dem 6,6-Fachen der bestehenden Pumpspeicherkapazität oder 5 Jahresproduktionen der Tesla Gigafactory Berlin-Brandenburg in der ersten Ausbaustufe. 953 GWh entsprechen 25,5 Pumpspeicheräquivalenten und 19 Jahresproduktionen der Tesla Gigafactory Berlin-Brandenburg.

In allen Szenarien ist auffällig, dass die Zyklenzahl in Jahr 1 und Jahr 2 fast identisch ist. Der Unterschied von einem halben Zyklus ergibt sich dadurch, dass der Speicher im ersten Jahr

leer ans Netz geht. Je nach Szenario wird der Speicher dann im Jahresverlauf (Speichergröße 80 %), innerhalb weniger Wochen (Speichergröße 20 %) oder nahezu sofort (Speichergröße 4 %) erstmalig voll geladen.

Erkennbar gilt bei der Speicherauslegung die 80-20-Regel ([Paretoprinzip](#)): Mit 20 Prozent des Aufwands werden 80 Prozent des Weges erreicht. Beträgt 2035 der Anteil erneuerbarer Energien ohne Speicher 81 Prozent, so sind 19 Prozent durch Speicher (oder anderweitig) zu decken. Für eine 100-prozentige Bedarfsdeckung aus Stromspeichern würden 23,8 TWh Speicherkapazität benötigt. Ein 20 Prozent so großer Speicher erreicht einen Gesamtanteil erneuerbarer Energien von 95 Prozent. Ein wiederum nur 20 Prozent so großer Speicher erreicht einen Gesamtanteil von 92 Prozent.

7.32 Bonus: Benötigte Spitzenleistung der Reservekraftwerke abschätzen

Aus der Berechnung verschiedener Speichergrößen wurde erkennbar, dass auch verhältnismäßig kleine Speichergrößen zu einem hohen Anteil erneuerbarer Energien im Strommix führen. Dennoch bedeuten kleiner dimensionierte Speicher, dass punktuell Netzlast durch in Reserve stehende Lastfolgekraftwerke bedient werden muss. In diesem Abschnitt wird die benötigte Erzeugungsleistung der Reservekraftwerke abgeschätzt. Dazu wird das Maximum der positiven Restlast nach Ausspeicherung mal vier multipliziert, da der Datensatz auf Viertelstundenbasis vorliegt.

```
spitzenleistung_2030 = anteil_ee_berechnen(restlast_2030, netzlast = netzlast_2030, einspeich
spitzenleistung_2035 = anteil_ee_berechnen(restlast_2035, netzlast = netzlast_2035, einspeich

## Datenstruktur angucken
## In Spalte 0 ist Speichergröße = 1, in den folgenden Spalten die neuen Speichergrößen gespe
# print(spitzenleistung_2030.shape)
# print(spitzenleistung_2030.head())

# Zeile 1 enthält den Jahresgang in Jahr 2
# Spalte 0 enthält das Basisszenario Speichergröße = 1
print(f"\nSpitzenleistung 2030 für Cmax = 0.20: {max(spitzenleistung_2030.iloc[1, 1]) * 4 / 100}
      f"Spitzenleistung 2030 für Cmax = 0.04: {max(spitzenleistung_2030.iloc[1, 2]) * 4 / 100}
      f"Spitzenleistung 2035 für Cmax = 0.20: {max(spitzenleistung_2035.iloc[1, 1]) * 4 / 100}
      f"Spitzenleistung 2035 für Cmax = 0.04: {max(spitzenleistung_2035.iloc[1, 2]) * 4 / 100}
```

Spitzenleistung 2030 für Cmax = 0.20: 87.64 GW
Spitzenleistung 2030 für Cmax = 0.04: 87.64 GW

Spitzenleistung 2035 für Cmax = 0.20: 87.53 GW
Spitzenleistung 2035 für Cmax = 0.04: 87.53 GW

8 Das Wichtigste

Bei der vergleichenden Analyse der Erzeugungs- und Verbrauchsdaten für Deutschland und Österreich wurde deutlich, dass vergleichbare Datensätze unterschiedlich aufgebaut sein können. Die Intention hinter der Zusammenstellung eines Datensatzes muss nicht notwendigerweise mit den Zielen Ihrer Analyse übereinstimmen, was beispielsweise eine Trennung von Kraftwerken und Stromspeichern rechtfertigen kann. In diesem Baustein haben Sie zwei allgemeine Vorgehensweisen zur Analyse von Datensätzen kennengelernt, die auf andere Anwendungsfelder und andere Datensätze übertragen werden können. Dies ist zum einen das Einlesen, Organisieren, Kontrollieren und Plausibilisieren von Daten. Zum anderen das Beschreiben, Erkunden und Auswerten von Daten mit Hilfe von Kennzahlen und Methoden der Datenvisualisierung.

Kennzahlenbasierte und visuelle Methoden der Datenanalyse ergänzen einander und helfen, einen Datensatz zu verstehen. Beispielsweise könnte mit einer rein kennzahlbasierten Vorgehensweise die Abschaltung der deutschen Kernkraftwerke leicht übersehen werden, während diese in der grafischen Darstellung des Jahresgangs deutlich erkennbar ist. Demgegenüber könnten bei der reinen Visualisierung des Erzeugungsanteils verschiedener Kraftwerkstypen in Österreich die Ein- und Ausspeicherung unbedacht aufsummiert werden.

Mit den vorgestellten Werkzeugen stehen Ihnen Hilfsmittel zur Verfügung, um datenbasiert Entscheidungen zu treffen und am klima- und energiewirtschaftspolitischen Diskurs teilzunehmen. Dabei sollten Sie jedoch immer bedenken, dass die Analyse von Aggregatdaten Zusammenhänge vereinfacht und das Risiko ökologischer Fehlschlüsse besteht. Zu einer umfassenden Datenanalyse gehört deshalb auch, die blinden Flecken im eigenen Vorgehen zu reflektieren und transparent zu machen.

9 Lernzielkontrolle

9.1 Kompetenzquiz

- (1) Wie lautet der vollständige Befehl, um mit dem Python Modul Pandas folgenden String in ein Objekt vom Typ datetime umzuwandeln?

```
datum = '2008-Oct-29'  
datum_pd = pd.to_datetime(datum, format = " ... ")
```

- (2) Mit welcher Methode können die Datenreihen a, b und c verkettet werden?

- a) pandas.concat(a, b, c)
- b) pandas.append(a, b, ,c)
- c) pandas.concatenate[a, b, c]
- d) pandas.concat([a , b , c])

- (3) Was ist der Zweck der beschreibenden Datenanalyse?

- a) Fehler im Datensatz identifizieren
- b) Benötigte Module laden
- c) Vorbereitung der explorativen und schließenden Datenanalyse
- d) Überblick über den Datensatz gewinnen

- (4) Welche Aussagen sind wahr?

- a) Explorative Datenanalyse ist ein iterativer Prozess, um einen Datensatz zu erkunden und mit den gewonnenen Erkenntnissen neue Fragen an den Datensatz zu stellen.

- b) Die Methoden der explorativen Datenanalyse sind fest vorgegeben.
 - c) Die explorative Datenanalyse erfolgt rein kennzahlenbasiert.
 - d) Die explorative Datenanalyse bereitet die schließende Datenanalyse vor.
- (5) Die Auslegung der Größe eines Stromspeichers ist abhängig von:
- a) Der Zyklus der Einspeicherung
 - b) Dem Verhältnis der einspeicherbaren, überschüssigen Stromerzeugung und der durch den Speicher zu bedienenden Last
 - c) Der Kappung von Erzeugungsspitzen
 - d) Dem Wirkungsgrad des Speichers

Tipp 12: Lösungen

Lösung 1: `datum_pd = pd.to_datetime(datum, format = "%Y-%b-%d")`
 Lösung 2: `pandas.concat([a , b , c])`
 Lösung 3: a, c, d
 Lösung 4: a, d
 Lösung 5: a, b, c, d

9.2 Übungen

Im Rahmen der schließenden Datenanalyse wurde festgestellt, dass durch die Kappung von Erzeugungsspitzen in einem von erneuerbarer Überschussproduktion geprägtem Stromsystem der erforderliche Stromspeicher um Größenordnungen kleiner dimensioniert werden kann. Allerdings verbleiben dann wenige Prozent der Jahresstromnachfrage, die nicht erneuerbar aus der laufenden Produktion oder durch Ausspeicherung gedeckt werden können. Eine Option bestünde darin, die Biomassekraftwerke in Lastfolge zu betreiben.

Berechnen Sie die erforderliche Speichergröße (Einspeicherwirkungsgrad = 0.9, Ausspeicherwirkungsgrad = 0.88), wenn der Anteil erneuerbarer Energien 2035 100 Prozent betragen soll und Biomassekraftwerke in Lastfolge betrieben werden. Dabei wird angenommen, dass Biomassekraftwerke in Zeiten mit einer vollständigen Deckung des Stromverbrauchs durch die übrigen erneuerbaren Energien ihre Gasproduktion einspeichern und dann verstromen, wenn eine positive Restlast besteht. Die Produktion der Biogasanlagen entspreche der Erzeugungskurve des Jahres 2023.

- Wie groß müsste der Gasspeicher (in MWh elektrischer Energie) sein?

- Wie hoch ist die maximal benötigte Stromerzeugungsleistung der Biomassekraftwerke absolut und relativ zur 2023 installierten Leistung?
- Wie groß muss der erforderliche Stromspeicher sein, wenn Biomassekraftwerke in Lastfolge betrieben werden?

Quellen

- Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE (2024). *Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland*. URL: <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=de&c=DE&chartColumnSorting=default&year=-1&interval=year&legendItems=lz1zb&source=public> (besucht am 03.06.2024).
- Heimerl, Stephan und Beate Kohler (2017). *Aktueller Stand der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland*. URL: https://www.fwt.fichtner.de/userfiles/fileadmin-fwt/Publikationen/WaWi_2017_10_Heimerl_Kohler_PSKW.pdf.
- Wickham, Hadley, Mine Çetinkaya-Rundel und Garrett Grolemund (2023). *R for data science: Import, tidy, transform, visualize, and model data*. URL: <https://r4ds.hadley.nz/>.