
Zukunfts-Agorameter Dokumentation

Version 1

24.09.2021

Ansprechpartner

Fabian Hein

fabian.hein@agora-energiewende.de

INHALT

INHALT.....	1
Einleitung.....	3
1 Methodisches Vorgehen.....	4
2 Kraftwerkskapazitäten.....	4
3 Berechnungsgrundlagen.....	5
Quellen.....	8
Anhang.....	9

Einleitung

Die vorliegende Dokumentation beschreibt die Methodik des Tools „Zukunfts-Agorameter“ von Agora Energiewende. Dieses baut auf dem seit vielen Jahren existierendem Tool „Agorameter“ auf und wurde mit Unterstützung der Prognos AG entwickelt. Datengrundlage für das Zukunfts-Agorameter sind die historischen wie Live-Daten zur Stromerzeugung des Agorameters. Das Zustandekommen dieser Daten ist in der Dokumentation zum Agorameter erläutert, abrufbar auf der Webseite www.agora-energiewende.de.

Das Agorameter bietet die Möglichkeit, den Fortgang der Energiewende in Echtzeit zu verfolgen, indem die aktuelle Strombereitstellung für Deutschland abgebildet wird.

Auf Basis dieser Daten ermöglicht das *Zukunfts-Agorameter* einen Ausblick auf die Stromerzeugung in Deutschland in der Zukunft. Es wird dargestellt, wie die Stromerzeugung eines zukünftigen Zeitraums mit gleichen Wetterbedingungen wie im aktuellen Zeitraum aussehen könnte.

Hierfür werden gesetzlich beschlossene Entwicklungen wie der Ausstieg aus der Kernenergie und Entwicklungen entsprechend der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045¹“, insbesondere zum Ausbau der Kapazitäten Erneuerbarer Energien als Randbedingungen verwendet. Zusätzlich werden Annahmen zur Entwicklung zusätzlicher Stromverbraucher wie der Elektromobilität und deren Verbrauchsverhalten getroffen. In Kombination mit den verfügbaren Live-Daten des Agorameters soll so ein Zeitraum in der Zukunft visualisiert werden, welcher ähnliche Bedingungen aufweist, wie der aktuelle (z.B. viel/wenig Wind, viel/wenig Sonne, hohe/geringe Nachfrage).

Die getroffenen technischen Annahmen basieren auf einer Modellierung im Rahmen des Projektes zum

klimaneutralen Deutschland. Ziel dieses Projektes war das Aufzeigen eines volkswirtschaftlich optimierten Weges sektorübergreifend Klimaneutralität im Jahr 2045 bzw. in einer vorherigen Studie im Jahr 2050 zu erreichen. Somit stellen diese Annahmen explizit keine Prognose dar und spiegeln auch nicht zwangsweise den im Erneuerbaren-Energien-Gesetz angedachten Zubau Erneuerbarer Energien wider, da dieser für eine avisierte Erreichung von Klimaneutralität im Jahr 2045 zu gering ausfällt. Ein wesentliches Ergebnis der Studie, welche auf eine volkswirtschaftliche optimierte, intersektorale Modellierung zurückgreift, verdeutlicht den notwendigen Ausbau Erneuerbarer Energien, welcher merklich oberhalb der gesetzlich festgelegten Ausbaumengen liegt.

Das zukünftige Stromsystem wird flexibler sein als das heutige. Der Einsatz dieser Flexibilität wird sich an der Erzeugung Erneuerbaren Stroms orientieren. Stromerzeuger und -verbraucher werden versuchen ihr Verhalten gewinnbringend anzupassen. Der Optimierungszeitraum im Zukunfts-Agorameter ist zunächst der Agorameter-Standarddarstellung nachempfunden, kann jedoch angepasst werden. Die Methodik der Optimierung, der Randbedingungen flexibler Verbraucher und Festlegung einzelner Parameter wird in dieser Dokumentation erläutert.

Als Zukunftszeitraum kann ein Jahr zwischen 2030 und 2040 ausgewählt werden, standardmäßig ist das Jahr 2030 vorausgewählt. Der Vergleichszeitraum kann ebenfalls ausgewählt werden. Voreingestellt ist der Zeitraum des Agorameters mit Live-Daten, es kann jedoch auch ein beliebiger Zeitraum zwischen dem aktuellen Datum und 2012 ausgewählt werden. Die Verwendung des Zukunfts-Agorameters ist kostenlos und steht der breiten Öffentlichkeit auf der Webseite von Agora Energiewende zur Verfügung. Agora Energiewende ist bestrebt, das Zukunfts-Agorameter kontinuierlich zu verbessern. Zur

¹ In der 2020 veröffentlichten Studie wird 2050 als Zielmarke für Klimaneutralität gesetzt. In einer Fortführung des Projektes wurden Pfade für eine Klimaneutralität im Jahr 2045, also fünf Jahre

früher, untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie wurden 2021 auf der Webseite von Agora Energiewende veröffentlicht.

Nachvollziehbarkeit und Transparenz werden sämtliche Datenquellen und Berechnungen im Folgenden dokumentiert. Hinweise, wie die Datenlage verbessert werden kann beziehungsweise an welcher Stelle bessere Schätzungen vorgenommen werden können, sind willkommen. Die Verwendung der Abbildungen ist unter Nennung der Quellenangabe kostenfrei möglich.

1 Methodisches Vorgehen

Die Basis für die Darstellung des Zukunfts-Agorameters ist die Verwendung von Live-Daten zur deutschen Stromerzeugung wie sie beim Agorameter abgebildet ist. Agora Energiewende erhebt selbst keine Daten, Primärquelle der dargestellten Grafiken ist die Leipziger Strombörse European Energy Exchange EEX für Daten vor 2018 bzw. den Transparenzplattformen der europäischen Übertragungsnetzbetreiber ENTSO-E für Daten ab 2018. Da diese Daten das deutsche Stromsystem nicht vollständig abbilden, werden sie im Agorameter überarbeitet, bevor sie online sichtbar werden. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik des Agorameters findet sich auf der Webseite von Agora Energiewende. Im Zukunftsagorameter werden die im Agorameter veröffentlichten Daten nun in einem weiteren Schritt verrechnet.

Die Verrechnung der Daten hat das Ziel, die veränderten Bedingungen für den Darstellungszeitraum in der Zukunft möglichst realistisch abzubilden. Dazu gehören im Wesentlichen

- das Ausscheiden konventioneller Kraftwerkskapazitäten,
- der Ausbau Erneuerbarer Energien,
- zusätzliche Stromnachfrage für die Gewinnung von Wasserstoff,
- eine zunehmende Flexibilisierung des Industriestromverbrauchs,
- eine größere Anzahl an Wärmepumpen sowie
- die weitere Elektrifizierung der Verkehrssektors.

Die Limitierung von Flexibilitäten findet durch das Einhalten von Randbedingungen statt. Das hierfür verwendete Modul („Flexibilitäts-Modul“) wurde von der Prognos AG eigens zu diesem Zweck erstellt. Die hierbei vollzogenen Berechnungsschritte werden im Kapitel 3.c dokumentiert.

Wie auch im Agorameter sind im Zukunfts-Agorameter die dargestellten Strommengen Nettostrommengen, also ohne den Eigenverbrauch von Kraftwerken.

Die Berechnung von CO₂-Emissionen der Stromerzeugung, des Großhandelsstrompreises sowie genauer Import- und Exportmengen ist nicht Bestandteil des Tools.

Nachfolgend werden zunächst die Annahmen zur Entwicklung des Kraftwerksparks begründet. Im Anschluss wird dargelegt, wie die Strommengen einzelner Erzeuger und die Stromnachfrage bestimmt wird. Danach wird die Funktionsweise des „Flexibilitäts-Moduls“ zur Bestimmung von flexiblen Lasten erläutert. Zuletzt wird auf die Bestimmung der Residuallast eingegangen.

2 Kraftwerkskapazitäten

Die Entwicklung der Kraftwerkskapazitäten im Zukunftsjahr beruht einerseits auf gesetzlichen Grundlagen wie dem Kernenergieausstieg sowie andererseits auf den Ergebnissen der Studie „[Klimaneutrales Deutschland 2045](#)“. In puncto Veränderung des Kraftwerksparks gelangt diese Studie zum Ergebnis eines zügigeren Ausbaus Erneuerbarer Energien als es derzeit im Erneuerbaren-Energien-Gesetz vorgesehen ist, sowie einem beschleunigten Kohleausstieg bis 2030, was ebenfalls nicht mit dem derzeitigen gesetzlichen Rahmen des Kohleausstiegsgesetzes übereinstimmt. Die Kapazitäten im aktuellen Jahr beruhen auf den Daten der Bundesnetzagentur bzw. der Statistik der Agentur Erneuerbare Energien. Nachfolgend werden energieträgerspezifische Entwicklungen dargestellt.

a. Erneuerbare Energien

Der Zubau Erneuerbarer Energien erfolgt entsprechend den Ergebnissen der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“, welche auf der Webseite von Agora Energiewende zum kostenlosen Download zur Verfügung steht. Demnach bilden die Erneuerbaren Energien den Eckpfeiler der zukünftigen Stromerzeugung. Die Kapazität im betrachteten Zukunftsjahr ist dabei ausschlaggebend für die Berechnung der erzeugten Strommengen. Unterjähriger Zubau wird nicht gesondert betrachtet.

Die Kapazität von Bioenergie zur Stromerzeugung bleibt im Wesentlichen unverändert bis zum Jahre 2030. Im weiteren Verlauf bis 2045 ist sie rückläufig, da die Biomasse primär in anderen Sektoren zum Einsatz kommt.

Bei der Verwendung von Wasserkraft zur Stromerzeugung ist das Potenzial in Deutschland weitestgehend ausgeschöpft. Aus diesem Grund bleibt die installierte Kapazität konstant.

Die Erzeugungskapazität von Windenergie nimmt deutlich zu. Im Jahr 2030 wird von einer installierten Leistung in Höhe von 80 Gigawatt Onshore bzw. 25 Gigawatt offshore ausgegangen. Bis zum Jahr 2045 erhöht sich die Leistung von Onshore-Anlagen auf 145 Gigawatt; die von Offshore-Anlagen auf 70 Gigawatt.

Die Photovoltaik wächst am stärksten und erreicht im Jahr 2030 eine Kapazität von 150 Gigawatt bzw. 385 Gigawatt im Jahr 2045.

b. Konventioneller Kraftwerkspark

Der konventionelle Kraftwerkspark in Deutschland wird sich in den kommenden Jahrzehnten signifikant verändern, u.a. durch den Ausstieg aus der Kernenergie und dem Kohleausstieg.

Im Zukunfts-Agorameter wird die Stromerzeugung aus konventionellen Kraftwerken zusammen mit der Exportbilanz in der Residuallast zusammengefasst und nicht weiter aufgeschlüsselt.

Es findet keine Begrenzung der Residuallast statt.

3 Berechnungsgrundlagen

Im Folgenden wird die Berechnungsmethodik der Stromerzeugung Erneuerbarer Energien, der Stromnachfrage sowie des Flexibilitäts-Moduls erläutert.

a. Erneuerbare Energien

Die Stromerzeugung aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen wird energieträgerspezifisch und stundenscharf berechnet auf Basis der installierten Leistung im Ausgangsjahr bzw. im Zukunftsjahr. Das Verhältnis von Stromerzeugung zu installierter Kapazität bleibt dabei erhalten. Dies bedeutet, dass windreiche Stunden im Ausgangsjahr in windreiche Stunden im gleichen Zeitraum im Zukunftsjahr skaliert werden, während sonnenarme Stunden auch in der Zukunft in sonnenarme Stunden übersetzt werden. Das Ziel ist die Visualisierung von Erzeugungsmustern Erneuerbarer Energien, welche auf die aktuelle Wettersituation zurückzuführen sind und wie sich diese bei einem zukünftig höheren Anteil Erneuerbarer Energien auf die Strombereitstellung in Deutschland auswirken könnte.

Die Wasserkraft beschreibt Anlagen mit natürlichem Zufluss und explizit keine Pumpspeicher-Anlagen. Somit ist die Erzeugung nicht flexibel. Da sich die Kapazität kaum verändert, bleibt – unter der Annahme gleichbleibender Wassermengen – auch die Erzeugungsmenge in der Zukunft im Vergleich zur aktuellen unverändert.

Die Stromerzeugung aus Biomasse ist nach der gleichen Berechnungsmethodik in puncto maximale Leistung beschränkt; es kann also nicht mehr Strom erzeugt werden als installierte Leistung vorliegt. Allerdings ist die Stromerzeugung aus Biomasse steuerbar und kann (zumindest teilweise) flexibel eingesetzt werden. Die heutige Darstellung der Stromerzeugung aus Biomassenanlagen bildet die vorhandene Flexibilität unzureichend ab. So könnte die Erzeugung aus Biomasse bedarfsgerechter erfolgen als es derzeit scheint. Diese Flexibilität wird im Zukunfts-Agorameter jedoch nicht abgebildet.

b. Nachfrage

Die Stromnachfrage in Deutschland wird zunächst kongruent zu der Berechnung Erneuerbarer Energien bestimmt. Hierfür wird die aktuelle Stromnachfrage anhand des Verhältnisses der gesamten Stromnachfrage zwischen dem derzeitigen Jahr und im Zukunftsjahr berechnet.

In einem zweiten Schritt wird nun jedoch das Potenzial der Flexibilisierung bestimmt. Hierfür wird das sog. „Flexibilitäts-Modul“ verwendet, welches zu diesem Zweck von der Prognos AG für Agora Energiewende entwickelt wurde und unter dem Punkt Flexibilitäts-Modul genauer beschrieben wird.

Die nach diesem Berechnungsschritt „flexibilisierte Nachfrage“ wird im Zukunfts-Agorameter abgebildet.

c. Flexibilitäts-Modul

In einem Stromsystem mit hohem Anteil variabler Erzeugung durch Erneuerbare Energien sind flexible Stromverbraucher nützlich, um den Strombedarf an die Stromerzeugung anzupassen und somit die Abregelung von Strom aus Erneuerbaren Energien und den Bedarf an Strom, der aus fossilen Energieträgern erzeugt wurde, zu verringern.

Um diese Flexibilität darzustellen, wird mit dem Flexibilitäts-Modul das Potenzial vorhandener Flexibilität bestimmt. Das Flexibilitäts-Modul des Zukunfts-Agorameters bestimmt das Potenzial vorhandener Flexibilität auf der Nachfrageseite im Stromsystem und hat das Ziel eine realistische Optimierung der Stromverbraucher abzubilden.

Elektroautos, Wärmepumpen, aber auch einige industrielle Prozesse besitzen eine zeitliche Flexibilität für ihren Strombedarf. Elektroautos haben bereits heute Akkus für eine Reichweite von 300 Kilometern und mehr bei steigender Tendenz; die durchschnittliche Fahrleistung in Deutschland liegt jedoch bei weniger als 50 Kilometern am Tag. Wärmepumpen haben durch die thermische Trägheit von Gebäuden ebenfalls die Möglichkeit ihren Stromverbrauch zeitlich zu verschieben. Wenn zusätzlich ein

Wärmespeicher vorhanden ist, erhöht sich die Flexibilität weiter.

Für die Verwendung im Zukunfts-Agorameter werden die flexiblen Verbraucher in drei Kategorien eingeteilt:

- *Elektroautos*,
- *Wärmepumpen* und
- *Industrielle Verbraucher*

Jede dieser Kategorien besteht aus Kohorten, welche die Heterogenität innerhalb der Kategorie abbilden. Innerhalb der Kategorie „Elektroautos“ werden beispielsweise Kohorten mit verschiedenen Nutzungsprofilen und Lademöglichkeiten unterschieden. Auf eine Verwendung von Akkus in Elektroautos im Sinne eines Speichers, welcher be- und entladen werden kann (bidirektionales Laden) wird in der aktuellen Version des Zukunfts-Agorameters explizit verzichtet. Folgende Kohorten werden innerhalb der Kategorien verwendet:

- Elektroautos
 - Batterieelektrische Personenkraftwagen als Plug-in-Hybrid, Schnelllader
 - Batterieelektrische Personenkraftwagen mit geringer Flexibilität des Ladevorgang-Zeitpunktes
 - batterieelektrische Personenkraftwagen mit hoher Flexibilität des Ladevorgang-Zeitpunktes
 - batterieelektrische inflexible leichte Nutzfahrzeuge
 - batterieelektrische flexible leichte Nutzfahrzeuge
 - Elektrische Zweiräder
 - batterieelektrische Lastkraftwagen
- Wärmepumpen
 - Einfamilienhäuser mit Speicher
 - Einfamilienhäuser ohne Speicher
 - Mehrfamilienhäuser
 - Gebäude aus dem GHD-Bereich (Gewerbe-Handel-Dienstleistungen)
 - Wärmepumpen in der Industrie (Überschneidung mit der Kategorie „Industrie“)
- Industrielle Verbraucher
 - Wärmepumpen

- Lastverschiebung
- Flexibilität durch Wasserstoff-Elektrolyseure

Jede Kohorte innerhalb einer Kategorie weist die folgenden Merkmale auf:

- die maximale stündliche *Ladeleistung je Verbraucher*
- ein stündlich aufgelöstes *Lade-Verfügbarkeitsprofil* pro Kohorte, welches beschränkt wie viel Prozent der einzelnen Autos maximal gleichzeitig in dieser Stunde ihren Akku laden können.
- ein stündlich aufgelöstes *Verbrauchsprofil* für das komplette Jahr. Für Autos durch ein vorgegebenes Fahrprofil definiert, bei Wärmepumpen durch den in erster Linie temperaturabhängigen, stündlichen Wärmebedarf.
- die *Größe des Speichers* (Akku, thermischer Speicher, bei industriellen Verbrauchern einen abstrakten Speicher, der die zeitliche Flexibilität, die sich z.B. bei Batchprozessen oder durch Stoffspeicher ergibt, abbildet)
- den *momentanen Ladestand* in jeder Stunde. Dieser darf nie unter ein festgelegtes Niveau fallen.

Unter Einhaltung dieser Bedingungen wird das Ladeverhalten der flexiblen Verbraucher intelligent gesteuert, so dass, soweit möglich, immer dann Strom aus dem Netz bezogen wird, wenn die Residuallast niedrig oder sogar negativ ist. Unter der Voraussetzung flexibler Stromtarife, die auf den Großhandelspreis reagieren ist dies auch wirtschaftlich eigenständig für die Verbraucher, da Stunden mit hohem Anteil Erneuerbarer Energie sehr stark mit niedrigen

Preisen korrelieren. Der angewandte Algorithmus minimiert daher mit einer Heuristik näherungsweise die Summe der Quadrate der stündlichen Residuallast.

Die flexible Nachfrage orientiert sich darüber hinaus an dem Wochentag. Auch eine Verringerung im Zeitraum von Weihnachten und Neujahr wird betrachtet. Weitere Feiertage werden nicht berücksichtigt.

d. Konventionelle Stromerzeugung

Die Differenz aus flexibilisierter Nachfrage und der gesamten Erzeugung aus Erneuerbaren Energien wird kumuliert als Residuallast dargestellt. Hierbei wird auf eine Aufgliederung in bestimmte Erzeugungstechnologien bzw. Import/Export verzichtet. Aus der Höhe der Residuallast ist nicht eindeutig auf die Erzeugung aus konventionellen Kraftwerken geschlossen werden, da auch Importe und Exporte berücksichtigt werden müssen. Dabei ist das Verhältnis von Importen, Exporten und konventioneller Kraftwerkserzeugung nicht fix und richtet sich neben den maximalen Grenzkuppelkapazitäten vor allem nach dem Verhältnis der Strompreise in den Strom handelnden Ländern.

Eine positive Residuallast bedeutet es wird weniger Strom aus Erneuerbaren Energien erzeugt, als nachgefragt wird. Somit wird zusätzlich Strom aus konventionellen Kraftwerken bzw. durch Import benötigt. Ist die Residuallast hingegen negativ, steht mehr Strom aus Erneuerbaren Quellen zur Verfügung als gebraucht wird. In diesem Falle wird der überschüssige Strom entweder exportiert oder abgeregelt.

Quellen

AG Energiebilanzen (2020): *Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern*, unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/>

Agentur für Erneuerbare Energien Statistik (2021): *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*, unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Agora Energiewende (2020): *Agorameter – Dokumentation*, unter <https://www.agora-energie-wende.de/veroeffentlichungen/agorameter-dokumentation/>

Agora Energiewende (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045*, unter <https://www.agora-energie-wende.de/projekte/klimaneutrales-deutschland-2045/>

Bundesnetzagentur (2021): *Kraftwerksliste*, unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html

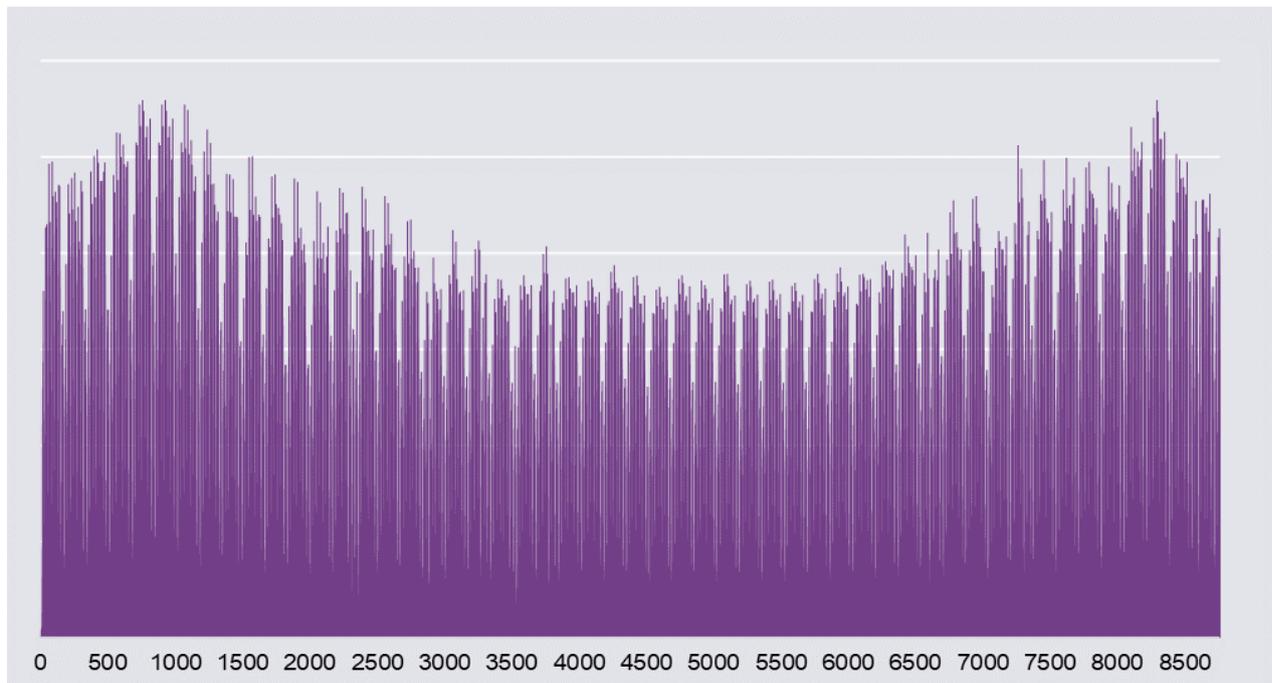
EEX (2012–2017): *Marktdaten zur Stromerzeugung*; (zur Verarbeitung im Agorameter werden die Daten direkt über einen kostenpflichtigen Server von der EEX bezogen; alle Daten zur Stromerzeugung der bei der EEX meldenden Anlagen werden jedoch auch auf der Transparenzseite der EEX veröffentlicht), unter: <http://www.eex-transparency.com/>)

ENTSO-E (2021): *Marktdaten zur Stromerzeugung*, unter: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show>

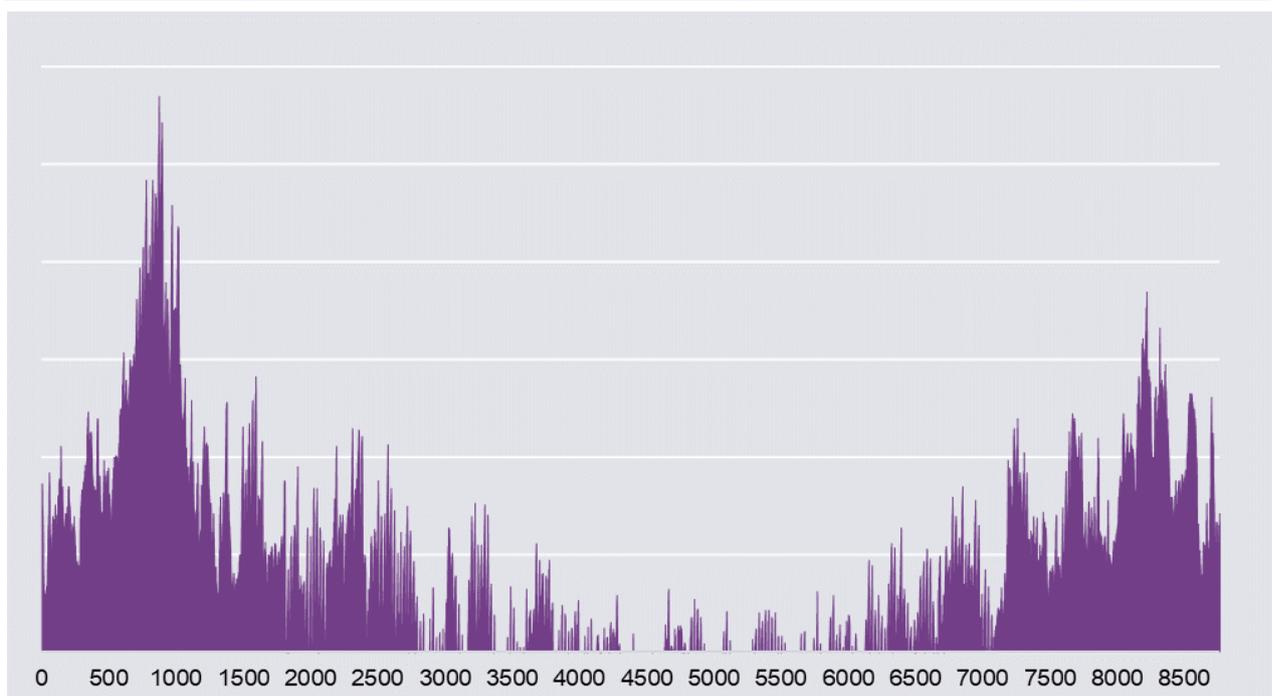
Anhang

Die nachfolgend dargestellten Verbrauchsprofile basieren auf den Temperaturdaten von 2012. Weitere Daten der einzelnen Kohorten sind dem Datenanhang zu entnehmen.

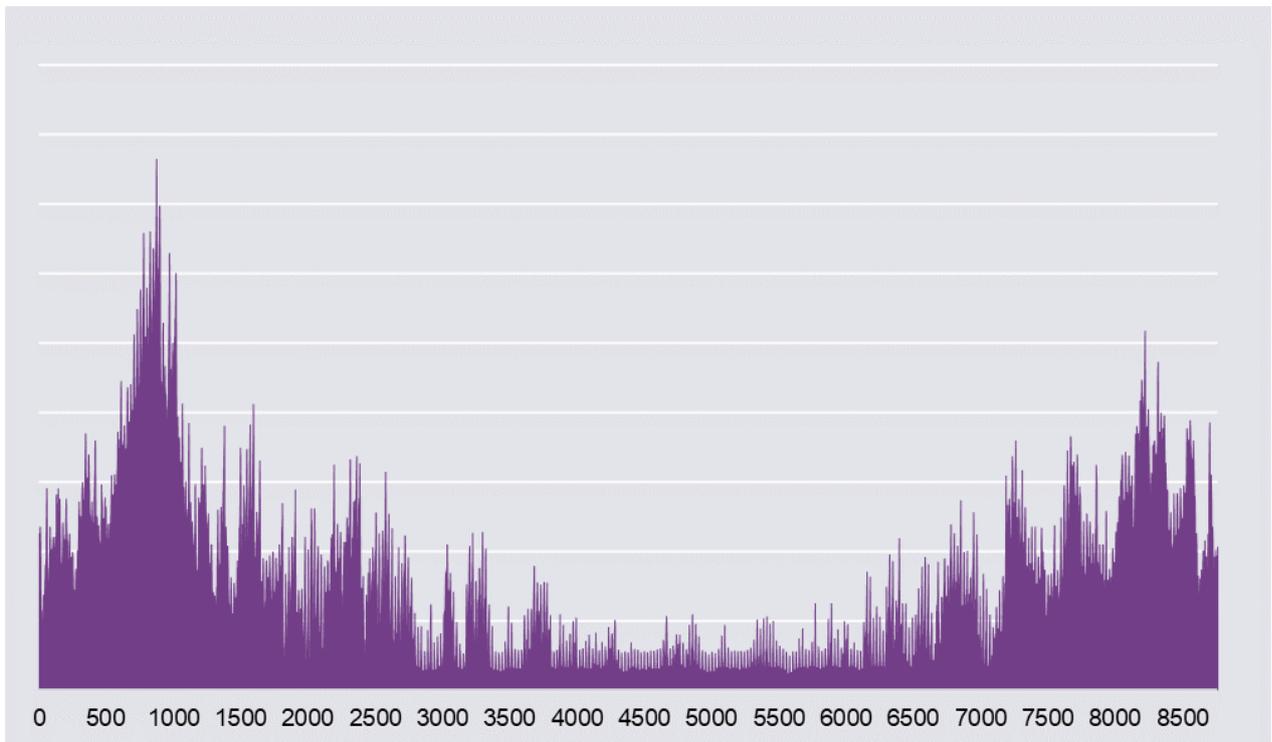
Personenkraftwagen: Stündlich normierter Strombedarf im Jahresverlauf



Einfamilienhäuser: Stündlich normierter Wärmebedarf im Jahresverlauf



Mehrfamilienhäuser: Stündlich normierter Wärmebedarf im Jahresverlauf



Agora Energiewende

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

P +49. (0) 30. 7001435-000

F +49. (0) 30. 7001435-129

www.agora-energiewende.de

info@agora-energiewende.de