

Analyse und Entwicklung eines Prototyps zur Optimierung des Verbrauchs von Ökostrom in Privathaushalten

Malina Bergmann¹, Sebastian Rauch¹, Josephine Brömme, Jochen Wittmann²

Abstract: Die gesamte Stromnachfrage der BRD kann bisher noch nicht mit regenerativem Strom abgedeckt werden. Um privaten Nutzern die Möglichkeit zu geben, ihren Strombedarf zeitlich an das Angebot von Ökostrom anpassen zu können, werden zunächst frei verfügbare Daten für die gesamte Netzlast und das Angebot an erneuerbarem Strom analysiert. Darauf aufbauend wird eine einfache Prognose erstellt, in welchen Zeitfenstern der Anteil von Ökostrom im Gesamtnetz besonders hoch ist. Private Nutzer können mit dieser Info den Anteil von Ökostrom an ihrem persönlichen Stromverbrauch optimieren.

Keywords: Stromnetz, Ökostrom, intelligente Stromverbraucher.

1 Einleitung

Der Bruttostromverbrauch in Deutschland hat im Jahr 2007 mit 624 TWh seinen bisherigen Höhepunkt erreicht. Obgleich in den vergangenen fünf Jahren: 2018 (592 TWh), 2019 (575 TWh), 2020 (555 TWh), 2021 (570 TWh) [Um22] und 2022 (547 TWh) [St22] eine abnehmende Tendenz im Stromverbrauch zu verzeichnen ist, widersprechen mittelfristige Prognosen diesem aktuellen Trend. In einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie beauftragten Studie, aus dem Jahr 2021, wird von einer Steigerung um elf % auf 658 TWh im Jahr 2030 ausgegangen [Ke21]. In einer langfristigen Studie, mit dem Titel „Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen“, die in Zusammenarbeit von Umweltbundesamt und Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik entstand, wird von einem Bruttostromverbrauch von 506 TWh im Jahr 2050 ausgegangen [Um10].

Unabhängig davon, welche dieser Szenarien tatsächlich eintreten, hat der Stromverbrauch in Deutschland einen wesentlichen Anteil an den, den Klimawandel weiter vorantreibenden, Emissionen.

¹ HTW Berlin, Fachbereich 2, Wilhelminenhofstr. 75A, 12459 Berlin, Deutschland,
{ Malina.Bergmann | Sebastian.Rauch | Josephine.Broemme }@Student.HTW-Berlin.de

² HTW Berlin, Fachbereich 2, Wilhelminenhofstr. 75A, 12459 Berlin, Deutschland,
Jochen.Wittmann@HTW-Berlin.de

Bei dem in CO₂-Äquivalenten angegebenen Emissionsfaktor des deutschen Strommix ist ein negativer Trend zu beobachten. Durch eine steigende Nutzung von dem aus Kohle erzeugten Strom ist jener pro Kilowattstunde von 438 g CO₂-Äquivalente 2020 auf 485 g 2021 gestiegen [Um22a]. Eine klimafreundliche und nachhaltige Kehrtwende und somit massive Reduktion der Emissionen im Energiesektor, ist nur durch das Senken des Stromverbrauchs in allen Sektoren zu bewältigen. Dies erfordert den vollständigen Ausbau erneuerbarer Energien.

Das Angebot an regenerativen Energien wächst kontinuierlich. Nicht zuletzt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und ein steigendes Bewusstsein in großen Teilen der Bevölkerung. Betrug der Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Bruttostromverbrauch Deutschlands im Jahr 2000 lediglich 6,3 %, so waren es im Jahr 2020 bereits 45,2 % [Um22a]. Für das vergangene Jahr 2022 wurde der Stromverbrauch bereits zu 48,4 % durch erneuerbare Energien gedeckt [In22]. Dies bedeutet jedoch auch, dass noch über die Hälfte der Netzlast durch die Stromerzeugung mit konventionellen Energieträgern gedeckt werden muss. Welcher Strommix dann bei Nutzenden ankommt und aus dem Netz entnommen wird, hängt, ganz unabhängig davon, ob ein Ökostromtarif vorliegt oder nicht, von dem Angebot der erneuerbaren Energien im Netz ab und kann von Endverbrauchenden derzeit nicht transparent eingesehen werden. Dieses Paper und der zugehörige Prototyp der Applikation zeigen einen Ansatz auf, zurückliegende Verbrauchsdaten und Prognosen zur Stromnachfrage und den Anteil an Ökostrom im aktuellen Strommix so aufzuarbeiten, dass daraus individuelle Empfehlungen zum bestmöglichen Ökostromverbrauch ausgegeben werden können. Die Ableitung dieser Prognosen basiert sowohl auf einem möglichst hohen Anteil erneuerbarer Energien am Strommix als auch auf einer möglichst geringen Auslastung des Stromnetzes. In den folgenden Kapiteln werden die Herangehensweise an diese Problematik, als auch die angewandten Modellierungen näher beschrieben, gefolgt von der Beschreibung der prototypischen Umsetzung einer Webapplikation und einem Ausblick hinsichtlich Verbesserungspotentialen der Datenmodellierung und Erweiterungsmöglichkeiten der Applikation.

2 Zielsetzung: Vorhersage umweltfreundlicher Stromverbrauchszeiten

Aufgrund der großen Schwankungen von Stromangebot und -nachfrage und den diversen Einflussfaktoren kommt es oft dazu, dass sich das Angebot an Strom aus erneuerbaren Energien und die Nachfrage nicht decken. So reicht der Strom aus erneuerbaren Energien oft nicht aus, um die Stromnachfrage zu Zeiten der Nachfragespitzen zu befriedigen. Gleichermäßen ist oft zu viel Strom aus erneuerbaren Energien vorhanden, wenn er gar nicht verwendet werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist daher, diese Leistungsspitzen mit einhergehendem geringem Angebot zu ermitteln. Die rechnerische Vorhersage von Angebot und Nachfrage wird zur

Entwicklung einer Empfehlung genutzt, zu welchen Zeitpunkten in den nächsten 72 Stunden es im Hinblick auf den Umwelt- und Klimaschutz am sinnvollsten ist, Strom zu verbrauchen. Um die Prognosen möglichst plausibel zu modellieren, werden zunächst vorliegende Angebots- und Nachfragedaten untersucht, bevor das Konzept für den Aufbau der Webapplikation vorgestellt wird.

3 Datenanalyse: Struktur des Angebots und der Nachfrage von Strom in Deutschland

Um Konzepte für die Modellierung von Nachfrage und Angebot entwickeln zu können, ist es sinnvoll, zunächst die aktuelle Strommarktsituation in Deutschland zu untersuchen. Die gesamte Stromnachfrage kann bisher noch nicht mit regenerativem Strom abgedeckt werden. Die Struktur und Analyse der verwendeten Daten für die gesamte Netzlast und das Angebot an Strom aus erneuerbaren Energien wird in den folgenden beiden Kapiteln näher beschrieben.

3.1 Struktur der Gesamtnachfrage von Strom in Deutschland

Um eine Prognose für die künftige Stromnachfrage modellieren zu können, war zunächst eine Datengrundlage gemessener historischer Nachfragewerte nötig. Die Datenquelle für die Netzlast, also den gesamten Stromverbrauch in Deutschland, stellt die Plattform SMARD, Strommarktdaten, der Bundesnetzagentur dar [SM22]. Zunächst wurden die Daten, gefiltert nach Stromverbrauch, realisierter Stromverbrauch und Region Deutschland, als csv Daten für die Analyse heruntergeladen. Die Daten in Originalauflösung bestehen aus sechs Datenspalten: Datum, Anfang, Ende, Gesamt (Netzlast)[MWh], Residuallast [MWh] und Pumpspeicher [MWh]. Die Daten können dabei noch nach Energieträgern gefiltert werden, für die Verbrauchsanalyse wurde jedoch der kumulierte Verbrauch benötigt und verwendet. Anfang und Ende der Daten beschreiben dabei jeweils einen Zeitraum von 15 Minuten. Für die Datenanalyse wurde die Gesamt Netzlast in MWh untersucht, dabei wurde die Residuallast (Netzlast ohne Wind- und Solarstrom) und Pumpspeicher (Energiespeicher unter Nutzung der potenziellen Energie von Wasser) außer Betracht gelassen, da für die Verbrauchsanalyse der tatsächlich verbrauchte Strom untersucht wurde.

Im nächsten Schritt der Datenanalyse wurden die verfügbaren Datensätze zunächst über Jupyter Notebooks formatiert und geplottet. Diese Analysen haben mit Daten aus den Jahren 2016 bis 2022 stattgefunden und werden im Folgenden anhand von Diagrammen für das Jahr 2022 kurz erläutert.

In Abbildung 1 wird der Stromverbrauch im Jahresverlauf dargestellt und, wie auch in anderen untersuchten Jahren, wird deutlich, dass es im Verlauf eines Jahres Schwankungen gibt. Diese jahreszeitlichen Schwankungen sind besonders deutlich zu

erkennen, wenn man die Sommermonate Juli bis September mit durchschnittlich 65.000 MWh und die Wintermonate Januar bis März, als auch Dezember, mit durchschnittlich 75.000 MWh, schwankend zwischen 70.000 MWh und knapp 80.000 MWh, miteinander vergleicht.

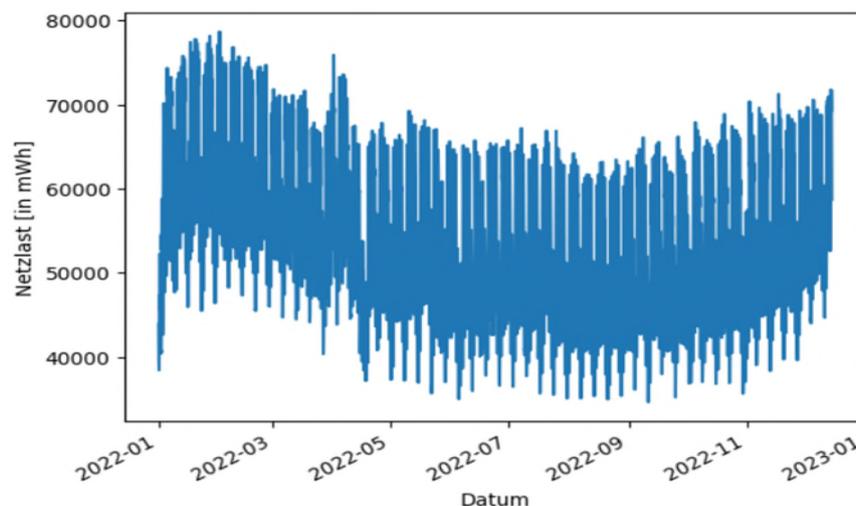


Abbildung 1 - Diagramm Netzlast Jahresverlauf (2022) in MWh

Die Stromverbräuche schwanken außerdem auch im Verlauf eines Tages, dargestellt in Abbildung 2. Diese Woche zeigt beispielhaft an der ersten August Woche 2022 die Schwankungen im Tagesverlauf, beispielsweise zwischen 10 und 14 Uhr dienstags und mittwochs im vergangenen Jahr, mit Spitzen von bis zu 65.000 MWh. Zwischen 0 und 5 Uhr ist der Verbrauch hingegen an allen Wochentagen vergleichsweise niedrig und fängt erst gegen 5 Uhr am Morgen an, 45000 MWh zu überschreiten. Ausnahmen hierzu stellen Samstag und Sonntag dar, hier steigen die Verbräuche erst ab 7 Uhr morgens. An allen Wochentagen nimmt der Stromverbrauch ab 20 Uhr kontinuierlich ab. Während an Sonntagen am wenigsten Strom verbraucht wird, wird an Samstagen etwas mehr Strom verbraucht als an Sonnabenden, jedoch erheblich weniger als an Wochentagen.

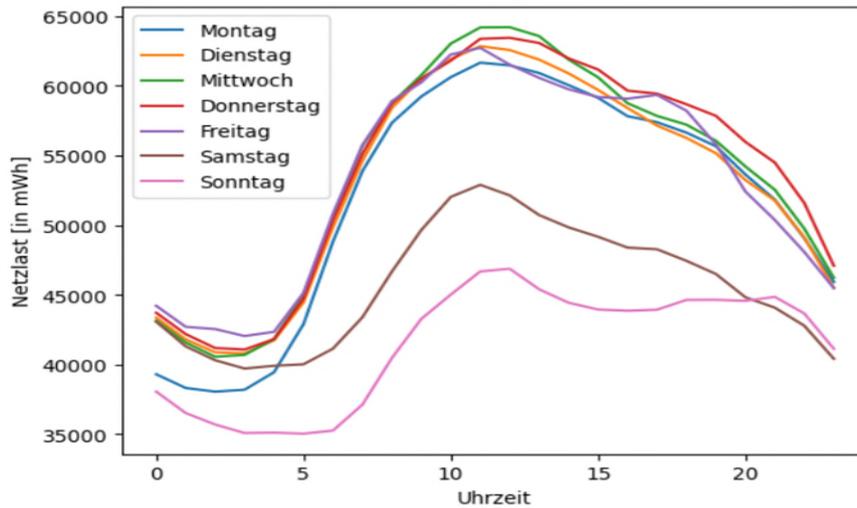


Abbildung 2 - Stromverbrauch in MWh - Schwankungen im Tagesverlauf (1.8.-7.8.22)

Neben den Schwankungen im Jahres- und Tagesverlauf, zeigte die Analyse auch starke Schwankungen in der Stromnachfrage an Feiertagen auf, dargestellt in Abbildung 3. So wird an bundesweit einheitlichen Feiertagen, beispielsweise Neujahr, Ostern oder Pfingsten, weniger Strom verbraucht. Im Gegensatz dazu stehen andere, lokale Feiertage, an denen der Stromverbrauch im Bereich eines normalen Wochentages liegt und die daher auch als solche betrachtet werden.

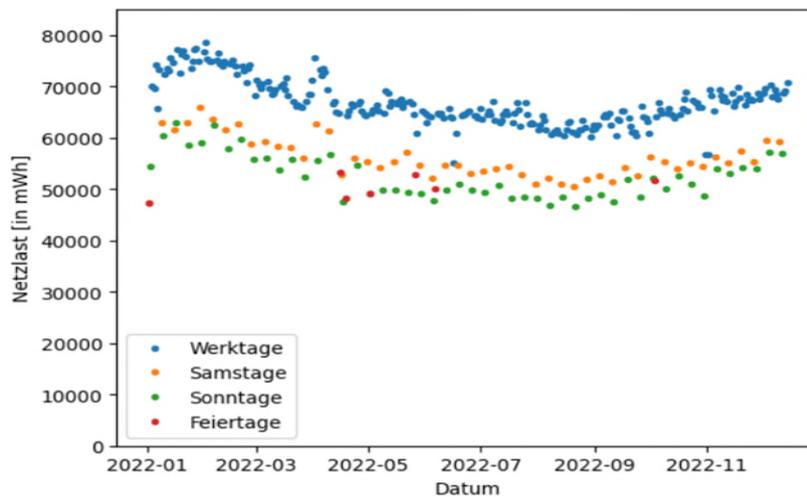


Abbildung 3 - Stromverbrauch in MWh nach Tagesart

Die Unterschiede in den Stromverbräuchen an verschiedenen Wochentagen und Feiertagen führten zu der Unterscheidung nach Tagesart, dabei wurden Werktage, Samstage, Sonntage und Feiertage als Kategorien festgelegt. Zu Feiertagen werden dabei nur die bundesweiten gesetzlichen Feiertage Neujahr, Karfreitag, Ostermontag, Tag der Arbeit, Christi Himmelfahrt, Pfingstmontag, Tag der deutschen Einheit, Erster- und zweiter Weihnachtsfeiertag gezählt. Die auf dieser Basis entstandene Modellierung der Prognosen der Gesamtnachfrage an Strom wird im Kapitel 3.3 erläutert. Zunächst wird jedoch das Angebot an regenerativem Strom, in Kapitel 3.2, näher beschrieben.

3.2 Struktur des Gesamtangebots von Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland

Neben den ständigen Änderungen der Gesamtnachfrage an Strom in Deutschland treten solche auch im Gesamtangebot an Strom aus erneuerbaren Energien auf. Es ist wichtig, das Stromangebot aus erneuerbaren Energien zu betrachten, da es nur möglich ist, den Fußabdruck der eigenen Stromverbräuche zu reduzieren, wenn genug Strom aus erneuerbaren Energien im gewünschten Zeitraum verfügbar ist.

Die Abbildung des Stromangebots aus erneuerbaren Energien ist komplex, da es verschiedene kurzfristige und langfristige Einflüsse gibt.

Zu den kurzfristigen Einflüssen zählen zum Beispiel das Wetter und die Tageszeit. Das Wetter und die Tageszeit haben einen großen Einfluss auf das Angebot aus erneuerbaren Energien, da erneuerbare Energiequellen wie Solar- und Windenergie von der Verfügbarkeit an Sonnenlicht und Wind abhängig sind. Zum Beispiel kann ein bewölkter Tag die Menge an Strom reduzieren, der von Solaranlagen produziert wird, da die Wolken die Sonnenstrahlen abschwächen. Gleiches gilt zur Nachtzeit, da hier nicht ausreichend Sonnenlicht vorhanden ist. [De23]

Langfristige Einflüsse stellen zum Beispiel die Verfügbarkeit von Speicherkapazitäten oder Kapazitäten zur Stromerzeugung dar. Das Vorhandensein an Speicher ermöglicht, dass erzeugter Strom auch zu einem späteren Zeitpunkt verwendet werden kann. Die Möglichkeiten zur Stromerzeugung wiederum, dass die Quellen regenerativer Energien überhaupt effektiv und effizient genutzt werden können. Je größer die Speicher- und Erzeugungskapazitäten also sind, desto mehr Strom aus erneuerbaren Energien kann erzeugt und über einen längeren Zeitraum verwendet werden. [Se09]

4 Konzept: Modellierung der Nachfrage- und Angebotsprognosen

Nach der Analyse der Verfügbarkeit und Struktur der Daten werden im Folgenden Konzepte für die Modellierung der Nachfrage und des Angebots vorgestellt. Anschließend folgt das Zusammenbringen der beiden Prognosen über einen Ranking-Algorithmus.

4.1 Ermittlung der prognostizierten Gesamtnachfrage mit Hilfe mathematischer Näherungsverfahren

Die Analyse der Daten der gesamten Stromnachfrage in Deutschland, beschrieben in Kapitel 3.1, zeigt Schwankungen auf, die für die Prognose des zukünftigen Stromverbrauchs berücksichtigt wurden. Die erheblichen Unterschiede in den Verbräuchen liegen sowohl in den tageszeitabhängigen und wochentagabhängigen Schwankungen als auch den Schwankungen im Verlauf eines Jahres. Vor diesem Hintergrund wurde die stündliche Taktung der Daten, wie sie bereits von der Bundesnetzagentur über die SMARD angeboten wird, für eine möglichst präzise Modellierung beibehalten. Die für jeden einzelnen Wochentag verfügbaren Daten wurden für die Prognose gemäß den Schwankungen zwischen Werktagen, Samstagen, Sonntagen und Feiertagen unterteilt und als Tages-Art in die Modellierung mit einbezogen und gewichtet. Um jährliche und temporäre Schwankungen, die Auswirkungen auf die Prognosen haben können, zu berücksichtigen, werden vor jeder Prognose die aktuellen Strommarktdaten abgefragt. Der genaue Aufbau der Modellierung, die Befüllung der Datenbank und die Berechnung der Prognosen werden im Folgenden anhand der Darstellung des Konzepts in Abbildung 4 näher erläutert.

Die Datenbank besteht aus zwei wesentlichen Tabellen, zum einen aus der Tabelle mit den historischen Daten (*HistoricalDemand*) und zum anderen aus der Tabelle mit den prognostizierten Daten (*PrognoseDemand*). Die Grundlage der Daten, und somit für die Berechnung der Prognosen, stellen die Strommarktdaten der Bundesnetzagentur dar, deren Struktur im Kapitel 3.1 bereits beschrieben wurde. Die Datenbank wird durch das Skript *initializeDbHistoricalDemand* initial befüllt. Für das regelmäßige Aktualisieren der historischen Datenbanktabelle (*updateDatabase*) wurde die SMARD API verwendet [Wi23]. Aus dieser API werden sowohl die Zeitstempel als auch die Zeitreihen URL genutzt. Die Zeitreihen enthalten dabei die Angaben zu Datum, Uhrzeit und Netz-Last. Um diese Daten abfragen zu können, muss jedoch erst der richtige Zeitstempel ermittelt werden. Dazu wird der Unix Code aus der Zeitstempel URL zunächst in das in der Datenbank genutzte Datumsformat konvertiert. Damit wird aus der historischen Datenbanktabelle der zuletzt gespeicherte Eintrag abgerufen und dessen Zeitstempel, bestehend aus Datum und Uhrzeit, wieder zurück in Unix Code konvertiert und damit dann die neuesten Daten aus API abgefragt, dies erfolgt über die Zeitreihen URL. Alle verfügbaren Einträge, die neuer sind als die bereits in der historischen Datenbanktabelle verfügbaren, werden mit Datum, bestehend aus Datum und Uhrzeit, und Netzlast übernommen, leere Einträge werden dabei herausgefiltert.

Anschließend werden diese neuen Datensätze formatiert, zudem wird deren Tages-Art ermittelt (*defineHolidays*) und die daraus entstehenden Dataframes, bestehend aus Datum, Uhrzeit, Tages-Art und Netzlast, in der historischen Datenbanktabelle ergänzt.

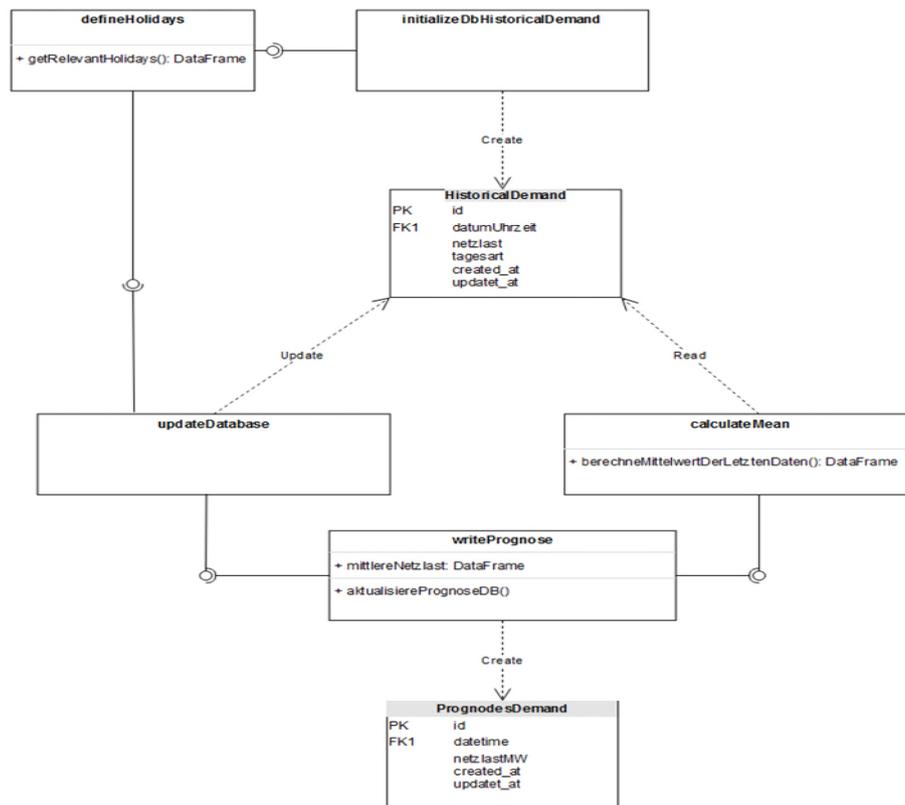


Abbildung 4: Grafische Darstellung des Modellierungskonzepts der Stromnachfrage

Vor jeder Aktualisierung der Prognosen werden die aktuellen Verbrauchsdaten auf diese Art und Weise ergänzt, um möglichst aktuelle, auf kurzfristige Veränderungen in der Marktnachfrage reagierende Prognosen zu erhalten. Die Prognose-Tabelle wird dann durch das Skript *writePrognose*, basierend auf den zuvor aktualisierten Daten, mit den neuesten Prognosen, jeweils für den heutigen und die drei darauffolgenden Tage, ergänzt. Sind für einen dieser vier Tage bereits Prognosen vorhanden, so werden diese mit neuen Daten überschrieben. Zusätzlich zu den aktuellen Datensätzen enthält diese Datenbanktabelle auch alle vergangenen Prognosen. Die Berechnung der Prognosen erfolgt über die Mittelwertberechnung der historischen Daten (*calculateMean*), dazu werden jeweils die letzten Werte der Uhrzeit und Tages-Art herangezogen und deren Mittelwert ermittelt.

Die prognostizierten Daten werden dann für das Matching von Nachfrage und Angebot verwendet, die genaue Zusammenführung dieser Datensätze wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2 Ermittlung des prognostizierten Gesamtangebots mit Hilfe des Grünstromindex

Für die Prognose des Gesamtangebots an Strom aus regenerativen Energiequellen wurde innerhalb des Projekts die Grünstromindex API eingebunden [Gr22]. Mit der API ist es möglich, unter Angabe der gewünschten Postleitzahl, GSI-Werte für die nächsten 72 Stunden zu erhalten. Die GSI-Werte repräsentieren die dynamischen Tarife für Elektrizität (EFA10) des Stufenmodells zur Weiterentwicklung der Standards für die Digitalisierung der Energiewende. Die Tarifstufen liegen zwischen den Werten 0 und 100 und sagen aus, wie viel regenerativer Strom sich im Netz befindet und vom Verbraucher in Anspruch genommen werden kann. Als Datengrundlage werden für die Prognose unter anderem die Netzstruktur, historische Schaltzustände, Mittelwerte von verschiedenen Wettervorhersagen und Marktstammdaten verwendet. [Zo22]

4.3 Zusammenführung von Angebot und Nachfrage und Empfehlung

Da es sich bei dem GSI des Angebots pro Postleitzahl und der ermittelten prognostizierten gesamten Netzlast auf Seiten der Nachfrage um Werte mit verschiedenen Einheiten handelt, können diese nicht direkt miteinander verrechnet werden, um eine prognostizierende Aussage zu treffen. Aus diesem Grund wurde ein Matching Algorithmus entwickelt, der näherungs- und schrittweise vorgeht, um zu einer Empfehlung zu kommen. Die Schritte werden in Abbildung 5 dargestellt und im Anschluss näher erläutert.

- **Schritt 1: Abruf der API**
Die GSI-Werte und prognostizierten Netzlasten werden mit einem GET-Request abgerufen. Anschließend werden die Werte im JSON-Format für die nächsten 72 Stunden zurückgegeben.
- **Schritt 2: Speichern der Werte**
Die abgerufenen Werte der Nachfrage und des Angebots werden jeweils als Datensätze in zwei assoziativen Arrays gespeichert. Dabei wird eine ID als Zahl von 1-72 zugewiesen. Diese Zahl beschreibt den zeitlichen Abstand in Stunden, von der aktuellen Uhrzeit ausgehend.
- **Schritt 3: Ranking der Nachfrage und des Angebots**
Die vorher erstellten Arrays werden jeweils anhand des GSIs und der prognostizierten Netzlast sortiert. Die Sortierung findet bei dem Angebot absteigend und bei der Nachfrage aufsteigend statt, weil ein hohes Angebot und eine niedrige Nachfrage in Hinblick auf die Gesamtverfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien als positiv zu bewerten sind. Die Sortierung stellt den Rang eines jeden Datensatzes dar und wird dem Datensatz hinzugefügt.
- **Schritt 4: Summierung der Rankings**

Die beiden Arrays werden anschließend aufsteigend anhand ihrer ID sortiert, sodass sie wieder zeitlich chronologisch nach der jeweiligen Stunde angeordnet sind. Anschließend werden die Ränge der Datensätze beider Arrays summiert und pro ID und Stunde in ein neues Array eingetragen. Je niedriger die Nachfrage und je höher das Angebot, desto niedriger ist dabei die Summe. Die Datensätze, beziehungsweise Stunden mit niedrigerem summiertem Rang sind deshalb empfehlenswerter für den Verbrauch von Strom.

- Schritt 5: Darstellung

Nachdem Angebot und Nachfrage für jede der nächsten 72 Stunden bewertet und addiert wurden, können Empfehlungen farblich formatiert und abhängig von der Eingabe der Nutzenden ähnlich einer ABC-Analyse auf dem Bildschirm ausgegeben werden. Näheres zu der Darstellung der Ergebnisse und der Bedienoberfläche wird im nächsten Kapitel erklärt.

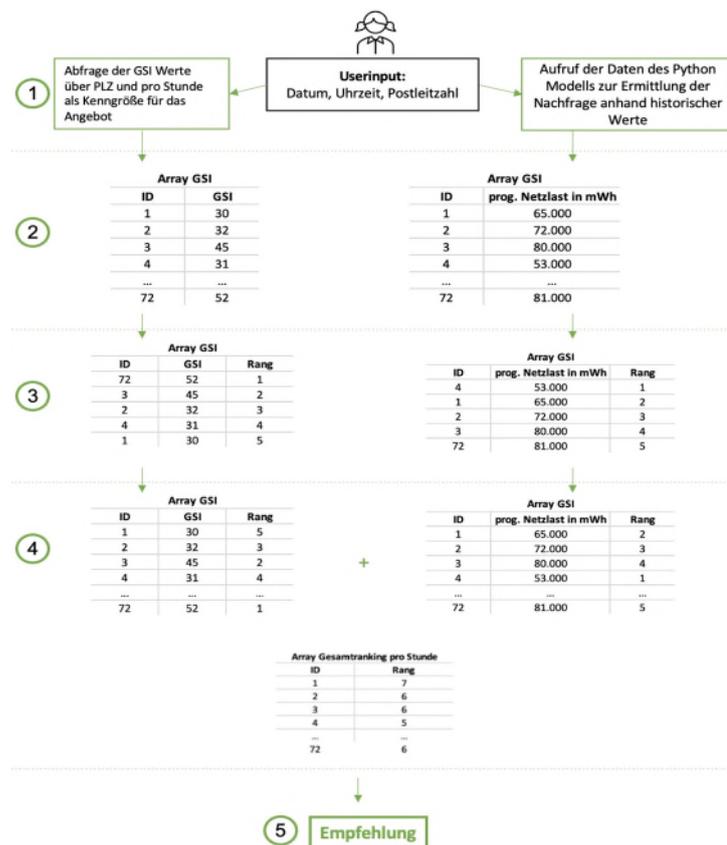


Abbildung 5 - Matching Algorithmus

5 Umsetzung: App mit Dashboard zur Prognose der Gesamtnachfrage und des Gesamtangebots

Die modellierten Prognosen könnten auf unterschiedliche Weisen genutzt werden. Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit ist das Nutzen der Daten für das möglichst sinnvolle Betreiben elektrischer Geräte in Privathaushalten. Anwendende sind in diesem Use-Case Privatpersonen, die eine Information darüber erhalten möchten, wann es innerhalb der nächsten Stunden ökologisch sinnvoll bzw. weniger sinnvoll ist, Strom zu verbrauchen. Zur Erfüllung dieses Use-Cases wurde der Prototyp einer Webanwendung entwickelt. Der Aufbau der Infrastruktur und der GUI dieser Webapplikation werden im Folgenden näher erläutert.

5.1 Aufbau der Infrastruktur des Prototyps

Die Infrastruktur der Anwendung basiert auf der Containerisierung bzw. Virtualisierung von Systemressourcen. Jeder Service der Anwendung wird in einem eigenen Docker-Container betrieben. Hierbei wird bei der eingesetzten Virtualisierungstechnologie Docker ein eigenes Subnetting auf dem Host-System erstellt, wobei die verschiedenen Services ein in sich geschlossenes Netz bilden. Um die Kommunikation innerhalb der Service-Struktur zu vereinfachen und um bei ggf. vielen Anfragen von Nutzenden bestimmte Services hochskalieren zu können, (z.B. die Berechnungsumgebung für Nachfrage oder die Datenbankinstanz) wurde ein Proxy-Server in die Infrastruktur integriert, welcher als Stellvertreter für den eingehenden Datenverkehr der Applikation fungiert.

5.2 Darstellung der Bedienoberfläche und der Ergebnisse

Innerhalb der Applikation haben Nutzende die Möglichkeit, verschiedene Eingaben zu tätigen. Wie in Abbildung 6 dargestellt, ist eine dieser die Postleitzahl. Diese wird für die Abfrage des GSI-Wertes benötigt. Zwei weitere Werte sind Prozentwerte für den Bereich A und den Bereich B. Der Prozentwert für den Bereich C wird aus $1-A-B$ berechnet. Die Bereiche bestimmen im Nachgang, ähnlich wie in einer ABC-Analyse, welcher Anteil der Werte in der Empfehlung mit grün, gelb oder rot dargestellt wird. Wählt der Nutzende beispielsweise für A 10 %, B 20 %, und C 70 %, werden die Top 10 % der Datensätze mit den niedrigsten summierten Rängen in Grün, die nächsten 20 % in Gelb und die verbleibenden 70 % in Rot angezeigt.

Zudem haben Nutzende die Möglichkeit, mit einem Klick auf den Button "Prognose Starten" die Abfrage zu starten und die Ergebnisse in der Übersicht darzustellen.

Die übersichtliche Darstellung der Empfehlung zu jeder Stunde erfolgt in tabellarischer Form und chronologischer Reihenfolge (siehe Abbildung 6). Hier wird je Stunde angezeigt, ob das Stromangebot und die Stromnachfrage relativ hoch, mittel oder niedrig

sind. Auf Basis der summierten Ränge wird jeder Datensatz zudem farblich markiert und so der jeweilige Bereich gemäß der Einteilung der Nutzenden angezeigt.

Nachdem die Nutzenden eine Abfrage durchgeführt haben, kann über ein Drop-Down Menü ein Zeitpunkt, zu dem nähere Details über das Angebot und die Nachfrage angezeigt werden sollen, gewählt werden. Wie in Abbildung 6 deutlich wird, können der GSI, die Angebots- und Nachfrage-Ränge sowie die Verbraucherempfehlung (Bereich) eingesehen werden. Auch wird gezeigt, dass aufgrund einer niedrigen Netzlast und dem vergleichsweise hohen Grünstromindex die Ampel auf Grün schaltet.



Abbildung 6 - GUI und Ergebnisübersicht des Prototyps

6 Ausblick: Potential und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung

In diesem Kapitel werden die Erweiterungsmöglichkeiten und andere zukünftige Potentiale der Applikation zur Optimierung des Ökostromverbrauchs beschrieben. Diese umfassen zunächst die möglichen Verbesserungen hinsichtlich der Nachfragemodellierung, zeigen Möglichkeiten in der Optimierung der Infrastruktur auf und bieten einen Ausblick hinsichtlich des Einbeziehens weiterer Einflussfaktoren, als auch Erweiterungsmöglichkeiten über die ursprünglich angedachte, manuelle Nutzung der Daten und Applikation hinaus.

Die Stromnachfrage und das Angebot von Ökostrom richten sich in Deutschland nach vielen Faktoren, welche, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, aktuell vor allem basierend auf den historischen Daten zur Netzlast, und unter Berücksichtigung der jeweiligen Tagesart, in die Modellierung des prognostizierten Stromverbrauchs und den aktuell im Netz vorhanden Anteil regenerativen Stroms in die Applikation eingeflossen sind. Eine Erweiterung der Applikation um verbesserte Datenmodellierung, zusätzliche Einflussfaktoren wie Wetter, individuelles Nutzungsverhalten und langfristige Prognosen des Stromverbrauchs werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben. Die momentan genutzte Nachfragemodellierung kann in zukünftigen Versionen verbessert werden, indem ausführliche Prüfungen und Bewertungen der Qualität der aktuellen Prognosedaten durchgeführt werden. Diese sollte sowohl eine Fehleranalyse als auch einen Abgleich der Prognosen mit den tatsächlichen Stromverbrauchsdaten, also eine detaillierte Korrelationsanalyse umfassen. Basierend auf diesen Analysen könnten weitere Modellierungsalgorithmen angewandt und ebenfalls bewertet werden. Der Prototyp wurde zunächst mit Mittelwerten modelliert, eine Erweiterung um lineare oder quadratische Regressionen könnten die Prognosen weiter verbessern.

Des Weiteren könnten örtliche Schwankungen im Hinblick auf die Nachfragedaten mit einbezogen werden. Da die Postleitzahl für die Ermittlung des Stromangebots bereits von Nutzenden abgefragt wird, kann diese zukünftig auch für lokale Schwankungen in der Nachfrage herangezogen werden. Diese könnten allgemeine Schwankungen und darüber hinaus auch die Unterschiede an regionalen Feiertagen mit einbeziehen und somit die Prognosen für den Stromverbrauch weiter verbessern.

Eine weitere Möglichkeit, die Prognosen zu verbessern, ergibt sich aus dem Einbeziehen von Wetterdaten. Auch wenn der Einfluss des Wetters (vor allem Sonne und Wind) eine größere Auswirkung auf die Erzeugung und somit das Angebot regenerativen Stroms hat, so sind die Auswirkungen auf das Nutzungsverhalten und somit den Stromverbrauch nicht zu vernachlässigen.

Zusätzlich zu diesen allgemeinen Verbesserungen der Prognosen, könnte den Nutzenden in der Applikation eine weitere Eingabemaske zur Verfügung gestellt werden, über welche das individuelle Nutzungsverhalten erfasst werden kann. In Kombination aus einer verbesserten Modellierung und unter Einbeziehen weiterer Einflussfaktoren in die Prognosen, kann der Zeithorizont der Prognosen von aktuell 72h auf weitaus langfristiger Prognosen erweitert werden.

Über die zuvor beschriebenen Ausbaumöglichkeiten hinsichtlich der Modellierung hinaus, gibt es außerdem Potentiale bei der Verbesserung der service-basierten Infrastruktur. Hier ist davon auszugehen, dass eine rein relationale Datenbank nur begrenzte Möglichkeiten zur Analyse von großen Datenmengen bietet und zudem wenig flexibel im Hinblick auf Datenformate oder Datentypen ist. Dabei könnte eine NoSQL- oder Dokumentenbasierte Datenbank eine höhere Flexibilität bei der Analyse von Dokumenten (bspw. CSV-Dateien) bieten, ohne die Inhalte von Input-Daten in eine relationale Datenbank migrieren zu müssen. Der Einsatz einer NoSQL Datenbank würde

sowohl die Performance der Anwendung verbessern als auch die Möglichkeit schaffen, verschiedene Daten- bzw. Dateiformate als Berechnungsgrundlage zu nutzen.

In dem folgenden und letzten Abschnitt dieses Papers werden Erweiterungsmöglichkeiten über die ursprünglich angedachten Anwendungsfälle hinaus, vor allem in Hinblick auf die Einbeziehung aktueller Strompreise und Erweiterungen durch Anbindung an Smart Home Geräte und Applikationen, dargelegt.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Preisschwankungen am deutschen Energiemarkt nicht mit aktuellen Tagespreisen an die Endverbrauchenden weitergegeben werden, ist eine Erweiterung der Applikation, um den Einflussfaktor Preis, nur begrenzt sinnvoll. Entwickelt sich der deutsche Strommarkt und vor allem die Abrechnung der Energiekonzerne dahingehend weiter, dass der Verbrauch auf mit Tagesaktuellen oder zumindest pro Monat gemittelten Strompreisen abgelesen und entsprechend abgerechnet wird, würde das Einbeziehen der Marktdaten die Attraktivität und den Nutzen der Applikation enorm steigern.

Dazu wäre jedoch eine Reform des deutschen Strom- und Energiemarktes, nach Vorbild des norwegischen Modells erforderlich. Bei diesem können die Endverbrauchenden entscheiden, ob sie einen Stromtarif mit Festpreis oder einen mit schwankenden Preisen wählen. Die Preisstruktur richtet sich dabei nach den skandinavischen Börsenpreisen, welche wiederum stark durch das besonders im Sommer und Winter schwankende Angebot des Ökostroms, welcher in Norwegen rund 99,1 % ausmacht und vorrangig durch Wasserkraft erzeugt wird [St23], beeinflusst wird. Um die Preisstruktur in Deutschland anpassen zu können, bedürfte es einer anderen Erfassung der individuellen Stromverbräuche, dazu müssten in Deutschland jedoch flächendeckend intelligente Stromzähler installiert und genutzt werden [Uk12]. Gemäß dem Beschluss des Bundeskabinetts vom 11. Januar 2023, werden, sollte dem Gesetzentwurf in allen Instanzen zugestimmt werden, die sogenannten Smart Meter ab 2032 Pflicht [Du23]. Sobald die Smart Meter dann entsprechend verbreitet sind und die Stromanbieter Verträge mit schwankenden Strompreisen anbieten, könnte die App auch dahingehend erweitert werden, dass sowohl die Daten vom Stromzähler im 15 Minuten Takt erfasst werden als auch in ähnlich regelmäßigen Abständen die Marktdaten vom Stromanbieter direkt oder der Europäischen Energiebörse EEX [EE23] abgerufen und in die Modellierung von Angebot und Nachfrage mit einbezogen werden.

Außerdem stellt sich die Frage, ob mittel- und langfristige Prognosen zu steigenden Bruttostromverbräuchen, beispielsweise elf % Steigerung des Bruttostromverbrauchs bis 2030 [3], anteilig mit in die Modellierung einbezogen werden sollten, oder ob im Rahmen der aktuellen Energiekrise (2022/2023) davon abgesehen werden kann, da mit niedrigeren Verbräuchen durch erhebliche Einsparungen in Industrie und Privathaushalten zu rechnen ist.

Überdies könnte eine Erweiterung der App für die Nutzenden darin bestehen, dass zwischen privater und gewerblicher Nutzung von Ökostrom unterschieden werden kann.

Eine weitere Möglichkeit die Applikation so zu verbessern, dass regenerativer Strom dann genutzt wird, wenn die Nachfrage am geringsten und der im Netz befindliche Ökostrom am höchsten ist, wäre eine zukünftige Anbindung an andere Applikationen, beispielsweise Smart Home Apps, mit denen Nutzende ihre elektrischen Geräte genau für die prognostizierten Zeiträume fernsteuern und starten, oder stoppen könnten. Darüber hinaus könnte die Anbindung an Applikationen und smarte Geräte noch weiter optimiert werden, indem diese nicht mehr durch Nutzende gesteuert, sondern automatisiert die Daten aus der in diesem Projekt geprototypen App beziehen, auswerten und dann den Ökostrom entsprechend nutzen, wenn dieser das Stromnetz potenziell sogar überlasten könnte.

Literaturverzeichnis

- [De23] Deutscher Wetterdienst (2023): Wettervorhersage für erneuerbare Energien. https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/07_wettervorhersage_erneuerbare_energien/vorhersage_erneuerbare_energien_node.html (21.05.2023)
- [Du23] Duy, S. (2023): Das Smart Meter kommt: Das sind Deine Vorteile. <https://www.finanztip.de/stromzaehler/> (09.03.2023)
- [EE23] EEX (2023): Marktdaten Strom EEX. <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom> (04.03.2023)
- [Gr22] Grünstromindex - Corrently API (2022): <https://corrently.io/books/grunstromindex> (27.03.2023)
- [In22] Informationsportal Erneuerbare Energien (2022): Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland.html (13.03.2023)
- [Ke21] Kemmler, A.; Wunsch, A.; Burret, H. (2021): Entwicklung des Bruttostromverbrauches bis 2030. [https://www.prognos.com/de/projekt/entwicklung-des-bruttostromverbrauches-bis-2030#:~:text=Im%20Zielszenario%20steigt%20der%20Bruttostromverbrauch,Jahr%20030%20\(%2B11%20Prozent\).](https://www.prognos.com/de/projekt/entwicklung-des-bruttostromverbrauches-bis-2030#:~:text=Im%20Zielszenario%20steigt%20der%20Bruttostromverbrauch,Jahr%20030%20(%2B11%20Prozent).) (06.11.2022)
- [Se09] Seifert, J. (2009): Preismodellierung und Derivatbewertung im Strommarkt – Theorie und Empirie. https://www.google.de/books/edition/Preismodellierung_und_Derivatebewertung/0fAq6QmbFc8C?hl=de&gbpv=1
- [SM22] SMARD (2022, 2023): Strommarktdaten. <https://www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten/#!?downloadAttributes=%7B%22selectedCategory%22:false,%22selectedSubCategory%22:false,%22selectedRegion%22:false,%22from%22:166682160000,%22to%22:166777559999,%22selectedFileType%22:false%7D> (13.03.2023)

- [St22] Statista (2022): Bruttostromverbrauch in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2022.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/256942/umfrage/bruttostromverbrauch-in-deutschland/> (13.03.2023)
- [St23] Statista (2023): Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Norwegen in den Jahren von 2021 bis 2022.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1292636/umfrage/struktur-der-stromerzeugung-in-norwegen/> (04.03.2023)
- [Um10] Umweltbundesamt (2010): Energieziel 2050.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf (13.03.2023)
- [Um22] Umweltbundesamt (2022): Stromverbrauch.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch> (19.12.2022)
- [Um22a] Umweltbundesamt (2022): CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-steigen> (13.03.2023)
- [Uk12] Uken, M. (2012): Strompreise Norwegen Deutschland.
<https://www.zeit.de/wirtschaft/2012-09/strompreise-norwegen-deutschland> (04.03.2023)
- [Wi23] Wittmann, L.; Fischer, A. (2023): bundesAPI – SMARD API.
<https://github.com/bundesAPI/smard-api> (18.03.2023)
- [Zo22] Zoerner, T. (2022): EAF-10 - Dynamische Tarife für Elektrizität
<https://corrently.io/books/grunstromindex/page/eaf-10-dynamische-tarife-fur-elektrizitat> (27.03.2023)