



**Technische Hochschule
Brandenburg**
University of
Applied Sciences
**Fachbereich
Technik**

EnInnov2024

18. Symposium Energieinnovation | 14.02.-16.02.2024



„ENTWICKLUNG EINES TOOLS ZUR SPEZIFISCHEN, LASTGANGBASIERTEM EIGENVERBRAUCHSOPTIMIERUNG MITTELS PV-LEISTUNGSPROGNOSE“

Klaus Markgraf (M. Eng.)

markgraf@th-brandenburg.de

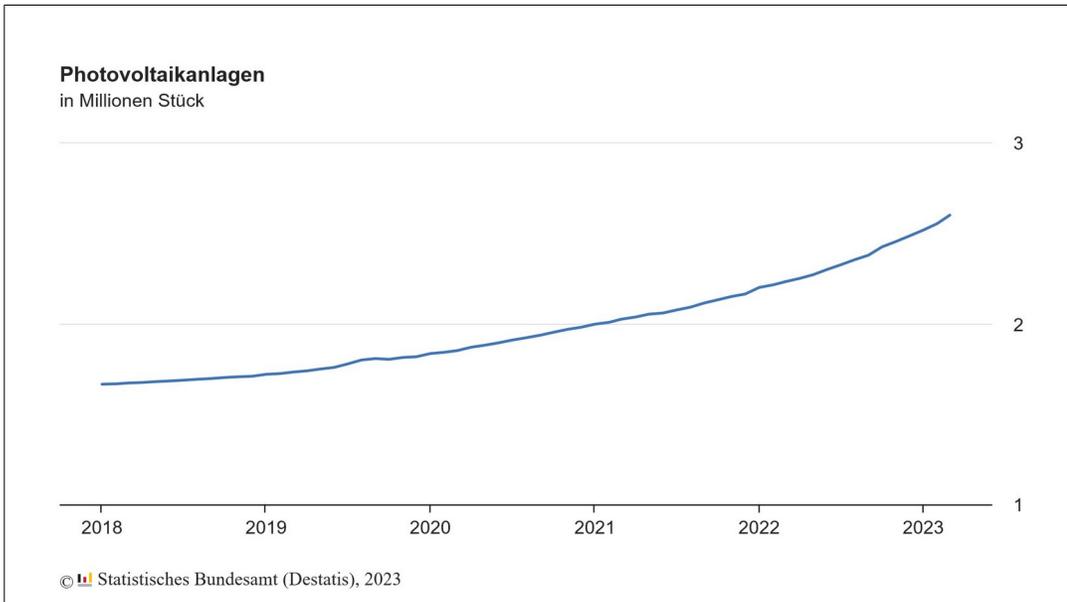


Agenda

- Motivation zum Projekt
- PV-Prognosemodelle
- Lastprofile elektrischer Verbraucher
- Optimierungsalgorithmus
- Erstellung des Softwaretools
- Potenzialanalyse des Programms
- Zusammenfassung & Ausblick
- Fragen



Motivation zum Projekt



Anzahl der erfassten PV-Anlagen

https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2023/PD23_25_p002.html

- Bis 2050 sollen 80% der Bruttostromerzeugung durch erneuerbare Energien erfolgen [1]
[1] „Klimaschutzplan der Bundesregierung“
https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Mehr Förderung → steigende Anzahl an PV-Anlagen
- Herausforderung: gewährleisten der Stromnetzstabilität



Motivation zum Projekt

Netzbetreiber schaltet mittags private PV-Anlagen ab – wegen „Versorgungssicherheit“

02.07.2023 | Stand 14.09.2023, 22:14 Uhr

A A A

Meldung – Passauer neue Presse 02.07.2023

<https://www.pnp.de/lokales/landkreis-deggendorf/sonne-da-der-strom-ist-weg-12230040>

Solar panels switched off by energy authorities to stabilise South Australian electricity grid

By Daniel Keane, Nick Harmsen and Sara Tomevska

Posted Wed 17 Mar 2021 at 7:34am, updated Wed 17 Mar 2021 at 9:00am

Meldung – ABC-News 17.03.2021

<https://www.pnp.de/lokales/landkreis-deggendorf/sonne-da-der-strom-ist-weg-12230040>

15.09.2023, 14:08 Uhr

 Audiobeitrag

 > Zu viel Sonne – Bayernwerk schaltet PV-Anlagen ab

Zu viel Sonne – Bayernwerk schaltet PV-Anlagen ab

Wegen des tagelangen Sonnenscheins haben etliche Photovoltaik-Anlagen in Bayern zu viel Strom produziert. Der Netzbetreiber Bayernwerk musste daher einige vom Netz nehmen – die Netze waren überlastet. Ein "unumgänglicher" Vorgang, so Bayernwerk.

Meldung – Bayerischer Rundfunk 15.09.2023

<https://www.br.de/nachrichten/bayern/zu-viel-sonne-bayernwerk-schaltet-photovoltaik-anlagen-ab,Tphu8em>

- Aktuelles Problem: schon jetzt werden PV-Anlagen regelmäßig durch den Netzbetreiber abgeschaltet
- Ursache: Viel Energie, zu einer Zeit an der geringer Verbrauch herrscht → Überlastung des Stromnetzes



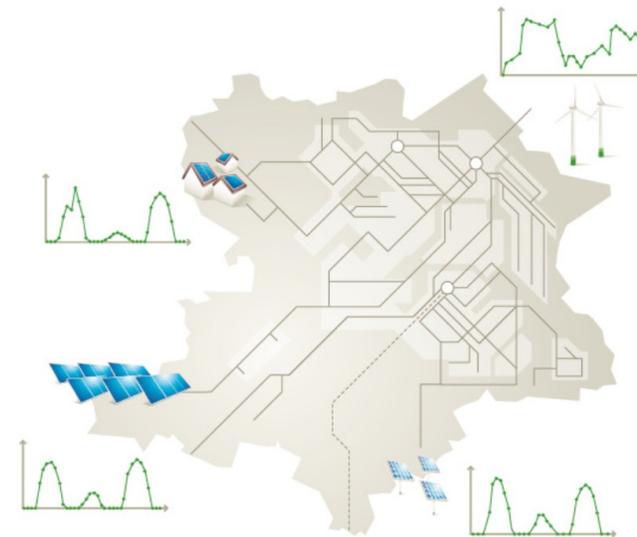
Motivation zum Projekt

- Namenhafte Institutionen sehen eine Lösung in der Prognose von PV-Leistungen und Lasten

Ziel: Netzbetreiber können im Voraus handeln und das Netz wird stabilisiert

Prognose der PV-Einspeisung in Netzknoten

enercast Netzknotenprognose zur Optimierung der Netzauslastung und zur Vermeidung von Netzengpässen



Nutzen für Verteilnetzbetreiber

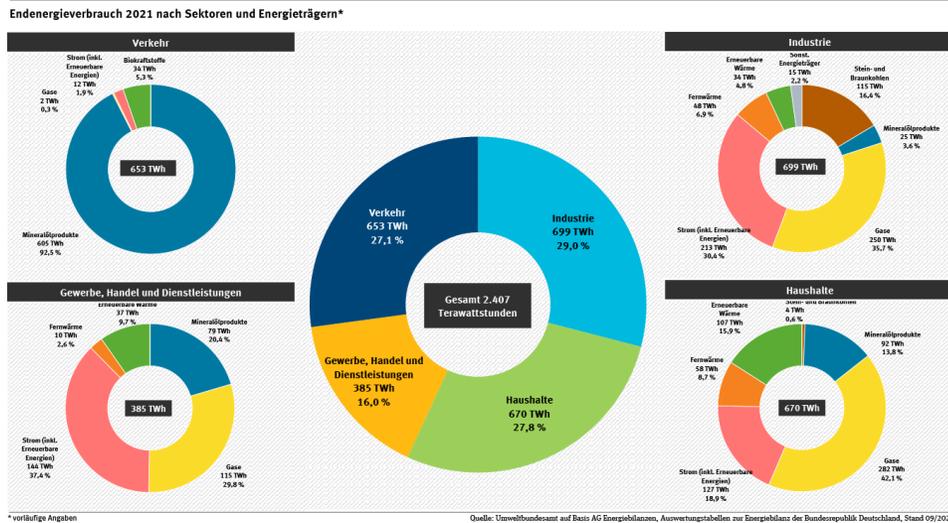
- Frühere Erkennung von Engpässen
- Weniger Abschaltungen und Reduzierungen
- Einfacher Nachweis nach EEG §12 Abs. 2.
- Vermeidung oder Aufschub von aufwändigen Investitionen in das Netz (z.B. Umspannwerk)
- Reduzierung von Eingriffen
- Bessere Zusammenarbeit zwischen dem Team der Leitwarte und den Betreibern von PV-Anlagen

Ausschnitt aus der Fallstudie: „Prognose zur PV-Einspeisung in Netzknoten“

<https://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/19353-rtkl-teufelskreis-wie-klimaanlagen-das-klima-aufheizen>



Motivation zum Projekt



- Gesamter Stromverbrauch jährlich bei etwa 500
- Haushalte: etwa 130 → also mehr als 25 %
- Große Anzahl an PV-Anlagen auch durch Haushalte

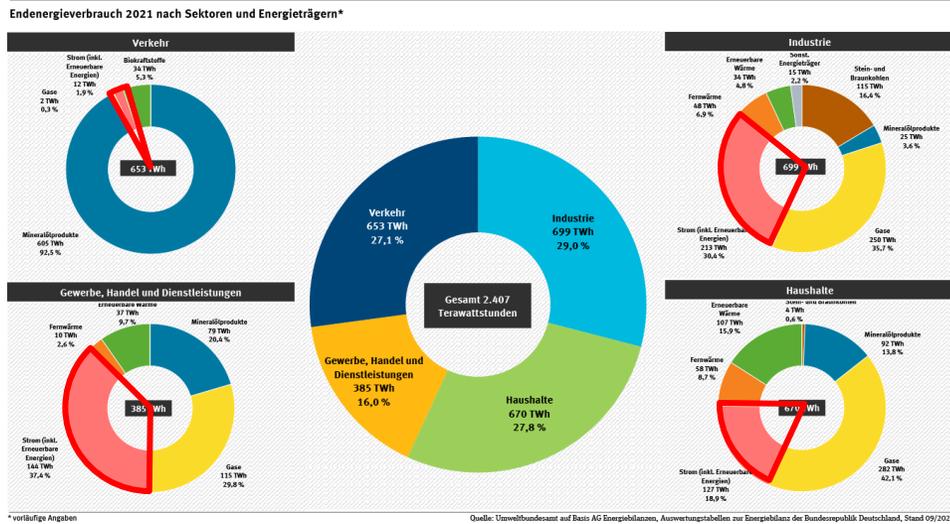
Daraus folgt: Last- und Einspeiseverhalten privater Haushalte hat eine direkte Auswirkung auf das Netz

Endenergieverbrauch 2021 nach Sektoren und Energieträgern"

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energietragern>



Motivation zum Projekt



- Gesamter Stromverbrauch jährlich bei etwa 500
- Haushalte: etwa 130 → also mehr als 25 %
- Große Anzahl an PV-Anlagen auch durch Haushalte

Daraus folgt: Last- und Einspeiseverhalten privater Haushalte hat eine direkte Auswirkung auf das Netz

Endenergieverbrauch 2021 nach Sektoren und Energieträgern**

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energietragern>



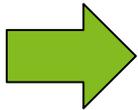
Motivation zum Projekt

Motivation von privaten Haushalten:

- Erhöhte Wirtschaftlichkeit
- Gesenkte CO₂-Emissionen
- Erhöhte Netzstabilität

Herausforderungen:

- Kaum PV-Prognose
- Fehlendes Wissen über Lastverhalten von Geräten
- Begrenzte Möglichkeit, Verbraucher im richtigen Moment anzusteuern



keine existierenden Programme



Motivation zum Projekt



Erstellung einer Software, die es dem Anwendenden unter Berücksichtigung der eigenen PV-Anlage und der eigenen Verbraucher ermöglicht, eine optimale Verbraucherkonstellation zu ermitteln, um den Eigenverbrauch zu maximieren



Motivation zum Projekt



Erstellung einer Software, die es dem Anwendenden unter Berücksichtigung der eigenen PV-Anlage und der eigenen Verbraucher ermöglicht, eine optimale Verbraucherkonstellation zu ermitteln, um den Eigenverbrauch zu maximieren

- Untersuchung PV-Prognosemodellen
Möglichkeiten, Anwendbarkeit, Vergleich
- Untersuchung von Verbrauchern hinsichtlich ihres Lastprofils
- Erstellen eines mathematischen Optimierungsalgorithmus
- Erstellen der Software
Intuitive Bedienbarkeit, Funktionsfähigkeit hinsichtlich unterschiedlicher Plattformen



PV-Prognosemodelle



PV-Prognosemodelle

Ziele:

- Entwicklung und Akquise von PV-Prognosemodellen/-Programmen
- Aufnahme von Daten zum Aufbau einer Testreihe
- Vergleich der Prognosemodelle hinsichtlich deren Genauigkeit und Qualität



PV-Prognosemodelle

Klassifizierung von PV-Prognosemodellen

Physikalische Modelle

Grundlegende math. und phys.
Berechnungen

Statistische Modelle

Auswertung von vorhandenen
Datensätzen

Hybride Modelle

Kombination aus mehreren
anderen Modellen



PV-Prognosemodelle

Genutzte Prognosemodelle:

- Selbstentwickeltes Modell „KM_physikalisch_V1“ (physikalisches Modell)
Strahlung berechnet, Bewölkung prognostiziert, Leistung berechnet
- Selbstentwickeltes Model „KM_OpenM_V1“ (physikalisches/hybrides Modell)
Strahlung prognostiziert, Leistung berechnet
- Zur Verfügung gestelltes Programm „Forecast.Solar“ (statistisches Modell)
Strahlung prognostiziert, Leistung prognostiziert



PV-Prognosemodelle

Vergleich der Prognosemodelle anhand realer Anlagen:

- Zwei betrachtete PV-Anlagen mit unterschiedlichen Eigenschaften
- Prognose über einen Zeitraum von 60 Tagen
- 120 Datensätze zum Vergleich der Prognosemodelle

Übersicht der bestehenden PV-Anlagen

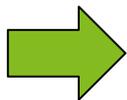
Lfd. Nr.	Längengrad / °	Breitengrad / °	Ausrichtungen	Neigung / °	Azimut / °	Installierte Leistung / W
1	51,89	11,63	1	30	180	800
2	52,35	12,9	2	5	90	425
				5	270	425



PV-Prognosemodelle

Vergleich von Prognosemodellen:

- Analytisch mittels der Fehlermetriken
- RMSE am häufigsten verwendet (Potenzierung legt Fokus auf große Fehler)
- Normalisierung der Werte erforderlich
- **Vergleich der Genauigkeit ist nicht ausreichend**



$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{t=1}^M (\hat{P}_t - P_t)^2}}{P_{\text{installiert}}}$$

Anzahl der Werte

Prognostizierte Leistung

Reale Leistung

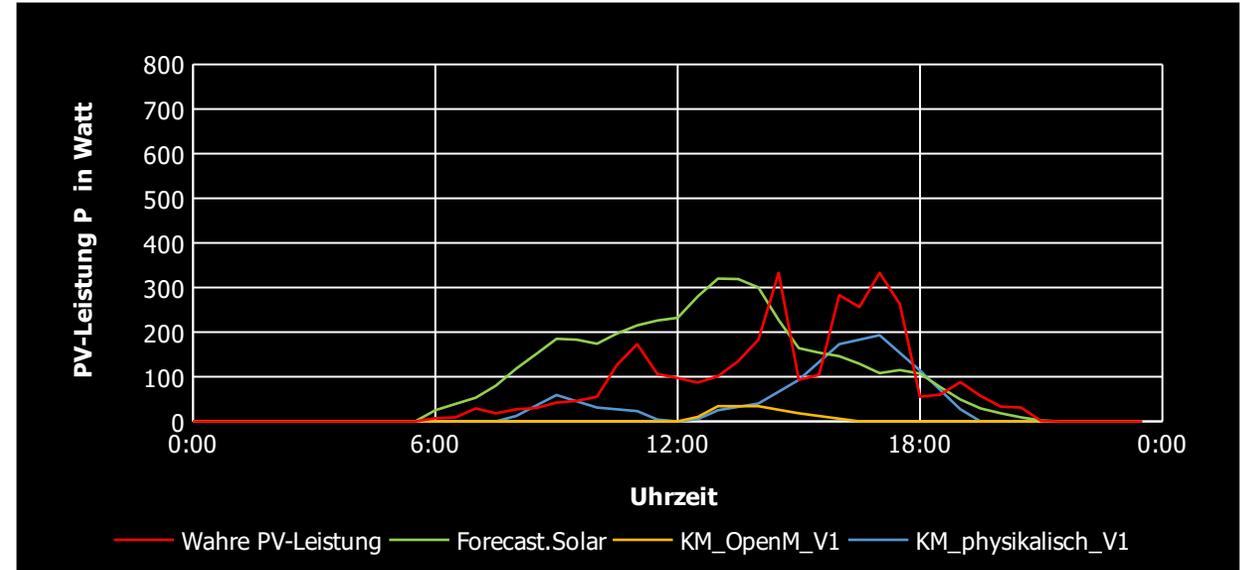
Installierte Leistung



PV-Prognosemodelle

Resultat:

- Forecast.Solar gesamtheitlich höchste Genauigkeit, keine Fehlertendenz
- KM_OpenM_V1 besser für Süd-Ausrichtung, Fehlertendenz zeigt vermehrt geringere Leistungen → gut geeignet
- KM_pyhsikalisch_V1 mittlere Genauigkeit, Fehlertendenz zeigt vermehrt höhere Leistungen → nicht geeignet



Auswertungsbeispiel für den 16.06.2023 an PV-Anlage Nr. 1

Ergebnisse der Fehlermetriken über die Gesamtlaufzeit

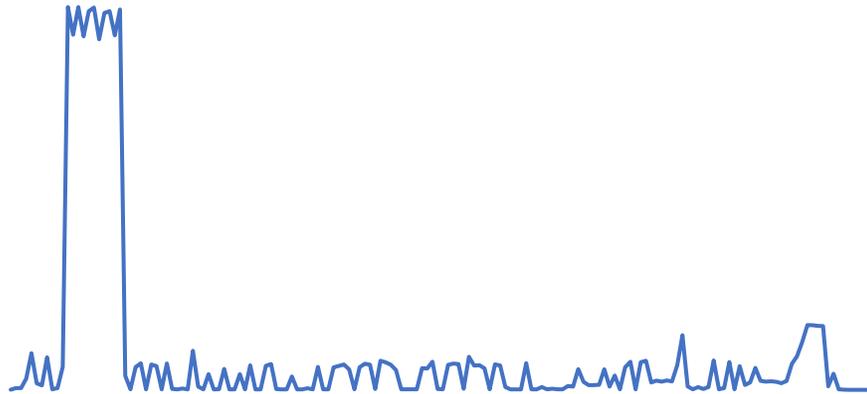
	RMSE-Forecast.Solar / %	RMSE-KM_OpenM_V1 / %	RMSE-KM_physikalisch_V1 / %
Anlage Nr. 1	13,18	11,63	13,48
Anlage Nr. 2	11,98	16,12	13,55
Gesamt	12,59	14,09	13,51



Lastprofile elektrischer Verbraucher



Lastprofile elektrischer Verbraucher

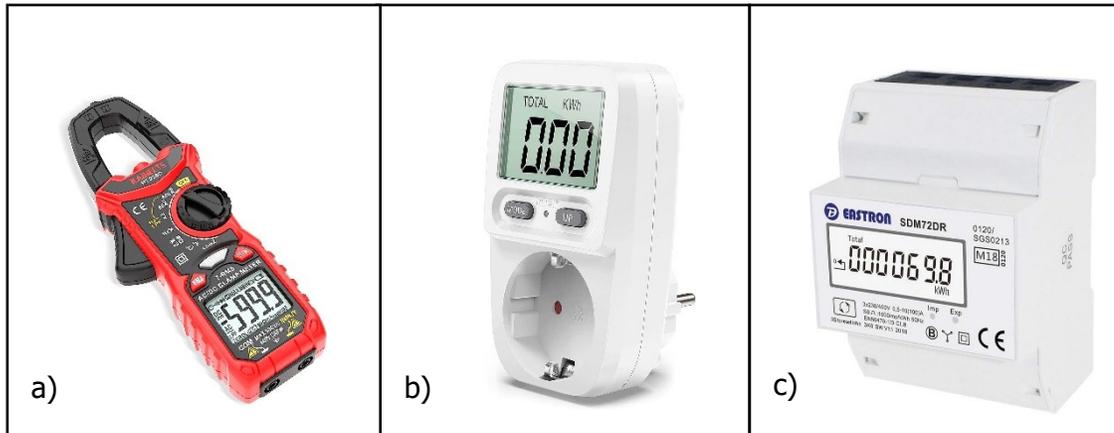


Gemessener Lastgang einer Waschmaschine
bei einem 60°C Waschgang über die Laufzeit von 2:45 Stunden

- Grafische Darstellung des Lastverhaltens eines Verbrauchers durch Lastprofile
- Erfassung erfolgt meist durch Messung
- Kaum Quellen für Lastgänge (z.B. Hersteller)



Lastprofile elektrischer Verbraucher



Hardware zur Bestimmung der elektrischen Leistung
(a - Strommesszange, b - Messsteckdose, c - Smartmeter)

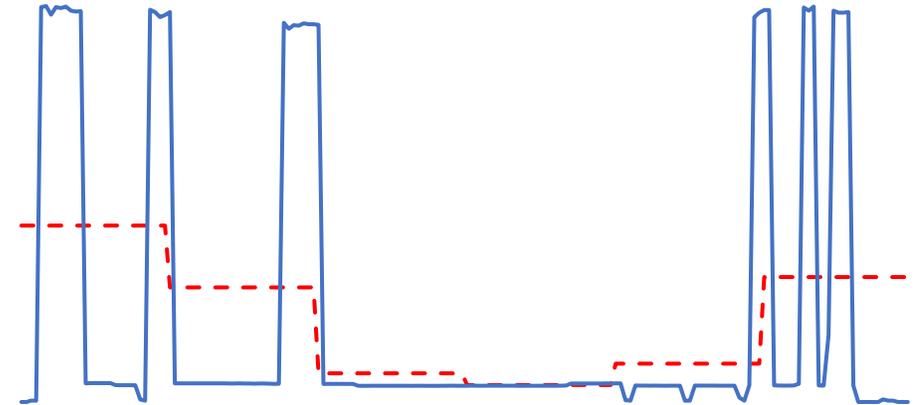
<https://www.amazon.de>

- Vielzahl von Möglichkeiten zur Erfassung von Lastdaten
- Erfassung erfolgt in festen Zeitperioden oder bei Lastwechsel



Lastprofile elektrischer Verbraucher

- Lasten von Verbrauchern ändern sich teilweise sekundlich
- Kurzfristige Lastwechsel sind nicht in PV-Prognosemodellen mit längerem Zeithorizont abbildbar
- Optimierungsrechnung nur möglich bei gleicher zeitlicher Auflösung
- Anpassung der zeitlichen Auflösung auf jene des Prognosemodells erforderlich



Anpassung des Lastprofils



Lastprofile elektrischer Verbraucher

Resultat:

- Erstellung eines Setups zur eigenständigen Aufnahme von Lastdaten
 - Hardware → Raspberry Pi 4B, Shelly Plug S, Fritzbox-Router
 - Software → Homeassistant, InfluxDB, Grafana
- Anpassung der Lastgänge auf eine 30-minütige Auflösung → zeit- und energierichtig
- Lastgänge dienen als Standardlastgänge stellvertretend für andere Geräte dieser Kategorien:
 - Waschmaschine
 - Backofen Umluft
 - Laden eines 5 Akkus
 - Geschirrspüler
 - Poolpumpe (5)
 - Staubsauger (, 0,5)
 - Trockner (1,5)
 - Laden eines Laptops



Optimierungsalgorithmus



Optimierungsalgorithmus

Voraussetzung für den Optimierungsalgorithmus:

- Parallelbetrieb von Verbrauchern
- Nutzerspezifisches Verhalten → Aufladen muss bis 12:00 Uhr abgeschlossen sein
→ Waschmaschine kann erst ab 17:00 Uhr gestartet werden
- Eingespeiste Energie aus wirtschaftlicher Sicht nicht gleichwertig mit bezogener Energie

$$\sum_{math.} \dot{v} - 3 \text{ kWh}_{bezogen} + 3 \text{ kWh}_{eingespeist} = 0$$

$$\sum_{wirt.} \dot{v} - 3 \text{ kWh}_{bezogen} \cdot 0,40 \frac{\text{€}}{\text{kWh}_{bezogen}} + 3 \text{ kWh}_{eingespeist} \cdot 0,08 \frac{\text{€}}{\text{kWh}_{eingespeist}} = - 0,96 \text{ €}$$



Optimierungsalgorithmus

Problemformalisierung:

$$\max_{\vec{t} \in \mathbb{Z}^*} F(\vec{t}), \text{ wenn } F(\vec{t}) = \sum_{i=1}^{48} w_i \cdot e(i, \vec{t})$$

mit:

unter

Berücksichtigung von:



Optimierungsalgorithmus

Optimierungsprozess:

- Basierend auf dem Enumerationsverfahren (robustes Verfahren)
- Abhängig von der Anzahl der Verbraucher und den Nebenbedingungen
- Sicherheit zum Auffinden des globalen Maximums, da Berechnung aller möglichen Varianten
- Aufgrund von Basisrechenoperationen ist der Prozess nicht rechenaufwendig und in jede Programmiersprache übertragbar



Erstellung des Softwaretools



Erstellung des Softwaretools

Anwendungsentwicklung:

- Aufgrund des Projektziels → plattformübergreifende Anwendungsentwicklung
- Verwendete Programmiersprache – „*Python*“
- Nach Prüfung verschiedener Kriterien → BeeWare-Framework

Resultat:

- PV-Prognose, Lastgänge und Optimierungsprozess erfolgreich in Software implementiert
- Lauffähige Software für die Plattformen „*Windows*“ und „*MacOS*“



Erstellung des Softwaretools

Anwendungsentwicklung:

- Aufgrund des Projektziels → plattformübergreifende Anwendungsentwicklung
- Verwendete Programmiersprache – „Python“
- Nach Prüfung verschiedener Kriterien → BeeWare-Framework

Resultat:

- PV-Prognose, Lastgänge und Optimierungsprozess erfolgreich in Software implementiert
- Lauffähige Software für die Plattformen „Windows“ und „MacOS“

komplexes, abstraktes Thema → gerne spezifische Fragen



Potenzialanalyse des Programms



Potenzialanalyse des Programms

Erstellung eines festen Verbraucherszenarios:

- Montag: Grundlast (100 W), Poolpumpe (5 h durchgängig), Geschirrspüler
- Dienstag: Grundlast (100 W), Poolpumpe (5 h durchgängig), Waschmaschine
- Mittwoch: Grundlast (100 W), Poolpumpe (5 h durchgängig), Staubsaugen (1 h), Laptop laden
- Donnerstag: Grundlast (100 W), Poolpumpe (5 h durchgängig), Geschirrspüler
- Freitag: Grundlast (100 W), Poolpumpe (5 h durchgängig), Werkzeug-Akku laden, Laptop laden
- Samstag: Grundlast (100 W), Poolpumpe (5 h durchgängig), Waschmaschine, Backofen (1 h)
- Sonntag: Grundlast (100 W), Poolpumpe (5 h durchgängig), Staubsaugen (1 h), Laptop laden

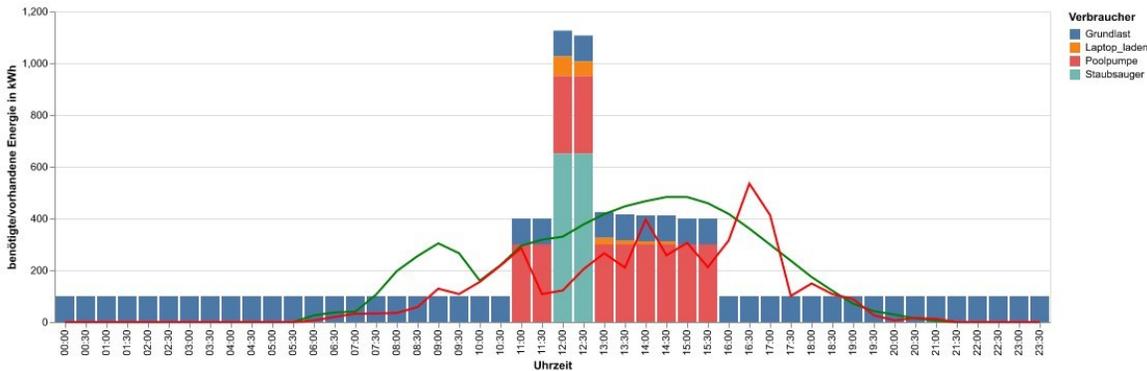


Potenzialanalyse des Programms

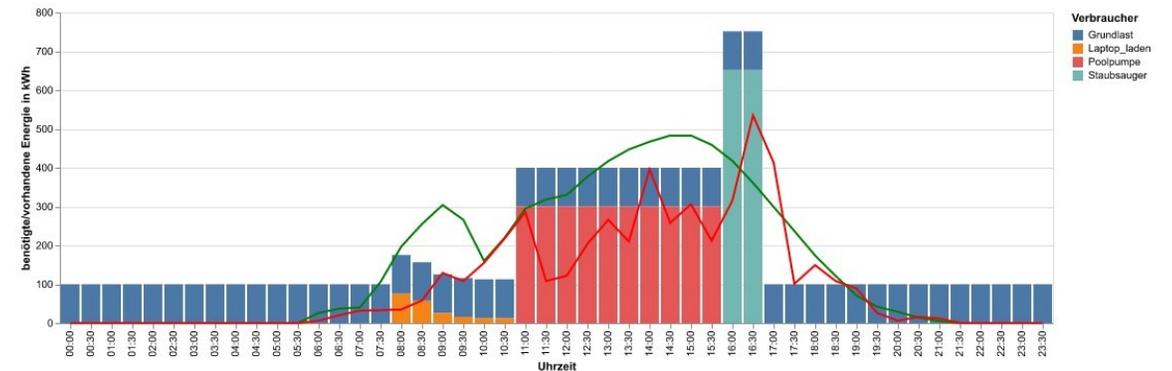
- 60 Tage Verwendung der PV-Anlage Süd
- Prognose → Optimierung → Berechnung
- Ermittelt: eingespeiste und bezogene Energie
- Vergleich mit intuitivem Betrieb
(alle Geräte werden gegen 12:00 Uhr betrieben)

Ausschnitt aus der Ergebnistabelle der Potenzialanalyse

Datum	Tag	Eingesp. E. opt. / kWh	Bez. E. opt. / kWh	Eingesp. E. int. / kWh	Bez. E. int. / kWh
06.06.2023	Di	0,1	3,3	0	3,2
07.06.2023	Mi	0,3	2,4	0,6	2,8
08.06.2023	Do	0,7	2,8	0,7	2,8
09.06.2023	Fr	1,8	1,5	1,6	1,4
10.06.2023	Sa	0,5	3,2	0,7	3,4



Potenzialanalyse – Ergebnis des intuitiven Betriebs am 07.06.2023
(grüne Funktion – Leistungsprognose, rote Funktion – reale PV-Leistung)



Potenzialanalyse – Ergebnis des optimalen Betriebs am 07.06.2023
(grüne Funktion – Leistungsprognose, rote Funktion – reale PV-Leistung)



Potenzialanalyse des Programms

Resultat:

Ergebnis der Summe der Potenzialanalyse aller 60 Testtage

	Eingespeiste Energie in optimiertem Szenario / kWh	Bezogene Energie in optimiertem Szenario / kWh	Eingespeiste Energie in intuitivem Szenario / kWh	Bezogene Energie in intuitivem Szenario / kWh
Anlage Nr. 1	39,2 (-9,7 %)	149,5 (-2,8 %)	43,4	153,8

- Ergebnis der Potenzialanalyse zunächst ernüchternd
- Wirtschaftliche Ersparnis über ein Jahr bei einem Stromarbeitspreis von 0,40 bei etwa 10
- Reduzierung der ins Netz eingespeisten Energie über ein Jahr um etwa 25

Mögliche Ursachen:

- Testanlage mit reiner Südausrichtung → intuitiver Verbraucherbetrieb sehr geeignet
- Qualitativ durchwachsene PV-Prognose → Steigerung der Genauigkeit = Steigerung des Potenzials
- Energetisch geringe Verbraucher und geringe Anlagengröße



Zusammenfassung und Ausblick



Zusammenfassung & Ausblick

- Prognosemodelle wurden entwickelt, verglichen und bezogen auf den Zweck ausgewertet
- Lastprofile wurden untersucht, aufgenommen und in der Software hinterlegt
- Funktionsfähiger numerischer Optimierungsprozess wurde erstellt
- Auf mehreren Plattformen ausführbare Software zur Optimierung des Eigenverbrauchs besteht
- Potenzial der Software wurde untersucht und die positiven Auswirkungen wurden bewiesen



Zusammenfassung & Ausblick

Ausstehend:

- Vertiefende Studien zum Potenzial der Software
→ Szenarien, PV-Systeme, Anlagengrößen, Umweltbedingungen
- Weiterentwicklung des Programms (mehr Plattformen, Einbindung von Smarthome-Geräten)
- Steigerung der Prognosegenauigkeit durch Weiterentwicklung der Modelle (generelles Forschungsthema)



Fragen...?



Ende

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**