

TECHNISCHE AUSWIRKUNG VARIABLER NETZENTGELTE

Eine Simulationsstudie für verschiedene Kundengruppen

TECHNISCHE AUSWIRKUNG VARIABLER NETZENTGELTE

Eine Simulationsstudie für verschiedene Kundengruppen

Arne Surmann

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Datum: 05.05.2023

Im Auftrag von Creos Luxembourg S.A.

Hinweis: Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Inhalt

1	Executive Summary	4
2	Einleitung und Ziel	5
3	Methodik und Annahmen	6
3.1	Haushaltslasten	6
3.2	Gewerbe Handel Dienstleistungslasten (GHD).....	6
3.3	Profile für PV-Anlagen	7
3.4	Profile für Elektroautos	7
3.5	Profile für Wärmepumpen	8
3.6	Energiemanagementsystem (EMS)	8
3.7	Betrachtete Szenarien.....	9
4	Ergebnisse	11
4.1	Die Ausgangslasten	11
4.2	Lastverteilung im Tagesdurchschnitt	13
4.3	Spitzenlast und Jahresdauerlinie	15
5	Abschließende Bewertung	17
6	Literaturverzeichnis	18
7	Anhang	19

1 Executive Summary

In der hier vorliegenden Studie wurde untersucht, wie sich ein Energiemanagement auf das Energiesystem auswirkt, welches auf verschiedene Preissignale eines variablen Netzentgelts reagiert.

Dazu wurden mit dem Simulationstool **synPRO** 15-minütlich aufgelöste Jahreslastzeitreihen für Gewerbe- und Haushaltskunden erzeugt. Für die Haushaltslasten wurden ergänzend Lastprofile für Wärmepumpen und E-Fahrzeuge erzeugt.

Das variable Netzentgelt wurde so definiert, dass ein Verbrauch innerhalb des Zeitraums von 17:00-21:00 Uhr (Sperrzeitfenster) verteuert wird. Weiterhin wurde ein Leistungsband angenommen, oberhalb dessen Energieverbrauch teurer ausfällt. Generell gilt, je geringer die Spitzenleistung ausfällt, also je konstanter die Last, desto geringer die Teuerung durch Überschreiten des Leistungsbandes.

Für die Studie wurde ein Betriebsführungskonzept auf Basis einer **Optimierung** entwickelt, das den Strombezug von Wärmepumpen und Ladesäulen innerhalb des Zeitfensters 17:00-21:00 Uhr reduziert. Zusätzlich reduziert die Optimierung den Strombezug der Ladesäulen auf eine möglichst geringe Leistung.

Der ungesteuerte Fall, ein gesteuerter Fall, der lediglich das Sperrzeitfenster berücksichtigt (sperrzeitgesteuert), und ein vollgesteuerter Fall, der auch die generelle Leistungsreduktion berücksichtigt, werden gegenübergestellt.

Im **Ergebnis** können die folgenden Aussagen getroffen werden:

- Der ungesteuerte Fall hat die höchste Last im Sperrzeitfenster, was die Intention unterstreicht, in der Zeit zwischen 17:00 und 21:00 Uhr eine Sperrzeit einzuführen.
- Im rein sperrzeitgesteuerten Fall ist die Last während des Sperrzeitfensters deutlich reduziert, jedoch kommt es zu einer starken Überreaktion unmittelbar nach Ablauf des Sperrzeitraums.
- Ein sperrzeitgesteuerter Betrieb hebt in einigen Fällen den 85% Leistungsschwellwert an und reduziert diesen in keinem Szenario
- Im vollgesteuerten Fall ist die Laststreuung am geringsten, die Ausnutzung der PV-Energie am höchsten und der Effekt einer Überkompensation nach dem Sperrzeitfenster tritt nicht mehr auf.
- Ein vollgesteuerter Betrieb von Flexibilitätsoptionen reduziert die Jahreslastspitze kaum, die Leistungsgrenze, bei der 85% der Last unterhalb des Leistungswerts liegen, wird jedoch deutlich - in einer Größenordnung um 50% - reduziert.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich die folgende **Bewertung** ableiten:

- Der von Creos vorgestellte Tarif, welcher ein Hochpreisfenster von 17:00 bis 21:00 Uhr und ein Hochpreisfenster für Energieverbräuche oberhalb eines Leistungsbandes vorsieht, ist als zielführend einzustufen. Die Simulation bestätigt, dass eine deutliche Reduktion der Spitzenlasten durch die Steuerung flexibler Verbraucher eintreten kann.
- Vor allem der zweite Tarifbestandteil, die Bepreisung von Energie oberhalb einer definierten Leistung, erzeugt einen sinnvollen Anreiz für Lastreduktion.
- Ein Tarif, der lediglich eine Sperrzeit berücksichtigt, kann zu einer Überreaktion des Systems führen und einen kritischen Netzzustand herbeiführen, wenn sämtliche E-Fahrzeuge am Ende des Sperrzeitfensters simultan anfangen zu laden.

2 Einleitung und Ziel

Im Energiesystem der Zukunft ist ein erhöhtes Aufkommen von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen zu erwarten. Dies kann bei unkoordiniertem Betrieb der elektrischen Verbraucher zu kritischen Netzzuständen führen, zum Beispiel immer dann, wenn viele Elektroautos nach der Arbeit in einem Wohnviertel gleichzeitig an Wallboxen angeschlossen werden und mit voller Leistung laden. Vor diesem Hintergrund möchte Creos ein neues Netzentgeltsystem einführen, bei dem zwei Multiplikatoren zum Einsatz kommen, mit denen ein Basispreis verrechnet wird. Der erste Multiplikator soll in Zeiten mit erhöhtem Lastaufkommen (in dieser Studie 17:00 – 21:00) zu einer Teuerung der Stromkosten führen und stellt somit ein Preissignal dar Lasten in andere Zeiträume zu verschieben. Zusätzlich soll ein zweiter Multiplikator eingeführt werden, der Energieverbräuche oberhalb einer definierten Leistungsschwelle verteuert und so einen Anreiz zur Spitzenlastreduktion liefert.

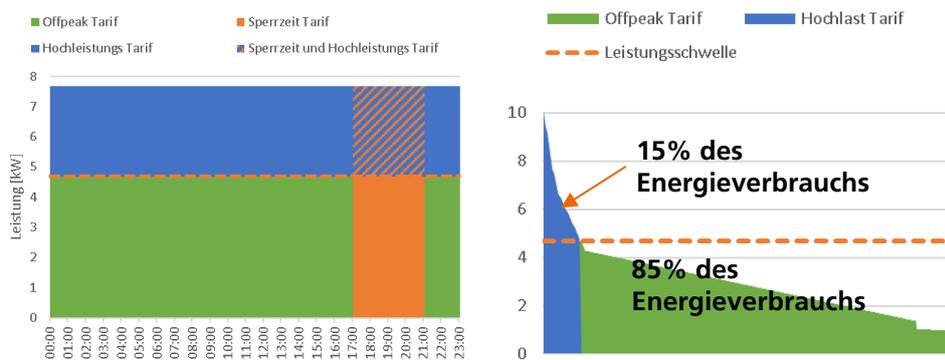


Abbildung 1 Links: Tarifzonen als farbige Flächen. Rechts Ermittlung des Leistungsbands im Hochlasttarif.

In der hier vorliegenden Studie wird gezeigt, welche technischen Auswirkungen ein solches Preissystem für verschiedene Kundengruppen mit verschiedenen Technologiepools mit sich bringt. Dazu wurden mit dem Lastprofilgenerator synPRO Jahreszeitreihen erzeugt und eine Steuerung entworfen, die basierend auf den von Creos vorgeschlagenen Tarifen die elektrischen Flexibilitätsressourcen (E-Auto und Wärmepumpe) optimiert. Es ergeben sich energetische Bilanzen auf deren Basis eine Entscheidung zur sozialen Verträglichkeit und zur Netzdienlichkeit eines solchen Preismodells getroffen werden können.

3 Methodik und Annahmen

Für die Studie wurden verschiedene Simulationen mit Hilfe des Fraunhofer Tools syn-PRO¹ gestartet.

3.1 Haushaltslasten

Es wurden fünf repräsentative sozioökonomische Haushaltskategorien simuliert.

- „**Familie**“: Ein Haushalt mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern
- „**Vollzeit Büro**“ Ein Haushalt mit zwei Erwachsenen, die im Büro arbeiten
- „**Vollzeit Home-Office**“: Ein Haushalt mit zwei Erwachsenen, die im Home-Office arbeiten
- „**Teilzeit Büro**“: Ein Haushalt mit zwei Erwachsenen, die in Teilzeit im Büro arbeiten
- „**Rentner**“: Ein alleinlebender Rentner

Eine Familie wurde gewählt, da diese klassische Haushaltskonfiguration weiterhin eine große Bevölkerungsgruppe darstellt. Die Kategorien Vollzeit Büro, Vollzeit Home-Office und Teilzeit wurden jeweils mit zwei Personen bestückt, um die Unterschiede verschiedener Berufskonstellationen abzubilden, ohne den Effekt der Personenanzahl gleichzeitig zu berücksichtigen. Die Kategorie Rentner zeigt schließlich den Unterschied zwischen einem Zwei- und Einpersonenhaushalt ohne regelmäßige Lohnarbeitstätigkeit.

Für die verschiedenen Haushaltskonfigurationen wurden jeweils 10 Simulationen gestartet, um eine stochastische Streuung abzubilden. Es wurden Jahressummenlastzeitreihen mit einer Auflösung von 15 Minuten für das Jahr 2022 für die Kategorien Strombedarf, Heizbedarf und Trinkwarmwasserbedarf erzeugt. Das zu Grunde liegende elektrische Modell ist in [1] beschrieben, das Modell für Heizung und Trinkwarmwasser in [2]. Zur Abbildung von Wettereinflüssen auf das Heizlastprofil wurde vom Deutschen Wetterdienst das Testreferenzjahr² für Trier gewählt, welches ein ähnliches Klima zu Luxemburg aufweist. Weiterhin wurden für das Heizlastprofil zwei verschiedene Gebäudestandards angenommen basierend auf durchschnittlichen Daten der Episcopo Studie für Deutschland (Tabula³). Der alte Isolationsstandard sorgt für einen durchschnittlichen Energieverbrauch von 80-100 kWh/m²a, der neue für einen Energieverbrauch von 20-25 kWh/m²a.

3.2 Gewerbe Handel Dienstleistungslasten (GHD)

Es wurden drei Datensätze für die folgenden GHD-Kategorien simuliert:

- „Restaurant“: Restaurant mit einer Fläche von 240m²
- „Verkauf“: Einkaufsladen mit einer Fläche von 880m²
- „Bürogebäude“: Bürogebäude mit einer Fläche von 1735m² (ca. 30 Gruppenbüroeinheiten)

¹ <https://synpro-lastprofile.de/>

² <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>

³ <https://episcopo.eu/building-typology/country/de/>

Die Simulationsannahmen beruhen auf den Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik des schweizerischen Ingenieurs und Architektenvereins¹, sowie der TEK2GO Studie des Institut Wohnen und Umwelt². Die Subaufteilung der Kategorien ist in der folgenden Tabelle gelistet.

Tabelle 1 Subzonen der GHD Kategorien Bürogebäude, Verkauf und Restaurant basierend auf TEK2GO und SIA

Bürogebäude [TEK2GO]		Verkauf [TEK2GO]		Restaurant [SIA]	
Einzel-, Gruppenbüro	62%	Fachgeschäft	91%	Restaurant	60%
Küche	1%	Einzel-, Gruppenbüro	9%	Einzel-, Gruppenbüro	5%
Verkehrsfläche	19%			Küche zu Restaurant	10%
Nebenraum	10%			Verkehrsfläche	10%
WC Bad Dusche	4%			Nebenraum	10%
Serverraum	4%			Garderobe, Dusche	5%

Für jede Kategorie wurden jeweils 10 Profile erzeugt, um eine gewisse Stochastik abzubilden. Die Gebäudeflächen wurden über die jeweils 10 Profile konstant gehalten.

3.3 Profile für PV-Anlagen

Es wurden zwei PV-Zeitreihen erzeugt für die folgenden Anlagengrößen

- „5 kWp“: 2 Stränge mit jeweils 9 Modulen (5,1 kWp), sowie ein Wechselrichter mit einer Nennleistung von 5 kW.
- „10 kWp“: 4 Stränge mit jeweils 8 Modulen (9,1 kWp), sowie ein Wechselrichter mit einer Nennleistung von 10,1 kW

Alle Module haben eine Neigung von 35% und eine Südausrichtung. Als Wetterdatensatz wurde dasselbe Testreferenzjahr verwendet wie in Abschnitt 3.1. Die Zeitreihen basieren auf realistischen Wechselrichter- und Modulsimulationen. Das verwendete Simulationstool ist in [4] erläutert.

3.4 Profile für Elektroautos

Zu jedem Haushalt wurden Elektrofahrzeuge simuliert. Die Fahrzeugnutzung basiert dabei auf der Mobilität in Deutschland Studie³. Es wurden zwei verschiedene Fahrzeugtypen angenommen mit unterschiedlichen Batteriegrößen (51 kWh und 80 kWh) und Verbräuchen. Als Ladeinfrastruktur stand in der Simulation pro Gebäude eine Wallbox mit maximal 11 kW Leistung zur Verfügung. Triphäufigkeit und Triplängen wurden zufällig innerhalb der verschiedenen Nutzerprofile erzeugt. Das zu Grunde liegende synPRO Elektromobilitätstool ist in [3] erläutert. Ein Mapping zwischen Elektromobilitätsdaten und Mobilitätsverhalten wurde gemäß der nachfolgenden Tabelle vorgenommen.

¹ <http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/sia%202024/d/2015/D/Product>

² <https://www.iwu.de/forschung/energie/tek2go/>

³ <https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/>

Haushaltskategorie	Mobilitätskategorie
Familie	Vollzeitarbeitende, zwei Erwachsene mit Kindern unter 14
Vollzeit Büro	Vollzeitarbeitende, zwei Erwachsene im Alter zwischen 30 und 60.
Vollzeit Home-Office	Arbeitslos*
Teilzeit Büro	Halbtagsarbeitende
Rentner	Rentner
* Die Kategorie Home-Office ist im Elektromobilitätsmodell nicht explizit abgebildet. Als Annäherung wurde „arbeitslos“ angenommen, da hier keine Trips zur Arbeitsstelle auftauchen.	

Den Haushalten einer sozioökonomischen Kategorie mit ungerader Nummerierung wurde jeweils ein einzelnes Elektroauto zugewiesen. Die verbliebenen 5 Haushalte erhielten zwei EVs. Dabei wurde ein einzelnes Auto jeweils doppelt verwendet, ein zweites Auto nur einfach zugeordnet. Haushalt Family_1 und Haushalt Family_2 haben so ein identisches Fahrprofil für das erste EV und Haushalt Family_2 besitzt ein zufälliges weiteres einmaliges E-Auto Profil. Durch diese Zuordnung ist ein Vergleich zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Haushalten möglich, um den Einfluss eines zweiten EVs exakter bestimmen zu können. Eine Ausnahme stellt die Kategorie Rentner da. Da hier nur eine Person angenommen wird, wurde 10 einzelne Autos zugeordnet.

3.5 Profile für Wärmepumpen

Wärmepumpen wurden für alle Haushalte basierend auf den Heizungs- und Trinkwarmwasser-Profilen simuliert. Dabei wurde als Quellmedium die Umgebungsluft verwendet. Das elektrische Profil des Heizsystems setzt sich in diesem Fall zusammen aus dem elektrischen Profil der Wärmepumpe und eines sekundären Heizsystems, eines elektrischen Heizstabs. Das System ist dabei so dimensioniert, dass die Wärmepumpe die Heizlast im Winter bei einer Bivalenztemperatur von 5-8°C vollständig decken kann und zusätzlicher Heizbedarf bei kälteren Temperaturen durch den Heizstab gedeckt wird. Für die beiden Energiesenken Heizung und Trinkwarmwasser steht jeweils ein Pufferspeicher zur Verfügung. Diese Pufferspeicher geben den energetischen Flexibilitätsrahmen vor. Der Heizungsspeicher ist dabei so dimensioniert, dass dieser in der Regel eine Pufferwirkung von 2h ermöglicht. In der Simulation wurden keine optimalen Systeme angenommen, sondern Systemdimensionierungen und Betriebseinstellungen, welche sich an real verbauten Systemen orientieren. Das Systemmodell ist in [4] beschrieben.

3.6 Energiemanagementsystem (EMS)

Um die Auswirkungen des neuen Tarifmodells zu testen, wurde ein Energiemanagementsystem entwickelt, welches Sperrzeiten berücksichtigen kann und Lastspitzen vermeidet. Als flexible Lasten stehen Wärmepumpen zur Verfügung sowie die Ladeinfrastruktur.

Der Flexibilitätsrahmen der **Wärmepumpe** wird technisch bestimmt durch die Leistung der Wärmepumpe sowie das thermische Speichervolumen von Heizungs- und

Trinkwarmwasserspeicher. Der Heizstab steht nicht für Flexibilitätseingriffe zur Verfügung, da dieser nur als zusätzliche Leistungssenke aktiviert werden könnte. Die Komfortanforderungen beschränken den Flexibilitätsrahmen insofern, als dass die Temperaturbänder der Speicher nicht verletzt werden dürfen. Eine Ausweitung der Temperaturhysterese wurde nicht zugelassen und auch das thermische Speicherpotential der Gebäudemasse wurde nicht aktiviert. Zur Steuerung der Wärmepumpe wird während der Sperrzeit von 17:00 – 21:00 der SG-Ready Betriebszustand 2¹ an das Wärmepumpensystem gesendet. Dieser Schaltbefehl lässt die Wärmepumpe so lange ausgeschaltet, wie die Speichertemperaturbänder nicht unterschritten werden. Eine Betriebsanpassung der Wärmepumpe außerhalb des Sperrzeitfensters wurde nicht simuliert. Der Flexibilitätsrahmen der **Ladeinfrastruktur** wird technisch bestimmt durch die minimal und maximal mögliche Ladeleistung. Als maximale Ladeleistung wurden 11 kW (3-Phasiges Laden mit 16 Ampere) gewählt, als minimale Ladeleistung 4,2 kW (3-Phasiges Laden mit 6 Ampere). Im Modell wurden Leistungsschritte von 100 Watt zugelassen. Die zur Verfügung stehende Energie wird durch die Batteriegrößen, sowie die Speicherfüllstände bei Ankunft der Elektroautos begrenzt. Bidirektionales Laden wurde nicht betrachtet. Jeder Parkvorgang eines EVs wird gesondert optimiert. Das bedeutet, dass Ladevorgänge nicht ausgesetzt werden können, um während eines späteren Parkvorgangs mehr Energie zu laden. Der Speicherfüllstand bei Abfahrt muss also im gesteuerten und ungesteuerten Fall identisch sein. Die Ladeheuristik ist wie folgt: Zunächst wird überprüft, ob genügend Energie außerhalb des gesetzten Sperrzeitfensters zur Verfügung steht. Ist dies nicht der Fall, so wird mit maximaler Leistung außerhalb des Sperrzeitfensters geladen und die verbliebene Energie wird innerhalb des Spitzenlastfensters mit minimal möglicher Ladeleistung, welche zur Erfüllung des Zielfüllstands benötigt wird, geladen. Dies beruht auf der Annahme, dass es günstiger ist mit hoher Leistung außerhalb des Sperrzeitfensters zu laden als mit niedriger Leistung innerhalb des Fensters. Steht außerhalb der Sperrzeit genügend Energie zum Laden des Autos zur Verfügung, so wird ausgehend von der geringsten Haushaltsresiduallast die Leistung so verteilt, dass insgesamt die geringste Last am Hausanschlusspunkt auftritt. Dieses Vorgehen verfolgt implizit auch eine Maximierung des PV-Anteils an der geladenen Energie. Für das EMS wird eine perfekte Vorhersage angenommen. Das sich so ergebende Ladeprofil bildet das maximal mögliche Flexibilitätspotential einer Ladesäule ab². Das reale Flexibilitätspotential reduziert sich mit der Prognosegüte der Residuallastzeitreihe. In Szenarien, bei denen Wärmepumpen und Ladeinfrastruktur zusammen optimiert werden, erfolgt zunächst die Optimierung der Wärmepumpe und anschließend die des EV-Ladevorgangs. Ein für die Optimierung entwickelte Controller kalkuliert basierend auf den verschiedenen Inputparametern einen optimalen Einsatzplan für Wärmepumpe und Ladeinfrastruktur. Controller und Simulation sind bei der Optimierung des Systems voneinander getrennt, so dass der Controller Signale an die Simulationsumgebung sendet, welche im Simulationsmodell umgesetzt werden. Die zu Grunde liegende Testumgebung für EMS ist in [6] erläutert.

3.7 Betrachtete Szenarien

Um die Frage zu beantworten, wie sich ein Tarifsystem mit Sperrzeitfenster und einer Bepreisung von Energiemengen oberhalb definierter Leistungsbänder technisch und ökonomisch auswirkt, wurden verschiedene Szenarien untersucht. Diese unterscheiden sich zum einen in der Steuerung von Wärmepumpen und Ladeinfrastruktur und zum

¹ Nähere Informationen zum SG-Ready Signal <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/sq-ready/>

² Bei Betrachtung gesonderter Parkereignisse. Werden mehrere Parkvorgänge gemeinsam betrachtet kann das Flexibilitätspotential weiter erhöht werden.

anderen in der Zusammensetzung des Anlagenpools. In diesem Bericht wird nur die technische Seite beleuchtet. Die ökonomische Auswertung erfolgte durch Creos. Die folgenden **Steuerungsszenarien** werden gegenübergestellt:

- **Ungesteuert:** Wärmepumpen laufen im wärmegeführten Betrieb in einer klassischen Hysterese Regelung. Elektroautos werden bei der Ankunft mit maximaler Leistung vollgeladen
- **Sperrzeitgesteuert:** Wärmepumpen und Ladesäulen werden, sofern möglich, während der Zeit von 17:00-21:00 ausgeschaltet.
- **Vollgesteuert:** Zusätzlich zum Szenario der Sperrzeit werden EVs so geladen, dass die Last am Hausanschlusspunkt verstätigt und damit so gering wie möglich wird.

Die drei Steuerungsszenarien können auf eine Reihe verschiedener Lastsimulationen angewendet werden. Die Konfigurationsdimensionen sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet und können teilweise miteinander kombiniert werden.

Tabelle 3 Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Last- und Erzeugungsprofile. Zellen mit einer grauen Fläche werden in ungesteuerten Aggregationen berücksichtigt, Zellen mit oranger Fläche in der Sperrzeitsteuerung und grüner Fläche in der Kombination aus Sperrzeit und Lastspitzenreduktion.

Kat.	Haushaltlasten			PV			Wärmepumpen			Ladesäule		
Variationen	Familie			Keine			Keine			Keine		
	Vollzeit Büro			Klein			Alt ungesteuert			Ungesteuert		
	Vollzeit HO			groß			Neu ungesteuert			Sperrzeit		
	Teilzeit Büro						Alt + Sperrzeit			Sperrzeit +		
	Rentner						Neu + Sperrzeit			Lastspitzen*		
Anz.	5	5	5	3	3	3	3	5	5	2	3	1
* Die auf Sperrzeiten und Lastspitzenreduktion gesteuerten E-Fahrzeuge wurden für sämtliche Kombinationsmöglichkeiten simuliert. Pro Haushaltskategorie ergeben sich so 15 individuelle Ladezeitreihen												

Aus der Kombination der Variationen ergeben sich pro Haushaltskategorie 60 verschiedene Residuallastzeitreihen, davon 18 ungesteuert, 27 Sperrzeit gesteuert und 15 Sperrzeit und Lastspitzen gesteuert. Für die 5 Haushaltskategorien mit jeweils 10 Profilen pro Kategorie ergeben sich damit 3000 verschiedene Residuallastzeitreihen. Hinzu kommen jeweils 10 Profile für Bürogebäude, Restaurants und Verkaufsstellen.

4 Ergebnisse

Der Ergebnissteil gliedert sich in drei Abschnitte:

- **Im ersten Abschnitt** werden die ungesteuerten Ausgangslasten analysiert mit Fokus auf dem Jahresenergieverbrauch und der Jahreslastspitze. Dies dient dazu einen Überblick über das generelle Potential zu erhalten, welches optimiert werden kann.
- **Im zweiten Abschnitt** wird die Lastverteilung im Tagesdurchschnitt analysiert für den ungesteuerten, sperrzeitgesteuerten und vollgesteuerten Betriebsfall. Hier liegt der Fokus darauf zu zeigen, wie eine Steuerung die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens bestimmter Lastspitzen zu verschiedenen Zeitpunkten verändert.
- **Im dritten Abschnitt** werden die Spitzenlasten aus Sicht der Kunden und des Netzbetreibers analysiert. Hier liegt der Fokus auf der Leistungsgrenze oberhalb derer Energie höher bepreist wird (vgl. Abbildung 1 rechts).

4.1 Die Ausgangslasten

In der Simulation wurden jeweils 10 Gebäude der Kategorie **Restaurant, Büro und Verkauf/Supermarkt** simuliert. Die Jahresenergiemengen fallen dabei im Vergleich zu den Haushaltlasten deutlich höher aus. Generell ist festzuhalten, dass es eine größere Streubreite innerhalb der Kategorie Gewerbe Handel Dienstleistungen gibt als im Haushaltsbereich. Bürogebäude schwanken von kleinen Startups, bis zu großen Gebäudekomplexen multinationaler Konzerne. Auch Verkaufsflächen können den Laden nebenan umfassen, den Supermarkt um die Ecke oder den Großhandel. Die zu Grunde liegenden Annahmen sind im Abschnitt 3.2 dargestellt.

Die Lastspitzen und Jahresenergieverbräuche (vgl. Abbildung 2) in der Kategorie Verkauf fallen mit durchschnittlich 33 kW bzw. 92 MWh am höchsten aus, gefolgt von der Kategorie Restaurant mit 9 kW bzw. 23 MWh. Das Bürogebäude hat eine Lastspitze von durchschnittlich 6 kW und verzeichnet einen Energieverbrauch von 18 MWh.

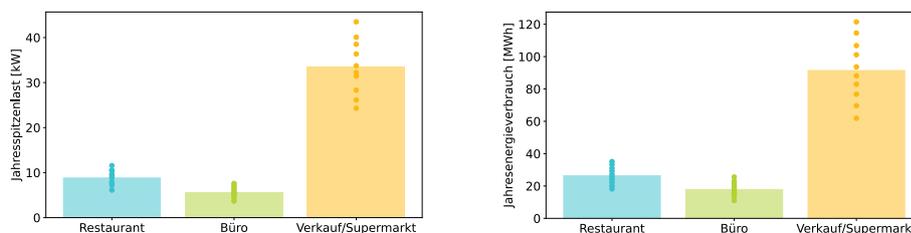


Abbildung 2 Jahresspitzenlast (links) und Jahresenergieverbrauch (rechts) der Kategorien „Restaurant“, „Büro“ und „Verkauf/Supermarkt“. Die Punkte stellen die einzelnen Werte dar, die Balken die Mittelwerte

Die Flexibilität im GHD-Bereich ist beschränkt. Gegebenenfalls können Wärmepumpen gesteuert werden oder eine Betriebsflotte zugehörig zu einem Bürogebäude, diese Szenarien sind jedoch nicht Teil dieser Studie, welche sich vor allem der Nutzergruppe der Haushaltskunden widmet.

Die **Haushaltskategorie** mit dem größten Jahresenergieverbrauch (vgl. Abbildung 3 unten) ist die Familie mit durchschnittlich 4175 kWh gefolgt von im Home-Office beschäftigten mit 2869 kWh, Teilzeitarbeitenden mit 2704 kWh und Vollzeitarbeitenden mit 2541 kWh. Ein alleinlebender Rentner kommt im Simulationspool auf durchschnittlich 1889 kWh Jahresenergieverbrauch. Wird die Wärme über eine Wärmepumpe bereitgestellt, erhöht sich der Energieverbrauch in einem Gebäude mit neuartiger Isolation um 2747 kWh für Vollzeitarbeitende und 2975 kWh für eine Familie bzw. in einem

Gebäude mit alter Isolation um 6735 kWh (Vollzeit) und 8570 kWh (Familie). Ein Elektroauto erhöht den Verbrauch um 1392 kWh (Durchschnitt Rentner) bzw. 3050 kWh (Durchschnitt Familie), wobei hier die individuelle Streuung sehr groß ist. Generell haben Rentner und im Home-Office Tätige eine geringe Elektroautonutzung als vollzeitarbeitende Bürobeschäftigte und Familien, jedoch ist auch innerhalb einer Haushaltskategorie die Streubreite sehr groß, je nach persönlichem Mobilitätsverhalten. Die Jahresenergieverbräuche beziehen sich auf ein Fahrzeug pro Haushalt. Hat ein Haushalt zwei Fahrzeuge, so steigt der Jahresenergieverbrauch entsprechend. Dabei wurden die beiden Fahrzeuge und das Mobilitätsverhalten der Nutzenden als voneinander unabhängig angenommen.

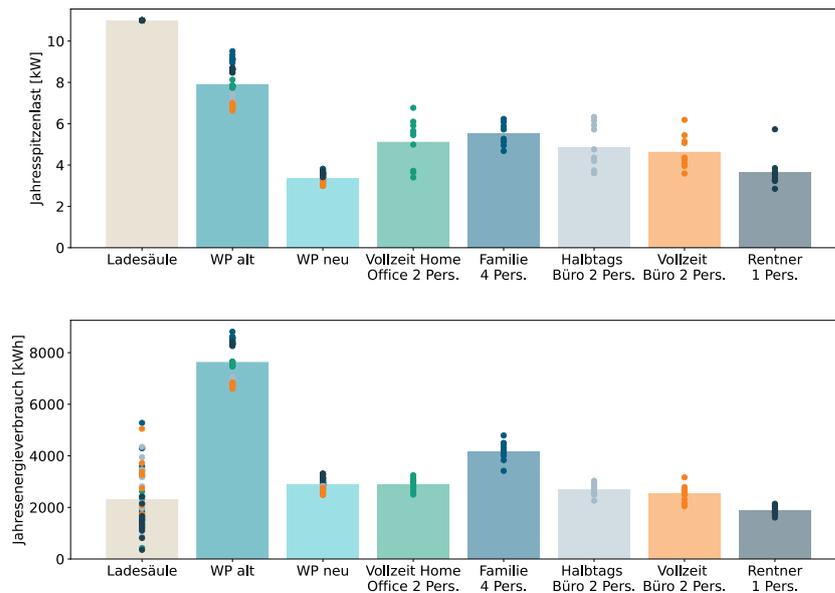


Abbildung 3 Jahresspitzenlast (oben) und Jahresenergieverbrauch (unten) der Haushaltslasten und zugehörigen Wärmepumpen bzw. Ladesäulen. Die Punkte stellen die einzelnen Werte dar, die Balken die Mittelwerte. Bei Ladesäulen und Wärmepumpen (WP) entspricht die Farbzuordnung der Punkte der jeweils zugehörigen Haushaltskategorie.

Die größte Lastspitze ist auf Ladesäulen bzw. Wallboxen zurückzuführen. Eine etablierte Größe ist mit 11 kW Anschlussleistung für die Simulation angenommen. Die elektrische Wärmepumpenleistung schwankt um 8 kW (Altbau) bzw. 3 kW (Neubau). Haushaltslastspitzen liegen im Bereich zwischen 3 und 7 kW.

Kernaussagen	<ul style="list-style-type: none"> Die Kategorie Gewerbe Handel und Dienstleistungen weist einen höheren Energieverbrauch auf als Haushaltslasten ist aber schwierig generell zu beurteilen, da die Variationsmöglichkeiten innerhalb der Subkategorien deutlich größer ausfallen. Der Energieverbrauch der Haushaltslasten schwankt zwischen 1900 kWh für einen einzelnen Rentner und 4200 kWh für eine vierköpfige Familie. Wärmepumpen im Altbau verbrauchen mit 7700 kWh in der Simulation etwa 2,6-mal so viel Energie wie im Neubau. Hier ist die Streubreite im Feld fließend, in der Simulation wurden zwei Isolationsklassen angenommen E-Autos weisen die größte Streuung auf abhängig vom Mobilitätsverhalten. Tendenziell haben Rentner und im Home-Office beschäftigte einen geringeren Energieverbrauch als im Büro arbeitende und Familien.
---------------------	--

4.2 Lastverteilung im Tagesdurchschnitt

Um die Auswirkung von ungesteuertem, sperrzeitgesteuertem und vollgesteuertem Laden auf den Tageslastgang zu vergleichen wurden alle zur Verfügung stehenden Daten des jeweiligen Kontrollmodus ausgewertet. Zunächst wurden die Summenlasten pro Haushalts- und Technologiepool gebildet. Für das Szenario „vollgesteuert“ des ersten Haushalts der Kategorie Familie, mit altem Gebäudeisolationsstandart einer Sperrzeitgesteuerten Wärmepumpe, einer kleinen PV-Anlage und einem vollgesteuerten Elektroauto wurden beispielsweise all diese Lasten aggregiert. Die PV-Anlage wurde in der Aggregation nicht verwendet, da diese die Boxplots einer Kategorie mit und ohne PV-Anlage stark verzerrt. Die Auswirkung der PV-Energie ist jedoch in der entsprechenden Ladesäulenzitreihe zu finden. Die sich ergebene aggregierte Jahreslastzeitreihe wurde pro Stunde zusammengefasst und anschließend normiert auf die Gesamtlast. Dies stellt sicher, dass auch Haushalte mit großen Jahresenergie differenzen qualitativ verglichen werden können. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Anschaulichkeit halber wurde die mittlere PV-Leistung als gelbe Fläche hinterlegt (skaliert, so dass der höchste Leistungswert, der durchschnittlichen Tagesspitzenlast entspricht), sowie die Sperrzeit als graue Fläche.

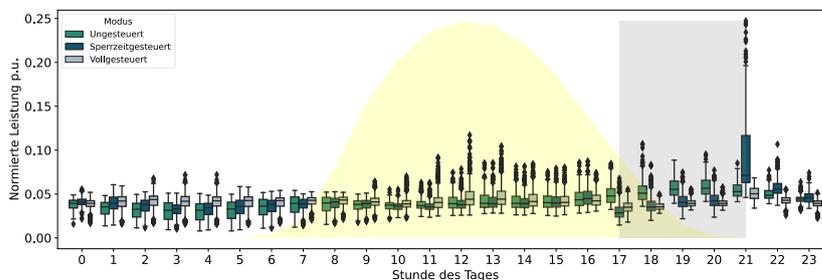


Abbildung 4 Boxplot der Tageslastverteilung für den ungesteuerten, sperrzeitgesteuerten und vollgesteuerten Betrieb. Dargestellt sind die normierten Werte pro Stunde. Es wurden alle Lasten der jeweiligen Szenarien aggregiert für sämtliche Personengruppen und Technologiekombinationen. Um eine qualitative Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die jeweiligen Mittleren Lasten auf die durchschnittliche Tagessummenlast normiert. Die gelbe Fläche stellt das PV-Zeitfenster dar, die graue Fläche markiert den Sperrzeitraum.

Aus dem Boxplot lässt sich erkennen, dass sowohl der sperrzeitgesteuerte als auch der vollgesteuerte Betrieb die Last während des Sperrzeitfensters von 17:00 bis 21:00 reduziert. Im Falle der **Berücksichtigung des reinen Spitzenlastfensters** ohne zusätzliches Ziel der allgemeinen Lastspitzenreduktion fällt jedoch eine **starke Ausprägung der Tagesdurchschnittslast um 22:00** auf. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass nach Abklingen des Sperrzeitfensters Ladesäulen gleichzeitig mit dem Laden der EVs beginnen. Der Effekt ist in Abbildung 5 links detailliert dargestellt. Die Auswirkung von Wärmepumpen auf die Reduktion der Lasten im Sperrzeitfensters fällt gering aus. In Abbildung 5 rechts ist zu sehen, dass nach Anlegen eines Ausschaltsignals eine deutliche Lastreduktion um 17:00 eintritt, die Last jedoch nach 1-2h wieder steigt. Diese Ausprägung hat zwei Effekte. Zunächst sind einige Wärmepumpen im Normalbetrieb sowieso ausgeschaltet, wenn das Sperrsignal eintritt. Daher reagieren im Schnitt, je nach Saison, etwa 50% der Wärmepumpen mit einer Unterbrechung des Betriebs. Zum anderen ist die maximale Sperrzeit der Wärmepumpen durch die thermischen Pufferspeicher auf ca. 2h begrenzt (auch hier wieder abhängig von der aktuellen Jahreszeit).

Weiterhin lässt sich in Abbildung 4 für den **vollgesteuerten** Verlauf feststellen, dass die **Lastschwankung geringer ausfällt** (die Boxen sind kleiner und die Anzahl an Ausreißern geringer). Dieser Effekt ist in Abbildung 6 links gesondert zu sehen für die absolute Tageslastverteilung über alle vollgesteuerten Szenarien hinweg. Neben der Verstetigung der Last sorgt die vollgesteuerte Optimierung implizit auch für eine

Bevorzugung der PV-Leistung, da zu diesen Zeitpunkten, die sich ergebene Lastspitze am Haushaltspunkt gering ist, auch wenn große Ladeleistungen als Sollwert gesetzt werden. Dieser Effekt wird in der Gesamtdarstellung (Abbildung 4) dadurch gemindert, dass nur ein Teil der Szenarien mit PV ausgestattet ist. Der Effekt äußert sich in einer Häufung von Ausreißern über die Mittagszeit. Für ein ausgewähltes Szenario mit großer PV-Anlage (siehe Abbildung 6 rechts) ist der Effekt ausgeprägt zu erkennen. Individuelle Effekte für alle Szenarien sind im Anhang Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

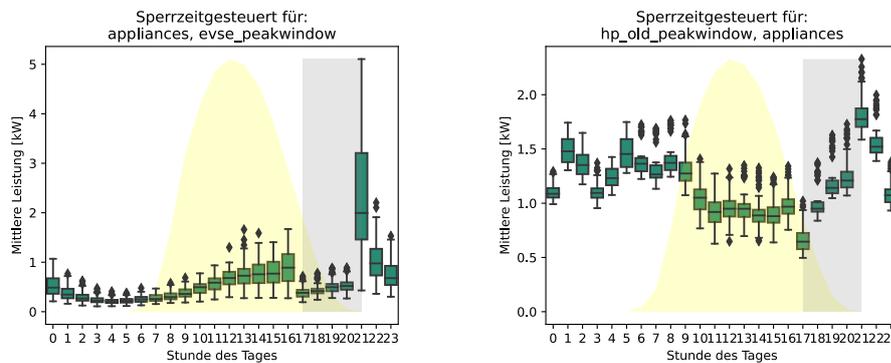


Abbildung 5 Boxplot der Tageslastverteilung für eine Steuerung mit Fokus auf Vermeidung des Sperrzeitfensters. Links für die Aggregierte Last aus Ladesäule und Haushaltslasten, rechts für die Aggregation aus Wärmepumpe (im Altbau) und Haushaltslasten. Es sind absolute mittlere Leistungen dargestellt basierend auf jeweils 50 Jahresdatensätzen.

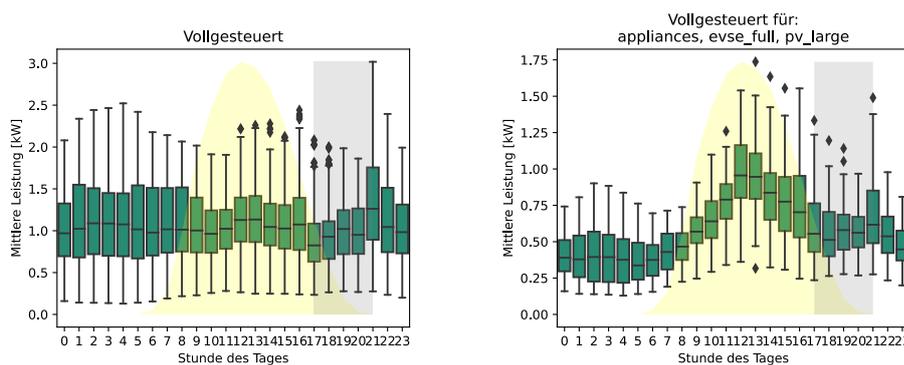


Abbildung 6 Boxplot der Tageslastverteilung für eine Steuerung zur Reduktion der Gesamt. Links für die Gesamtheit aller vollgesteuerten Szenarien, rechts für die Aggregation Ladesäule und Haushaltslasten mit PV-Anlage.

Kernaussagen	<ul style="list-style-type: none"> • Der ungesteuerte Fall hat die höchste Last im Sperrzeitfenster, was die Intention unterstreicht, in der Zeit zwischen 17:00 und 21:00 Uhr eine Sperrzeit einzuführen • Im rein sperrzeitgesteuerten Fall ist die Last während des Sperrzeitfensters deutlich reduziert, jedoch kommt es zu einer starken Überreaktion unmittelbar nach Ablauf des Sperrzeitraums. • Im vollgesteuerten Fall ist die Laststreuung am geringsten, die Ausnutzung der PV-Energie am höchsten und der Effekt einer Überkompensation nach dem Sperrzeitfenster tritt nicht mehr auf.
---------------------	---

4.3 Spitzenlast und Jahresdauerlinie

In diesem Abschnitt wird der spitzenlastmindernde Effekt der Optimierung näher beleuchtet. Das größte Optimierungspotential ist durch das Elektroauto gegeben. Hier ist das Reduktionspotential vor Allem vom Mobilitätsverhalten der Nutzenden abhängig. In Abbildung 7 links ist ein Ladevorgang für das Elektroauto eines Rentners zu sehen. Die in grau markierte Fläche zeigt die Sperrzeit an, die grüne Linie entspricht der Residuallastzeitreihe welche als Inputsignal für die Steuerung dient. Man erkennt, dass die Sperrzeitsteuerung (dunkelblau) nach 21:00 mit voller Leistung lädt, bis die Batterie vollgeladen ist. Der vollgesteuerte Betrieb (hellblau) verschiebt hingegen die Ladeleistung bis zum nächsten Tag, an dem das Auto weiterhin geparkt ist, um dann ein Maximum an PV-Leistung zu verwenden. In Abbildung 7 rechts ist ein typisches Mobilitätsverhalten der Kategorie Vollzeit- Büroarbeitende zu sehen. Es fällt auf, dass die Mehrzahl an Ladevorgängen während der Nachtstunden stattfindet, dadurch gegeben, dass die Elektroautos während der sonnenreichen Tageszeit an der Arbeitsstelle parken. Auch in diesem Fall wird die Ladeleistung in Zeiträume minimaler Leistung verschoben und die Last mehr als halbiert, jedoch ist das Flexibilitätspotential deutlich geringer.

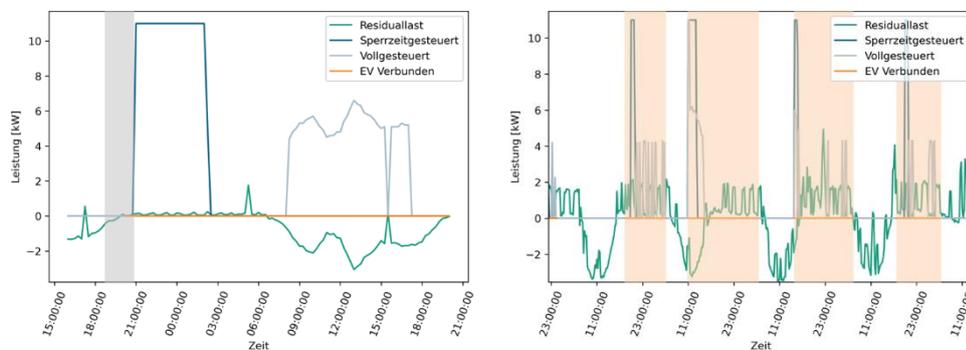


Abbildung 7 Auswahl repräsentativer Zeitfenster für gesteuerte Ladevorgänge. Links ein Ladevorgang eines Rentners, rechts das typische Ladepotential einer vollzeitarbeitenden Person. Die orangenen Bereiche stellen die Parkzeiten dar, der graue Bereich im linken Bild das Sperrzeitfenster.

Die Auswirkungen eines Hochtarifs für Energie oberhalb einer definierten Leistungsgrenze sind in Abbildung 8 dargestellt. Es werden drei Haushalte beleuchtet, Familie, Vollzeit (Büro) und Rentner, jeweils mit Technologiedurchdringungen von EV über PV + EV bis zum vollen Technologiemit PV + EV + WP. Alle Haushalte haben genau ein EV. Dargestellt ist ein Ausschnitt der Jahresdauerlinien für die 1000 Stunden im Jahr mit der höchsten Residuallast. Unterhalb der Jahresdauerlinien sind jeweils die Spitzenlastwerte und die Leistungsgrenzwerte, bei denen 85% der Energie unterhalb der Leistung liegen, gelistet. Es fällt auf, dass über alle Szenarien hinweg der sperrzeitgesteuerte Betrieb in etwa dieselbe Spitzenlast aufweist wie der ungesteuerte Betrieb. Die 85% Leistungsgrenze fällt in diesem Fall sogar höher aus als im ungesteuerten Betrieb. Dies unterstützt die Aussage des vorherigen Kapitels, dass eine reine Sperrzeitsteuerung zu einer Erhöhung der Last führt, sich das Hochlastzeitfenster lediglich nach hinten verschiebt. Der vollgesteuerte Betrieb reduziert die Jahreslastspitze geringfügig, wobei hier vor Allem stochastische Effekten zum Tragen kommen. Wenn der Zeitraum in dem ein Elektroauto, aufgrund der kurze eines Parkvorgangs, mit voller Leistung geladen werden muss zufällig mit einem Zeitraum hoher Haushaltslasten und ggf. einer Wärmepumpenlaufzeit übereinstimmt, so bleibt die Jahreslastspitze unverändert. Der vorgeschlagene Tarif berücksichtigt jedoch nicht die Jahreslastspitze, sondern einen 85% Leistungsschwellwert. Beim Blick auf diesen Schwellwert führt der vollgesteuerte Betrieb zu einer deutliche Reduktion. Im Fall des Rentners mit E-Auto und PV-Anlage kann die 85% Leistungsschwelle um 64% reduziert werden. Im Falle der Familie sind bei gleichem Technologiemit 55% und im Falle der Vollzeitarbeitenden 27% Reduktion möglich. Auffällig ist, dass das Szenario mit EV aber ohne PV-Anlage gegenüber dem

Szenario mit EV und großer PV-Anlage eine geringere 85%-Leistungsschwelle aufweist. Dies ist dadurch zu erklären, dass insgesamt weniger Energie bezogen wird. Der Lastreduktionseffekt durch gesteuertes Laden ist zwar größer, jedoch werden auch die kleinen Lasten zu Zeitpunkten zu denen nicht geladen wird reduziert bzw. vollständig kompensiert, so dass der Leistungsschwellwert, welche keine negativen Lasten berücksichtigt, gehoben wird. In der Bilanz fällt das Netzentgelt im Falle mit PV-Anlage daher trotzdem geringer aus, da absolut gesehen weniger Energie oberhalb der Schwelle liegt. Der Einfluss der PV-Energie auf die Jahresdauerlinie ist im Anhang in Abbildung 12 dargestellt.

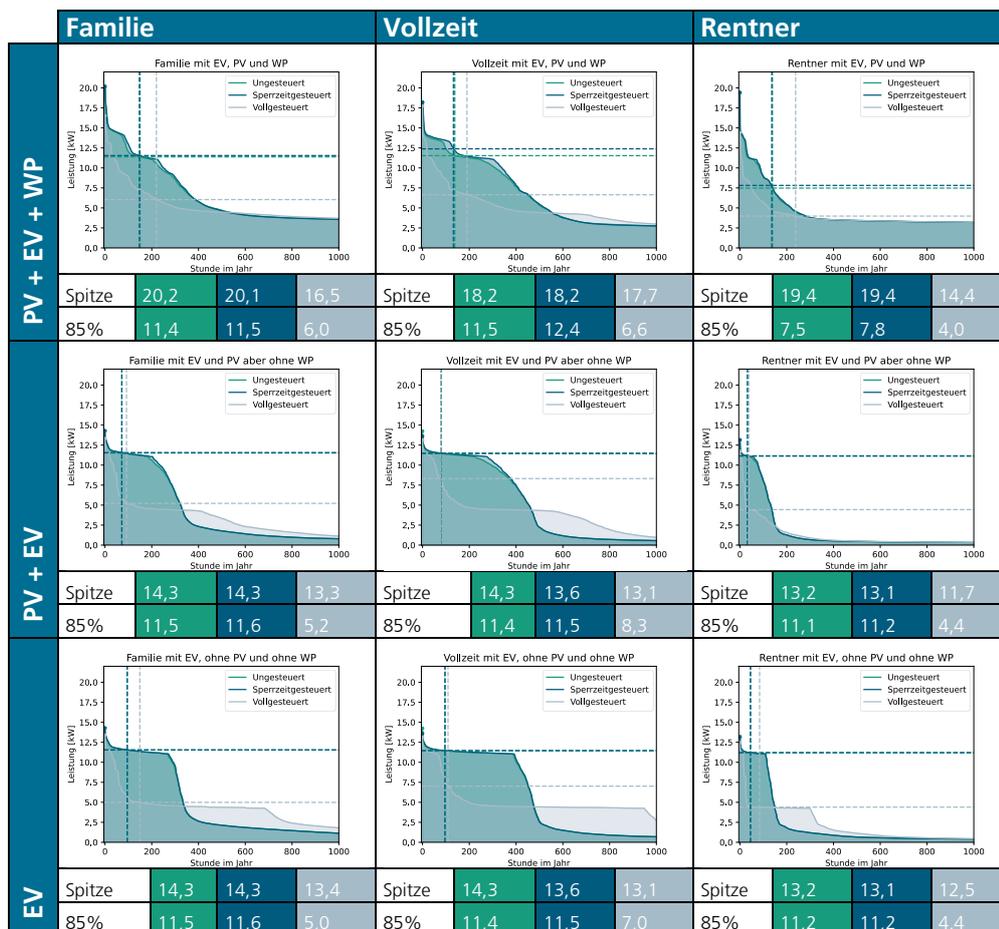


Abbildung 8 Jahresdauerlinien dreier ausgewählter Haushalte mit verschiedenen Technologiepools für den ungesteuerten, sperrzeitgesteuerten und vollgesteuerten Betrieb. Es sind die 1000h mit der größten Leistung im Jahr dargestellt. Ein Pendant mit vollständiger Jahresdauerlinie ist in Abbildung 12 zu finden. Die horizontalen Linien markieren jeweils die Leistung unterhalb derer 85% des Jahresenergieverbrauchs liegen, die vertikalen Linien markieren die Anzahl der Stunden im Jahr an denen das 85% Leistungsband überschritten wird. Unter den jeweiligen Abbildungen ist die Jahresspitzenleistung sowie der 85% Leistungsschwellwert angegeben.

Kernaussagen	<ul style="list-style-type: none"> • Das Potential eines gesteuerten Elektroautos ist abhängig von Mobilitätsverhalten der Hauptnutzer*in. Steht das Fahrzeug tagsüber am Arbeitsplatz ist das Potential für gesteuertes Heimpladen gering. • Ein vollgesteuerter Betrieb von Flexibilitätsoptionen reduziert die Jahrelastspitze kaum, die 85% Leistungsgrenze wird jedoch deutlich - in einer Größenordnung um 50% - reduziert. • Ein sperrzeitgesteuerter Betrieb hebt in einigen Fällen den 85% Leistungsschwellwert an und reduziert diesen in keinem Szenario.
---------------------	---

5 Abschließende Bewertung

Aus den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ergebnissen können die folgenden Aussagen abgeleitet werden. Dabei ist zu beachten, dass all diese Aussagen nur auf Grundlage der Simulationsdaten getroffen wurden. In der Realität verhalten sich Systeme nicht optimal, vor Allem vor dem Hintergrund, dass eine perfekte Vorhersage in der Simulation vorausgesetzt wurde.¹

- Der von Creos vorgestellte Tarif, welcher ein Hochpreisfenster von 17:00 bis 21:00 Uhr und ein Hochpreisfenster für Energieverbräuche oberhalb eines Leistungsbandes vorsieht, ist als zielführend einzustufen. Die Simulation bestätigt, dass eine deutliche Reduktion der Spitzenlasten durch die Steuerung flexibler Verbraucher eintreten kann.
- Vor allem der zweite Tarifbestandteil, die Bepreisung von Energie oberhalb einer definierten Leistung, erzeugt einen sinnvollen Anreiz für Lastreduktion.
- Ein Tarif, der lediglich eine Sperrzeit berücksichtigt, kann zu einer Überreaktion des Systems führen und einen kritischen Netzzustand herbeiführen, wenn sämtliche E-Fahrzeuge am Ende des Sperrzeitfensters simultan anfangen zu laden. In diesem Fall wäre die Lastspitze nur zeitlich verlagert aber ggf. größer als im ungesteuerten Fall. Der Effekt einer Sperrzeit kann dennoch positiv sein, wenn durch stochastische Effekte (z.B. dadurch, dass nicht jedes Haus flexible Verbraucher besitzt, diese nicht gesteuert werden, oder diese bewusst anders optimiert werden) eine Verschiebung eines Teils der Last außerhalb der Sperrzeiten erfolgt. Eine sinnvolle Maßnahme könnte auch sein das Sperrzeitfenster dynamisch anpassbar zu machen und nachzuführen, wenn temporäre Netzengpässe abzusehen sind.
- Die wirtschaftlichen Auswirkungen für den Endverbraucher wurden in dieser Studie nicht beleuchtet, es zeigt sich jedoch, dass eine Optimierung, welche die Lastspitzen reduziert gleichzeitig auch eine Eigenverbrauchsmaximierung bewirkt, was in der Regel eine Stromkostenreduktion zur Folge hat. Weiterhin wurde gezeigt, dass die von Creos angedachte individuelle Leistungsgrenze unterhalb derer 85% des Energieverbrauchs fallen im vollgesteuerten Fall deutlich reduziert werden kann, was gleichbedeutend ist mit einer Reduktion der Kosten für den Endverbraucher.

¹ Das Fraunhofer ISE übernimmt keine Haftung für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Lasten im Feld.

6 Literaturverzeichnis

- [1] D. Fischer, A. Härtl und B. Wille-Hausmann, „Model for electric load profiles with high time resolution for German households,” *Energy and Buildings*, pp. 170-179, 2015.
- [2] D. Fischer, T. Wolf, J. Scherer und B. Wille-Hausmann, „A Stochastic Bottom-up Model for Space Heating and Domestic Hot Water Load Profiles for German Households,” *Energy and Buildings*, 2016.
- [3] W. F. Holmgren, C. W. Hansen und M. A. Mikofski, „pvlib python: a python package for modeling solar energy systems,” *Journal of Open Source Software*, Bd. 3, Nr. (29), 2018.
- [4] D. Fischer, A. Habrecht, A. Surmann und R. McKenna, „Electric vehicles' impacts on residential electric local profiles – A stochastic modelling approach considering socio-economic, behavioural and spatial factors,” *Applied Energy*, pp. 644-658, 2019.
- [5] D. Fischer, M.-A. Triebel und O. Selinger-Lutz, „A Concept for Controlling Heat Pump Pools Using the Smart Grid Ready Interface,” *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1-6, 2018.
- [6] B. Köpfer, A. Surmann und M. Resch, „Testumgebung für Energiemanagementsysteme in Quartieren und Verteilnetzen,” in *Tagung Zukünftige Stromnetze*, 2022.

Abbildung 9 Boxplots der vollgesteuerten Szenarien. Jeder Plot enthält jeweils 50 Jahresdatensätze. Es handelt sich um die mittleren absoluten Leistungen. Die gelbe Fläche zeigt das typische mittlere PV-Fenster an, skaliert, um den Boxplots zu entsprechen, die graue Fläche markiert die Spermzeiten

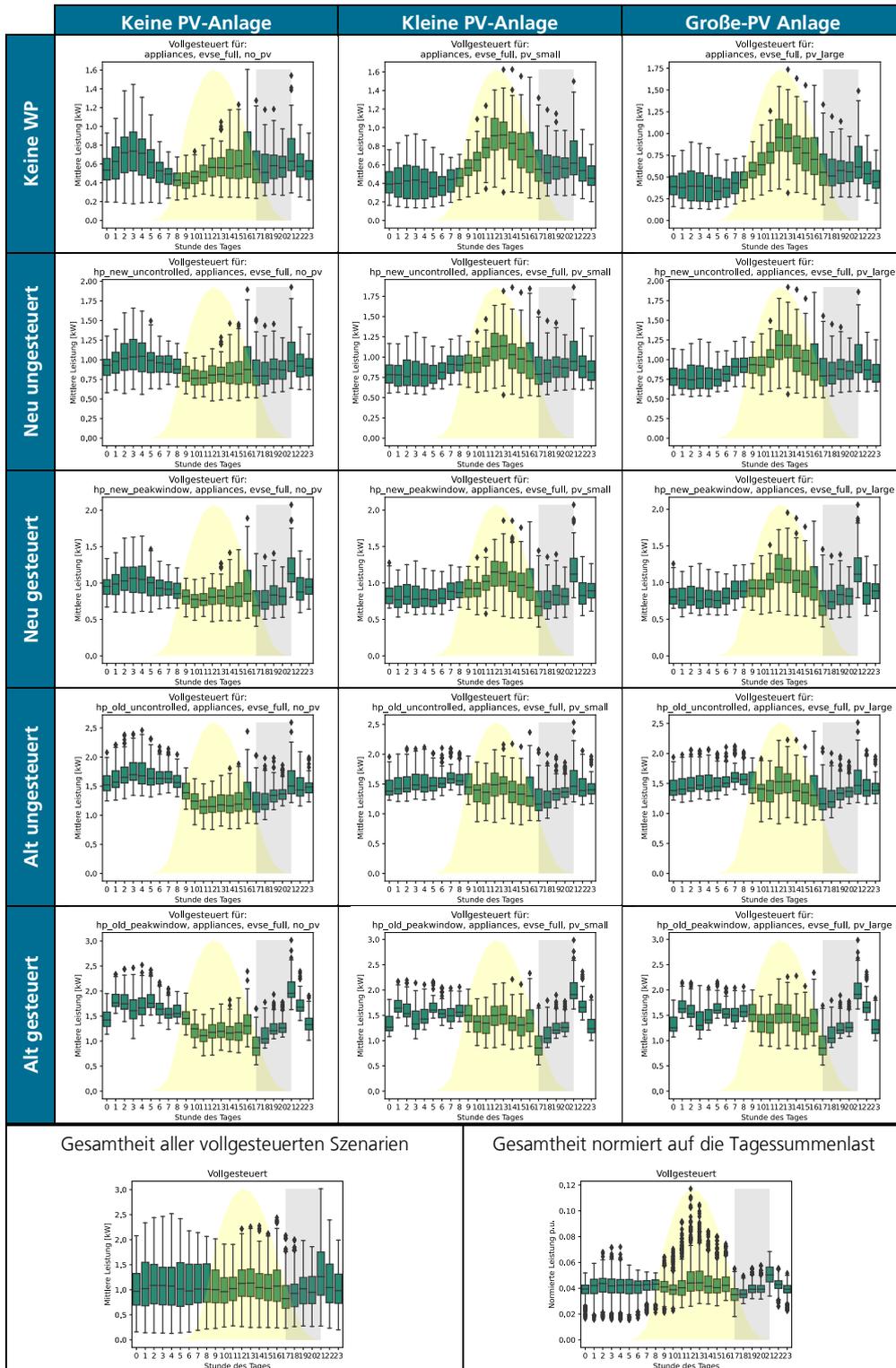


Abbildung 10 Boxplots der auf das Spitzenlastfenster gesteuerten Szenarien. Jeder Plot enthält jeweils 50 Jahresdatensätze. Es handelt sich um die mittleren absoluten Leistungen. Die gelbe Fläche zeigt das typische mittlere PV-Fenster an, skaliert, um den Boxplots zu entsprechen, die graue Fläche markiert die Sperrzeiten

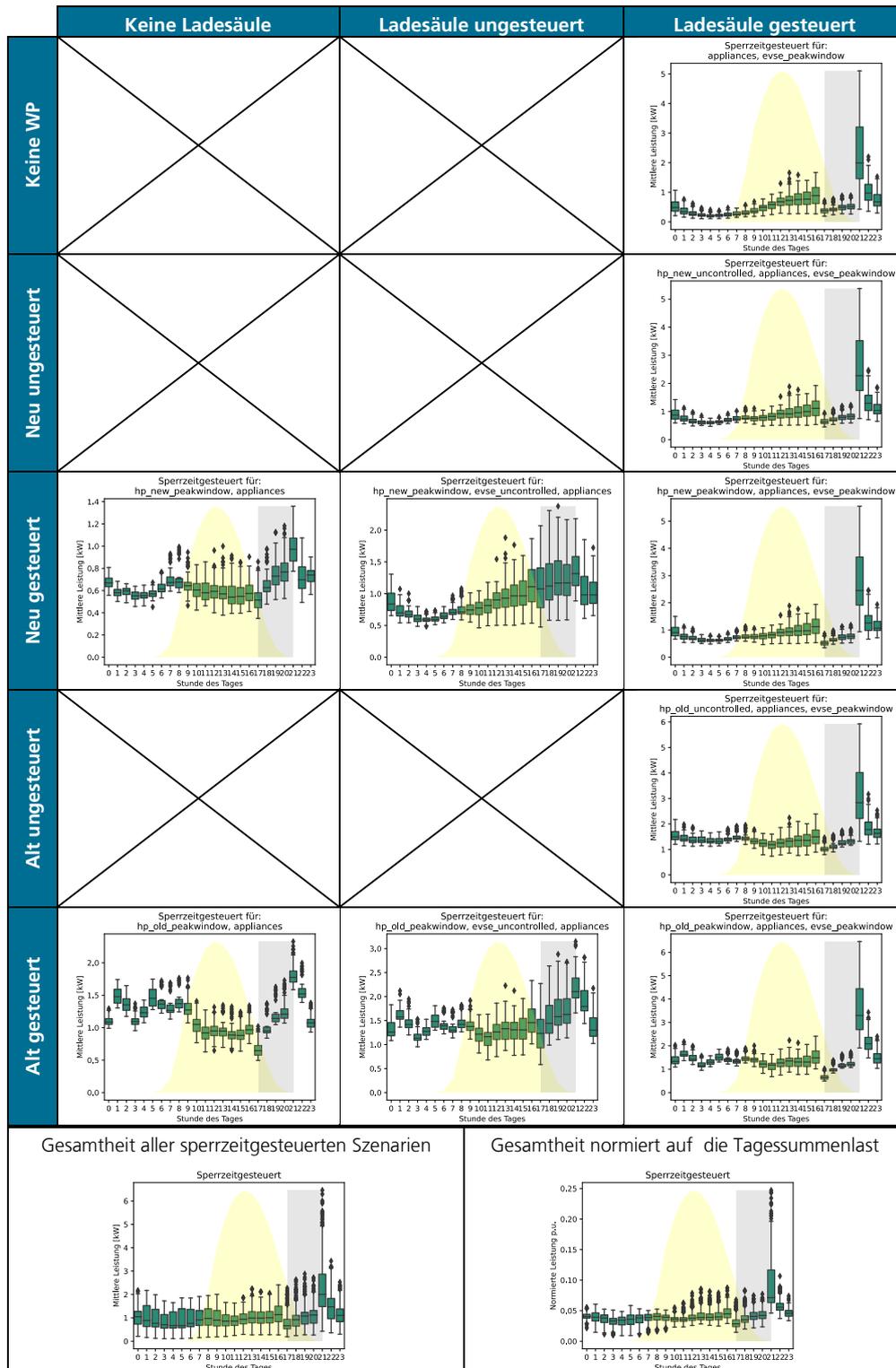


Abbildung 11 Boxplots der auf das Spitzenlastfenster gesteuerten Szenarien. Jeder Plot enthält jeweils 50 Jahresdatensätze. Es handelt sich um die mittleren absoluten Leistungen. Die gelbe Fläche zeigt das typische mittlere PV-Fenster an, skaliert, um den Boxplots zu entsprechen, die graue Fläche markiert die Sperrzeiten

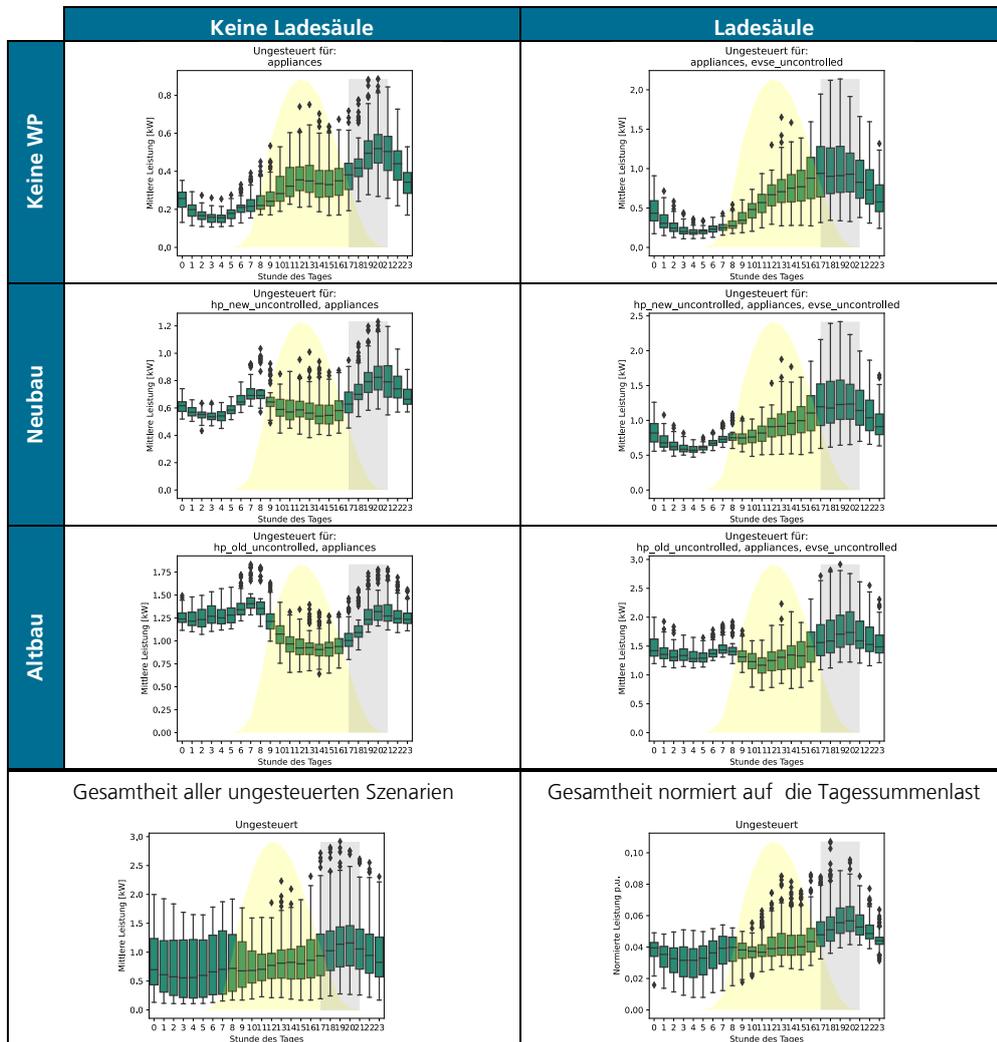


Abbildung 12 Jahresdauerlinien dreier ausgewählter Haushalte mit verschiedenen Technologiepools für den ungesteuerten, sperrzeitgesteuerten und vollgesteuerten Betrieb. Die horizontalen Linien markieren jeweils die Leistung unterhalb derer 85% des Jahresenergieverbrauchs liegen, die vertikalen Linien markieren die Anzahl der Stunden im Jahr an denen das 85% Leistungsband überschritten wird. Unter den jeweiligen Abbildungen ist die Jahresspitzenleistung sowie der 85% Leistungsschwellwert angegeben.

