

Gefördert durch:



ERGEBNISDOKUMENT

ENERGIEMANAGEMENT – OPTIMIERT UND MIT ANDEREN ZELLEN VERNETZT

High-Level-Use-Case 050E, TP5, AP 5.4
C/Sells-Blaupause: Grün/Gelb

Autoren: Julian Huber julian.huber@fzi.de
Kevin Förderer foerderer@fzi.de
Mischa Ahrens ahrens@fzi.de
Johannes Zipplies j.zipplies@uni-kassel.de
Alexander Dreher alexander.dreher@iee.fraunhofer.de
Katharina Habbishaw katharina.habbishaw@iee.fraunhofer.de
Felix Guthoff felix.guthoff@ier.uni-stuttgart.de
Nikolai Klemp nikolai.klemp@ier.uni-stuttgart.de
Ramiz Qussous ramiz.qussous@inatech.uni-freiburg.de
Jessica Thomsen jessica.thomsen@ise.fraunhofer.de
Natapon Wanapinit natapon.wanapinit@ise.fraunhofer.de
Clemens Döpmeier clemens.duepmeier@kit.edu



Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

4.12.2020

Abstract

Zunehmend erzeugen auch Anlagen in kleineren Liegenschaften Strom, vor allem aus PV-Anlagen. Wenn die Gebäude den erzeugten Strom nicht zur selben Zeit vor Ort verbrauchen oder speichern können, fließt dieser in das Stromnetz zurück. Da das Stromnetz nicht immer zusätzliche Einspeisung braucht, kann es sinnvoll sein, Erzeugung und Verbrauch zunächst lokal auszugleichen, um zu verhindern, dass in diesem Fall Strom ins Netz fließt. Hierzu muss vor Ort eine Möglichkeit bestehen, die Erzeugung, den Verbrauch und die Speicherung von Energie zu steuern. Dies leistet ein Energiemanagementsystem. Es kann zum Beispiel dafür sorgen, dass lokal erzeugter PV-Strom um die Mittagszeit gespeichert und dann abends von den heimkehrenden Bewohnern genutzt wird. Dies spart nicht nur Geld, sondern entlastet auch das Stromnetz, da ohne ein Energiemanagement möglicherweise viele PV-Anlagen mittags gleichzeitig Strom ins Netz einspeisen würden. Solche räumlichen Zusammenschlüsse mit einem oder mehreren Energiemanagementsystemen können Zellen verschiedener Größe bilden. Diese Zellen können Einfamilienhäuser, gewerbliche Immobilien oder auch ganze Flughäfen oder smarte Stadtviertel sein. Je diverser die Energieversorgungs- und Verbrauchsstrukturen vor Ort, desto höher ist grundsätzlich das Potenzial, Erzeugung und Verbrauch vor Ort auszugleichen. Gleichzeitig steigt jedoch auch die Komplexität, verschiedene Anlagen in einem Energiemanagementsystem zusammenzufassen.

In einem zellulären Energiesystem stehen die Liegenschaften im ständigen Informations- und Energieaustausch mit Ihrer Umgebung. Hierdurch können die Zellen flexibel auf neue Information reagieren indem sie ihren Energieverbrauch oder -Erzeugung anpassen. Der folgende High Level Use Case beschreibt den Ablauf des Informations- und Energieaustausch aus Sicht der Liegenschaften. Kapitel 1 legt die gemeinsamen Grundlagen für einen Austausch zwischen den Zellen indem gemeinsame Prozesse und Rollen beschrieben werden. In Kapitel zwei werden die unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Zelltypen definiert. Kapitel 3 beschreibt die Methoden, welche für den Flexibilitätstausch zwischen Energiemanagementsystemen entwickelt wurden. In Kapitel vier werden die Erkenntnisse über die so in verschiedenen Piloten gehobenen Flexibilitätspotentiale beschrieben und bewertet.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Beteiligte Partner	1
1 Einordnung und Grundlagen	2
1.1 Flexibilität in einem zellulär geprägten Energiesystem	2
1.2 Bereitstellung von Flexibilität.....	3
1.2.1 Rollen.....	3
1.2.2 Phasen der Flexibilitätsbereitstellung	5
1.2.2.1 Angabe der Steuerungsbereitschaft	6
1.2.2.2 Steuerungsanforderung.....	6
1.2.2.3 Umsetzung des Steuerungssignals	6
1.2.1 Unterschiedliche Ausprägungen der Flexibilitätsbereitstellung.....	7
2 Anforderungen und Voraussetzungen der Flexibilitätsbereitstellung aus Sicht der Liegenschaften	8
2.1 Beschreibung des Umfelds und Vermarktungsoptionen	8
2.2 Smarte Gebäude.....	9
2.3 Smart Districts	10
2.4 Typisierte, regionale Versorgungsstrukturen.....	11
3 Methoden und Modelle der Flexibilitätsbereitstellung	12
3.1 Modellparameter zur Beschreibung von Flexibilitätspotentialen	13
3.2 Korridormodelle	14
3.3 Distributed Energy Resource.....	15
3.4 Schnittstellen Zur Flexibilitätsbereitstellung durch das District FRANKLIN	17
3.5 Abstrakte Modellierung Von Flexibilität	17
3.6 Schnittstellen Zur Direkten und Indirekten Flexibilitätsbereitstellung	19
4 Bewertung der Flexibilitätsbereitstellung.....	21
4.1 Bereitstellung von Flexibilität zwischen Zellen in Peer-2-Peer-Konzepten.....	21

4.1.1	Beschreibung der Beispielliegenschaft	21
4.1.2	Beschreibung Flexibilitäterschließung	23
4.1.3	Potentiale und Erkenntnisse	24
4.2	Zelle Franklin	24
4.3	Demonstrationszelle Kirchhain-Stausebach.....	27
4.3.1	Beschreibung der Beispielliegenschaft	27
4.3.2	Beschreibung Flexibilitäterschließung	28
4.3.3	Potentiale und Erkenntnisse.....	29
4.4	Energy Lab 2.0	32
5	Zusammenfassung	35
	Literaturverzeichnis.....	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf der Flexibilitätsbereitstellung.....	6
Abbildung 2: Die drei C/sells-Handelsplätze: Handelsplatz für Regionalstromprodukte (links), bestehender Handelsplatz für Energieprodukte und Regelleistung (Mitte) und Handelsplatz für netzdienliche Flexibilität (rechts).....	8
Abbildung 3: Identifizierte Typregionen (Cluster) mit 7 Indikatoren.....	11
Abbildung 4: Flexibilitätspotentiale bis zur Erbringung	14
Abbildung 5: Flexibilitätskorridor mit Kosten der Flexibilitätsbereitstellung	15
Abbildung 6: Aufbau des Kommunikationskonzeptes	16
Abbildung 7: Erstellen und Kommunizieren des Modelles. Quelle: Förderer et al. (2018)	18
Abbildung 8: Bestimmung eines Signals zum Abruf von Flexibilität. Quelle: Förderer et al. (2018)	18
Abbildung 9: Iterative Bestimmung eines Lastprofils zum Abruf von Flexibilität. Quelle: Förderer & Schmeck 2019.	19
Abbildung 10: JSON Darstellung eines indirekten Steuersignals mit variablen Strompreisen	20
Abbildung 11: Bereitstellung von Flexibilität zwischen Zellen	22
Abbildung 12: Zweistufiges Systemkonzept von Energiezellen in Franklin mit eingebetteten Gebäude-Energiesystemen	25
Abbildung 13: Abbildung des Energiesystems des Biomassezentrums Stausebach.....	28
Abbildung 14: optimierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung des BHKW	31
Abbildung 15: Wärmebedarf von Stausebach, Wärmeerzeugung durch BHKW und Heizkessel und Speicherung.....	32
Abbildung 16: Aufbau des Speicherverbunds Karlsruhe/Stuttgart.....	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beteiligte Partner mit partnerspezifischen Arbeitsschritten.....	1
Tabelle 2: Mögliche Flexibilitätsanbieter	4
Tabelle 3: Mögliche Flexibilitätsanwender	5
Tabelle 4: Unterscheidungskategorien für Flexibilitätsmechanismen.....	7
Tabelle 5: Steckbrief Zelle Flughafen	22
Tabelle 6: Steckbrief Stausebach	28
Tabelle 7: Flexibilitätspotenziale verschiedener Gebäude	30
Tabelle 8: Anforderungen an das Informations- und Kommunikationskonzept für den Speicherverbund Karlsruhe/Stuttgart.....	34

Beteiligte Partner

In Tabelle 1 finden sich die Arbeitsschritte der beteiligten Partner laut TVB, deren Ergebnisse sich in diesem Dokument widerspiegeln.

Tabelle 1: Beteiligte Partner mit partnerspezifischen Arbeitsschritten

Partner	Arbeitsschritt
KIT-AIFB	Analyse der Anforderungen zur Energiemarktintegration von Smart Homes
KIT-AIFB	Adaption der externen Kommunikationsschnittstelle des Organic Smart Home zum Anbieten von Flexibilitäten an übergeordnete Koordinationsebenen
KIT-AIFB	Modellierung und Kategorisierung von Privathaushalten bezüglich Flexibilitäten
FZI	Gebäudespezifische Adaption generischer Energiemanagementsysteme an die individuellen Anforderungen der Liegenschaft und des Betreibers.
FZI	Untersuchung von Flexibilitätsdaten zur Identifikation relevanter Kennzahlen. Empirische und analytische Validierung.
FZI	Erstellung einer Metrik zur Bewertung von Flexibilität der Prosumenten.
UNF	"Spartenübergreifendes Optimierungsmodell eines Microgrids
UNF	Weiterentwicklung des Optimierungsmodells auf Basis von Erfahrungen im Laborbetrieb
KIT-IAI	Realisierung der externen Kommunikationsschnittstelle der Leitstelle des Energy Lab 2.0 des KIT (AIFB) zum Anbieten von Flexibilitäten und zur Integration mit dem übergeordneten Netz-Energiemanagement
IER	Gemeinsame Definition von Referenzliegenschaften und deren Flexibilitätpotential auf unterster Zellebene
IER	Abgleich der Optimierungsziele des lokalen Energiemanagement, um einen zellübergreifenden Austausch zu ermöglichen.
ISE	Betriebsstrategien und Regelungskonzepte für das spartenübergreifende Energiemanagement
ISE	Bewertung des Flexibilitätpotentials von Liegenschaften und Prosumenten
IEE	Konzeption und Modellierung von Werkzeugen für das spartenübergreifende Energiemanagement
IEE	Betriebsstrategien und Regelungskonzepte für das spartenübergreifende Energiemanagement.

1 Einordnung und Grundlagen

Das erste Kapitel erläutert die in c/sells durch die Fachgruppe Flexibilität definierte und in der Folge verwendete Definition von Flexibilität und beschreibt generische Mechanismen, nach denen die Bereitstellung von Flexibilität von und zwischen Zellen ablaufen kann. Hierdurch wird ein gemeinsames Verständnis für die Einordnung der folgenden Beiträge geschaffen. Zudem wird auf angrenzende Arbeiten in C/sells verwiesen, welche an anderer Stelle relevant sind.

1.1 Flexibilität in einem zellulär geprägten Energiesystem

Die C/sells Fachgruppe Flexibilität hatte das Ziel, die Blickwinkel der Mitglieder innerhalb des C/sells-Projekts auf Flexibilität im Energiesystem zusammen zu führen und ein einheitliches Verständnis des Flexibilitätsbegriffs zu erarbeiten. Dieser liegt auch dem folgenden Dokument zugrunde. Flexibilität bedeutet im Allgemeinen, dass mehrere Handlungsmöglichkeiten existieren. Insbesondere ist ein flexibler Akteur, der an ein Elektrizitätsnetz angeschlossen ist, in der Lage seine Einspeisung oder Entnahme so anpassen, dass durch diese Veränderung eine Dienstleistung an andere bereitgestellt werden kann. Diese Flexibilitätsbereitstellung wird dabei durch ein externes Signal abgerufen. Das führt die C/sells Fachgruppe "Flexibilität" (2018) zur Definition der techno-ökonomischen Flexibilität im Kontext Energie.

„Die Flexibilität einer Zelle wird durch die Fähigkeit definiert, zu einem vorgegebenen Zeitpunkt unterschiedliche Handlungspfade zu beschreiten und hierdurch eine Dienstleistung für die Zelle oder für Dritte bereitzustellen.“ - Lehmann et al. 2019a

Um einen Handlungspfad aus der Menge der möglichen Handlungspfade zu beschreiten, benötigt es eine Entscheidung, die durch einen Menschen, ein Energiemanagementsystem oder einem Zusammenspiel beider getroffen werden muss. Die Dienstleistung, die bereitgestellt wird, ist der Grund, wieso ein Handlungspfad beschritten wird. Was für eine Art Dienstleistung das ist, kann stark variieren, je nachdem ob die Flexibilität dazu eingesetzt wird eine z.B. eine Nachfrage nach Wirkleistung zu bedienen oder ein Lastabwurf auf Grund einer Engpasssituation durchgeführt wird.

Energie wird über verschiedene Energieträger übertragen. Das Prinzip der Flexibilität ist dabei auf verschiedene Energieträger anwendbar. Insbesondere werden im Folgenden jedoch Flexibilität bei der Strom- und Wärmeversorgung untersucht. In Kapitel 4 wird deutlich, dass besonders durch

eine Kopplung verschiedener Sektoren ein besonders hohes Flexibilitätspotential gehoben werden kann.

Im Stromnetz kann Flexibilität beispielsweise bereitgestellt werden, indem die Bezugs- oder Einspeiseleistung am Übergabeort (zum Beispiel dem Hausanschluss) verändert wird. Ebenso sind aber auch Anpassungen anderer relevanter Größen, wie Phasenwinkel denkbar. Dies bedeutet, dass Last und Erzeugung entweder verschoben oder angepasst werden, Leistungselektronik oder Speicher zum Einsatz kommen.

Hiermit sind nicht nur Stromspeicher gemeint. Energie kann auch in Form von Wärme gespeichert werden, was besonders dann sinnvoll ist, wenn ohnehin eine Kopplung zwischen Strom- und Wärmesektor vorliegt. Wärmeversorgungssysteme haben dabei den Vorteil, dass sie beträchtliche inhärente Speicherkapazitäten aufweisen. Deshalb muss im Gegensatz zum Stromnetz kein permanenter Leistungsausgleich erfolgen, was kurzzeitige Lastverschiebungen leicht ermöglicht. Diese inhärente Flexibilität kann deshalb mit geringem Aufwand erschlossen werden und über Sektorkopplungstechnologien für das Stromnetz nutzbar gemacht werden.

1.2 Bereitstellung von Flexibilität

Damit Flexibilität bereitgestellt werden kann, müssen Zellen nicht nur Energie, sondern auch Information austauschen. Im Folgenden wird der Ablauf und Informationsfluss der Flexibilitätsbereitstellung beschrieben. Dazu werden zunächst die beteiligten Rollen beschrieben.

1.2.1 ROLLEN

Einer der zentralen Begriffe des C/sells-Projekts ist „Zellularität“. Wobei eine Zelle nach der C/sells ein Energiesystem ein übergeordneter Verbund oder Zusammenschluss von Zellen ist. Eine **Zelle** ist im Folgenden definiert als ein *„von der Umgebung abgegrenztes und gleichzeitig über Schnittstellen verbundenes System aus Komponenten der Energieinfrastruktur¹⁾ verschiedener Energieformen²⁾ sowie auch weiterer Infrastrukturen der Kommunikation und Logistik, deren Funktionen ein autonomes Zellenmanagement³⁾ mit Optimierung von Angebot und Nachfrage im System über alle vorhandenen Energieformen in Verbindung mit dem Austausch von Produkten und Dienstleistungen über bidirektionale Flüsse von Energie, Stoffen und Information zu physikalischen Nachbarzellen sowie zu nicht lokal definierten virtuellen Marktzellen⁴⁾ ermöglichen* - C/sells (2019), von VDE ETG/ITG AK Energieversorgung 4.0 abgeleitete und erweiterte Definition

Die folgenden Fußnoten vervollständigen die Definition:

¹⁾ z.B. zur Energieinfrastruktur zählen alle Komponenten (Assets: Schicht A), die zur Wandlung von Energie, zu Transport und Verteilung sowie zur Speicherung eingesetzt werden.

²⁾ Energieformen umfassen u.a. Elektrizität, Gas, Wärme und Energieträger für Mobilität.

³⁾ Zum Zellenmanagement zählen Komponenten der Systemnutzer (Schicht D), Betriebsführung- und Leittechnikkomponenten (Schicht C) sowie Digitalisierungskomponenten (Schicht B) mit Informations- und Unterstützungsfunktionen (Basiskomponenten), Mess- und Steuereinrichtungen (Zugriffskomponenten) sowie gesicherte Kommunikationskomponenten

⁴⁾ Infrastrukturzellen können zu umfassenderen Infrastrukturzellen verbunden werden. Es gibt somit Zellen auf der gleichen Stufe sowie auf übergelagerten und unterlagerten Stufen.

Eine Zelle kann im Rahmen der Flexibilitätsbereitstellung zwei mögliche Rollen annehmen. Ein **Flexibilitätsanbieter** ist eine Zelle, die Flexibilität für ein kommendes Zeitintervall an seiner Zellgrenze anbietet. Innerhalb des Zeitintervalls reagiert sie auf ein Signal von außerhalb ihrer Grenzen mit einer Anpassung seiner Lastkurve, um Flexibilität zu gewährleisten. Im diesem High Level Use Case liegt der Fokus auf Zellen mit Energiemanagementsystemen und den Prozess der Flexibilitätsbereitstellung. Weitere Ergebnisse zu möglichen Flexibilitätsanbietern finden sich in die folgenden High Level Use Cases.

Tabelle 2: Mögliche Flexibilitätsanbieter

Flexibilitätsanbieter

Heim-Energiemanagementsysteme	HLUC 050E und HLUC 050F Regelungskonzepte / Betriebsstrategien zur Flexibilitätsbereitstellung
Elektrofahrzeuge und Ladesäulen	HLUC 050H Integration von Elektromobilität in lokales EMS, Markt und Netz
Einzelne Anlagen	HLUC 050G Integration von Geräten/Anlagen mit EMG in lokales EMS, Markt und Netz

Mögliche **Flexibilitätsanwender** sind Zellen der gleichen, höheren oder niedrigeren Ebene und kommen in Form von physischen Zellen (z.B. Quartiersenergiemanagementsystem eines Stadtviertels) sowie virtuellen Zellen (z.B. ein Aggregator oder ein Flexibilitätsmarkt). Der Flexibilitätsanwender ist eine Zelle, die vom Flexibilitätsanbieter ein Flexibilitätsangebot erhält und daraufhin die Option besitzt innerhalb des Bewirtschaftungszeitraums ein Abrufsignal an den Flexibilitätsanbieter zu senden, also z.B. eine Lastkurve oder ein Preissignal, um die Realisierung einer Lastkurve zu fördern. Die möglichen Flexibilitätsanwender werden insbesondere in AP 5.2 und AP 5.3 betrachtet:

Tabelle 3: Mögliche Flexibilitätsanwender

Flexibilitätsanwender	
Übergeordnete Arealzelle	UAP 7 (siehe Flughafen Stuttgart und MVV)
Aggregator	HLUC 050D Aggregation lokaler Energieflüsse und Flexibilität
Regionale Marktplattformen	HLUC 050J Flex-Plattform für System-/Netzdienstleistungen
P2P Handel	HLUC 050K Direkthandelsumgebungen (Peer-to-Peer)
Bestehende Märkte	HLUC 050L Vermarktung von Flexibilität auf parallel existierenden Märkten

Wie zuvor angesprochen bedarf die Flexibilitätsbereitstellung sowohl Energie- als auch Kommunikationsinfrastruktur. Das **Energieübertragungssystem** (z.B. Stromnetz) dient der Realisierung physikalischer Energieflüsse. Das **Infrastruktur Information System (IIS)** verbindet die Zellen und ermöglicht den Austausch von Informationen. Es ist daher eine notwendige Voraussetzung für den Flexibilitätsaustausch und bildet eine zusätzliche Schicht, die den Informationsaustausch zwischen Zellen basierend auf Nachrichten ermöglicht.

1.2.2 PHASEN DER FLEXIBILITÄTSBEREITSTELLUNG

Die Bereitstellung von Flexibilität zwischen den Zellen folgt in der Regel einem wiederkehrenden Muster. Ein Mechanismus ist ein regelmäßiger ablaufender Prozess, dessen Regeln, Rahmenbedingung und Rollenverteilungen allen beteiligten Akteuren bekannt sind. Ein Flexibilitätsmechanismus besteht aus der Bereitstellung, der Ansteuerung, dem Abruf und der Erbringung von Flexibilität. Dies wird im Folgenden anhand der im vorherigen Kapitel vorgestellten Rollen, i.e. Flexibilitätsanbieter und Flexibilitätsanwender, beschrieben.

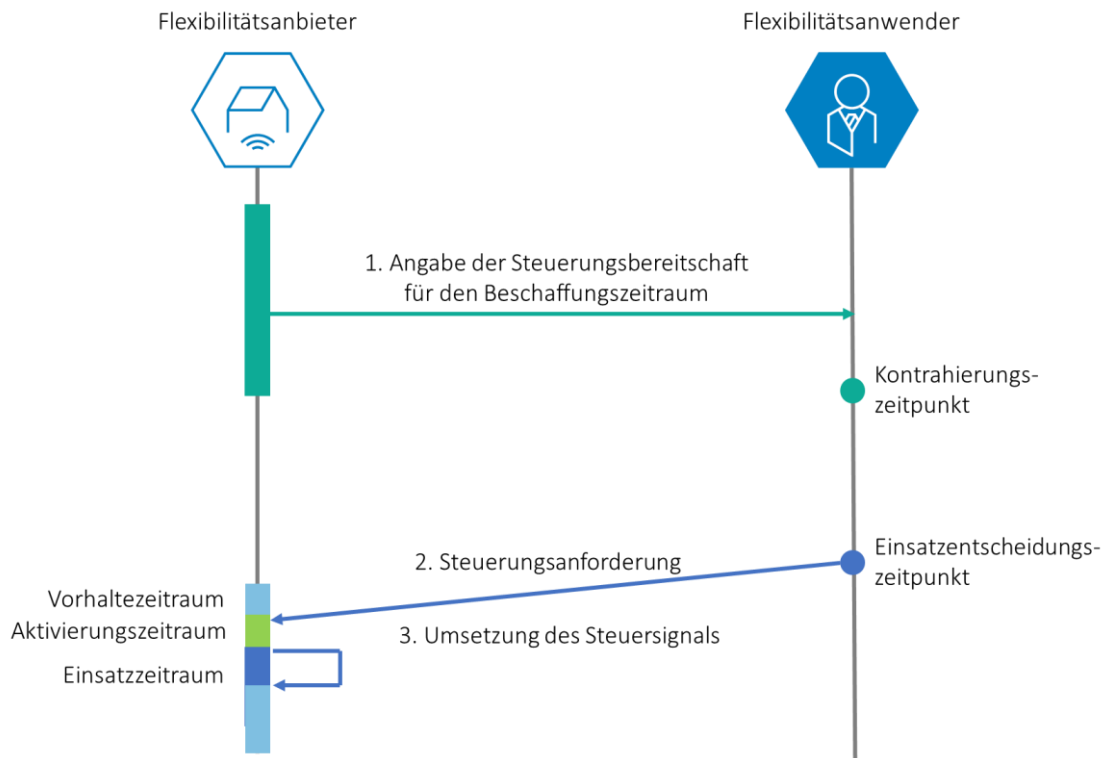


Abbildung 1: Ablauf der Flexibilitätsbereitstellung

1.2.2.1 Angabe der Steuerungsbereitschaft

Der Flexibilitätsanbieter bestimmt zunächst die aktuelle, zustandsabhängige Flexibilität zum. Nachdem er seine Präferenzen berücksichtigt hat, bietet er dem Flexibilitätsanwender die Flexibilität für das kommende Zeitintervall (z.B. Planungsintervall des Energiemanagementsystems oder Beschaffungszeitraum). Dem kann eine Aufforderung zur Abgabe eines Angebots durch den Flexibilitätsnutzer vorausgehen.

1.2.2.2 Steuerungsanforderung

Um die Lastanpassung auszulösen, sendet der Flexibilitätsanwender zum Einsatzentscheidungszeitpunkt ein Signal an den Flexibilitätsanbieter, um die Flexibilität abzurufen. Alternativ reagiert der Flexibilitätsanbieter auf ein vereinbartes Signal.

1.2.2.3 Umsetzung des Steuerungssignals

Zuletzt wird das Signal in eine Anpassung des Betriebs des Flexibilitätsanbieters umgesetzt und durchgeführt.

1.2.1 UNTERSCHIEDLICHE AUSPRÄGUNGEN DER FLEXIBILITÄTSBEREITSTELLUNG

Da dieser Prozess jedoch in allen Anwendungsfällen der Flexibilitätsbereitstellung wieder auftritt, kann der Prozess auf unterschiedliche Weise implementiert werden. Die Spanne reicht hier vom Verhalten eines Menschlichen Nutzers auf eine variables Preissignal, über die Integration eines Elektrofahrzeugs in ein Energiemanagementsystem bis hin zur Abgabe eines Gebots für Regelleistung durch ein Virtuelles Kraftwerk.

Um die Unterschiede zwischen diesen Mechanismen der Flexibilitätsbereitstellung zu systematisieren, werden in diesem Kapitel vier Dimensionen vorgestellt, die den Austausch von Flexibilität zwischen zwei Zellen beschreiben: Flexibilitätsangebot, Abrufsignal, Signalweg und Verantwortung für die Anpassung des Betriebs. Die in Tabelle 4 beschriebenen Unterscheidungskategorien werden in Lehmann et al. (2019b) detailliert beschrieben.

Tabelle 4: Unterscheidungskategorien für Flexibilitätsmechanismen

Unterscheidungskategorie		
1. Steuerungsbereitschaft	explizit durch Beschreibung der Flexibilität in Reaktion auf die Steuerungsanforderung z.B. Übermittlung eines Abschaltpotentials als Leistungszeitreihe	implizit durch Teilnahme ohne Vorabbeschreibung des Flexibilitätspotentials z.B. durch das Akzeptieren eines zeitdynamischen Stromtarifes
2. Steuerungsanforderung	direkt durch Vorgabe einer Steuergröße die sich direkt in einer Lastanpassung überträgt z.B. Übermittlung einer Soll-Leistung als Leistungszeitreihe	indirekt durch eine andere Information, die in einer Lastanpassung übersetzt werden muss z.B. Übermittlung einer zeitvariablen Arbeitspreiszeitreihe, einer Quote, oder die Reaktion auf einen Netzparameter
Signalweg der Steuerungsanforderung	kommunikationsgesteuert über einen dedizierten Kommunikationskanal z.B. TLS-Kanal über ein SMGW oder Rundsteuersignal	zustandsgesteuert durch Überwachung des Zustandes eines Umwelt- oder Systemparameters z.B. Netzfrequenz oder Phasenwinkel
3. Verantwortung der Umsetzung des Steuersignals	aktive Zelle Flexibilitätsanbieter, der die Umsetzung des Steuersignals in eine Lastanpassung verantwortet z.B. Gebäude-Energiemanagementsystem, das auf einen zeitvariablen Arbeitspreis reagiert	passive Zelle Flexibilitätsanbieter, der externen Zugriff auf seine flexiblen Anlagen gewährt z.B. Laststeuerung über eine Steuerbox durch einen Aggregator

2 Anforderungen und Voraussetzungen der Flexibilitätsbereitstellung aus Sicht der Liegenschaften

Welche Flexibilitätsmechanismen für die Integration von Liegenschaften in Frage kommen hängt zum einem von deren Umfeld und damit dem Flexibilität Anwender ab. Zum anderen können die Liegenschaften selbst unterschiedliche Anforderungen an die Flexibilitätsbereitstellung haben.

2.1 Beschreibung des Umfelds und Vermarktungsoptionen

Um den Austausch zwischen Zellen zu ermöglichen, stehen in C/sells drei Handelsplätze zur Verfügung. Diese beinhalten zum einen die bestehenden Märkte (Großhandel, Regelleistungsmarkt), die punktuell für die Teilnahme neuer Akteure erweitert wurden, und zum anderen zwei neue Handelsplätze für den regionalisierten Handel von Energie und Flexibilität. Somit wird einerseits der direkte Handel von Regionalstromprodukten zwischen Zellen ermöglicht und andererseits durch die Bereitstellung von Flexibilität mit einer regionalen Komponente ein sicherer und effizienter Betrieb unseres Stromnetzes sichergestellt.

Auf Handelsplätzen trifft Angebot und Nachfrage zusammen. Damit wird sichergestellt, dass Zellen und andere Akteure ihre Bedürfnisse an Energie und Flexibilität decken und damit Zusatzerlöse erzielen können. Zusätzlich haben sie das Potenzial zu Effizienzsteigerungen und zu Innovationsanreizen. Die Teilnahme an den C/sells-Handelsplätzen ist natürlich freiwillig, sodass den Zellen größtmöglicher Freiraum gegeben wird. Die im Projekt unterschiedenen drei Arten von Handelsplätzen für Energie und Flexibilität sind nachfolgend dargestellt (vgl. Abbildung X).



Abbildung 2: Die drei C/sells-Handelsplätze: Handelsplatz für Regionalstromprodukte (links), bestehender Handelsplatz für Energieprodukte und Regelleistung (Mitte) und Handelsplatz für netzdienliche Flexibilität (rechts)

Die Handelsplätze für netzdienliche Flexibilität erfordern, entweder eine explizite Beschreibung der Steuerungsbereitschaft in der Form eines Gebots oder Fahrplanproduktes (ALF und Comax) oder eine implizite Beschreibung interhalb eines Quotenmodells (Reflex). Regionalstromprodukte und Peer-to-Peer Konzepte werden in HLUC 050K und HLUC 050F genauer besprochen, erfordern jedoch ebenfalls eine Explizite Beschreibung der Flexibilität durch Gebotsabgabe. Durch verschiedene Tarifierungsfälle des Smart Meter Gateways werden zudem variable Stromtarife ermöglicht. Diese benötigen nur eine implizite Flexibilitätsbereitstellung durch die Teilnahmebereitschaft der Zellen, ohne die Flexibilität vorab explizit beschrieben werden muss. Zudem können Zellen an bestehende Handelsplätze für Energieprodukte und Regelleistung angebunden sein. Während Energieprodukte nicht zwangsläufig eine explizite Beschreibung der Flexibilität erfordern (nach dem Handel muss lediglich die Lastkurve abgefahren werden), müssen am Regelleistungsmarkt vorab explizite Gebote über die Flexibilität abgegeben werden.

2.2 Smarte Gebäude

Smarte Gebäude bündeln verschiedenartigen Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen mit einem Energiemanagementsystem. Neben einer PV-Anlage und elektrischen Speichern, können das auch thermische Anlagen sein. Das Energiemanagementsystem ist dafür zuständig eine optimale Betriebsstrategie abzuleiten. Auf dieser Basis kann dann die Flexibilität der Gebäudezelle quantifiziert und somit anderen Zellen angeboten werden. Sofern die Flexibilität durch ein Steuersignal abgerufen wird, müssen die lokalen Anlagen so gesteuert werden, dass die angebotene und abgefragte Flexibilität möglichst exakt erbracht wird. Hierzu ist eine Schnittstelle nötig, die sowohl übergeordneten Zellen, Marktakteuren, als auch Netzbetreibern den Abruf von Flexibilität ermöglicht.

Die Integration in einen Energiemarkt kann entweder direkt oder indirekt erfolgen, indem die vorhandene Flexibilität direkt auf einem Markt vermarktet wird, oder diese an einen anderen Marktakteur, z.B. einen Aggregator, zur Verfügung gestellt wird. Beide Optionen setzen lokale Automatisierung voraus, da manuelles Handeln und Steuern durch Anwohner nicht praktikabel und auch nicht rentabel sind (vgl. Befragung in AP 2.4). Die im Smart Home vorhandene Flexibilität ist im Vergleich zu den auf den heute üblichen Märkten angebotenen Energiemengen verschwindend gering und auch deutlich mit stärkerer Unsicherheit belastet. Eine direkte Vermarktung ist daher zukünftig vor allem auf lokalen Energiemärkten interessant, welche voraussichtlich über deutlich geringe Einstiegshürden aufweisen. Insbesondere auf lokalen Märkten in denen keine, oder nur wenige größere Anbieter von Flexibilität vorhanden sind ist ein Flexibilitätsangebot auch durch kleine Gebäudezellen wertvoll, da im Allgemeinen hohe Volumina

von Angebot und Nachfrage auf einem Markt wünschenswert sind, um einen effizienten Betrieb des Marktes zu gewährleisten. Bei der Vermarktung mittels Aggregator können Einstiegshürden deutlich einfacher genommen werden und so die Flexibilität auch auf etablierten Märkten wie dem Regelleistungsmarkt angeboten werden. Hier ist der Smart Home Besitzer jedoch vom Angebot und auch der Bereitschaft der Aggregatoren abhängig auch kleine Anlagen direkt oder indirekt (im Sinne des Flexibilitätsabrufes) zu steuern. Auch ein gemischtes Portfolio, bei dem Flexibilität anteilig auf verschiedenen Märkten vermarktet wird ist denkbar, stellt jedoch hohe Anforderungen an die Algorithmen der Energiemanagementsysteme.

Voraussetzung für das Angebot von Flexibilität durch ein Smart Home sind insbesondere:

- Zuverlässige Kommunikationsinfrastruktur
- Definierte Schnittstellen für Flexibilitätsbereitstellung und Abruf
- Ausgereifte und wirksame Konzepte für Sicherheit und Datenschutz
- Vorhandensein eines Nachfragers bzw. Marktes
- Geringe Einstiegshürden, z.B. ökonomisch

Des Weiteren ist die Nutzung einer möglichst generischen Schnittstelle, welche die lokalen Vorgänge im Gebäude verschleiert und auf eine direkte Steuerung der Anlagen verzichtet im Sinne der Autonomie der Gebäudezelle wünschenswert, um so beispielsweise auch die Akzeptanz solcher Lösungen in der Bevölkerung zu erhöhen. Insbesondere wenn von gesetzlichen Zwängen abgesehen werden soll ist diese von besonderer Bedeutung, um das Angebot von Flexibilität insgesamt zu erhöhen.

Für eine weitere, technische Detailierung des Flexibilitätsabrufes einer Gebäudezelle sei auf den *Use Case 7.6.1: „Flexibilitätsangebot und –Bereitstellung durch eine intelligente Gebäudezelle“* verwiesen.

2.3 Smart Districts

Größere Zellen, wie Smarte Quartiere und Mico-Grids haben darüber hinaus spezielle Anforderungen, da diese z.B. an höheren Netzebenen angeschlossen sind, höherer Verbräuche haben und somit über andere Anreize (z.B. Spitzenlastbepreisung, atypische Netznutzung) und Möglichkeiten (aktive Teilnahme an Energiemärkten) verfügen. In der Folge sind Möglichkeiten zur expliziten Steuerung (z.B. durch Fahrpläne), implizite Steuerung (z.B. durch Preissignale), sowie netzdienlichen Steuerung durch Aktivierung / Deaktivierung und Konfiguration vordefinierten Steuerungsverhalten notwendig. Zudem sammeln sich in einem Quartier häufig

mehrere unterschiedliche Nutzer, was eine Authentifizierung und Autorisierung, Multi-Mandantenfähigkeit bei der Übermittlung von Prozess- und Monitoringdaten notwendig macht.

2.4 Typisierte, regionale Versorgungsstrukturen

Eine Ebene darüber unterscheiden sich Versorgungsregionen auch strukturell voneinander. So haben z.B. städtische und ländliche Regionen ein zeitlich, räumlich unterschiedlichen Bedarf und Angebot an Flexibilität. Die Vielfältigkeit der Zellen/Versorgungsregionen kann über Indikatoren beschrieben werden. Beispiele hierfür sind installierte Leistung EE, Stromnachfrage, Stromnetzdicke und Schnittstellen nach außen.

Für weitere Analysen wurden Auswahl ausgewählter erzeugungsseitiger und nachfrageseitiger Indikatoren auf NUTS 3 Ebene analysiert und mittels hierarchischem Ward-Algorithmus in fünf Cluster geclustert. Die C/Sells Region fällt dabei im Abbildung 3 überwiegend in das Cluster 4, das durch ländliche Regionen mit hoher PV-Erzeugung geprägt ist, hier kann perspektivisch ein hoher Bedarf and positiver Flexibilität in Sonnenstunden gerechnet werden. Zudem finden sich stark bevölkerte Custer (5) in den städtischen Regionen und wenige wind-dominierte Regionen (Cluster 2). Diese Clustering wird in AP 2.6 eingesetzt, um die Potentiale zellulärer Energiesysteme zu bewerten.

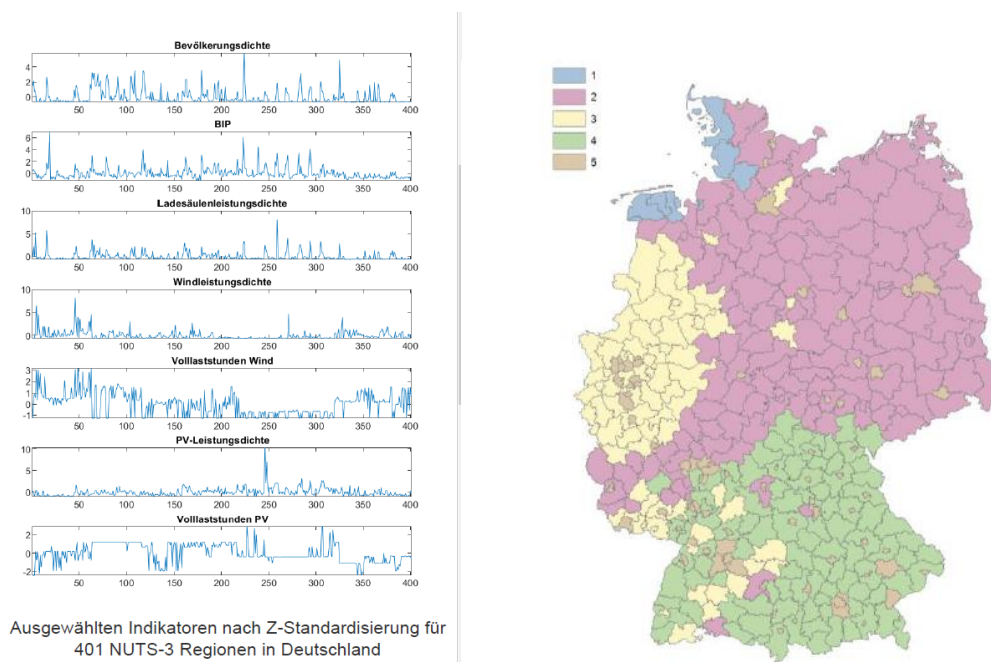


Abbildung 3: Identifizierte Typregionen (Cluster) mit 7 Indikatoren

3 Methoden und Modelle der Flexibilitätsbereitstellung

Es existiert eine Vielzahl an Schnittstellen zur Steuerung von Anlagen. Neben gerätespezifischen Schnittstellen, die für jedes Endgerät im Einzelnen implementiert werden müssen, gibt es auch verschiedene Standardisierungsbestrebungen wie beispielsweise den EEBus und auch diverse Anregungen aus der Wissenschaft. Die Frage der Gestaltung der Schnittstelle ist eng verbunden mit der Wahl eines Modells für Flexibilität, oder in anderen Worten, wie diese beschrieben werden soll. Im Hinblick auf das Modell, welches ein für einen Anwendungszweck bestimmtes, vereinfachtes Abbild der Realität darstellt, existieren diverse Spannungsfelder und Fragestellungen. Beispiele hierfür sind:

- Wird das System selbst modelliert (z.B. MILP) oder nur seine Reaktion auf Umwelteinflüsse (z.B. Elastizität)?
- Wird ein Systemmodell kommuniziert, aus welchem sich die Flexibilität ergibt (z.B. MILP), oder wird die Flexibilität selbst modelliert und kommuniziert (z.B. Korridore)?
- Soll das Modell möglichst exakt sein oder reicht die Annäherung aus? In diesem Kontext stellt sich insbesondere die Frage, ob das Modell „nur“ Reaktionsmöglichkeiten auf ein mögliches Problem anbieten soll um eine stabile Energieversorgung zu gewährleisten, oder ob ein globales Optimum nach zu definierenden Zielen gesucht ist.
- Werden Informationen bezüglich Unsicherheit benötigt?
- Sind neben Elektrizität auch andere Energiedienstleistungen (z.B. Wärme) zu berücksichtigen?
- Wie detailliert sind Preisinformationen notwendig?

Diese und weitere Fragen lassen sich häufig nur im Kontext eines gegebenen Anwendungszweckes beantworten. Im Hinblick auf verschiedene Akteure und technische Randbedingungen ergeben sich insbesondere folgende Spannungsfelder

- Detaillierungsgrad vs. Handhabbarkeit
Sehr detaillierte Modelle sind ggf. nur noch schwer mit Standardwerkzeugen (z.B. mittels MILP) lösbar.

Einfache Modelle beschneiden andererseits den Lösungsraum und so wird ggf. nicht die beste realisierbare Lösung gefunden.

- Anforderungen Marktakteur vs. Anforderungen lokaler Optimierer

Die am Markt gehandelte Flexibilität (z.B. positive und negative Leistung je Zeitintervall) beinhaltet i.d.R. deutlich weniger technische Details als in der lokalen Optimierung genutzt werden. Ein komplexes Modell erschwert das Handeln am Markt, ein zu einfaches Modell ist potentiell ungeeignet für die lokale Optimierung.

Konfigurationsgesteuerte Flexibilität ist ein solcher Algorithmus auf der Anlage implementiert und geeignet konfiguriert, kann er auch Offline basierend auf vorkonfigurierbaren Ereignissen (z.B. Grenzwertüberschreitung) ausgeführt werden und trägt somit zur Erhöhung der Resilienz bei.

3.1 Modellparameter zur Beschreibung von Flexibilitätspotentialen

In der Folge wird ein Überblick über die im Arbeitspaket entwickelten Schnittstellen zur Flexibilitätsbereitstellung gegeben, sowie Methoden vorgestellt, die die Flexibilität in einem für die Schnittstellen geeigneten Format quantifizieren können.

Die Flexibilität einer Zelle oder deren technischen Komponenten kann durch die Menge ihrer möglichen Fahrkurven beschrieben werden. Die potenzielle maximale Flexibilität lässt sich meist aus den Konstruktionsdaten und damit technischen Randbedingungen der Anlagen ablesen ('Nameplate Parameter') (vgl. Abbildung 4). Für jeden Zeitpunkt wird die Menge an ausführbaren Fahrkurven durch ihren aktuellen Zustand eingeschränkt und kann als Maximum die Flexibilität, welche durch technische Randbedingungen festgelegt ist, nicht überschreiten. So hängt beispielsweise die Flexibilität einer Batterie nach dem Zeitpunkt t_0 jeweils von ihrem aktuellen Ladezustand ab.

Unter Berücksichtigung sozio-ökonomischer Bedingungen, wie z.B. der monetären Kompensation der angebotenen Flexibilität oder des Komfortverlustes durch die Bereitstellung von Flexibilität, kann der Flexibilitätsanbieter entscheiden, wie viel Flexibilität er über welchen Mechanismus einer anderen Zelle bereitstellen möchte. Aus der Menge der bereitgestellten Flexibilität wird nach Abruf eine Fahrkurve realisiert und die Flexibilität somit erbracht.

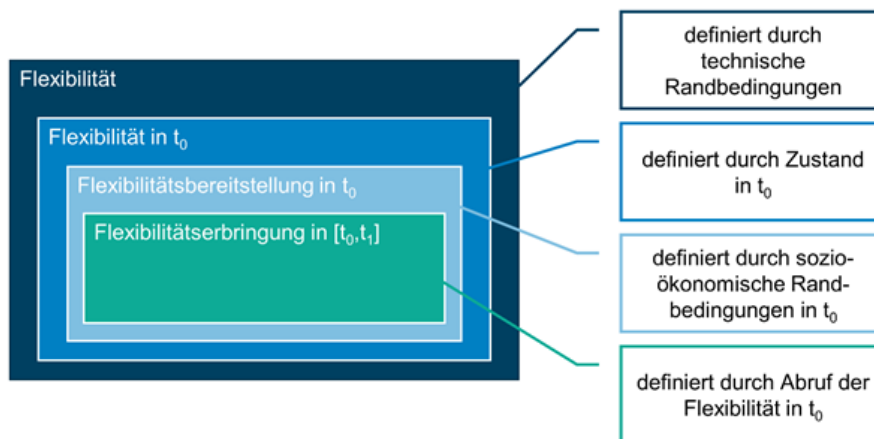


Abbildung 4: Flexibilitätspotentiale bis zur Erbringung

Die Ausprägung des Flexibilitätsmodells, das die mögliche Flexibilitätsbereitstellung in t_0 bis t_1 beschreibt, hängt von den Nutzern (z.B. Flexibilitätsanwender und Flexibilitätsanbieter), dem Anwendungsfall sowie dem Betrachtungszeitraum ab. Besonders relevant sind hierbei zwei Aspekte der Flexibilität:

1. Das Modell beschreibt qualitativ, wie und wofür die Flexibilität genutzt werden kann. Es wird festgelegt, über welche Flexibilitätsmechanismen mit ihr interagiert werden kann.
2. Das Modell beschreibt die quantitativen Aspekte der Flexibilität und gibt so die möglichen Fahrkurven wieder. Bei solchen Modellen kann zwischen Konstanten, statischen Variablen und dynamischen Variablen unterschieden werden. Während statische Variablen sich nicht in Abhängigkeit mit der Zeit ändern (z.B. maximale Lastgradienten), werden dynamische Variablen insbesondere dazu genutzt, die gültigen Handlungswege (Fahrkurven) einer Flexibilität zu beschreiben.

3.2 Korridormodelle

Eine einfach Art Flexibilität durch eine Teilmenge der gültigen Handlungswege (Fahrkurven) zu beschreiben ist ein Korridor, um den geplanten (häufig optimierten Betrieb) zu legen. Der optimierte Betrieb kann dabei bereits auf eine implizite Flexibilitätsbereitstellung ausgelegt sein. Zudem ermöglicht die explizite Beschreibung der möglichen Abweichungen eine Anwendung der Flexibilität für weitere Anwendungsfälle, wie das Netzengpassmanagement oder Flexibilitätsmärkte. Um dem Markt Flexibilität zur Verfügung zu stellen, muss diese jedoch korrekt quantifiziert und ihre Kosten müssen geschätzt werden. Hierzu wurde eine Methodik für die generische Quantifizierung von Flexibilität entwickelt und in einer Python-Umgebung unter Verwendung der modellbasierten prädiktiven Steuerung implementiert. Die gewählte Methodik erlaubt es, die einstellbare Leistung zu quantifizieren und auch die entsprechenden Kosten der

Flexibilitätsbereitstellung zu bestimmen. Es wurde beobachtet, dass die verfügbare Flexibilität und ihre Kosten von vielen Faktoren wie Systemkomponenten, menschlichem Verhalten, thermischen Parametern des Gebäudes und Preissignalen beeinflusst werden. Auch die Einbeziehung selbst eines geringen Anteils von Haushalten mit Batterien oder elektrischen Fahrzeugen glättet die das aggregierte Flexibilitätsprofil, und ein beträchtliches Maß an Flexibilität ist an fast jedem Punkt in Zeit. Abbildung 5 beschreibt einen solchen Flexibilitätskorridor einer Liegenschaft mit Kosten der Flexibilitätsbereitstellung nach oben und unten über den Tagesverlauf.

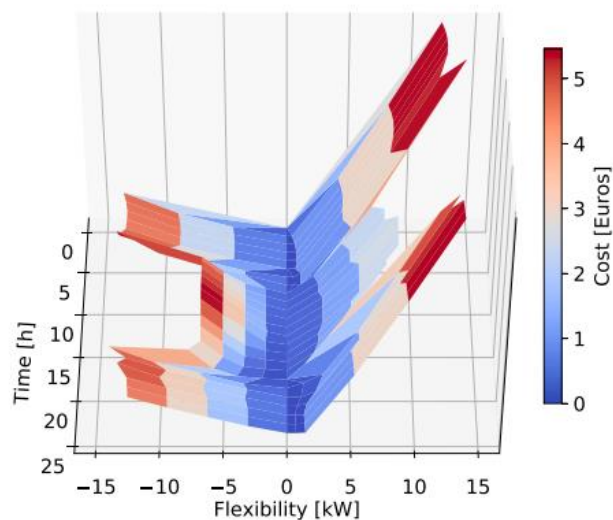


Abbildung 5: Flexibilitätskorridor mit Kosten der Flexibilitätsbereitstellung

Die detaillierte Beschreibung kann Harder et al. (2020) entnommen werden.

3.3 Distributed Energy Resource

Um den besonderen Anforderungen von Smarte Quartieren (Kapitel 2.3) gerecht zu werden, wurde das Modell und eine Kommunikationsschnittstelle für Distributed Energy Resources entwickelt. Die Umsetzung der Kommunikationsschnittstelle zur Bereitstellung von Flexibilität mit ihren Anforderungen hinsichtlich der Resilienz und der funktionalen Anforderungen der impliziten, expliziten und netzdienlichen Steuerung einer „Distributed Energy Resource“ (DER) ist in der Abbildung 6 dargestellt. Die DER kann hierbei über den regelbasierten Aufruf einer Funktionsinstanz (parametrisierter Funktionsblock) von einer übergeordneten Ebene gesteuert werden. Zur expliziten Steuerung kann z.B. ein vordefinierter Fahrplan für eine Leistungsbereitstellung durch eine DER ab einem vorgegebenen Zeitpunkt vom Controller abgefahren werden. Hierbei kann dies sowohl auf Geräteebene als auch auf der Ebene mehrerer

aggregierter DER stattfinden. Durch die regelbasierte Funktionsausführung ist auch im Falle eines Kommunikationsausfalls ein wertvoller Betrieb der technischen Anlage sichergestellt. Ein netzdienlicher Betrieb in Form von unterstützten Grid-Code-Funktionalitäten kann durch die automatische oder manuelle Aktivierung auf dem Anlagenverbund implementierter Steuerungsalgorithmen realisiert werden, welche physikalisch gemessene Größen als Steuerungsgrößen verwenden (zustandsbasierter Flexibilitätsabruf, z.B. Q(U) Regelung mit Steuerungsgröße U am Anschlusspunkt). Ist ein solcher Algorithmus auf der Anlage implementiert und geeignet konfiguriert, kann er auch Offline basierend auf vorkonfigurierbaren Ereignissen (z.B. Grenzwertüberschreitung) ausgeführt werden und trägt somit zur Erhöhung der Resilienz bei. Durch ihre Konfigurier- sowie ihre Aktivier-/Deaktivierbarkeit liefern solche Algorithmen Verteilnetzbetreibern einen Flexibilitätsbeitrag hinsichtlich der Netzstabilität.

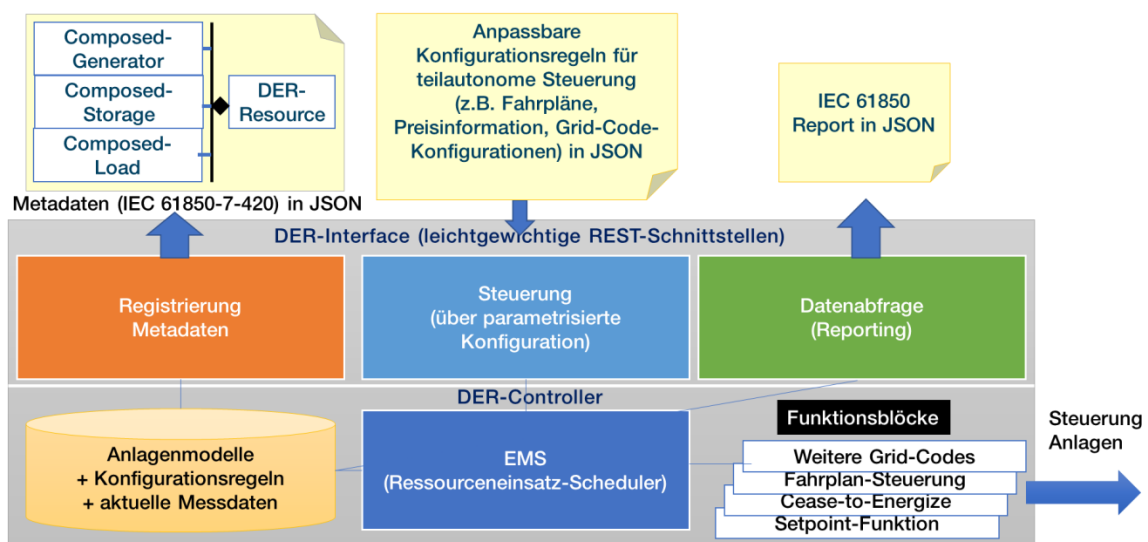


Abbildung 6: Aufbau des Kommunikationskonzeptes

Mit Hilfe der im zentralen DER-Controller hinterlegten Beschreibung der technischen Kenngrößen (z.B. Nennwerten, und andere limitierende Vorgaben) von Anlagen kann dieser Rahmenbedingungen für den Flexibilitätseinsatz bestimmen und externen Nutzern bereitstellen. Hiermit liefert er Aggregatoren oder Verteilnetzbetreibern Informationen, innerhalb welcher Grenzen eine Flexibilitätsbereitstellung möglich ist. Prozessdaten und Statusmeldungen können ebenfalls datensparsam als Report im JSON-Format abgefragt und für die Analyse und weitere Planung verwendet werden. Der zentrale DER-Controller eines Anlagenverbundes abstrahiert und aggregiert dabei die Wirkung des Anlagenverbundes (Zelle) und kommuniziert die möglichen Steuerungsoptionen des gesamten Anlagenverbundes oder der Zelle aggregiert an eine übergelagerte Instanz.

3.4 Schnittstellen Zur Flexibilitätsbereitstellung durch das District FRANKLIN

Für das Stadtquartier FRANKLIN wird ein Quartiers-Energiemanagementsystem durch den Subauftragnehmer ABB mit der Lösung OPTIMAX implementiert (vgl. AP 5.5 und UAP 7.8). Diese Lösung bestimmt auf Grundlage von Prognosen sowie von historischen und aktuellen Messwerten der einbezogenen Anlagen im Quartier sowie der Interaktion mit den Sub-Energiemanagementsystemen in den Gebäuden die nach vorrangigem Betrieb des Wärmenetzes verbleibende Flexibilität im Stromsystem. Die verbleibende Flexibilität wird als Leistungskurve an ein Flexibilitätsinformationssystem übergeben. In diesem Informationssystem steht die Leistungskurve als Bereitschaft zur Lieferung von Flexibilität für verschiedene Vermarkter parallel zur Verfügung. Wenn eine entsprechende Vermarktung zu Stande gekommen ist, wird die Flexibilitätsinformation wieder gelöscht. Somit kann die Flexibilität auf parallel existierenden Märkten angeboten werden. Im ersten Schritt erfolgt die Vermarktung durch den MVV-Handel am Regelenergiemarkt. Um interoperable Prozesse mit verschiedenen Vermarktern zu ermöglichen soll für die zu liefernde Flexibilitätsinformation ein gemeinsames Flexibilitätsmodell sowie ein Kommunikationsprofil für Flexibilität zusammen mit den Projektpartnern erarbeitet werden.

3.5 Abstrakte Modellierung Von Flexibilität

Nicht immer reicht es auf Flexibilität über Korridore oder DER-Komponenten zu beschreiben. Beispielsweise, wenn technologieagnostisch das annähernd volle Flexibilitätspotential beschrieben oder Privatsphäre gewahrt bleiben soll. In der Literatur finden sich verschiedene Machine Learning basierte Ansätze zur Modellierung von Flexibilität. Dazu gehören Ansätze auf Basis von Support Vector Machines, Klassifikator-Kaskaden und Künstlichen Neuronalen Netzen. Das Vorgehen zur Nutzung solcher Modelle stellt sich wie in Abbildung 7 aus Förderer et al. (2018) dar:

Zunächst wird lokal ein Modell erzeugt/trainiert (1), dann zusammen mit den notwendigen Parametern an den Flexibilitätsanwender (in der Grafik „Demand Side Manager“) kommuniziert (2) und zuletzt von diesem für die spätere Verwendung gespeichert (3).

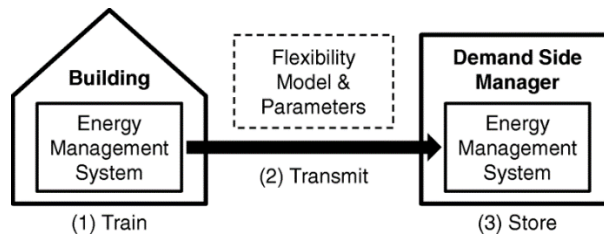


Abbildung 7: Erstellen und Kommunizieren des Modelles. Quelle: Förderer et al. (2018)

Sobald nun ein Abruf der Flexibilität erfolgen soll, fragt der Flexibilitätsanwender (falls notwendig) aktuelle Zustandsgrößen ab. Mittels des gespeicherten Modells und den Parametern, sowie der Zustandsgrößen kann der Flexibilitätsanwender nun ein valides Signal bestimmen welches dem Flexibilitätsanbieter übermittelt wird.

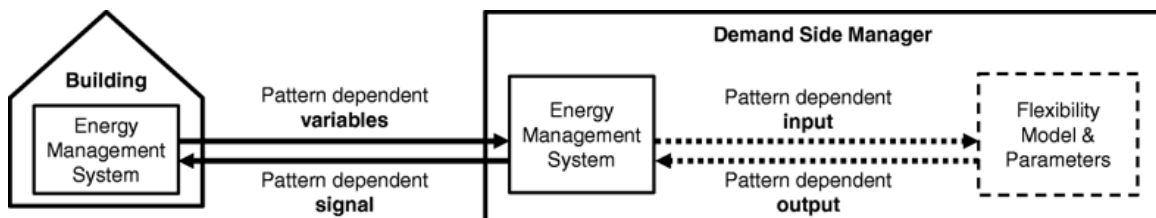


Abbildung 8: Bestimmung eines Signals zum Abruf von Flexibilität. Quelle: Förderer et al. (2018)

In Förderer et al. (2018) sind verschiedene Muster hierfür beschrieben. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes basiert auf der Idee Markov Modelle der Systeme mit Hilfe eines Klassifikators und einer Zustandsprognose lernbar zu machen (Förderer & Schmeck 2019):

Ausgehend vom Ausgangszustand werden mittels Klassifikator alle zulässigen Aktionen (z.B. laden oder entladen einer Batterie) ermittelt. Diese kann dann mittels einer Abbildung (Action Mapping) bewertet werden, beispielsweise anhand der entstehenden Gebäudelast. Die präferierte Aktion wird dann vom Flexibilitätsanwender ausgewählt. Mittels der Zustandsprognose kann dann der erwartete neue Zustand bestimmt und die nächste Iteration begonnen werden. Für nähere Details sei auf (Förderer & Schmeck 2019) verwiesen.

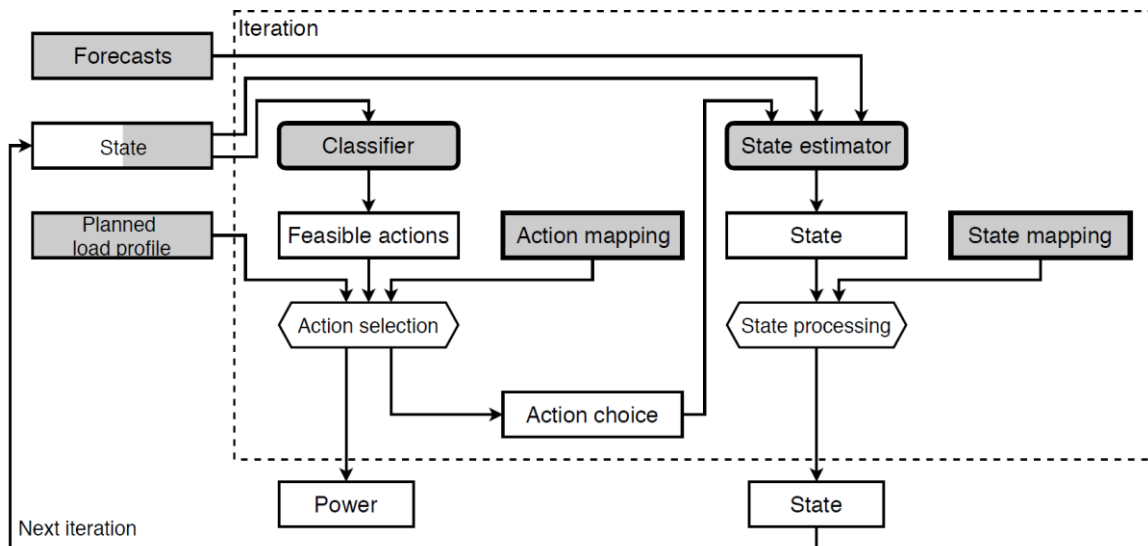


Abbildung 9: Iterative Bestimmung eines Lastprofils zum Abruf von Flexibilität. Quelle: Förderer & Schmeck 2019.

Weiterführendes Wissen zur Bedeutung von Aktionen oder der kommunizierten Zustandsdaten ist für den Flexibilitätsanwender nicht notwendig. Zur Findung optimaler Lösungen eignen sich aufgrund der Struktur insbesondere Markovsche Entscheidungsprozesse, aber auch das eng verwandte Reinforcement Learning. Auch Evolutionäre Algorithmen könnten eingesetzt werden. Es sei außerdem angemerkt, dass der in Abbildung 9 dargestellte Prozess vereinfacht werden kann, beispielsweise indem der Aktionenraum in den Zustandsraum eingebettet wird. Die Abbildung stellt lediglich den ausführlichen, generischen Fall dar.

3.6 Schnittstellen Zur Direkten und Indirekten Flexibilitätsbereitstellung

Zur Bereitstellung von Flexibilität an höhere Koordinationsebenen wurde in der realen Laborumgebung Energy Smart Home Lab (ESHL) auf dem Campus Süd des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), welche ein prototypisches, intelligentes Wohngebäude darstellt, eine Representational State Transfer (REST)-Schnittstelle implementiert. Über diese kann mittels der Übermittlung von JavaScript Object Notation (JSON) Dateien sowohl explizit die Möglichkeit zur Flexibilitätsbereitstellung signalisiert, als auch direkt und indirekt Flexibilität vom Gebäude abgerufen werden. Ein direkter Flexibilitätsabruf kann z.B. ein Steuerbefehl zur An- oder Abschaltung des im ESHL vorhandenen Blockheizkraftwerks sein. Ein indirekter Flexibilitätsabruf kann durch die Übermittlung von Preissignalen an das ESHL und die entsprechenden Fahrplanänderungen durch die Energiemanagementsoftware Organic Smart Home (OSH)

stattfinden, welche das ESHL steuert und eine Energiekostenoptimierung entsprechend der übermittelten Preissignale durchführt. Eine beispielhafte JSON-Datei, die von einer übergeordneten Kontrollebene an das ESHL gesendet werden kann, ist im Folgenden gezeigt:

```
[
  {
    "timestampLastChanged":1525434555,
    "activepowerexternal":{
      "1525420000": 12,
      "1525420600": 36,
      "1525421200": 20,
      "1525421800": 40
    },
    "timestampPublished": 1525434592
  }
]
```

Abbildung 10: JSON Darstellung eines indirekten Steuersignals mit variablen Strompreisen

Es werden hier sowohl ein Zeitstempel für die letzte Preisänderung, als auch ein aktueller Zeitstempel und vier neue Strompreise (zu verstehen als cent/kWh) inklusive der jeweiligen Startzeit übermittelt. Das OSH liest diese JSON-Datei aus und passt unter Berücksichtigung der Geräteeigenschaften und –zustände und der Nutzerpräferenzen den Verlauf des Energieverbrauchs so an, dass sich mit den neuen Preisen minimale Energiekosten für den Optimierungshorizont ergeben.

4 Bewertung der Flexibilitätsbereitstellung

In diesem Kapitel wird beschrieben in welchen Piloten die zuvor beschriebenen Konzepte zur Anwendung gebracht wurden und inwiefern diese in der Lage waren Flexibilitätspotentiale zu heben.

4.1 Bereitstellung von Flexibilität zwischen Zellen in Peer-2-Peer-Konzepten

4.1.1 BESCHREIBUNG DER BEISPIELLIEGENSCHAFT

In dieser Case Study wird untersucht, inwiefern der Handel zwischen Zellen durch Flexibilität beeinflusst wird. Dies wird am Beispiel des Flughafens Stuttgart und Wohngebieten betrachtet. Der Handel zwischen Zellen entspricht dem Konzept einer regionalen Handelsplattform, auf der die teilnehmenden Zellen untereinander Strom handeln können. Dabei ist Flexibilität kein explizites Produkt, sondern unterstützt eine möglichst effiziente Energiebereitstellung der teilnehmenden Zellen. Das eingesetzte Optimierungsmodell DISTRICT (Fraunhofer ISE 2019; Wanapinit et al. 2021) zielt dabei auf eine Kostenminimierung aller Zellen ab und betrachtet dabei den Betrieb in 15-minütiger Auflösung. Neben der Stromversorgung wird auch die lokale Wärmeversorgung betrachtet. Der untersuchte Handel ist rein strombasiert, da kein Fernwärmenetz vorliegt. Um eine Auswertung des Handels vornehmen zu können, werden unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der lokalen Preise betrachtet.

Als Liegenschaften dienen zum einen der Flughafen Stuttgart als gewerbliche Liegenschaft sowie zwei aggregierte Wohngebiete mit lokaler Erzeugung aus PV und kleinen BHKWs.

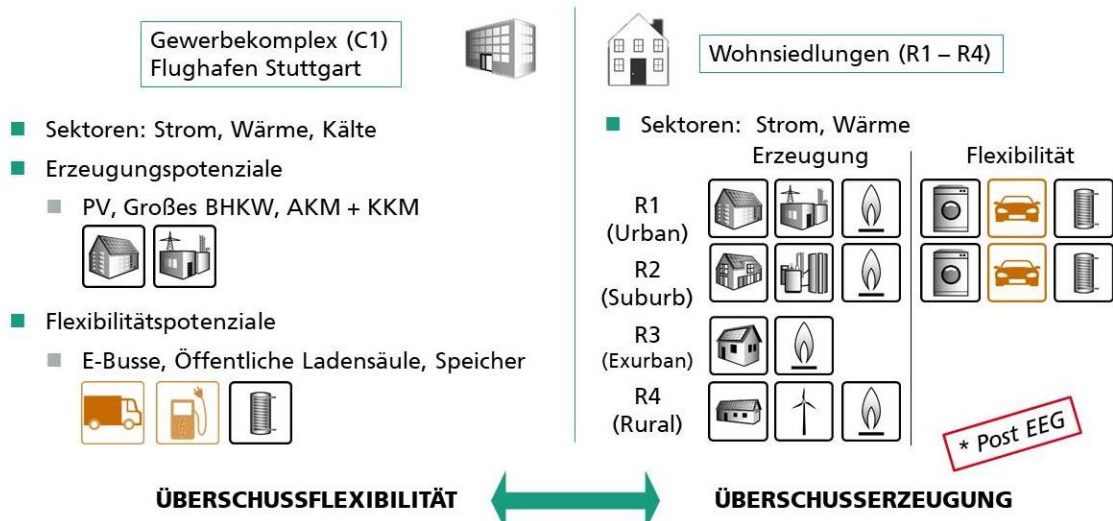


Abbildung 11: Bereitstellung von Flexibilität zwischen Zellen

Tabelle 5: Steckbrief Zelle Flughafen

Name	Flughafen Stuttgart
Lage	Die Zelle repräsentiert ein großes Gewerbegebiet mit Bedarf an Strom, Wärme und Kälte. Teilweise werden die Nachfragen von eigenen Erzeugungsanlagen - Photovoltaik und Blockheizkraftwerk - versorgt. Zudem verfügt das Gebiet über die theoretischen Flexibilitätpotenziale aus E-Mobilität, z.B. interne E-Busse und PKW.
Flexible Verbraucher	E-Mobilität sowie Wärme und Kälte mithilfe von thermischen Speichern
Erzeuger	Blockheizkraftwerk, Kompressionskältemaschine und Absorptionskältemaschine
Einsatzgebiet der Flexibilität	In der Arbeit wird ein marktdienlicher Flexibilitätseinsatz untersucht. In diesem wird die Flexibilität dabei genutzt, um die gesamte Nachfrage an die zeitvariablen Strompreise der Zelle anzupassen. Zudem wird es auch untersucht, wie die Flexibilität bei einer

	<p>lokalen Kooperation zwischen der Zelle und den benachbarten Wohnsiedlungen mit dem Stromüberschuss eingesetzt wird, damit die gesamten Kosten und der Stromimport der Kooperation reduziert werden.</p>
<p>Abschätzung des Flexibilitätpotentials</p>	<p>Das Blockheizkraftwerk (2MW) kann positive sowie negative Flexibilität bereitstellen. Deren Ausmaß ist jahreszeitlich bedingt, z.B. im Winter kann das BHKW während seines durchlaufenden Betriebs keine positive Flexibilität anbieten. Theoretisch können die schnellen und normalen Ladepunkten (SLP bzw. NLP) reichlich DSM-Flexibilität anbieten, deren Nachfrage in 2050 6 bzw. 26 GWh beträgt. Allerdings ist die Flexibilität der SLP wegen der kurzen Parkdauer (<2 Stunden vgl. mit mehreren Tagen für die NLP) sehr begrenzt, ohne die von Nutzern erwartete Aufladung zu beeinträchtigen.</p>

4.1.2 BESCHREIBUNG FLEXIBILITÄTSERSCHLIEßUNG

Im Modell DISTRICT werden Flexibilitäten innerhalb einer Liegenschaft sowie die Bereitstellung von Flexibilität für eine andere Liegenschaft betrachtet. Ersteres kann grundsätzlich mit variierender Detailtiefe geschehen, von der Haushaltsebene bis zu aggregierten Liegenschaften. Aufgrund der anderen Arbeiten in C/Sells wurde entschieden, die Flexibilität auf der aggregierten Ebene der Liegenschaft zu betrachten, um sich zusätzlich das Potenzial eines möglichen Handels zwischen Liegenschaften für die Flexibilitätsbereitstellung und –nutzung zu analysieren. Dafür werden die Flexibilitäten im Sinne der Verschiebung, Reduktion oder Erhöhung der Stromerzeugung oder –nachfrage für die Liegenschaft aggregiert modelliert, d.h. jede Liegenschaft hat eine bestimmte Kapazität je Erzeugungstyp und Nachfrage. Aufgrund der Intersektoralität von DISTRICT kann zusätzlich die Flexibilität aus Sektorkopplungstechnologien wie BHKWs, Wärmepumpen oder E-Mobilität abgebildet werden. Der Austausch von Strom erfolgt leitungsgebunden, d.h. zwischen Liegenschaften, die eine Netzverbindung haben, können Strom oder Wärme gehandelt und physisch ausgetauscht werden. Die Optimierung strebt eine Kostenminimierung an, sodass die Liegenschaften sich möglichst günstig mit Energie versorgen.

4.1.3 POTENTIALE UND ERKENNTNISSE

Die Ergebnisse zeigen, dass ein lokaler Peer-to-Peer Handel von einer heterogenen Zusammensetzung der Liegenschaften profitiert. So zeigt der Handel zwischen gewerblichen und Wohngebieten einen größeren Nutzen als der reine Handel zwischen Wohngebieten. Die Flexibilitätsnutzung kann damit durch eine Zusammenstellung von Gruppen mit unterschiedlichen Lastkurven sowie einer Vielfalt von Erzeugungstechnologien deutlich erhöht werden gegenüber homogenen Nachfrage- und Erzeugungstypen. Ein lokaler Austausch verbessert die Kosten der Liegenschaften bereits, wenn die Nachfrage als inflexibel

Weiterhin erfolgte eine Betrachtung unterschiedlicher Preisansätze. Diese zeigt, dass der gewählte Mechanismus für den lokalen Preis einen erheblichen Einfluss auf die Flexibilitätsnutzung und -bereitstellung der einzelnen Zelle hat. Es wurden zwei in der Literatur vorgeschlagene Preismechanismen verglichen, bei denen die Preise für den lokalen Handel im Voraus anhand der prognostizierten Nachfrage und Erzeugung bestimmt werden. Dabei zeigt sich, dass die Beteiligung der Liegenschaften am lokalen Handel sowie der Nutzen des lokalen Handels von Strom und damit auch Flexibilität stark vom Preismechanismus abhängig ist. Während der eine zu einer gleichmäßigen Beteiligung aller führt, führt der andere Mechanismus zu einer deutlichen Verschiebung hin zu einer sehr hohen Beteiligung der gewerblichen Liegenschaft und einer Reduktion bei den Wohngebieten. Daher empfiehlt es sich, vor der Implementierung die Zusammensetzung von Handelsgruppen, die Zielsetzung und dafür geeignete Preismechanismen noch genauer zu analysieren. Anderenfalls kann es zu nicht erwünschten Effekten wie der überproportionalen Beteiligung einzelner Handelspartner kommen. Weiterhin ist an der Fallstudie zu sehen, dass die heterogene Zusammensetzung beim Zusammenschluss von Zellen deutliche Vorteile bringt. Eine große Gruppe homogener Zellen profitiert deutlich weniger vom C/Sells Konzept als eine Gruppe heterogener Zellen. Eine detailliertere Analyse kann Wanapinit & Thomsen (2020) entnommen werden.

4.2 Zelle Franklin

Die Konversionsfläche FRANKLIN in Mannheim bietet die Möglichkeit, eine Energiezelle zu bilden. Im FRANKLIN-Quartier simuliert und testet die MVV das Energiesystem der Zukunft, indem die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität miteinander verknüpft werden. Die Digitalisierung liefert hierfür die notwendigen Werkzeuge: Eine Smart Infrastructure Plattform wird implementiert, um die verschiedenartigen Infrastrukturkomponenten im Quartier miteinander zu verbinden – wie Energieanlagen, intelligenten Messsystemen und Applikationen (siehe Abbildung 12).

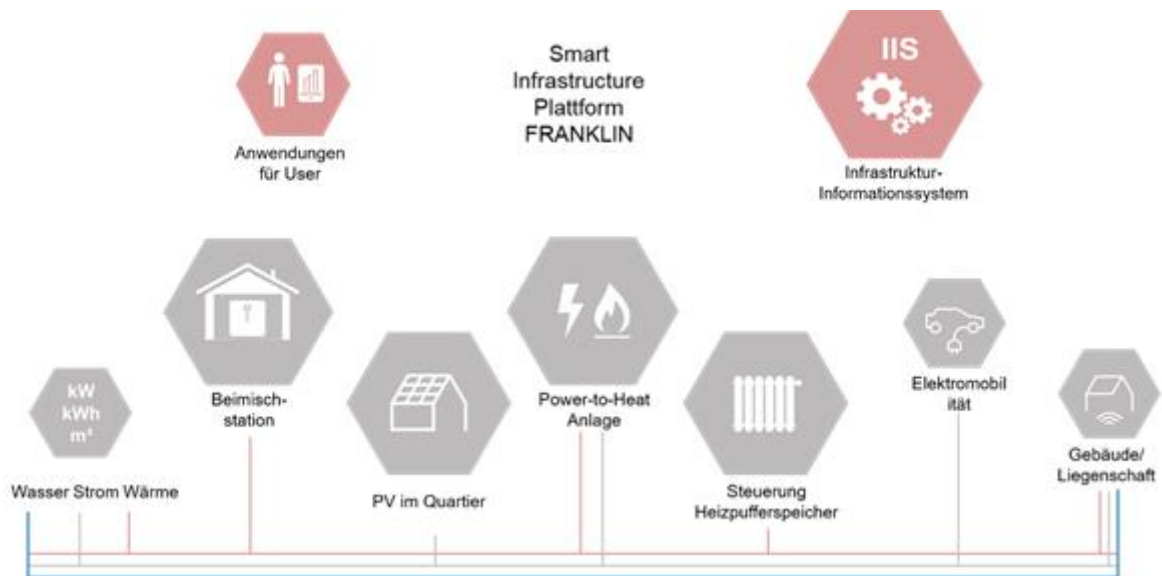


Abbildung 12: Zweistufiges Systemkonzept von Energiezellen in Franklin mit eingebetteten Gebäude-Energiesystemen

Eine Grundlage für die Optimierung des Quartiers ist das flächendeckende hochaufgelöste Smart Metering: Es schafft messtechnische Transparenz nahezu in Echtzeit und ermöglicht so nicht nur, dass Flexibilitätspotenziale erkannt werden, sondern auch ein intelligentes Monitoring. Die Energieflüsse werden zudem für die Endkunden sichtbar gemacht. MVV schafft die Basis für ein modernes, zukunftsweisendes Quartier, indem sie Mehrwertdienste und innovative Dienstleistungen anbietet.

Mit dem Ziel, Flexibilitätspotenziale zu untersuchen, baut MVV die moderne Ladeinfrastruktur für Elektromobile aus und schafft eine smarte Wärmезelle. Mit letzterer soll gezeigt werden, wie Wärme aus regenerativen Quellen vor Ort sinnvoll eingebunden und genutzt werden kann; Beispiele sind eine mit Photovoltaik gekoppelte Power-to-Heat Anlage oder die situationsangepasste Steuerung der Wärmeaufnahme in Heizpufferspeichersysteme.

Der **zellulare Ansatz** in C/sells wird im Rahmen der Stadtquartiersentwicklung Franklin in Mannheim mit einem zweistufigen Konzept der Organisation von Energiezellen im Sektorenverbund von Elektrizität und Wärme umgesetzt. Als Infrastrukturentwickler für Franklin schafft die MVV Energie AG damit eine Musterlösung, die für das Projekt C/sells und darüber hinaus beispielgebend ist.

Im Rahmen der umfangreichen Themen zur Entwicklung dieser Infrastruktur legt die MVV innerhalb des Arbeitspaketes 7.8 des Projektes C/sells den Fokus auf die Prozesse zum lokalen Energiemanagement in der Liegenschaft sowie zur Marktintegration von Energieüberschüssen und Flexibilitäten aus der Energiezelle Franklin (Musterlösung zur Grünphase im Ampelmodell der Markt-/Netzabstimmung) als auch auf die Ermöglichung eines autarken Notbetriebes innerhalb von Franklin bei externem Netzausfall (Musterlösung zur Blauphase im Ampelmodell der Markt-/Netzabstimmung).

Das zweistufige Konzept für die Umsetzung von Energiezellen in TP 7 basiert auf der Errichtung

- der in Abbildung 12 vereinfachend abgebildeten **Energieinfrastruktur** als autonom geregelte Energiesysteme
 - im Quartier und
 - in integrierten Gebäuden
- sowie einer im Quartier angesiedelten „Smart Infrastructure Plattform“, die auch als IoT-Plattform (Internet of Things) bezeichnet wird, wobei diese Umgebung wiederum in folgende zwei Ebenen gegliedert wird:
 - unterstützende **Informationsinfrastruktur** (zellbezogenes **Infrastruktur-Informationssystem**) sowie
 - Komponenten zum **lokalen Energiemanagement** zur effizienten Organisation der Energieflüsse im Quartier zuzüglich lokaler Energiemanagementsysteme in den Gebäuden.

Diese zweistufige Energiesystem wird in der Weise geregelt, das im ersten Schritt von unten nach oben Gebäude-Energiemanagementsysteme Energieüberschüsse und Flexibilität sowie hochwertige Systemdienstleistungen im Stadtquartier bereitstellen können. Die Smart Infrastructure Plattform nutzt diese zusätzliche Flexibilität der Gebäude in Verbindung mit den direkt im Stadtquartier gesteuerten Anlagen (PV-Anlagen, Power-to-Heat-Anlagen, Heizpufferpeicher, Ladepunkte der Elektromobilität sowie Beimischstationen), um im Verbund von Strom und Wärme die Energieflüsse im Stadtquartier effizient und damit kostengünstig bei Nutzung erneuerbarer Energien zu regeln. Grundlage für dieses Systemkonzept ist im Quartier eine breite Durchdringung mit hochauflösendem Monitoring von Verbrauchsdaten (High Resolution-Monitoring; HR-Metering).

Schlussendlich können Energieüberschüsse und Flexibilitäten des Stadtquartieres durch die Gestaltung einheitlicher Prozesse und Schnittstellen auch über verschiedene regionale und überregionale Handlungsmöglichkeiten an Markt- und Netzakteure vermarktet werden. Dies unterstützt das C/sells-Ziel zur Erschließung neuer **Handlungsräume** unter **Partizipation** vielfältiger Akteure, hier insbesondere unter Beteiligung der **Vielfalt** von Bewohnern und Nutzern des Stadtquartieres. Ebenso kann die zellulare Ausgestaltung den zellularen Netzbetrieb unterstützen und ist somit auch Beitrag zur lokalen Versorgungssicherheit, was aber nicht im Fokus des AP 7.8 steht.

Im Use Case Wärmeflexibilität in der Zelle Franklin wird das Nahwärmenetz des Quartiers Franklin soll als Niedertemperaturfernwärmenetz (VLT ca. 70°C, mind. 65°C) konfiguriert werden und primär Wohngebäude versorgen. Im Zuge des Projektes soll zum einen untersucht werden, inwieweit eine mit PV-Strom gespeiste dezentrale Wärmepumpe zur Temperaturhaltung (mind. 65°C) beitragen kann und zum anderen welche Flexibilitäten nutzbar werden. Darüber hinaus soll eine Aussage bzgl. der Verbesserung des PEFs getroffen werden.

Durch die Steuerung der Heizpufferpeicher in Wohngebäuden durch bezugsoptimiertes Laden sollen die Verluste reduziert werden, wodurch die Ökologie des Wärmesystems steigt. Die Steuerung kann sich zudem am Anteil/Grad „grüner“ Fernwärme/Flexibilität orientieren (siehe 7.8.1 mit Integration System aus PV und WP ans Nahwärmenetz).

Weitere Flexibilität im Stromnetz wird mit der aufzubauenden Ladeinfrastruktur sowie mit der Interaktion vom Quartiers-Energiemanagementsystem sowie den Sub-Energiemanagementsystemen in Wohngebäuden erschlossen. Die Anbindung der sich in diesen Rahmen im Quartier sowie in den Wohngebäuden befindenden Geräte und Anlagen soll auch über interoperable Prozesse und Schnittstellen sowie die Nutzung sicherer Zugangswege unter Einsatz intelligenter Messsysteme erfolgen.

4.3 Demonstrationszelle Kirchhain-Stausebach

In der Demonstrationszelle Kirchhain-Stausebach wird das Biomassezentrum Stausebach u. a. durch den Einsatz von hochflexiblen BHKW zu einer intelligenten Liegenschaft ausgebaut. Vor allem die Kopplung der Sektoren Strom und Wärme trägt hier zur Flexibilitäterschließung eine Rolle. Es werden sowohl die Flexibilitätpotenziale der Wärmenetze, der am Nahwärmenetz angeschlossenen Gebäude als auch des Anlagenportfolios, bestehend aus den hochflexiblen BHKW, Speichern und Heizkesseln analysiert. Über den Einsatz der Energiemanagementsoftware microSCOPE werden die Anlagenfahrpläne optimiert und über das IEE.vpp die optimalen Fahrpläne an die Anlagen in der Demonstrationsphase geschickt. Zum einen sollen die Anlagen den produzierten Wärmebedarf des Nahwärmesystems bzw. von einzelnen Gebäuden oder Gebäudeensembles decken. Zum anderen soll die Stromerzeugung an dem regionalen Flexibilitätsmarkt, der im Rahmen des Projektes im Netzgebiet der EAM entsteht, in Verbindung mit bestehenden Märkten optimiert werden.

4.3.1 BESCHREIBUNG DER BEISPIELLIEGENSCHAFT

Am Biomassezentrum (BMZ) Stausebach wird Biogas erzeugt, zu Biomethan aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist. Aktuell wird ein Nahwärmenetz erschlossen, wodurch Haushaltskunden im Ort Stausebach sowie weitere Liegenschaften in Kirchhain durch das BMZ mit Wärme versorgt werden sollen. Im Rahmen dieser Erweiterung soll das das BMZ zu einer intelligenten Liegenschaft ausgebaut werden.

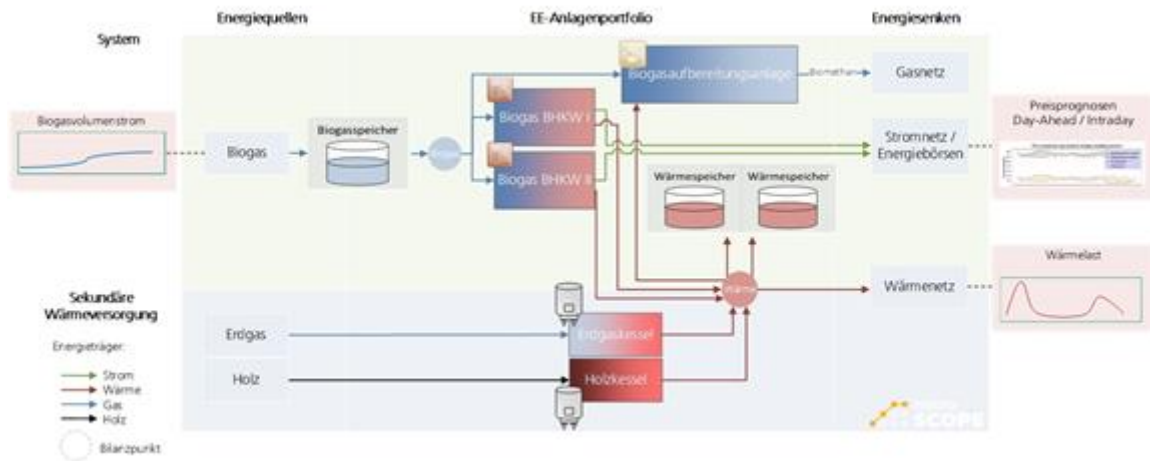


Abbildung 13: Abbildung des Energiesystems des Biomassezentrums Stausebach

Um das Nahwärmenetz als Flexibilitätsoption für den Stromsektor zu aktivieren, müssen Technologien zur Sektorenkopplung von Strom und Wärme eingesetzt werden. Geeignete Optionen stellen hochflexible BHKW sowie Power-to-Heat-Technologien dar. Zur bedarfsorientierten Verstromung und um den Wärme- und den Strombedarf voneinander zu entkoppeln, sind Gas und Wärmespeicher notwendig.

Tabelle 6: Steckbrief Stausebach

Name	Biomassezentrum Stausebach
Lage	Kirchhain/Stausebach (Hessen)
Flexible Verbraucher	Biomassezentrum: Biogasaufbereitung Wärmenetz: 75°C Vorlauf, 50°C Rücklauf, 80 m ³ , Last max. 3.7 MW, 5000 MWh/a Wärmespeicher: 120 m ³
Erzeuger Erzeuger	Flexible BHKW
Einsatzgebiet der Flexibilität	Deckung der Wärmelastspitzen Glättung der Erzeugungslasten Vermarktungsoption Bereitstellung von Systemdienstleistungen
Abschätzung des Flexibilitätspotentials	0,5 MWh (Wärmenetz)

4.3.2 BESCHREIBUNG FLEXIBILITÄTERSCHLIEßUNG

Um das Wärmenetz zur Flexibilisierung der BHKWs zu ertüchtigen, ist zunächst eine Wärmebedarfsanalyse und bei neuen Netzen darauf aufbauend die Auslegung des Netzes durchzuführen. Die für Stausebach durchgeführten Analysen zeigen hierbei, dass eine wirtschaftlich effiziente Auslegung des Wärmenetzes zu eher geringen Rohrdurchmessern führt, was die Wärmeverluste und Baukosten deutlich verringert, aber auch zu einer geringeren

Speicherfähigkeit im Netz führt. An den großen, zentralen Wärmespeichern muss mittels geeigneter Messtechnik (ausreichend Temperaturfühler in verschiedenen Höhen) und Software zuverlässig der Speicherzustand ermittelt werden.

Für die Demonstrationszelle wurde ein detailliertes dynamisches Wärmenetzmodell entwickelt und damit der flexible Betrieb untersucht. Diese Detail-Untersuchung ist notwendig, wenn das Netz selbst flexibel betrieben werden soll, indem Netztemperaturen gezielt geändert werden oder Abnehmer hochflexibel zu- und abgeschaltet werden. Aus den Ergebnissen kann das Flexibilitätspotential und die dazugehörigen Betriebsstrategien, sowie Maßnahmen zur Vermeidung unerwünschter Nebeneffekte des flexiblen Betriebs abgeleitet werden. In der Demonstrationszelle wird der Ansatz verfolgt, diese Ergebnisse zu abstrahieren und vereinfacht im Energiemanagementsystem zu berücksichtigen, sodass keine aufwändige dynamische Netzsimulation im live-Betrieb notwendig ist.

Für die gezielte Nutzung der Speicherfähigkeit des Netzes ist eine zuverlässige Steuerung der Netz-Vorlauftemperatur nötig (meist ohnehin vorhanden, da Vorlauf-Temperaturfahrkurven in Abhängigkeit des Lastzustandes angewendet werden). Optional können steuerbare Bypässe am Ende von Netzsträngen vorgesehen werden, die ein Aufladen des Netz-Rücklaufs ermöglichen.

Für die in Kapitel 4.3.1 dargestellte Beispielliegenschaft konnten drei Segmente zur Flexibilitätserschließung identifiziert, die sich auf die Bereiche des Brauchwarmwasserspeichers, die Kombination von Brauchwarmwasserspeicher und Pufferspeicher, sowie die Kombination Brauchwarmwasser-, Pufferspeicher und Aktivierung der Gebäudemasse beziehen.

Die Flexibilitätserschließung mittels Luft-/Wasser Wärmepumpen mit integrierten Nachheizern könnte dabei, je nach Anlagen-, Wärmepumpensteuerung und Erweiterungsmodule, über zwei Kommunikationswege erfolgen. Eine Möglichkeit könnte die Ansteuerung über die etablierte SG-Ready-Schnittstelle mit 4 Schaltzuständen oder ein digitaler Kommunikationsweg über Modbus TCP/IP und einem herstellerspezifischen Kommunikationsmodul darstellen.

Zur Steuerung und Simulation der Anlagen wird die Energiemanagementsoftware microSCOPE des Fraunhofer IEE eingesetzt und weiterentwickelt. Neben der Einsatz- und Fahrplanoptimierung von Anlagenportfolios, bietet es als Managementsystem im operativen Betrieb die Möglichkeit zur Steuerung einzelner und mehrerer Anlagenportfolios. So können die Flexibilitätspotenziale ermittelt und die Fahrpläne an die Anlagen in der Demonstration gesendet werden. Die Flexibilitätserschließung findet vor allem durch den Einsatz von Energiespeichern statt (Wärmespeicher, Brennstoffspeicher) oder auch durch Heizkessel. Die optimale Fahrweise der Anlagen ergibt sich hierbei durch unterschiedliche Restriktionen, wie der Deckung des Wärmebedarfes und der wirtschaftlichen Optimierung durch Vermarktung des Stroms an den Strommärkten. Hierzu werden aktuelle und zukünftige wirtschaftlichen Anreize untersucht, die Marktprozesse und sonstige Regelungen abgestimmt und auf den Simulationsablauf übertragen.

4.3.3 POTENTIALE UND ERKENNTNISSE

Das Flexibilitätspotential durch Variation der Vorlauftemperatur des Wärmenetzes ist ohne großen Aufwand nutzbar, aber eher gering (im Use Case Stausebach Größenordnung 0,5 MWh)

und nicht beliebig abrufbar (abhängig von der aktuellen Last, dabei ist die Einspeicherleistung typischerweise höher als Ausspeicherleistung). Die Effizienz der Speicherung im Netz ist dabei hoch, sinkt aber mit steigender Verschiebungsdauer (Zeit zwischen Einspeicherung und Ausspeicherung). Bei einer Verschiebungsdauer von 3 h ergeben sich im Use Case Stausebach Speicherwirkungsgrade in der Größenordnung 95 %. Deshalb ist diese Art der Flexibilisierung gut geeignet für kurze Lastverschiebungen in geringem Umfang. Sie kann aber andere Flexibilitätsoptionen wie größere Wärmespeicher nicht ersetzen.

Zusätzlich wurden die Auswirkungen der Betriebsstrategien auf das Wärmenetz untersucht, um unerwünschte Nebeneffekte zu ermitteln und zu vermeiden: Die Simulationen zeigen zum Beispiel, dass der hochflexible Betrieb des Netzstrangs zu den öffentlichen Liegenschaften mit Stillstandszeiten bis zu 16 h und darauf folgender hoher Wärmeabnahme zu ungewollten Lastspitzen am Erzeuger führt, die bis zu das doppelte der tatsächlichen Last betragen können. Dies kann durch ein Vorspülen des Netzes oder das Einhalten einer relativ geringen Mindestlast vermieden werden. Bei der Flexibilisierung der Vorlauftemperatur ist darauf zu achten, dass die mechanischen Belastungen für das Netz nicht zu groß werden und Schäden verursachen. Dies kann durch eine Limitierung der Temperaturerhöhung, die dabei nicht sprunghaft, sondern über gewissen Zeitraum erfolgt, erreicht werden.

Für die in Stausebach, ländlich geprägte Gebäudestruktur, erfolgte zunächst die Ableitung der Gebäudeeigenschaften (Wand- und Dachaufbau, U-Werte, etc.) in Anlehnung an die Wohngebäudetypologien nach Institut Wohnen und Umwelt GmbH IWU (2012, 2015), sowie die Verortung, Verwendung und Eigenschaften der Anlagentechnik sowie der Wärmebereitstellungsanlage in Anlehnung an Institut Wohnen und Umwelt GmbH IWU (2010). Für neuere Gebäudetypen (Baualterklasse J) zeigt nachfolgende Tabelle die wichtigsten Eigenschaften.

Tabelle 7: Flexibilitätspotenziale verschiedener Gebäude

Name		Flexibilitätspotenziale Gebäude (Baualterklasse J)
Spezifischer Heizwärmebedarf	[kWh/(m ² a)]	78.8
Heizlast	(inkl. Trinkwarmwassererwärmung) [kW]	17
Pufferspeichervolumen	[dm ³]	750
Warmwasserspeichervolumen	[dm ³]	160

Aufbauend auf den Eigenschaften erfolgte die Ermittlung von strombasierten Wärmebereitstellungsanlagen bestehend aus einer Luft-/Wasser Wärmepumpe und einem Nachheizer.

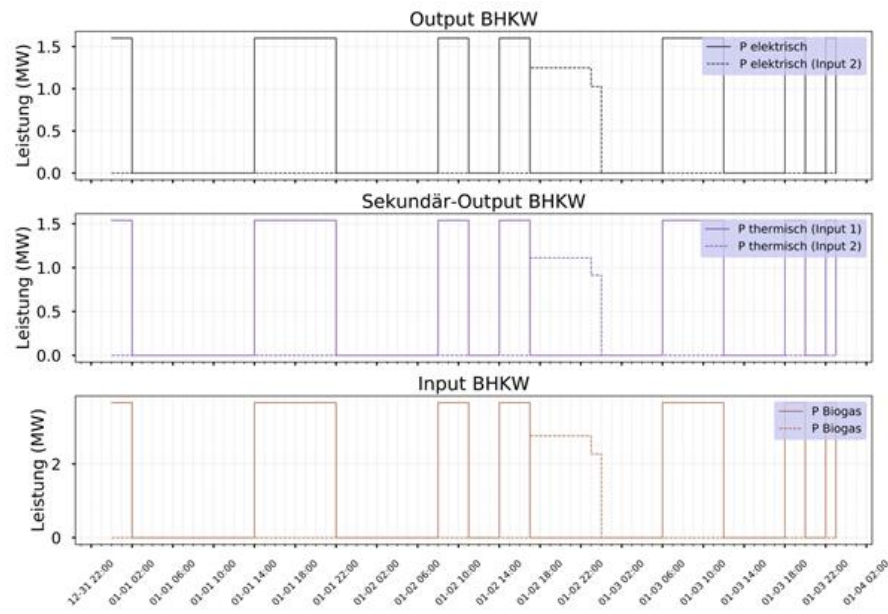


Abbildung 14: optimierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung des BHKW

Abbildung 14 zeigt einen beispielhaften Fahrplan für das Biomassezentrum Stausebach. In der Einsatzoptimierung wurden die wichtigsten (geplanten) Anlagen des Biomassezentrums berücksichtigt, mit teilweise noch vereinfachenden Annahmen. Im oberen Teil „Output BHKW“ ist der optimierte Fahrplan für die Elektrizitätserzeugung dargestellt. Die folgende Wärmeleistungskurve „Sekundär-Output BHKW“ zeigt die Wärmeerzeugung der Anlage. Der zu erkennende Verlauf der Produktion ist analog zur oberen Darstellung, was auf die Gleichzeitigkeit der Wärmeauskopplung zur elektrischen Stromerzeugung zurückzuführen ist. Der zur Produktion benötigte Brennstoff wird in der unteren Darstellung „Input BHKW“ abgebildet.

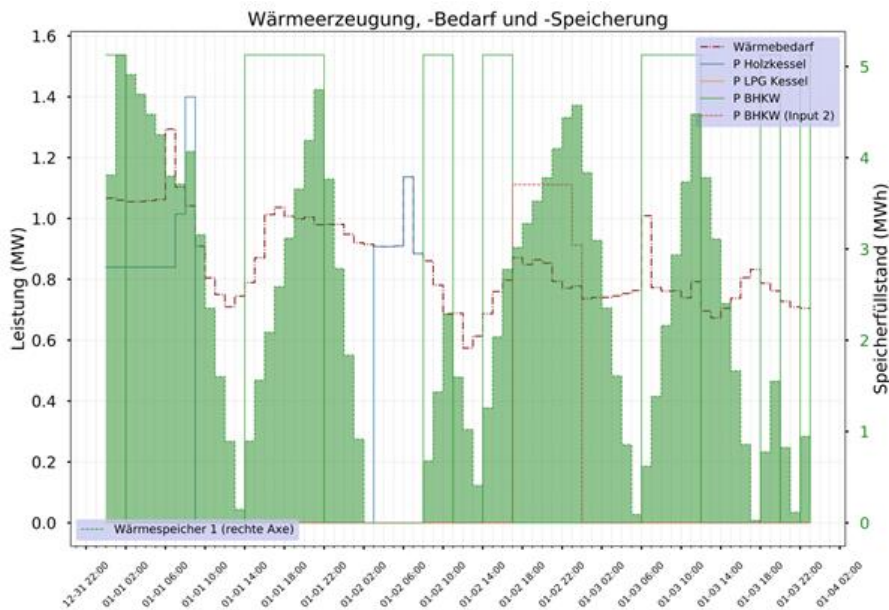


Abbildung 15: Wärmebedarf von Stausebach, Wärmeezeugung durch BHKW und Heizkessel und Speicherung

Abbildung 15 stellt einerseits den Verlauf des Wärmebedarfs von Stausebach nach den Berechnungen des Fraunhofer IEE für 3 Tage im Januar 2017 dar. Gleichzeitig wird die Wärmeezeugung durch das BHKW und die Heizkessel zur Deckung des Bedarfes gezeigt. Grün im Hintergrund ist der Füllstand des Speichers zu sehen. Die Wärmelastspitzen treten jeden Morgen um 7 Uhr auf. Hier ist an den ersten beiden Tagen das Heizkessel aktiv um die Wärmebereitstellung zu unterstützen. Der Speicher wird geladen während die Erzeugung von BHKW und Heizkessel über dem Wärmebedarf von Stausebach liegt. Gut zu erkennen ist, dass der Speicher tagsüber geladen wird und sich dann nachts wieder entlädt.

4.4 Energy Lab 2.0

Im Kontext des AP 7.6.5 „Speicherverbund Karlsruhe/Stuttgart“ wird das Energy Lab 2.0 am Campus Nord des KIT eine intelligent gesteuerte Zelle als energetischer Anlagenverbund (Distributed Energy Resouce, kurz DER), bestehend aus einer Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher, einer Elektrolyse- und Methanisierungsanlage mit Gasspeicher, einem thermischen Speicher mit Power2Heat-Anlage und verschiedenen lastflexiblen Bürogebäuden, bereitstellen.

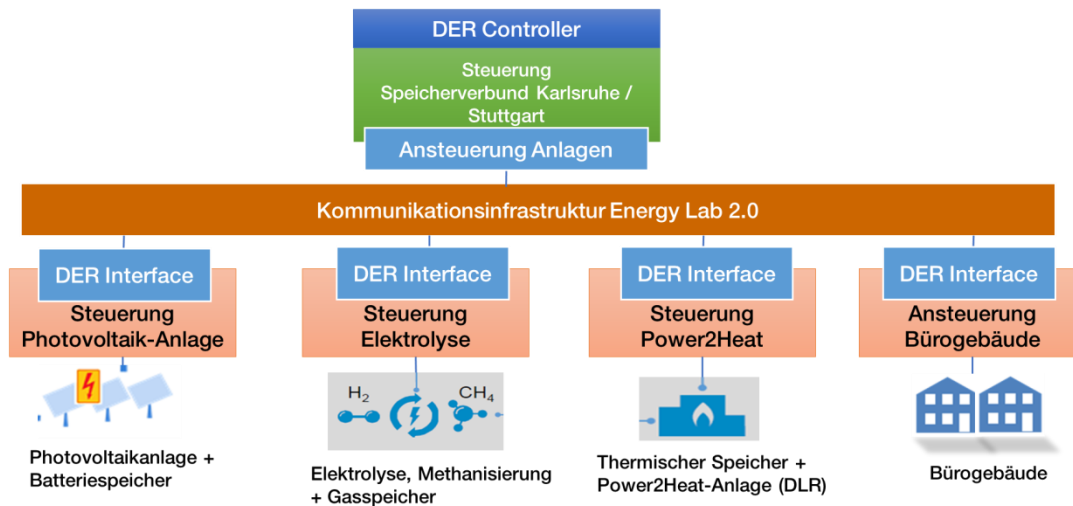


Abbildung 16: Aufbau des Speicherverbunds Karlsruhe/Stuttgart

Die grobe Struktur des Speicherverbundes insbesondere in Bezug auf die Ansteuerung zeigt Abbildung 16. Für eine übergeordnete Instanz, z.B. ein Verteilnetzbetreiber, stellt ein von außen erreichbaren, zentralen DER-Controller (in der Abbildung oben dargestellt) die zentrale Kommunikationsschnittstelle für die Bereitstellung und den Abruf von Flexibilität zur Verfügung. Der Speicherverbund wird so realisiert, dass die übergeordnete Instanz neben direkten Leistungsvorgaben hinsichtlich Verbrauch oder Erzeugung (explizite Steuerung) auch netzdienliches Verhalten (z.B. durch Implementierung ein-/ausstellbarer und konfigurierbarer „Grid Code“-Steuerungsalgorithmen) als Flexibilitätsbeitrag der Zelle abrufen kann. D.h. z.B., dass eine Q(U)-Regelung konfiguriert, aktiviert und deaktiviert werden kann. Die vom Anlagenverbund unterstützten „Grid Codes“ können durch die Aggregation von Funktionalitäten der Teilanlagen durch den zentralen DER-Controller des Anlagenverbundes umgesetzt werden, sodass die gesamte Zelle eine netzdienliche Flexibilität bereitstellen kann. Hierzu müssen die einzelnen Teilanlagen ebenfalls ein geeignetes Steuerinterface (DER Interface) bereitstellen.

Zur Bereitstellung und zum Abruf von Flexibilität der beschriebenen Zelle wird dafür ein Informations- und Kommunikationskonzept benötigt, dass die in Tabelle 8 gelisteten Anforderungen erfüllt.

Tabelle 8: Anforderungen an das Informations- und Kommunikationskonzept für den Speicherverbund Karlsruhe/Stuttgart

Nicht-funktional	Funktional
<ul style="list-style-type: none"> • IKT-Kommunikation sollte Resilienz erhöhen • Datensparsamkeit und Datenschutz • Einfache Erweiterbarkeit • Einfache Implementierbarkeit • Fachlich-ausgereiftes Informationsmodell basierend auf gängigen Standards 	<ul style="list-style-type: none"> • Explizite Steuerung (z.B. durch Fahrpläne) • Implizite Steuerung (z.B. durch Preissignale) • Netzdienliche Steuerung durch Aktivierung / Deaktivierung und Konfiguration vordefinierten Steuerungsverhalten • Authentifizierung und Autorisierung, Multi-Mandantenfähigkeit • Übermittlung von Prozess- und Monitoringdaten

Hierbei wird zwischen nicht-funktionalen und funktionalen Anforderungen differenziert. Im Bereich der nicht-funktionalen Anforderungen werden Themen adressiert, wie z.B. die Erhöhung der Resilienz durch den Einsatz von IKT in dezentralen Elektrizitätsnetzen, die durch die Struktur des Kommunikationskonzeptes implizit erfüllt werden. Grundlegende Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit, Akzeptanz und Ökonomie werden hier ebenfalls aufgeführt. Dem gegenüber stehen die funktionalen Anforderungen, die eine explizite Funktionalität, wie z.B. die Übermittlung von Prozessdaten oder eine netzdienliche Steuerung, beschreiben. Hier soll sowohl eine explizite (direkte Anweisung einer Leistungsänderung) als auch implizite (Vorgabe von Preissignalen) im Anlagenverbund umgesetzt werden. Des Weiteren soll eine netzdienliche Steuerung durch die Aktivierung / Deaktivierung standardisierter netzdienlicher Steuerungsalgorithmen ermöglicht werden, wobei diese auch flexibel konfigurierbar sein sollen. Schließlich soll der Controller multi-mandanten-fähig sein und hierfür auch ein geeignetes Authentifizierungs- und Autorisierungskonzept umsetzen. Des Weiteren soll die Kommunikationsschnittstelle Prozess- und Monitoringdaten übermitteln können.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Dokument wurde beschrieben, wie Liegenschaften als Zellen ausgeprägt werden können, die Flexibilität mit ihrer Umwelt austauschen und damit Dienstleistungen erbringen können. Flexibilität wird als Fähigkeit verstanden zum Nutzen von anderen verschiedene Handlungspfade in der Zukunft zu beschreiten und dennoch alle Anforderungen des lokale Energiemanagements zu erfüllen. Um Ordnung in die vielen unterschiedlichen Mechanismen zur Bereitstellung von Flexibilität zu bringen, wurde ein Ablaufmodell für und einer Kategorisierung von Flexibilitätsmechanismen vorgestellt. Zudem wurden die unterschiedlichen Anforderungen des Vermarktungsumfeldes der Zellen und verschiedener Liegenschaftstypen und regionaler Zellen diskutiert. Hieraus ergeben sich auch unterschiedliche Anforderungen für die Ermittlungen und Beschreibung von Flexibilität. Fünf hierfür entwickelte Modelle wurden in Kapitel 4 vorgestellt. Kapitel 4 zeigt, wie solche Modelle in Demonstratoren umgesetzt werden können, um Liegenschaften zu optimierten und vernetzen Zellen auszuprägen und Flexibilitätspotentiale zu heben. Insbesondere ist hervorzuheben, dass durch einer Kopplung von Strom-und-Wärme und ein Zusammenschluss möglichst diverser Zellen größere Flexibilitätspotentiale gehoben werden können.

Literaturverzeichnis

Deutsche Wohngebäudetypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden – zweite erweiterte Auflage- ; Institut Wohnen und Umwelt GmbH IWU; 10.02.2015

Application of Building Typologies for Modelling the Energy Balance of the Residential Building Stock – TABULA Thematic Report N°2 – TABULA; Institut Wohnen und Umwelt GmbH IWU; Februar 2012

Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand – IWU Dez.2010

Lehmann, N., Kraft, E., Duepmeier, C., Mauser, I., Förderer, K., & Sauer, D. (2019a). Definition von Flexibilität in einem zellulär geprägten Energiesystem. *Zukünftige Stromnetze 2019: 30./31. Januar 2019 in Berlin*, 459.

Lehmann, N., Huber, J., & Kießling, A. (2019b). Flexibility in the context of a cellular system model. In *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)* (pp. 1-6). IEEE.

Förderer, K., Ahrens, M., Bao, K., Mauser, I., & Schmeck, H. (2018, June). Towards the modeling of flexibility using artificial neural networks in energy management and smart grids: note. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems* (pp. 85-90).

Förderer, K., & Schmeck, H. (2019). State-based load profile generation for modeling energetic flexibility. *Energy Informatics*, 2(1), 18.

Fraunhofer ISE (2019). DISTRICT: Systementwicklung und Marktintegration von Wärme und Strom

Harder, N., Qussous, R., & Weidlich, A. (2020). The cost of providing operational flexibility from distributed energy resources. *Applied Energy*, 279, 115784. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115784

Mauser, I., Müller, J., Förderer, K., & Schmeck, H. (2017, November). Definition, Modeling, and Communication of Flexibility in Smart Buildings and Smart Grid. In *International ETG Congress 2017* (pp. 1-6). VDE.

Wanapinit, N., & Thomsen, J. (2020, September). Exploiting renewable energy and flexibility potential via local cooperation. In *2020 17th International Conference on the European Energy Market (EEM)* (pp. 1-6). IEEE.

Wanapinit, N., Thomsen, J., Kost, C., Weidlich, A. (2021). An MILP model for evaluating the optimal operation and flexibility potential of end-users. In *Applied Energy* 282, p. 116183. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116183.