

Definition von Flexibilität in einem zellulär geprägten Energiesystem

Nico Lehmann ^a, Emil Kraft ^a, Clemens Duepmeier ^b, Ingo Mauser ^c, Kevin Förderer ^d,
Dominique Sauer ^b

^a Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hertzstr. 16 - Gebäude 06.33 (Uni-West)

76187 Karlsruhe

Tel.: 0721-608-44573, Fax: 0721-608-44682

E-Mail: nico.lehmann@kit.edu

Internet: <http://www.kit.edu/>

^b Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI), KIT, Karlsruhe

^c Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB), KIT,
Karlsruhe

^d FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe

Abstract

Bereits existierende nationale und internationale Definitionen des Begriffs Flexibilität sind zu unpräzise und werden den Anforderungen, die sich bei der Beschreibung von Flexibilität innerhalb eines zellulären Energiesystems ergeben, nicht gerecht. Diese Arbeit benennt und definiert Flexibilitätsbegriffe, um ein gemeinsames Verständnis zu schaffen. Zunächst werden die technisch-ökonomischen Flexibilitätsbegriffe Fahrkurve, Flexibilitätsbereitstellung, Flexibilitätserbringung, Quantifizierbarkeit, Prognostizierbarkeit sowie explizite und implizite Flexibilität beschrieben. Im Anschluss werden Begriffe beschrieben, die mit der Ansteuerung und dem Abruf von Flexibilität einhergehen. Darunter fallen die aktive und passive Flexibilitätserbringung, der zustands- und kommunikationsgesteuerte Flexibilitätsabruf sowie der direkte und indirekte Flexibilitätsabruf. Zuletzt wird eine Unterscheidung anhand des Verwendungszwecks in system-, netz- und marktdienliche Flexibilität vorgenommen. Das Ergebnis sind exakte Begriffsdefinitionen und Begriffsabgrenzungen, auf deren Basis Flexibilitätsprodukte beschrieben und kategorisiert werden können, die für die Konzeption und Demonstration eines zellulären geprägten Energiesystems unabdingbar sind.

1 Einleitung

Das Projekt C/sells verbindet vielfältige Infrastrukturzellen intelligent zu einem Organismus, indem ökonomische mit technischen Rahmenbedingungen in Einklang gebracht werden, sodass ein nachhaltiges Wirtschaften und die Partizipation vielfältiger Akteure ermöglicht wird. Dabei wird der Solarbogen von Bayern im Osten über Baden-Württemberg bis nach Hessen im Nordwesten genutzt, um ein zellulär strukturiertes Energiesystem zu untersuchen und zu demonstrieren [1, 2].

Eine wesentliche Grundidee des Projektes ist, dass Zellen als Zusammenschluss von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern intern, d.h. innerhalb ihrer Grenzen autonom Entscheidungen fällen. Dabei können sie informatorisch und physisch über die Zellgrenzen hinweg nach außen mit der Umgebung verbunden sein. Im Energiesystem agieren die Zellen als wesentliche Bereitsteller von Flexibilität. Bisher haben vor allem konventionelle Einzelanlagen, die auf Hoch- bzw. Höchstspannungsebene angeschlossen sind, die Nachfrage nach Flexibilität am existierenden Intraday- und Regelleistungsmarkt befriedigt [3]. Durch den fortschreitenden Ausbau der erneuerbaren Energien sowie den anstehenden altersbedingten Marktaustritt von konventionellen Kraftwerken wird der Bedarf an Flexibilität und dessen Koordination zukünftig steigen [3]. Folglich ist eine Ausweitung des Nutzens von Flexibilität über die existierenden Märkte hinaus notwendig.

Flexibilität kann ganz allgemein aus zwei Blickwinkeln betrachtet und beschrieben werden. In einer externen Betrachtung beschreibt Flexibilität die Veränderbarkeit und Elastizität, also die Eigenschaft, durch äußere Einflüsse veränderbar zu sein, ohne irreversiblen Schaden zu nehmen. Die interne Betrachtung umfasst die Anpassungsfähigkeit und das Verhalten, also die Eigenschaft, sich selbst anpassen zu können und wollen. Diese beiden Blickwinkel werden bei den folgenden Definitionen von Flexibilität im Kontext Energie berücksichtigt, da Flexibilität sowohl durch extrinsische als auch durch intrinsische Motivation bzw. Anreize durch Zellen bereitgestellt und abgerufen werden kann.

Eine in der wissenschaftlichen Literatur häufig zitierte Definition von Eurelectric [4], die auch von der Bundesnetzagentur in einem Positionspapier übernommen und ins Deutsche übersetzt wurde [5], beschreibt Flexibilität wie folgt:

“On an individual level flexibility is the modification of generation injection and/or consumption patterns in reaction to an external signal (price signal or activation) in order to provide a service within the energy system. The parameters used to characterize flexibility include the amount of power modulation, the duration, the rate of change, the response time, the location etc.”

In dieser Definition wird davon ausgegangen, dass die Änderung der Einspeisung oder Entnahme im Wesentlichen durch ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung) ausgelöst wird, sodass eine Dienstleistung für Dritte erbracht werden kann. Neben der Definition von Eurelectric existieren auf nationaler und internationaler Ebene noch einige weitere Definitionen [6–8]. Alle zielen darauf ab, dass eine energietechnische Komponente, die an ein Elektrizitätsnetz angeschlossen ist, eine Veränderung ihrer Einspeisung oder

Entnahme als Dienstleistung durchführt. Als energietechnische Komponenten werden im Folgenden Erzeuger, Speicher, Verbraucher oder deren Verbund verstanden. Letzterer kann, muss jedoch nicht identisch mit dem Begriff der Zelle sein. Solch kurze Definitionen wie die zuvor genannten sind jedoch nicht in der Lage, die verschiedenen Facetten und die im wissenschaftlichen Alltag gebräuchlichen Beiwörter zum Flexibilitätsbegriff abzudecken. Dies führt uns nachfolgend zu einer Sammlung passenderer, zellulär orientierter Flexibilitätsbegriffe.

2 Zellulär orientierte Flexibilitätsbegriffe

Ein Energiesystem wird durch miteinander in Verbindung stehende Objekte definiert, die im Zusammenhang von Energiegewinnung, Speicherung, Transport und Energienutzung als Ganzes gesehen und von ihrer Umwelt abgegrenzt betrachtet werden können. Wird eine Zelle als (Sub-)Energiesystem betrachtet, so ist die Flexibilität auf die Menge aller gültigen Kombinationen von Systemeingaben und der zustandsbezogenen Ausgaben im Hinblick auf alle Energieträger beschränkt. Gültige Kombinationen sind dadurch gekennzeichnet, dass alle notwendigen Energiedienstleistungen in einem stabilen System erbracht werden (vgl. **Abbildung 2-1 Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**) [9].

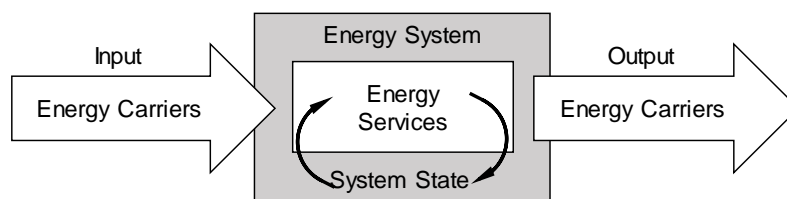


Abbildung 2-1: Darstellung von Flexibilität als Menge aller gültigen Kombinationen von Systemeingaben und zustandsbezogenen Ausgaben [9]

In Anlehnung an bestehende Definitionen kann Flexibilität demnach in einem zellulären Energiesystem wie folgt beschrieben werden.

Def. 1: Flexibilität einer Zelle 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.

Die Fähigkeit, unterschiedliche Handlungspfade zu beschreiten setzt voraus, dass die Zelle intern oder extern beeinflussbar ist und ein Mensch und/oder eine Maschine die Entscheidung trifft, welcher Handlungspfad ab einem gewissen Zeitpunkt zu beschreiten ist. Dass dabei eine Dienstleistung bereitgestellt wird, kann sowohl auf Menschen als auch auf Systeme bezogen werden. Bei einem Smart Home kann z.B. die Flexibilität der gesamten energietechnischen Anlagen des Hauses primär den eigenen Zielen als Zelle dienen, beispielsweise

- der Bereitstellung von Wohlfühlkomfort,
- der Reduktion des Energieverbrauchs, d.h. Energiekostenreduktion,
- der Maximierung des Autarkiegrades der Zelle oder

- der Bereitstellung von Flexibilität als Dienstleistung für das Verteilnetz oder höher gelagerte Netzebenen als Dritten, insofern ein Anschlusspunkt vorhanden ist.

2.1 Technisch-ökonomische Flexibilitätsbegriffe und Quantifizierung

Je nach Anwendungsfall spielt die Quantifizierbarkeit einer möglichen Flexibilitätsbereitstellung (ex-ante Betrachtung) oder einer bereits stattgefundenen Flexibilitätserbringung (ex-post Betrachtung) sowohl bei der technischen als auch der ökonomischen Perspektive eine große Rolle. Daher werden diese Begriffe in den folgenden Definitionen genauer voneinander abgegrenzt.

Def. 2: Fahrkurven und Quantifizierbarkeit einer Flexibilitätserbringung bzw. Flexibilitätsbereitstellung

Seien M_1, M_2, \dots, M_n Wertemengen von Flexibilitätsgrößen (technisch, ökonomisch, sozial, ökologisch).

- a) Als *Fahrkurve* wird im Folgenden eine mathematische Abbildung $F: [t_0, t_1] \rightarrow M_1 \times \dots \times M_n$ bezeichnet, die abhängig von einem gegebenen Zeitpunkt t_0 und evtl. externen (Steuer-)Größen sowie einem gegebenen Ort der Bereitstellung/Erbringung einer Flexibilität die Dienstleistung in einem Zeitintervall $[t_0, t_1]$ über die Angabe von Flexibilitätsgrößen über der Zeit beschreibt.
- b) Die *Flexibilitätserbringung* einer Zelle oder deren technischen Komponenten ist *quantifiziert* ab einem Zeitpunkt t_0 , wenn sie durch eine bekannte Fahrkurve beschrieben werden kann.
- c) Eine *Flexibilitätsbereitstellung* zum Zeitpunkt t_0 ist *quantifizierbar*, wenn sie durch eine Menge von Fahrkurven beschrieben werden kann, welche die möglichen Flexibilitätserbringungen der Zelle oder deren technischen Komponenten zum Zeitpunkt t_0 beschreiben.
- d) Kann für eine Flexibilitätsbereitstellung keine Fahrkurve bestimmt werden, so ist diese *nicht quantifizierbar* (zu einem Zeitpunkt t_0).
- e) Ist bei einer Flexibilitätserbringung keine einzelne Fahrkurve bekannt, so ist diese *nicht quantifiziert* (zu einem Zeitpunkt t_0).

Für die Quantifizierung der Flexibilitätsbereitstellung an einem Anschlusspunkt eines elektrischen Netzes ist typischerweise die physikalische Größe $P(t)$ (*elektrische Leistung*) interessant. Die in Abbildung 2-2 betrachtete Quantifizierung der Flexibilitätsbereitstellung einer energietechnischen Komponente ab dem Zeitpunkt t_0 bis zum Zeitpunkt t_1 bietet zwei mögliche Fahrkurven $P_1(t)$ und $P_2(t)$ an.

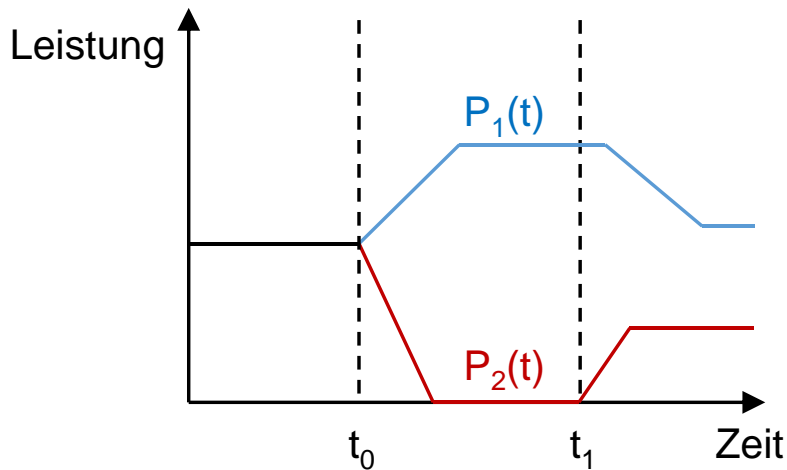


Abbildung 2-2: Zwei mögliche Fahrkurven einer Flexibilitätsbereitstellung ab einem Zeitpunkt t_0

Die energietechnische Komponente kann ab Zeitpunkt t_0 für eine gewisse Zeit ihren Leistungsbedarf erhöhen oder auf 0 absenken. Beide Änderungen benötigen ab t_0 eine gewisse Zeit bis sie die volle Leistungsänderung realisiert haben. Bereitstellungsdauer, angebotene Höhe der Leistungsänderung, Änderungsrate, Zeitpunkt der Bereitstellung sowie das Verhalten beim Anfahren und Abfahren lassen sich direkt über die Abbildung beschreiben. Der Ort der Bereitstellung kann zusätzlich spezifiziert werden, bspw. durch Angabe des Netzanschlusspunkts oder der Geokoordinaten. Neben physikalischen Größen kann eine Quantifizierung zugehörige ökonomische Größen als Dimensionen bei der Abbildung angeben. Damit kann im obigen Beispiel den Leistungsänderungen z.B. ein Preis auf einem Markt zugeordnet werden.

Die Menge aller möglichen Fahrkurven zu einem Zeitpunkt t_0 an einem bestimmten Erbringungsort x kann nun als technische Flexibilität zum Zeitpunkt t_0 angesehen werden.

Def. 3: Technische Flexibilität

- a) Die *Flexibilität am Bereitstellungsort* x , $\Phi(x)$, ist definiert durch die Menge aller technisch möglichen Fahrkurven.

$$\Phi(x) := \{F \mid F \text{ ist eine mögliche Fahrkurve am Bereitstellungsort } x\}$$

- b) Die *Flexibilität ab dem Zeitpunkt* t_0 *am Bereitstellungsort* x , $\Phi(t_0, x)$, ist definiert durch die Menge aller technisch möglichen Fahrkurven ab dem Zeitpunkt t_0 .

$$\Phi(t_0, x) := \{F \mid F \text{ ist eine mögliche Fahrkurve ab Zeitpunkt } t_0 \text{ am Bereitstellungsort } x\}$$

Die Flexibilität einer Zelle oder deren technischen Komponenten wird in t_0 durch ihren 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 von ihrem jeweils aktuellen Ladezustand ab. Der

Zeitpunkt t_q der Angabe bzw. Berechnung einer Fahrkurve zum Zeitpunkt t_0 kann sowohl vor t_0 (ex-ante) als auch nach dem Zeitpunkt t_0 (ex-post) liegen. Liegt er davor, so wird eine Fahrkurve als Teil einer Flexibilitätsbereitstellung vorab ermittelt, d.h. es wird eine Flexibilitätsbereitstellung in der Zukunft quantifiziert. Liegt das Zeitintervall dagegen in der Vergangenheit, kann eine bereits durchgeführte Flexibilitätserbringung im Verlauf der Erbringung gemessen worden sein und anschließend durch diese Messungen als Fahrkurve spezifiziert werden. In diesem Fall kann die Erbringung einer Flexibilität nach der Erbringung quantifiziert werden, obwohl die Flexibilitätsbereitstellung im Vorfeld nicht durch mögliche Fahrkurven quantifiziert wurde.

Aus den obigen Definitionen von Flexibilität, Flexibilitätsbereitstellung und Flexibilitätserbringung ergeben sich die in Abbildung 2-3 dargestellten Beziehungen.

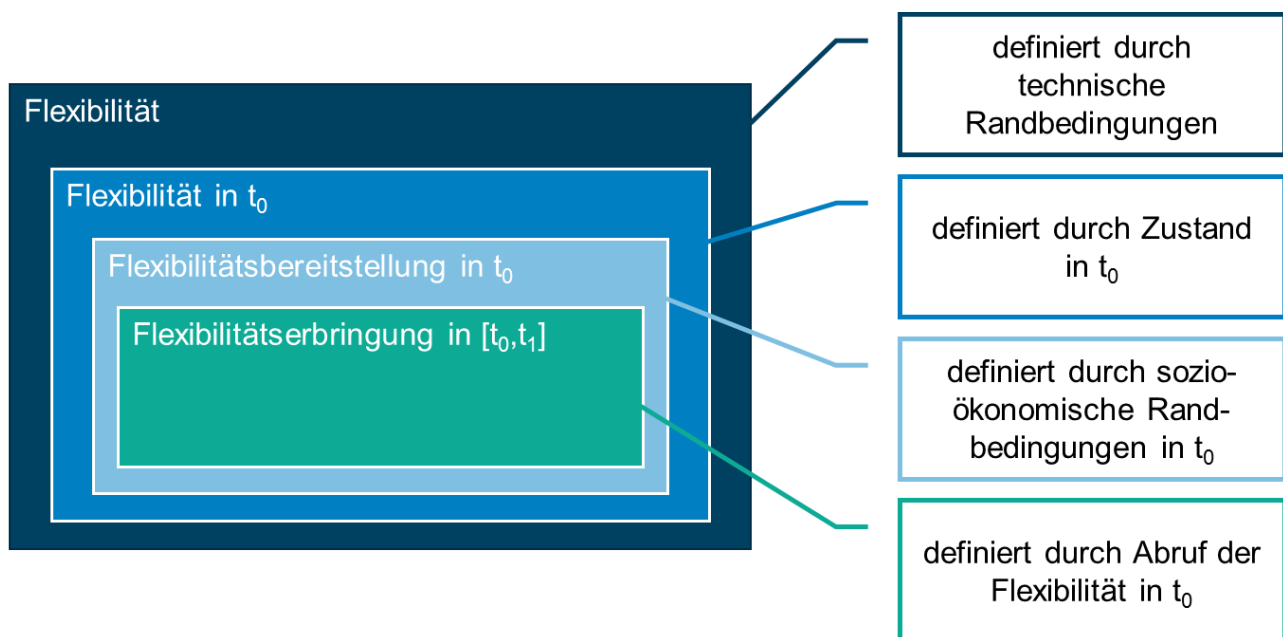


Abbildung 2-3: Beziehungen von Flexibilität, Flexibilität in t_0 , Flexibilitätsbereitstellung und Flexibilitätserbringung

Zur ex-ante Quantifizierung wird in der Regel ein Modell der Zelle oder deren technischen Komponenten benötigt, welches erlaubt, die Flexibilitätsbereitstellungen vorab zu berechnen. Im Fall volatiler Erzeuger oder Verbraucher existieren aber keine Modelle, welche eine exakte Prognose erlauben. Die Möglichkeiten zur Flexibilitätsbereitstellung hängen u.a. vom Wetter und dem Verhalten der Nutzenden ab und sind entsprechend volatil. In diesem Fall lässt sich keine exakte Quantifizierung durchführen und das Potenzial zur Flexibilitätsbereitstellung höchstens prognostizieren.

Def. 4: Prognostizierbarkeit einer Flexibilitätsbereitstellung

Eine Flexibilitätsbereitstellung ist *prognostizierbar* ab einem Zeitpunkt t_0 (*prognostizierbare Flexibilität*), wenn es eine mathematische Abbildung W_p gibt, die abhängig vom gegebenen Zeitpunkt t_0 und einem Ort der Bereitstellung x die

bereitgestellte Dienstleistung zu jedem Zeitpunkt $t \in [t_0, t_1]$ eines Intervalls über die Angabe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen Flexibilitätsgrößen zu jedem Zeitpunkt t beschreibt.

Für die Beschreibung und Berechnung von quantifizierbarer oder prognostizierbarer Flexibilität wird häufig ein Modell benötigt, welches die Flexibilität beschreibt. Häufig existiert ein solches Modell aber nicht oder dieses wird nicht nach außen kommuniziert. Trotzdem kann in solch einem Fall Flexibilität bereitgestellt und durch Messungen nachträglich quantifiziert werden. Dieser Umstand motiviert die Unterscheidung in explizite und implizite Flexibilitätsbereitstellung, die wie folgt definiert ist.

Def. 5: Explizite und implizite Flexibilitätsbereitstellung (Steuerungsbereitschaft)

- a) Die Bereitstellung einer Flexibilität heißt *explizit (explizite Flexibilität)*, wenn der Flexibilitätsbereitsteller einer Zelle oder deren technischen Komponenten zulässt, dass die Flexibilität Φ nach einer fest vereinbarten Steuerungsgröße $S1$ (z.B. Leistung $P(t)$ oder Leistungsdifferenz zu bestimmten Zeitpunkten), die unabhängig von weiteren Variablen ist, gesteuert werden kann.

$$\Phi: [t_0, t_1] \rightarrow P$$

$$\Phi = f(S1)$$

- b) Eine Bereitstellung einer Flexibilität heißt *implizit (implizite Flexibilität)*, wenn sie durch ihren Flexibilitätsbereitsteller vorab nicht näher quantifiziert wird, aber von anderen Akteuren nutzbar ist. Dies ist der Fall, wenn der Flexibilitätsbereitsteller einer Zelle oder deren technischen Komponenten zulässt, dass die Steuergröße $S1$ durch eine weitere Variable $S2$ beeinflusst wird. Der funktionale Zusammenhang ist dem Anwender nicht bekannt, sodass dieser nur geschätzt bzw. prognostiziert werden kann.

$$\Phi: [t_0, t_1] \rightarrow P$$

$$\Phi = f(S1(S2))$$

Bei der expliziten Flexibilität ist sowohl dem Flexibilitätsbereitsteller als –anwender $f(S1)$ bekannt. Dagegen ist bei der impliziten Flexibilität dem Anwender $S1(S2)$ nicht bekannt und dem Bereitsteller ist $S1(S2)$ bekannt oder unbekannt. Letzteres ist beispielsweise der Fall, wenn der Endverbraucher selbst nicht weiß, wie er in Zukunft auf einen Anreiz reagieren wird. Sein zukünftiges Verhalten unterliegt demnach Prognosen. Die Definition der impliziten Flexibilität bedeutet also nicht, dass diese nicht von außen abgerufen werden kann. Es findet bei einem Abruf allerdings eine Beeinflussung der Flexibilität durch Anreize oder Signale statt. Die Entscheidung über die Erbringung obliegt damit dem Flexibilitätsbereitsteller. Der Flexibilitätsanwender hat keine Information, wie sich die Beeinflussung genau auswirkt. Da eine implizite Flexibilität vom Bereitsteller vorab nicht quantifiziert wird, ist diese häufig kaum oder nur mit großer Unsicherheit prognostizierbar

und folglich nicht in einem exakten Fahrplan bzw. Lastprofil darstellbar [10]. Sie kann aber durch Messung erfasst und ex-post quantifiziert werden, z.B. für Abrechnungszwecke.

Ein Beispiel ist die Nutzung zeitvariabler Tarife zur Beeinflussung des Lastprofils von Privathaushalten. Ist die Historie von Tarifen und Verhalten dieser implizit bereitgestellten Flexibilität bekannt, also die Preiselastizität der Haushalte, kann gegebenenfalls eine Prognose des Verhaltens erstellt und damit eine mit Unsicherheit versehene Quantifizierung ex-ante vorgenommen werden. Diese Prognose ermöglicht z.B. Aggregatoren, die implizite Flexibilität zu bewerten und unter einem gewissen Risiko zu vermarkten. Ein Aggregator würde hierbei auf Basis von historischen Informationen zeitvariable Tarife in angebotene Flexibilität transformieren.

2.2 Definitionen zu Ansteuerung und Abruf von Flexibilität

Die Flexibilitätserbringung kann auf Basis eines zellexternen Anreiz- oder Steuersignals oder basierend auf zellinternen Entscheidungskriterien (z.B. auf Basis von Messgrößen und/oder einer Konfiguration) erfolgen. Um die hierdurch gegebenen unterschiedlichen Ausprägungen des Flexibilitätsbegriffs noch präziser fassen zu können, sind weitere Detaillierungen und Klassifizierungen des Flexibilitätsbegriffs notwendig.

Def. 6: Zustands- und kommunikationsgesteuerte Flexibilität (Signalweg)

- a) Die Ansteuerung und der Abruf von Flexibilität heißen *zustandsgesteuert* (*zustandsgesteuerte Flexibilität*), wenn eine Zelle oder deren technischen Komponenten Flexibilität auf Basis von physikalischen Größen erbringt. Die Veränderungen physikalischer Größen bilden dabei ein Signal, dessen Informationsgehalt unmittelbar auf andere physikalische Größen wirkt. Deren Veränderungen wiederum wirken durch Rückkopplung auf die Ausgangsgrößen.
- b) Die Ansteuerung und der Abruf von Flexibilität heißen *kommunikationsgesteuert* (*kommunikationsgesteuerte Flexibilität*), wenn eine Zelle oder deren technischen Komponenten eine Flexibilität durch Interpretieren einer Nachricht erbringt. Die Übertragung der Nachricht erfolgt über einen Kommunikationskanal.

Die Veränderung physikalischer Größen wird in diesem Fall als Signal bezeichnet. Dieses Signal kann auf unmittelbarem Wege zur Steuerung genutzt werden. So misst bei der zustandsgesteuerten Flexibilität die Zelle oder deren technischen Komponenten, welche an einem elektrischen Netz angeschlossen ist, z.B. Spannung oder Frequenz am Anschlusspunkt und reagiert auf deren Veränderungen, um z.B. zur Netzstabilisierung beizutragen. Der Standardanwendungsfall ist die Primärregelung, bei der große Kraftwerke die Frequenz messen und einer Frequenzabweichung entgegenwirken (Primärregler), indem sie die Erzeugungsleistung erhöhen bzw. verringern. In der Praxis werden zustandsgesteuerte Abrufe von Flexibilität durch hinterlegte Konfigurationen erbracht. So werden zur Spannungshaltung an Netzleitungen bei PV-Anlagen Q(U)-Kennlinien hinterlegt, damit diese abhängig von der Spannung am Netzverknüpfungspunkt selbstständig die

Blindleistungseinspeisung anpassen. Des Weiteren reagieren PV-Anlagen auf Frequenzänderungen, indem sie sich ab einer bestimmten Frequenzabweichung vom Netz trennen bzw. abschalten. Die Veränderung einer physikalischen Größe kann auch bewusst herbeigeführt und somit ein Signal erzeugt werden. Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber können beispielsweise den physikalischen Zustand eines Netzes beeinflussen und somit Solaranlagen an einem Abgang hinter einer Ortsnetzstation durch gezielte Manipulation der Frequenz ausschalten. Dies ist z.B. nötig, wenn eine Leitung zu Wartungszwecken spannungsfrei geschaltet werden muss. Neben dem Signalweg kann die Steuerung einer technischen Komponente dahingehend unterschieden werden, auf welche Weise die Flexibilitätsanforderung erfolgt.

Def. 7: Direktes und indirektes Flexibilitätsabrufsignal (Steuerungsanforderung)

- a) Der *Abruf* einer Flexibilitätsbereitstellung erfolgt *direkt (direkte Flexibilität)*, wenn die bereitgestellte Flexibilität vom Flexibilitätsanwender über die Vorgabe einer Fahrkurve kommunikationsgesteuert abgerufen wird. Diese kann auch in Echtzeit angepasst werden.
- b) Erfolgt der *Abruf* über ein anderes Signal, so erfolgt ein *indirekter Abruf (indirekte Flexibilität)* einer Flexibilitätsbereitstellung.

Die kommunikationsgesteuerte Ansteuerung und der Abruf einer Flexibilitätsbereitstellung kann durch verschiedene Signale geschehen. Während die indirekte Flexibilitätsbereitstellung i.d.R. durch zeitvariable Preise abgerufen wird, erfolgt bei der direkten Flexibilitätsbereitstellung ein Abruf über die Vorgabe einer Fahrkurve oder durch die Vorgabe von Grenzen (auch häufig als Quote bezeichnet). Eine typische Anwendung direkter Flexibilitätsbereitstellung ist die Sekundärregelleistung, bei der die Übertragungsnetzbetreiber kommunikationsgesteuert innerhalb weniger Sekunden einen Sollwert an den Bereitsteller übermitteln.

Bei den vorangegangenen Definitionen ist nicht festgelegt, welcher Akteur die Steuerung einer technischen Komponente bezüglich der Systemgrenzen auslöst. Grundlage ist die Definition eines Systems im räumlichen Zusammenhang, das als Zelle mit festgelegten Systemgrenzen zur Umgebung definiert wird.

Def. 8: Interner und externer Flexibilitätsabruf (Steuerungsauslösung)

- a) Erfolgt der Flexibilitätsabruf durch einen Flexibilitätsanwender innerhalb der Zellgrenzen, so wird von *internem Flexibilitätsabruf (interne Flexibilität)* gesprochen.
- b) Erfolgt der Flexibilitätsabruf durch einen Flexibilitätsanwender außerhalb der Zellgrenzen, so wird von *externem Flexibilitätsabruf* gesprochen (*externe Flexibilität*).

Hierbei wird noch nicht unterschieden, ob die flexibilitätsbringende Zelle selbst über den Einsatz ihrer technischen Komponenten entscheidet, oder die Steuerungshoheit übergibt. Dies führt zur nachfolgenden Definition.

Def. 9: Aktive und passive Flexibilitätserbringung (Steuerungsverantwortung)

- a) Bei der *aktiven Flexibilitätserbringung (aktive Flexibilität)* entscheidet die Zelle selbst über den Einsatz ihrer technischen Komponenten und erbringt mit diesen Flexibilität.
- b) Bei der *passiven Flexibilitätserbringung (passive Flexibilität)* überlässt die Zelle die Entscheidung über den Einsatz ihrer technischen Komponenten dem Flexibilitätsanwender.

Ein Beispiel für aktive Flexibilitätserbringung ist ein lokales, automatisiertes Heimenergiemanagementsystem (HEMS), welches den Betrieb von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern optimiert, um dadurch Flexibilität zu erbringen. Ebenfalls könnte die Liegenschaft die Steuerungshoheit über einzelne Komponenten (z.B. eine Ladesäule für Elektrofahrzeuge) an einem Flexibilitätsanwender übergeben und somit passiv bleiben, während sie Flexibilität erbringt.

2.3 Flexibilität aus Anwendungssicht

Flexibilität lässt sich im Kontext von Energiesystemen unterschiedlich nutzen. So kann diese für die Erhaltung der Qualität oder Stabilität eines elektrischen Netzes auf globaler Ebene, zellübergreifend oder lokal, also zellintern, genutzt werden oder auch als Austauschgut zwischen unterschiedlichen Marktteilnehmern dienen. Dies führt zu den folgenden Definitionen.

Def. 10: System-, netz- und marktdienliche Flexibilität

- a) *Systemdienliche Flexibilität*: Nutzung der Flexibilität (durch die Übertragungsnetzbetreiber) zum Erhalt der Systemstabilität, also dem übergeordneten Verbund aller Zellen bzw. einem Zusammenschluss von Zellen.
- b) *Marktdienliche Flexibilität*: Nutzung der Flexibilität vom Markt als Energieausgleich oder bspw. bei stark volatilen Marktpreisen. Der Wert liegt in der Nutzung durch einzelne Marktparteien/Zellen (Portfoliooptimierung).
- c) *Netzdienliche Flexibilität*: Von den Netzbetreibern zur Beherrschung bzw. Vermeidung kritischer Netzsituationen genutzte Flexibilität und um die Versorgung mit einer gewissen Versorgungsqualität aufrechtzuerhalten sowie vorhandene Infrastruktur effizienter auszunutzen.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Flexibilitätsformen ist die netzdienliche Flexibilität immer durch die lokale Komponente mit ihrer Wirkung in einem konkreten Netzsegment geprägt. Netzdienliche Flexibilität ist ein wichtiges Element, um die Überlastung von Leitungen zu vermeiden (präventives Netzengpassmanagement) oder zu beherrschen (kuratives Netzengpassmanagement). Im aktuellen regulatorischen Rahmen ist hier insbesondere auf die §§ 13, 14a EnWG zu verweisen. Als systemdienliche Flexibilität wird im Allgemeinen Regelleistung verstanden, deren Ziel das Systemgleichgewicht und somit

eine stabile Frequenz des Gesamtsystems ist (Kontinentaleuropa, UCTE-Netz). Rechtlich sind die Übergänge zwischen diesen beiden Einsatzzwecken fließend. Marktdienliche Flexibilität kann ebenfalls eine lokale Komponente beinhalten. In diesem Fall ist die lokale Komponente jedoch nicht durch physikalische Notwendigkeiten bedingt, sondern durch Präferenzen auf der Nachfrageseite.

3 Zusammenfassung

Das SINTEG-Projekt C/sells beschreibt ein Energiesystem, dessen Struktur durch untereinander verbundene, autonom handelnde Zellen geprägt ist. Diese Struktur soll es ermöglichen, den steigenden Anteil erneuerbarer Energien effektiv und effizient zu integrieren. Eine zentrale damit einhergehende Herausforderung ist, den durch die Energiewende bedingten Flexibilitätsbedarf zu decken.

Um Flexibilität zu beschreiben, bedarf es eines gemeinsamen Verständnisses und der Schärfung der in den Diskussionen vorherrschenden Flexibilitätsbegriffe. Bereits existierende nationale und internationale Definitionen des Begriffs Flexibilität werden jedoch diesen Anforderungen, die sich durch ein zelluläres Energiesystem ergeben, nicht gerecht. Ziel ist es daher, diese Flexibilitätsbegriffe zu definieren, zu separieren und zu kombinieren und damit ein gemeinsames Verständnis zu schaffen, sodass eine einheitliche und eindeutige Verwendung der Begriffe garantiert ist.

Die Flexibilitätsbegriffe werden in drei Kapiteln subsummiert und darin beschrieben, voneinander abgegrenzt und kombiniert. Das erste Kapitel beschreibt die technisch-ökonomischen Flexibilitätsbegriffe Fahrkurve, Flexibilitätsbereitstellung, Flexibilitätserbringung, Quantifizierbarkeit, Prognostizierbarkeit sowie explizite und implizite Flexibilität. Im zweiten Kapitel werden Begriffe beschrieben, die mit der Ansteuerung und dem Abruf von Flexibilität einhergehen. Darunter fallen die aktive und passive Flexibilitätserbringung, der zustands- und kommunikationsgesteuerte Flexibilitätsabruf sowie der direkte und indirekte Flexibilitätsabruf. Das letzte Kapitel umfasst die Anwendersicht und definiert den system-, netz- oder marktdienlichen Einsatz von Flexibilität.

Auf Basis der definierten Begriffe können im nächsten Schritt Flexibilitätsprodukte beschrieben und kategorisiert werden, die für die Konzeption und Demonstration des zellulären Energiesystems in C/sells betrachtet werden.



Literatur

- [1] Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V., *C/sells Überblick - Modellregion Süddeutschland*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.smartgrids-bw.net/csells/csells-ueberblick/modellregion-sueddeutschland/>. Zugriff am: Jun. 27 2018.
- [2] Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V., *C/sells - Das Schaufenster für die nachhaltige Energiewende*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.csells.net/de/>. Zugriff am: Nov. 13 2018.
- [3] J. Villar, R. Bessa und M. Matos, „Flexibility products and markets: Literature review“, *Electric Power Systems Research*, Jg. 154, S. 329–340, 2018.
- [4] EURELECTRIC, *Flexibility and Aggregation - Requirements for their interaction in the market*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.usef.energy/app/uploads/2016/12/EURELECTRIC-Flexibility-and-Aggregation-jan-2014.pdf>. Zugriff am: Jun. 17 2018.
- [5] Bundesnetzagentur, *Flexibilität im Stromversorgungssystem - Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität*. [Online] Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/BNetzA_Flexibilitaetspapier.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am: Jun. 17 2018.
- [6] G. Papaefthymiou, K. Grave und D. Ken, *Flexibility options in electricity systems*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ecofys.com/files/files/ecofys-eci-2014-flexibility-options-in-electricity-systems.pdf>. Zugriff am: Nov. 13 2018.
- [7] EURELECTRIC, *Concepts, Elements and Tools for the Smart Grid Methodology*. [Online] Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/xpert_group3_methodology.pdf. Zugriff am: Jun. 17 2018.
- [8] Ofgem, *Electricity system flexibility*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ofgem.gov.uk/electricity/retail-market/market-review-and-reform/smarter-markets-programme/electricity-system-flexibility>. Zugriff am: Nov. 13 2018.
- [9] I. Mauser, K. Förderer, J. Müller und H. Schmeck, „Definition, Modeling and Communication of Flexibility in Smart Buildings and Smart Grids“ in *International ETG Congress 2017*, S. 605–610.
- [10] K. Förderer, M. Ahrens, B. Kaibin, I. Mauser und H. Schmeck, „Modeling flexibility using artificial neural networks“, *Energy Informatics*, Nr. 21, S. 73–91, 2018.