

Grundlagen der Massenfähigkeit

Teilprojekt 2 – Umfeldgestaltung

Arbeitspaket 2.8 - Massenfähigkeit durch Technische Regeln / Normen / Standards



C/sells – Großflächiges Schaufenster im Solarbogen Süddeutschlands

SINTEG - Förderprogramm

"Schaufenster intelligente Energie - Digitale Agenda für die Energiewende" (SINTEG)
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

**Methoden und Modelle für Terminologie, Use Case- und Sicherheitsanalyse
sowie Flexibilitätsmodellierung**

Interoperabilität durch vereinbarte Regeln, Standards und Normen

--- Flexibilitätsmethodik ---

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Version: **02/2020** (Aktualisierung vom 09.12.2020)

Verfasser: Andreas Kießling (energy design)

in Zusammenarbeit mit C/sells-Fachgruppe Flexibilität und weiteren mitwirkenden C/sells-Partnern



Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	4
1 Flexibilität als Eigenschaft eines zellularen Energiesystems	5
1.1 Steuerungskategorien und Flexibilitätsmechanismen	5
1.1.1 Steuerungskategorien	5
1.1.2 Flexibilitätsmechanismen.....	10
1.2 Flexibilitätsbegriff und Flexibilitätsmodell	14
1.2.1 SynErgie-Modell	15
1.2.1 Klassenkonzept zum Flexibilitätsmodell.....	20
2 Quellen	21

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Erwartungskurven zur Leistung sowie Fluss zwischen Knoten über eine Kante [SGI: Kießling, A. (10/2015)]	10
Abb. 2: Leistungsfluss auf Netzverbindung (Kante) zwischen zwei Energiezellen (Knoten)	12
Abb. 3: Darstellung der nicht-technischen Definition von Flexibilität im Kontext Energie [Mauser, Ingo; Förderer, Kevin; Müller, Jan; Schmeck, Hartmut. (2017)].....	14
Abb. 4: Beispiel zur modularen Modellierung einer Flexibilität [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)]	16
Abb. 5: Beispiel für eine Lastkurve einer möglichen flexiblen Lastmaßnahme aus der Schar möglicher individueller Lastkurven einer flexiblen Einheit [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)].....	16
Abb. 6: Klassendiagramm zur Diskussion des Flexibilitätsmodells	20

1 Flexibilität als Eigenschaft eines zellularen Energiesystems

1.1 Steuerungskategorien und Flexibilitätsmechanismen

Vorrangige Ziele der im Glossar „Begriffe und Modelle zum zellularen Ansatz sowie zu Infrastrukturkomponenten“ eingeführten Architektur sind

- Beherrschung von **Komplexität** in einem zunehmend dezentralen Energiesystem
- Erhöhung der **Flexibilität** im volatilen erneuerbaren Energiesystem im Sektorenverbund der Endenergiearten Strom, Wärme, Gas und Energieträger für Mobilität sowie zur Eigenoptimierung
- Erweiterung der Handlungsräume für lokale und regionale **Partizipation** und Eigengestaltung im globalen Verbund
- Erhöhung der **Resilienz** gegen Angriffe und Störungen der vernetzten kritischen Infrastruktur

Flexibilität ist also letztendlich bezogen auf den eingeführten Systembegriff eine sich zunehmend entwickelnde **Eigenschaft** des intelligenten, erneuerbaren Energiesystems.

1.1.1 Steuerungskategorien

Andreas Kießling, Leimen, 16. September 2018

Zwecks Kategorisierung von Mechanismen zur Steuerung eines Systems und insbesondere deren Anwendung auf Flexibilitätsmechanismen im Energiesystem werden folgende fünf Unterscheidungsmerkmale definiert:

- **Signalweg**
- **Steuerungsbereitschaft**
- **Steuerungsanforderung**
- **Steuerungsauslösung**
- **Steuerungsverantwortung**

Zwecks Kategorisierung von Mechanismen zur Steuerung eines Systems wird im ersten Schritt Bezug auf das Energiesystem genommen, wo die wesentlichen Attribute Energie und Information gleichzeitig Mittel der Beobachtung von Steuerungsnotwendigkeiten sowie der Ausführung eines Steuerungsprozesses sind. Zur Fallunterscheidung dient hierbei der **Signalweg** als erste Steuerungskategorie (1. Dimension des Steuerungsraumes) in nachfolgender Weise.

Die Beobachtung energiebezogener Attribute kann unmittelbar auf physikalischem Wege zur Steuerung eines anderen energiebezogenen Attributes genutzt werden, dessen Beeinflussung auf dem Wege der Rückkopplung zur Anpassung des beobachteten Attributes führt. Ein Attribut in Form einer messbaren physikalischen Größe bildet ein Signal, dessen Informationsgehalt unmittelbar auf eine andere physikalische Größe wirkt, deren Veränderung wiederum durch Rückkopplung die Ausgangsgröße anpasst. Hierzu wird der Begriff der **zustandsbasierten Steuerung** genutzt.

Im anderen Falle erfolgt die Umwandlung des durch Beobachtung eines Attributes erzeugten Signals in eine Nachricht sowie der Versand der in der Nachricht enthaltenen Information zum beobachteten Attribut über einen Kommunikationskanal. Der Empfänger verarbeitet diese Information zu einer Steuerentscheidung und überträgt wiederum über einen Kommunikationskanal die Steuerinformation als Nachricht an die ausführende Komponente des Systems, in dem ein Attribut im Rahmen der **kommunikationsbasierten Steuerung** angepasst werden soll, dessen Änderung ebenso das beobachtete Attribut beeinflusst.

Mit der im Glossar-Kapitel zum Systemmodell geführten Betrachtung wurde das Energiesystem als attributives System beschrieben, dessen jedes Element sich mit jedem anderen Element derselben Klasse in (wenigstens) einer Zusammenhangersrelation befindet, derart, dass die Gesamtheit der Klassenelemente ein „einheitlich geordnetes Ganzes“ bleibt. Dies umfasst die prinzipielle Erreichbarkeit jedes Attributes von jedem anderen Attribut ohne Umweg über ein zusätzliches Attribut (z.B. *y* in Abhängigkeit von *x*, d.h. $y(x)$, aber nicht *y* in Abhängigkeit von *t* in der Form $y(x(t))$) [Stachowiak, H. (1973)].

Deshalb wird als zweite Steuerungskategorie (2. Dimension des Steuerungsraumes) als **Steuerungsbereitschaft** mit den zwei Ausprägungen **explizite** oder **implizite Steuerung** aus Sicht des Anbieters einer Steuerungsmöglichkeit definiert.

Die explizite Steuerung bedeutet, dass der Anbieter eines steuerbaren Systems zulässt, dass beispielsweise die Leistung *P* einer Anlage nach einer fest vereinbarten Steuergröße *S* (z.B. Leistungsdifferenz zu bestimmten Zeitpunkten), die unabhängig von einer weiteren Variable ist, gesteuert werden kann. Aufgrund dieser Unabhängigkeit der Steuergröße *S* von anderen Variablen ist die zukünftige Leistung zu bestimmten Zeitpunkten bekannt und damit fest kalkulierbar, d.h. $L = f(S)$.

Dagegen beschreibt die implizite Steuerung die Bereitschaft des Anbieters eines steuerbaren Systems, eine Steuergröße *S* zur Anpassung der Leistung *P* als abhängige Größe zu erhalten, die wiederum von einer abhängigen Variable, z.B. dem Preis *PR* beeinflusst wird. Beispielsweise beeinflusst ein variabler Preis die Steuergröße und passt damit auch die Leistung an. Nur ist die Beeinflussung der Steuergröße *S* durch den Preis nicht fest kalkulierbar, sondern nur prognostizierbar. Der Anbieter ermöglicht damit Prognosen auf sein zukünftiges Verhalten, aber keine definierte Leistung, d.h. $L = f(S(PR))$

Dem Nachfrager der Steuerungsmöglichkeit eines Systems stehen nun in analoger Weise zwei Möglichkeiten einer dritten Steuerungskategorie (3. Dimension des Steuerungsraumes) als **Steuerungsanforderung** zur Verfügung. Einerseits kann er mittels eines Attributes, von dem das zu steuernde Attribut direkt abhängig ist, die Möglichkeit zur Steuerung vereinbaren. Hierzu wird der Begriff der **direkten Steuerung** definiert. Im Gegensatz dazu umfasst der Begriff der **indirekten Steuerung** den Einsatz eines steuernden Attributes, das nur auf dem Vermittlungsweg über ein anderes Attribut zur Veränderung beim zu steuernden Attribut führt.

Zur Unterscheidung der Varianten bei Erbringung der gewünschten Steuerung wird die vierte Steuerungskategorie (4. Dimension des Steuerungsraumes) zur **Steuerungsauslösung** definiert.

Die Steuerung von Komponenten innerhalb eines Systems kann sowohl auf Basis interner Systembeobachtung und Analysen als auch durch externe Beeinflussung über die Informations- und Energieschnittstellen erfolgen. Hierbei spielt es keine Rolle, ob die Verbindung der Energiezelle horizontal zu einer Energiezelle gleicher Stufe oder vertikal zu einer Energiezelle einer anderen Stufe (einbettende oder untergeordnete Zelle) erfolgt. Insofern kann der Nachfrager der Steuerungsmöglichkeit den eigentlichen Steuerungsvorgang extern aus Sicht des Systems auslösen (**externe Steuerung**) oder einen selbsttätigen Auslösungsvorgang innerhalb des Systems (**interne Steuerung**) nutzen.

Weiterhin ist es notwendig, im Falle der Auslösung der Steuerung eines Systemattributes zwei weitere Fälle im Rahmen der fünften Steuerungskategorie (5. Dimension des Steuerungsraumes) zur **Steuerungsverantwortung** folgendermaßen zu unterscheiden.

Die Steuerung bezogen auf das System kann einerseits dadurch erfolgen, dass das zu steuernde Attribut an der Schnittstelle des Systems über eine Managementkomponente des Systems gesteuert wird, ohne direkt auf andere im System enthaltenen Komponenten oder Untersysteme einzuwirken. Das System handelt hier im Rahmen einer **aktiven Steuerung** auf Basis eigener Analysen und entscheidet, welche internen Attribute der Systemkomponenten dabei gesteuert werden sollen.

Erfolgt die Steuerung aber nicht an der Systemschnittstelle, sondern wirkt unmittelbar an ausgewählten Attributen dedizierter Komponenten, findet eine **passive Steuerung** statt.

Auf Basis dieser fünf Dimensionen des Steuerungsraumes und den 2 hoch 5 Ausprägungen ergeben sich 32 mögliche Kombinationen bei Flexibilitätsmechanismen.

Das beschriebene Modell zur Kategorisierung von Steuerungsmechanismen wird nachfolgend am Beispiel ausgewählter Flexibilitätsmechanismen veranschaulicht.

Mit der ersten Steuerungskategorie werden die **Signalwege** eingeordnet.

Die **zustandsbasierte Steuerung** kann auf unterschiedlichsten Zustandsgrößen beruhen. Dies betrifft Netzzustandsgrößen wie Frequenz, Spannung und Phasenverschiebung, aber auch andere die Energieflüsse beeinflussende Größen wie die Temperatur.

Bekannt ist diese Steuerungsart beispielsweise im Rahmen der Primärregelung zur Steuerung der Netzfrequenz. Auf Basis der Beobachtung der Netzfrequenz und physikalischer Rückkopplung ändert sich automatisch die Drehgeschwindigkeit von Generatoren in Kraftwerken. Mit dem Fortschritt beim Ausbau der Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen und dem damit verbundenen Wegfall von Kraftwerksgeneratoren werden zunehmend Lösungen geschaffen, die die Frequenzregelung mittels dezentraler Elektroniklösungen ermöglichen. Analoge Einrichtungen der Leistungselektronik existieren zur Anpassung der Leistung von Stromverbrauchern, wenn die Netzspannung die Soll-Grenzen verlässt.

Auf der anderen Seite kann die **kommunikationsbasierte Steuerung** dadurch erfolgen, dass die Netzspannung an verschiedenen Netzanschlusspunkten einer Netzzelle gemessen und an die in diesem Netzgebiet zuständige Netzleitwarte oder eine intelligente Trafostation als Nachricht über einen sicheren Kommunikationskanal übertragen wird. Algorithmen der Systeme in der Leitwarte treffen basierend auf erhaltenen Informationen sowie mittels zusätzlichen Wissens um vergangene Situationen und Prognosen zur Zukunft Entscheidungen, um dann entsprechende Steuerinformationen an Teilsysteme oder Einzelanlagen im Netzgebiet zu senden.

Im letzten Beispiel kann die kommunikationsbasierte gegenüber der zustandsbasierten Steuerung vorteilhaft sein, weil es gilt, die Spannungen an verschiedenen Netzanschlusspunkten im Zusammenhang zu betrachten, um das optimale Steuerungsregime abzuleiten.

Die zweite Steuerungskategorie dient der Einordnung der **Steuerungsbereitschaft** eines Anbieters, die hier im speziellen Falle auf die **Flexibilitätsbereitschaft** bezogen wird.

Denkbar ist der proaktive Versand einer Nachricht durch einen Anschlussnutzer im Einfamilienhaus an seinen Energielieferanten, die Geräte im Wohnbereich durch variable Tarife in Verbindung mit einer durch den Dienstleister bereitgestellten Energiemanagementeinrichtung **implizit steuern** zu lassen. Die Änderung der Energienutzung durch derartig gesteuerte Komponenten beruht auf einem Anreizsystem. Verbrauchsänderungen sind also nur zu prognostizieren und nicht unmittelbar zu erreichen.

Die Bereitschaft als Anschlussnutzer, die Energienutzung bezogen auf das Einfamilienhaus oder nur in Bezug auf Einzelanlagen (z.B. Wärmepumpe, Ladepunkt Elektromobilität) durch zugeordnete und vorgegebene Fahrpläne (fixe Leistungsvereinbarungen zu bestimmten Zeitperioden) zu vereinbaren, wird bei **expliziten Steuerungen** genutzt, wobei die Vorlaufzeit zwischen Flexibilitätsvereinbarung und -erbringung stark variieren kann.

In analoger Weise können die Mechanismen des Nutzers von Steuerungsmöglichkeiten bei der **Steuerungsanforderung** nachfolgend in spezieller Weise für die **Flexibilitätsanforderung** eingeordnet werden.

Die **direkte Steuerung** basiert analog zur expliziten Bereitschaft eines Flexibilitätsanbieters mit fest vereinbarten Fahrplänen auf der Übersendung von Fahrplänen durch den Flexibilitätsnutzer. Dagegen umfasst die **indirekte Steuerung** die Übersendung von variablen Anreizsignalen (z.B. Preisen), nachdem der Flexibilitätsanbieter seine Bereitschaft zur impliziten Steuerung mitgeteilt hat.

Beispielsweise kann die direkte Steuerung durch einen Betreiber eines Verteilnetzes innerhalb einer definierten Netzzelle (Niederspannungszelle im Verteilnetz der Ortschaft) dadurch angefordert werden, dass eine maximale Leistung zugeordnet wird. Je nachdem, ob mit dieser Steuerungsanforderung die Steuerungsauslösung dediziert an einem Anschlusspunkt oder nur als Wert über das gesamte Netzgebiet der Zelle benötigt wird, werden jeweils zwei Beispielverfahren im folgenden Abschnitt zur Steuerungsauslösung und zur Steuerungsverantwortung beschrieben.

Zusätzlich ist die Frage zu beantworten, ob die Bereitschaft eines Anbieters zur impliziten Steuerung mit einer direkten Steuerungsmöglichkeit beantwortet werden kann. Erst in diesem Falle ist die Trennung in die zweite und dritte Steuerungskategorie sinnvoll. Als Beispiel soll hier genannt werden, dass eine mitgeteilte Bereitschaft des Flexibilitätsanbieters zur impliziten Steuerung durch ein direktes Steuerungssignal des Flexibilitätsnutzers im Notfall oder vertraglich unter bestimmten Bedingungen vereinbart übersteuert werden könnte.

Die **Steuerungsauslösung** wurde als vierte Steuerungskategorie definiert und betrifft mit nachfolgenden Beispielen insbesondere die Flexibilitätsauslösung.

Hierbei erfolgt zur Kategorisierung von Mechanismen die Einordnung des die Steuerung auslösenden Akteurs bezüglich der Systemgrenzen. Grundlage ist die Definition eines Systems im räumlichen Zusammenhang, das als Energiezelle mit festgelegten Systemgrenzen zur Umgebung definiert wird. Mit Auslösung der Flexibilitätsbereitstellung innerhalb der definierten Räume durch einen außerhalb dieser Grenzen wirkenden Akteur wird der Begriff der **externen Steuerung** genutzt. Dies betrifft beispielsweise das als Aggregator wirkende virtuelle Kraftwerk, beim Abruf einer vorher mit dem Betreiber eines Gebäudes, in dem Erzeugungsanlagen installiert sind, vereinbarten Leistungsänderung (Flexibilität) zu einem definierten Zeitpunkt.

Hierzu zählt aber auch die Möglichkeit, dass ein Netzbetreiber von der Leitwarte aus für eine in das Verteilnetz eingelagerte Niederspannungszelle die Maximalleistung an einem Anschlusspunkt oder als Gleichzeitigkeitsquote für den Betrieb von Anlagen in der jeweiligen Netzzelle vorgibt.

Analog wirkt bei der **internen Steuerung** ein Akteur innerhalb der Systemgrenzen als Auslöser der Flexibilitätsbereitstellung. Als Beispiel sei hier der Abruf einer unvorhergesehenen Energiemenge für einen Ladevorgang des Elektrofahrzeuges aus einer Batterie durch das Energiemanagementsystem des Gebäudes genannt, wenn der Ladevorgang ansonsten zu einer Überschreitung der vereinbarten Spitzenlast am Netzanschluss des Gebäudes führen würde.

Die interne Steuerung träge ebenso zu, wenn durch eine intelligente Trafostation innerhalb der in das Verteilnetz eingelagerten Niederspannungszelle die Maximalleistung an einem Anschlusspunkt oder als Gleichzeitigkeitsquote für den Betrieb von Anlagen in der jeweiligen Netzzelle vorgegeben wird.

Mit der fünften Steuerungskategorie wird die jeweilige **Steuerungsverantwortung** herangezogen.

Zum Beispiel kann im Falle der externen Steuerung durch einen Aggregator die Steuerungsauslösung an das Energiemanagementsystem des jeweiligen am Netzanschluss zu steuernden Systems wie im Falle eines Gebäudes oder Stadtquartieres – übergeben werden. Wenn nun das adressierte Managementsystem selbständig über den optimalen Einsatz der Anlagen oder Teilsysteme im Gebäude oder im Stadtquartier entscheidet, um die durch den Aggregator am Netzanschluss beabsichtigte Leistungsänderung zu erreichen, soll der Begriff der **aktiven Steuerung** zur Kategorisierung benutzt werden.

Adressiert dagegen der Aggregator die Nachricht zur Flexibilitätsauslösung direkt an einzelne Anlagen oder Teilsysteme innerhalb des Gebäudes als Systemzelle, wirkt das Gebäude als Zelle mit Managementsystem nicht am Vorgang zur Flexibilitätsauslösung mit. In diesem Falle wird von der **passiven Steuerung** gesprochen.

Analog kann folgendes Beispiel den Unterschied dieser Steuerungsarten verdeutlichen. Wenn der Netzbetreiber, startend in der Leitwarte des gesamten Verteilnetzes, eine Leistungsbegrenzung an einem Übergabepunkt in die höhere Spannungsebene einer bestimmten, eingelagerten Niederspannungszelle erreichen möchte, existieren folgende zwei Möglichkeiten. Erstens kann eine Anforderung von der Netzleitwarte aus, also extern bezogen auf die Verteilnetzzelle, unmittelbar an eine passende Anlage in der Nähe des Übergabepunktes weitergegeben werden. In diesem Falle wirkt die intelligente Trafostation als Management der Verteilnetzzelle im Rahmen der passiven Steuerung nicht mit.

Wird die Leistungsänderung am Übergabepunkt benötigt, ohne Bezug auf eine bestimmte Anlage nehmen zu müssen, kann die Anforderung von der Leitwarte an die intelligente Trafostation gesendet werden, um dort im Rahmen der aktiven Steuerung zu entscheiden, welche passenden Anlagen innerhalb der Zelle gesteuert werden.

Schlussendlich umfasst ein Beispiel das Zusammenspiel der definierten fünf Steuerungskategorien.

Eine Regionalnetzbetreiber möchte im Rahmen seiner Verantwortung für eine Regionalnetzzelle an eine eingebettete Verteilnetzzelle einer Ortschaft die Anforderung bezüglich einer Quote zur maximalen Gleichzeitigkeit des Betriebes von bestimmten Anlagengruppen (Nachtspeicherheizungen, Wärmepumpen und Ladepunkte der Elektromobilität) senden. Dabei soll für den **Signalweg** die **kommunikationsbasierte Steuerung** genutzt werden, um abhängig von weiteren Einflussfaktoren über die Auswahl der mitwirkenden Anlagegruppen entscheiden zu können.

Vor Adressierung derartiger Steuerungsanliegen findet eine langfristige, vertragliche Allokation von Anlagen statt, zu denen die Anlagenbetreiber ihre **Steuerungsbereitschaft** auf Basis definierter Leistungszuweisungen zu bestimmten Zeitpunkten vereinbaren, womit die **explizite Steuerung** ihren Einsatzfall findet.

Der Betreiber des Regionalnetzes beabsichtigt nun, die **Steuerungsanforderung** mittels **direkter Steuerung** jeden Tag zu einer bestimmten Zeit an die Verteilnetze als eingelagerte Netzzellen mit festgelegten Leistungen an Übergabepunkten oder maximalen Gleichzeitigkeitsfaktoren für Anlagegruppen in den Verteilnetzen zu senden.

Da die **Steuerungsauslösung** von außerhalb der Systemgrenzen der Verteilnetzzellen stattfindet, handelt es sich hierbei um eine **externe Steuerung**.

Mit Versand der Signale direkt an Einzelanlagen innerhalb der Verteilnetze wird die **Steuerungsverantwortung** durch die Leitwarten der Verteilnetze auch an den Regionalnetzbetreiber abgegeben, womit die **passive Steuerung** aus Sicht der VNBS stattfindet. Mit Versand einer Quote an Marktsysteme in Verteilnetzen, die dann im Zuge von Handelsverfahren Anlagen der betroffenen Gruppen zur gewünschten Leistungsänderung im Verteilnetz mit festen Leistungsänderungen aggregieren, um die Quote zu erfüllen, wird die **aktive Steuerung** durch Systeme im betroffenen Netz eingesetzt.

1.1.2 Flexibilitätsmechanismen

SGI: Kießling, A. (10/2015)

Zielstellung von Flexibilitätsmechanismen

Das Ziel beim Einsatz von Flexibilitätsmechanismen ist es, die Leistung auf einer Kante innerhalb einer Zelle energetisch verbundener Komponenten (intern) oder auf der Kante verbundener Energiezellen (extern) in Bezug auf eine Ausgangsbasis zu verändern. Mit folgender Abbildung wird dies beispielhaft dargestellt.

Die Leistungserwartungskurve der Abbildung stellt eine Prognose dar. Die maximal auf der betrachteten Netzkante als Kuppelpunkt zwischen Knoten 1 und Knoten 2 übertragbare Leistung ist in positiver sowie in negativer Richtung durch die rote, gestrichelte Linie gekennzeichnet. Innerhalb der ersten vier Zeitblöcke Δt_1 bis Δt_4 ab einem Prognosezeitpunkt t_0 in der Zukunft überschreitet die Last im Knoten 1 die Erzeugung in diesem System, womit Energie aus dem Knoten 2 über das koppelnde Netz zufließt, wobei die Leistungsgrenzen nicht erreicht werden. Mit dem grünen Balken im Zeitfenster Δt_5 ist eine hohe Erzeugung im Knoten 1 zu verzeichnen, die den Verbrauch deutlich überschreitet. Die Differenz aus überschüssiger und damit in den Knoten zwei zu transportierende Energie aus Knoten eins überschreitet hierbei zusätzlich einen Grenzwert im Netzbereich der verbindenden Kante.

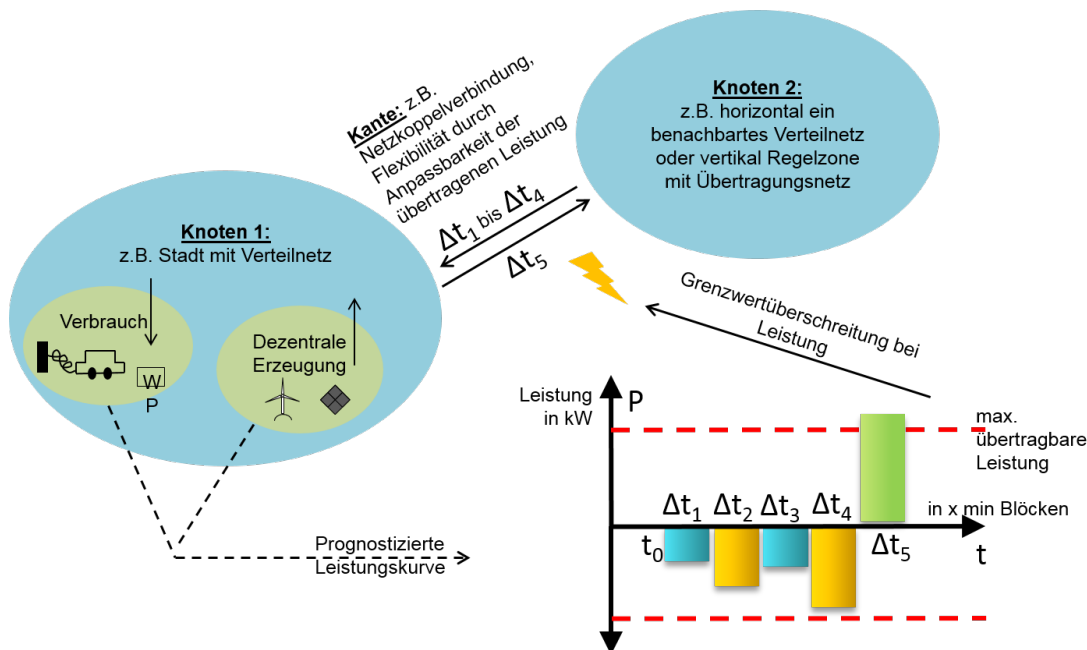


Abb. 1: Erwartungskurven zur Leistung sowie Fluss zwischen Knoten über eine Kante [SGI: Kießling, A. (10/2015)]

Um mögliche Problemlösungen zu betrachten, wird das genutzte Denkmodell noch einmal mit nachfolgenden Stichpunkten kurz zusammengefasst:

- Als Knoten wird eine Energiezelle, also eine Struktur aus einer Anzahl von Energie exportierenden, Energie speichernden und Energie nutzenden Subsystemen, verbunden durch Strukturen von Energienetzen, innerhalb eines begrenzten Bereiches verstanden.
- Ein Knoten entspricht damit einer räumlichen und logisch abgegrenzten Struktur und kann eine Liegenschaft als Gebäude, Areal oder Quartier umfassen, aber auch einem Bereich im Verteilnetz, einem Verteilnetz einer gesamten Stadt, einer Bündelung von Verteilnetzen oder einer Region im Übertragungsnetz sowie einer gesamten Regelzone entsprechen.

- Jeder Knoten wird als offenes System betrachtet, das über eine oder mehrere Kanten mit der Umwelt Verbindungen eingeht. Es entsteht also ein System aus Systemen. Für die hier geführte Betrachtung wird nur eine Kante einbezogen.
- Eine Kante kann dabei sowohl horizontal zwischen zwei Energiezellen der gleichen Stufe n (peer-to-peer zwischen Geräten eines Gebäudes, zwischen Gebäuden und Arealen oder zum Beispiel zwischen benachbarten Verteilnetzen), aber auch vertikal zwischen mehreren Systemen sowie einem aggregierenden, einbettenden System (z.B. Gebäude im Verteilnetz oder Verteilnetz im Übertragungsnetz – Energiezellen von Stufe n und Stufe $n-1$ interagieren) gebildet werden.
- Innerhalb des betrachteten Knotens liefern wiederum integrierte Subsysteme als Energiequellen oder als Energiesenken in diesem Knoten.
- Für die hier gegenüber externen Knoten geführte Betrachtung befinden sich die inneren Netze im Knoten 1 und 2 innerhalb ihrer zulässigen Netzparameter und es findet keine weitere Betrachtung dieser Netze statt. Die hier geführte Betrachtung ist aber analog auch für einbettende Strukturen anwendbar und damit rekursiv wiederholbar.
- Die Differenz aus Erzeugung und Verbrauch innerhalb eines Knotens kann über die Kante zu einem anderen Knoten in beide Richtungen als überschüssige Leistung transportiert werden.
- Grenzwertüberschreitungen zur Leistung auf der Kante werden durch Verringerung der Differenz in den Leistungsbilanzen innerhalb der Knoten durch Ausnutzung der Flexibilität von Einspeisung, Last und Speicherung auf Seiten beider Knoten korrigiert.

Im realen System besitzen Knoten als Energiezellen eine innere Struktur, die wiederum aus verbundenen Knoten (Bereiche im Verteilnetz, Areale, Quartiere und Liegenschaften) bestehen. Außerdem können Bedarfe zur Leistungsanpassung auch auf Basis der inneren, vernetzenden Struktur innerhalb des Knotens entstehen, wovon hier aber abstrahiert wird. Die mögliche rekursive Wiederholung wurde schon angesprochen.

Steuerungsmöglichkeiten für Flexibilitätsmechanismen

Nachfolgend sollen die Möglichkeiten erläutert werden, Grenzwertüberschreitungen im Leistungsunterschied an der Kante zwischen zwei Knoten durch Verringerung der Differenz in den Leistungsbilanzen bei Ausnutzung der Flexibilität von Einspeisung, Last und Speicherung auf Seiten beider Knoten zu korrigieren.

Zur Steuerung der Leistungsflüsse ist zuerst die Energieeinspeisung aller im Knoten 1 enthaltenen Subsysteme als Energiequellen zu prognostizieren und für den Knoten aufzusummieren (**Erzeugungsprognose Knoten 1**). Dies geschieht durch die Prognose der Leistung der Subsysteme über definierte Zeitblöcke. Der daraus resultierende Leistungsfluss wird in nachfolgender Abbildung im ersten Abschnitt als Beispiel nur mit einem Leistungsblock dargestellt, in dem Energieeinspeisung aus Quellen im Knoten 1 stattfindet. Diese Einspeisung wird als positiver, grüner Leistungsbalken mit 370 Leistungseinheiten aus Sicht des im Knoten 1 verbindenden, internen Netzes dargestellt.

Im zweiten Schritt ist der Energiebezug aller im Knoten 1 enthaltenen Subsysteme als Energiesenken zu prognostizieren und für diesen Knoten aufzusummieren (**Lastprognose Knoten 1**). Hierzu dient ebenso die Prognose der Leistung dieser Subsysteme über definierte Zeitblöcke. Der daraus resultierende Leistungsfluss wird in nachfolgender Abbildung im zweiten Abschnitt als Beispiel mit fünf Leistungsblöcken dargestellt, in denen Energie von Komponenten innerhalb des Knotens 1 bezogen wird. Dieser Bezug wird aus Sicht des innerhalb des Knotens 1 verbindenden, internen Netzes mit negativen Leistungsbalken dargestellt. Im Beispiel betrifft dies im

zweiten Abschnitt den 1., 2. und 5. Balken (grau und grün) als eine Art Grundlast sowie im 2. und 4. Balken (gelb) Sonderlasten (z.B. Ladepunkte), die die negative Leistung innerhalb des Knotens 1 deutlich erhöhen können.

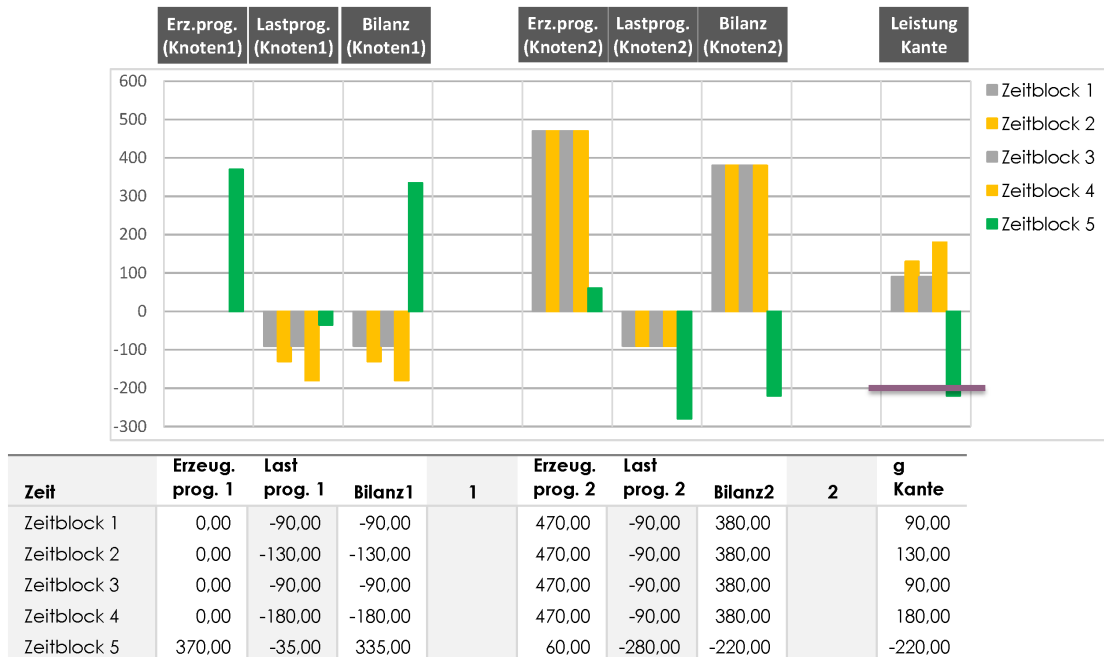


Abb. 2: Leistungsfluss auf Netzverbindung (Kante) zwischen zwei Energiezellen (Knoten)

Auf Basis der aufsummierten Prognosen im Knoten 1 für Erzeugung (Einspeisung aus Quellen im Knoten 1 in das intern dieses System verbindende Netz) und Lastbezug aus dem intern den Knoten 1 verbindenden Netz in interne Senken) wird im dritten Abschnitt der Betrachtung zu Knoten 1 die Bilanz durch Summation von Erzeugung und Last in jedem Zeitblock gebildet (**Bilanz Knoten 1**). Daraus ergeben sich für den Knoten 1 eine Leistungsunterdeckung in den ersten vier Balken sowie ein Leistungsüberschuss im fünften Balken.

Auf analoge Weise werden die **Erzeugungsprognose zum Knoten 2** und die **Lastprognose zum Knoten 2** (Abschnitt 4 und 5) sowie die **Bilanz zum Knoten 2** (Abschnitt 6) gebildet. In diesem Falle findet eine hohe Erzeugung in den Zeitblöcken 1 bis 4 mit 470 Leistungseinheiten sowie eine prognostizierte, durch Windstille und Dunkelheit bewirkte, viel geringere Erzeugung im Zeitblock 5 mit 60 Leistungseinheiten statt, während die Last in den Zeitblöcken 1 bis 4 mit minus 90 Leistungseinheiten sowie deutlich im Zeitblock 5 erhöht minus 280 Leistungseinheiten beträgt. Die resultierende Bilanz im Knoten 2 umfasst damit 5 Zeitblöcke mit Leistungsüberschüssen von 380 Leistungseinheiten in den ersten vier Zeitblöcken sowie einer Leistungsunterdeckung im fünften Zeitblock mit minus 220 Leistungseinheiten.

Wir gehen in diesem Beispiel davon aus, dass innerhalb beider Knoten ausreichende Leitungskapazitäten für den Transport der Leistung bis zu 500 Leistungseinheiten vorhanden sind. Der Engpass soll durch die verbindende Kante gegeben sein, die nur bis zu 200 Leistungseinheiten belastbar ist.

Mit Abschnitt 7 der Abbildung wird nun die Leistung auf der Kante bei Energieflüssen zwischen den beiden Knoten auf Basis der bilanziellen Differenz in beiden Knoten dargestellt, wobei die zu hohe Leistung auf der Kante in Höhe von 220 im letzten Block zu erkennen ist.

Mit welchen Maßnahmen kann nun das Ziel erreicht werden, den Stromfluss zwischen Knoten 1 und 2 über die Kante im Zeitfenster 5 zu senken?

Der Leistung im Zeitblock 5 über die Kante sinkt, wenn

- die positive Leistungsbilanz im Knoten 1 unter 220 Leistungseinheiten verringert oder
- die negative Leistungsbilanz im Knoten 2 reduziert wird.

Bezüglich des 1. Falles kann die positive Leistungsbilanz im Knoten 1 im Zeitblock 5 gesenkt werden, indem

- die Erzeugung zum Zeitblock 5 durch Senkung der Einspeisung in das im Knoten 1 verbindende Netz gesenkt wird (**Abregelung Erzeugung im Knoten 1**),
- der Abtransport der Erzeugung zum Zeitblock 5 durch Speicherung innerhalb des Knotens 1 oder in einem der Subsysteme gesenkt wird (**Steigerung Speicherbefüllung im Knoten 1**),
- im Zeitblock 5 eine zusätzliche Last aktiviert wird (**Erhöhung Energienutzung im Knoten 1**)
- für Lasten, die lokal Energie aus Speichern im Knoten 1 beziehen, durch Senkung der Entleerung von Speichern zum Zeitblock 5 mehr Energie im Knoten 1 genutzt und damit weniger Energie zum Knoten 2 transportiert werden kann (**Senkung Speicherleerung im Knoten 1**)
- sowie eine Last beispielsweise aus dem Zeitblock 4 zum Zeitblock 5 in dem Maße verschoben wird, dass ein verbleibender Erzeugungsüberschuss von unter 200 Leistungseinheiten entsteht, womit die Grenzwerte der Kante bei Lieferung an Knoten 2 nicht mehr erreicht werden (**Lastverschiebung im Knoten 1**)

Ebenso kann im 2. Fall die negative Leistungsbilanz im Knoten 2 zum Zeitblock reduziert werden, indem

- die Erzeugung zum Zeitblock 5 durch Erhöhung der Einspeisung in das im Knoten 2 verbindende Netz durch eine bisher nicht völlig ausgelastete Anlage oder eine aktuell vor Ort speichernde Erzeugungsanlage (z.B. KWK, Biomassekraftwerk) gesteigert wird (**Steigerung Erzeugung im Knoten 2**)
- der Zutransport der Erzeugung vom Knoten 1 zum Zeitpunkt 5 durch Reduzierung der Speicherung innerhalb des Knotens 2 oder in einem der Subsysteme gesenkt wird (**Senkung Speicherbefüllung im Knoten 2**)
- im Zeitblock 5 eine Last reduziert wird (**Senkung Energienutzung im Knoten 2**)
- die Einspeisung zum Zeitblock 5 durch Leeren eines Speichers im Knoten 2 erhöht wird (**Steigerung Speicherleerung im Knoten 2**)
- sowie eine Last im Knoten 2 beispielsweise aus dem Zeitblock 5 zum Zeitblock 4 verschoben wird (**Lastverschiebung im Knoten 2**).

In der Kombination führen diese Maßnahmen zu einer Senkung der Leistungsflüsse zwischen den beiden Knoten und damit zu einer Reduktion des grünen Balkens im Zeitblock 5 des siebenten Abschnittes der Abbildung und damit zur Beseitigung der Grenzwertverletzung.

1.2 Flexibilitätsbegriff und Flexibilitätsmodell

Anspruch im C/sells-Projekt war es, verschiedene Ansätze zur Spezifikation eines Flexibilitätsmodells gegenüberzustellen und einen C/sells-Vorschlag für dieses Modell abzuleiten und im Gesamtprojekt abzustimmen, um die Verwendbarkeit in Bezug auf in verschiedenen C/sells-Demonstrationslösungen eingeführte Flexibilitätsmechanismen zu prüfen.

Dabei wird Flexibilität durch die Bundesnetzagentur folgendermaßen definiert:

„Flexibilität ist die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme in Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung), mit dem Ziel eine Dienstleistung im Energiesystem zu erbringen. Die Parameter um Flexibilität zu charakterisieren beinhalten: die Höhe der Leistungsveränderung, die Dauer, die Veränderungsrate, die Reaktionszeit, der Ort etc.“ (BNetzA, 2017)

Grundsätzlich kann ein System mehrere gültige Verhaltensweisen einnehmen. Setzt man die Menge dieser möglichen Verhaltensweisen zu einem vorgesehenen Verhalten in Bezug, wird von der Flexibilität des Systems gesprochen.

Entsprechend dieser verallgemeinerten Flexibilitätssicht wurde in der C/sells-Fachgruppe eine grundlegende Definition von Flexibilität eingeführt. Nachfolgend wird aus dem zugehörigen Dokument zitiert.

„Die *Flexibilität eines Energiesystems* ist die Menge aller gültigen Kombinationen von Systemeingaben und der zustandsbezogenen Ausgaben im Hinblick auf alle Energieträger. Gültige Kombinationen sind dadurch gekennzeichnet, dass alle notwendigen Energiedienstleistungen in einem stabilen System erbracht werden. (vgl. Mauser, Ingo; Förderer, Kevin; Müller, Jan; Schmeck, Hartmut. (2017))

Man beachte, dass bei dieser Definition – wie dies auch in nachfolgender Abbildung dargestellt wird – das betrachtete Energiesystem in der Regel einen Teilausschnitt eines größeren Systems darstellt, sodass

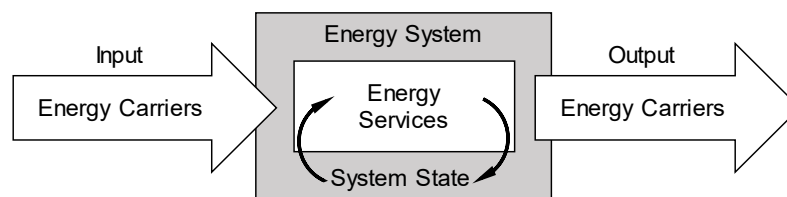


Abb. 3: Darstellung der nicht-technischen Definition von Flexibilität im Kontext Energie [Mauser, Ingo; Förderer, Kevin; Müller, Jan; Schmeck, Hartmut. (2017)]

Energieflüsse aus dem größeren System in das betrachtete System hinein- (*Input*) als auch herausfließen (*Output*). Das betrachtete Energiesystem kann z.B. ein elektrisches Verteilnetz als ein Teilausschnitt eines größeren Systems sein, das auch die angeschlossenen Erzeugungs- und Verbraucheranlagen, angeschlossene Speicher, etc. berücksichtigt. Energie fließt dann von den Erzeuger- und/oder Speicheranlagen in das elektrische Verteilnetz hinein oder wird als Output konsumiert.

Die Flexibilität des Verteilnetzes ist folglich definiert über die Veränderungsfähigkeit und Elastizität des Verteilnetzes (Energiesystems), bei der Inputs und Outputs das Verteilnetz nicht in einen instabilen Zustand bringen.

In der Praxis betrachtet man den Flexibilitätsbegriff häufig nicht als Eigenschaft eines Gesamtsystems (z.B. des gesamten elektrischen Netzes oder einer Zelle), sondern als Eigenschaft einer an ein solches Gesamtsystem angeschlossenen technischen Komponente, Anlage oder eines Anlagenverbundes.“

[C/sells – FG Flexibilität. (12/2018)]

1.2.1 SynErgie-Modell

Als externer Vergleichsmaßstab für die verschiedenen C/sells-Konzepte wird dabei folgende Quelle benutzt: Paul Schott, Johannes Sedlmeir, Nina Strobel, Thomas Weber, Gilbert Fridgen and Eberhard Abele. A Generic Data Model for Describing Flexibility in Power Markets. *Energies - Open Access Journal*. Veröffentlichung 18 Mai 2019 [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)]. Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes SynErgie als Teil des Programmes „Kopernikus-Projekte für die Energiewende“.

Einführung in das SynErgie-Modell

Das Modell legt den Fokus auf die Beschreibung industrieller Flexibilität. Der umfassende Ansatz zur Automatisierung der Nutzung von Flexibilitätspotentialen und im fortgeschrittenen Energiemanagement scheint aber geeignet, auch in anderen Bereichen genutzt werden zu können. Ziel des im Artikel beschriebenen Ansatzes ist auch die Standardisierung der Beschreibung von Flexibilität sowie der darauf basierenden Interaktionen bei Austauschprozessen.

Flexibilität kann seitens des Energieangebotes, des Energiebedarfes, der Energiespeicherung sowie durch Flexibilität im Netz angeboten werden. **Insbesondere die verbrauchsseitige Flexibilität wird dabei als Abweichung vom geplanten Verhalten definiert. Somit korrespondiert dies mit der C/sells-Definition, dass Flexibilität auf einer Schar von Leistungskurven (positive Leistung im Bezug sowie negative Leistung in der Einspeisung) basiert, die möglich sind. Dabei wird eine Leistungskurve als Basis geplant und prognostiziert, während die anderen Leistungskurven zum Angebot möglicher Flexibilität herangezogen werden.**

Das modulare Modell soll die Abbildung der verschiedensten Arten von Flexibilität ermöglichen und bei verschiedenen Anwendungssektoren (Flexibilität in Industrie sowie Groß- und Kleingewerbe, beim Wohnen, im Handel und bei Energiedienstleistungen, sowohl beim Angebot und der Nutzung von Flexibilität) einsetzbar sein.

Das Angebot von Flexibilität kann durch feste Vereinbarungen oder durch Preissignale verschiedener Akteure innerhalb oder außerhalb einer Energiezelle ausgelöst oder motiviert werden. Eine entsprechende Kategorisierung der Steuerungskategorien fand im Kapitel 1.1.1 statt.

Die grundsätzliche Umsetzung zur Beschreibung einer Flexibilität erfolgt modular, d.h. mehrere flexible Einheiten können unter Nutzung der Beschreibung von Abhängigkeiten in gesonderten Modulen zusammengesetzt werden. Dabei wird im SynErgie-Modell der Fokus zuerst auf den flexiblen Bezug von Energie im Zusammenhang mit flexiblen Speichern gelegt. In gleicher Weise kann das flexible Angebot von Energie im Zusammenhang mit flexiblen Speichern modelliert werden.

Der Begriff der flexiblen Last soll deshalb hier in zwei Richtungen definiert werden. Eine positive Leistung wird flexiblen Lasten zugeordnet, die Energie beziehen, während eine negative Leistung flexiblen Lasten zugeordnet wird, die Energie einspeisen.

Das Beispiel in nachfolgender Abbildung aus [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)] soll den Einsatz einer flexiblen Last verdeutlichen. Zwei flexible Lasten erbringen Flexibilität in einer bestimmten Abhängigkeit, wobei die Flexibilität einer Last dabei von zwei Speichern unterstützt wird sowie der zweite Speicher auch noch zur Unterstützung der zweiten flexiblen Last dient.

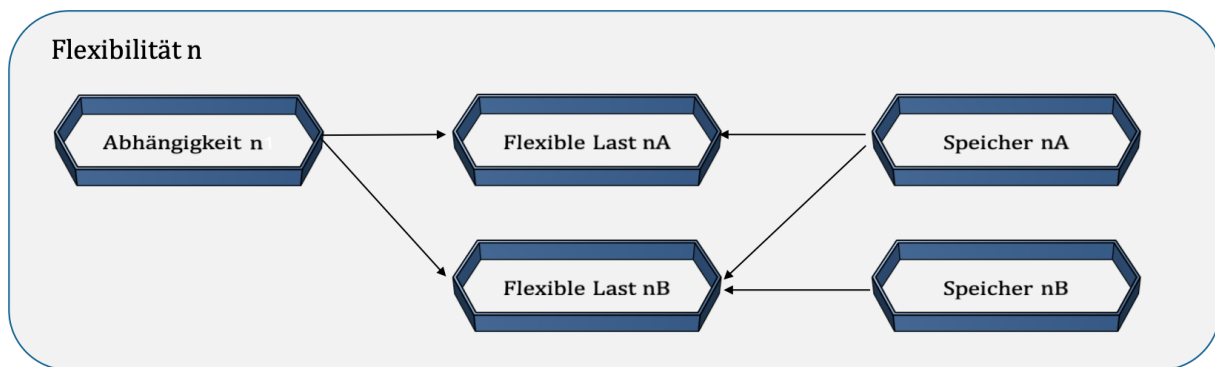


Abb. 4: Beispiel zur modularen Modellierung einer Flexibilität [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)]

Eine flexible Entität – hier am Beispiel einer **flexiblen Last** – wird durch eine **Schar möglicher individueller Lastkurven** charakterisiert. Die Nutzung einer speziellen Realisierung aus der Menge der Lastkurven wird dann **flexible Lastmaßnahme** genannt.

Mathematisch lässt sich eine Lastkurve nun als einfacher Graf mit der Leistung je Zeitpunkt beschreiben. Im Sinne einer intuitiveren Beschreibbarkeit und Programmierbarkeit der Flexibilität bestimmter Einheiten (Geräte / Anlagen / Zellen) wurde folgende Form gewählt. Eine Lastkurve besteht aus Zeitperioden mit entweder konstanter Leistung (**Halteperioden**) oder sich positive oder negativ ändernden Leistungen. (**Modulationsperioden**), ergänzt um eine **Aktivierungs-** und eine **Deaktivierungsperiode**. Dabei wird hier im Beispiel nur der Bezug von Energie betrachtet.

Leistung: P

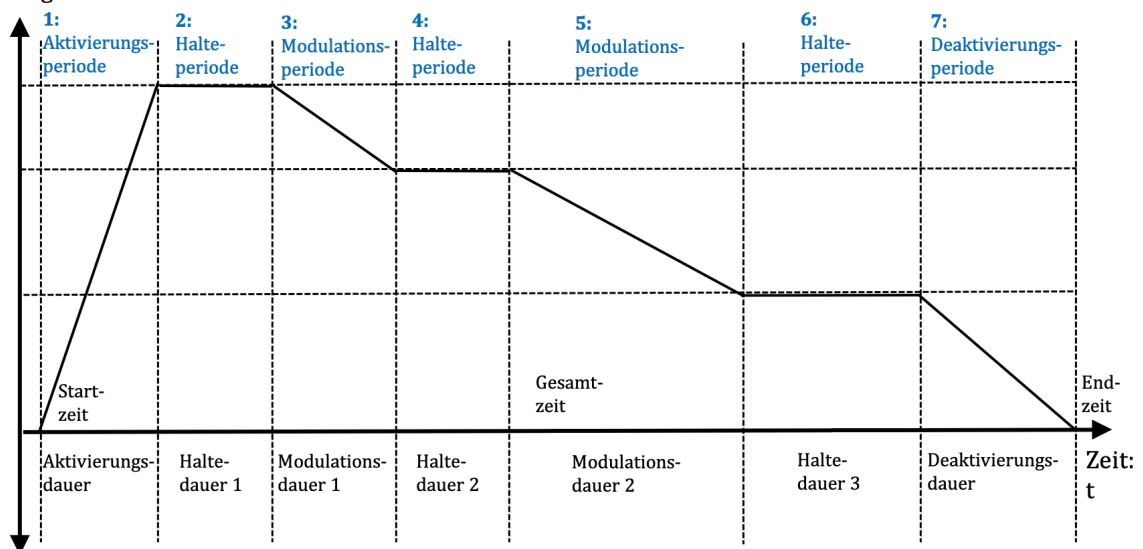


Abb. 5: Beispiel für eine Lastkurve einer möglichen flexiblen Lastmaßnahme aus der Schar möglicher individueller Lastkurven einer flexiblen Einheit [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)]

Datenstruktur zur flexiblen Last

Betrachtet wird ein **Planungshorizont H**, der durch ein Zeitintervall von einer definierten Zeit bis zu einer anderen, nachfolgenden Zeit festgelegt wird.

Da nun innerhalb einer Zelle eine beliebig große Zahl flexibler Einheiten existieren kann, wird je Einheit eine eindeutige **Flexible Last ID** benötigt.

Bei Steuerungen kann es einerseits zu Verzögerungen durch die Signalübertragung, aber auch durch die technische Trägheit der Geräte und Anlagen selbst kommen. Insofern wird als weiteres Datenelement die **Reaktionszeit (reaction duration)** benötigt.

Weitere technische Restriktionen schränken die grundsätzliche Verfügbarkeit von Flexibilitätspotentialen zu bestimmten Zeiten ein. Deshalb wird die Definition von Zeitfenstern notwendig, in denen Flexibilität grundsätzlich bereitgestellt werden kann. Außerhalb dieser Fenster steht das jeweilige System für Flexibilitätsmechanismen nicht zur Verfügung. Die nutzbaren Zeitperioden werden mit der Kenngröße **Gültigkeit (validity)** beschrieben. Diese Zeitperioden sind jeweils Subsets im definierten Planungshorizont H sind und werden damit ebenso durch verschiedene Zeitvariablen beschrieben. Jede Periode der Gültigkeit besteht aus einem Tupel der Variablen **Startzeit (start)** und **Endzeit (end)** sowie der Variable **totale Zeitdauer (total)**, wobei der dritte Wert die maximale Dauer beschreibt, zu der innerhalb der gesamten Zeitperiode von start bis end Flexibilität bereitgestellt werden kann.

Ebenso können bestimmte Geräte und Anlagen mit einem variablen Leistungswert betrieben werden, während andere Anlagen nur auf bestimmte, diskrete Leistungswerte eingestellt werden können. Hinzu kommt, dass Leistungswerte von Anlagen über eine bestimmte Zeitdauer selten exakt konstant sind, aber die Vermarktung von Flexibilität und Energie über feste Zeitblöcke (z.B. 15 Minuten-Blöcke) mit konstanter Leistung erfolgt. Insofern ist der sogenannte **Leistungszustand (power state)** der flexiblen Einheiten einzubeziehen.

Bestimmte Anlagen benötigen wiederum eine minimale Funktionsdauer, um ihre Prozesse vollenden zu können. Dies führt dazu, dass die Haltedauer nicht unbeschränkt klein bei einer Leistungskurve zum Angebot von Flexibilität festgelegt werden kann. Diese Restriktion wird durch die **Haltedauer (holding duration)** zu jeder definierten Halteperiode definiert. Es sind also unterschiedliche Werte der Haltedauer definierbar und den Halteintervallen zuordenbar.

Andere Geräte arbeiten nun mit einer hohen Wiederholungsrate, innerhalb einer definierten totalen Dauer zur Bereitstellung von Flexibilität. Um nun die Anzahl der Flexibilitätsaktivierungen innerhalb dieser Zeitdauer einzuschränken, kann eine Maximalzahl durch die **Nutzungsanzahl** festgelegt werden.

Modulationsperioden können auch aufeinander ohne zwischenzeitliche Halteperioden folgen. Die Anzahl der Modulationsperioden kann über die **Modulationsanzahl** angegeben werden.

Die Geschwindigkeit der Modulation wird sich zwischen den verschiedenen flexiblen Lasten unterscheiden. Insofern macht es Sinn, die benötigte oder die leistbare Modulationsgeschwindigkeit anzugeben. Dies trifft auch für die Aktivierungs- und Deaktivierungsphase zu. Dazu dienen die Angaben in Leistung pro Zeiteinheit für **Modulationsgradient, Aktivierungsgradient** und **Deaktivierungsgradient**.

Weiterhin kann nach Bereitstellung einer Flexibilität nicht sofort zur nächsten bereitzustellenden Flexibilität übergegangen werden. Dies wird durch eine **Regenerationsdauer** größer Null angegeben.

Aufgrund der Komplexität der Einbeziehung der **Kosten** bei Flexibilitätsprozessen in unterschiedlicher Umgebung und bei verschiedensten Anlagen – auch abhängig vom Geschäftsmodell - ist dieser Punkt nicht explizit im Flexibilitätsmodell enthalten, muss aber durch eine nachrangige Berechnung bei Flexibilitätsprozessen, die das Modell nutzen, einbezogen werden.

Eine Zusammenfassung dieser notwendigen Datenstrukturen mit jeweiligen Datentypen und Einheiten kann [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)] auf Seite 11 entnommen werden.

Datenstruktur für Abhängigkeiten

Hiermit sollen die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen flexiblen Lasten bei der Bereitstellung einer gemeinsamen Flexibilität dargestellt werden.

Hierzu werden Datenelemente eingeführt, die eine flexible Last als Trigger einer flexiblen Lastmaßnahme, sowie eine weitere flexible Last als Ziel einer flexiblen Lastmaßnahme definieren. Damit kann beispielsweise definiert werden, dass eine Maßnahme der flexiblen Ziellast (**target flexible load**) in Abhängigkeit von einer Maßnahme

einer flexiblen Triggerlast (**trigger flexible load**) ausgeführt wird. Dazu gehörend wird ein **logischer Typ** zur Verknüpfung dieser beiden Maßnahmen definiert. So können Verknüpfungen der Maßnahmen von Trigger und Ziel geschaffen werden, zum Beispiel durch bestimmte logische Verknüpfungen (**Implikation**), auf Basis der Maßnahmen zusammen ausgeführt werden müssen oder als **EXCLUDE**-Verknüpfung (Maßnahme in Triggerlast schließt Ausführung der Maßnahme in der Ziellast aus. Weitere Verknüpfungstypen können definiert werden.

Mit der Anwendungsdauer (**applicability duration**) kann dann die Zeit festgelegt werden, in der die Flexibilitätsmaßnahme in der Ziellast aktiviert werden muss, nachdem die Maßnahme in der Triggerlast startete. Im Falle der Exclude-Verknüpfung wird hiermit die Zeit bestimmt, in der die flexible Ziellast nicht für eine Flexibilitätsmaßnahme genutzt werden darf.

Analog zur Gültigkeit bei der Datenstruktur zur flexiblen Last wird auch hier die Definition eines Zeitfenster für das Bestehen der Abhängigkeit benötigt. Dazu wird ein **temporaler Typ** genutzt, der in der Anwendung jeweils aus Kombinationen von "Startzeit", "totale Zeit" und "Endezeit" in beiden Komponenten besteht. Damit entstehen Darstellungen in welchen Intervallen flexible Lastmaßnahmen der Triggerlast und der Ziellast liegen müssen oder nicht liegen dürfen.

Zur Erfüllung eventueller weiterer Anforderungen, die auch komplexen Berechnungsvorschriften unterliegen können, wird die Kenngröße „**zusätzliche Bedingungen – additional conditions**“ eingeführt. Jede dieser Bedingungen wird durch eine Gleichung beschrieben, die sich auf die hier definierten Kenngrößen sowie die involvierten flexiblen Lasten bezieht.

Datenstruktur zum Speicher

Die Datenstruktur zur Spezifikation der Besonderheiten von Speichern enthält keine Einschränkungen auf elektrische Speicher, sondern berücksichtigt die Speicherpotentiale der verschiedensten Energiearten, die insbesondere in Industrieprozessen vielfältig sind.

Da nun innerhalb einer Zelle eine beliebig große Zahl flexibler Speicher existieren kann, wird je Einheit eine eindeutige **Speicher ID** benötigt.

Da in der Regel nicht die gesamte Kapazität eines Speichers für Flexibilitätsprozesse eingesetzt werden soll, wird die Kenngröße „**nutzbare Kapazität – usable capacity**“ eingeführt. Die nutzbare Kapazität wird dabei durch eine untere Grenze gespeicherter Energie, die bei Maßnahmen nie unterschritten werden soll, sowie eine obere Grenze gespeicherter Energie, die bei Maßnahmen nie überschritten werden soll, spezifiziert.

Weiterhin werden der initiale Energiegehalt als auch der „**Ziel-Energiegehalt – target energy content**“ jeweils zu einem bestimmten Zeitpunkt als notwendige Kenngrößen zum Beispiel bei Ladeprozessen eingeführt.

Eventuell kann es einen Energieverlust von der Berechnung eines Flexibilitätsprozesses bis zu seiner Initiierung geben, z.B. das Absinken der Temperatur im Energiespeicher. Hierfür wird die Kenngröße **Energieverlust** mit der Einheit Prozent je Sekunde definiert.

Die Verbindung zwischen flexiblen Lasten und Speichern kann mit verschiedener Effizienz wirksam sein. Somit wird der Speicher bei Belieferung von verschiedenen Lasten mit unterschiedlicher Zeitdauer befüllt. Zur Abbildung der verschiedenen Wirkung wird die Kenngröße „**Lieferant – supplier**“ genutzt, die mit einer Lieferanten-ID und einer Effizienzbeschreibung befüllt wird. Dabei kann die Effizienzbeschreibung wiederum von allen anderen Kenngrößen des Lieferanten abhängen.

Es gibt auch unbeeinflussbare Lasten. Diese Komponenten werden mit der Kenngröße „**Abluss – Drain**“ erfasst, mit der die nicht beeinflussbare, ständig abgezogene Leistung zu jedem Zeitpunkt benannt wird. Damit wird eine Leistungskurve definiert, die nicht durch eine andere Leistungskurve einer flexiblen Lastmaßnahme ersetzt werden kann.

Kosten für die Speicheroperationen können zugeordnet und somit mit den Kosten für die flexiblen Lasten zu einer umfassenden Betrachtung der Kosten der Gesamtheit des Systemaufbaues zur Definition einer Flexibilität sehr differenziert zusammengeführt werden.

Die Abhängigkeiten der Datenstruktur zum Speicher zu den Datenstrukturen flexible Last und Abhängigkeiten besteht damit über die Kenngröße Lieferant und die Kosten.

Datenstruktur zur flexiblen Lastmaßnahme

Zusätzlich zum Datenmodell zur Systembeschreibung für eine Flexibilität mit den drei Strukturen flexible Last, Abhängigkeiten und Speicher wird eine Datenstruktur für die flexible Lastmaßnahme selbst benötigt. Wie schon ausgeführt kann jeder Komponente eine geplante oder prognostizierte Lastkurve sowie ein Schaar weiterer, individueller Lastkurven – also die Menge möglicher individueller, flexibler Lastmaßnahmen (flexible load measures) zugeordnet werden.

Der nachfolgende Ansatz dient der Beschreibung einer individuellen flexiblen Lastmaßnahme. Zur Beschreibung dieser Lastmaßnahme wird eine Datenstruktur mit folgenden Kenngrößen, abgeleitet aus der Struktur für eine flexible Last, definiert:

- flexible Last ID: eindeutige Kennzeichnung der die Lastmaßnahme umsetzenden Komponente
- Reaktionszeit: Verzögerungen durch die Signalübertragung, aber auch durch die technische Trägheit der Geräte und Anlagen
- Startzeit: aus dem Subset für die Gültigkeit der Datenstruktur der flexiblen Last hier die Einschränkung auf die Startzeit möglich, da jede einzelne Modulationsperiode einen Datensatz bildet
- Leistungszustände (power states): Vektor mit allen Werten zum Powerstatus, dessen Länge von der Anzahl der Modulationszyklen abhängt
- Halteperioden (holding durations): Vektor mit allen Werten von Halteperioden, dessen Länge von der Anzahl der Modulationszyklen abhängt
- Modulationsanzahl (modulation number): Anzahl der Modulationsperioden
- Gradienten (gradients): Vektor für alle Änderungsperioden inklusive der Aktivierungs- und Deaktivierungsperiode sowie der m Modulationsperioden
- Kosten (costs): finanzielle Aufwände für die Nutzung einer flexiblen Last ohne die Energiekosten

Verschiedene Beispiele im Artikel [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)] verdeutlichen die Anwendung des beschriebenen Flexibilitätsmodells.

1.2.1 Klassenkonzept zum Flexibilitätsmodell

Als grundlegende Objekte eines Flexibilitätsdatenmodells in C/sells wurden identifiziert:

- Organisatorische Daten zum Betreiber (Eigentümer) der Flexibilität, beispielsweise mit Akteur und zugehörigen Namen, Kontaktinformation, Kommunikationsdaten
- gemeinsam notwendige technische Daten zum Anschlusspunkt (PCC: point of common coupling) mit Zuordnung der Gridlevels (evtl. Spannungsebene), IDs für Messlokation, Geolokation, zuständiger Netzbetreiber
- Geolokation zum Mapping zwischen PCC-Daten und Netzbetreiberzuordnung der Anlage,
- Information über die angeschlossene Anlage / den Anlagenverbund als ein oder mehrere logische Objekte, welche jeweils eine einzelne Anlage oder ein einzelnes Gerät als Verbraucher, Erzeuger oder Speicher als auch ein System in der Bündelung von mehreren Anlagen / Geräten innerhalb einer Zelle (z.B. Gebäude (Quartier / Areal) beschreiben kann (inkl. technischer Daten zur Facility, wie maximale / minimale Leistung, Änderungsgeschwindigkeiten, Schwarzstart- und Inselfähigkeit, Kapazität, usw., siehe auch [Sedlmeir, j. et. al. (05/2019)]).
- Stammdaten zur Beschreibung der Flexibilität der Facility inklusive Einsatzverantwortlicher (EIV) als zuständiger Betreiber der Facility
- Liste von möglichen Flexibilitätsmaßnahmen mit Bezug zur ID der Stammdaten der Flexibilität, wobei Flexibilitätsmaßnahmen mögliche Leistungsänderungskurven gegenüber dem prognostizierten oder vereinbarten Verhalten beschreiben
- Liste der zur Vermarktung angebotenen Flexibilitätsmaßnahmen mit IDs zum Vermarkter, um nach Vermarktung die betroffene Flexibilitätsmaßnahme zur Verhinderung von Doppelvermarktungen zu streichen

Zur Ableitung eines Datenmodells wurde im ersten Schritt folgendes Klassendiagramm als Grobkonzept diskutiert.

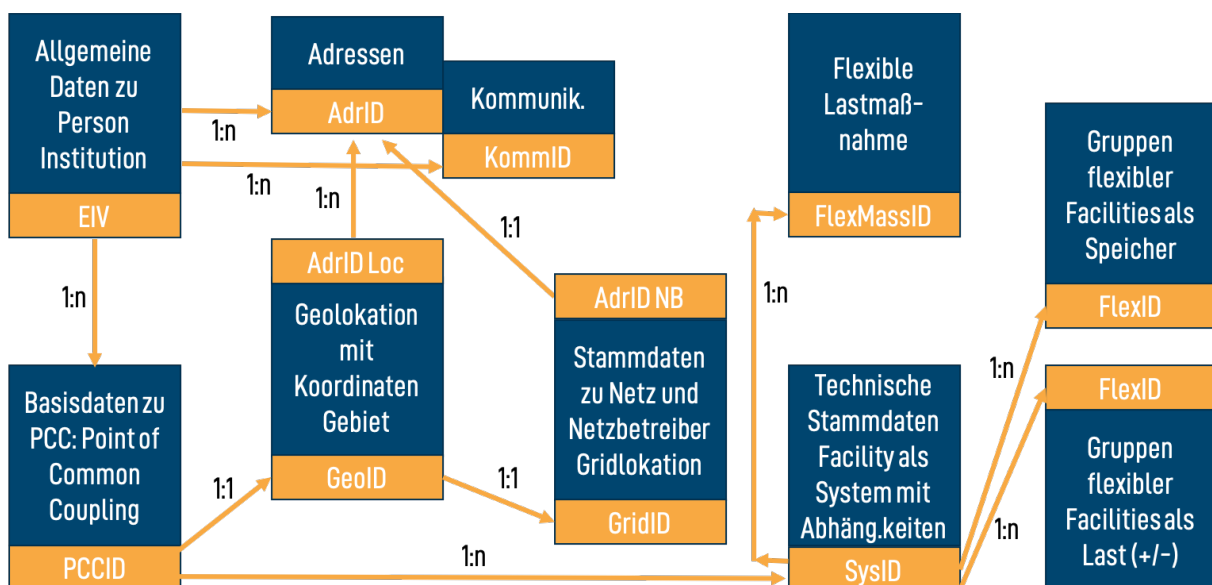


Abb. 6: Klassendiagramm zur Diskussion des Flexibilitätsmodells



2 Quellen

siehe Quellenverzeichnis in

Kießling, A. et al. (11/2020): Grundlagen der Massenfähigkeit. Methoden, Modelle für Interoperabilität durch Regeln, Standards und Normen sowie Verhältnis von Innovation, Standardisierung und Regulierung. Zusammenfassung, Motivation, Abgrenzung, Werkzeuge, Anwendung. Von <https://www.csells.net/de/ergebnisse-c-sells/arbeitspakete/45-arbeitspaket1-2.html> abgerufen