VDE Studie



Das zellulare Verteilnetz

by VDE ETG

VDE

Empfohlene Zitierweise
VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
Das zellulare Verteilnetz, VDE Studie, Offenbach am Main, Juli 2026

Diese VDE Studie ist Arbeitsergebnis des Fachausschusses V2.4 „Zellulare Energiesysteme“ des ETG Fachausschusses.

Autoren:
Josef Bayer, EnSolVision GmbH
Jan Roschek, Polarium Energy Solutions AB
Stefan Aigenbauer, BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH
Lutz Josef Schmid, Schmid Datensicherheit GmbH
Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Prof. Dr.-Ing. Markus Zink, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt
Gerhard Jost, Ingenieurbüro Klein
Patrick Scholz, EnSolVision GmbH
Marcel Linnemann, ENERVIE Vernetzt GmbH

Vorbemerkung
VDE Studien geben – entsprechend der Positionierung des VDE als neutraler, technisch-wissenschaftlicher Verband – gemeinsame Erkenntnisse des jeweiligen Gremiums wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse werden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studien spiegeln daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wider.

Herausgeber:
VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.
Energietechnische Gesellschaft (ETG)
Merianstraße 28
63069 Offenbach
Tel. +49 69 6308-346
etg@vde.com
www.vde.com/etg

Titelbild und Foto auf Seite 31: © Sergey Nivens / stock.adobe.com

Design: Schaper Kommunikation, Bad Nauheim

Juli 2026

Inhalt

Executive Summary ... 4
1. Das Zellulare Organisationsprinzip ... 5
1.1. Problemstellung ... 6
1.2. Konzept ... 6
1.3. Ausgangslage der Energiewende ... 7
1.4. Grenzen der heutigen Netzbetriebsweise ... 8
1.5. Grundidee: Lokale Balance statt zentraler Steuerung ... 8
2. Definition ... 10
3. Entstehung und Entwicklungsgeschichte ... 11
3.1. Motivation ... 12
3.2. Historie und Entwicklung ... 12
4. Systemmodell und Arbeitsweise ... 13
4.1. Architektur und Steuerung im Systemmodell ... 14
4.2. Paradigmenwechsel in der Netzführung ... 18
4.3. Informationsfluss ... 19
4.4. Transformation zu einem zellularen Energiesystem ... 21
4.5. Funktionsprinzip des zellularen Energiesystems ... 22
4.6. Beispiele für Flexibilitäten ... 23
5. Spezialfälle und Detailbetrachtungen ... 23
5.1. Stabilitätserhaltung ... 23
5.1.1. Integration des zellularen Energiesystems in ein Ampelsystem ... 25
5.1.2. Stabilitätsmechanismen am Beispiel Ortsnetzstation ... 25
5.2. Grid Codes / Netzanschlussbedingungen ... 26
5.3. Störfallmanagement ... 27
5.3.1. Kommunikationsausfall ... 27
5.3.2. Autonome Arbeitsweise bei Kommunikationsausfall ... 28
5.3.3. Netzausfall ... 28
5.3.4. Netzwiederkehr ... 29
5.4. Erste Schritte auf dem Weg zur Umsetzung ... 29
5.5. Dynamische Einspeiseleistung und dynamische Netzbezugsleistung ... 30
6. Vorteile und Chancen des zellularen Energiesystem ... 31
6.1. Transformationsweg in das zellulare Energiesystem ... 33
6.2. Effizientere Auslastung der Netzbetriebsmittel ... 34
6.3. Lokale und regionale netzorientierte Marktplattformen ... 35
6.3.1. Stärkung der regionalen Player und der regionalen Märkte ... 36
7. Datenschutz und Informationssicherheit ... 37
7.1. Datenschutz ... 38
7.2. Informationssicherheit ... 38
8. Fazit ... 39
9. Literaturverzeichnis ... 40

Executive Summary

Die Energiewende verändert die Anforderungen an die Stromnetze grundlegend. Während elektrische Energie in der Vergangenheit überwiegend von wenigen zentralen Großkraftwerken zu den Verbrauchern transportiert wurde, prägen heute Millionen dezentraler Erzeugungsanlagen, Speicher, Wärmepumpen und Ladeeinrichtungen den Netzbetrieb. Dadurch verlagert sich die systemrelevante Steuerung zunehmend von der Übertragungs- auf die Verteilnetzebene. Das Verteilnetz wird damit zum entscheidenden Erfolgsfaktor für die Integration erneuerbarer Energien und die Umsetzung der Energiewende.

Die Studie zeigt, dass die heutige Netzbetriebsführung noch weitgehend auf statischen Planungs- und Dimensionierungsansätzen basiert. Netzkapazitäten werden auf selten auftretende Maximalbelastungen ausgelegt, während die tatsächliche Auslastung über weite Zeiträume deutlich darunter liegt. Gleichzeitig führen volatile Einspeisungen aus Photovoltaik und Windenergie sowie neue elektrische Verbraucher zu einer steigenden Dynamik im Netzbetrieb. Die Folge sind lokale Engpässe, Spannungsprobleme und ein wachsender Steuerungsaufwand. Die vorhandenen Netzressourcen können unter diesen Rahmenbedingungen nicht optimal genutzt werden.

Als Antwort auf diese Entwicklung beschreibt die Studie das Konzept des zellularen Verteilnetzes. Zentrales Ziel ist es, Erzeugung, Verbrauch und Speicher möglichst sinnvoll, lokal oder regional miteinander auszugleichen. Hierzu werden Energiezellen gebildet, die beispielsweise aus Photovoltaikanlagen, Batteriespeichern, Wärmepumpen und steuerbaren Verbrauchern bestehen. Mehrere Energiezellen werden an den Netzknoten, Ortsnetzstationen und Umspannwerke zu Clustern zusammengefasst, die über intelligente Clustermanager koordiniert werden. Die Steuerung erfolgt hierarchisch über alle Netzebenen hinweg, orientiert sich jedoch konsequent an den physikalischen Gegebenheiten des jeweiligen Netzabschnitts. Dabei werden Entscheidungen zur Netzbetriebsführung in der niedrigsten möglichen Ebene getroffen, unter Berücksichtigung der Anforderungen der übergeordneten und nachgelagerten Netzebenen. Nur verbleibende Energieüberschüsse oder -defizite werden an die nächsthöhere Netzebene weitergegeben. Dadurch werden im Normalbetrieb Energieflüsse dort optimiert, wo sie entstehen, und höhere Netzebenen gezielt entlastet. Dabei werden bei der Optimierung auch immer die Zustände und Anforderungen des vor- und nachgelagerten Netzes mitberücksichtigt.

Ein wesentlicher Bestandteil des Ansatzes ist die Weiterentwicklung der heutigen Verteilnetze hin zu einer volldynamischen und weitgehend vollautomatischen Betriebsweise. Grundlage hierfür sind Echtzeitmessungen, digitale Netzzwillinge, Prognoseverfahren und automatisierte Regelalgorithmen. Netzkapazitäten werden nicht mehr anhand statischer Grenzwerte vergeben, sondern dynamisch entsprechend dem aktuellen Netzzustand. Entscheidungen werden zunehmend dezentral an den jeweiligen Netzknoten getroffen, beispielsweise in Ortsnetzstationen oder Umspannwerken. Lokale Regelkreise können dabei selbstständig auf Veränderungen reagieren und gleichzeitig mit benachbarten Netzbereichen kooperieren. Auf diese Weise entsteht ein selbstorganisierendes System, das die Komplexität eines stark dezentralen Energiesystems beherrschbar macht.

Die Studie beschreibt diesen Entwicklungspfad als evolutionäre Weiterentwicklung der bestehenden Netzinfrastruktur. Die vorhandenen Netzstrukturen bleiben erhalten, werden jedoch um zusätzliche Informations-, Steuerungs- und Automatisierungsfunktionen ergänzt. Das zellulare Organisationsprinzip verbindet dabei Energie- und Informationsflüsse entlang der bestehenden Netztopologie und schafft eine skalierbare, fraktale Struktur, die sich über alle Spannungsebenen hinweg wiederholt. Dadurch können lokale Optimierungen mit den Anforderungen des Gesamtsystems koordiniert werden.

Aus Sicht der Verteilnetze ergeben sich daraus erhebliche Vorteile: Die vorhandene Infrastruktur kann deutlich effizienter genutzt werden, da freie Netzkapazitäten in Echtzeit erkannt und bewirtschaftet werden. Durch die dynamische Netzführung können zusätzliche Anschlusskapazitäten für Erzeuger, Speicher und Verbraucher erschlossen und der Bedarf an kostenintensivem Netzausbau reduziert werden. Gleichzeitig verbessert sich die Integration dezentraler Flexibilitäten, da steuerbare Anlagen automatisch in die Betriebsführung eingebunden werden können. Die Netzstabilität steigt, weil lokale Störungen innerhalb von Zellen und Clustern abgefangen werden können, bevor sie sich auf größere Netzbereiche auswirken. Darüber hinaus erhöht die Möglichkeit lokaler Inselbetriebsfähigkeit die Resilienz gegenüber technischen Störungen, externe Angriffe, Extremwetterereignissen oder Kommunikationsausfällen.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende maßgeblich von einer Weiterentwicklung der Verteilnetze abhängt. Das zellulare Verteilnetz stellt hierfür einen Ansatz dar, der Dezentralität, Automatisierung, Echtzeitfähigkeit und lokale Flexibilitäten systematisch miteinander verbindet. Durch die schrittweise Transformation hin zu einer automatisierten, zellularen Betriebsweise können bestehende Netzressourcen effizienter genutzt, die Versorgungssicherheit erhöht und die Integration erneuerbarer Energien nachhaltig unterstützt werden.

1. Das Zellulare Organisationsprinzip

Das Zellulare Organisationsprinzip bzw. der zellulare Ansatz unseres Energiesystem ist ein Betriebs- und Organisationsmodell für die zukünftige Energieversorgung. In diesem interdisziplinären Modell werden technische und wirtschaftliche Belange berücksichtigt, wobei auch juristische, politische und gesellschaftliche Aspekte einfließen. Im Zellularen Energiesystem wird nach dem Subsidiaritätsprinzip die physikalische Balance zwischen Energieangebot und -nachfrage so weit wie möglich bereits auf lokaler/ regionaler Ebene hergestellt und nur die Energiedifferenz wird mit der nächsthöheren Ebene ausgeglichen.

Die Energiewende erfordert Anpassungen im Betrieb der Netze und der Architektur des Energiesystems. Energieerzeugung verändert sich immer mehr von zentraler hin zu dezentraler Erzeugung. Energieflüsse wandeln sich von unidirektional zu bidirektional. Angebot und Nachfrage müssen im Gegensatz zu den Energieträgern Gas und Wärme bei der Elektrizität zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein. Mit zunehmender Volatilität der Erzeugung auf Basis erneuerbarer Energien wachsen die Ausgleichsanforderungen bei elektrischer Energie.

Grundsätzliche Bausteine dieses Modells sind die Energiezellen. Eine Energiezelle besteht aus der Infrastruktur zur Erzeugung, der Verteilung und der Wandlung bzw. dem Verbrauch für verschiedene Energieformen, in der durch ein Energiezellenmanagement in möglicher Koordination mit Nachbarzellen der Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch über alle vorhandenen Energieformen organisiert wird.

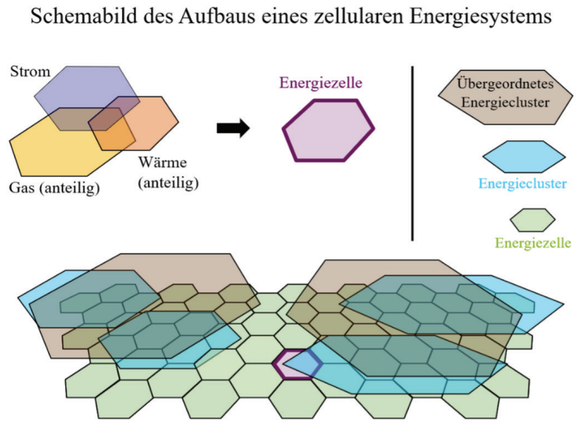


Abbildung 1: Das Schaubild zeigt das Grundprinzip eines zellular aufgebauten, dezentralen Energiesystems. Einzelne Energiezellen bilden die unterste Ebene und integrieren verschiedene Energieformen wie Strom, Wärme und Gas. Mehrere Energiezellen werden zu Energieclustern zusammengefasst, die wiederum in übergeordneten Clustern eine hierarchische Struktur bilden. Eigene Darstellung nach [18], erweitert um die Darstellung von Energieclustern.

1.1. Problemstellung

Das Energiesystem befindet sich in einer tiefgreifenden Transformation. Während früher Strom zentral von wenigen Großkraftwerken zu den Verbrauchern floss, wird heute ein immer größerer Teil dezentral in Photovoltaikanlagen erzeugt. Mit inzwischen über 4,2 Millionen installierten PV-Anlagen und knapp 100 GW Leistung allein in Deutschland ist die Photovoltaik zu einer dominierenden erneuerbaren Energiequelle im Verteilnetz geworden.

Parallel dazu wächst die Zahl der Batteriespeicher rasant, sowohl im Haushalt als auch im gewerblichen und industriellen Bereich. Ergänzt durch Wärmepumpen und eine stetig expandierende Ladeinfrastruktur für Elektromobilität entsteht eine bisher nicht gekannte Dichte an dezentralen Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten.

Diese Entwicklung verändert die Lastflüsse fundamental: Schwankende PV- und Wind-Einspeisung, dynamisches Speicherverhalten und neue Verbraucher mit hohem Leistungsbedarf erhöhen die Volatilität und Komplexität in den Verteilnetzen erheblich. Netzbetreiber stehen zunehmend vor der Herausforderung, kurzfristige Engpässe auszugleichen und Stabilität zu gewährleisten. Die Zahl der notwendigen Eingriffe steigt kontinuierlich, während die bisherigen zentralen Steuerungsansätze den Anforderungen nicht mehr gerecht werden.

Angesichts des weiterhin beschleunigten PV-Ausbaus und der entscheidenden Rolle von Speichern zur Flexibilisierung wird deutlich, dass zentrale Netzführungsstrategien an ihre Grenzen stoßen. Für eine erfolgreiche Integration von regenerativen Erzeugungsanlagen und Speichern in die Stromnetze sind daher neue, dezentrale automatisierte Organisations- und Steuerungsmodelle für unsere Verteilnetze unausweichlich.

1.2. Konzept

In einem zellularen Energiesystem wird die physikalische Balance zwischen Energieangebot und Nachfrage so weit wie möglich bereits auf regionaler und lokaler Ebene hergestellt. Der zentrale Baustein ist dabei die Energiezelle, die zum Beispiel aus einer Photovoltaikanlage, einem Batteriespeicher sowie ergänzenden Verbrauchern wie Wärmepumpen oder Ladepunkten für Elektromobilität usw. besteht.

Diese Kombination bildet die kleinste organisatorische Einheit, die in der Erzeugung und Verbrauch direkt aufeinander abgestimmt werden können. Jede Energiezelle ist in der Lage (im Rahmen ihrer Möglichkeiten), Strom zu erzeugen, aufzunehmen, lokal zu speichern, zeitlich verschoben bereitzustellen oder in das Netz einzuspeisen.

Mehrere Energiezellen sind über eine Ortsnetzstation zu einem Cluster verbunden. Der Clustermanager in der Ortsnetzstation koordiniert die angeschlossenen Energiezellen, gleicht deren Erzeugungs- und Verbrauchsprofile ab und stellt sicher, dass Überschüsse aus PV-Erzeugung optimal genutzt oder gespeichert werden und sorgt für eine bestmögliche Nutzung des örtlichen Niederspannungsnetzes.

Auf der nächsthöheren Ebene orchestriert der Clustermanager im Umspannwerk die unterlagerten Cluster mit dem Ziel, die Energieflüsse in dem jeweiligen Mittelspannungsnetz zu optimieren. So entsteht eine hierarchische Struktur, in der PV und Speicher vorrangig lokal integriert und nur die verbleibenden Energiesalden in andere Netzebenen weitergegeben werden. Dabei werden auch Bedarfe und Potentiale aus dem übergeordneten Netz und dem nachgelagerten Netzen mitberücksichtigt und dies mit unterstützt.

Diese Architektur erlaubt eine flexible und netzorientierte Einbindung von Erzeugungsanlagen ebenso wie eine Optimierung auf der Verbraucherseite wie Ladeinfrastruktur, Wärmepumpen usw.: Hohe PV-Einspeisung am Mittag kann direkt durch Speicher in den Zellen oder Clustern aufgenommen und zeitlich verschoben abgegeben werden. Gleichzeitig können Speicher lokale Lastspitzen abfedern und die Netzbelastung reduzieren. Damit werden sowohl kurzfristige Schwankungen der Erzeugung als auch steigende Flexibilitätsanforderungen auf Systemebene beherrschbar.

Durch den dezentralen Ansatz werden Netzebenen gezielt entlastet, was langfristig den Netzausbau reduziert. Energiecluster ermöglichen zudem einen besseren Überblick über das Gesamtsystem, da die Komplexität auf handhabbare Einheiten heruntergebrochen wird. Durch Echtzeitüberwachung und dezentrale Plausibilitätsprüfungen kann die Integration von regenerativen Erzeugungsanlagen und Speichern jederzeit optimiert erfolgen. Die Möglichkeit zum Umschalten in den Inselbetrieb bei dafür geeigneten Clustern erhöht zusätzlich die Versorgungssicherheit und Resilienz.

Ein entscheidendes Merkmal des zellularen Prinzips ist die enge Verzahnung von Energie- und Informationsflüssen. Während die Energieflüsse der physischen Netztopologie folgen, werden die Informationsflüsse an den jeweiligen Netzknoten und Netzanschlusspunkten lokal gebündelt und optimiert. Steuerungssignale können in beide Richtungen über die Hierarchieebenen hinweg weitergegeben werden.

Die Kombination aus lokal gemessenen Erzeugungsdaten, Speicherzuständen und Netzparametern mit übermittelten Koordinationsvorgaben schafft eine inhärente Sicherheitsarchitektur, die Manipulation erschwert und selbst bei Kommunikationsausfällen ein netzorientiertes Verhalten sicherstellt. So entsteht eine skalierbare, robuste und selbstähnliche Architektur, die es erlaubt, regenerative Erzeuger, Speicher und Energieverbraucher nicht nur technisch zu integrieren, sondern auch optimal aufeinander abzustimmen.

Dadurch werden ihre Flexibilitätspotenziale bestmöglich ausgeschöpft und ein entscheidender Beitrag zur stabilen, effizienten und resilienten Transformation des Energiesystems geleistet.

1.3. Ausgangslage der Energiewende

Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit leistungsfähiger Netzinfrastrukturen ab. Während die Erzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Quellen in den vergangenen Jahren stark ausgebaut wurden und auch auf der Verbrauchsseite eine zunehmende Elektrifizierung zu beobachten ist, bleibt die Netzanbindung zunehmend der limitierende Faktor. Gute und wirtschaftlich nutzbare Netzverknüpfungspunkte werden immer seltener, wie wir an der Speicherdebatte der letzten Monate zunehmend sehen.

Schon heute verzögern sich zahlreiche regenerative Erzeugungs- und Speicherprojekte, weil keine geeigneten Anschlussmöglichkeiten vorhanden sind oder die Erschließung mit sehr hohen Kosten verbunden ist, da die vorgeschlagenen Netzverknüpfungspunkte z. B. zu weit weg sind. Eine mögliche Ursache ist die noch immer sehr statische Netzbetriebsführung, welche in vielen Fällen planwertbasiert mit großen Sicherheitspuffern erfolgt. Damit wird ein zentrales Element der Energiewende, die Integration dezentraler Erzeugung in das Gesamtsystem, erheblich behindert.

Diese Situation verdeutlicht, dass die Energiewende nicht allein eine Frage der Erzeugungskapazität, sondern in erster Linie eine Netzherausforderung ist. Das Stromnetz, insbesondere das Verteilnetz, wird zunehmend zum entscheidenden Erfolgsfaktor der Transformation. Über 90 Prozent der installierten Leistung aus erneuerbaren Energien speisen bereits heute in die Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetze der Verteilnetzbetreiber ein. Millionen dezentrale Anlagen – Photovoltaik, Wind, Biogas, Speicher – prägen den operativen Netzbetrieb und verlagern die systemrelevante Steuerungsebene von der Übertragungs- auf die Verteilnetzebene. Das Verteilnetz ist damit das Rückgrat der Energiewende.

Parallel zu dieser Entwicklung steigt die Komplexität im Netzbetrieb erheblich. Neben der wachsenden Zahl von Einspeisern kommen neue, stark fluktuierende Verbraucher hinzu: Ladeinfrastruktur für Elektromobilität, Wärmepumpen, Batteriespeicher und industrielle Flexibilitäten verändern die Lastprofile grundlegend. Das Zusammenspiel von dynamischer Erzeugung, speicherbasierten Verschiebungen und neuen Verbrauchsspitzen führt zu einer bislang unbekannten Volatilität und Variabilität im Netz.

Diese Dynamik stellt die heutigen Betriebsstrategien vor erhebliche Herausforderungen. Viele Verteilnetze – gerade im ländlichen Raum - erreichen bei konventioneller, statischer Betriebsweise bereits ihre Kapazitätsgrenzen. Netzbetreiber müssen zunehmend eingreifen, um Spannungsbandverletzungen und lokale Überlastungen zu vermeiden. Gleichzeitig wächst der Steuerungsaufwand, während die etablierten zentralen Führungsstrukturen, geprägt von hierarchischen Informationsflüssen und statischen Grenzwerten, die reale Netzdynamik kaum mehr abbilden können.

Die Ausgangslage der Energiewende ist somit geprägt durch ein Paradox: Einerseits steigt der Anteil dezentraler, regenerativer Erzeugung kontinuierlich, andererseits stößt die Netzinfrastruktur in ihrer der-

zeitigen Form an technische und organisatorische Grenzen. Eine zukunftsfähige Netzführung erfordert daher neue Konzepte, die Dezentralität, Echtzeitfähigkeit und Flexibilität systematisch integrieren.

1.4. Grenzen der heutigen Netzbetriebsweise

Die bestehenden Netzführungs- und Planungsansätze beruhen im Wesentlichen auf statischen Dimensionierungsprinzipien. Netzstrukturen und Betriebsmittel werden so ausgelegt, dass sie auch unter maximaler Belastung, also zur Zeit der höchsten gleichzeitigen Einspeisung oder des höchsten Verbrauchs, die technischen Grenzwerte einhalten (unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren). Dieses Vorgehen hat sich in einem zentralistisch geprägten Energiesystem mit wenigen Großkraftwerken und planbaren Lastflüssen bewährt, stößt im dezentralen Energiesystem jedoch zunehmend an seine Grenzen.

In den heutigen Verteilnetzen bestimmen insbesondere zwei physikalische Faktoren die Aufnahmefähigkeit: die Stromtragfähigkeit der Leitungen und Betriebsmittel sowie die Spannungsqualität. Während die thermische Belastbarkeit vor allem an den Engpassstellen, etwa in Ortsnetzstationen oder an Umspannwerken, die übertragbare Leistung limitiert, begrenzen in vielen Fällen die zulässigen Spannungshübe in den 20-kV- und 0,4-kV-Netzen die Einspeisemöglichkeiten. Die maximale Aufnahmekapazität wird daher durch die Summe der installierten Spitzenleistungen aller angeschlossenen Anlagen definiert. Die tatsächliche Einspeisung liegt jedoch im Mittel deutlich darunter. Zwischen technischer Dimensionierung und realer Netzbelastung besteht somit ein erheblicher zeitlicher und energetischer Abstand, der heute in vielen Zeitfenstern ungenutzt bleibt.

Die bestehende Betriebsweise orientiert sich stark an diesem statistischen Spitzenlastprinzip und verhindert damit eine flexible Nutzung vorhandener Netzreserven. Statt auf die reale Netzsituation zu reagieren, wird pauschal auf konservative Grenzwerte abgestellt (die auch nötig sind, solange das Netz nicht digitalisiert und automatisiert ist). Diese Praxis führt zu einer systemischen Unterauslastung der Netzinfrastruktur: Große Teile der verfügbaren Leitungs- und Transformatorleistung bleiben im Mittel ungenutzt, obwohl sie physikalisch vorhanden wären. Gleichzeitig entstehen Engpässe auf der Lastseite oder im Spannungsband, sobald die lokale Einspeisung oder Last zu stark ansteigt, z. B. bei starker PV-Erzeugung oder hohen Lasten.

Das zentrale Steuerungsparadigma des bisherigen Netzbetriebs, eine Top-Down-Führung von wenigen zentralen Knoten aus, ist für eine dynamische und dezentralisierte Netzrealität perspektivisch nicht mehr geeignet. Informationsflüsse verlaufen träge, Entscheidungen erfolgen auf Basis aggregierter Daten mit erheblicher Verzögerung. Die Folge sind reaktive statt vorausschauender Eingriffe, wachsende Regelaufwände und ein sinkender Wirkungsgrad der Steuerung.

Zudem führt das Denken in übergeordneten Leistungsflüssen, etwa das Bestreben, lokal erzeugten Strom möglichst vollständig in höhere Netzebenen zu exportieren, zu unnötiger Belastung der Netz- und IT Strukturen. Das Zielbild einer stabilen, effizienten Netzführung wird dadurch verfehlt. In einem System, in dem Erzeugung und Verbrauch zunehmend volatil und standortnah auftreten, verliert das klassische Top-Down-Prinzip seine Steuerungswirkung.

Die aktuellen Netzführungsstrategien sind damit nicht mehr imstande, die steigende Zahl dezentraler Erzeuger und Lasten wirtschaftlich und stabil zu integrieren. Eine volldynamische, dezentrale Netzbetriebsführung, die die tatsächlichen Netzparameter in Echtzeit berücksichtigt und lokale Steuerungsautonomie ermöglicht, wird bei einem klimaneutralen Energiesystem zur notwendigen Weiterentwicklung der bestehenden Betriebsphilosophie (kleiner Spoiler: Dann würden flexible Netzanschlussverträge endlich Sinn ergeben).

1.5. Grundidee: Lokale Balance statt zentraler Steuerung

Der zellulare Ansatz beschreibt ein Organisations- und Steuerungsprinzip für Energiesysteme, das auf Dezentralität, Selbstorganisation und lokaler Stabilität beruht. Er setzt dort an, wo die heutigen zentralen Netzführungsstrukturen an ihre Grenzen stoßen: bei der dynamischen Integration einer Vielzahl dezentraler Erzeuger, Speicher und Verbraucher in den operativen Netzbetrieb. Statt den Energiefluss über wenige zentrale Steuerungspunkte zu regeln, wird die physikalische Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch so weit wie möglich lokal hergestellt.

Kern des Konzepts ist die Energiezelle als kleinste organisatorische und technische Einheit. Eine Energiezelle kann beispielsweise aus einer Photovoltaikanlage, einem Batteriespeicher, einem steuerbaren Verbraucher wie einer Wärmepumpe oder einer Ladeinfrastruktur für Elektromobilität bestehen. Diese Kombination bildet eine in sich geschlossene Struktur, in der Erzeugung und Verbrauch über lokale Steuerungsmechanismen direkt aufeinander abgestimmt werden können.

Ziel ist, dass jede Energiezelle den innerhalb ihrer Grenzen erzeugten Strom möglichst effizient selbst nutzt, überschüssige Energie zwischenspeichert oder effizient in übergeordnete Netzebenen einspeist, wenn ein lokaler Überschuss verbleibt. Mit dieser Zielbeschreibung ist allerdings nicht gemeint, das heutige Netz in abgekapselte Microgrids zu zerlegen. Vielmehr soll ein Informationsaustausch zwischen den Energiezellen und Zellclustern einen Kommunikations- und Energieaustausch ermöglichen, um die Gesamteffizienz des Systems zu steigern. Statt lokale, abgekapselte Netze wie zu Beginn der Zeit der Elektrifizierung im 19. Jahrhundert kann weiterhin die Stärke des vorhandenen Verbundnetzes genutzt werden.

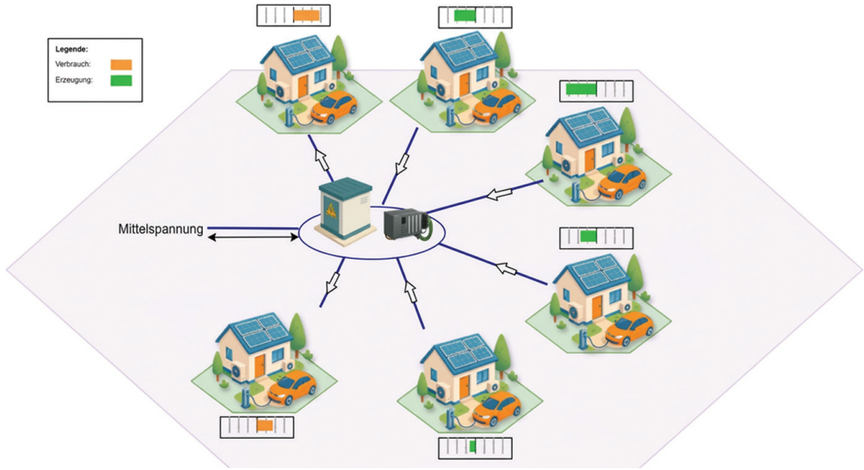


Abbildung 2: Das Bild zeigt ein Energiecluster, in dem mehrere Energiezellen (Haushalte) über eine Trafostation miteinander verbunden sind. Am Netzknoten der Trafostation auf der Ebene zwischen 0,4 kV und 20 kV ist der Clustermanager angesiedelt, der die Energieflüsse erfasst und koordiniert.

Mehrere dieser Energiezellen sind zu Clustern zusammengefasst, die über eine gemeinsame Netzstation verbunden sind. Ein Clustermanager in der Ortsnetzstation übernimmt die operative Koordination der angeschlossenen Energiezellen. Er gleicht deren Erzeugungs- und Verbrauchsprofile ab, steuert die Nutzung lokaler Speicher und sorgt für eine optimale Auslastung des jeweiligen Netzclusters. Überschüsse oder Defizite auf Clusterebene werden an die nächsthöhere Ebene, beispielsweise an den Clustermanager im Umspannwerk, weitergegeben. Auf dieser Ebene erfolgt eine übergeordnete Optimierung des Mittelspannungsnetzes, sodass auch hier lokale Ausgleichsmechanismen wirken, bevor Energieflüsse in höhere Netzebenen weitergeleitet werden. Die jeweiligen Netzcluster arbeiten somit alle nach einer einheitlichen Logik.

Durch diese mehrstufige, hierarchisch strukturierte Architektur entsteht ein Netz, das in sich selbstregulierende und interagierende Einheiten gegliedert ist, welches sich aus der bereits bestehenden Netzstruktur ergibt in Zusammenspiel mit angegliederten dezentralen Organisationseinheiten (Clustermanager). Jede Zelle und jedes Cluster handelt innerhalb klar definierter physikalischer Grenzen autonom, ist jedoch gleichzeitig in ein übergeordnetes Koordinationssystem eingebunden. Damit werden Energieflüsse dort stabilisiert, wo sie entstehen: unmittelbar am Ort der Erzeugung oder des Verbrauchs. Nur unvermeidbare Restflüsse oder netzstabilisierende Energieflüsse werden weitergereicht, was die Belastung höherer Netzebenen deutlich reduziert.

Dieses Prinzip führt zu einer grundlegenden Umkehr der Steuerungslogik: Statt die Vielzahl lokaler Akteure zentral zu dirigieren, wird die Netzführung von unten nach oben organisiert. Jede Zelle trägt

aktiv zur Stabilisierung des Gesamtsystems bei, indem sie lokale Flexibilitäten nutzt und den Energiefluss dynamisch anpasst. Dadurch entsteht eine adaptive Netzstruktur, die sich in Echtzeit an verändernde Erzeugungs- und Lastbedingungen anpassen kann.

Die Energiezelle bildet somit nicht nur eine technische, sondern auch eine organisatorische Grundeinheit der volldynamischen Netzführung. Durch den modularen Aufbau ist das System skalierbar und selbstähnlich: Lokale Regelmechanismen können auf jeder Netzebene angewendet und erweitert werden. Die daraus entstehende Architektur erlaubt es, die Vorteile dezentraler Strukturen, wie Flexibilität, Robustheit und Effizienz, systematisch zu nutzen, ohne die übergeordneten Systemzusammenhänge zu vernachlässigen.

Der zellulare Ansatz schafft damit die Grundlage für eine Netzführung, die physikalische Realität und organisatorische Steuerung miteinander vereint: lokal, adaptiv und resilient.

2. Definition

Ein Zellulares Energiesystem besteht aus dem Zusammenspiel verschiedener Energiezellen und Zellclustern. Diese bestehen aus der Infrastruktur für eine oder verschiedene Energieformen. Unter Zellcluster versteht man einen Verbund aus Energiezellen, die gemeinsam verwaltet werden. Die Verwaltung in den Energiezellen erfolgt durch ein Energiezellenmanagement. Angestrebt wird der Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch in der jeweiligen Zelle über alle vorhandenen Energieformen und in möglicher Koordination mit anderen Zellen.

Die in der Definition der Energiezelle und des Zellclusters genannten Begriffe werden gemäß den folgenden Erläuterungen eingeführt und verstanden:

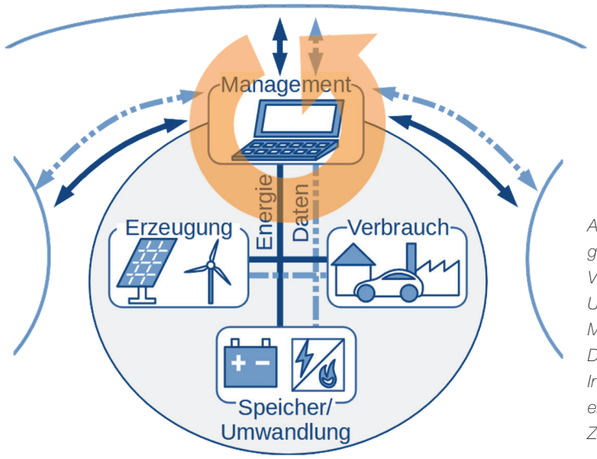


Abbildung 3: Das Bild zeigt eine Energiezelle mit den Bereichen Erzeugung, Verbrauch sowie Speicherung und Umwandlung, die durch ein zentrales Management koordiniert werden. Dabei werden sowohl Energie- als auch Informationsflüsse berücksichtigt und eine Kommunikation mit benachbarten Zellen ermöglicht. [15]

- **Infrastruktur:**
  Zur Infrastruktur gehören Anlagen und Systeme zur Umwandlung, Übertragung, Speicherung und Nutzung sowie Mess- und Regelungstechnik.

- **Energieformen:**
  Die betrachteten Energieformen umfassen u. a. Elektrizität, Gas, Wärme, Kälte sowie Treibstoffe (chemische Energieformen).

- **Energiezellenmanagement:**
  Zum Energiezellenmanagement (EZM) zählen alle Einrichtungen zur Steuerung der Energiezelle einschließlich der benötigten Kommunikationstechnik. Das EZM nutzt die in der Zelle verfügbaren energetischen Anlagen, Sensoren und Messsysteme unter Berücksichtigung des Netzanschlusspunktes. Dadurch kann das EZM die Energieflüsse erfassen, diese analysieren, optimieren und die Anlagen der Zelle steuern.

- **Energiezellen:**
  Energiezellen können auf der gleichen Ebene sowie hierarchisch auf übergeordneten und unterlagerten Ebenen angeordnet sein.

- **Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch:**
  Beim Ausgleich, der sowohl saisonal als auch kurzfristig durchgeführt werden kann, können sich die drei Zustände: ausgeglichen, überversorgt oder unterversorgt über alle vorhandenen Energieformen ergeben. Über- oder Unterversorgung wird über Speicher und flexible Lasten oder über den Netzanschlusspunkt mit anderen Zellen ausgeglichen.

- **Zellcluster:**
  Das Zellcluster wird von einem Energieclustermanagement (ECM) orchestriert. Das ECM verwaltet die Informationen aus den im Cluster eingebundenen Energiezellen, bündelt diese und gibt die akkumulierten Informationen an das ECM des übergeordneten Zellclusters und an die ihm untergeordneten EZM der eingebundenen Energiezellen weiter.

- **Zellulares Energiesystem:**
  Das zellulare Energiesystem organisiert sich in Zellclustern, die sich an der bestehenden Netzstruktur (physikalisches Energienetz) orientieren. So wie ein Zellcluster aus Zellen besteht, setzen sich übergeordnete Zellcluster aus untergeordneten Zellclustern zusammen. Daraus ergeben sich in jeder Ebene selbstähnliche Strukturen.

- **Energieclustermanagement:**
  Das Clustermanagement (ECM) bereitet alle Daten im Cluster auf und hält diese für den weiteren Betrieb des Clusters vor. Das ECM ist für den Informationsaustausch, die Prognosen-Weitergabe und die Energieoptimierung innerhalb seines Clusters und für den Empfang und Weitergabe von Bedarfen und Potentialen aus dem übergeordneten Cluster zuständig.

- **Selbstähnliche Strukturen (Fraktale Geometrie):**
  Das zellulare Energiesystem stellt selbstähnliche Strukturen dar, die sich in den verschiedenen Netzebenen wiederholen. Dies ist unter dem Begriff „fraktale Geometrie“ erläutert.

- **Zellulare Organisationsprinzip (Zellulare Betriebskonzeptes):**
  Beschreibt das Zusammenwirken aller Netzteilnehmer und Netzbetreiber mit einer Erweiterung der jeweiligen Möglichkeiten und auch einer Erweiterung der Aufgaben und Verantwortung für einen gemeinsamen volldynamischen automatisierten Netzbetrieb.

3. Entstehung und Entwicklungsgeschichte

Im Juni 2015 wurde die Studie „Der Zellulare Ansatz“ im VDE-Verlag veröffentlicht [1]. Ausgehend von dieser Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG) hat sich im Herbst 2015 der Arbeitskreis Energieversorgung 4.0 im VDE Bayern gegründet.

Zur Einbindung einer größeren Öffentlichkeit fanden seit der Gründung des Arbeitskreises mehrere Veranstaltungen zum zellularen Ansatz statt. Die Arbeit wurde bundesweit ausgeweitet und führte im Jahr 2021 zur Gründung des VDE-Fachausschusses Das zellulare Energiesystem, unter dessen Führung eine Reihe von Arbeitsgruppen das zellulare Energiesystem weiterentwickeln, präsentieren und an der aktiven Umsetzung arbeiten. Beim VDE stehen seit der Gründung des Arbeitskreises und des Fachausschusses eine Reihe von Veröffentlichungen zum zellularen Energiesystem zur Verfügung.

3.1. Motivation

Die Energiewende generiert neue Anforderungen an die Gestaltung des Energiesystems durch dezentrale und CO2-arme Energieerzeugung. Die Transformation des Energiesystems in Richtung dieser dezentralen, erneuerbaren Ressourcen und die Intensivierung der Sektorenkopplung hin zu elektrischen Lösungen erfordert geeignete Maßnahmen auf regionaler und lokaler Ebene.

Mit dem Zellularen Ansatz wird aufgezeigt, wie der Umbau in eine dezentrale, zellulare Energieversorgung ökologisch, regenerativ und wirtschaftlich funktionieren kann. Zellulare Energiesysteme unterstützen die Vorgaben des „Clean Energy for all Europeans Package“ (CEP) der Europäischen Union [2] und ermöglichen die Partizipation aller EU-Bürger an der Energiewende.

Ziel ist die Weiterentwicklung des vorhandenen Energiesystems, um dieses an die neuen Aufgaben anzupassen. Dies bedingt neue Formen der Organisations- und Betriebsstruktur, um die bestehenden Systemkomponenten bestmöglich nutzen und die Vielzahl der noch entstehenden Anlagen einbinden zu können.

3.2. Historie und Entwicklung

Das Bewusstsein bezüglich der aufgrund steigender Komplexität aufkommenden Herausforderungen reifte zunehmend mit dem beschleunigten Ausbau Erneuerbarer Energien im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts – zuerst in Europa, aber dann auch in den USA sowie in Asien, beispielsweise in China und Japan. Quelle der Untersuchungen waren Forschung und Entwicklung rund um die Begriffe Smart Grid und Microgrid [3].

Auf Basis des Förderprogramms E-Energy konnten insbesondere Forschung und Entwicklung zu diesen Themen in Deutschland verstärkt werden [4]. Insbesondere wurde in diesem Kontext erstmals der Vorschlag zum zellularen Ansatz im Energiesystem [5] formuliert, wobei hierzu ein Modell [6] eingeführt wurde. Die weitere Untersuchung von Anwendungsszenarien dieses Modells konnte mit der Spezifikation des Demonstrationsprojektes C/sells [7] ermöglicht werden. Die Studie [8] kalkulierte Netzmaßnahmen auf Basis des zellularen Ansatzes. Ein Vergleich und die Optimierung von zentral und dezentral orientierten Ausbaupfaden zu einer Stromversorgung aus erneuerbaren Energien in Deutschland findet in der Studie [9] statt.

Der Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) übernahm im Rahmen der VDE Studien zum zellularen Ansatz [1] und [10] die Überführung des Konzeptes in einen breiten Diskussionsprozess der Fachwelt. Um die erforderlichen Modelle zu fördern, wurde vom Arbeitskreis „Terminologie Smart Energy“ bei der DKE eine öffentlich verfügbare Spezifikation unter gleichem Titel im Erstentwurf veröffentlicht [11].

Das Energiesystem hat sich über ein Jahrhundert lang entwickelt. In der Vergangenheit war die Energieerzeugung und die Steuerung zentral und die Energie wurde immer von den Erzeugungsanlagen zu den Verbrauchern transportiert. Seit der Jahrtausendwende wurde der Ausbau Erneuerbarer Energien stark vorangetrieben. Die Steuerung (Netzmanagement) ist aber immer noch zentral. Die räumlich verteilte Erzeugung, speziell im Elektrizitätsbereich, generiert neue Herausforderungen: Volatilität, Komplexität und eine immer größer werdende Neigung zur Instabilität, die häufigere Eingriffe von Netzbetreibern notwendig macht. Im Energiesystem von morgen sind dezentrale Lösungen gefordert, die ein neues Systemmodell bedingen.

4. Systemmodell und Arbeitsweise

Ausgehend vom Systembegriff wird das Energiesystem als Gesamtheit von miteinander in Verbindung stehenden Komponenten betrachtet. Diese Verbindung besteht sowohl für die Energieflüsse als auch die Informationsflüsse. Die Systemkomponenten werden im Zusammenhang von Energiegewinnung, speicherung, -nutzung, -transport als Ganzes gesehen und von ihrer Umwelt abgegrenzt betrachtet.

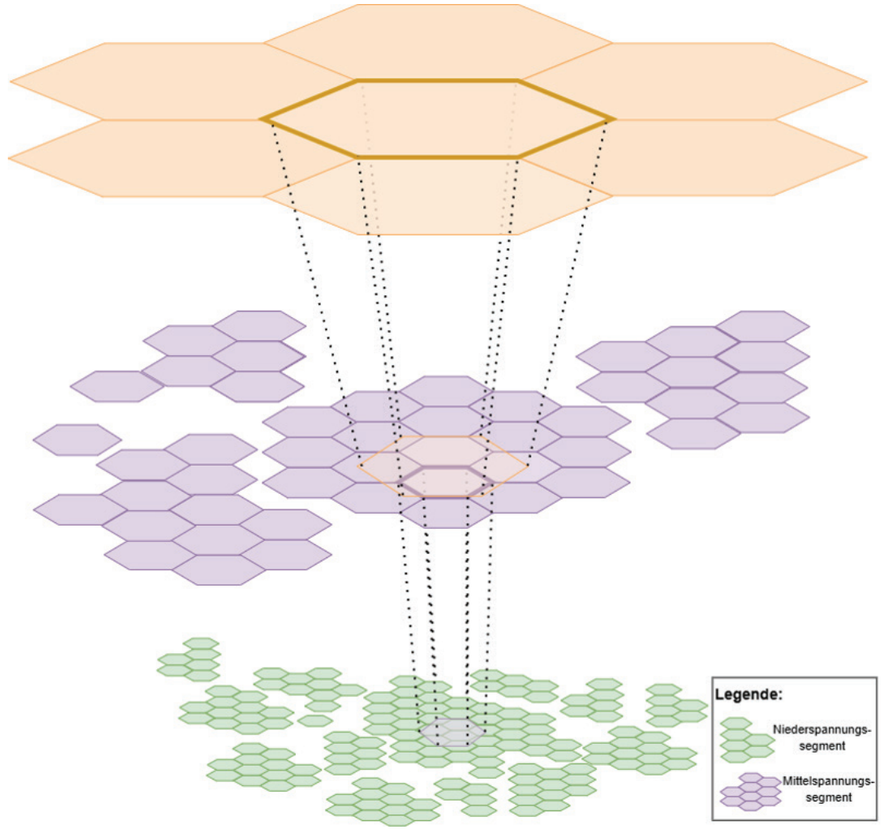


Abbildung 4: Die Darstellung verdeutlicht in Anlehnung an [15] die hierarchische und selbstorganisierte Struktur zellularer Energiesysteme über mehrere Ebenen. Innerhalb eines Segments sind einzelne Energiezellen horizontal miteinander gekoppelt, beispielsweise über das Niederspannungsnetz und die Schaltanlagen der Trafostationen. Die vertikale Kopplung erfolgt zwischen den Segmenten bzw. Spannungsebenen und wird insbesondere durch Transformatoren realisiert, die unterlagerte Niederspannungssegmente mit dem übergeordneten Mittelspannungsnetz verbinden. Dadurch entsteht eine strukturierte Einbindung lokaler Energiezellen in übergeordnete Netzstrukturen.

Die zunehmende Dezentralisierung der Energieerzeugung und der Wandel der Verbrauchsstrukturen machen deutlich, dass die künftige Netzarchitektur grundlegende neue Eigenschaften aufweisen muss. Die bisherigen zentralistischen Modelle, bei denen Energieflüsse, Steuerung und Entscheidungen von wenigen Knotenpunkten aus koordiniert wurden, können die entstehende Komplexität und Dynamik nicht mehr abbilden. Stattdessenmuss die Netzführung auf Prinzipien aufbauen, die Dezentralität, automatisierten Netzbetrieb, Autonomie und Resilienz systematisch fördern.

Künftige Verteilnetze müssen so gestaltet sein, dass Entscheidungen zunehmend dort getroffen werden, wo sie wirksam sind, also im jeweiligen lokalen Netzabschnitt. Eine zentrale Steuerung kann die Vielzahl an dezentralen Anlagen, Speichern und Verbrauchern weder technisch noch organisatorisch in Echtzeit erfassen und regeln. Erforderlich sind daher Strukturen, in denen lokale Regelkreise mit eigener Informationsbasis und Entscheidungslogik agieren. Hier lässt sich die bereits vorhandene Netztopologie nutzen, da lokale Ankerknoten u.a. mit den Trafostationen und Umspannwerken schon vorhanden sind. Diese lokalen Einheiten, Energiezellen, Cluster oder Netzsegmente. müssen in der Lage sein, Erzeugung, Verbrauch und Speicher autonom aufeinander abzustimmen und nur residuale Energiesalden in übergeordnete Ebenen weiterzugeben unter Berücksichtigung der ökonomischen Parameter.

Eine solche Dezentralisierung entlastet nicht nur übergeordnete Netzebenen, sondern verbessert auch die Systemstabilität. Lokale Störungen können innerhalb der jeweiligen Zellcluster abgefangen werden, ohne sich auf das Gesamtsystem auszubreiten. Damit wird die Netzführung robuster gegenüber externen Einflüssen und Kommunikationsstörungen.

Ein wesentliches Merkmal zukünftiger Netzstrukturen ist die Fähigkeit zur autonomen Selbstorganisation. Das bedeutet, dass Netzkomponenten, von der Erzeugungsanlage über Speicher bis zum Verbraucher, aktiv am Betriebsgeschehen teilnehmen. Durch intelligente Mess-, Regel- und Kommunikationssysteme können sie ihren Zustand selbst erfassen, Entscheidungen vorbereiten und auf lokale Netzsignale reagieren. Der Informationsaustausch erfolgt dabei nicht ausschließlich vertikal (Top-Down oder Bottom-Up), sondern zunehmend horizontal zwischen benachbarten Netzkomponenten.

Diese lokale Autonomie ist die Voraussetzung für eine volldynamische automatisierte Netzführung, bei der Energieflüsse nicht mehr durch zentrale Vorgaben, sondern durch physikalische Zustände und abgestimmte Regelalgorithmen gesteuert werden. Systeme, die auf Selbstregelung und Echtzeitkommunikation beruhen, können schneller und präziser auf Netzschwankungen reagieren als klassische hierarchische Steuerungssysteme.

Neben Effizienz und Flexibilität muss das Energiesystem der Zukunft vor allem resilient sein. Resilienz beschreibt die Fähigkeit, trotz Störungen oder Teilausfällen stabil zu bleiben oder sich selbst zu reorganisieren. Dezentral organisierte Strukturen tragen hierzu wesentlich bei: Fällt eine Einheit oder Kommunikationsverbindung aus, können benachbarte Einheiten den Betrieb weitgehend eigenständig fortführen. Inselbetriebsfähigkeit und lokale Netzstabilisierung werden so zu integralen Eigenschaften der Netzarchitektur.

Eine resiliente Netzstruktur erfordert zudem eine enge Verzahnung von Energie- und Informationsflüssen. Die physikalische Netztopologie und die digitale Kommunikationsstruktur müssen aufeinander abgestimmt sein, sodass Entscheidungen sowohl technisch korrekt als auch informationssicher erfolgen können. Nur wenn Mess- und Steuerungsdaten zuverlässig und manipulationssicher verfügbar sind, kann ein dezentrales System dauerhaft stabil betrieben werden.

Zukünftige Netzstrukturen müssen somit dezentral organisiert, selbstorganisierend, datenbasiert, resilient und duplizierbar[1] sein. Nur auf dieser Grundlage lässt sich ein Energiesystem skalierbar weiterentwickeln und betreiben, dass die wachsende Zahl an dezentralen Erzeugern, Speichern und Verbrauchern zuverlässig integriert und die verfügbare Netzkapazität vollumfänglich ausschöpft.

Diese Anforderungen bilden den konzeptionellen Rahmen für den zellulären Ansatz, der diese Prinzipien in einer strukturierten, skalierbaren Architektur umsetzt und die Grundlage einer volldynamischen Netzführung schafft.

4.1. Architektur und Steuerung im Systemmodell

Die im zellularen Ansatz angelegte Struktur erfordert eine technische Architektur, die den dezentralen Charakter des Systems unterstützt und zugleich eine koordinierte Netzführung ermöglicht. Entscheidend ist dabei die Integration von Mess-, Steuer- und Kommunikationssystemen, die in Echtzeit den Zustand des Netzes erfassen und adaptive Entscheidungen ermöglichen. Die Architektur verbindet physikalische und informationstechnische Ebenen zu einem integrierten Gesamtsystem.

Im Mittelpunkt steht die dezentrale Netzbeobachtung. Sensorik in Ortsnetzstationen und Umspannwerken, Netzverknüpfungspunkten und bei relevanten Anlagen erfasst kontinuierlich die elektrische Situation – etwa Spannungsniveaus, Stromflüsse, Leistungsgradienten und Blindleistungsanteile. Diese Informationen werden lokal vorverarbeitet und dienen als Grundlage für die situationsabhängige Steuerung.

Im Unterschied zur klassischen Netzführung, bei der Grenzwerte zentral definiert und selten angepasst werden, arbeitet der zellulare Ansatz mit dynamischen Parametern. Die zulässige Einspeise- oder Bezugsleistung einer Zelle wird fortlaufend auf Basis der aktuellen Netzbelastung, Spannungslage und vorhandener Flexibilitäten berechnet. Jede Zelle erhält damit individuelle Leistungsfreigaben, die sich an der momentanen physikalischen Realität orientieren.

Die Koordination erfolgt durch dezentrale Steuerinstanzen, typischerweise in den Ortsnetzstationen oder auf Clusterebene, wobei eine gesamtsystemische Optimierung verfolgt wird. Sie werten die lokalen Messdaten aus, gleichen Prognosen mit Echtzeitwerten ab und optimieren den Energiefluss innerhalb des Clusters.

Übergeordnete Netzebenen greifen nur ein, wenn systemische Abweichungen erkannt oder größere Koordinationsbedarfe bestehen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn in einer höheren Spannungsebene Engpässe auftreten und zusätzliche Einspeisung aus untergeordneten Clustern erforderlich wird. In solchen Situationen geben die übergeordneten Instanzen entweder Anreize zur erhöhten Energieabgabe oder – bei kritischen Netzsituationen – automatische Fahranweisungen an die lokalen Steuerinstanzen aus. Dadurch wird der Energiefluss clusterübergreifend stabilisiert und die Netzsicherheit gewahrt. In der Folge bleibt der Steuerungsaufwand beherrschbar, während die Regelgeschwindigkeit deutlich zunimmt.

Kern der volldynamischen Steuerung ist die Fähigkeit, auf Änderungen in Erzeugung und Verbrauch innerhalb weniger Sekunden zu reagieren – was zwar heute auf den unteren Netzebenen noch nicht erforderlich ist, aber immer mehr im Zuge der Energiewende notwendig wird. Dies erfordert ein enges Zusammenspiel von Prognosemodellen, Messwertverarbeitung und automatisierten Regelalgorithmen.

Das Steuerungssystem nutzt dabei eine Kombination aus:

- Kurzfristprognosen auf Basis von Wetter- und Lastdaten,
- Echtzeitmessungen zur Ermittlung aktueller Netzbelastung,
- Regelstrategien, die automatisch auf Spannungs- oder Stromabweichungen reagieren.

Die Steuerung kann sowohl reaktiv (auf Messwertänderungen) als auch prädiktiv (auf erwartete Entwicklungen) erfolgen. Ein Beispiel ist die vorausschauende Reduktion von Einspeiseleistung bei erwarteter Überspannung im Netzabschnitt, die gezielte Aktivierung von Last-Flexibilitäten, um Spannungseinbrüche zu vermeiden oder gezielte Kühlung von Betriebsmitteln zur Optimierung des Lastmanagements.

Dadurch wird das Netz kontinuierlich in einem optimalen Arbeitspunkt gehalten – ohne die Notwendigkeit statischer Sicherheitsmargen. Im Ergebnis lassen sich Spannungsbandverletzungen vermeiden und gleichzeitig die Aufnahmefähigkeit des Netzes deutlich erhöhen.

Für die Umsetzung einer volldynamischen Netzführung ist eine bidirektionale, echtzeitfähige Kommunikation unverzichtbar. Die Datenströme verlaufen sowohl vertikal (zwischen Zelle, Cluster und Netzebenen) als auch horizontal (zwischen benachbarten Clustern oder Zellen).

Die Kommunikationsinfrastruktur muss hohe Anforderungen an Verfügbarkeit, Latenz und Sicherheit erfüllen. Eine wesentliche Designvorgabe ist dabei, dass jede Regelentscheidung auch lokal wirksam bleiben kann: Fällt die Verbindung zu übergeordneten Ebenen aus, läuft der Betrieb autark weiter. Lokale Prioritätslogiken und Plausibilitätsprüfungen sichern die Stabilität und verhindern unkontrollierte Zustandsänderungen.

1 Dublizierbarkeit beschreibt im Kontext elektrischer Netze die Eigenschaft eines Netzmanagement- oder Steuerungssystems, bei der die grundlegenden funktionalen Vorgaben, Regelungslogiken und Parametereinstellungen unabhängig vom konkreten Netzstandort einheitlich ausgelegt sind und somit auf verschiedene Netzumspannknoten übertragen werden können. Die Inbetriebnahme an einem spezifischen Standort erfordert ausschließlich der Abbildung und Integration der jeweiligen lokalen Netztopologie in Form eines digitalen Netzzwillings, ohne Anpassung der übergeordneten Steuerungs- und Regelkonzepte.

Zudem erfolgt die Datenverarbeitung dezentral: Nur aggregierte Informationen werden an übergeordnete Systeme weitergegeben, um Datenschutz, Effizienz und Ausfallsicherheit zu gewährleisten. Dadurch bleibt das System skalierbar, ohne die Netztransparenz zu verlieren.

Diese Regelmechanismen wirken komplementär zu den dezentralen Steueralgorithmen in den Energiezellen: Während Zellen und Cluster auf der Verbrauchs- und Erzeugungsseite verfügbare Flexibilitäten aktivieren, greifen die Netzkomponenten auf der Infrastrukturebene stabilisierend ein. Ergänzend dazu verfügen alle Zell- und Clustermanager sowie die angeschlossenen Erzeugungsanlagen und intelligenten Verbraucher über ein grundlegendes, netzdatenbasiertes Grid-Verhalten. Dieses ist in den jeweiligen Assets fest nach den Netzcodes hinterlegt und stellt einen sicheren Grundbetrieb auch bei Kommunikationsausfällen sicher. Beispiele hierfür sind frequenzabhängige Leistungsreduktionen oder automatische Spannungsunterstützungsfunktionen.

Der resultierende Regelverbund folgt einem iterativen, hierarchisch abgestuften Prozess: Zunächst reagieren lokale Netzkomponenten wie Trafostufenschalter und Schutzsysteme, anschließend übernehmen die ersten Energiemanagementsysteme, bevor sukzessive weitere Zellen und Cluster eingebunden werden. Dadurch muss das Gesamtsystem nicht vollständig abgeschaltet werden; stattdessen entsteht ein wachsendes, evolutionäres Stabilitätsverhalten, das sich schrittweise an die Netzsituation anpasst. Gemeinsam bilden diese Mechanismen ein integriertes System zur Spannungs- und Leistungsführung in Echtzeit.

Das ganze System soll dabei den Anforderungen einer komplexen, strukturierten Architektur entsprechen. Das bedeutet, dass der grundsätzliche Aufbau selbstähnlich sein muss und die Arbeitsweise für alle Ebenen gleich ist. Der Clustermanager hat z.B. in einer Trafostation grundsätzlich die gleiche Aufgabe wie der Clustermanager in einem 20-kV-Umspannwerk oder in einem 110-kV-Umspannwerk.

Die Realisierung von Energiezellen / Zellcluster erfolgt über alle Ebenen der Energieversorgung, d.h. mehrere Zellen in einer Ebene bilden sich auf der nächsthöheren Ebene wieder als eine einzelne Zelle / Zellcluster ab und werden nach dem gleichen Grundprinzip behandelt. Die übergreifende Zusammenarbeit von Zellen in Bezug auf ihren Austausch von Energie wird über marktliche Mechanismen koordiniert. Das Management kann dabei auf Basis von Algorithmen soweit möglich automatisiert stattfinden und/oder durch Entscheidungen / Handlungen von Menschen beeinflusst werden.

An den jeweiligen Netzknoten überwacht der Clustermanager die physikalische Auslastung seines Netzbereiches und gibt die Informationen weiter, um einer Überlastung entgegenzuwirken. Netzknoten sind dabei Netzverknüpfungspunkte wie z.B. Hausanschluss, Quartiersanbindung, Anschluss eines Industrieunternehmens, Trafostationen oder Umspannwerke in allen Netzebenen.

Die Struktur des physikalischen Netzes im zellularen Energiesystem ändert sich nicht. Die Energieflüsse werden in Zukunft möglichst innerhalb der jeweiligen Ebenen und auf Basis der lokalen, regionalen und überregionalen Anforderungen optimiert.

Wie man in Abbildung 5 sieht, sind die Vernetzung und die fundamentalen Grundfunktionen (wie z.B. physikalische Vernetzung, Netzschutzfunktionen) im zellularen System und im bisherigen System nahezu identisch. Neu sind die Rollen und die Fähigkeiten der Netzteilnehmer und der Systeme in Bezug auf die Optimierung der Energieflüsse und die Möglichkeiten des Zusammenspiels zur Stabilisierung des Gesamtsystems. Entscheidend hierfür ist die Verknüpfung der Energieflüsse mit dem Informationsfluss.

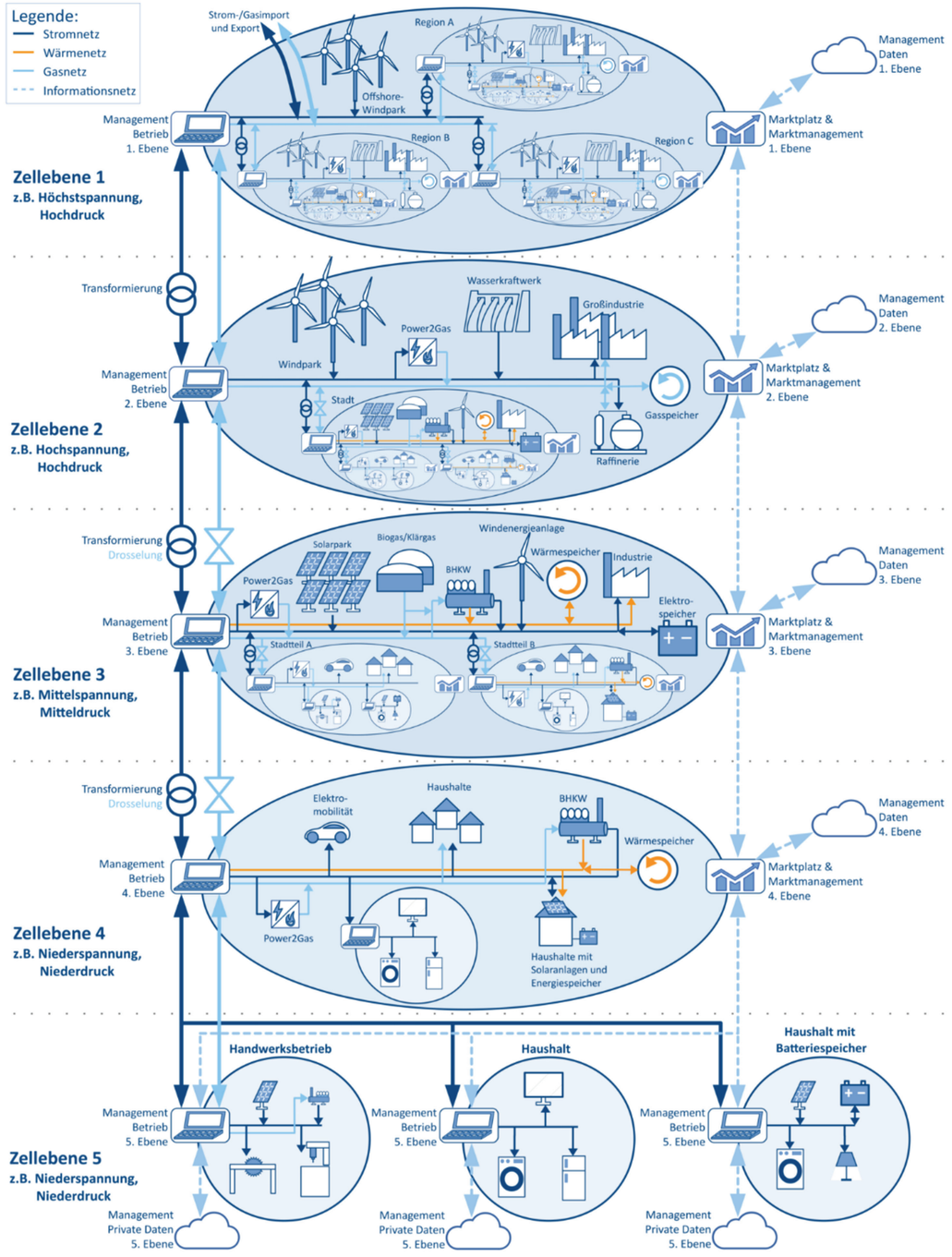


Abbildung 5: Die Darstellung zeigt mehrere Zellebenen, die jeweils unterschiedlichen Spannungs- und Druckniveaus im Energiesystem zugeordnet sind von der Niederspannungsebene bis hin zur Höchstspannung. Jede Ebene umfasst spezifische Akteure und Infrastrukturen und verfügt über ein eigenes Management zur Koordination der jeweiligen Energieflüsse. Zwischen den Zellen und Ebenen findet ein kontinuierlicher Austausch von Energie und Informationen statt, wodurch lokale Zustände erfasst, weitergegeben und übergeordnete sowie untergeordnete Bereiche aufeinander abgestimmt werden. [15]

4.2. Paradigmenwechsel in der Netzführung

Von statischer Dimensionierung zu dynamischer Systemführung

Das bisherige Leitbild der Netzplanung und -führung folgt einem statischen Paradigma: Netze werden auf Basis festgelegter Last- und Einspeiseszenarien dimensioniert, die sich am zu erwartenden Maximum orientieren. Diese Vorgehensweise war sinnvoll, solange die Netze im Wesentlichen lineare Lastflüsse zwischen zentralen Erzeugern und räumlich verteilten Verbrauchern abbildeten. Mit dem Übergang zu einem dezentralen Energiesystem verändert sich jedoch die Charakteristik der Stromflüsse grundlegend.

Erneuerbare Erzeugung, Speicher und flexible Verbraucher führen zu einer hohen zeitlichen Dynamik und lokalen Varianz der Energieflüsse. Spitzen entstehen nicht mehr synchron im Gesamtsystem, sondern zufällig verteilt in Raum und Zeit. Damit verliert das Prinzip der statischen Dimensionierung seine Wirksamkeit. Die Auslegung nach maximaler gleichzeitiger Einspeiseleistung führt zu überdimensionierten Betriebsmitteln und vermeidet zwar Grenzwertverletzungen, nutzt die vorhandenen Ressourcen aber ineffizient. In der Praxis wird ein Großteil der Netzkapazität nicht ausgeschöpft, weil sie nur für selten auftretende Extremsituationen vorgehalten wird.

Gleichzeitig entstehen lokale Engpässe, wenn Erzeugung oder Verbrauch in Teilbereichen des Netzes stark ansteigen, während benachbarte Netzabschnitte unausgelastet bleiben. Diese Ungleichverteilung lässt sich mit zentralen Steuerungsstrategien nur unzureichend kompensieren, da sie u.a. auf aggregierten Daten und trägen Kommunikationswegen beruhen. Allgemein lassen sich folgende Herausforderungen nennen:

- Zentrale Verwaltung einer sehr großen Anzahl von Anschlussnehmern, deren Zusammensetzung sich kontinuierlich ändert, verbunden mit der Herausforderung, diese dynamisch den jeweiligen lokalen Netzbezugspunkten (Netzknoten) korrekt zuzuordnen.

- Grundlegende Charakteristik eines chaotischen Systems: eine Vielzahl von Teilnehmern, die untereinander interagieren und dabei ein stark nichtlineares Systemverhalten zeigen.

- Erkenntnisse aus der Chaosforschung, wonach Systeme mit einer hohen Anzahl interagierender Akteure ab einer kritischen Systemgröße instabil werden können.

- Zunehmender Bedarf an häufigeren und schnelleren Regeleingriffen, die jedoch nicht zu einer Beruhigung des Systems führen, sondern die Amplituden der Systemschwankungen weiter vergrößern. Das System verliert dadurch seine Fähigkeit zur Selbststabilisierung und erfordert permanent eskalierende Eingriffe.

Das Ergebnis sind ein zunehmender Regelungsaufwand, steigende Netzverluste und wachsende Unsicherheiten im Systembetrieb.

Die zunehmende Komplexität der dezentralen Erzeugungslandschaft erfordert daher einen Wechsel von einer planungsgetriebenen zu einer betriebsgetriebenen Netzführung. Nicht mehr der theoretische Maximalwert bestimmt die Auslegung, sondern die momentane Auslastung und der tatsächliche physikalische Zustand des Netzes bestimmen die für die Anschlussnehmer zur Verfügung stehenden Kapazitäten. Grundlage dafür ist eine kontinuierliche Erfassung relevanter Netzgrößen, Spannung, Strom, Leistungsfluss, Frequenz, sowie deren Verarbeitung in Echtzeit und deren Weitergabe. Auf dieser Basis kann die Netzführung adaptiv reagieren und verfügbare Kapazitäten dynamisch zuweisen.

Diese dynamische Systemführung zielt nicht darauf ab, Netzengpässe (Auf Last- und Verbrauchsseite) ausschließlich durch Ausbau zu vermeiden, sondern durch optimierte Nutzung der bestehenden Infrastruktur und vorhandenen Flexibilitätspotentiale. Prognosefunktionen, automatisierte Steuerungsalgorithmen und lokale Entscheidungslogiken ermöglichen es, temporäre Freiräume zu erkennen und gezielt zu nutzen. An die Stelle statischer Grenzwerte tritt eine situationsabhängige Steuerung, die sich kontinuierlich an die aktuelle Netzsituation anpasst.

Damit vollzieht sich ein grundlegender Paradigmenwechsel:

- von der rein strukturellen Planung zur operativen Optimierung,

- von zentraler Kontrolle zu dezentraler Koordination,

- und von starren Annahmen zu lernenden, datenbasierten Regelmechanismen.

- Einbindung der Anschlussnehmer in einem dynamischen Netzbetrieb.

Das Ziel dieser Entwicklung ist ein Netzbetrieb, der auf Echtzeitinformationen basiert, lokale Flexibilitäten integriert und dadurch Stabilität, Effizienz und Versorgungssicherheit gleichzeitig gewährleistet.

4.3. Informationsfluss

Im Allgemeinen kann der Informationsfluss in einem zellulären System in hierarchisch organisierten elektrischen Netzen in vier Ebenen beschrieben werden (siehe Abbildung 6):

1. Die unterste Ebene sind die einzelnen Energiezellen mit einem Netzverknüpfungspunkt, welche Daten für Ihre eigene Optimierung aber auch Potentiale, Bedarfe und Flexibilität an die nächste, höhere Ebene weiterleiten. Beispiele sind Häuser, Quartiere, Gewerbebetriebe aber auch Ladesäulen, Solaranlagen oder Windturbinen mit ihren jeweiligen Zellmanagern.

2. Lokale Ebene, Niederspannungsseite Trafostation 0,4 kV: Auf der lokalen Ebene sammelt und verarbeitet der Clustermanager die Daten der Zellmanager über ihre Leistung, Verfügbarkeit und Flexibilität. Hier werden Algorithmen verwendet, um die Lasten im Netzwerk zu optimieren und die Energieflüsse zu managen. Diese Daten werden aufbereitet und gebündelt an die nächsthöhere Ebene weitergeleitet.

3. Regionale Ebene, Verteilnetz Umspannwerksebene 20 kV und 110 kV: Auf der regionalen Ebene werden die Daten von mehreren Energiequellen in einem bestimmten geografischen Bereich zusammengeführt und analysiert. Hier werden Algorithmen verwendet, um die Lasten im Netzwerk zu optimieren und die Energieflüsse zu steuern. Die Potentiale, Bedarfe und Flexibilität werden dann an die unteren Ebenen als Empfehlung, bei netzkritischen Situationen auch als Anweisung zur Flexibilisierung des Energiesystems, weitergegeben. Ebenso werden die Potentiale, Bedarfe und Flexibilität an die nächste höhere Ebene weitergeleitet.

4. Übergeordnete Ebene, Übertragungsnetz 220 kV und 380 kV: Auf der übergeordneten Ebene wird das gesamte Netzwerk überwacht und gesteuert. Hier werden Entscheidungen getroffen, die das gesamte System betreffen, wie z.B. die Planung neuer Energiequellen oder die Ausfallvorhersage.

In einem hierarchisch organisierten elektrischen Netzwerk ist der Informationsfluss durch eine vertikale Hierarchie strukturiert, wobei jede Ebene eine bestimmte Rolle bei der Verarbeitung und Weitergabe von Daten hat. Diese werden, angelehnt an die physikalischen Energieflüsse, nur an die jeweiligen übergeordneten Netzknoten gebündelt weitergegeben oder empfangen. Durch diese Struktur kann das Netzwerk effektiv verwaltet werden, da jede Ebene sich auf ihre spezifischen Aufgaben konzentrieren kann, ohne dass Informationen redundant oder ineffektiv übertragen werden. Auch erfolgt bei der Aufbereitung der Daten eine Anonymisierung und Plausibilitätsprüfung, so dass in jedem Bereich die Systemsicherheit (Vertiefung in Kapitel 7) immanenter Bestandteil der Systemarchitektur ist.

Der Datenfluss sollte dabei nach der Automatisierungspyramide [12] gebündelt und angepasst werden. Das bedeutet, dass nur die Daten in die nächsthöhere Ebene weitergegeben werden, welche für den Energieaustausch und Netzbetrieb zwingend erforderlich sind. Für die nachgelagerten Netzteilnehmer, Zellmanager oder Clustermanager stellt der übergeordnete Clustermanager alle erforderlichen Informationen bereit. Diese Informationen sind für die interne Optimierung des Zellclusters unter der Berücksichtigung der Bedarfe aus dem vorgelagerten Zellclustern notwendig. Die Anforderungen von den vor- oder nachgelagerten Managern werden dabei von jedem Manager eigenständig auf Plausibilität und Übereinstimmung mit den direkt gemessenen physikalischen Netzdaten geprüft.

Für die Informationsweitergabe in den Netzknoten der Verteilnetze könnten dabei bestehend Fernwirksysteme und Schnittstellen weiterentwickelt werden. Für die Kommunikation mit den Zellmanager (behind the meter) könnten erweiterte Funktionen aus dem SMG (smart meter gateway) weiterentwickelt werden. Basisfunktionen sind bereits mit den bestehenden Systemen umsetzbar.

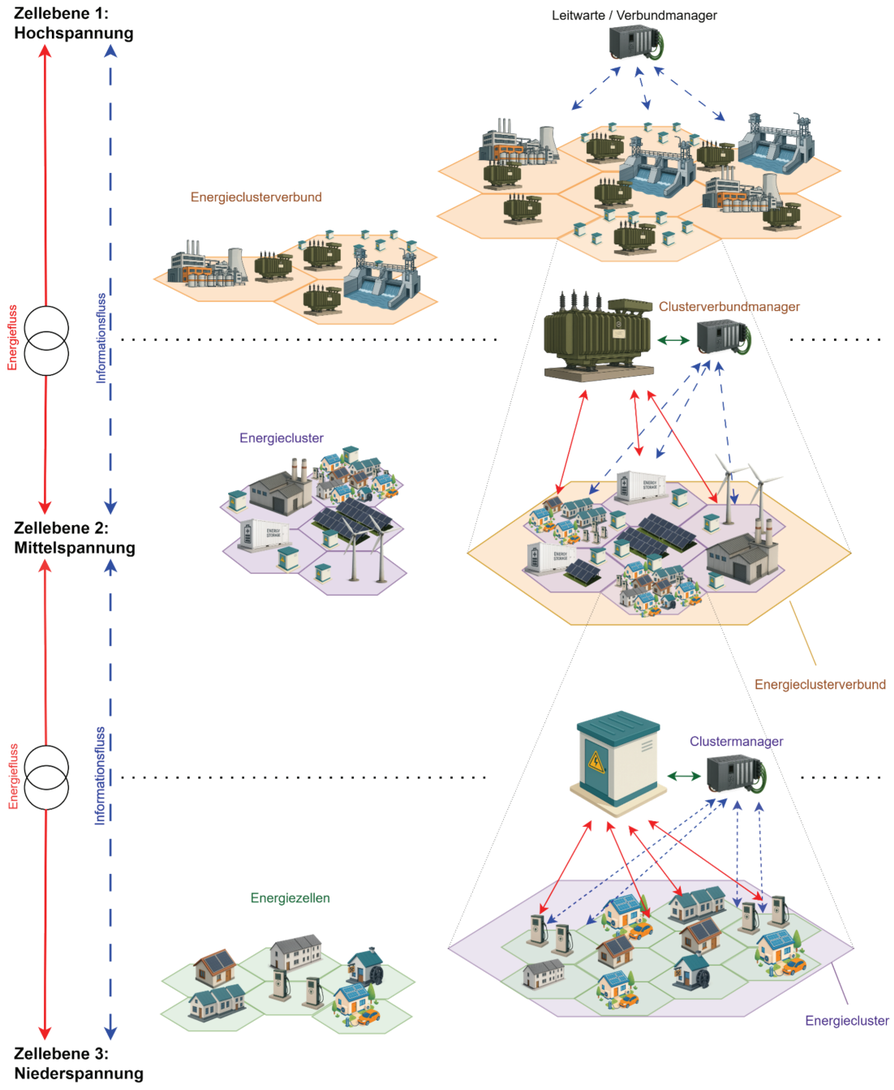


Abbildung 6: Die Darstellung verdeutlicht das Grundprinzip eines zellularen Energiesystems, bei dem sich das Gesamtsystem aus miteinander verknüpften Energiezellen und darauf aufbauenden Clustern zusammensetzt. Energie und Informationen werden dabei parallel ausgetauscht, sodass sowohl lokale Prozesse innerhalb einer Zelle als auch übergeordnete Abstimmungen zwischen den Ebenen ermöglicht werden. Mit zunehmender Hierarchieebene steigt das Spannungsniveau, wodurch größere Erzeuger und Verbraucher eingebunden und in das Gesamtsystem integriert werden.

4.4. Transformation zu einem zellularen Energiesystem

Auf Grund des Umbaus unseres jetzigen Energiesystems und einer größtenteils zentralen Erzeugungs- und Verteilungsstruktur hin zu einem dezentralen, regenerativen und volatilen Energienetz steigt die Anzahl an Teilnehmern in diesem Netz und die Anzahl an Veränderungen und Interaktionen stark, teils exponentiell an. Dies führt nach und nach zu einer immer größeren Instabilität des jetzigen Systems, sofern man das Organisations- und Managementsystem einer zentralen Erzeugungs- und Verwaltungsstruktur beibehält.

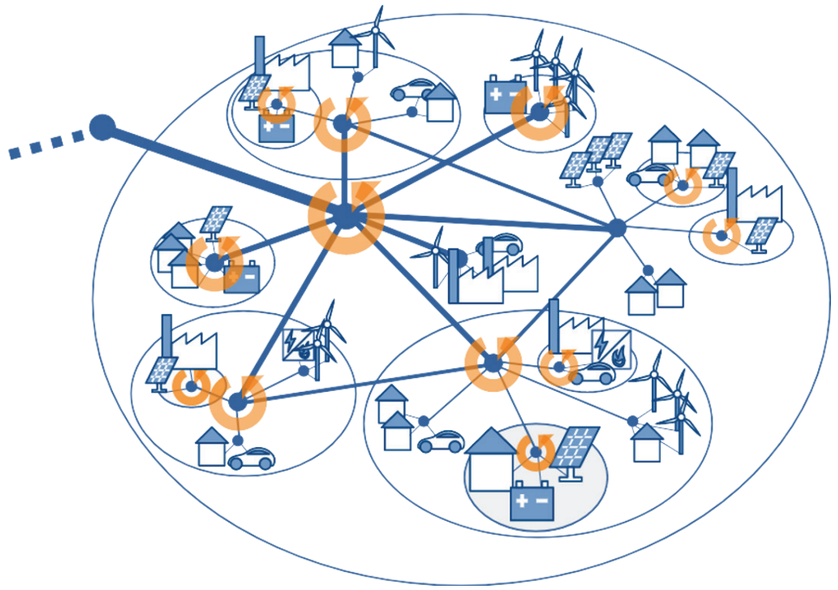


Abbildung 7: Das Prinzipbild eines zellularen Energiesystems zeigt die Vernetzung mehrerer Energiezellen über zentrale Knotenpunkte. Innerhalb der Zellen werden Erzeugung, Verbrauch und Speicherung lokal organisiert, während zwischen den Zellen ein übergeordneter Austausch und eine Koordination stattfinden. [15]

Um die klassischen Stabilitätsmechanismen aufrechterhalten und mittels des zellularen Organisationsprinzips ergänzen zu können, ist es zwingend notwendig, auch das Organisations- und Betriebskonzept an das neue, regenerative, dezentrale Energiesystem anzupassen. Die neuen Anforderungen an das Organisationsprinzip des zukünftige Energiesystems können am besten durch das zellulare Organisations- und Betriebskonzept gewährleistet werden.

Ziel ist es, mit der Transformation unseres Energiesystems eine CO2- neutrale, wirtschaftliche und resiliente Energieerzeugung zu ermöglichen sowie auch die Unterstützung eines solidarischen Verbundsystems in einem selbstoptimierenden Energieorganismus zu gewährleisten. Das wird durch eine Weiterentwicklung des vorhandenen Energiesystems und eine an die neuen Aufgaben angepasste Organisations- und Betriebsstruktur erreicht. Die dezentrale Struktur des zellularen Ansatzes kann genutzt werden, um erneuerbare Energien, wie z.B. Solarenergie oder Windenergie, auf lokaler Ebene zu integrieren und so die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren.

Durch die Dezentralität verringert sich die Anfälligkeit gegenüber Einflüssen von außen, wie z.B. Naturkatastrophen oder Cyberattacken. Der Ausfall einzelner Systeme oder ganzer Bereiche führt in der Regel nicht mehr zu einem Gesamtausfall des Versorgungssystems. Mit dem zellularen Betriebskonzeptes erhalten die Netzbetreiber und auch dem Netzteilnehmer weitere Rollen und Möglichkeiten, um sich und den Netzbetrieb zu optimieren.

Es geht dabei um eine Weiterentwicklung des bestehenden Systems mit der Erschließung neuer Fähigkeiten und Potentiale, um den Herausforderungen aus der Energiewende gerecht werden zu können.

Die Teilnehmer und Akteure am Netz sollen zusätzliche Fähigkeiten und auch Verantwortung erhalten, um diese neu erworbenen Fähigkeiten sowohl netzorientiert als auch zur eigenen Optimierung einsetzen zu können.

Die jetzigen Netzstrukturen werden durch das zellulare Energiesystem nicht aufgehoben. Jedoch können die durch den Ausbau erneuerbarer Energien sich ergebenden Dynamiken in den Netzen durch das zellulare Energiesystem besser aufgefangen und effizienter ausgelastet werden. Durch die Aggregation von Flexibilitäten – von kleinteiligen Flexibilitäten bis hin zu großen Potentialen – können Energieerzeugung und Verbrauch gesteuert werden, um die Effizienz der Energieflüsse und die Resilienz des Energiesystems zu erhöhen (siehe Kapitel 4.4). Damit können neue Flexibilitätspotentiale automatisch in das System eingebunden und nutzbar gemacht werden. Das Gesamtsystem verbessert sich durch jede neu hinzugefügte Zelle, aber auch durch jedes neue intelligente Gerät (im Sinne von vernetzt und steuerbar).

Innerhalb eines zellularen Energiesystems gibt es unterschiedliche Optimierungskreise (grob vergleichbar mit Bilanzkreis). Diese Kreise sind zum einen durch die physikalische Topologie der Netze bedingt. Des Weiteren sind diese auf unterschiedliche wirtschaftliche Anforderungen der in das Gesamtsystem eingebundenen Teilnehmer ausgelegt. Sofern netztechnisch weder vorhandene noch prognosebasierte Einschränkungen vorliegen, optimieren sich die Teilnehmer auf Basis der eigenen Optimierungsziele.

Diese Optimierungsziele haben bei Normalbetrieb (siehe grüne Ampelphase in Kapitel 5.1.1) die höchste Priorität. Wenn ein Energieclustermanagement in einzelnen Netzbereichen Engpässe prognostiziert oder erkennt, so soll diese Priorisierung über Anreizsysteme (z.B. §14a EnWG in Deutschland) in diesen betroffenen Netzbereichen die Teilnehmer zu einem veränderten netzorientierten Verhalten hinführen. Dies kann unabhängig von der Netzebene umgesetzt werden.

Damit bietet ein zellulares Energiesystem auch die technische Grundlage für die Einführung netzzustandsabhängigen, regionalen und lokalen Netzentgeltsystemen und lokalen/ regionalen Marktplätzen.

Wenn die Anreizsysteme nicht ausreichen, anstehende oder prognostizierte Netzengpässe zu beheben, kann das jeweilige Energieclustermanagement den nachgelagerten Energieclustermanagementsystemen netzorientiertes Verhalten vorgeben (siehe rote Ampelphase in Kapitel 5.1.1). In diesem Fall hat die Stabilität des Gesamtsystems die höchste Priorität, sofern Eingriffe für die Stabilität notwendig sind. Daraus ergibt sich eine flexible Priorisierung der Rangfolge für die Optimierung. Diese Variabilität ist der entscheidende Unterschied.

4.5. Funktionsprinzip des zellularen Energiesystems

Die folgenden 7 Punkte beschreiben die grundlegende Funktionsweise:

1. Das Energiezellenmanagement EZM kann auf Basis von Algorithmen soweit möglich automatisiert stattfinden und/oder durch Entscheidungen und Handlungen von Menschen beeinflusst werden.

2. Das EZM besteht aus einer Hardwareeinheit, auf der die Software für das Energiemanagement installiert ist und läuft. Die Hardwareeinheit ist mit der Sensorik und Aktorik in der Zelle verbunden oder hat Zugriff darauf. Das EZM erhält netzrelevante Parameter aus den Messeinrichtungen und beeinflusst die steuerbaren Betriebsmittel.

3. Das EZM regelt bei Bedarf automatisch sämtliche relevanten Betriebsmittel unter Berücksichtigung der betrieblichen und physikalischen Anforderungen innerhalb der Zelle. Aus den erhaltenen Parametern und den vorgegebenen Anforderungen nimmt das EZM einen Ausgleich aus Energieangebot und Energiebedarf vor und kommuniziert Flexibilitätsoptionen mit dem Energieclustermanager.

4. Das EZM muss in der Lage sein, alle relevanten Informationen von Verbrauchern, Erzeugern, Sektorenkopplungselementen und Speichern in der Zelle zu erfassen, zu verarbeiten und zu verwalten. Diese Informationen müssen, idealerweise in aggregierter[2] Form, an den vorgelagerten Energieclustermanager weitergeleitet werden.

2 Aggregiert bedeutet in diesem Zusammenhang zusammengefasst und anonymisiert.

5. Das Clustermanagement führt für seinen Netzbereich eine laufende Netzzustandsüberwachung durch (digitaler Zwilling) und überprüft, ob die Betriebsführungskriterien eingehalten werden. Wird eine Abweichung erkannt, erfolgt unmittelbar die Beurteilung der Situation durch das Clustermanagement und ggf. werden notwendige stabilisierende Maßnahmen veranlasst. Für einen optimalen Netzbetrieb des Clusters wird vorab ein Fahrplan für die Betriebsweise anhand von prognostizierten Daten und Informationen erstellt. In diesem Prozess sind Verletzungen der Betriebsführungskriterien auszuschließen. Sowohl bei akuten wie auch prognostizierten Verletzungen können Marktanreize als Basis zur Behebung als auch Netzschaltmaßnahmen wie Stufenschalter oder Blindleistungsabruf genutzt werden.

6. Für das Energieclustermanagement wesentlich ist der Austausch von Daten und Informationen mit externen IT-Systemen von benachbarten bzw. vorgelagerten Clustern, Energiemarktteilnehmern und Prognosesystemen (Last- und Einspeiseprognosen) und von weiteren in das Gesamtsystem eingebundenen Teilnehmern (siehe Kapitel 4.2).

7. Die Nutzbarmachung von Flexibilitätspotenzialen (= zukünftig verfügbare, vernetzte Geräte und Anlagen) kann durch das zellulare Energiesystem automatisiert erfolgen, ohne dass diese im laufenden Betrieb des zellularen Energiesystems bei einer übergeordneten, koordinierenden Instanz einzeln eingerichtet werden muss. Durch die zellulare Struktur werden vorhandene und neu hinzugekommenen Flexibilitäten automatisch gebündelt und können nach außen wirken. Mit ergänzenden Marktmodellen kann die Bereitschaft gesteigert werden, die Flexibilitäten zur Verfügung zu stellen.

4.6. Beispiele für Flexibilitäten

Eine vernetzte und steuerbare Wallbox oder Wärmepumpe/Wärmespeicher wird über den Energiemanager der eigenen Zelle automatisch, zwar als minimal kleiner, aber nutzbarer Flexibilitätsbaustein erschlossen. Damit wird diese Flexibilität über den Energiemanager der Zelle (Einwilligung des Nutzers vorausgesetzt) automatisch Teil des Gesamtsystems, ohne dass es im übergeordneten System angemeldet werden muss.

Im Bereich der Verteilnetze können große Batteriespeicher oder z.B. große energieintensive Verbraucher wie Kühlhäuser (oder flexible Industrieanlagen) als Mittelspannungsenergiezelle dienen und damit eine Flexibilität in der Mittelspannung oder sogar in der Hochspannung generieren. Über ansteuerbare Energiemanager kann vielfältiger Altbestand an konventionellen (existierenden) Geräte eingebunden werden, ohne die Besonderheiten der bestehenden Anlagentechnik im Informationsfluss berücksichtigen zu müssen.

5. Spezialfälle und Detailbetrachtungen

Im Folgenden werden einige spezielle Fälle für den Betrieb des zellularen Energiesystems im Detail betrachtet.

5.1. Stabilitätserhaltung

Für die Stabilisierung des Gesamtsystems ist es wichtig, bei einer hohen Anzahl von Teilnehmern sowohl die eigenen beeinflussenden Effekte zu begrenzen als auch die Einflussmöglichkeiten der Umgebung über Schnittstellen zu limitieren. Das bedeutet konkret, nicht alle Netzteilnehmer werden gemeinsam in einer Plattform (Rechenzentrum Netzbetreiber) gesteuert, sondern die Netzteilnehmer werden anhand Ihrer physikalischen Netzanschlusspunkte über die dafür zuständigen Netzknoten und Clustermanager eingebunden. Bei entsprechender Wahl der beeinflussenden Parameter (Marktanreize, Regelkennlinien und Grid Code) entsteht ein koevolvierendes System, das sich selbst organisiert

und Ordnung ausbildet. Das bedeutet, durch die Schaffung von Substrukturen und der Reduzierung von Schnittstellen entsteht Stabilität in einem instabilen System.

Ein wichtiger Faktor für die Stabilität eines zellularen Energiesystems ist die Fähigkeit des Systems, auf Veränderungen zu reagieren. Die Praxis zeigt, dass komplexe nicht-lineare Systeme zu chaotischem Verhalten neigen. Wenn sich die Bedingungen im System ändern, wie zum Beispiel eine Änderung der Last oder eine Störung der Energieerzeugung, müssen die Energiecluster und Einzelzellen des Energiesystems in der Lage sein, ihre Funktion anzupassen, um das Gleichgewicht aufrechtzuerhalten.

Die Aufrechterhaltung der Stabilität im ZES wird durch die einzelnen Organisationseinheiten, übergeordnete Clustermanager, regionale Clustermanager und lokale Zellmanager in allen Ebenen zu jeder Zeit in Kollaboration gewährleistet. Diese Zusammenarbeit ist ein integrativer und immanenter Bestandteil des zellularen Organisationsprinzips. Die klassischen Mechanismen zur Sicherheit in den Energienetzen werden nicht aufgehoben oder umgangen. Durch das zellulare Organisationsprinzip (mit den verteilten intelligenten Systemen) stehen zusätzliche Schutzmechanismen zur Verfügung. Dies führt insgesamt zur Verbesserung der Sicherheit und erhöht die Stabilität des Gesamtsystems.

Das bis dato existierende Netzmanagement, speziell im Verteilnetz, lässt derzeit kleinteilige, lokale oder regionale Optimierungen nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen zu mit allen Nachteilen für die Teilnehmer und der Netzauslastung, ohne dass dadurch Komplexität des Systems verringert wird. Durch das zellulare Organisationsprinzip erreichen wir eine Reduktion der Komplexität, indem wir Substrukturen durch die Clustermanager schaffen, welche sich an der tatsächlichen Netzstruktur orientieren. Die Stabilisierung und Optimierung des Gesamtsystems erfolgen dabei im Wesentlichen unter Berücksichtigung der Optimierungsziele der einzelnen Zellen

Der Informationsfluss wird wieder mit dem tatsächlichen physischen Energiefluss zusammengebracht. Entscheidungen zur Steuerung von Energieanlagen werden in den Netzknoten getroffen und orientieren sich an den physikalisch gemessenen Größen am Netzknoten. Dadurch wird eine weitere zusätzliche Sicherheitsebene für die Stabilität eingebracht, weil es an den jeweiligen Netzknoten physikalisch möglich ist, eine Plausibilitätsprüfung auf Basis der physikalischen Messwerte durchzuführen. Die Reaktion auf veränderte Stellsignale kann dabei anhand der Messwerte sofort verifiziert werden.

Dies bezieht sich sowohl auf die beabsichtigte Reaktion als auch auf die Wirkung dieser Reaktion. Weiterhin können übergeordnete und nachgelagerte Netzzustandsinformationen einbezogen und überprüft werden. Auch diese Informationen der jeweiligen Clustermanager können mit den am jeweiligen Netzknoten gemessenen Werten in die Plausibilitätsprüfung einbezogen werden. Der Clustermanager ist nicht allein auf die übermittelten Daten angewiesen, sondern kann auch reale Messwerte berücksichtigen. Die Grundfunktionen des Clustermanagers können hierbei auch ohne Übermittlung digitaler Daten ausgeführt werden.

Stabilität und Sicherheit durch zellulare Energiesysteme

Es kann viel von der Natur gelernt werden. Ein Schwarm regelt sein komplexes Verhalten anhand von nur drei Regeln. Die Cluster- und Zellmanager können vereinfacht, als Schwarm betrachtet werden und entsprechend agieren.

Die Anwendung der Schwarmregeln auf das zellulare Energiesystem bedeutet folgende Prämissen:

- Versuche den Energiefluss innerhalb deiner Zelle / Zellcluster auszugleichen.
- Unterstütze, wenn möglich, benachbarte und übergeordnete Zellen / Zellcluster.
- Wenn die Unterstützung benachbarter Zellen / Zellcluster nicht ausreicht, schütze dich selbst.

Mit diesen Regeln kann ein komplexes zentrales System in ein sich selbst stabilisierendes dezentrales zellulares System mit hoher Resilienz überführt werden. Es geht darum, netzorientiertes Verhalten im zukünftigen Systemdesign in die Struktur des Systems und nach und nach bei allen Teilnehmern im Netz unterzubringen.

5.1.1. Integration des zellularen Energiesystems in ein Ampelsystem

Das zellulare System unterstützt ein Ampelsystem auf allen Netzebenen:

Grüne Ampelphase:

- Der Zell- oder Clustermanager gibt die Informationen über Potentiale, Bedarfe und Prognosen gebündelt weiter an die nächsthöhere Ebene.
- Das zellulare Energiesystem ist bestrebt, die Energieflüsse auf der niedrigsten möglichen Ebene, unter Berücksichtigung der physikalischen Einschränkungen und der Prognosen auszugleichen.

Gelbe Ampelphase:

- Die Zell- oder Clustermanager geben Informationen über bevorstehende lokale, regionale und überregionale Netzengpässe oder Energieengpässe weiter, um einen marktgesteuerten Ausgleich zu erreichen. Dabei bieten sie die technische Grundlage für z.B. flexible regionale und lokale Netzentgelte als marktbasierten Stabilitätsansatz.

Rote Ampelphase:

- Die Zell- oder Clustermanager geben an ihre nachgelagerten Netzteilnehmer Anweisungen weiter, welche zur Vermeidung eines Netzausfalles oder einer Netzauftrennung notwendig sind. Diese Anweisungen sind vorrangig zu Marktanweisungen oder Eigenoptimierungen, solange diese nicht die Stabilität der nachgelagerten Zellen oder Zellcluster gefährden würden.

5.1.2. Stabilitätsmechanismen am Beispiel Ortsnetzstation

Durch neue Anforderungen an Verteilnetzbetreiber rücken Ortsnetzstationen in den Fokus. Gerade bei Ortsnetzstationen und den daran angeschlossenen Niederspannungsnetzen gibt es ein hohes Potenzial zur besseren Nutzung und Auslastung der bestehenden Systeme.

Durch Installation eines Clustermanagers in einer Ortsnetzstation und dessen Anknüpfung an den/die vorhandenen Ortsnetztrafo(s) können die folgenden Funktionen realisiert werden:

- Plattform für das Managementsystem mit Grundfunktionen des Clustermanagers
- Grundfunktionen beinhaltet die Erfassung aller Energieflüsse in und durch die Ortsnetzstation sowie deren Auslastung (inkl. Spannung, Blindleistung, thermische Belastung, …)
- Überwachung von Spannung und Stromflüssen
- Steuerung des Stufenstellers
- Blindleistungsabruf
- Netzorientiertes Abregeln steuerbarer Verbrauchseinrichtungen
- modulare Plattform für Softwaremodule (optionale eigene Zusatzfunktionen oder von Dritten)
- Zusatzfunktionen:
  - z.B. Wirkleistungsreduzierung durch Anpassung des Stufenstellers
  - z.B. regionale Insel bei netzbildenden Einspeisemöglichkeiten (z.B. Speicher)
  - z.B. lokaler digitaler Zwilling des Niederspannungsnetzes (im Sinne des zellularen Energiesystems)
  - z.B. thermisches Modell des Trafos mit dynamischer Betrachtung der Belastung

- z.B. optimale Ausnutzung des Niederspannungsnetzes durch Spannungsmanagement
- z.B. Plattform für regionalen und lokalen Energiehandel
- …

Der Übergang kann schrittweise erfolgen und evolutionär gestaffelt werden. Die bestehenden Strukturen bleiben erhalten, werden weiterentwickelt und in einem fließenden Prozess in eine zellulare Struktur überführt. Die Effizienz des Gesamtsystems verbessert sich mit einzelnen Teilschritten.



Abbildung 8: Das Prinzipbild zeigt die Fallback-Mechanismen in der Netzführung über die Zustände Normalbetrieb, gestörter Betrieb und Störbetrieb. Mit zunehmender Störung werden Kommunikation und Koordination reduziert, sodass die Steuerung schrittweise von optimierten, übergeordneten Prozessen hin zu lokalen und vereinfachten Regelungen übergeht.

5.2. Grid Codes / Netzanschlussbedingungen

Grid Codes sind die Netz- und Systemregeln der Netzbetreiber. Grid Codes stellen ein wichtiges Regelwerk in jedem modernen Stromsystem dar, egal, ob es sich um vollständig entflochtene Systeme oder um vertikal integrierte Systeme mit einem Anteil an privaten Erzeugungseinheiten handelt. Sie legen die technischen Regeln fest, die jeder aktive Teilnehmer am Stromsystem, insbesondere Erzeugungseinheiten, befolgen müssen, um Netzzugang zu erhalten. Im Deutschen wird oft der

Begriff „Netzanschlussrichtlinien“ verwendet, allerdings können Grid Codes darüber hinaus auch Richtlinien für die Planung, Systemführung und Kommunikation enthalten, womit der Begriff „Netzanschluss“ etwas zu kurz greift.

Derzeit gibt es unterschiedliche Regelwerke für Verbrauchs- und Erzeugungsanlagen. Diese getrennte Betrachtungsweise sollte aufgegeben und eine einheitliche Regelung für das Verhalten von Erzeugern und Verbrauchern am Netz gefunden werden.

Die Grid Codes bilden dabei die Beziehungs-DNA für eine zukünftige zellulare Struktur. Es geht darum, netzorientiertes Verhalten im zukünftigen Systemdesign in die Struktur des Systems und nach und nach bei allen Teilnehmern im Netz zu implementieren.

Diese technischen Regeln stellen sicher, dass Erzeugungsanlagen und steuerbare Verbraucher auch ohne Kommunikation netzorientiert agieren und beispielsweise frequenzabhängige Leistungsanpassungen vornehmen. Die Steuerung erfolgt dabei rein betriebsgetrieben auf Basis von Echtzeit-Messwerten wie Spannung und Frequenz unmittelbar am Netzknoten. Durch diesen dezentralen, hierarchisch abgestuften Prozess wird ein evolutionäres Stabilitätsverhalten erzeugt, das Kaskadeneffekte verhindert und die Versorgungssicherheit ohne zentrale Steuerungseingriffe wiederherstellt.

Die Umrichter-basierten, mit Wechselrichter ausgestatteten Netzteilnehmer könnten bei richtiger Konfiguration eigenständig netzstabilisierend agieren. Dies kann bis zur teilweisen Nachbildung von Momentan-Reserve reichen. Die Wirkung der Stabilisierung auf der Netzseite gilt sowohl für Erzeugungsanlagen als auch eingeschränkt für Verbrauchersysteme mit Leistungselektronik. Mit einem flächendeckenden Einsatz solcher optimierten Komponenten könnte die Wahrscheinlichkeit eines Blackouts stark verringert werden. Das Verhalten dieser netzstabilisierenden Komponenten kann sich bei richtiger Konfiguration dämpfend, auf die bei einem drohenden Blackout auftretenden Netzoszillationen auswirken.

5.3. Störfallmanagement

Das Notfallmanagement soll hier nur in Bezug auf die Möglichkeiten betrachtet werden, die das zellulare Energiesystem bietet. Dies betrifft einerseits den Ausfall der Kommunikation als auch einen Netzausfall von Seiten der Energieversorgung.

5.3.1. Kommunikationsausfall

Bei der bisherigen Vorgehensweise der Energieversorgung werden lokale Endgeräte (z.B. Wärmepumpen, Ladestationen, Batteriespeicher) in wenigen zentralen Rechenzentren oder Leitwarten gesteuert. Bei einem Kommunikationsausfall verbleiben die Schaltzustände im zuletzt festgelegten Ist-Status. Eine eingeschaltete Photovoltaikanlage speist damit unabhängig von außen den Strom ein, der von der Anlage erzeugt wird.

In einem zellularen Energiesystem ist die Fähigkeit zur lokalen Notfall-Autonomie bei totalem Kommunikationsausfall eine grundlegende Vorgabe. Dabei agiert ein Clustermanager nicht mehr auf Basis koordinierter digitaler Datenströme, sondern stellt seinen Betrieb auf eine rein lokale, physikalisch getriebene Steuerung um.

Im zellularen Energiesystem unterscheiden sich zwei Ausfallmodi: eine Störung der Kommunikation zu übergeordneten Systemebenen sowie ein vollständiger Kommunikationsausfall. Wenn die Kommunikation auf lokaler Ebene möglich ist, so werden Daten noch so weit wie möglich innerhalb des betroffenen Clusters ausgetauscht.

Dieser Clustermanager arbeitet mit seinen lokal gemessenen Parametern des Netzzustands weiter und passt sein Verhalten auf Basis dieser an. Intern betreibt und steuert der Clustermanager seine untergeordneten Cluster- und Zellmanager und sein Netz weiter und verhält sich nach außen netzorientiert. Bei vollständigem Kommunikationsausfall ist kein Datenaustausch mehr möglich. In diesem Modus arbeiten die Cluster- und Zellmanager auf Basis der jeweils lokal gemessenen Parameter weiter und behalten ihre Schutzfunktionen bei.

5.3.2. Autonome Arbeitsweise bei Kommunikationsausfall

Die autonome Arbeitsweise folgt dabei diesen spezifischen Mechanismen:

- Rückgriff auf physikalische Parameter: Der Clustermanager nutzt ausschließlich die an seinem Netzknoten unmittelbar gemessenen physikalischen Größen wie Spannung und Frequenz als Regelsignale. Diese Parameter dienen als Indikatoren für den Zustand des Gesamtnetzes und die lokale Balance.

- Implementiertes Grid-Verhalten: Alle Clustermanager verfügen über ein fest hinterlegtes, auf Netzdaten beruhendes Basisverhalten, das den geltenden Netzanschlussregeln (Grid Codes) entspricht. Diese „Beziehungs-DNA" ermöglicht einen sicheren Grundbetrieb, indem vordefinierte Automatismen greifen.

- Selbstständige Stabilisierungsfunktionen: Der Manager führt eigenständig Maßnahmen zur Netzstützung durch, wie etwa die frequenzabhängige Leistungsreduktion oder automatische Funktionen zur Spannungsunterstützung.

- Aufrechterhaltung von Schutzfunktionen: Trotz des Informationsverlusts bleiben alle lokalen Schutz- und Überwachungsfunktionen im Clustermanager aktiv, um die physikalische Integrität der Infrastruktur zu gewährleisten.

- Fähigkeit zum Inselbetrieb: Falls das vorgelagerte Netz aufgrund der Störung nicht mehr aufrechterhalten werden kann, ist der Clustermanager in der Lage, den betroffenen Cluster vom restlichen Netz zu trennen[3] und eine autarke Netzinsel zu bilden, sofern die technischen Voraussetzungen dafür gegeben sind.

Durch diese Kombination aus lokaler Sensorik und festen Regelalgorithmen wird sichergestellt, dass das System selbst bei einem vollständigen Zusammenbruch der IT-Infrastruktur resilient bleibt und nicht in einen unkontrollierten Zustand gerät.

Zusammenfassung:

- Bei einem Kommunikationsausfall versuchen die Zell- und Clustermanager das Netz auf Basis der physikalischen Netzparameter Spannung und Frequenz zu stützen und zu stabilisieren. Um diese zu erreichen, werden automatisch netzorientierte Verhaltensparameter eingesetzt.

- Kann das vorgelagerte Netz nicht aufrechterhalten werden, dürfen sich die nachgelagerten Zellcluster oder Zellen vom vorgelagerten Netz trennen und eine Netzinsel bilden. Dies setzt voraus, dass die Netztrennung und der Inselbetrieb vorbereitet und möglich ist. Diese Verhaltensweise gilt in Anlehnung an die bestehenden Vorschriften wie FRT-Vorgaben (Fault Ride Through) für die Netztrennung.

5.3.3. Netzausfall

Fällt ein Teil des Netzes aus, das einem Clustermanager nachgelagert ist, so kann dies in der Regel vom Clustermanager erkannt werden. Ein derartiger Fehler wird durch die Lastflussüberwachung an den Abgängen mit entsprechender Plausibilitätsprüfung im Clustermanager detektiert. Der Clustermanager gibt die Information über die Störung an eine Störungsstelle weiter, die den Fehler lokalisiert und behebt.

Beim Ausfall des vorgelagerten Netzes können – wie zuvor beschrieben – einzelne Cluster oder Clusterverbünde in den Inselbetrieb zurückfallen (z.B. Versorgungsgebiete, die einem Ortsnetztrafo oder einem Umspannwerk zugeordnet sind). Dies bezieht sich insbesondere auf einzelne Zellen oder

Zellcluster mit ausreichender Kapazität und geeigneter Infrastruktur, die nach Übergang in den Inselbetrieb diesen Zustand aufrechterhalten können. Diese Möglichkeiten des zellularen Energiesystems können auch durch geeignete Nachrüstung (z.B. durch Netzbildner) auf Basis der vorhandenen Einrichtungen erreicht werden. Hierfür ist eine funktionsspezifische Planung zusammen mit einer passenden Konfiguration erforderlich.

3 Dies ist möglich, wenn die Ortsnetzstation diese Fähigkeit aufweist und sofern die nachgelagerten Netzteilnehmer Inselnetzfähigkeiten aufweisen und der Cluster dafür ertüchtigt ist.

5.3.4. Netzwiederkehr

Der Clustermanager kann mittels Messungen an seiner Trennstelle die Zustände sowohl des vorgelagerten als auch des nachgelagerten Netzes erkennen. Bei Wiederkehr des vorgelagerten Netzes kann der Clustermanager in Abhängigkeit seiner gemessenen Netzparameter die Wiedereinschaltzeitpunkte im nachgelagerten Netz so wählen, dass diese das vorgelagerte Netz geringstmöglich belasten. Dadurch erleichtert der Clustermanager den Wiederaufbau des Netzes, weil große Lastsprünge durch ein gebündeltes Einschalten großer Lastströme vermieden werden.

Aus einem Inselbetrieb heraus kann bei Netzwiederkehr der Clustermanager die Resynchronisation mit dem zurückgekehrten vorgelagerten Netz durchführen.

Um den Wiederaufbau des Netzes zu erleichtern, wählt der Clustermanager die Wiedereinschaltzeitpunkte für das nachgelagerte Netz gezielt so, dass die Belastung für das vorgelagerte System minimiert wird. Durch diese zeitlich gestaffelte oder koordinierte Zuschaltung werden große Lastsprünge vermieden, die andernfalls durch das gleichzeitige Einschalten aller Lastströme entstehen könnten. Falls die betroffenen Cluster während des Ausfalls in einen Inselbetrieb übergegangen ist, führt der Clustermanager eine präzise Resynchronisation mit dem zurückgekehrten Netz durch. Da das nachgelagerte Netz im Inselbetrieb bereits ausbalanciert ist, treten beim Zusammenführen der Netze keine nennenswerten Lastspitzen auf.

Obwohl der zellulare Ansatz das beste Modell für eine krisenfeste Versorgung darstellt, wird deutlich, dass für einen überregionalen Ausgleich und die langfristige Sicherheit weiterhin gesicherte Erzeugungsanlagen und ein solidarisches Verbundsystem notwendig sind. Die dauerhafte lokale Versorgung ist somit theoretisch möglich, sofern die Zelle über ausreichende saisonale Speicherkapazitäten und eine intelligente Sektorenkopplung verfügt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Inselbetriebe die lokale Versorgung bei Blackouts stabilisieren und bei entsprechender technischer Ausstattung auch über längere Zeiträume sichern können, die „dauerhafte" Autarkie jedoch nicht Ziel eines zellularen Energiesystems ist.

5.4. Erste Schritte auf dem Weg zur Umsetzung

Die Transformation hin zu einem zellularen Energiesystem ist bereits vielerorts im Gange. In Haushalten, Wohngebäuden und Mietarealen bilden Photovoltaikanlagen zusammen mit Heimspeichern, Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen in Verbindung mit einem Energiemanagementsystem schon heute funktionale Energiezellen. Diese Kombination erlaubt es, den lokal erzeugten regenerativen Strom direkt zu speichern, flexibel zu nutzen und so die Netzintegration zu verbessern.

Auch in der Industrie werden zunehmend eigene Erzeugungsanlagen, große Batteriespeicher, Kraft-Wärme-Kopplung und teilweise unternehmenseigene Netze in Kombination mit Energiemanagementsystemen betrieben. Daraus entwickeln sich autarke Industriezellen, die aufgrund ihrer Größe und Flexibilität zu wichtigen Bausteinen auf der Mittel- und Hochspannungsebene werden. Diese Entwicklungen zeigen, dass dezentrale Erzeugungsanlagen und Speicher längst nicht mehr isolierte Komponenten sind, sondern sich zu zentralen Trägern neuer Netzarchitekturen entwickeln.

Die Aufgabe der kommenden Jahre wird es sein, die Verteilnetze so weiterzuentwickeln, dass diese die Vielzahl dezentraler Erzeugungsanlagen und Speicher-Systeme sowie die stark wachsenden elektrischen Verbraucher in einen volldynamischen automatisierten Netzbetrieb integriert werden. Nur so lassen sich Komplexität und Kosten reduzieren, Versorgungssicherheit erhöhen und die Transformation in ein resilientes, dezentrales und regeneratives Energiesystem nachhaltig ermöglichen.

Sobald Investitionen stattfinden, werden mittlerweile immer auch Lösungen aus der Nutzung regenerativer Energien zusammen mit einer weitergehenden Elektrifizierung realisiert. Dies gilt sowohl im ganzen Bereich der Haushalte, Wohngebäude und Mietareale, im Bereich der Industriebetriebe bis hin zu Stadtwerken, die sich mit eigenen Strom- und Wärmenetzen zu einer übergeordneten Energiezelle entwickeln.

Zu den Stadtwerken gibt es einige herausragende Beispiele zur Entwicklung von übergeordneten Energiecluster, z.B. die Stadtwerke Haßfurt. Der Netzverknüpfungspunkt, der den Knoten des Clusters bildet, ist die Hochspannung, im Cluster wird ein eigenes Mittel- und Niederspannungsnetz betrieben. Im Netz des Clusters werden verschiedene Anlagen zur Erzeugung, aber auch Verbrauchsanlagen (z.B. Elektrolyseur und Wärmenetz) und Speicher eigenoptimiert betrieben.

Dadurch wird im Jahresmittel mehr Energie erzeugt als verbraucht. Innerhalb dieses Energiecluster können durch flexible Preissignale die volatile Erzeugung und Verbrauch angeglichen werden. Damit betreiben die Stadtwerke Haßfurt im Grunde nach bereits ein Energiecluster im Sinne des zellularen Energiesystems.

Im beispielhaften Bereich der Haushalte existieren vielfach Photovoltaikanlagen, Heimspeicher, Wärmepumpe und E-Auto. Zusammen mit einem Energiemanagementsystem bildet dies bereits eine Energiezelle. In ähnlicher Weise findet die Umsetzung auch im Bereich der Industrie statt.

Unternehmen betreiben eigene Erzeugungsanlagen, Speicheranlagen, Kraft-Wärme-Kopplung und teilweise eigene Netze. Industriebetriebe sind große Verbraucher von Energie in Form von Strom, Wärme, usw. und haben Flexibilitätspotentiale in der Betriebsführung und bei der Produktion (>2,5 GWh/a). Der Netzverknüpfungspunkt liegt zumeist bei einem Anschluss im Mittel- oder Hochspannungsnetz. Für die volle Nutzung der Potentiale werden bereits eigene Energie-Managementsysteme und Energie-Optimierungssysteme eingeführt oder schon eingesetzt. Durch den Ansporn zur Effizienzsteigerung entwickeln sich Industriezellen immer mehr zu potenten großen Energiezellen auf der Mittel- und Hochspannungsebene.

5.5. Dynamische Einspeiseleistung und dynamische Netzbezugsleistung

Im Zuge der Energiewende steigen sowohl die Erzeugung (Einspeiseleistung) als auch der Verbrauch (Netzbezugsleistung) elektrischer Energie im Verteilnetz deutlich an. Die Transformation des Energiesystems wird zunehmend durch die begrenzte Aufnahmefähigkeit und Lieferfähigkeit der bestehenden Stromnetze limitiert. Statischer Betrieb der Netze und langwierige Netzausbauverfahren verhindern häufig den Anschluss neuer Erzeugungsanlagen. Das Konzept des zellularen Energiesystems bietet einen innovativen Ansatz, um diese Herausforderungen zu adressieren.

Ein zentraler Bestandteil der volldynamischen Netzbetriebsführung ist die netzzustandsabhängige Netzanschlusskapazität. Anstatt einer statischen Einspeise- oder Bezugsleistung wird die zulässige Leistung dynamisch an den aktuellen Netzzustand angepasst. Dadurch lassen sich bestehende Netzressourcen flexibler und effizienter nutzen, ohne die Betriebssicherheit zu gefährden. Innerhalb einer Energiezelle können Anlagenbetreiber durch Lastmanagement, Speicherbetrieb und variablen Eigenverbrauch ihre Einspeisung bedarfsgerecht steuern und so Netzengpässe aktiv vermeiden.

Im Rahmen entsprechender Forschungsarbeiten werden Planungs- und Betriebsführungsstrategien entwickelt, um die technische, wirtschaftliche und regulatorische Umsetzbarkeit dieses Ansatzes insbesondere auf der Mittel- und Niederspannungsebene zu bewerten. In Kombination mit regelbaren Ortsnetztransformatoren (RONT) und weiteren Maßnahmen können die Anschlusskapazitäten in vorhandenen Netzstrukturen für Erzeuger und Verbraucher um den Faktor drei bis fünf erhöht werden. Das zellulare Energiesystem ermöglicht somit eine flexible, resiliente und effiziente Integration dezentraler erneuerbarer Energien und reduziert den Netzausbaubedarf erheblich.

6. Vorteile und Chancen des zellularen Energiesystem



Die Einführung einer volldynamischen automatisierten Netzführung auf Basis des zellularen Ansatzes führt zu einer Reihe struktureller, technischer und systemischer Verbesserungen. Sie ermöglicht nicht nur eine effizientere Nutzung bestehender Infrastruktur, sondern verändert die Funktionsweise des Verteilnetzes grundlegend: vom passiven Energietransportmedium hin zu einem aktiven, selbstorganisierenden Systembestandteil.

Durch die kontinuierliche Bewertung der Netzzustände und die dynamische Leistungsvergabe wird die physikalisch vorhandene Netzkapazität wesentlich besser ausgenutzt. Anstatt den Betrieb auf selten auftretende Spitzenwerte auszulegen, wird die tatsächliche Auslastung in Echtzeit gesteuert.

Temporäre Freiräume in Spannung und Leitungsauslastung können unmittelbar erkannt und genutzt werden. Simulations- und Praxiserfahrungen zeigen bereits heute, dass durch eine adaptive Spannungs- und Leistungsregelung in Kombination mit aktiver Blindleistungsführung Zuwächse bei der nutzbaren Einspeiseleistung möglich sind (Faktor 2 bis 5 sowohl auf Last- als Erzeugungsseite) – ohne unnötige physikalische Netzverstärkung.

Dies erlaubt die Integration zusätzlicher Photovoltaik-, Wind- und Speicheranlagen in bestehenden Netzabschnitten, die nach konventioneller Betrachtung bereits als ausgelastet gelten würden. Die zellularen Netzstruktur ermöglicht höhere Anschlussleistung ebenso bei dem immer stärker wachsenden Bedarf durch die Elektrifizierung. Wärmepumpen, Ladeinfrastruktur und Power-to-X und vieles mehr, können so effizienter in das Netz integriert werden.

Die bessere Auslastung der vorhandenen Betriebsmittel führt unmittelbar zu einer Reduktion des Netzausbaubedarfs und Senkung der Netzentgelte, dessen Höhe immer mehr Teil der öffentlichen Debatte sind. Anstatt Leitungen und Transformatoren frühzeitig zu verstärken, können bestehende Komponenten länger und wirtschaftlicher genutzt werden.

Der Ausbauaufwand verschiebt sich vom großflächigen zum gezielten Leitungsausbau hin zur gezielten Nachrüstung mit Mess- und Steuertechnik, wobei ein gewisser Anteil des physikalischen Ausbaus weiter notwendig sein wird. Auch böte der zellulare Ansatz die technische Voraussetzung, um ernsthafter in die nodale Bepreisung der Netznutzung einzusteigen oder wie von der Bundesnetzagentur (BNetzA) aktuell im AgNes-Prozess diskutiert: dynamische Netznutzungsentgelte (NNE).

Insgesamt wird auch der Ressourceneinsatz optimiert: Kupfer und Stahl werden teilweise durch Sensorik, Datenverarbeitung und Regelalgorithmen ersetzt. Diese Entwicklung markiert einen Übergang von einem statischen zu einem informationsbasierten, automatisierten Netzbetrieb. Die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems verbessert sich, da Investitionen zunehmend in intelligente Steuerung statt in physische Überdimensionierung fließen.

Ein entscheidender Systemeffekt der zellularen Architektur ist die Steigerung der Versorgungssicherheit, da jede Energiezelle und jedes Cluster autonom agiert, wie bereits beschrieben über die implementierten Grid Codes in der Mess- und Regelungstechnik verfügt, und somit das Gesamtsystem auch bei Störungen, Kommunikationsausfällen oder Teilausfällen einzelner Netzsegmente für einen sicheren Weiterbetrieb stabilisiert.

Im Störungsfall können geeignete Cluster in den Inselbetrieb übergehen und sich temporär vom übergeordneten Netz entkoppeln. Innerhalb der Zelle wird dabei die Balance zwischen Erzeugung, Verbrauch und Speicherleistung eigenständig gehalten. Diese Fähigkeit zur lokalen Stabilisierung reduziert das Risiko großflächiger Versorgungsunterbrechungen und schafft Redundanzen, die in klassischen, zentral gesteuerten Netzen nicht vorhanden sind.

Darüber hinaus verringert die lokale Regelautonomie die Zahl der erforderlichen zentralen Eingriffe. Entscheidungen werden dort getroffen, wo sie unmittelbar wirken. Das beschleunigt die Reaktion auf Netzereignisse und verhindert Kaskadeneffekte. Die Kombination aus Selbstregelung und Autarkiefähigkeit macht das Gesamtsystem robuster gegenüber technischen, wetterbedingten oder externen Einflüssen.

Die zellulare Struktur führt zu einer resilienten, selbstähnlichen Netzarchitektur, in der jede Ebene, ob vor- oder nachgelagert, auf denselben Prinzipien basiert: lokale Stabilisierung, hierarchische Koordination und bidirektionale Kommunikation. Dadurch wird das Gesamtsystem skalierbar und anpassungsfähig.

Resilienz entsteht dabei nicht durch zentrale Redundanz, sondern durch verteilte Intelligenz: Jede Zelle verfügt über die notwendigen Informationen und Funktionen, um innerhalb definierter Grenzen autonom zu agieren. Störungen oder Überlastungen bleiben lokal begrenzt, und die übrigen Netzbereiche können unabhängig davon stabil weiterarbeiten.

Diese Selbstähnlichkeit schafft eine hohe Systemrobustheit, weil sich Funktionsprinzipien unabhängig von der räumlichen oder technischen Skalierung wiederholen: von der Gebäudeeinheit über das Quartier bis hin zum gesamten Verteilnetz. Das System kann wachsen, ohne dass Komplexität und Steuerungsaufwand proportional zunehmen. Wir könnten die vielen energiewirtschaftlichen Debatten auf der regulatorischen Ebene endlich in physikalischen Gegebenheiten abbilden.

Der zellulare Ansatz ermöglicht sowohl die Nutzung lokaler als auch überregionaler Energie und kann dabei Erzeugungskosten und Übertragungskosten berücksichtigen. Dadurch kann für einen spezifischen Anwendungsfall der optimale Energietransfer unter marktlich und netzorientierten Aspekten gewählt und genutzt werden. Das zellulare Energiesystem kann unter verschiedenen Szenarien des Marktdesigns seine Vorteile ausspielen, weil Kapazitäten zur Übertragung und Flexibilitäten optimal genutzt werden. Dadurch ergibt sich ein kosteneffizienter Betrieb der Netzinfrastruktur.

Weiterhin erhöht sich die Resilienz, weil zum einen die Struktur des zellularen Energiesystems eigenständige Netzinseln ermöglicht, die sich einfacher resynchronisieren lassen und dadurch großflächige Ausfälle vermeidet, und zweitens, weil durch verteilte reale Messungen mehrfache Plausibilitätsprüfungen erfolgen können, die die Manipulationsmöglichkeiten von außen deutlich einschränkt. Dies stellt einen konstruktiven Sicherheitsmechanismus dar, der eine höhere Schutzwirkung gegen Cyberangriffe hat als adaptive oder administrative Sicherheitsmechanismen. Siehe Kapitel 4.4 und 7.

Energiemanagementsysteme sind inzwischen in unterschiedlichsten Varianten standardmäßig verfügbar. Das Aufsetzen und Betreiben von Energiezellen durch Adaption und Erweiterung dieser Systeme wurde in den vergangenen Jahren durch Reallabore und Forschungsvorhaben mehrfach gezeigt. Entscheidend für den Aufbau eines zellularen Energiesystems ist jedoch die Verknüpfung der Zellen über einen Clustermanager.

Der Clustermanager kann im Sinne von Edge Computing verstanden werden, wobei sich eine Abbildung des untergeordneten Netzes als digitaler Zwilling im Clustermanager anbietet. Die Implementierung solcher Einheiten mit der entsprechenden Funktionalität ist aus der Automatisierungsbranche heraus hinlänglich bekannt. Gerade durch die Automatisierungstechnik eröffnen sich hier neue Möglichkeiten zur Stärkung der regionalen Souveränität und allgemeiner energetischer Unabhängigkeit.

6.1. Transformationsweg in das zellulare Energiesystem

Die Transformation des bestehenden Stromnetzes in ein zellulares Energiesystem (ZES) ist ein stetiger, kontinuierlicher Entwicklungsprozess, der die vorhandene Infrastruktur schrittweise in eine dezentrale und volldynamische Architektur überführt. Dieser Pfad beschreibt den Übergang von einer starren, zentral gesteuerten Versorgung hin zu einem selbstorganisierenden Organismus.



Abbildung 9: Das Bild unterteilt den Transformationspfad zur zellularen Netzsteuerung in sechs aufeinander aufbauende Phasen. Beginnend mit der Transparenz über den Netzstatus und dem Aufbau digitaler Modelle entwickelt sich das System schrittweise hin zu einer aktiven Steuerung, der Integration von Verbrauchern und Einspeisern sowie schließlich zu einer hierarchischen, koordinierten Netzführung.

Phase 1-2: Transparenz und Systemverständnis

In der ersten Stufe der Transformation steht die Schaffung von Transparenz über den Netzzustand im Vordergrund. Durch die Erfassung von Messdaten und den Aufbau digitaler Zwillinge entsteht ein detailliertes Verständnis der Netztopologie und der Zusammenhänge zwischen Erzeugung, Verbrauch und Netzbetrieb. Diese Informationsbasis bildet die Voraussetzung für alle weiteren Schritte der Transformation. Damit können bereits in den ersten Stufen freie Netzpotentiale und Netzengpässe genauer ermittelt werden und die Netzentwicklung daraufhin optimiert werden.

Phase 3-5: Lokale Steuerung und Aktivierung von Flexibilitäten

Aufbauend auf der geschaffenen Transparenz wird der Netzbetrieb in dieser Stufe aktiv gestaltet. Clustermanager an den Netzknoten nutzen die verfügbaren Netzzustandsdaten, um Energieflüsse innerhalb eines lokalen Netzbereichs gezielt zu beeinflussen und die vorhandene Infrastruktur effizient auszunutzen.

Zunächst erfolgt die aktive Steuerung der Netzbetriebsmittel, beispielsweise durch die Regelung von Transformatoren zur Spannungsbandhaltung oder durch gezielte Eingriffe in die Netzkonfiguration. Ergänzend dazu werden flexible Verbraucher gemäß §14a EnWG in die Netzführung einbezogen und über netzorientierte Signale gesteuert, sodass Lastspitzen reduziert und Netzengpässe vermieden werden können.

Mit fortschreitender Entwicklung werden auch dezentrale Einspeiser und Speicher systematisch in die Netzführung integriert. Dabei werden Einspeisebudgets definiert und Maßnahmen priorisiert, um die vorhandenen Netzkapazitäten optimal auszunutzen. Auf diese Weise entwickelt sich die Netzführung von einer rein lokalen Steuerung hin zu einer koordinierten Nutzung aller verfügbaren Flexibilitäten innerhalb eines Clusters.

Phase 6: Hierarchische Koordination und Systemintegration

In der finalen Ausbaustufe werden die einzelnen Cluster in eine übergeordnete, hierarchische Netzstruktur integriert. Lokale Optimierungen innerhalb von Zellen und Clustern werden mit systemweiten Anforderungen abgestimmt. Dabei gilt das Prinzip, dass ein Ausgleich zunächst lokal innerhalb der Zelle oder des Clusters erfolgt, bevor Energieflüsse zwischen benachbarten Clustern oder übergeordnete Netzebenen in Anspruch genommen werden. Dadurch entsteht eine skalierbare und koordinierte Netzführung über alle Spannungsebenen hinweg.

Die Effizienz des Gesamtsystems steigt proportional zur Anzahl der Teilnehmer und deren Fähigkeit zur Koordination. Je mehr Energiezellen und Zellcluster miteinander vernetzt sind, desto größer wird der Pool an verfügbaren Flexibilitäten. Durch eine volldynamische Netzbetriebsführung, die auf Echtzeitdaten und digitalen Zwillingen der Netztopologie basiert, können vorhandene Reserven der Infrastruktur präzise identifiziert werden. Dies ermöglicht es, die Aufnahmekapazität bestehender Netze für regenerative Energien, um den Faktor drei bis fünf zu steigern, ohne dass ein massiver physischer Ausbau von Leitungen (Kupfer und Stahl) im selben Maße erforderlich ist.

Mit fortschreitender Entwicklung gewinnt das System an Resilienz. Die Stabilität wird durch „Schwarmregeln“ sichergestellt: Der lokale Ausgleich innerhalb einer Zelle oder eines Clusters hat oberste Priorität. Erst wenn dies nicht ausreicht, erfolgt die Unterstützung durch benachbarte oder übergeordnete Einheiten. Diese fraktale Struktur erlaubt es einzelnen Clustern im Störungsfall, in den Inselbetrieb überzugehen. So wird verhindert, dass lokale Fehler zu großflächigen Kaskadeneffekten im Gesamtsystem führen.

Fazit

Der Weg zum zellularen Energiesystem ist kein abrupter Wechsel, sondern eine evolutionäre Weiterentwicklung. Durch die Verknüpfung von Energie- und Informationsflüssen an den intelligenten Netzknoten entsteht ein skalierbares und robustes System, das die Komplexität von Millionen dezentraler Anlagen beherrschbar macht und die Versorgungssicherheit nachhaltig garantiert.

6.2. Effizientere Auslastung der Netzbetriebsmittel

Die Transformation des bestehenden Stromnetzes hin zu einem zellularen Energiesystem (ZES) markiert einen grundlegenden Paradigmenwechsel von einer zentralistischen, statischen Netzführung zu einer dezentralen, volldynamischen Architektur. Die Energiewende findet im Verteilnetz statt.

Das Verteilnetz ist das Rückgrat der Energiewende. Über 4 Millionen dezentrale Anlagen speisen über 90 Prozent der Leistung in die Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetze der Verteilnetzbetreiber ein. Doch diese sind bereits jetzt in vielen Bereichen an der Kapazitätsgrenze bei der derzeitigen Betriebsweise. In den Verteilnetzen entscheidet sich, ob wir die Energiewende erfolgreich umsetzen können.

1. Steigerung der Systemeffizienz durch dynamische Bewirtschaftung

Das bestehende Netz basiert auf dem Prinzip der statischen Dimensionierung, bei dem Leitungen für seltene Spitzenlasten ausgelegt werden, was zu einer systemischen Unterauslastung führt. Im zellularen Ansatz wird die physikalische Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch vorrangig lokal in Energiezellen und regional in Energieclustern hergestellt. Durch eine volldynamische Netzbetriebsführung, die auf Echtzeitdaten und digitalen Netzzwillingen basiert, können vorhandene Reserven der Infrastruktur präzise identifiziert werden.

Neben den tatsächlichen physischen Grenzen der Stromtragfähigkeit insbesondere bei den Übertragungsknoten der Umspannwerke sind die Aufnahmegrenzen durch den Spannungshub in den 20 und 0,4 kV Netzen beschränkt. Dies begrenzt derzeit die Aufnahmekapazität durch die Maßgabe der maximalen Spitzenleistung aller angeschlossenen Anlagen im jeweiligen Netzabschnitt. Bei den derzeit

üblichen Netzanschlussprüfungen wird in der Regel nur von statischen Maximalwerten ausgegangen. Das heißt maximale Rückspeisung bei minimaler Last, Bezogen auf Spannungs- und Stromgrenzwerte am schlechtesten Punkt ist die freie Einspeisekapazität.

Die tatsächliche Erzeugungsleistung liegt im Mittel jedoch weit darunter. Durch eine dezentrale Leistungsvergabe auf der Basis der momentanen Auslastung und des tatsächlichen Spannungshubes in allen Bereichen des Netzstranges, also durch eine dynamische dezentrale Netzbetriebsführung lässt sich die Netzaufnahmekapazität im MS-Netz in den meisten Fällen signifikant erhöhen. Dadurch werden Freiräume direkt am betroffenen Netzabschnitt erschlossen und weitergegeben. Wenn das noch mit regelbaren Ortsnetztransformatoren und einem erweiterten Spannungsband in der MS, sowie einem aktiven Blindleistungsmanagement kombiniert wird, können die vorhandenen Aufnahmekapazitäten noch weiter erhöht werden. Das Ganze funktioniert genauso mit den Lasten, welche in Zukunft durch die Elektrifizierung immer weiter zunehmen werden.

Dies kann die Aufnahmekapazität bestehender Netze für erneuerbare Energien um den Faktor drei bis fünf erhöhen, ohne die physikalische Substanz zu verändern.

2. Kosteneffizienz durch Minimierung des physischen Netzausbaus

Ein zentraler wirtschaftlicher Vorteil ist die Anwendung des NOVA-Prinzips (Netzoptimierung vor Netzverstärkung vor Netzausbau). Da das ZES lokale Flexibilitäten wie Batteriespeicher, Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge intelligent orchestriert, wird die Belastung der übergeordneten Netzebenen massiv reduziert. Speichersysteme werden dadurch automatisch netzorientiert betrieben.

Investitionen verlagern sich von kostenintensivem physischem Ausbau (Kupfer und Stahl) hin zu kosteneffizienterer Sensorik, Kommunikationstechnik und Regelalgorithmen. Langfristig führt dies zu einer Senkung der Netzentgelte, da bestehende Betriebsmittel effizienter genutzt werden können. Ergänzend dazu ermöglichen solche dezentralen Strukturen die Grundlage für dynamische Netzentgelte auf allen Netzebenen, welche netzorientiertes Verhalten finanziell belohnen und die Netzstrukturen zusätzlich entlastet.

Fazit

Der zellulare Ansatz transformiert das Stromnetz von einem überwiegend passiven Transportmedium zu einem aktiven, selbstorganisierenden Organismus. Er stellt das derzeit effizienteste Modell dar, um die Komplexität von Millionen dezentraler Erzeuger zu beherrschen, die Kosten der Energiewende durch digitale Intelligenz zu begrenzen und eine krisenfeste Energieversorgung für die Zukunft zu garantieren.

6.3. Lokale und regionale netzorientierte Marktplattformen

Das ZES ermöglicht die Steuerung der netzorientierten Verfügbarkeit verschiedener Marktmodelle abhängig vom physikalischen Zustand im Netz. Clustermanager können lokale und regionale Marktplattformen bilden. Dadurch ist auch marktliche und netzorientierte Integration von Batteriespeichern möglich.

Mit dem zunehmenden Anteil dezentraler Erzeugung und flexibler Verbraucher wächst die Bedeutung von Marktmechanismen, die nicht nur ökonomische, sondern auch physikalische Anforderungen des Netzbetriebs berücksichtigen. Im zellularen Energiesystem entstehen hierfür lokale und regionale Marktplattformen, die eine netzorientierte Koordination von Erzeugung, Verbrauch und Flexibilitäten ermöglichen. Ziel ist es, Energieflüsse möglichst auf der niedrigsten Netzebene auszugleichen und damit die Belastung übergeordneter Netzstrukturen zu reduzieren.

Im Unterschied zu heutigen, überwiegend zentral organisierten Energiemärkten orientieren sich diese Marktplattformen an der realen Netztopologie. Sie sind eng mit den Energiezellen und Zellclustern verknüpft und werden durch das jeweilige Energiezellen- bzw. Clustermanagement koordiniert. Flexibilitäten wie steuerbare Lasten, Speicher oder regelbare Erzeugungsanlagen werden dabei aggregiert und können gezielt zur Stabilisierung des lokalen Netzes eingesetzt werden. Der Handel bezieht sich somit nicht nur auf Energiemengen, sondern insbesondere auf die Bereitstellung von Flexibilität zur Einhaltung technischer Netzgrenzen.

Ein zentrales Merkmal dieser Marktplattformen ist die Kopplung an den aktuellen Netzzustand. Netzzustandsabhängige Preissignale oder Anreize ermöglichen es, lokale Engpässe marktlich zu adressieren. So können beispielsweise bei hoher Einspeisung Anreize zur lokalen Nutzung oder Speicherung von Energie geschaffen werden, während bei hoher Netzbelastung Flexibilitäten zur Reduktion von Last oder Einspeisung aktiviert werden. Dadurch wird ein möglichst marktbasierter Ausgleich erreicht, bevor netzseitige Eingriffe erforderlich werden.

Die lokalen und regionalen Marktplattformen sind dabei in das im zellularen Energiesystem vorgesehene Ampelkonzept eingebettet. Im Normalbetrieb erfolgt die Optimierung frei am Markt. Bei absehbaren Engpässen werden netzzustandsabhängige Anreize gesetzt, um ein netzorientiertes Verhalten zu fördern. Erst wenn diese Mechanismen nicht ausreichen, greifen steuernde Maßnahmen durch das Clustermanagement ein, um die Stabilität des Systems sicherzustellen.

Durch die Integration von Markt und Netzbetrieb ermöglichen lokale und regionale Marktplattformen eine effizientere Nutzung der bestehenden Infrastruktur, reduzieren den Netzausbaubedarf und erhöhen die Systemstabilität. Gleichzeitig schaffen sie die Grundlage für eine aktive Teilnahme der Netzteilnehmer, indem Flexibilitäten wirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Damit stellen sie einen wesentlichen Baustein für ein dezentrales, volldynamisches Energiesystem dar.

Durch die enge Kopplung von Marktmechanismen und physikalischem Netzbetrieb werden ökonomische Entscheidungen direkt an die technischen Randbedingungen des Netzes gebunden. Netzzustandsgrößen wie Spannung, Strombelastung und verfügbare Übertragungskapazitäten fließen als Nebenbedingungen in die marktlichen Prozesse ein und bestimmen die zulässigen Handlungsspielräume der Teilnehmer.

Marktliche Signale spiegeln damit nicht mehr ausschließlich Angebot und Nachfrage wider, sondern berücksichtigen explizit die aktuelle Netzsituation. Auf diese Weise werden Flexibilitäten gezielt dort aktiviert, wo sie aus physikalischer Sicht wirksam sind. Lokale und regionale Marktplattformen ermöglichen somit eine Synchronisation von ökonomischer Optimierung und technischer Systemführung und schaffen die Grundlage für ein Energiesystem, in dem Markt und Physik nicht getrennt, sondern integriert wirken.

6.3.1. Stärkung der regionalen Player und der regionalen Märkte

Das zellulare Energiesystem unterstützt temporäre Autarkie, beabsichtigt jedoch keine dauerhafte Abkopplung unseres solidarischen Energiesystems. Das moderne Energiesystem wandelt sich von einer statischen „Zentralverwaltungswirtschaft“, in der wenige Großkraftwerke die Versorgung diktierten, hin zu einer dynamischen Marktwirtschaft mit einer Vielzahl interagierender Akteure.

Die Herausforderung besteht darin, die Innovationskraft des freien Marktes zu nutzen und gleichzeitig eine soziale Ausgestaltung zu gewährleisten. Das zellulare Energiesystem (ZES) ermöglicht eine Stärkung der lokalen und regionalen Teilnahme der Wirtschaft und der Bürger am Energiemarkt. Das ZES bildet dieses Prinzip technisch ab: Sie ermöglichen das freie Agieren einzelner Energiezellen innerhalb einer orchestrierten Zusammenarbeit. Als komplexe, dynamische Systeme nutzen sie Wechselbeziehungen zwischen den Zellen, um durch Selbstorganisation Stabilität und Effizienz im Gesamtzusammenhang zu erzeugen.

Obwohl das zellulare Prinzip auf lokale Optimierung setzt, ist eine vollständige physikalische Abkopplung einzelner Teilnehmer gesamtgesellschaftlich kontraproduktiv und nicht Teil des zellularen Energiesystems:

- Verlust der Solidargemeinschaft: Der zellulare Ansatz zielt darauf ab, die Vorteile dezentraler Strukturen zu nutzen, ohne die Unterstützung eines solidarischen Verbundsystems aufzugeben. Eine dauerhafte Autarkie widerspricht dem Grundgedanken der sozialen Marktwirtschaft, in der das System negative Auswirkungen auf die Gemeinschaft dämpfen soll.

- Ineffizienz durch Isolierung: Die Stärke des Energiesystems liegt im vorhandenen Verbundnetz, das einen Kommunikations- und Energieaustausch zwischen den Zellen ermöglicht, um die Gesamteffizienz zu steigern. Wer sich abkoppelt, entzieht dem System wertvolle Flexibilitätspotenziale, die für den Ausgleich volatiler Erzeugung (z. B. Wind und Sonne) auf überregionaler Ebene zwingend erforderlich sind.

- Verletzung des Subsidiaritätsprinzips: Das ZES folgt dem Subsidiaritätsprinzip: Ausgleich erfolgt vorrangig lokal, aber die Zellen bleiben zur gegenseitigen Unterstützung vernetzt. Eine vollständige Abkapselung würde das System in ineffiziente „Microgrids des 19. Jahrhunderts“ zurückwerfen und die Vorteile der großräumigen Vernetzung ignorieren.

- Ökonomische Schieflage: Investitionen in das Netz werden durch die Gemeinschaft getragen. Wenn sich „starke“ Akteure (finanzstarke Haushalte oder Industriebetriebe) durch Autarkie entziehen, müssen die verbleibenden „schwachen“ Teilnehmer die Kosten für die kritische Infrastruktur allein tragen, was den gesellschaftlichen Zusammenhalt gefährdet.

- Resilienz durch Vernetzung, nicht durch Abschottung: Wirkliche Resilienz entsteht nicht durch Isolierung, sondern durch verteilte Intelligenz und die Fähigkeit, sich im Notfall gegenseitig zu stützen. Getrennte autarke Einheiten können keine Nachbarzellen unterstützen, was die Schwarmregel „Unterstütze benachbarte Zellen“ verletzt und die kollektive Sicherheit schwächt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nur ein integriertes zellulares System – und keine Summe isolierter autarker Einheiten – in der Lage ist, die Komplexität der Energiewende kosteneffizient und krisenfest zu bewältigen.

7. Datenschutz und Informationssicherheit

Informationsaustausch und Datenkommunikation sind ein wichtiges Element der Energiewende. Der sichere Austausch und die sichere Verarbeitung der Daten im Energiesystem ist dabei immanenter Bestandteil der Systemarchitektur. Dabei sind auch die gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben zum Datenschutz und zur Informationssicherheit in der kritischen Infrastruktur umzusetzen und müssen kontinuierlich in die Entwicklung und den Betrieb zellularer Energiesysteme einfließen.

Die vorliegende dezentrale Organisationsstruktur fasst nur eine sehr begrenzte Anzahl von Teilnehmern an einer Stelle zusammen. Jeder Clustermanager agiert nur mit den ihm direkt zugeordneten Managern (Zell- oder Clustermanager). Daraus folgt, dass die Kompromittierung eines Clustermanagers gemäß dem Need-to-know-Prinzip keine Auswirkung auf benachbarte oder übergeordnete Clustermanager hat. Ein Clustermanager verarbeitet alle Informationen aus seinen direkt untergeordneten Systemen (Zell- oder Clustermanager) und kann diese direkt auf Plausibilität prüfen.

Dies geschieht durch eigene Messungen sowohl auf der Seite der untergeordneten Systeme als auch auf Seite der übergeordneten Anbindung. Jeder Clustermanager kennt die nachgelagerte Netztopologie und deren Parameter als digitaler Zwilling und kann daraus den Zustand dieses Netzes transparent darstellen, ohne dass er an allen relevanten Netzpunkten einzelne Messungen durchführt. Der Clustermanager kann auch prüfen, ob die nachgelagerten Systeme auf seine gegebenen Anweisungen wie beabsichtigt reagieren.

Des Weiteren kann der Clustermanager Orchestrierungs- und Steuerungsanweisungen von übergeordneten Clustermanagern auf Grund von direkten Messungen an seinem Netzknoten (z.B. Spannung, Strom, Frequenz) auf Richtigkeit überprüfen.

Daten und Informationen der untergeordneten Teilnehmer, z.B. aus einem Energiemanager, erhebt nur der jeweilig zugeordnete Clustermanager. Von diesem werden Energiedaten nur gebündelt zusammen mit der jeweiligen Auslastung des Netzes an das übergeordnete System weitergegeben. Dadurch wird eine erhebliche Reduktion des Datenvolumens erreicht, da nur gebündelte Daten sowohl vom als auch zum einzelnen Clustermanager weitergegeben werden.

Dadurch ist eine inhärente Sicherheitsarchitektur gegeben, welche ein wesentlich höheres Maß an Resilienz und Sicherheit ermöglicht als rein adaptive Systeme, wie sie derzeit im zentral gesteuerten System vorliegen.

7.1. Datenschutz

Durch den Umbau des Energiesystems und die Nutzung vieler verteilter regenerativer Erzeugungsanlagen ergeben sich umfangreiche datenschutzrechtliche Anforderungen speziell für die Digitalisierung der Energiewende. Insbesondere beim Stromnetz muss mittels Informationsaustauschs eine Regelung zur Steuerung von Erzeugung und Verteilung etabliert werden. Da dies im Grunde für jeden Zeitpunkt gelten soll, ergeben sich durch die umfangreiche Datenerfassung auf unterster Ebene Risiken für die Privatsphäre der Endnutzer.

Diese Risiken können im zellularen Energiesystem deutlich herabskaliert oder stark minimiert werden. Die Bedingungen für die datenschutzrechtlichen Aspekte im zellularen Energiesystem können wie folgt betrachtet werden:

- Der Zellmanager (Energiemanager des Netzanschlussnehmers), der Daten mit teilweise zeitlich dichter Auflösung erfasst, verarbeitet diese Daten ausschließlich innerhalb des eigenen Systems.
- Es gibt keine übergeordnete zentrale Stelle, die Daten aus den einzelnen Zellmanagern erhält. Die einzelnen Systeme der Zell- und Clustermanager agieren völlig autonom und kommunizieren mit fest definierten Gegenstellen.
- Der Zellmanager gibt nur Flexibilitäten, Bedarfe und Überschüsse (als Wert der möglichen Residualleistung) an den Clustermanager weiter. Im übergeordneten Clustermanager (und nur dort) werden die Daten mit den Daten der anderen Zellmanager akkumuliert und nur diese Daten werden weiterverarbeitet.
- Die Zweckbindung für die Verarbeitung der anfallenden Daten kann ausschließlich auf den Betrieb der Energiezelle und auf die Steuerung der Energieflüsse festgelegt werden.
- Die von den Clustermanagern erhaltenen Daten einer darunterliegenden Ebene können im zugeordneten Clustermanager pseudonymisiert verarbeitet werden. Zur Regelung des Ausgleichs benötigter oder erzeugter Energie werden vollständig anonymisierte Daten an benachbarte Zellen oder Zellcluster weitergegeben.
- Es werden keine Nutzungsprofile erstellt. Der volle Umfang der Daten einer Zelle steht nur im Zellmanager zur Verfügung und wird nicht mit Daten aus anderen Zellmanagern verknüpft.

7.2. Informationssicherheit

Die Informationssicherheit erlangt in zellularen Energiesystemen eine sehr große Bedeutung, da die Kommunikationsstrukturen mit der wachsenden Anzahl von einzubindenden Anlagen zunehmend komplexer werden. Dabei sind die Sicherheitsanforderungen von Anfang an zu berücksichtigen, weil sie vielfach nachträglich nicht mehr oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand einzubeziehen sind. Die Architektur der IT- und Kommunikationssysteme und die Systeme selbst müssen so ausgerüstet und verbunden sein, dass ein zellulärer Betrieb möglich ist.

Die Fragen der Informationssicherheit, das heißt die Gewährleistung des Schutzes vor Offenlegung und die Manipulationssicherheit der Systeme (Zell- und Clustermanager, Messsysteme, Gateways, usw.), sind von erheblicher Bedeutung. Der Vorteil des zellularen Energiesystems liegt darin, dass die vorhandene Infrastruktur in einer Zelle nur vom jeweiligen Zellmanager gesteuert wird. Zell- und Clustermanager müssen so gestaltet sein, dass Informationen von außen immer einer Authentizitäts- und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden.

Verbindungen müssen ausreichend gesichert sein und die Vertraulichkeit und Integrität jeglicher Kommunikation im zellularen Energiesystem muss über verschlüsselte Verbindungen und Netzwerke nach Stand der Technik gewährleistet sein. Software-basierte Funktionen in den Systemen sollen jederzeit und nachvollziehbar mit Software-Updates aktualisierbar sein. Die Gestaltung von Backup-Lösungen bezüglich der Systeme und der Daten ist gemäß einem geregelten Prozess umzusetzen.

Die Resilienz eines zellularen Energiesystems auf informationstechnischer Ebene ist hoch und wird durch die Dezentralität der Systeme und durch die räumliche Verteilung der einzelnen Zell- und Clustermanager verstärkt. Die Resilienz dieser Systeme im ZES ergibt sich aus der Logik und dem Organisationsprinzip seiner fraktalen, selbstähnlichen Struktur. Während das heutige System anfällig für Kaskadeneffekte bei zentralen Störungen ist, können Energiezellen im ZES autonom agieren.

Im Falle eines großflächigen Netzausfalls sind geeignete Cluster in der Lage, in den Inselbetrieb überzugehen und die Versorgung lokal aufrechtzuerhalten. Die Stabilität wird dabei durch sogenannte „Schwarmregeln“ gewährleistet: Der lokale Ausgleich innerhalb einer Zelle hat Vorrang, gefolgt von der gegenseitigen Unterstützung benachbarter Zellen, während der Eigenschutz bei kritischen Fehlern die letzte Instanz bildet. Auch die Informationssicherheit ist im Vergleich zu zentralen Systemen höher, da Daten nach dem „Need-to-know“-Prinzip lokal verarbeitet und nur aggregiert weitergegeben werden.

Dies minimiert die potenzielle Angriffsfläche für Cyberattacken, wobei der Aufwand für die Angreifer durch die Menge der verteilten Systeme steigt. Die korrekte Implementierung der Plausibilitätsprüfungen, die die jeweilige Kenntnis der realen Vor-Ort-Gegebenheiten einbezieht, ist ein weiterer Baustein für eine hohe Systemsicherheit.

8. Fazit

Das zellulare Energiesystem als Schlüssel für eine erfolgreiche Energiewende

Das **zellulare Energiesystem (ZES)** stellt einen Wandel in der Organisation und Steuerung der Energieversorgung dar und vereint **Dezentralität, Resilienz, Effizienz und Nachhaltigkeit** in einer skalierbaren und selbstähnlichen Architektur, die sich an den bestehenden Netzstrukturen orientiert und diese gezielt weiterentwickelt. Das zellulare Energiesystem ist für die komplexen Anforderungen der Energiewende mit dezentralen und regionalen Erzeugungs- und Verbraucherstrukturen aktuell ein vielversprechendes Organisations- und Betriebsmodell.

Das zellulare Energiesystem ermöglicht eine flexible, resiliente und effiziente Integration dezentraler erneuerbarer Energien, reduziert den Netzausbaubedarf erheblich und stellt einen entscheidenden Baustein für das Energiesystem der Zukunft dar. Das zellulare Energiesystem steht nicht in Konkurrenz zum aktuellen System, sondern bildet eine Weiterentwicklung des bestehenden Systems.

Lokale Ausgleichsmechanismen innerhalb von Energiezellen sowie deren koordinierte Steuerung und hierarchische Orchestrierung optimieren Energieflüsse und reduzieren die Belastung der Netze. Die enge Kopplung von Energie- und Informationsflüssen ermöglicht dabei die flexible Integration erneuerbarer Energien und von Speichern.

Durch die zellulare Struktur und die an den Knotenpunkten verankerten Manager (Zell- und Clustermanager) wird das Potenzial der Digitalisierung gezielt genutzt und ein skalierbarer, zukunftsorientierter Ansatz zur Integration (auch bereits bestehender) digitaler Komponenten geschaffen. Auf diese Weise entsteht ein resilientes und effizientes Energiesystem, das Flexibilitäten ausschöpft und gleichzeitig den Bedarf an Netzausbau reduziert.

Viele der für den zellularen Ansatz notwendigen Grundlagen werden bereits heute geschaffen – oft ohne, dass sie explizit als Teil eines zellularen Energiesystems verstanden werden. Netzbetreiber bauen zunehmend detaillierte Netzmodelle auf, treiben den Rollout intelligenter Messsysteme voran und digitalisieren Betriebsmittel wie Ortsnetzstationen und Umspannwerken.

Auch bei weiterhin zentral organisierten Steuerungskonzepten sind diese Maßnahmen unverzichtbar, um Transparenz, Regelbarkeit und Effizienz im Netz zu erhöhen. Genau diese digitalen und strukturellen Voraussetzungen bilden zugleich die Basis für einen zellularen Ansatz: Sie ermöglichen es, Netze perspektivisch in klar abgegrenzte, steuerbare Einheiten zu gliedern und lokal zu optimieren. Der zellulare Ansatz setzt somit nicht bei null an, sondern baut konsequent auf bereits laufenden Entwicklungen auf und führt diese in ein skalierbares, dezentrales Gesamtsystem über.

9. Literaturverzeichnis

[1] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, „Energy-Charts," 2026. [Online]. Available: https://www.energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?c=DE. [Zugriff am 05. Juli 2026].

[2] Bundesverband Solarwirtschaft e. V., „Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Speicher/Mobilität)," 2026. [Online]. Available: https://www.solarwirtschaft.de/2026/06/22/batteriespeicher-wachsen-rasant-ausbau-bis-2029-dennoch-unsicher-3/. [Zugriff am 05. Juli 2026].

[3] Bundesnetzagentur, „Ladesäulenkarte," Bundesnetzagentur, [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/Ladesaeulenkarte/start.html. [Zugriff am 05. Juli 2026].

[4] Bundesverband Wärmepumpe e. V., „waermepumpe.de," 2025. [Online]. Available: https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatzzahlen/. [Zugriff am 05. Juli 2026].

[5] Deutsche Energie-Agentur GmbH, „dena-Verteilnetzstudie II," Berlin, 2025.

[6] VDE, „Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende," 12. Juni 2015. [Online]. Available: https://www.vde.com/de/etg/publikationen/studien/vde-studie-der-zellulare-ansatz. [Zugriff am 26. April 2026].

[7] European Comission, „Clean energy for all Europeans package," 2019. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en. [Zugriff am 21. Juli 2026].

[8] „Microgrids," 8 Juni 2010. [Online]. Available: http://microgrids.eu/index.php. [Zugriff am 10. April 2026].

[9] A. E-Energy, „Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Evaluation der sechs Leuchtturmprojekte," 2008-2013. [Online]. Available: https://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AbgeschlosseneProgrammeProjekte/E-Energy/e-energy.html. [Zugriff am 26. Mai 2026].

[10] A. K. D. N. B. Buchholz, „Individual customers" influence on the operation of virtual power plants, 2009.

[11] G. H. A. Kießling, Energie zyklisch denken, Hamburg: tredition, 2014.

[12] Csells(Hrsg.), „Großflächiges Schaufenster im Solarbogen Süddeutschlands," 2015.

[13] F. Peter, M. Wünsch und H. Falkenberg, Dezentralität und zellulare Optimierung – Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf, Berlin und Nürnberg: Prognos, 2016.

[14] Reiner Lemoine Institut (Hrsg.), Vergleich und Optimierung von zentral und dezentral orientierten Ausbaupfaden zu einer Stromversorgung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland, Berlin, 2013.

[15] VDE, „Zellulares Energiesystem – Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen," Mai 2019. [Online]. Available: https://www.vde.com/resource/blob/2316290/f024301232b742f617a60157cb6ca89b/vde-studie-zellulares-energiesystem-data.pdf. [Zugriff am 21. Juli 2026].

[16] S. A. A. Kießling, Methoden und Modelle für Terminologie, Use Case- und Sicherheitsanalyse, Frankfurt, 2021.

[17] Wikipedia, „Automatisierungspyramide," [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Automatisierungspyramide. [Zugriff am 4. Mai 2026].

[18] H. Krause, M. Zdrallek, F. Graf, R. Albus, J. Hüttenrauch, S. Zöllner, H. Schroeder, B. Uhlemeyer, W. Köppel und F. Burmeister, „Zellulare Energienetze (ZellEnNetz)," DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, 2018.

Über die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG)

Die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG) steht für die Entwicklung der Energiesysteme in Deutschland. Sie bündelt die Fachkompetenz von der Erzeugung, Speicherung, Übertragung und Verteilung bis hin zu den vielfältigen Anwendungsfeldern elektrischer Energie und relevanter Querschnittstechnologien. Eingebunden in das fachübergreifende Netzwerk des VDE, ist die ETG eine über die Grenzen hinaus anerkannte und wahrgenommene technisch-wissenschaftliche Vereinigung. Die ehrenamtlichen Expertinnen und Experten schaffen eine gemeinsame Plattform für den Wissensaustausch in Wissenschaft und Wirtschaft, tragen zur Beschleunigung der Energietransformation und zum Verständnis für nachhaltige Energietechnik in der Gesellschaft bei und zeigen Handlungsfelder für die Politik auf. Die ETG verbindet Menschen, Generationen, Start-ups und etablierte Institutionen, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft mit Leistung und Energie.

Mehr Informationen unter www.vde.com/etg

Über den VDE

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 130 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit mehr als 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz.

Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. Im VDE Netzwerk engagieren sich über 2.000 Mitarbeiter*innen an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Expert*innen und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch.

Wir gestalten die e-diale Zukunft.

Sitz des VDE (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e.V.) ist Frankfurt am Main. Mehr Informationen unter www.vde.com

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com