

Mustafa Duman

Konzept einer Messtechnik des Inselbetriebexperiments der Versorgungsbetriebe Bordsesholm

Bericht

Technische Hochschule Köln,
Cologne Institut for Renewable Energy,
10. Oktober 2018

Betreuer: Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt
M. Sc. Silvan Rummeny



**Technology
Arts Sciences
TH Köln**

Erklärungen

Name: Mustafa Duman

Matrikel-Nummer: 11092998

Erklärung zum eigenständigen Verfassen

Hiermit erkläre ich an Eid statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe. Ich habe keine anderen außer den von mir angegeben Quellen und Hilfsmittel verwendet

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Köln, 10. Oktober 2018

Mustafa Duman

Erklärung zur Veröffentlichung

Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit ausgeliehen werden darf. Sie darf von meinem Betreuer im Internet veröffentlicht werden.

Köln, 10. Oktober 2018

Mustafa Duman

Erklärung zu Bildrechten

Außer den im Folgenden genannten habe ich alle Bilder und Diagramme dieser Abschlussarbeit selbst erstellt.

Die folgenden Bilder sind von anderen Autoren übernommen. Die Autoren sind in meiner Arbeit entsprechend genannt. Sie dürfen aufgrund einer öffentlichen Lizenz veröffentlicht werden.

Abbildung 1: Elektrische Energieverteilung in Deutschland

Abbildung 2: Regelzonen mit Übertragungsnetzbetreiber

Abbildung 3: Proportionalität der Frequenz zwischen Erzeugter und verbrauchter Leistung

Abbildung 4: Europäisches Verbundsystem

Abbildung 5: Struktur der Energiezellen

Die Nutzungsrechte der folgenden Bilder sind mir vom Autor der Bilder persönlich/mündlich/schriftlich/per E-Mail erteilt worden:

Abbildung 6: Übergänge zwischen Verbund- und Inselbetrieb eines Teilnetzes

Köln, 10. Oktober 2018

Mustafa Duman

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
1.1 Motivation	6
1.2 Ziel.....	6
2. Grundlagen	7
2.1 Elektrische Energieversorgung.....	7
2.2 Das europäische Verbundsystem.....	10
2.3 Der 5-Stufen Plan	12
2.4 Energiespeicher	13
2.5 Regenerative Energien	15
2.6 Automatisierungs- und Fernwirktechnik im Stromnetz	16
2.7 Systemdienstleistungen	17
3 Lokale Versorgung - Der Zellulare Ansatz	21
3.1 Grundsätze der heutigen Netze.....	21
3.2 Der zellulare Ansatz	22
3.3 Isolierte Stromversorgung mit Erneuerbaren Energien.....	23
3.4 Das Stromnetz der Versorgungsbetriebe Bordesholm	24
4 Inselbetrieb	26
4.1 Handlungspfade inselfähiger Stromnetze.....	26
4.2 Messtechnik des Inselbetriebs	28
4.2.1 Kriterien	28
4.2.2 Ergebnisse	30
5 Diskussion/Fazit	32

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: ELEKTRISCHE ENERGIEVERTEILUNG IN DEUTSCHLAND.....	8
ABBILDUNG 2: REGELZONEN MIT ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER IN DEUTSCHLAND	9
ABBILDUNG 3: PROPORTIONALITÄT DER FREQUENZ ZWISCHEN ERZEUGTER UND VERBRAUCHTER LEISTUNG	10
ABBILDUNG 4: EUROPÄISCHES VERBUNDSYSTEM	11
ABBILDUNG 5: STRUKTUR DER ENERGIEZELLEN	22
ABBILDUNG 6: ÜBERGÄNGE ZWISCHEN VERBUND- UND INSELBETRIEB EINES TEILNETZES	26

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1: DER 5-STUFEN-PLAN.....	12
TABELLE 2:EINTEILUNG DER SPEICHER NACH CHARAKTERISTIKEN	13
TABELLE 3: LISTE DER NETZANALYSATOREN NACH PUNKTEBEWERTUNG	31

1. Einleitung

1.1 Motivation

Zu den zuverlässigen Energiequellen gehören Wind und Sonnenlicht. Diese Energiequellen sind jederzeit auf unserer Erde verfügbar. Der Nachteil ist das diese Quellen über bestimmte Zeiträume durch Wettereinflüsse nicht genutzt werden können. Erneuerbare Energien werden regional und dezentral erzeugt. So profitieren viele Menschen vor Ort von der Wertschöpfung durch die Stromerzeugung. Die Nutzung erneuerbarer Energien ist aktiver Umwelt- und Klimaschutz, da sehr wenige Emissionen entstehen. Das gilt sowohl für Treibhausgase als auch für andere Schadstoffe. Der Stromverbrauch der ganzen Welt könnte durch eine Photovoltaikfläche, die ein Drittel der Sahara in Anspruch nimmt, gedeckt werden. Jedes Jahr liefert die Sonne 135-mal mehr Energie auf die Fläche Deutschlands, als dort verbraucht wird; ein Zehntausendstel der auf die Erde eingestrahlten Sonnenenergie würde den Weltenergiebedarf decken. Erneuerbare Energiesysteme sind dagegen nicht nur umweltfreundlich, sondern bieten ferner auch die Chancen einer größeren Versorgungssicherheit und Energieunabhängigkeit. Zudem stellt die VDE Studie ein ähnliches Thema dar, Energiezellen im Energieverbrauch und -erzeugung auf der niedrigsten möglichen Ebene auszubalancieren. Diese Energiezellen konnten sich im Notfall autark versorgen.

1.2 Ziel

Das Ziel dieses Praxisprojektes ist, ein Konzept der Messtechnik für ein bestehendes autarkes Inselnetz durch erneuerbare Energien zu entwerfen. Die Messtechnik soll unter anderem dazu dienen, dauerhaft die Sicherheit des Netzes zu erhöhen. Es ist eine wesentliche Aufgabe der Messtechnik, technische Vorgänge quantitativ zu erfassen und anhand der gemessenen Größen Funktionsabläufe zu steuern. Bei unserem autarken Inselnetz, bei dem nur über die Messung von Strömen, Spannungen, Leistungen und anderen Größen Aussagen über den momentanen Zustand möglich sind und bei Abweichungen vom Sollwert geeignete Eingriffe in das System erfolgen können. Des Weiteren wird untersucht in welcher Form die Messtechnik in einem Automatisierten Stromsystem zusammenarbeitet. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Analyse von Netzdynamiken bei Schaltvorgängen zwischen Verbund- und Inselnetzbetrieb sowie Analyse des Netzzustandes zwischen Energieversorgung und -verbrauch.

2. Grundlagen

2.1 Elektrische Energieversorgung

Nach dem 19. Jahrhundert nach der Erfindung der Thermodynamik, wurde es möglich elektrische Energie als Quelle für sämtliche Energien zu nutzen. Die Drehstrom Übertragung ist das wichtigste Verfahren der Übertragung elektrischer Energie. In Deutschland wird für die Übertragung und Verteilung vom Dreiphasenwechselstrom eine Frequenz von 50 Hz verwendet.

Verteilnetze bestehen aus mehreren Spannungsebenen. Sie werden durch Höchstspannungsnetze sowie kleine und mittlere Kraftwerke zur Verfügung gestellt:

- Höchstspannung (220 kV oder 380kV)
- Hochspannung (110 kV)
- Mittelspannung (bis 50 kV)
- Niederspannung

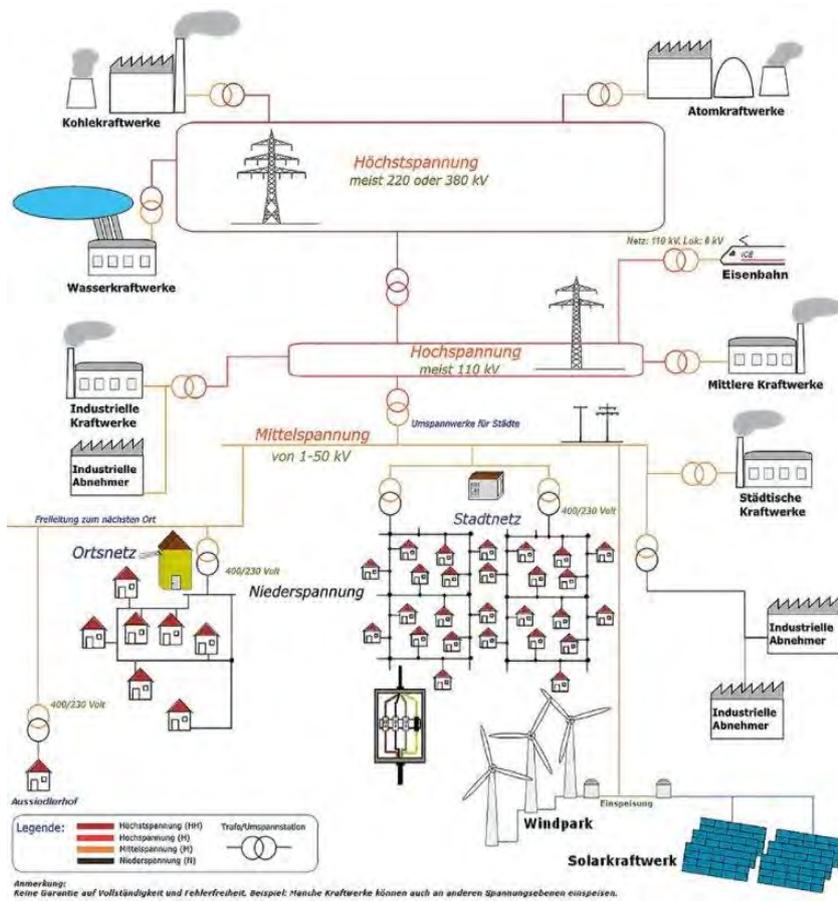


Abbildung 1: Elektrische Energieverteilung in Deutschland

Quelle: <https://www.geilenkirchen.de/klimaschutz-und-energie-sparen/informationen-zum-klimaschutz/oekostrom/stromverteilung/>

Die Stromerzeugung stammt aus großen Atom- und Kohlekraftwerken, sowie von Offshore-Anlagen. Diese speisen die Höchstspannung in das Netz ein. Dies wird vom Übertragungsnetz landesweit an Leistungstransformatoren übertragen. Von den Leistungstransformatoren transformierte Spannung ist das Hochspannungsnetz mit 110 kV. Hier wird die Spannung an große Industriebetriebe oder Ballungszentren zu deren Umspannwerken verteilt. Am mittelspannungsnetz sind Trafostationen und kleinere Industriebetriebe, sowie größere Einrichtungen z.B. Krankenhäuser oder Fabriken angebunden. Das Niederspannungsnetz versorgt die kleineren Verbraucher z.B. Private Haushalte, kleinere Industriebetriebe oder Gewerbe. Zum Einspeisen in das Niederspannungsnetz bei Überschussleistung, werden Photovoltaikanlagen verwendet.

Der größte Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland ist die TenneT TSO GmbH. Dazu gehören die Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hessen und Bayern. Darauf folgt die 50 Hertz Transmission GmbH für die östliche Seite des Landes (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen). Der Westliche Teil des Landes wird von der Amprion GmbH versorgt (NRW, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarbrücken). Den gesamten Baden- Württembergischen Teil übernimmt die TransnetBW GmbH.



Abbildung 2: Regelzonen mit Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland

Quelle:

https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Regelzonen_mit_%C3%9Cbertragung_snetzbetreiber_in_Deutschland.png

2.2 Das europäische Verbundsystem

Das europäische Verbundsystem besteht aus mehreren Verbundnetzen Europas. Es ermöglicht den Stromaustausch zwischen 23 Ländern auf dem Festland. In Europa existieren aufgrund der räumlichen Aufteilung mehrere voneinander getrennte Verbundsysteme, jedoch sind im Allgemeinen die Länder einbezogen, welche zum ehemalige UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) gehören. Das Stromnetz ist mit 220kV und 400 kV in Form von Drehstrom- Hochspannungs-Übertragung verteilt, bestehend aus Hoch- und Höchstspannungsleitungen. Das System hat den Vorteil, dass Schwankungen im Netz besser ausgeglichen werden können. Schwankungen können zwischen dem Verhältnis der Erzeugung und dem Verbrauch entstehen. Die Frequenz ist ein wichtiger Bestandteil zwischen der elektrischen Energieerzeugung und Verbrauch, wie es auf der folgenden Abbildung zu sehen ist:

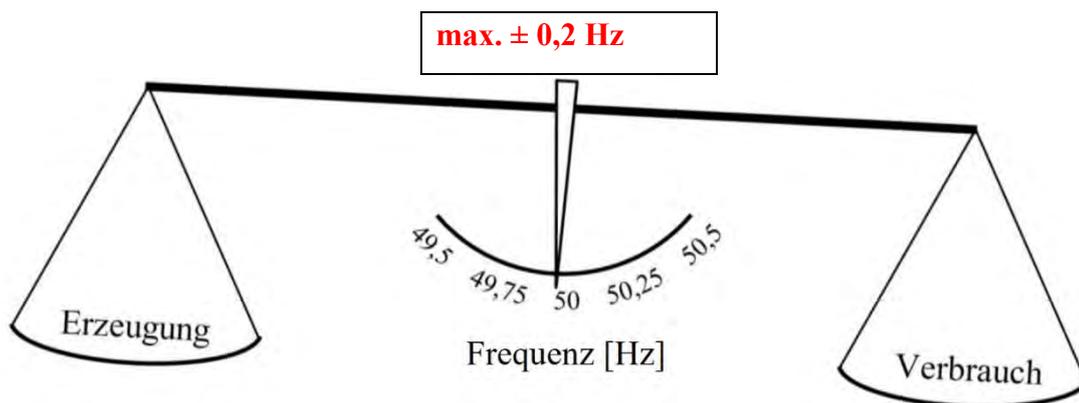


Abbildung 3: Proportionalität der Frequenz zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung

Quelle: Fassbender Silvan, Masterarbeit 2016

Im europäischen Verbundnetz beträgt die Frequenz im ausgeglichenen Zustand 50 Hz. Wird die Erzeugung höher als der Verbrauch, steigt die Frequenz. Ist sie jedoch geringer als der Verbrauch, fällt die Frequenz ab. Ein wichtiger Aspekt ist das die Frequenz innerhalb des Toleranzbereiches von max. $\pm 0,2$ Hz eingehalten werden muss.

Der Verbundbetrieb erhöht die Betriebssicherheit, sodass die Reservehaltung jedes einzelnen Kraftwerkes beschränkt werden kann. Weiter wird durch die örtlich unterschiedlichen Lebensgewohnheiten der Menschen und verschiedenartige Industrien ein natürlicher Ausgleich der Verbraucherschwankungen, d.h. eine Vergleichmäßigung der gemeinsamen Tagesbelastungskurve, erreicht. So würde z.B. eine Kupplung mehrerer nationaler Netze in Ost-West-Richtung schon durch die tageszeitlichen Verschiebungen einen Belastungsausgleich begünstigen. Laufwasserkraftwerke können ohne Rücksicht auf den regionalen Bedarf Grundlast in das Verbundnetz liefern und somit optimal genutzt werden. Jahreszeitliche Schwankungen in der Wasserdarbietung spielen dann praktisch keine Rolle mehr. (Rene Flosdorff, 2005)

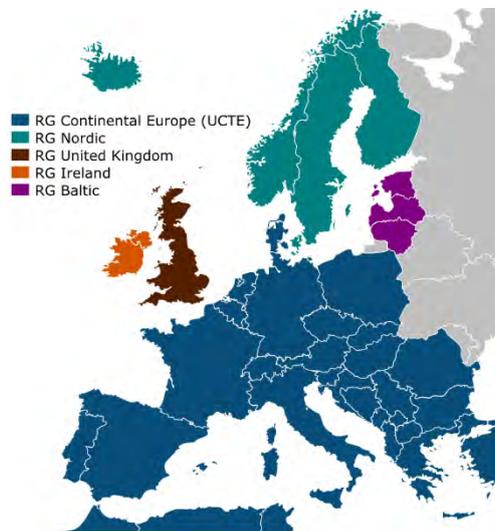


Abbildung 4: Europäisches Verbundsystem

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Europ%C3%A4isches_Verbundsystem

Das deutsche Stromnetz ist mit dem Verbundsystem der ehem. UCTE (kontinentaleuropa) elektrisch gekoppelt. Zu dem europäischen Verbundsystem gehören das kontinentaleuropäische (TG Continental Europe, blau), skandinavische (TG Nordic, grün), irische (RG Ireland, orange) und das baltische Verbundsystem (RG Baltic, violett).

„Die elektrische Kopplung mit dem kontinentaleuropäischen Verbundnetz macht die Netzfrequenz sehr träge und sicherer gegenüber Lastsprüngen. Eine durchschnittliche Netzstatik von 19.500 MW/Hz ermöglicht, dass das kontinentaleuropäische Stromversorgungssystem zu den sichersten auf der Welt zählt.“ (Fassbender, 2016)

2.3 Der 5-Stufen Plan

In Europa und somit auch in Deutschland beträgt die Soll-Netzfrequenz 50 Hz für das Drehstromnetz. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) erkennt man, dass wenn der Verbrauch höher als die erzeugte Leistung ist, die Netzfrequenz fällt. Diese fallende Netzfrequenz wird auch als Unterfrequenz bezeichnet. Es kann es bei einer sprunghaften Lastzunahme oder bei einem plötzlichen Ausfall einer Kraftwerksleistung, zu einer Unterfrequenz kommen.

Um einen Netzzusammenbruch durch Unterfrequenz zu vermeiden gibt es in Deutschland den 5-Stufen-Plan:

Tabelle 1: Der 5-Stufen-Plan

Quelle: https://www.sanitaerjournal.de/dunkelflaute-hitzevlaute-und-lastabwurf_11647

Stufe 1:	49,8 Hz	Alarmierung des Personals und Einsatz der noch nicht mobilisierten Erzeugungsleistung auf Anweisung des ÜNB, Abwurf von Pumpen.
Stufe 2:	49,0 Hz	Unverzögerter Lastabwurf von 10 - 15 % der Netzlast.
Stufe 3:	48,7 Hz	Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 10 - 15 % der Netzlast.
Stufe 4:	48,4 Hz	Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 15 - 20 % der Netzlast.
Stufe 5:	47,5 Hz	Abtrennen aller Erzeugungsanlagen vom Netz.

Es werden für die Stufen 2 bis 4 elektronische Frequenzrelais benötigt, um einen automatischen Lastabwurf zu gewährleisten. Beim Erreichen einer Frequenz ab 47,5 Hz müssen sich alle Kraftwerke vom Netz trennen. Ist es nicht der Fall, hat man die Folge, dass das gesamte Versorgungsnetz zusammenbricht. Bei größeren Kraftwerken wird versucht, die Leistung im Eigenbedarf zu reduzieren, um das Versorgungsnetz für einige Stunden aufrecht zu erhalten. Wenn das Auffangen und Halten des Netzes nicht gelingt, werden die betroffenen Kraftwerksblöcke abgeschaltet. Dies führt zu einer längeren Zeit der Wiederinbetriebnahme.

2.4 Energiespeicher

Als Energiespeicher wird werden drei Arten von Speicher unterschieden:

- Leistungsspeicher
- Verschiebespeicher
- Saisonale Speicher

Leistungs- und Verschiebespeicher gehören zu den Kurzzeitspeichern, wohingegen saisonale Speicher zu den Langzeitspeichern gehören. In dem heutigen elektrischen Netz stehen Leistungsspeicher für Regelleistung sowie Systemdienstleistungen oder in Anwendungen wie Fahrzeugen zur Energieeinsparung (beispielsweise regeneratives Bremsen). Dies sind in der Regel Schwungradspeicher oder Kondensatoren sowie Batterien, welche viele Zyklen pro Tag erreichen. In dem elektrischen Inselnetzbetrieb in Bordsesholm kommen Batterien zum Einsatz, die auch als Verschiebespeicher bezeichnet werden.

Tabelle 2: Einteilung der Speicher nach Charakteristiken
Quelle: VDE Studie- Der zellulare Ansatz

	Kurzzeitspeicher		Langzeitspeicher
	Leistungsspeicher	Verschiebespeicher	Saisonale Speicher
Zeitraum	ms ... min	min ... h ... d	d ... Wochen
Anwendung	Regelleistung Systemdienstleistung	Ausgleich innerhalb eines Tages	langfristige Flauten saisonale Differenzen
technische Merkmale	großes Verhältnis von Leistung zu Speicherkapazität	geringe Be- und Ent- ladeverluste	sehr große Speicherkapazität
Selbstentladung	hoch	gering	sehr gering
Zyklen	viele pro Tag	wenige pro Tag	wenige pro Jahr
Beispiele	Schwungradspeicher Kondensatoren Batterien	Batterien Druckluftspeicher Pumpspeicherwerke	chemische Speicher (Wasserstoff/Methan)

Verschiebespeicher sollen die Energiebilanz während eines Tages ausgleichen. Eine geringe Selbstentladung ist zulässig, wohingegen die Be- und Entladeverluste möglichst geringgehalten werden sollten. Die Verschiebespeicher durchlaufen wenige Zyklen pro Tag.

Die Langzeitspeicher, welche auch als saisonale Speicher bezeichnet werden, müssen langfristige Flauten und saisonale Differenzen bei Energiebereitstellung und Energieverbrauch ausgleichen. Daher ist eine sehr geringe Selbstentladung von Bedeutung.

Diese Arten von Speicher haben häufig Elektrizität als Bezugs- und Zielenergie. Die Energieform des Speichers an sich ist jedoch meist abweichend eine andere Energieform, beispielsweise chemische Energie bei Batterien, potenzielle Energie bei Pumpspeicherwerken oder Rotationsenergie bzw. kinetische Energie bei Schwungradspeichern.

Die Wirkungsgrade für diese Speicher liegen zwischen 70 und 95%. Wichtig ist jedoch auch die Selbstentladung zu beachten. Die Selbstentladung wird in Prozent des gesamten Speichervermögens je Zeiteinheit angegeben und beschreibt den Verlust an nutzbarer Energie. Bei Schwungradspeichern beispielsweise sind die Reibungsverluste so groß, dass die Selbstentladung 5% bis 15% der gespeicherten Energie pro Stunde beträgt. Bei Doppelschicht-Kondensatoren kommt es aufgrund von Leckströmen zu Selbstentladungsraten mit 10% bis 20% pro Tag. Bei Batterien ist die Selbstentladung mit wenigen Prozent pro Monat im Vergleich sehr gering. Jedoch ist die Selbstentladung bei Batterien stark temperaturabhängig. Insbesondere hohe Temperaturen führen zu einer wesentlichen Erhöhung der Selbstentladung.

In dem Projekt des Inelbetriebes kommt die Lithium-Ionen-Batterie zum Einsatz. Bei einem Beim Nutzen eines Umrichters liegt der Wirkungsgrad bei 99%, wobei das Laden und Entladen 97 % erreicht. Im Gesamtwirkungsgrad erreicht die Batterie 92%. (VDE-Studie, 2015)

2.5 Regenerative Energien

Unter regenerativen Energien versteht man eine Umwandlung aus einer Umweltenergie in eine Sekundärenergie. Umweltenergie ist z.B. die kinetische Energie von Wind und Wasser oder eine elektromagnetische Strahlung der Sonne. Sekundärenergie ist z.B. Elektrizität oder Wasserstoff.

Die elektrische Energiebereitstellung kann durch:

- Offshore-Windenergieanlagen,
- Onshore-Windenergieanlagen,
- Photovoltaik-Anlagen,
- Biomassekraftwerke und
- Wasserkraftwerke

erfolgen.

Die Energiebereitstellung dieser Technologien ist zum größten Teil abhängig von Tag und Jahreszeiten sowie Wetterlagen.

Der größte Teil der regenerativen Energie für das Inselnetzbetrieb Bordesholm wird von zwei Biogaskraftwerken bereitgestellt. Die Stromerzeugung aus Biogas erfolgt auf dem Weg der Kraft-Wärme-Kopplung. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung treibt ein mit Biogas befeuertes Aggregat einen Generator an, die elektrische Energie erzeugt. Ein Teil der erzeugten Energie wird in Wärme umgewandelt, wobei es aus ökologischen und wirtschaftlichen Gründen neben der Stromerzeugung auch eine effektive Wärmenutzung anzustreben ist. Ein Biogaskraftwerk kann eine Leistung von 4 GW umsetzen.

2.6 Automatisierungs- und Fernwirktechnik im Stromnetz

Vor einigen Jahren war es schwer dezentrale Stationen zu überwachen und zu warten. Zu dieser Zeit konnten die entfernten Anlagen nicht oder nur mit hohem Aufwand mit einer Zentrale kommunizieren, da der Stand der Technik nicht ausreichte.

Heutzutage müssen sämtliche Gewerke in der Ver- und Entsorgungstechnik, zum Beispiel Wasser-, Gas- oder Energieversorgung, Pipelines oder auch Verkehrstechnikapplikationen, an ein zentrales Leitsystem angebunden werden. Somit werden kleinere Gewerke wie Pumpwerke, Trafo- oder Umspannstationen aus der Ferne überwacht und gesteuert.

Die Fernwirktechnik gilt mittlerweile als Standard in unserem System. Außenstationen oder Anlagen, die sich in der Ferne befinden, lassen sich problemlos auf unterschiedlichsten Übertragungswegen mit der Leitzentrale verbinden. Die festgelegten und genormten Protokolle erleichtern dabei eine standardisierte Übertragung. Durch diese Technik ist es möglich geworden, eine vorausschauende Instandhaltung sowie enorme Einsparungen von Kosten zu erreichen.

Mit der Automatisierungs- und Fernwirktechnik hat man die Möglichkeit, jederzeit auf alle Parameter der Unterstationen des Stromnetzes einzugreifen. Die Zustände der Anlagen werden in einer Leitzentrale angezeigt. Alle notwendigen Dokumentationen können über einen langen Zeitraum im System zentral gespeichert werden. Durch spezielle Protokolle lassen Prozessdaten sicher über die Weitbereichsnetze übertragen. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass eine niedrige Bandbreite oder eine schlechte Übertragungsqualität keinen Einfluss darauf haben.

„Fernwirktechnik beschreibt die Fernüberwachung und Steuerung räumlich getrennter Anlagenteile mittels Datenübertragung. Messwerte und Steuerbefehle werden über große Entfernungen übertragen und in einer zentralen Leitstelle visualisiert, verarbeitet und gespeichert. Im Gegensatz zur Fernwartung ist beim Fernwirken überwiegend eine dauerhafte Verbindung zu einer abgelegenen Station gefordert.“ (Wedekind)

2.7 Systemdienstleistungen

Systemdienstleistungen sind für einen sicheren und zuverlässigen Stromsystem notwendig. Dies wird durch den Netzbetreiber erbracht, welcher verschiedene Quellen nutzt, (z.B. Erzeugungsanlagen) um Überlastungen zu vermeiden und eine Optimierung in einzelnen Netzbereichen und Betriebsmittel zu erreichen.

Eine hohe Versorgungsqualität wird gewährleistet in dem der Netzbetreiber mit verschiedenen Maßnahmen dafür sorgt, dass Spannung, Frequenz und Belastung in einem zulässigen Grenzbereich gehalten werden.

Gesetzlicher, regulatorischer Rahmen

Nach § 13 des Energiewirtschaftsgesetzes sind die Übertragungsnetzbetreiber für das Stromsystem verantwortlich. Dazu gehört auch die Sicherstellung des Leistungsgleichgewichtes bei Abweichungen des Bilanzkreises. Das Energiewirtschaftsgesetz schreibt vor, dass auch die Einhaltung der Spannungswertgrenze und Belastung der Betriebsmittel durch den Netzbetreiber in seinem betrieblich geführten Netzbereich sichergestellt werden.

Zur Sicherung der Systemverantwortung legt das EnWG fest, dass zu aller erst eine netzbezogene und daraufhin eine marktbezogene Maßnahme durchgeführt werden muss. Netzbezogene Maßnahmen sind im Besonderen auf die Netzschtaltung bezogen und hingegen hierzu gehören zu den marktbezogenen Maßnahmen die Einsätze von Regelenergie,- zu- und abschaltbare Lasten, Engpassmanagement und Mobilisierung zusätzlicher Reserven.

§14 des EnWG sind Verteilnetzbetreiber die direkt angeschlossen oder nachverlagert sind dafür verantwortlich den Übertragungsnetzbetreiber mittels eigener Maßnahmen zu unterstützen dabei müssen dem Netzbetreiber alle notwendigen Informationen zur Verfügung gestellt werden um den Systemstand zu bewerten.

Frequenzhaltung:

Die Standardfrequenz im europäischen Verbundnetz beträgt 50Hz. Um die Frequenz stabil zu halten muss die Balance zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch zu jedem Zeitpunkt in gehalten werden. Dasselbe gilt auch bei einer sprunghaften Änderung des Verbrauches sowie bei unerwartetem Ausfall des Kraftwerks. Der Übertragungsnetzbetreiber ist für die Frequenzhaltung des Gesamtsystem verantwortlich. Weitere Maßnahmen zur Frequenzhaltung

sind Momentanreserven, Regelleistungen, Steuerbare Lasten, Wirkleistungsreduktionen, Lastabwürfe und vertraglich vereinbarte Lasten flexibel zu- oder abzuschalten und bei Über- oder Unterfrequenz die Wirkleistungseinspeisung Erneuerbarer Energie- oder Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zu regeln.

Zukünftige Herausforderung entstehen dadurch, dass die Erneuerbaren Energien ihren Strom anders als konventionelle Kraftwerke über Wechselrichter ins Netz einspeisen. Daher tragen sie derzeit nicht zur Bereitstellung von Momentanreserven bei. Um zukünftig zur Momentanreserve zurückgreifen zu können, müssen alternative Bereitstellungsarten im Verbundnetz gefunden werden.

Spannungshaltung:

Auch die Spannungshaltung ist für einen sicheren und stabilen Netzbetrieb wichtig. Die Spannung im Netz ist von Ort zu Ort unterschiedlich und abhängig von der aktuellen Netzsituation wie z.B. Einspeisung und Verbrauch. Voraussetzung hierzu ist eine Stabilität bei schnellen Änderungen des Zustandes, das sichere Funktionieren von Schutzgeräten sowie die Beschränkung der Fehler auf den Fehlerort. Zur Sicherstellung einer hohen Spannungsqualität wird die Spannung mit verschiedenen Mitteln im Spannungsband von $\pm 10\%$ der Nennspannung beim Letztverbraucher gehalten. Bei zu schnellen Zustandsänderungen ist eine Kurzschlussleitung ausreichend um dieses weiterhin stabil zu erhalten. Hierfür liegt die Verantwortung bei dem zuständigen Netzbetreiber, der wiederum die Vorgaben des ihm vorgelagerten Betreibers einhalten muss. Zu lange Kabelstrecken verursachen einen Spannungsabfall. Erzeugungsanlagen tragen in Ortsnetzen bei Einspeisung zur Erhöhung bei. Seit 2011 müssen Erzeugungsanlagen einen Teil der Leistung als Blindleistung einspeisen damit die Spannungsgrenze nicht überschritten wird. Den größten Beitrag zur Spannungshaltung liefern bisher konventionelle Kraftwerke, Netzbetriebsmittel wie Kompensationsanlagen und zum Teil bereits Erneuerbare-Energien-Anlagen. Auch hier sind mit zukünftigen Herausforderungen durch die zunehmende volatile Einspeisung erneuerbarer Energien im Verteilnetz im Zusammenspiel mit steigenden Verkabelungsgrad zu rechnen, da dieser den Bedarf an der gezielten Spannungsregelung erhöht. Sowohl im Verteil- als auch Übertragungsnetz sind spezielle Maßnahmen zur Blindleistungsbereitstellung als Instrument zur Spannungshaltung nötig. Auch durch den Rückgang der Kraftwerke werden alternative Blindleistungslösungen erforderlich. Durch erneuerbare Energieanlagen sowie Installation von Kompensationsanlagen, Umrichterstationen der

Hochspannungsgleichstromübertragungstrassen (HGÜ), Phasenschieberbetrieb stillgelegter/neuer Kraftwerke und Netzsicherheitsmanagementmaßnahmen können aus heutiger Sicht alternativen geschaffen werden.

Betriebsführung:

Die Steuerung und Überwachung hinsichtlich der Grenzwertverletzungen ist die Aufgabe des Netzbetreibers im Zuge der Betriebsführung mit allen angeschlossenen Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten. Für den Regelleistungseinsatz, die Spannungshaltung und das Engpassmanagement im Übertragungsnetz sowie die Abstimmung des Wiederaufbaus nach Störfällen ist der Übertragungsnetzbetreiber verantwortlich. Bei einer Betriebsführung kann man bei den Punkten Netzanalyse, Engpassmanagement, Einspeisemanagement sowie Netzebenen übergreifende Koordination von Schwerpunkten ausgehen. Die zukünftige Herausforderung besteht aus dem zunehmenden, auch überregionalen Austausch im europäischen Strommarkt welches die Anforderungen auf allen Spannungsebenen erhöht. Die steigende Anzahl dezentraler Anlagen zieht eine Steigerung der Kommunikations- und Steuerungsbedarfes an. Das intelligente Messsystem dessen Einbau verpflichtend ist, soll in Zukunft dazu verwendet werden, die Steuerung von Einspeisung und last auch im Niederspannungsbereich hinsichtlich netzdienlicher und netzkritischer Funktion zu ermöglichen somit kann der Netzausbaubedarf optimiert werden. In der Zukunft werden massenhafte Anlagen über ein intelligentes Messsystem angesteuert. Eine große Herausforderung dabei ist, dass im Gegensatz zu früher nicht mehrere hunderte Anlagen eine Rolle spielen, sondern bereits heute über 1,5 mio. Damit dieses ermöglicht werden kann ist eine Verfügbarkeit einer standardisierten Informations- und Kommunikationsstruktur notwendig.

Versorgungswiederaufbau:

Nach einem großflächigen Stromausfall ist es besonders wichtig, schnell und nach festgelegtem Prozess die Versorgung mit elektrischer Energie wiederaufzubauen. Eine erhebliche Rolle tragen dabei die schwarzstartfähigen Kraftwerke, die unabhängig von einer bestehenden Stromversorgung starten können (z.B. Laufwasser- oder Pumpspeicherkraftwerke). Damit die Erzeugungsanlagen an der Niederspannung einspeisen können, benötigen sie derzeit noch eine Netzspannung.

Durch die Zuschaltung der Erzeugungsanlagen und der Verbraucher entstehen die sogenannten Inselnetze, wonach der Wiederaufbau des Gesamtnetzes erfolgt. Zukünftig wird die Herausforderung sein, dass im Falle eines großflächigen Stromausfalles das Konzept des zentralen Versorgungswiederaufbaus angewandt wird. Hierfür müssen weiterhin Pumpspeicher- und Gaskraftwerke (schwarzstartfähig) zur Verfügung stehen. Bei der Durchführung des Netzaufbaus und der Zuschaltung neuer Netzbereiche sind die Wetterbedingungen einzurechnen, um einen Überblick über die Erzeugungskapazität zu erlangen. Zur Steuerung fluktuierender Erzeugungsleistung während des Netzwiederaufbaus sind Instrumente zwingend notwendig. Die wichtigste Basis ist die Erschließung über standardisierte Informations- und Kommunikationstechnologien.

3 Lokale Versorgung - Der Zellulare Ansatz

3.1 Grundsätze der heutigen Netze

Hier werden die wesentlichen Grundsätze zusammengestellt, die für die Planung und den Betrieb der bestehenden elektrischen Netze in Frage kommen.

Einer der wichtigsten Punkte ist das Einhalten der Netzfrequenz von 50 Hz, welches im Kapitel „Der 5-Stufen-Plan“ beschrieben ist.

Zudem werden auf allen Spannungsebenen, von der Höchst bis zur Niederspannung, die jeweilige Nennspannung in engen Grenzen zu halten. Alle Geräte müssen eine vorgegebene Toleranz aushalten, ohne dass Funktionseinschränkungen hervorgerufen werden. Besonders bei Überspannungen besteht die Gefahr, dass die Geräte zerstört werden. Zumindest kann die Lebensdauer der betroffenen Anlagen und Betriebsmitteln verkürzt werden. Bei Unterspannung können Funktionseinschränkungen verursacht werden.

Ebenso gilt die Einhaltung der Spannungsqualität. Das Einhalten der Spannungsqualität beschreibt die Übereinstimmung von Nennwerten der Netzspannung mit den aktuellen Größen. Hierzu gehören die Kurvenform, Oberschwingungen, Störungen und die bereits Beschriebenen Parameter Frequenz und Spannungshöhe.

Ein weiterer Aspekt ist die Versorgungszuverlässigkeit. Die Versorgungszuverlässigkeit wird durch das zusammenschalten der Verbund und Verteilnetze ermöglicht. Das (n-1) -Planungs- und Betriebskriterium trägt hierzu bei. Ein Beispiel sind hierzu Krankenhäuser, Rechenzentren oder Verkehrssteuerungen, die jeweils über eine Notstromversorgung verfügen. Die heutige Versorgungssicherheit der Endverbraucher in Deutschland ist im internationalen Vergleich sehr hoch.

Als nächstes wird die Netzstabilität vorgenommen. Durch die Kraftwerke mit großen drehenden Massen in Form von angeschlossenen Generatoren-Turbinen-Einheiten ist es möglich, in einem hohen Maße zur Kurzzeitstabilität der Netze beizutragen. Diese Momentanreserve können bedingt auch Erzeugungseinrichtungen zur Verfügung stellen, die über Leistungselektronik an die Netze angebunden sind. Zu Anfangszeiten der Elektrisierung wurde teilweise sehr häufig über den Einsatz von Gleich- und Wechselspannung diskutiert. Im Laufe der Zeit hat sich der durchgängige Einsatz von Wechselspannung durchgesetzt.

3.2 Der zellulare Ansatz

Die VDE Studie beschäftigt sich mit der Autarken Versorgung in Verbindung mit der lokalen Versorgung und überregionalem Energieausgleich. Eine Energiezelle besteht aus einzelnen Verbrauchern (Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistung und Industrie). In der Abbildung ist eine Struktur nach dem Bienenwabennetz zu erkennen. Hier soll verdeutlicht werden, dass mehrere Zellen in einer Ebene sich auf der nächsthöheren Ebene wieder als eine einzelne Zelle abbilden. (Verbraucher (lila) □□ Gemeinden (grün) □□ Kreise (rot) □□ Länder (blau)).

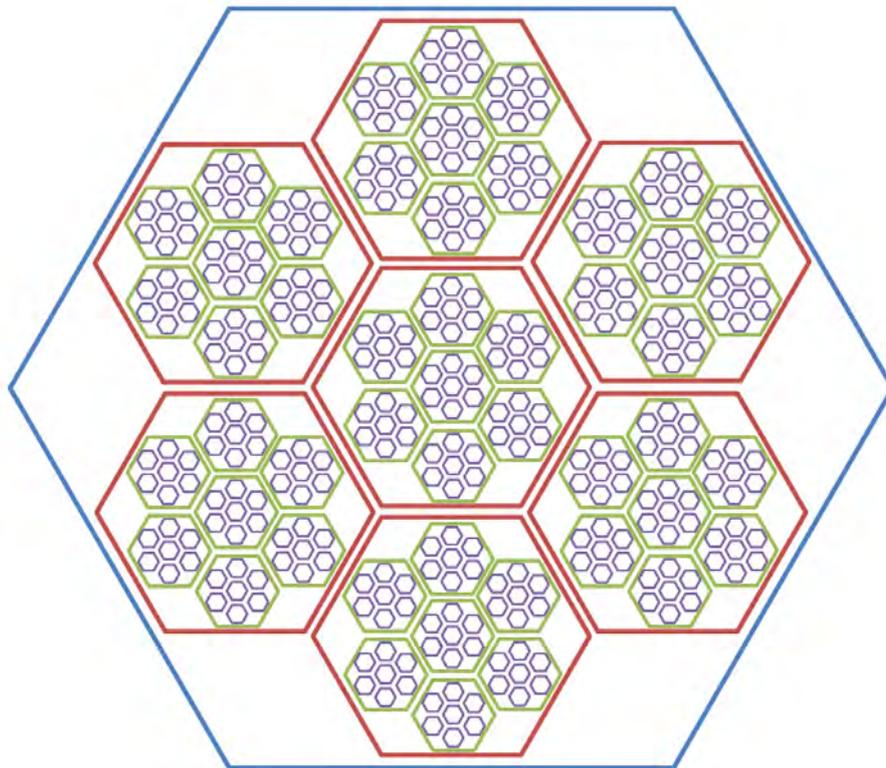


Abbildung 5: Struktur der Energiezellen
Quelle: Fassbender Silvan, Masterarbeit 2016 (öffentliche Version)

Als kleinste Energiezelle wird ein Haus betrachtet. Diese Energiezellen können selbst Energie durch WEA oder PV- Anlagen erzeugen. Energie, die im Überschuss produziert wird, kann in Batterien gespeichert oder auch ins Stromnetz eingespeist werden (innerhalb der lila Zellen). Die Erzeugungüberschüsse und -defizite werden in Energiezellen der gleichen Gruppe ausgetauscht bis eine autarke Versorgung hergestellt ist (innerhalb der grünen, roten und blauen Zellen). Die Energiezelle des Autarken Notbetriebes benötigt immer eine regelbare Leistungskapazität, um Unter und Überfrequenzen ausgleichen zu können.

Jede der Energiezellen muss in der Lage sein, folgende Aktionen durchzuführen:

- **Schalten in den Inselbetrieb**
 - Die Energieversorgung vom Verbundnetz wird vollständig durch einen Synchronkuppelschalter getrennt. Somit kann es in den isolierten Netzzustand übergehen.
- **Regelung des isolierten Zustandes**
 - Hier muss die Balance zwischen Stromerzeugung und Verbrauch gehalten werden um eine Überlastung zu vermeiden. Dazu müssen dauerhaft der Effektivwerte des isolierten Netzzustandes gemessen werden.
- **Rücksynchronisierung in den Verbundbetrieb**
 - In diesem Vorgang wird die Messung für die Dauer der Synchronisierung und Schalthandlung durchgeführt. Um eine Rucksynchronisation zu ermöglichen, müssen die Frequenzen des vorgelagerten Netzes und des Inselnetzes zueinander angepasst werden. Zu diesem Zeitpunkt werden ebenfalls die transienten Überspannungen gemessen.

Bei einem vollständigen Stromausfall müssen schwarzstartfähige Energiezellen eingesetzt werden, um selbstständig die Energieversorgung wiederaufzubauen. Erzeuger wie Biogasanlagen, PV Anlagen mit Wechselrichtern und große Batteriespeicher können einen Schwarzstart durchführen.

In der Studie untersuchten Gebiete stellen eine Weiterentwicklung der dezentralen Energieerzeugung dar. Das neue Grundprinzip für die Energieversorgung der Zukunft, die Erzeugung und den Verbrauch von Energie auf der niedrigsten möglichen Ebene auszubalancieren, bietet eine maximale Effizienz und Versorgungssicherheit. Gleichzeitig wird der nötige Netzausbau somit minimiert.

3.3 Isolierte Stromversorgung mit Erneuerbaren Energien

In wichtige Einrichtungen z.B. Krankenhäuser, wo Operationen um Leben und Tod entscheiden oder in Industrien der sichere Umgang mit Gefahrstoffen gewährleistet sein muss, werden in der Regel mit Notstromaggregaten (meist Dieselgeneratoren) versorgt.

Erneuerbare Energien tragen auch zu anderen Großprojekten bei. Das zeigt das Projekt „Brooklyn Microgrid“, wo man versucht ein städtisches Gebiet im Stadtteil von New York mit einem Mikronetz bei Stromausfall autark zu betreiben. Das Gebiet trägt es des Öfteren Stromausfällen bei, da es im Winter zu extremen Wetterlagen, wie Wirbelstürmen kommt. In solchen Situationen müssen in erster Linie wichtige Einrichtungen und Notunterkünfte wie Schulen, Universitäten, Feuerwehr- und Polizeistationen und Krankenhäuser zu versorgen. Im späteren Ablauf sollen Wohn- und Hilfseinrichtungen vernetzt werden. Es wird sich unter anderem auch darauf konzentriert, dass die Nutzung von PV-Anlagen, Batteriespeichern, Lastmanagement und energieeffiziente Technik bewirkt wird. Durch Dieselgeneratoren und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen wird ein Schwarzstart somit möglich gemacht. Der Vorteil besteht darin, dass durch das isolierte Netz, elektrische Energie lokal erzeugt und verbraucht werden kann. Es ist nicht mehr notwendig durch zentrale Kraftwerke, den über weite Strecken transportierten Strom zu erhalten. Da die Solar- und Windkraftanlagen stark von der Wetterlage beeinflusst werden, benötigt man Flexibilitätstechnologien.

3.4 Das Stromnetz der Versorgungsbetriebe Bordesholm

Die Versorgungsbetriebe Bordesholm ist ein Energieversorgungsunternehmen in Schleswig-Holstein, die sich für umweltfreundlich Technologien engagiert. Das Mittelspannungsnetz ist ein Teil des Stromnetzes, dass zur Verteilung der elektrischen Energie auf mehreren Kilometer auf ländlichen Bereichen realisiert. Der Spannungsbereich liegt bei einer Hochspannung von 10 kV, 20 kV oder 30 kV. Ein Mittelspannungsnetz umfasst das Stromnetz einer Region, mehrere Ortschaften oder einen Stadtteil. Das Netz besteht aus einem 20 kV Verteilnetz. Es verteilen 43 Ortsnetzstationen elektrische Energie an die untergeordneten Niederspannungsnetzte zu den Verbrauchern. Zur Einspeisung dienen auf der Niederspannungsebene dezentrale Energieerzeuger wie PV-Anlagen sowie auf der Mittelspannungsebene Biogasanlagen. Das besondere an der Netzstruktur ist, dass ein Umspannwerk die Mittelspannungsebene der Versorgungsbetriebe Bordesholm mit dem 110 kV Verteilnetz der Übertragungsnetzbetreiber TenneT verbindet. Somit hat man den Vorteil, das Mittelspannungsnetz vollständig vom Übertragungsnetzbetreiber zu trennen und im isolierten Netzzustand selbstständig zu versorgen. Die Versorgungsbetriebe Beordesholm investieren u.a. seit einigen Jahren auch auf die Informations- und Kommunikationstechnik auf

Basis von Glasfaserkabeln. Das bietet neben dem High-Speed-Internet die Möglichkeit eine engmaschige Datenkommunikation und -steuerung von dezentralen Energiemanagementsystemen.

Seit dem Sommer 2016 ist das Projekt gestartet, das zum Ziel führen soll einen autarken Notbetrieb des Netzes zu ermöglichen. Es wird eine 5 MW Batteriespeicher eingesetzt, der im Notfall eine unterbrechungsfreie Stromversorgung bereitstellen kann.

Eine Autarke Notversorgung soll nach folgenden Plan gelten:

1. Die Endverbraucher werden durch die dezentrale erneuerbare Erzeugung durch PV- und Biogasanlagen versorgt.
2. Die Batterie gleicht Leistungsüberschuss und -defizit durch ein auf- und entladen aus. Wenn die Batterie vollgeladen ist, wird der Erzeugungsüberschuss aberegelt. Ist die geforderte Leistung von der Batterie nicht mehr ausgleichbar, wird die Versorgung unterbrochen.

4 Inselbetrieb

4.1 Handlungspfade inselfähiger Stromnetze

Um ein Inselbetrieb realisieren zu können, muss die Stadt eine vertragliche Bindung mit dem Netzbetreiber vereinbaren. In der folgenden Abbildung sind die technischen Übergänge zwischen dem Verbund- und dem Inselbetrieb zu sehen:

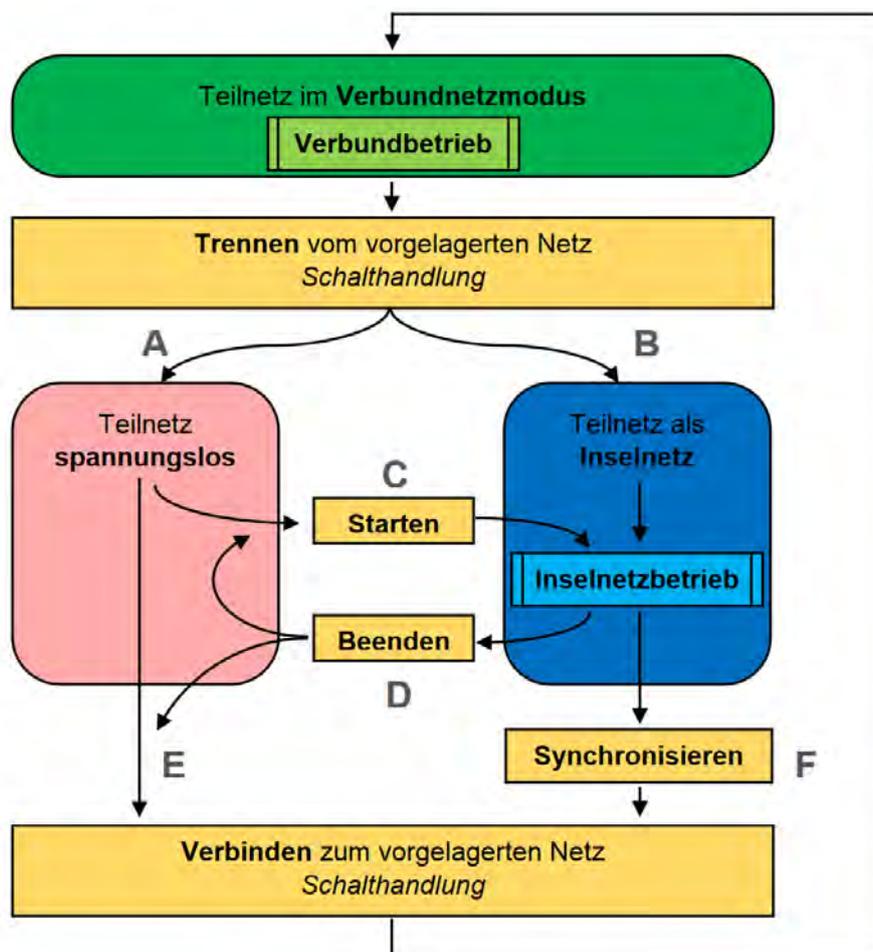


Abbildung 6: Übergänge zwischen Verbund- und Inselbetrieb eines Teilnetzes

Quelle: S. Fassbender, Elektrische Energietechnik, Planung und Betrieb von Verteilnetzen

Man kann auf zwei Varianten einen Inselbetrieb herstellen. Die erste Variante ist, dass man vom Verbundbetrieb abschaltet und zeitgleich in den Inselbetrieb wechselt (Option B). Die andere Variante ist, man schaltet zuerst ab und baut kontrolliert den Inselnetzbetrieb auf (Option A → C). Für die letztere Option werden schwarzstartfähige Erzeuger oder Speicher im Inselnetz benötigt. Für die Option B muss der Verbrauch und die Erzeugung im ausgeglichenen Zustand sein, ansonsten können hohe Lastsprünge bei der Schalthandlung entstehen.

Für einen sicheren Betrieb wird bei Option B eine große und schnellreagierende Leistungskapazität benötigt.

Bei einem Zusammenbruch des Inselbetriebes, hat man die Möglichkeit mit schwarzstartfähigen Erzeugern oder Speichern das System wiederaufzubauen (Option D → C). Wie beim Herstellen des Inselbetriebes für zwei Varianten, ist es möglich ebenfalls in zwei Varianten den Inselbetrieb wieder zu beenden. Für die erste Variante gilt, man schaltet das Inselnetz kontrolliert ab, ist einen Moment Spannungslos und schaltet dann ins Verbundnetz (Option D → E) oder man schaltet vom Inselbetrieb direkt zum Verbundbetrieb ohne einen spannungslosen Moment zu haben (Option B → F). Hierzu müssen die Frequenzen des Inselbetriebes und des Verbundbetriebes zueinander angeglichen werden.

Über den Weg A → C → D → E ist es möglich mit wenig betrieblichen Aufwand und Risiko einen Inselbetrieb zu realisieren, jedoch ist es das Ziel der Versorgungsbetriebe Bordsesholm während der Schalthandlungen eine konstante Strom- und Spannungsversorgung zu ermöglichen (Option B → F).

Ganz besonders können bei der Option B→F beim Wechsel zwischen Verbund- und Inselbetrieb transiente Störungen bei Schaltmomenten auftreten. Ein Transient ist ein Einschwingvorgang oder ein Abschnitt in einem Signal, welches durch Schaltvorgänge in elektrischen Schaltungen oder durch elektrostatische Entladungen verursacht wird. Die Dauer kann im Nano- und Mikrosekunden- oder im Millisekundenbereich auftreten. Bei diesen sehr kurzen Momenten ist es notwendig schnelle Regelungen von Frequenz und Spannungen zu erzielen.

Um Transienten zu vermeiden, hat eine Kondensatorbank Equilazer von Elspec solch ein System umgesetzt. Durch das Schalten im Nulldurchgang mit speziellen Thyristoren, können die Transienten Überspannungen vermieden werden. Jedoch steigt der Preis bei hohen Leistungen drastisch. Als alternative können transiente Überspannungen von Anlagen im Inselnetz kompensiert werden. Um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten wird eine Generatorstatik als Reglerkennlinie eingesetzt, um die Leistung linear zur Frequenzänderung Regeln zu können. Bei Netzen mit vielen dezentral verteilten Anlagen muss darauf geachtet werden, dass ein Regelkonsens zwischen diesen Anlagen getroffen wird. Sonst besteht die Gefahr, dass der Regelkreis instabil wird.

Einen Vorschlag wurde mit dem Konzept von Liu et al. mit einer Methodik gemacht, dass dezentral verteilte Regler ohne sichere Kommunikationsverbindung einen Regelkonsens finden. (Fassbender S. , 2018)

4.2 Messtechnik des Inselbetriebs

Um die Sicherheit des Netzes zu erhöhen, muss eine Messtechnik installiert werden. Es wird mit einem Synchronkuppelschalter zwischen dem vorgelagerten Netz und dem Inselbetrieb geschaltet. Während diesen Schaltmomenten muss u.a. am Synchronkuppelschalter gemessen werden. Der Messbefehl kann entweder fernsteuerbar oder automatisiert erfolgen. Zudem soll eine RMS-Messung (Effektivwert) des Netzzustandes im isolierten Netzzustand durchgeführt werden.

Gemessen soll an folgenden Stellen:

- Vor und nach dem Synchronkuppelschalter
- Leistung an den Biogaskraftwerken (4 MW)
- An den PV- Anlagen > 100kWp (Anlagennummer 219, 134, 97; Moorweg, Bahnhofstr., Eiderstedestr.)
- PV- Wechselrichter auslesen
- exemplarisch an den Verbrauchern

4.2.1 Kriterien

Messung

Da es sich um ein dreiphasiges Netz (Drehstromnetz) handelt, werden 6 Kanäle zur zeitsynchronen Messung benötigt (3 x Spannung und 3x Strom). Zum einen soll die Messtechnik in der Lage sein, mögliche Spannungseinbrüche zu erfassen, die bei Schaltzeitpunkten über den Synchronkuppelschalter entstehen können. Zum anderen soll es für die Messung der Stromstärke dienen, die bei Schaltzeitpunkten über den Synchronkuppelschalter fließen.

Ein wichtiger Punkt ist, dass die Messtechnik eine hochauflösende Messung ermöglicht. Unter anderem sollte es eine Kurvenform darstellen können, um Transienten bei Schaltvorgängen zu erfassen. Um Transienten erfassen zu können benötigt man üblich eine Auflösung ab einer Abtastrate von 25 kHz (500 Werte pro Periode). Für eine Messung an der 20 kV Mittelspannung werden jeweils ein Spannungs- und Stromwandler benötigt, da die Messgeräte solche hohen

Spannungen und Ströme nicht erfassen können bzw. für Niederspannung ausgelegt sind. Am 20 kV Netz sind die Biogaskraftwerke und der Synchronkuppelschalter angeschlossen.

Datenübertragung der Messwerte (Ethernet):

Die Datenübertragung soll unter anderem dienen um ein fernsteuerbares Messgerät für die entsprechenden Messungen, zentral zu steuern und auszulesen. Eine Abschätzung für Datenübertragungsgeschwindigkeit könnte üblicherweise so aussehen:

- Eine Messung entspricht: 16 Bits = 2 Byte
- Berechnung der Übertragungsgeschwindigkeit: 6 Kanäle * 25 kHz*2 Byte = 300 kB/s
→ für 10s Transienten Messung = 3MB

Um eine Datenübertragung zu ermöglichen, ist eine geeignete Software dazu notwendig.

Datenverarbeitung

Das System muss in der Lage sein, die Wirk-, Blind-, und Scheinleistung aus den zeitsynchronen Strom- und Spannungsmessungen zu berechnen und gegebenenfalls darzustellen. Damit die erfassten Messwerte und Kurvenformen nicht verloren gehen ist es relevant einen internen Speicher anzuschaffen. Um einen guten Überblick zu verschaffen, sollen alle Messdaten und Kurvenverläufe von allen Messgeräten synchronisiert und zusammengeführt werden.

Darstellung

Zur Darstellung ist beispielsweise ein zeitlicher Verlauf des elektrischen Stromes und in der Spannung als Graph übersichtlich. Eine Ereignisliste mit Zeitstempeln und Werten, sowie Maximalwerte beispielsweise als Balkenanzeige bieten ebenso einen guten Überblick der Messdaten.

Benötigte Materialien

Da es vor und nach dem Synchronkuppelschalter sowie an den Messstellen der Biogaskraftwerken gemessen wird, werden an diesen Messstellen Strom und Spannungswandler sowie drei Messgeräte benötigt. Es werden drei weitere Messgeräte für Messungen an den PV Wechselrichtern eingesetzt. Dazu müssen Glasfaseranschlüsse und Kommunikationsschnittstellen an den jeweiligen Messgeräten vorhanden sein. Ein verfügbarer Computer ist zu Datenverarbeitung, Darstellung und zur zentralen Steuerung des Systems

notwendig. Des Weiteren ermöglicht eine geeignete Software der Messgeräte, die Steuerung, Überwachung und Auslegung der Messdaten. Als internen Speicher wird mindestens eine Kapazität von 1 GB für alle Messdaten empfohlen. Als Zusatzgerät, um jederzeit an gewünschten Messstellen messen zu können, wurde entschieden einen mobilen Messmonitor einzusetzen. Dieser sollte ebenfalls mit mindestens 1 GB Speicherkapazität ausgestattet sein.

4.2.2 Ergebnisse

Die Messungen für ein Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz, wird mit sogenannten Netzanalysatoren durchgeführt. Um die geeigneten Netzanalysatoren zu finden, wurden Angebote von verschiedenem Hersteller erhalten. Die Messgeräte wurden einer Liste zugeordnet und je nach Kriterium mit Punkten versehen.

Die entscheidenden Kriterien sind:

- Abtastrate
- interner Speicher
- Messbereich
- Preis

Die in der Liste folgenden Netzanalysatoren erfüllen in 4.2.1 erläuterten Voraussetzungen:

Tabelle 3: Liste der Netzanalysatoren nach Punktebewertung

Hersteller	Typ	Preis	Abtaste	Interner Speicher	Messbereich	Messbereichsendwert	Punktzahl
Bender	PEM 735	2.200 €	512 samples/cycle	1 GB	0,1 ... 120% In In = 1A,5A	6A	Abtaste: 5/10 Punkten Interner Speicher: 5/10 Punkten Preis: 8/10 Punkte Gesamt: 18 Punkte
Janitza	UMG 508	1.642 €	400 sample/cycle	• 256 MByte Flash • 32 MB SDRAM	0,001...7,4A	7,4A	Abtaste: 5/10 Punkten Interner Speicher: 5/10 Punkten Preis: 8/10 Punkten Gesamt: 18 Punkte
	UMG 512 PRO	3.736 €	512 samples/cycle	1GB	0,005A ... 7 A	7A	Abtaste: 5/10 Punkten Interner Speicher: 8/10 Punkten Preis: 5/10 Punkte Gesamt: 19 Punkte
	MRG 512 PQ PRO Flex (mobile)	6.625 €	512 samples/cycle	256 MB	Rogowski Spule 0,1... 4 kA	4 kA	Abtaste: 5/10 Punkten Interner Speicher: 1/10 Punkten Preis: 2/10 Punkte Gesamt: 8 Punkte
Gossen Metrawatt	Mavolog PRO	2.190 €	640 samples/cycle	128 Messgrößen	In = 1A,5A 0,1%...120%	12,5A	Abtaste: 6/10 Punkten Interner Speicher: 5/10 Punkten Preis: 8/10 Punkte Gesamt: 19 Punkte
	Mavowatt 240 (mobile)	6.000 €	512 samples/cycle	4GB Flash	1,5A...6000A	6 kA	Abtaste: 5/10 Punkten Interner Speicher: 8/10 Punkten Preis: 2/10 Punkte Gesamt: 15 Punkte
	Sineax A230	450 €	32 samples/cycle	2 MB (Erweiterungsmodul)	In = 1A,5A 0,1%...120%	6A	Abtaste: 1/10 Punkten Interner Speicher: 1/10 Punkten Preis: 10/10 Punkte Gesamt: 12 Punkte
a-eberle	PQI DA smart	1.350 €	800 samples /cycle	1GB und erweiterbar	In = 1A...5 A 0,1%...120%	6A	Abtaste: 8/10 Punkten Interner Speicher: 5/10 Punkten Preis: 10/10 Punkten Gesamt: 23 Punkte
	PQ-Box 300 (mobile)	8.950 €	20000 samples/cycle	8 GB und erweiterbar	Ministromzangen und 0,1A ...200A Rogowskispulen 1A 6000A	6kA	Abtaste: 10/10 Punkten Interner Speicher: 10/10 Punkten Preis: 1/10 Punkte Gesamt: 21 Punkte

Es ist zu erkennen, dass die Messgeräte von der Punktzahl nur leicht unterscheidbar sind. Mobile Netzanalysatoren unterscheiden sich deutlich im Preis, da die Möglichkeit besteht ein vollausgestattetes System mit einer sehr hochauflösenden Messung durchzuführen. Zusätzlich bietet solch ein all-in-one Messsystem ein hochauflösendes Display um Mess- und Kurvenverläufe genauestens erkennen und bewerten zu können. Ein weiter wichtiger Punkt, ist das im Niederspannungsbereich die Wechselrichter der PV-Anlagen gemessen werden. Hierzu eignet sich das SINEAX A230 von GOSSEN METRAWATT (Gelbe Zeile). Mit 32 Messungen pro Periode ist es völlig ausreichend, Störungen und Schwankungen in Wechselrichtern zu erfassen.

5 Diskussion/Fazit

In diesem Praxisprojekt ist die Aufgabe ein Messsystem zu konzipieren. Zu dieser Aufgabe gehört unter anderem die Messung der Spannungsqualität.

Mit dieser Arbeit wurde die Erfahrung gemacht, dass bei Schaltvorgängen in Mittelspannungskreisen transiente Spannungsspitzen sowie Spannungseinbrüche entstehen können. Um diese erfassen zu können werden spezielle Messsysteme benötigt. Es wurde verdeutlicht, dass die Messsysteme sich nur leicht voneinander unterscheiden. Im Prinzip gibt es nicht „das Beste“ Messgerät. Je nach Anwendungsgebiet und bestimmte Voraussetzungen für das Projekt, muss das passende Gerät ausgewählt werden. Zudem macht es besonders Sinn, sich an die Hersteller zu wenden die auf diese bestimmten Gebiete spezialisiert sind.

Ein gutes Beispiel sind die Produkte der Firma A-Eberle. Wie man in der Liste sehen konnte, gehören die Produkte der Firma A-Eberle nach Punktbewertung zu den Top-Geräten.

Der Hersteller beschäftigt sich ausschließlich mit Power Quality, worauf die Hersteller (Gossen Metrawatt, Bender und Janitza) auch Produkte für andere Bereiche der Elektrotechnik anbieten bzw. nicht spezialisiert auf Power Quality sind.

Das Ziel der Messtechnik soll sein, dass mit einem Computer bzw. ein Softwaretool alle Netzanalysatoren steuer- und auslesbar sind. Man kann für ein „low- cost“ Konzept Messgeräte von zwei verschiedenen Herstellern einsetzen (z.B. A-EBERLE PQI-DA Smart und GOSSEN METRAWATT SINEAX A 230), um Kosten zu senken. Jedoch empfiehlt es sich nicht, da man ebenso zwei verschiedene Softwaretools erhält. Es empfiehlt sich, Komponentengruppen von einem Hersteller zu kaufen, welches den Vorteil bringt alle Messgeräte zentral mit einem Softwaretool zu steuern, auslesen und zu kontrollieren.

Literaturverzeichnis

Fassbender, S. (2016). *Masterarbeit, Autarker Notbetrieb des Stromnetzes einer Gemeinde mit erneuerbaren Energien*. Köln.

Fassbender, S. (2018). *Machbarkeit, Umsetzung und Betrieb von inselfähigen Stromnetzen als Grundlage für ein resilientes und nachhaltiges Stromsystem*. Köln.

VDE-Studie. (2015). *Der Zellulare Ansatz*. Frankfurt am Main: VDE.

Wedekind, E. (kein Datum). *Phoenix Contact*. Von https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_promotion/CI_S07_15_000_PR5_DE_Fernwirk_und_Fernwartungssysteme_LoRes.pdf abgerufen