

Notstromversorgung von Wasserversorgungsanlagen mit Biogasanlagen im Inselnetz: Analyse der technischen und betriebswirtschaftlichen Umsetzbarkeit

Dominik J. Storch¹⁽¹⁾, Sebastian Seifried⁽¹⁾, Tobias Lechner⁽¹⁾, Michael Finkel⁽¹⁾,
Rolf Witzmann⁽²⁾

⁽¹⁾ Hochschule Augsburg, An der Hochschule 1, 86161 Augsburg, +49 821 5586-3362, dominik.storch@hs-augsburg.de, <https://www.hs-augsburg.de>

⁽²⁾ Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München, +49 89 289 22004, rolf.witzmann@tum.de, <https://www.tum.de>

Kurzfassung:

Diese Arbeit untersucht die grundsätzliche Eignung von Biogasanlagen zur Notstromversorgung von bayerischen Trinkwasserversorgungsanlagen im Inselnetz. Hierbei werden zunächst relevante Biogasanlagen analysiert und diese dann mit einem bereits vorhandenen Datenbestand zu Trinkwasserversorgungsanlagen verschnitten. Für eine realitätsnahe Modellierung des Inselnetzes finden der Kruskal und Dijkstra Algorithmus Anwendung. Das resultierende Netzmodell wird anschließend automatisiert in eine Netzberechnungssoftware eingelesen, wodurch weiterführende Untersuchungen zur technischen Umsetzbarkeit ermöglicht werden. Diese werden für mehrere Szenarien und Versorgungsvarianten durchgeführt und abschließend auch hinsichtlich betriebswirtschaftlicher Kriterien bewertet sowie mit einer konventionellen Notstromversorgung verglichen. Es werden zudem non-monetäre Vorteile der Inselnetznotstromversorgung aufgezeigt und zu beachtende technische, organisatorische und rechtliche Rahmenbedingungen zusammengefasst.

Keywords: Inselnetz, Notstromversorgung, Kritische Infrastruktur, Biogasanlage

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Insbesondere zu Zeiten steigender geopolitischer Unsicherheit sowie einer klimabedingten Zunahme von Extremwetterereignissen [1], ist eine hohe Resilienz Kritischer Infrastrukturen ein maßgebliches Instrument des Bevölkerungsschutzes. Im Falle eines langandauernden und großflächigen Stromausfalles ist eine funktionierende Notstromversorgung für Kritische Infrastrukturen essenziell, da diese andernfalls stark beeinträchtigt werden können oder sogar gänzlich ausfallen. Neben konventionellen Notstromversorgungslösungen, wie z. B. dem Einsatz von Dieselaggregaten, stellen auch lokale Inselnetze eine sinnvolle

¹ Jungautor

Notstromversorgungsmöglichkeit dar, durch welche die im Falle eines Blackouts entstehenden Beeinträchtigungen stark reduziert werden können. [2]

Im Forschungsprojekt LINDA 4 H₂O [3] wird vor diesem Hintergrund die Eignung von Biogasanlagen (BGA) zur Notstromversorgung von bayerischen Trinkwasserversorgungsanlagen (WVA) im Inselnetzbetrieb untersucht (vgl. Schema der Inselnetzversorgung in Abbildung 1). Diese Arbeit analysiert unter Berücksichtigung von sowohl technischen als auch betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen das grundsätzliche Potenzial dieser Inselnetz-Notstromversorgungsvariante. Hierfür wird ein Modell entwickelt, welches die Umsetzbarkeit der Inselnetz-lösung bei über 1.250 WVA mit Eigengewinnung bewertet.

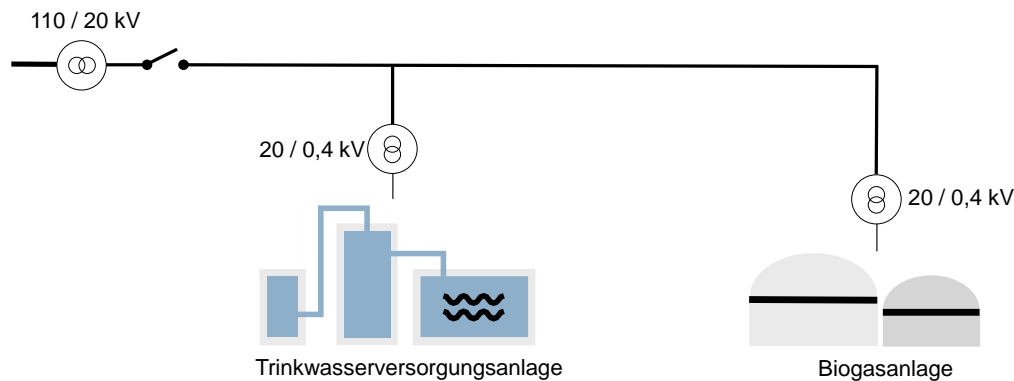


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Inselnetzversorgung

Die Arbeit ist dabei folgendermaßen aufgebaut: Zunächst wird in Kapitel 2 auf die grundlegende Methodik eingegangen. Hierbei werden zunächst die Eingangsdaten beschrieben und anschließend die Modellierung des Inselnetzes erläutert. Hiernach wird dargelegt, nach welchen Kriterien die Prüfung der technischen Umsetzbarkeit der Inselnetznotstromversorgung sowie die Bewertung der betriebswirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit erfolgt. In Kapitel 3 werden dann die betrachteten Szenarien und in Kapitel 4 die Analyseergebnisse vorgestellt. Hierbei wird auch auf non-monetäre Vorteile der Inselnetzversorgung eingegangen. Abschließend werden in Kapitel 5 zu beachtende technische, organisatorische und rechtliche Rahmenbedingungen aufgezeigt.

2 Methodik

Zur Bestimmung des grundsätzlichen Potenzials der Inselnetznotstromversorgung von bayerischen WVA mit BGA werden zunächst relevante Daten zu den entsprechenden Erzeugern und Verbrauchern erhoben. Die Informationen zu den BGA stammen aus dem Marktstammdatenregister (MaStR) der Bundesnetzagentur, während bei den WVA Daten des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) verwendet werden.

Basierend auf der resultierenden Datenbank, in welcher unter anderem die Standorte und der Leistungsbedarf der WVA sowie die Standorte und die installierte Leistung der BGA hinterlegt sind, wird unter Verwendung der Kruskal und Dijkstra-Algorithmen der minimale Spannbaum für eine Verkabelung sämtlicher relevanter Verbraucher und Erzeuger entlang des bestehenden Straßennetzes gebildet. Hierdurch kann eine realitätsnahe Modellierung des für die Notstromversorgung zu errichtenden Inselnetzes erzeugt werden (vgl. auch [4]).

Dieses Modell dient hiernach als Grundlage für die Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit der Inselnetzversorgung, wobei unter anderem für jede Versorgungskonstellation automatisiert Lastflussberechnungen mithilfe einer Netzberechnungssoftware durchgeführt werden. Für sämtliche technisch umsetzbaren Inselnetzversorgungskonstellationen werden anschließend betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen bestimmt und Vergleiche mit einer konventionellen Notstromversorgung mittels Diesellaggregaten angestellt. Dies ermöglicht schlussendlich auch Rückschlüsse zur betriebswirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der Inselnetznotstromversorgung. Zur Erhöhung der Aussagekraft werden die Untersuchungen für mehrere Szenarien sowie Versorgungsvarianten durchgeführt. Die gewählte Vorgehensweise wird in Abbildung 2 zusammengefasst und in den folgenden Abschnitten detaillierter erläutert.

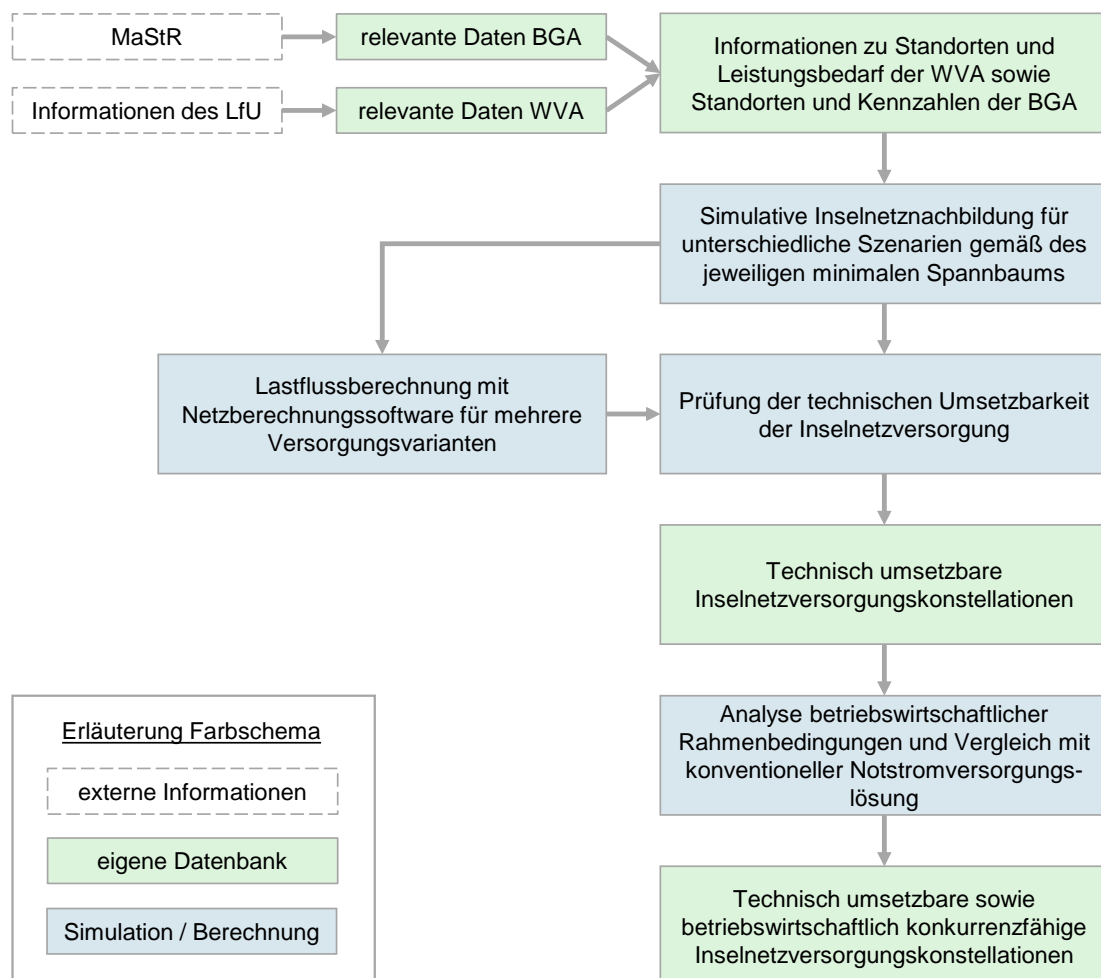


Abbildung 2: Methodik zur Bestimmung des Potenzials der Inselnetznotstromversorgung von bayerischen WVA mit BGA

2.1 Eingangsdaten

Zur Analyse der Umsetzbarkeit von Inselnetznotstromversorgungen bayerischer WVA mit BGA müssen zunächst relevante Daten zu diesen erhoben, aufbereitet und ggf. approximiert werden. Die Vorgehensweise und der Datenbestand werden in den beiden folgenden Abschnitten erläutert.

2.1.1 Biomasseeinheiten im Freistaat Bayern

Die primäre Datenquelle für Informationen zu den bestehenden BGA ist das Marktstammdatenregister (MaStR) der Bundesnetzagentur. Dieses stellt das zentrale Register für Stromerzeugungsanlagen in Deutschland dar. Betreiber von Erzeugungsanlagen sind gesetzlich verpflichtet, ihre Anlagen im MaStR zu registrieren [5], weshalb von einem annähernd vollständigen Datenbestand ausgegangen werden kann.

Das MaStR enthält Informationen zu über 6.600 Biomasseeinheiten in Bayern (Stand: Dezember 2022). Bayern ist hiermit das deutsche Bundesland mit den meisten Biomasseeinheiten. Da der Fokus des Forschungsprojekts LINDA 4 H₂O auf der Verwendung von Biogasaggregaten als inselnetzbildende Einheiten liegt, werden für weiterführende Untersuchungen nicht alle dieser Biomasseeinheiten miteinbezogen. Es werden lediglich bayerische Biomasseeinheiten berücksichtigt, die nicht dauerhaft stillgelegt sind, einen Verbrennungsmotor besitzen und deren Hauptbrennstoff Biogas ist. Es verbleiben 5.375 potenziell relevante Biomasseeinheiten in Bayern, dies entspricht 81 % aller gelisteten Biomasseeinheiten. Wenngleich eine BGA auch aus mehreren Einheiten (Aggregaten) bestehen kann, werden im Folgenden BGA und Biomasseeinheit synonym verwendet, da für das hier vorgestellte Notstromkonzept stets nur eine Biomasseeinheit als Energieerzeugungsanlage verwendet wird, um auf ein komplexeres Regelungskonzept zwischen mehreren Aggregaten verzichten zu können.

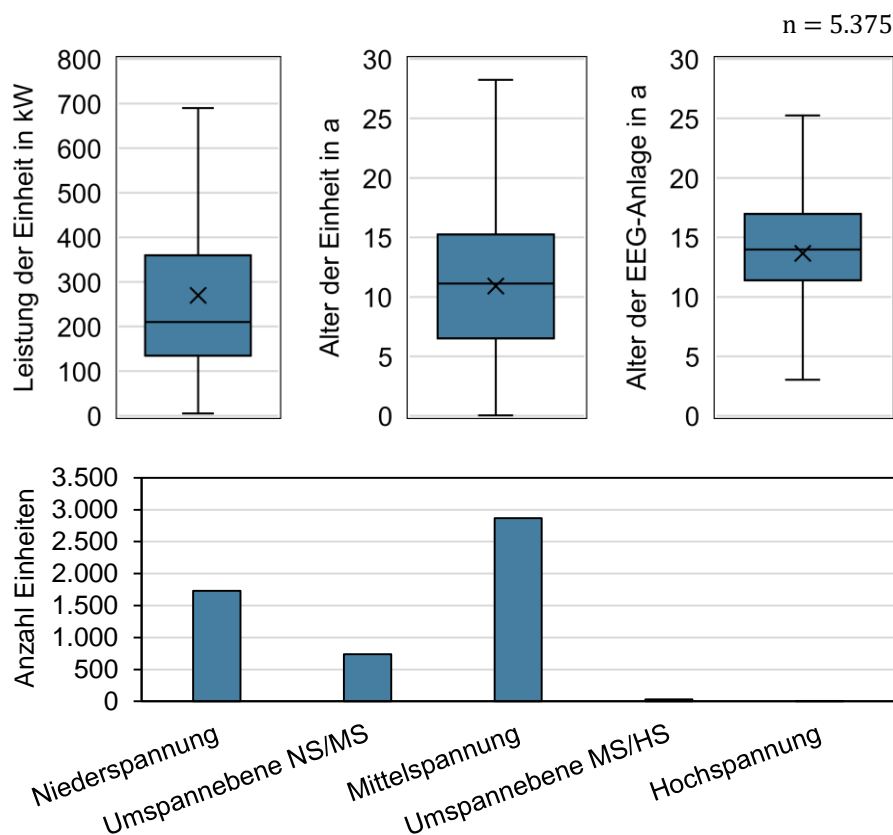


Abbildung 3: Charakterisierung bayerischer Biogasanlagen²

² In den Boxplot-Darstellungen dieser Arbeit werden aus Gründen der Übersichtlichkeit keine „Ausreißer“ dargestellt. Eine grundsätzliche Erläuterung der Boxplot-Darstellung wird in [6] gegeben.

Abbildung 3 fasst relevante Kennzahlen der bayerischen BGA zusammen. Die durchschnittlich installierte Bruttoleistung der Einheiten beträgt 270 kW. Im Mittel sind die Aggregate knapp elf Jahre alt und weisen mehrheitlich einen Mittelspannungsnetzanschluss auf. Es wird ersichtlich, dass 50 % der Einheiten bereits älter als elf Jahre sind. Gemäß VDI-Richtlinie 2067 kann bei BHKW eine Lebensdauer von etwa 15 Jahren angenommen werden. Dies deutet bei einigen dieser Anlagen auf eine zeitnahe Reinvestition hin, bei welcher die für eine Inselnetznotstromversorgung notwendigen Anforderungen (vgl. auch Abschnitt 2.3.1) theoretisch direkt berücksichtigt werden könnten.

Das mittlere Alter der EEG-Anlage, welcher die Einheit zugeordnet wird, ist höher als das Alter der Einheit und beträgt fast 14 Jahre. Gemäß § 25 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird die EEG-Vergütung nur über eine Dauer von max. 20 Jahren bezahlt, so dass für ältere Bestandsanlagen mögliche alternative Einkommensquellen als besonders attraktiv einzuschätzen sind. Eine Vergütung für die Bereitstellung der Notstromversorgung von WVA könnte somit einen wesentlichen Anreiz für den Weiterbetrieb der Anlage darstellen.

Das MaStR enthält neben den bereits dargelegten Daten auch Standortkoordinaten aller Einheiten mit einer installierten Leistung von mehr als 30 kW. Für weiterführende Untersuchungen sind insbesondere der Standort sowie die installierte Leistung der Anlage von Relevanz, da hierdurch die Distanz zur WVA bestimmt sowie Rückschlüsse zur Höhe der maximal schaltbaren Lasten gezogen werden können.

2.1.2 Trinkwasserversorgungsanlagen im Freistaat Bayern

Da die öffentliche Trinkwasserversorgung in Bayern als Aufgabe der Gemeinden dezentral strukturiert ist, weist der Freistaat eine vergleichsweise hohe Anzahl an WVA auf. Zur detaillierten Charakterisierung der WVA werden Datenbestände des LfU verwendet und miteinander verschnitten. Dies ermöglicht die Abschätzung des jeweiligen elektrischen Leistungsbedarfs der WVA. Die Charakterisierung der WVA sowie die Methodik zur Approximation des Leistungsbedarfs werden in [7] beschrieben. Die Kenndaten der einzelnen Anlagenteile der WVA (Brunnen, ggf. Aufbereitungsanlagen) sowie deren jeweiliger elektrischer Leistungsbedarf sind damit bekannt.

Da die Notwendigkeit, der Leistungsbedarf sowie die Komplexität einer Notstromversorgung bei WVA mit Trinkwassereigengewinnung höher sind, als bei WVA mit Wasserfremdbezug, werden in den folgenden Untersuchungen dieser Arbeit nur WVA betrachtet, welche eigene Brunnen zur Wassergewinnung betreiben. Insgesamt werden 1.271 bayerische WVA mit Eigengewinnung hinsichtlich der Umsetzbarkeit einer Inselnetznotstromversorgung mit BGA analysiert.

2.1.3 Zusammenfassung der Eingangsdaten

Es kann zusammengefasst werden, dass sowohl für BGA als auch die Anlagenteile der WVA neben weiteren Informationen auch der Standort sowie die installierte Leistung bzw. der Leistungsbedarf bekannt sind. Dies wird in Abbildung 4 veranschaulicht.

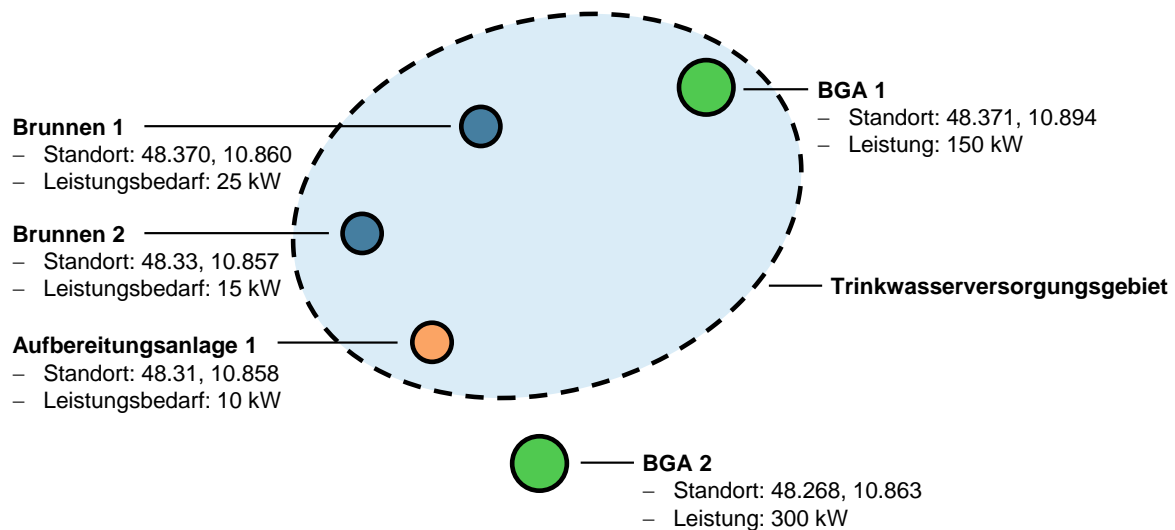


Abbildung 4: Veranschaulichung der vorhandenen Eingangsdaten

Häufig ist zudem eine räumliche Nähe zwischen den Anlagenteilen der WVA sowie den BGA gegeben. Abbildung 5 stellt das Ergebnis einer Nearest Neighbor Analyse dar und zeigt eine statistische Auswertung der Luftlinienentfernung von Brunnen und Aufbereitungsanlage zur nächstgelegenen BGA. Es wird deutlich, dass sich in etwas über 50 % der Brunnen und Aufbereitungsanlagen die nächste BGA in einer Luftlinienentfernung von unter 3 km befindet.

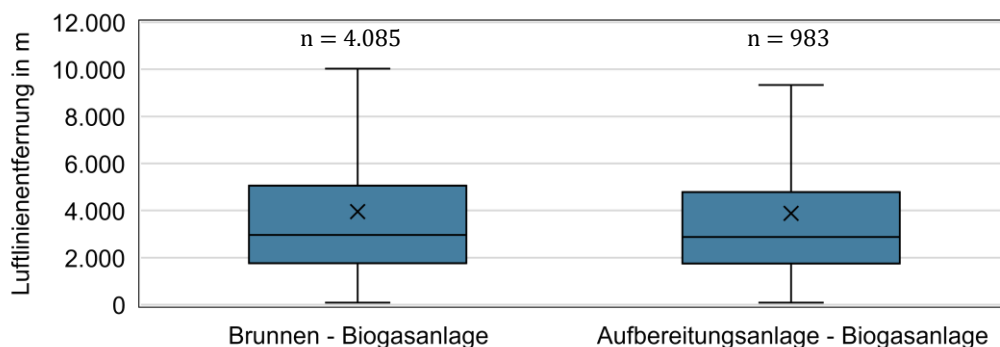


Abbildung 5: Luftlinienentfernung von Brunnen und Aufbereitungsanlagen zur nächstgelegenen Biogasanlage

Aufbauend hierauf kann nun eine Modellierung des zu errichtenden Inselnetzes erfolgen. Die Vorgehensweise wird in Abschnitt 2.2 beschrieben.

2.2 Modellierung des Inselnetzes

Zur Prüfung einer potenziell möglichen Inselnetznotstromversorgung muss der plausible Verlauf des Inselnetzes zunächst modelliert werden. Besitzt die WVA neben einem Brunnen keine weiteren Anlagenteile, ist die Nachbildung wenig komplex. In diesem Fall kann angenommen werden, dass eine (möglichst) direkte Verbindung von BGA zur Wasserfassung geschaffen wird. Besteht die WVA allerdings aus mehreren Anlagenteilen an unterschiedlichen Standorten, muss zunächst die Inselnetzanbindung sämtlicher Anlagenteile und der BGA bestimmt werden. Da ein Netz mit einer möglichst kurzen Gesamtkabellänge sowohl betriebswirtschaftliche (geringere Kabel- und Verlegungskosten), als auch technische Vorteile (geringerer

Spannungsfall und Erdschlussströme) bietet, wird der minimale Spannbaum sämtlicher Verbindungsmöglichkeiten gebildet. Die Vorgehensweise wird in Abbildung 6 veranschaulicht.

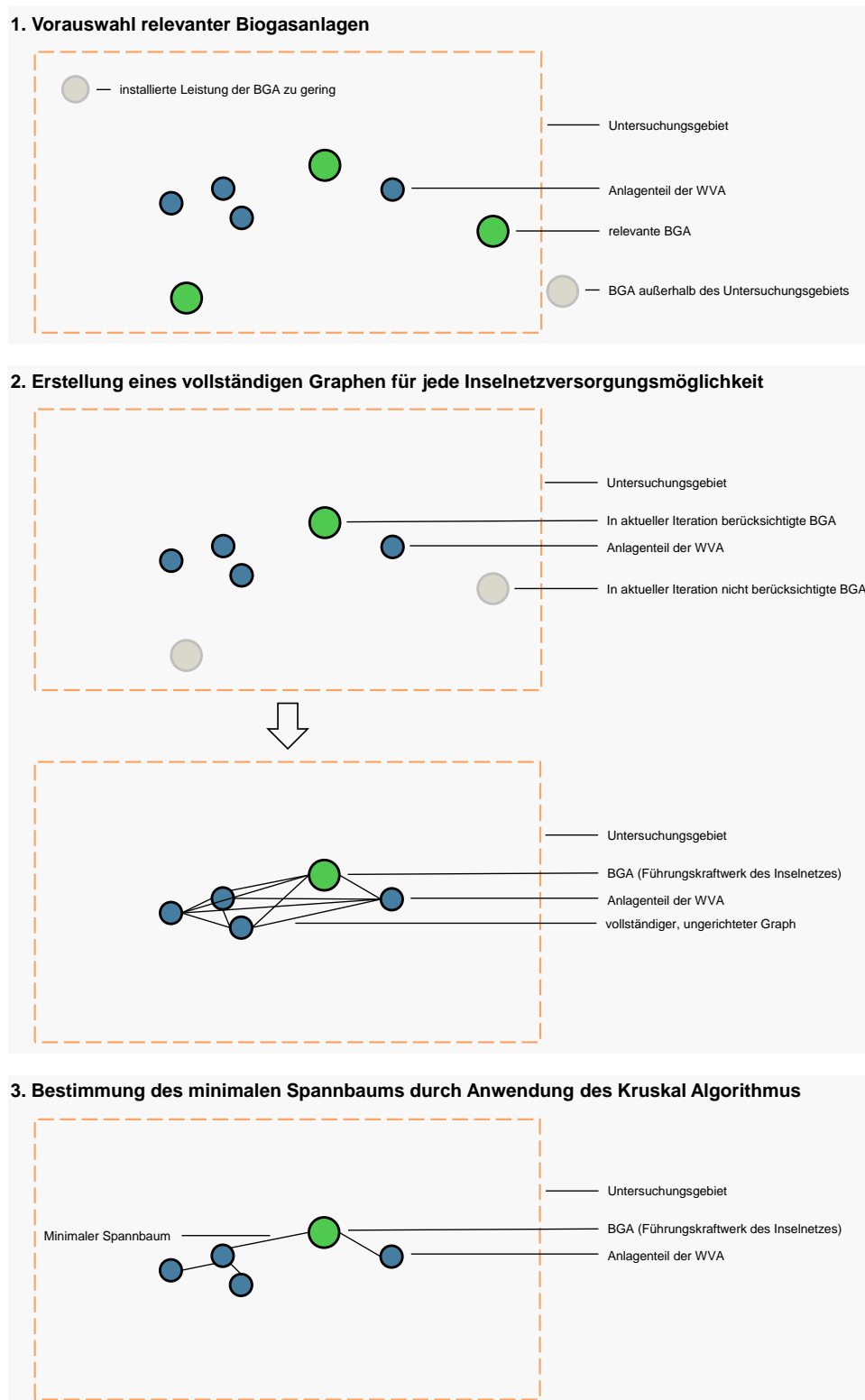


Abbildung 6: Modellierung der Inselnetznotstromversorgung

Zunächst erfolgt eine Vorauswahl potenziell relevanter BGA im Umkreis der Wasserversorgungsanlage, wobei nur BGA berücksichtigt werden, die sich innerhalb eines Einzugsgebiets von maximal 20 km Entfernung um die Grenzen der WVA befinden und deren installierte

Leistung größer als der Gesamtleistungsbedarf der WVA ist. Hiernach erfolgt die Erstellung eines vollständigen, ungerichteten Graphen für jede potenzielle Inselnetzversorgungsmöglichkeit. Dies bedeutet, dass für jede relevante BGA ein vollständiger Graph erstellt wird, welcher eine Inselnetzversorgungsmöglichkeit repräsentiert. Hierbei bestehen die Knoten des Graphen aus den Anlagenteilen der WVA sowie der inselnetzbildenden Einheit (BGA). Jeder Knoten wird dann mit jedem anderen Knoten durch eine Kante verbunden. Das Gewicht der jeweiligen Kante entspricht der Entfernung der verbundenen Knoten. Abschließend wird unter Verwendung des Kruskal Algorithmus der minimalen Spannbaum jeder potenziellen Inselnetzversorgungsmöglichkeit bestimmt.

Das resultierende Netzmodell in Form eines ungerichteten Graphen stellt die Grundlage für weiterführende Untersuchungen dar und entspricht der Situation, in welcher kein bestehendes Energieversorgungsnetz zwischen den einzelnen Anlagenteilen der WVA genutzt werden kann, und das Inselnetz neu errichtet werden muss (entspricht dem *Basisszenario*, s. Kapitel 3).

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der jeweiligen Entfernung zwischen den Knoten (Gewicht der Kante im obigen Graphenmodell) wird im Folgenden erläutert. Da Kabel in der Regel entlang des bestehenden Straßennetzes verlegt werden [8], ist eine Verwendung der Luftlinienentfernung unzureichend. Zur Approximation der real benötigten Kabellänge wird zunächst der relevante Ausschnitt des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes um die zu verbindenden Standorte von OpenStreetMap bezogen. Es werden hierbei ausschließlich Straßen berücksichtigt, auf welchen Personenkraftwagen fahren dürfen (somit werden z. B. Fahrradwege oder Wanderwege nicht betrachtet). Das Straßennetz wird anschließend in ein Graphenmodell transformiert.

Zur Bestimmung der Entfernung zwischen den beiden Standorten wird zunächst die Luftlinienentfernung der Start- und Zielkoordinaten zum nächstgelegenen Knoten des „Straßen-Graphen“ berechnet. Anschließend wird der Dijkstra-Algorithmus angewendet, um die kürzeste Verbindung entlang des bestehenden Straßennetzes zu identifizieren. Die Gesamtlänge des zu verlegenden Kabels setzt sich somit aus den Luftlinienentfernungen der beiden Standorte zum „Straßen-Graphen“ sowie der Länge der kürzesten Verbindung entlang des Straßennetzes zusammen. Der Sachverhalt wird in Abbildung 7 veranschaulicht und die Methodik in [4] detaillierter erläutert.

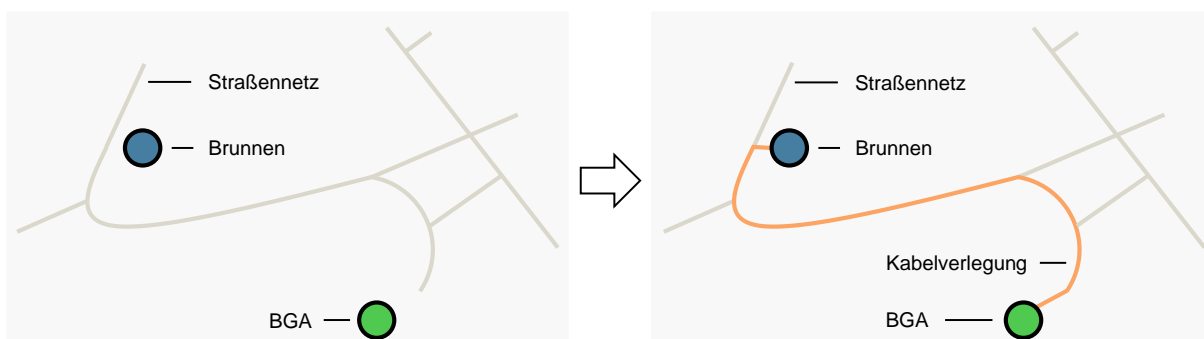


Abbildung 7: Bestimmung der erforderlichen Kabellänge zwischen zwei Standorten

Durch die dargelegte Modellierungsmethodik kann ein das Inselnetz repräsentierendes Graphenmodell erstellt werden, in welchem sämtliche für weiterführende Berechnungen benötigten Parameter hinterlegt sind. Hierzu zählen der Leistungsbedarf der einzelnen Anlagenteile

der WVA (Brunnen, Aufbereitungsanlagen), die installierte Leistung der BGA sowie die Längen der notwendigen Kabel. Bei WVA ist zudem der Leistungsbedarf „sonstiger Verbraucher“ zu berücksichtigen (vgl. [7]). Hierzu gehören z. B. die Leitstelle oder die Beleuchtung. Der Leistungsbedarf sonstiger Verbraucher wird im Verhältnis zum Leistungsbedarf der Brunnen und Aufbereitungsanlagen auf die jeweiligen Standorte verteilt. Einem Standort mit höherem Leistungsbedarf wird somit auch ein höherer Anteil des „sonstigen Leistungsbedarfs“ zugerechnet. Liegen keine Daten zum Standort eines Anlagenteils der WVA vor (teilweise bei Aufbereitungsanlagen der Fall), wird dieser Anlagenteil dem am weitesten von der BGA entfernten bekannten Anlagenstandort zugeordnet. Dies stellt somit eine Worst-Case-Betrachtung im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit dar. Abbildung 8 veranschaulicht das Graphenmodell sowie die bekannten Parameter beispielhaft. Diese können im nächsten Schritt zur Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit der Inselnetznotstromversorgung verwendet werden.

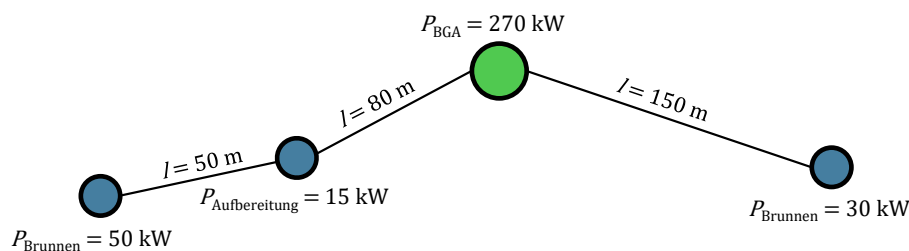


Abbildung 8: Repräsentatives Graphenmodell eines exemplarischen Inselnetzes

2.3 Prüfung der technischen Umsetzbarkeit der Inselnetznotstromversorgung

Es bestehen mehrere technische Rahmenbedingungen, die es für eine Inselnetzversorgung zu erfüllen gilt. Nur wenn sämtliche der nachfolgend beschriebenen Kriterien eingehalten werden, ist eine Notstromversorgung der WVA mittels BGA möglich. Da die BGA das inselnetzführende Kraftwerk darstellt, ist deren Lastschaltperformance zu berücksichtigen. Basierend auf den Untersuchungen in [9] wird angenommen, dass die Gasmotoren in der Lage sind, eine sprunghafte Lastzuschaltung von etwa 20 % der Motornennleistung innerhalb der Frequenzgrenzen gemäß DIN EN 50160 (47 Hz – 52 Hz) zu regeln. Somit darf der Leistungsbedarf des größten elektrischen Verbrauchers der WVA nicht mehr als 20 % der Biogasanlagenleistung betragen.

Es soll sowohl die Möglichkeit der Versorgung über Niederspannungskabel (NS-Kabel), als auch über ein Mittelspannungskabel (MS-Kabel) untersucht werden. Hierbei müssen die Strombelastbarkeit sowie der maximal zulässige Spannungsfall über dem Kabelsystem berücksichtigt werden. Da davon ausgegangen wird, dass aus ökonomischen Überlegungen auf eine Erdschlusslöschspule verzichtet werden soll, muss im Fall der MS-Versorgung auch die Einhaltung des maximal zulässigen Erdschlussstroms geprüft werden. Der Leistungsbedarf der Wasserfassungen bzw. Anlagenteile der WVA P_{WVA} ist bekannt, wodurch gemäß Gleichung (1) der Betriebsstrom I_B bestimmt werden kann. Die Versorgungsspannung U beträgt bei der Versorgung über ein MS-Kabel 20 kV und bei der Versorgung über ein NS-Kabel 0,4 kV. Es wird ein Leistungsfaktor $\cos \varphi$ von 0,9 angenommen.

$$I_B = \frac{P_{WVA}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \quad (1)$$

Für die NS-Verbindung wird ein Kabel vom Typ NAYY-J 4x240 SE verwendet, für die MS-Verbindung wird der Kabeltyp NA2XSY 3x50 angenommen. Beides sind in der Praxis häufig eingesetzte Kabeltypen. In Tabelle 1 werden relevante Charakteristiken der verwendeten Kabeltypen zusammengefasst. Beträgt beispielsweise der Betriebsstrom mehr als 357 A (dies entspricht einem Leistungsbedarf von ≥ 223 kW), so kann keine einfache NS-Verbindung hergestellt werden, da die Strombelastbarkeit des NS-Kabels überschritten wird. Um in diesem Fall dennoch eine NS-Verbindung zu realisieren, müsste ein weiteres NS-Kabel parallelverlegt werden.

Tabelle 1: Charakteristiken der verwendeten Kabeltypen (gemäß [10, 11])

	NAYY-J 4x240 SE	NA2XSY 3x50
Spannungsebene	Niederspannung	Mittelspannung
Anordnung / Aderzahl	Kabel mit 4 Adern	3 Einzelkabel im Dreieck angeordnet
Querschnitt	240 mm ²	50 mm ²
Strombelastbarkeit	357 A	165 A
Elektrische Leitfähigkeit Aluminium	$38 \frac{\text{m} \cdot \text{mm}^2}{\Omega}$	$38 \frac{\text{m} \cdot \text{mm}^2}{\Omega}$
Kapazitätsbelag	$0,4227 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$	$0,1838 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$

Der resultierende Spannungsfall ΔU kann mit Gleichung (2) bestimmt werden. Der Leitungsquerschnitt A sowie die spezifische elektrische Leitfähigkeit κ können Tabelle 1 entnommen werden. Die Kabellänge l ist bekannt (vgl. Abschnitt 2.2).

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} * l * I_B * \cos \varphi}{\kappa \cdot A} \quad (2)$$

Gemäß DIN EN 50160 sollen Änderungen der Versorgungsspannung unter normalen Betriebsbedingungen ± 10 % der Nennspannung nicht überschreiten. Wenngleich im Inselnetzbetrieb ein Spannungsfall von -15 % erlaubt ist, wird im Rahmen dieser Auswertung der maximal zulässige Spannungsfall im stationären Betrieb auf -10 % der Nennspannung festgelegt, da im Inselnetz bei Lastschaltungen größere Spannungsschwankungen als im Verbundnetz zu erwarten sind. Der im Falle einer MS-Verbindung relevante Erdschlussstrom pro Kilometer Kabellänge $I_{\text{CE_km}}$ kann entsprechend Gleichung (3) berechnet werden. Die Frequenz f beträgt 50 Hz, der Kapazitätsbelag der Kabel C'_E kann Tabelle 1 entnommen werden.

$$I_{\text{CE_km}} = 3 \cdot 2\pi f \cdot C'_E \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Gemäß DIN VDE 0845-6-2 darf der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} im isolierten Netz 35 A nicht überschreiten. Wird der maximal zulässige kapazitive Erdschlussstrom durch den Erdschlussstrom pro Kilometer dividiert, erhält man die maximal zulässige Gesamtkabellänge. Diese beträgt bei dem hier betrachteten MS-Kabeltyp ca. 17,5 km. Abbildung 9 soll die wichtigsten Zusammenhänge und Proportionalitäten graphisch veranschaulichen.

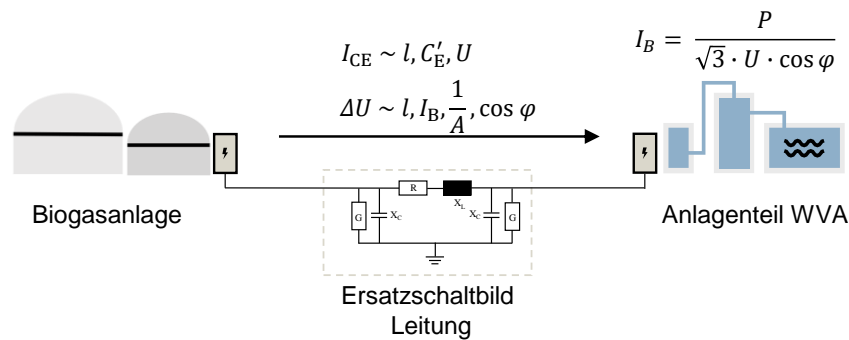


Abbildung 9: Veranschaulichung der technischen Zusammenhänge der Inselnetzversorgung

Abbildung 10 fasst die beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung der technischen Umsetzbarkeit der Inselnetzversorgung in Form eines Prozessdiagramms zusammen.

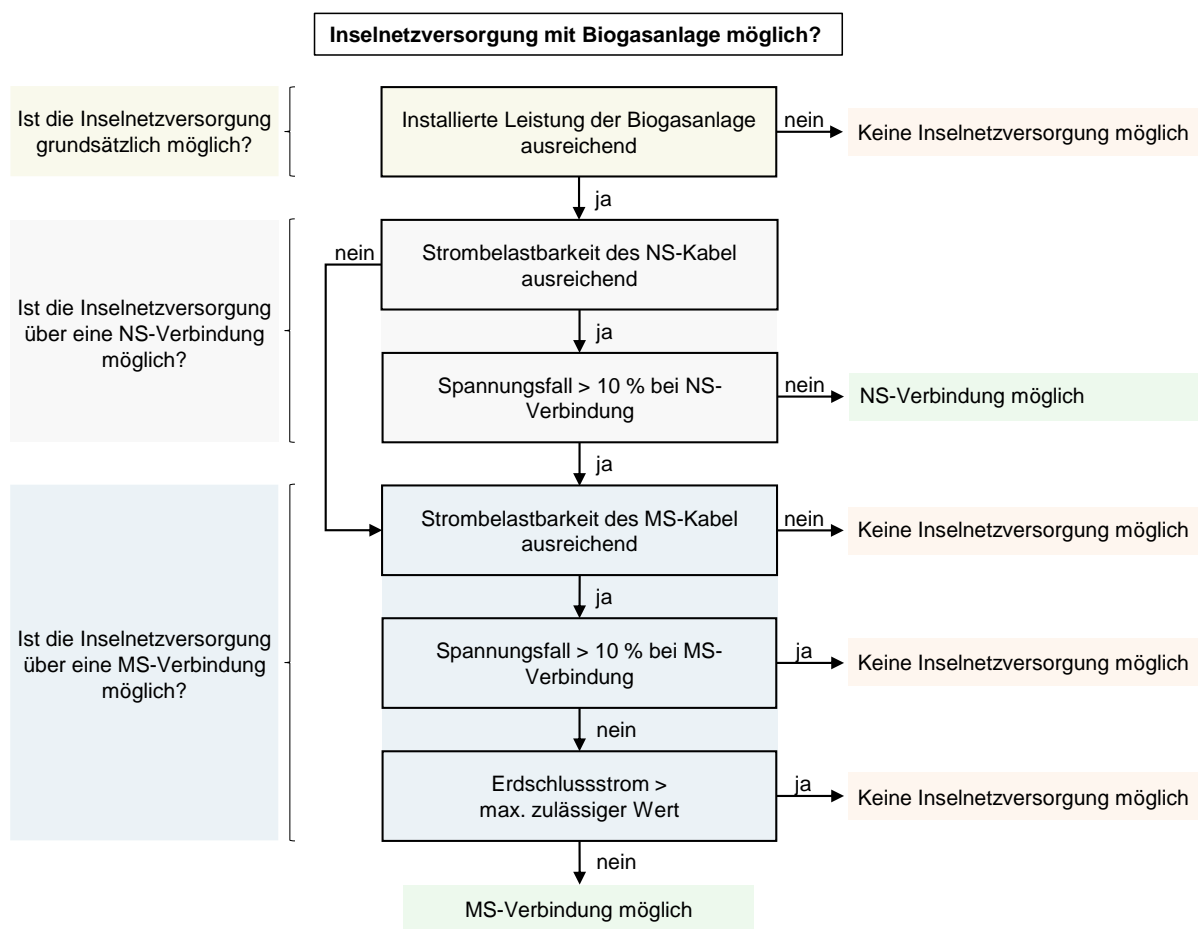


Abbildung 10: Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit der Inselnetznotstromversorgung

Die Konformität einer jeden Inselnetzkonstellation mit den definierten technischen Anforderungen bzgl. der Spannung an den Sammelschienen sowie der Auslastung der Betriebsmittel wird mithilfe einer Netzberechnungssoftware geprüft. Hierbei wird das Graphenmodell (vgl. Abbildung 8) automatisiert in ein rechenbares Netzmodell überführt.

Die Knoten des Graphen werden dabei im Netzmodell als Sammelschienen hinzugefügt und die entsprechenden Lasten angeschlossen. Die Kanten des Graphen werden als Kabel mit der entsprechenden Länge mit den jeweiligen Sammelschienen verbunden. Da es sich bei den

durchzuführenden Analysen um Lastflussberechnungen im stationären Zustand handelt, wird der Generator vereinfachend in Form eines externen Netzes modelliert und an der entsprechenden Sammelschiene hinzugefügt. Im Falle einer MS-Inselnetzversorgung wird zusätzlich ein Transformator an jedem Standort (Sammelschiene) ergänzt. Der Generator sowie die Lasten werden dann an der Unterspannungsseite des Transformators angeschlossen, während die MS-Kabel an der Oberspannungsseite angebracht werden. Die Auswahl der Transformatoren erfolgt in Abhängigkeit zur niederspannungsseitig angeschlossenen Last / Erzeugungsleistung aus Standardmodellen von [10].

Für jede Inselnetzkonstellation wird dann eine Lastflussberechnung im stationären und fehlerfreien Zustand gemäß des Newton-Raphson-Verfahrens durchgeführt und relevante Ergebnisse (z. B. Spannung an den Sammelschienen, Auslastung der Kabel) übergeben. Grundsätzlich werden stets drei Versorgungsvarianten untersucht:

- Einfache NS-Inselnetzversorgung (Verwendung eines NS-Kabels)
- NS-Inselnetzversorgung, bei welcher zwei NS-Kabel parallel verlegt werden
- MS-Inselnetzversorgung (Verwendung eines MS-Kabels)

2.3.1 Schwarzstart- und Inselnetzfähigkeit von Biogasanlagen

Zur Umsetzung einer Inselnetznotstromversorgung mit einer BGA als inselnetzbildende Einheit muss das entsprechende Biogasaggregat schwarzstart- und inselnetzfähig sein. Die grundsätzliche Eignung von Gasmotoren als Führungskraftwerke in Inselnetzen konnte bereits im Forschungsprojekt LINDA im Rahmen von Lastschaltversuchen auf einem Motorenprüfstand bestätigt werden [9]. Es gilt jedoch zu beachten, dass im aktuellen Anlagenbestand gegebenenfalls Nachrüstungen notwendig sind. Im Rahmen des Forschungsprojekts LINDA 4 H₂O fand diesbezüglich ein Austausch mit mehreren BHKW (Blockheizkraftwerk) Herstellern statt.

Es muss davon ausgegangen werden, dass der Anteil von schwarzstart- und inselnetzfähigen BHKW im Bestand im einstelligen Prozentbereich liegt und somit bei der Mehrheit der Bestandsbiogasanlagen eine Inselnetzversorgung nicht ohne Nachrüstungen möglich ist. In den meisten Anlagen sind allerdings gute Voraussetzungen für eine nachträgliche Ertüchtigung zu moderaten Kosten gegeben, wobei Art und Umfang der Nachrüstungen zwischen den einzelnen BHKW-Herstellern und Baureihen variieren können. Ein erster Überblick zu den durchzuführenden Maßnahmen wird in nachfolgender Auflistung gegeben:

- Änderung der Schaltanlage, um die Versorgung von Verbrauchern im Netzersatzbetrieb zu ermöglichen
- Softwareanpassung, welche die Umschaltung zwischen Insel- und Verbundnetzbetrieb ermöglicht (Drehzahlregelung im Inselnetzbetrieb vs. Leistungsregelung im Netzparallelbetrieb)
- Nachrüstung eines Automatic Transfer Switch, welcher es ermöglicht die Vorschmierung und die Kühlwasserpumpe wahlweise von der Sammelschiene (im Netzparallelbetrieb) oder dem Generator (im Inselnetzbetrieb) zu versorgen
- Falls nicht bereits vorhanden, ist die Nachrüstung von Starterbatterien notwendig, über welche das Sicherheitsabsperrventil, der Starter und die Steuerung des BHKW

versorgt werden. Es bietet sich ein redundanter Einsatz mehrerer Batterien an, um den Anlagenstart auch bei älter werdenden Batterien gewährleisten zu können

- Zusätzlich ist eine kleine unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage erforderlich, mit welcher die Brandmeldeanlage, die Gaswarnanlage, die Steuerung der BGA, die Gasfackel und der Gasverdichter notstromversorgt werden können

Bei den Anlagekomponenten Notkühler, Lüfter, Kühl-/Heizwasserpumpe, Rührwerk, Pumpen und Einbringtechnik ist eine sofortige Notstromversorgung nicht erforderlich. Es ist ausreichend diese nach dem Schwarzstart über den Generator zu versorgen.

Da anhand der zur Verfügung stehenden Daten des MaStR kein Rückschluss auf die Schwarzstart- und Inselnetzfähigkeit einer individuellen BGA gezogen werden kann, wird in dieser Arbeit vereinfachend angenommen, dass die für die Inselnetzversorgung infrage kommenden BGA entweder bereits in schwarzstart- und inselnetzfähiger Ausführung vorliegen oder diese entsprechend nachgerüstet werden können.

Neben den technischen Anforderungen stellen auch betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen ein wichtiges Kriterium zur Bewertung des Potenzials der Inselnetznotstromversorgung dar. Daher wird deren Analyse im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

2.4 Analyse betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen und Vergleich mit konventioneller Notstromversorgungslösung

Zur Analyse der betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Inselnetzversorgungsvarianten und des Vergleichs mit einer konventionellen Notstromversorgung mit Dieselaggregaten wird die Kapitalwertmethode angewendet. Hierbei handelt es sich um ein Instrument der dynamischen Investitionsrechnung, bei welchem sämtliche mit einer Investition verbundenen Zahlungen (initiale Investitionskosten und laufende Kosten) berücksichtigt werden. Alle Auszahlungen des gesamten Nutzungszeitraumes werden hierbei auf den Gegenwartswert (Kapitalwert K) abgezinst. [12] Da in den hier durchgeführten Berechnungen keine Einzahlungen, sondern lediglich Auszahlungen zum jeweiligen Zeitpunkt A_t berücksichtigt werden müssen, gilt Gleichung (4).

$$K = \sum_{t_a=0}^{n_d} -A_t \cdot (1+i)^{-t_a} \quad (4)$$

Hierbei beschreibt n_d die gesamte Nutzungsdauer des Investitionsobjektes und t_a das Jahr, in welchem die Auszahlung erfolgt. Der Kalkulationszinsfuß (Abzinsungssatz) wird durch i repräsentiert. Die zu berücksichtigenden Kosten der unterschiedlichen Notstromversorgungsvarianten werden in Tabelle 2 aufgeführt. Monatlich anfallende Kosten (z. B. Vergütung des BGA-Betreibers) werden für die Berechnungen mittels Kapitalwertmethode auf Gesamtjahreswerte aggregiert. Gemäß Richtwerten der Deutschen Bundesbank wird ein Kalkulationszinsfuß von 2 % verwendet [13].

Tabelle 2: Berücksichtigte Kosten bei der Realisierung der Notstromversorgungsvarianten

Kostenart	Variante ³	Kostenpunkt	Kosten UG	Kosten OG	Erläuterung / Quelle
Investitionskosten	1	NS-Kabel	50.000 € / km	60.000 € / km	inkl. Verlegung, nach [14]
	1	NH Sicherheitsleiste	600 € / Stück		Beispielprodukt: :hager LVSG2CPX [15]
	1, 2	Nachrüstung BGA	3.000 €	15.000 €	Bandbreite soll Nachrüstungskomplexität unterschiedlicher Aggregate abbilden
	2	MS-Kabel	100.000 € / km	110.000 € / km	inkl. Verlegung, angelehnt an [14]
	2	Lasttrennschalter	800 € / Stück		Beispielprodukt: :hager HCT250AR [16]
	2	MS/NS-ONS	37.500 € / Stück		Beinhaltet: Trafo, MS-Schaltanlage, NS-Verteilung, Sekundärtechnik und Gebäude (nach [14])
	3	Dieselaggregat	bis 20 kW: Systemkosten von 1.500 € / kW		In Anlehnung an [17] und [18]. Beinhaltet sind auch Kosten für die Notstromautomatik, Fernüberwachung, Kaltstartausrüstung, Kraftstofftank und weitere Kostenpunkte.
			ab 20 kW: Systemkosten von 500 € / kW		
3	Baukosten	Stellplatz / Raum: 1.171 € / m ²		Mittlere Kosten für den Bau eines Fabrik- und Werkstattgebäudes nach [19]	
		Bodenbeschichtung: 200 € / m ²		z. B. hochwertige Reaktionsharz-Beschichtung [20]	
Betriebskosten	1, 2	Kabel	1 % der Investition pro Jahr		nach [14]
	1, 2	Sonstige Anlagen des Stromnetzes	2 % der Investition pro Jahr		nach [14]
	1, 2	Vergütung BGA-Betreiber	200 € / Monat	2.000 € / Monat	standortindividuelle Verhandlung erforderlich
	3	Instandhaltung / Wartung	Aggregate bis 20 kW: 500 € / a		Geschätzte Wartungspauschale für Motorölwechsel, Ölfiltererneuerung, Luftfiltererneuerung, Kraftstofffiltererneuerung, Analyse der Kraftstoffqualität, monatlicher Probelauf, etc. in Anlehnung an [18] und [21]
			Aggregate über 20 kW: 1.000 € / a		
			Monatlicher Probelauf: 100 € / Monat		
3	Diesel	1,66 € / l	2,10 € / l	Soll Bandbreite von Kraftstoffpreisschwankungen abbilden	
3	Entsorgung Diesel	0,35 € / l		in Anlehnung an [22]	

³ 1: NS-Inselnetzversorgung, 2: MS-Inselnetzversorgung, 3: Dieselaggregat

Die Nutzungsdauer der eingesetzten Betriebsmittel für die Inselnetzversorgung (Kabel, Transformatoren, ONS, etc.) variiert zwischen 30 und 40 Jahren [14], weshalb eine Gesamtnutzungsdauer von 35 Jahren angesetzt wird. Es muss beachtet werden, dass die Gesamtdauer der Notstromversorgung auch mit dem BGA-Betreiber vertraglich geregelt werden sollte, so dass bei älteren Bestandsaggregaten die getroffenen Vereinbarungen auch für das „Nachfolgeaggregat“ Gültigkeit besitzen. Da die jährlichen Betriebszeiten der Notstrom-Dieselaggregate gering sind, wird davon ausgegangen, dass diese bei guter Wartung ebenfalls eine Lebensdauer von 35 Jahren erreichen können.

Existieren für eine WVA mehrere für eine Inselnetznotstromversorgung technisch geeignete BGA, werden die Kosten für das Inselnetz mit der geringsten Gesamtkabellänge (und somit auch den geringsten Kosten) bestimmt. Zur besseren Abbildung der realistischen Kostenspanne werden die Berechnungen zu den resultierenden Kosten stets für zwei Varianten durchgeführt. Hierdurch soll sowohl die Untergrenze (Kosten UG), als auch die Obergrenze der zu erwartenden Kosten (Kosten OG) bestimmt werden.

Bei einer NS-Inselnetzversorgung wird angenommen, dass an jedem Standort eine NH-Sicherheitsleiste (Trennvorrichtung) nachgerüstet werden muss. Werden Untersuchungen für den Fall von zwei parallel verlegten NS-Kabeln durchgeführt, erhöhen sich die Kabelkosten. Ein Großteil der Verlegungskosten, welche den Hauptteil der veranschlagten Gesamtkabelkosten bedingen [14], entfällt allerdings, da die Kabelgrabenbreite i. d. R. breit genug für zwei Kabelsysteme ist. Daher wird angenommen, dass die gesamten Kabelkosten bei der Parallelverlegung zweier Kabel lediglich das 1,4-fache⁴ der gesamten Kabelkosten eines einzelnen Kabels betragen.

Bei der MS-Inselnetzversorgung wird für die Bestimmung der Kosten UG unterstellt, dass an sämtlichen Standorten bereits eine Ortsnetzstation (ONS) mit freiem Abgang vorhanden ist und somit lediglich an jedem Standort ein Lasttrennschalter nachgerüstet werden muss. Bei der Berechnung der Kosten OG wird angenommen, dass keine ONS an den Standorten der WVA existieren. Somit muss an allen Standorten der WVA eine neue ONS errichtet und am Standort der BGA ein Lasttrennschalter nachgerüstet werden.

Im Falle einer konventionellen Notstromversorgung mittels Dieselaggregaten gelten die nachfolgenden Annahmen. Da die Notstromversorgung für eine Vollversorgung der WVA untersucht wird, wird angenommen, dass an jedem Standort der WVA ein Dieselaggregat benötigt wird. Typischerweise werden Dieselaggregate um den Faktor 2 überdimensioniert [17], weshalb beispielsweise einem Brunnen mit einem Gesamtleistungsbedarf von 25 kW ein Aggregat mit einer Leistung von 50 kW zugeordnet wird. Bei der Berechnung der Kosten UG wird davon ausgegangen, dass als Investitionskosten lediglich die Kosten für das Dieselaggregat anfallen, da entsprechende Räumlichkeiten für das Notstromaggregat bereits in sämtlichen Anlagenteilen der WVA vorhanden sind. Zudem wird angenommen, dass der Inhalt des Kraftstoff-Tagestanks jährlich, der in beistehenden Kraftstofftanks gelagerte Diesel allerdings lediglich alle zwei Jahre ausgetauscht wird. Für die Bestimmung der Kosten OG wird angenommen, dass an sämtlichen Standorten der WVA zunächst geeignete Räumlichkeiten für die Notstromversorgung geschaffen werden müssen und sowohl der Inhalt des Kraftstoff-Tagestanks, als auch

⁴ Kostenerhöhungsfaktor entstammt Austausch mit einem großen deutschen Verteilnetzbetreiber

der Inhalt der zusätzlichen Tanks einmal jährlich ausgetauscht wird. Dies stellt auch die Empfehlung des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) dar [23, S. 25].

Die Untersuchungen zur Umsetzbarkeit der Inselnetznotstromversorgung werden für mehrere Szenarien durchgeführt. Diese werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3 Untersuchte Szenarien

Durch die Definition mehrerer Szenarien zur Bewertung der technischen und betriebswirtschaftlichen Umsetzbarkeit der Inselnetznotstromversorgung sollen die Aussagekraft sowie Verallgemeinerbarkeit der Analysen weiter erhöht werden.

Im *Basisszenario* wird eine Vollversorgung der Bevölkerung betrachtet (reguläre Trinkwasserversorgung ohne Einschränkungen) und angenommen, dass kein nutzbares Bestandsnetz zwischen den jeweiligen Standorten der WVA und der BGA existiert. Das Inselnetz muss in diesem Fall gänzlich neu errichtet werden (vgl. Abschnitt 2.2). Für den Vergleich mit der konventionellen Notstromversorgungsalternative wird gemäß Empfehlung des BBK [23] eine zu gewährleistende Notstromversorgungsdauer von 72 h (3 Tage) angesetzt.

Das *Szenario Bestandsnetz* untersucht die Vollversorgung für den Fall eines vorhandenen und nutzbaren Bestandsnetzes zwischen den Anlagenteilen der WVA. Für die Netzmodellierung wird hierbei zunächst der minimale Spannbaum der Anlagenteile der WVA gebildet (dies repräsentiert das Bestandsnetz) und anschließend die BGA zum nächstgelegenen Knoten hinzugefügt (neu benötigter Netzabschnitt). Die zu gewährleistende Notstromversorgungsdauer für die konventionelle Notstromversorgungsalternative liegt ebenfalls bei 72 h.

Das *Szenario längere Notstromversorgung* ist identisch zum *Basisszenario*, jedoch wird die konventionelle Notstromversorgung gemäß aktueller Empfehlung des LfU [24] für eine Dauer von 168 h (7 Tage) ausgelegt.

Im *Szenario eingeschränkte Versorgung* wird ein reduzierter Trinkwasserbedarf unterstellt. Gemäß Konzeption Zivile Verteidigung müssen Wasserversorgungsunternehmen (WVU) die leitungsgebundene Versorgung mit Trinkwasser bei eingeschränkter Versorgung mit mindestens 50 l pro Person und Tag sicherstellen können [25]. Da das grundsätzliche Ziel der Notstromversorgung allerdings eine Vollversorgung der Bevölkerung darstellt, wird dieses Szenario im weiteren Verlauf nur qualitativ analysiert.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Untersuchungsszenarien

Name	Versorgungsart	Bestandsnetz	Dauer der Alternativnotstromversorgung
<i>Basisszenario</i>	Vollversorgung	kein nutzbares Bestandsnetz	3 Tage
<i>Szenario Bestandsnetz</i>	Vollversorgung	nutzbares Bestandsnetz zwischen Anlagenteilen d. WVA	3 Tage
<i>Szenario längere Notstromversorgung</i>	Vollversorgung	kein nutzbares Bestandsnetz	7 Tage
<i>Szenario eingeschränkte Versorgung</i>	eingeschränkte Versorgung	-	-

4 Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse für die 1.271 betrachteten bayerischen WVA mit Eigengewinnung werden im Folgenden zusammengefasst. Abbildung 11 zeigt, dass die technische Umsetzbarkeit einer Inselnetznotstromversorgung mit einem NS-Kabel in ca. 30 % der Fälle möglich ist. Wird ein zweites NS-Kabel parallel verlegt, steigt der Anteil aufgrund der resultierenden höheren Strombelastbarkeit sowie des geringeren Spannungsfalls auf etwa 43 %. Wird eine Mittelspannungsverbindung für das Inselnetz verwendet, ist sogar bei 78 % der WVA eine technische Umsetzbarkeit gegeben.

Bezüglich der technischen Umsetzbarkeit sind kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass die Umsetzbarkeit im *Szenario eingeschränkte Versorgung* höher als bei den anderen Szenarien liegt, da in diesem Fall in einigen WVA aufgrund der reduzierten Trinkwasserbereitstellung nicht sämtliche Wasserfassungen zur Wassergewinnung benötigt werden und somit der Leistungsbedarf und die Länge des Inselnetzes sinken.

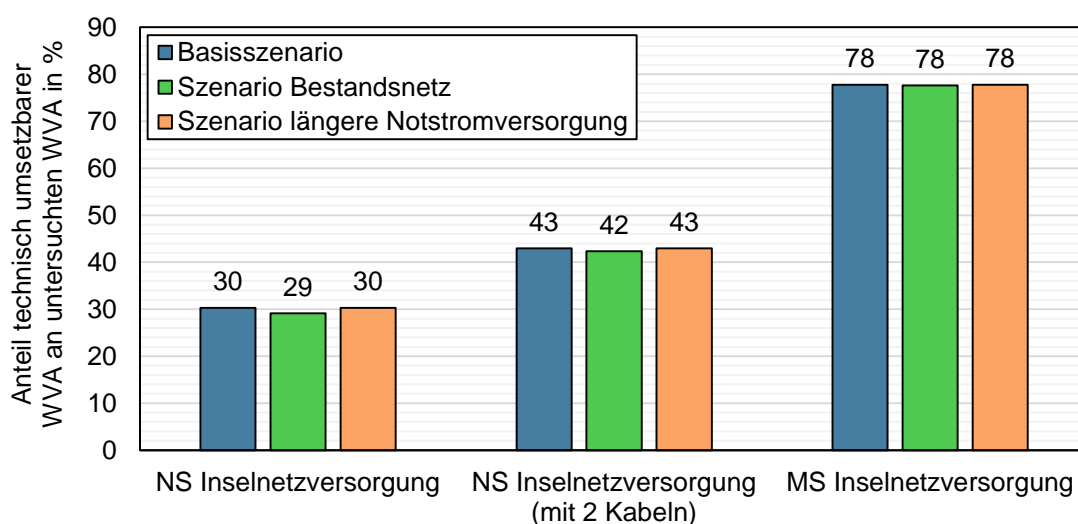


Abbildung 11: Anteil WVA, bei welchen eine technische Umsetzbarkeit der Inselnetzversorgung gegeben ist

Abbildung 12 fasst die Untersuchungen zur betriebswirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit zusammen. Die Konkurrenzfähigkeit wird hierbei folgendermaßen definiert: Die Inselnetznotstromversorgung einer WVA gilt als grundsätzlich betriebswirtschaftlich konkurrenzfähig, wenn deren Kosten UG geringer ist, als die Kosten OG der konventionellen Notstromversorgung. In diesem Fall überschneiden sich die realistischen Kostenspannen der beiden Varianten und es besteht die Möglichkeit, dass die Inselnetzversorgung günstiger ausfällt.

Es wird deutlich, dass eine betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit nur recht selten gegeben ist. Die geringste Konkurrenzfähigkeit liegt im *Basisszenario* vor, da in diesem angenommen wird, dass kein nutzbares Bestandsnetz vorhanden ist und somit die Kosten für die Errichtung des Inselnetzes voll anfallen. Wird ein vorhandenes Bestandsnetz unterstellt (*Szenario Bestandsnetz*) ist eine deutlich höhere betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit gegeben, da geringere Infrastrukturinvestitionen notwendig sind. Im Falle einer Mittelspannungsversorgung besteht hier bei 12 % der WVA eine betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit. Da im *Szenario längere Notstromversorgung* im Falle der konventionellen Notstromversorgung

mehr Diesel für die Gewährleistung der längeren Notstromversorgung bevorratet werden muss, resultieren bei der Notstromversorgung mit Dieselaggregaten höhere Kosten, weshalb auch hier die Konkurrenzfähigkeit höher als im *Basisszenario* ist. Die Kosten der Inselnetzversorgung bleiben gleich, da die Anlagen i. d. R. sowieso über eine Substratbevorratung für eine Dauer von mehreren Wochen oder sogar Monaten verfügen und somit keine zusätzlichen Bevorratungskosten entstehen. Es wird deutlich, dass die Konkurrenzfähigkeit der Inselnetzversorgungslösung mit zunehmender zu gewährleistender Notstromversorgungsdauer steigt.

Wird lediglich eine eingeschränkte Versorgung der Bevölkerung angestrebt (*Szenario eingeschränkte Versorgung*), kann davon ausgegangen werden, dass sich die Kosten der Inselnetzvariante deutlich verringern, da nicht mehr sämtliche Anlagenteile (Brunnen, Aufbereitungsanlagen) an das Inselnetz angeschlossen werden müssen. Grundsätzlich kann auch ein hybrides Notversorgungsmodell, bei welchem besonders geeignete Anlagenteile im Inselnetz und abgelegene Anlagenteile mit Dieselaggregaten notversorgt werden, eine kostenoptimale Lösung darstellen.

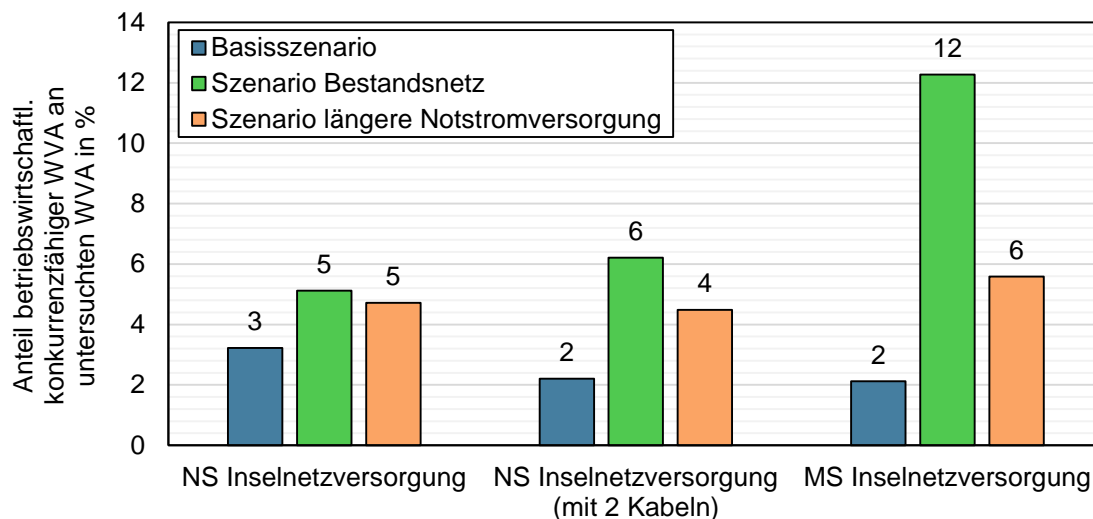


Abbildung 12: Anteil WVA, bei welcher eine betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der Inselnetzversorgung gegeben ist

Es kann zusammengefasst werden, dass szenarienunabhängig die technische Umsetzbarkeit der Inselnetzversorgung vergleichsweise häufig gegeben ist, während eine betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit nur in der Minderheit der Fälle vorliegt. Die Inselnetzversorgung weist allerdings mehrere non-monetäre Vorteile auf, welche im Folgenden Abschnitt erläutert werden sollen.

4.1 Non-monetäre Vorteile einer Inselnetznotstromversorgung

Der bedeutendste Vorteil der Inselnetznotstromversorgung ist die Möglichkeit einer signifikant längeren und weitgehend unabhängigen Notstromversorgung. Selbst bei einer Diesel-Kraftstoffbevorratung für eine 72 stündige Notstromversorgung gemäß Empfehlung des BBK kann bei einem langandauernden Stromausfall nur die ersten Tage die öffentliche Trinkwasserversorgung aufrechterhalten werden. Ob und in welcher Menge danach Kraftstofflieferungen erfolgen, kann aufgrund der bis dahin fortgeschrittenen Krisensituation kaum abgeschätzt werden. Da der Großteil der Netzersatzanlagen mit Diesel betrieben wird [17], und nahezu keine

Tankstelle in Deutschland über eine Notstromversorgung verfügt [2], muss ein ernster Kraftstoffengpass erwartet werden. Beeinträchtigungen der Verkehrsinfrastrukturen für die Transportfahrzeuge sowie die Problematik der komplexen Koordination und bedarfsgerechten Verteilung der Kraftstofflieferungen durch Krisenstäbe – bei zunehmend defizitären Kommunikationsmöglichkeiten – erschweren die Sicherstellung der Kraftstofflieferungen zusätzlich. [2]

Bei einer Inselnetznotstromversorgung über eine nahegelegene BGA können derartige Abhängigkeiten reduziert werden. Je nach Absprache und individuellen Voraussetzungen des BGA-Betreibers können der Fermentationsprozess und die Notstromversorgung über mehrere Wochen oder sogar Monate aufrechterhalten werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass Transport, Umschlagen und Lagerung des wassergefährdenden Stoffes Diesel in Trinkwasserschutzgebieten entfallen (demgegenüber ist jedoch sicherzustellen, dass das Einzugsgebiet der Wassergewinnung nicht von der BGA gefährdet werden kann). Die Inselnetznotstromversorgung mit einer BGA stellt zudem grundsätzlich eine ökologischere und regionale Form der Energiebereitstellung dar.

5 Rahmenbedingungen der Inselnetznotstromversorgung

Eine zuverlässige Inselnetznotstromversorgung kann nur realisiert werden, wenn auch technische, organisatorische und rechtliche Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Diese werden im Folgenden thematisiert.

5.1 Technische und organisatorische Rahmenbedingungen

Nur ein geringer Anteil der BGA ist bereits in schwarzstart- und inselnetzfähiger Ausführung, bei den meisten Anlagen sind diverse Nachrüstungen notwendig. Ein Überblick zu potenziell notwendigen Nachrüstungen wird bereits in Abschnitt 2.3.1 gegeben. Der Umfang der Nachrüstungen kann hierbei individuell sehr unterschiedlich ausfallen, weshalb zur jeweiligen Konzeptionierung i. d. R. ein Austausch mit dem entsprechenden Anlagenhersteller bzw. Vertriebspartner notwendig ist.

Neben den Umrüstungen, welche die Biogasanlage direkt betreffen, müssen für eine funktionierende Notstromversorgung jedoch noch weitere Anforderungen berücksichtigt werden. Ein wichtiger Faktor ist es, die Substrateinbringung sicherzustellen. Zwar ist die Biogasbildung ein träger Prozess, bei welchem die Gasproduktionsrate der eingebrachten Substrate erst nach mehreren Tagen ihren Spitzenwert erreicht und somit zunächst auch ohne neue Substratzugaben weiter Biogas erzeugt wird [26, S. 10-13], jedoch ist eine möglichst konstante Fermenterbeschickung für einen stabilen Gärprozess erstrebenswert [27, S. 9]. Dies ist insbesondere im Inselnetzbetrieb von Relevanz, da eine schwankende Biogasqualität Auswirkungen auf die Motorperformance haben kann. Daher ist es für eine länger andauernde Notstromversorgung erforderlich, sowohl ausreichend Substrat vorzuhalten, als auch Hilfsmedien (z. B. Diesel für Hilfsmaschinen zur Substratzuführung) verfügbar zu haben. Zur Befüllung eines Feststoffdosierers können beispielsweise Baggerlader oder Traktoren mit Ladeschaufel eingesetzt werden, für deren Betrieb dann ebenfalls Kraftstoff vorrätig sein muss.

Es muss stets eine ausreichende Substratverfügbarkeit für die vereinbarte Dauer der Notstromversorgung gewährleistet werden. BGA-Betreiber, mit welchen im Rahmen des Forschungsprojekts LINDA 4 H₂O ein Austausch stattfand, hatten aus Gründen der

schwankenden und saisonalen Substraternte i. d. R. sowieso ausreichend Substrat gelagert, um ihre Anlage hiermit für mehrere Monate betreiben zu können. Sollte jedoch kein ausreichender Substratbestand vorliegen, müssen die Anlagenbetreiber ggf. ihre Speicherkapazitäten erhöhen oder Fremdlieferungen von benachbarten Betrieben im Falle eines Blackouts vereinbaren. Für die Substratlieferung bzw. -abholung vom kooperierenden Betrieb müsste in diesem Fall ebenfalls ausreichend Kraftstoff bevorratet werden.

Neben der Sicherstellung der Substratzufuhr sind weitere Punkte zu beachten. Sollte die Inselnetzversorgung beispielsweise über eine Ortsnetzstation des Netzbetreibers erfolgen, muss dieser in die Organisation der Notstromversorgung miteinbezogen werden. Da der lokale Verteilnetzbetreiber über die Schaltheihe verfügt, muss dieser die für die Errichtung des Inselnetzes ggf. notwendigen Schaltheihen durchführen. Es sollte hierbei vorab mit dem WVU abgestimmt werden, in welchem zeitlichen Rahmen die Herstellung der Notstromversorgung erforderlich ist. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der in der Trinkwasserversorgung i. d. R. vorhandenen Hochbehälter ein Zeitfenster von mehreren Stunden für die Errichtung des Inselnetzes besteht.

Auch das Kommunikationsmedium zwischen den Beteiligten (insbesondere WVA-Verantwortlicher & BGA-Betreiber) sollte im Vorfeld für den Krisenfall festgelegt werden, da davon ausgegangen werden muss, dass bereits nach kurzer Zeit kaum noch auf die öffentlichen Kommunikationsinfrastrukturen zugegriffen werden kann [2]. Eine praktikable Alternative kann hier die Verwendung von batteriebetriebenen Funkgeräten sein.

Grundsätzlich gilt, dass ein individueller Ablaufplan für den Fall eines Blackouts erstellt werden sollte, welcher dann von den Beteiligten im Ernstfall befolgt wird. Hierbei ist es von herausragender Bedeutung, dass regelmäßige „scharfe“ Testläufe durchgeführt werden, welche es den Verantwortlichen ermöglichen, Routinen zu entwickeln und potenzielle Schwachstellen zu entdecken und zu beheben. Sollte der BGA-Betreiber zudem einen landwirtschaftlichen Betrieb führen, ist von diesem sicherzustellen, dass hier ggf. anfallende Tätigkeiten (z. B. Versorgung der Tiere) die Aufrechterhaltung der Notstromversorgungsinsel nicht gefährden.

Es wird deutlich, dass der BGA-Betreiber Präventivmaßnahmen (z. B. Vorhaltung von Substrat und Hilfsmedien, regelmäßige Testläufe) zu treffen hat und im Krisenfall eine große Verantwortung trägt. Als ein Anreiz zur Teilnahme an der Notstromversorgung sollte dieser daher eine leistungsgemäße Vergütung erhalten. So könnte beispielsweise im Falle eines landwirtschaftlichen Betriebs die Stromversorgung des Hofes ebenfalls in das Inselnetz mitaufgenommen werden. Auch eine monetäre Vergütung stellt eine Möglichkeit dar. Art und Umfang der Vergütung sind standortindividuell zu beurteilen und vertraglich zu fixieren (vgl. auch Abschnitt 5.2).

Eine weitere Möglichkeit zur Förderung der Partnerschaft zwischen WVU und BGA-Betreiber stellt ein Power Purchase Agreement dar, welches einen Stromlieferungsvertrag zwischen den beiden Parteien auch im Normalbetrieb ermöglicht. Dies kann insbesondere nach Auslaufen der EEG-Vergütung der Biogasanlage und bei Vorhandensein einer Direktleitung (keine Nutzung des öffentlichen Netzes) zwischen BGA und WVA eine attraktive Lösung für beide Seiten sein. Kann die Energieversorgung über eine Direktleitung erfolgen, entfallen die Netzentgelte sowie sämtliche weiteren netzentgeldbezogenen Preisbestandteile einschließlich der Konzessionsabgabe. Auch eine Stromsteuerbefreiung ist in diesem Fall möglich. [28] Durch dieses

Modell können sowohl WVU, als auch der BGA-Betreiber finanziell profitieren und langfristig risikoarme Preissicherheit schaffen.

5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Werden im Rahmen eines Repowering wesentliche Änderungen an der BGA durchgeführt, so ist u. U. eine Genehmigung nach § 16 BImSchG erforderlich. Wesentliche Änderungen der Lage, Beschaffenheit oder des Betriebs der Anlage werden hierbei als Änderungen definiert, durch die nachteilige Auswirkungen hervorgerufen werden können und die für die Prüfung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz erheblich sein können (z. B. Austausch des BHKW Motors, sofern nicht baugleich). [29] Dass es sich bei den für die Schwarzstartfähigkeit teilweise erforderlichen Anlagennachrüstungen um erhebliche Änderungen handelt, kann jedoch als unwahrscheinlich eingeschätzt werden. Dieser Eindruck wurde von lokalen Immissionsschutzbehörden bestätigt.

Sollte für die Inselnetznotstromversorgung eine Kabelneuverlegung in die Schutzzonen eines Trinkwasserschutzgebietes erforderlich sein, muss beachtet werden, dass hier erweiterte Schutzanforderungen gelten, eine Ausnahme von der Schutzgebietsverordnung zu erteilen ist und die Kabel unter geringstmöglicher Störung der Bodenverhältnisse zu verlegen sind [30].

Zudem stellt die vertragliche Ausgestaltung der Kooperation zwischen WVU und BGA-Betreiber eine wichtige rechtliche Anforderung dar. Da davon auszugehen ist, dass die WVU den BGA-Betreibern in den meisten Fällen eine Vergütung für die Bereitstellung der Notstromversorgung bezahlen, sollten die Rahmenbedingungen der Notstromversorgung vertraglich fixiert werden. Hierbei sollten neben der Übernahme potenzieller Kosten (z. B. Kabelverlegung, Nachrüstung der BGA) sowohl Art und Umfang der Vergütung des BGA-Betreibers, als auch die Eigentumsverhältnisse (falls z. B. das WVU die Nachrüstung einer USV-Anlage für die BGA bezahlt, gehört diese dann auch dem WVU?) definiert werden. Außerdem sollten die Dauer der geplanten Kooperation sowie ggf. auch Entschädigungszahlungen bei Nichteinhaltung des Vertrags festgehalten werden. Hierzu gehört auch die Beantwortung folgender Fragestellungen:

- Was passiert, wenn im Blackout-Fall entgegen der Absprache keine Notstromversorgung erfolgt (z. B. aufgrund eines Defekts / Wartung der BGA)?
- Was passiert, sollte der BGA-Betreiber die Anlage vor Vertragsende stilllegen (z. B. weil das Ende der Anlagenlebensdauer erreicht ist oder Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen einen Weiterbetrieb der BGA unwirtschaftlich machen)?
- Wie wird im Falle eines Wechsels des Anlagenbetreibers verfahren?
- Wer haftet für möglicherweise entstehende Schäden (z. B. durch Überspannung)?

Es ist davon auszugehen, dass die Höhe der Vertragsstrafen direkt proportional zur Höhe der Vergütung des BGA-Betreibers ausfällt. Zu berücksichtigen ist zudem die Frage nach der EEG-Konformität der Inselnetzversorgung. Grundsätzlich müssen gemäß EEG 2021 § 21b Absatz 1 Anlagenbetreiber jede Anlage einer Veräußerungsform zuordnen (Marktprämie, Einspeisevergütung oder Direktvermarktung). Gemäß EEG 2021 § 21b Absatz 4 können Anlagenbetreiber jedoch unabhängig von Absatz 1 Strom vollständig oder anteilig an Dritte weitergeben, sofern diese den Strom in räumlicher Nähe zur Anlage verbrauchen und der Strom nicht durch ein öffentliches Netz übertragen wird. Befindet sich eine BGA

also beispielsweise im Vergütungsmodell der Marktprämie, möchte aber im Blackout-Fall Strom an die benachbarte WVA liefern, so ist dies im Falle einer vorhandenen Direktleitung möglich, ohne dass der BGA-Betreiber den Verlust von EEG-Vergütungsprivilegien zu befürchten hat.

6 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Umsetzbarkeit einer lokalen Inselnetznotstromversorgung von WVA mit BGA im Falle eines Blackouts zu analysieren. Hierfür wurde zunächst der Biogasanlagenbestand in Bayern analysiert. Im Freistaat gibt es über 5.000 potenziell relevante Biomasseeinheiten. Die durchschnittliche Einheit hat eine installierte Leistung von 270 kW. Bei der Mehrheit der Bestandsbiogasanlagen ist eine Inselnetznotstromversorgung nicht ohne Nachrüstungen möglich, jedoch sind in den meisten Anlagen gute Voraussetzungen für eine nachträgliche Ertüchtigung gegeben.

Die Daten der BGA wurden dann mit den bereits vorliegenden Daten zu den WVA verschnitten, um die Umsetzbarkeit der Inselnetzversorgungslösung zu bewerten. Insgesamt wurden 1.271 WVA mit Eigengewinnung (mit Brunnen) auf die technische Umsetzbarkeit einer Inselnetznotstromversorgung hin untersucht. Zur Modellierung der potenziellen Inselnetze wird mittels Kruskal Algorithmus der minimale Spannbaum der Anlagenteile der WVA und der BGA einer jeden geeigneten Versorgungsmöglichkeit bestimmt. Die Länge der zu verlegenden Kabel wurde hierbei realitätsnah anhand der kürzesten Entfernung entlang des bestehenden öffentlichen Straßenverkehrsnetzes unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus bestimmt. Das resultierende Netzmodell wurde automatisiert in eine Netzberechnungssoftware eingelesen und eine Lastflussberechnung im stationären Zustand durchgeführt.

Zur Erhöhung der Aussagekraft und Verallgemeinerbarkeit der Analysen wurden mehrere Szenarien untersucht. Hierbei wurden die Fälle ohne nutzbares Bestandsnetz, mit nutzbarem Bestandsnetz, mit längerer Notstromversorgung sowie mit eingeschränkter Trinkwasserversorgung betrachtet. Es wurden jeweils die Variante einer einfachen NS-Inselnetzversorgung, einer NS-Inselnetzversorgung bei Parallelverlegung zweier Kabel, sowie eine MS-Inselnetzversorgung analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen ergaben, dass je nach Szenario und Versorgungsvariante bei 29 % bis 78 % der WVA eine Inselnetznotstromversorgung technisch umsetzbar ist.

Anschließend wurden betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen der Inselnetzversorgungsvarianten analysiert und anhand der Kapitalwertmethode mit einer konventionellen Notstromversorgung mit Dieselaggregaten verglichen. Es wurde deutlich, dass eine Inselnetznotstromversorgung meist teurer als eine konventionelle Notversorgung ist, es allerdings auch mehrere WVA in Bayern gibt, bei welchen die Inselnetzlösung betriebswirtschaftlich konkurrenzfähig sein kann.

Die Inselnetznotstromversorgung stellt eine interessante Alternative zu konventionellen Dieselaggregaten dar, welche häufig eine Treibstoffbevorratung in Wasserschutzgebieten erfordern und eine unabhängige Notstromversorgung für eine nur vergleichsweise kurze Zeit gewährleisten können. Je nach Anlage, Einbringtechnik und Absprache mit dem BGA-Betreiber kann durch diese eine ökologischere, unabhängigere und deutlich länger andauernde Notstromversorgung realisiert werden. Hierdurch können höhere Versorgungssicherheiten für die

Aufrechterhaltung der öffentlichen Trinkwasserversorgung erzielt sowie signifikante Stromausfallkosten und gesamtgesellschaftliche Schäden reduziert werden.

Eine zuverlässige Inselnetznotstromversorgung kann nur realisiert werden, wenn auch technische, organisatorische und rechtliche Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Hierzu gehören beispielsweise das Vorhalten von ausreichend Substrat und notwendigen Hilfsmedien, die regelmäßige Durchführung scharfer Testläufe sowie die Ausgestaltung eines rechtsverbindlichen Vertrags zwischen BGA-Betreiber und WVU.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Ergebnisse ein großes Potenzial für die Nutzung von BGA zur Notstromversorgung von WVA im Freistaat Bayern aufzeigen. Im nächsten Schritt soll das Konzept im Rahmen von Pilotvorhaben in die Praxis überführt werden. Hierbei können weitere Erkenntnisse zur Lastschaltperformance von Gasmotoren, zur Wirksamkeit von Maßnahmen zur Frequenzstabilisierung und zur Übertragbarkeit auf andere Einsatzorte gewonnen werden. Auch kann mit Hilfe der Erfahrungen aus der Praxis eine detailliertere Ableitung von Handlungsempfehlungen erfolgen.

7 Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, *Extremwetterereignisse*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/themen/gesundheitschemikalien/gesundheitschemikalien-im-klimawandel/extremwetterereignisse> (Zugriff am: 9. Dezember 2022).
- [2] T. Petermann, H. Bradke, A. Lüllmann, M. Poetzsch und U. Riehm, *Was bei einem Blackout geschieht: Folgen eines langandauernden und großflächigen Stromausfalls*, 2. Aufl. Berlin: edition sigma, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/buecher/petermann-etal-2011-141.pdf>
- [3] Hochschule Augsburg, *LINDA 4 H2O*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hs-augsburg.de/Elektrotechnik/LINDA-4-H2O.html> (Zugriff am: 9. Dezember 2022).
- [4] D. J. Storch, S. Kreutmayr, S. Seifried, C. Gutzmann, M. Finkel und R. Witzmann, „Analyse typischer Trassenfaktoren von kabelbasierten Verteilnetzen und Validierung des Dijkstra-Algorithmus zur Modellierung der Kabelverlegung“, 13. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2023.
- [5] P. Stratmann, „Marktstammdatenregister (MaStR): Registrierungspflicht für alle Stromerzeugungsanlagen“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschUndMonitoring/MaStR/Netzbetreiber/InfoschreibenAnlagenbetreiber2019.pdf
- [6] V. Vignesh, D. Pavithra, K. Dinakaran und C. Thirumalai, „Data analysis using box and whisker plot for stationary shop analysis“ in *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, Tirunelveli, 2017, S. 1072–1076, doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300874.
- [7] D. Storch, M. Finkel und R. Witzmann, „Charakterisierung bayerischer Trinkwasserversorgungsanlagen und Approximation des zugehörigen elektrischen Leistungsbedarfs“, *DVGW energie | wasser-praxis*, Jg. 73, 09/2022, S. 32–39, 2022.
- [8] Netze BW GmbH, „Information für Bauunternehmen: Schutz von Kabel, Rohr- und elektrischen Freileitungen“, 2021. [Online]. Verfügbar unter:

- https://assets.ctfassets.net/xytbf1vrn7of/1KPPI2rW36wEQUKkMceGcM/7d5c64a00afe46509b199f7898c1349a/Information_f__r_Bauunternehmen.pdf. Zugriff am: 13. Dezember 2022.
- [9] C. J. Steinhart *et al.*, „Gasmotoren als Führungskraftwerk im Inselnetzbetrieb“, *ew Magazin für die Energiewirtschaft*, 3-4 | 2018, S. 38–42, 2018.
- [10] *PowerFactory: Betriebsmittel Bibliothek*. DlgSILENT, 2022.
- [11] Aluminium-Zentrale e.V., „Aluminium in der Elektrotechnik und Elektronik“. Merkblatt E 1 - 1. Auflage. [Online]. Verfügbar unter: http://www.aluinfo.de/files/_media/dokumente/Downloads/Technische%20Daten/Merkblaetter/E1_Aluminium_in_der_Elektrotechnik_und_Elektronik.pdf. Zugriff am: 13. Dezember 2022.
- [12] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, *Organisationshandbuch: Quantitative Bewertungsmethoden*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/65_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/651_Quantitative/quantitative_inhalt.html (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [13] Deutsche Bundesbank, *Abzinsungszinssätze gem. § 253 Abs. 2 HGB / 10-Jahresdurchschnitt / 35,0 Jahre RLZ / Monatsendstand*. [Online]. Verfügbar unter: <https://api.statistiken.bundesbank.de/rest/download/BBK01/WV0035?format=csv&lang=de> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [14] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, „Projekt Merit Order Netz-Ausbau 2030 (MONA 2030): Teilbericht Maßnahmenklassifizierung“, München. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/10/20170403_MONA_Teilbericht_Massnahmenklassifizierung.pdf. Zugriff am: 21. Februar 2022.
- [15] :hager, *LVSG2CPX - Schaltleiste NH2 3p M12 | Hager DE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://hager.com/de/katalog/produkt/lvsg2cpx-schaltleiste-nh2-3p-m12> (Zugriff am: 21. Februar 2022).
- [16] :hager, *HCT250AR - Lasttrennschalter h3+ P250 3x250A | Hager DE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://hager.com/de/katalog/produkt/hct250ar-lasttrennschalter-h3-p250-3x250a> (Zugriff am: 21. Februar 2022).
- [17] D. Hart, F. Lehner und X. Hansen, *Sichere Stromversorgung für die digitale Gesellschaft: Untersuchung des europäischen Marktes für Netzersatzanlagen bis 100 kW Leistung*. Abschlussbericht. [Online]. Verfügbar unter: https://www.e4tech.com/uploads/files/Sichere-Stromversorgung-fuer-die-digitale-Gesellschaft_NEA-bis-100-kW.pdf (Zugriff am: 23. Februar 2022).
- [18] J. Kurtz, G. Saur, S. Sprik und C. Ainscough, „Backup Power Cost of Ownership Analysis and Incumbent Technology Comparison“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60732.pdf>. Zugriff am: 2. März 2022.
- [19] Statistisches Bundesamt, *Bauen und Wohnen: Baugenehmigungen / Baufertigstellungen*. Baukosten. [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baugenehmigungen-baukosten-xlsx-5311103.xlsx?__blob=publicationFile (Zugriff am: 23. Februar 2022).
- [20] Kostencheck, *Epoxidharz-Bodenbeschichtung: welche Kosten fallen dafür an?* [Online]. Verfügbar unter: <https://kostencheck.de/epoxidharz-bodenbeschichtung-kosten> (Zugriff am: 23. Februar 2022).
- [21] S. Baltruschat, *Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen als Netzersatzanlage für Basisstationen des Digitalfunks*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/37583621->

- Einsatz-von-wasserstoff-brennstoffzellen-als-netzersatzanlage-fuer-basisstationen-des-digitalfunks.html (Zugriff am: 2. März 2022).
- [22] Heizung 11880.com, *Tankreinigung: Diese Kosten kommen auf Sie zu*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.11880-heizung.com/preisvergleich/tankreinigung-kosten> (Zugriff am: 23. Februar 2022).
- [23] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, *Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-13-notstromversorgung-unternehmen-behoerden.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (Zugriff am: 23. Februar 2022).
- [24] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Sicherheit der Wasserversorgung in Not-, Krisen- und Katastrophenfällen“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lfu.bayern.de/publikationen/get_pdf.htm?art_nr=lfu_was_00317. Zugriff am: 18. November 2022.
- [25] Bundesministerium des Innern, „Konzeption Zivile Verteidigung (KZV)“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/bevoelkerungsschutz/konzeption-zivile-verteidigung.pdf;jsessionid=A8A7AFEA0B402A7117260ADBEF70DE9C.2_cid295?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am: 18. November 2022.
- [26] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Biogashandbuch Bayern Kapitel 1.1 bis 1.8“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lfu.bayern.de/energie/biogashandbuch/doc/kap1bis18.pdf>. Zugriff am: 22. November 2022.
- [27] Dirk Walter, *Sicherer Betrieb von Biogasanlagen: Gesetzliche Normen praktisch umsetzen*. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 2013.
- [28] Johannes Hilpert, „Rechtliche Bewertung von Power Purchase Agreements (PPAs) mit erneuerbaren Energien“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2019/02/Stiftung_Umweltenergierecht_WueStudien_12_PPA.pdf. Zugriff am: 23. November 2022.
- [29] Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Materialienband Biogashandbuch Kapitel 2.1*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lfu.bayern.de/energie/biogashandbuch/doc/kap21.pdf>
- [30] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Merkblatt Nr. 1.2/9 - Planung und Errichtung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen in Trinkwasserschutzgebieten“, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil1_grundwasserwirtschaft/doc/nr_129.pdf. Zugriff am: 23. November 2022.