Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 12. Dezember 2022

BackupFlex

Notbetrieb mit dezentralen Anlagen

Quelle: Holzhof

Datum: 12. Dezember 2022

Ort: Bern

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:
Fleco Power AG
Technoparkstrasse 2, 8406 Winterthur
www.flecopower.ch

Otto Wartmann, Käserei und Landwirtschaft
Hüttlingerstrasse 22, 8514 Amlikon-Bissegg
holzhof.ch

Autor/in:
Martin Schröcker, Fleco Power AG, martin.schroecker@flecopower.ch
Urs Zahnd, Fleco Power AG, urs.zahnd@flecopower.ch
Otto Wartmann, Käserei und Landwirtschaft, wartmann@holzhof.ch

BFE-Projektbegleitung:
Karin Söderström, karin.soederstroem@bfe.admin.ch
Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502155-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Im Projekt «BackupFlex» konnte in praktischen Feldtests demonstriert werden, wie die Notstromversorgung von Landwirtschaftsbetrieben auch über einen längeren Zeitraum, z.B. während eines grossräumigen Blackouts, sichergestellt werden kann.

Die Ergebnisse der Grundlagenarbeit im Projekt zeigen, dass sich der sogenannte Notbetrieb unter Einbezug von dezentralen Erzeugungseinheiten der erneuerbaren Energien in der Breite umsetzen liesse. Die Analysen zeigen aber auch, dass problematische Energielücken auftreten können, wenn das Konzept auf Photovoltaikanlagen limitiert wird. Ein sicherer Notbetrieb wird daher auf Photovoltaikanlagen in Kombination mit weiteren, saisonal unabhängigen, Energiequellen aufbauen müssen. Die Integration von mehreren Energiequellen in einem gemeinsamen Notnetz wird die bereits beträchtliche technische Komplexität des Notbetriebs jedoch zusätzlich erhöhen.

Die verschiedenen Feldtests im Projekt haben klar aufgezeigt, dass der Netzaufbau im Inselnetz in der Praxis alles andere als trivial ist. Mehrere Schwarzstartversuche sind an fehlerhaften Einstellungen oder defekten Komponenten gescheitert. Wichtig ist allerdings auch die Erkenntnis, dass nach einem gelungenen Netzaufbau der stabile Notbetrieb jeweils problemlos etabliert werden konnte. Ebenfalls während Feldtests konnte gezeigt werden, dass sich – wenn die entsprechenden technischen Voraussetzungen gegeben sind – verschiedene Erzeugungstechnologien der erneuerbaren Energien für den Notbetrieb kombinieren lassen. So waren während verschiedenen Tests die Biogasanlage und die Photovoltaikanlage zeitgleich im Notnetz aktiv.

Sowohl während der Grundlagenarbeit als auch während den Feldtests konnten auch konzeptionelle Schwachstellen und Lücken des Notbetriebs mit dezentralen Anlagen identifiziert werden. Exemplarisch sei an dieser Stelle die technisch unzureichende beziehungsweise finanziell unattraktive Nachrüstbarkeit von Bestandsanlagen genannt.

Eine grundsätzliche Herausforderung zeigte sich schliesslich bei der Information der betroffenen Landwirtschaftsbetriebe. Spätestens seit dem Frühjahr 2022 ist das Interesse für das Thema zwar sehr gross und die Branche scheint besser sensibilisiert zu sein. Es besteht in der Branche aber weiterhin ein erheblicher Informationsbedarf. Notwendig wären zudem speziell auf die Landwirtschaft zugeschnittene Konzepte, um die Risiken von langandauernden Stromausfällen adäquat abmildern zu können.

Résumé

Le projet «BackupFlex» a permis de démontrer, dans le cadre de tests pratiques sur le terrain, comment l'alimentation électrique de secours des exploitations agricoles peut être assurée sur une longue période, par exemple pendant un black-out à grande échelle.

Les résultats du travail de base effectué dans le cadre du projet montrent que le fonctionnement dit de secours pourrait être mis en œuvre à grande échelle en intégrant des unités de production décentralisées d'énergies renouvelables. Mais les analyses montrent également que des lacunes énergétiques problématiques peuvent apparaître si le concept est limité aux installations photovoltaïques. Une exploitation de secours sûre devra donc se baser sur des installations photovoltaïques combinées à d'autres sources d'énergie indépendantes des saisons. Cependant, l'intégration de plusieurs sources d'énergie dans un réseau de secours commun augmentera encore la complexité technique déjà considérable de l'exploitation de secours.

Les différents tests sur le terrain réalisés dans le cadre du projet ont clairement montré que la mise en place du réseau dans un réseau isolé est loin d'être triviale dans la pratique. Plusieurs tentatives de démarrage au noir ont échoué en raison de réglages erronés ou de composants défectueux. Il est toutefois important de noter qu'après une mise en place réussie du réseau, le fonctionnement de secours stable a pu être établi sans problème. Les tests sur le terrain ont également montré que, lorsque les conditions techniques sont réunies, il est possible de combiner différentes technologies de production d'énergie renouvelable pour l'exploitation de secours. Ainsi, lors de différents tests, l'installation de biogaz et l'installation photovoltaïque ont été actives en même temps sur le réseau de secours.

Tant le travail de base que les tests sur le terrain ont permis d'identifier les points faibles et les lacunes conceptuelles de l'exploitation de secours avec des installations décentralisées. A titre d'exemple, on peut citer la possibilité de rééquiper les installations existantes, insuffisante sur le plan technique ou peu intéressante sur le plan financier.

Enfin, l'information des exploitations agricoles concernées a constitué un défi fondamental. Depuis le printemps 2022 au plus tard, l'intérêt pour le sujet est certes très grand et le secteur semble mieux sensibilisé. Mais le besoin d'information reste important dans le secteur. Il serait en outre nécessaire d'élaborer des concepts spécialement adaptés à l'agriculture afin de pouvoir atténuer de manière adéquate les risques liés aux pannes de courant de longue durée.

Summary

In the «BackupFlex» project, it was possible to demonstrate in field tests how the emergency power supply of farms can be ensured over long periods of time, e.g. during a large-scale blackout.

It was possible to show that such emergency operations can be implemented on a broad scale with the inclusion of decentralised renewable energy generation. However, the analyses also show that problematic energy gaps can occur if the concept is limited to photovoltaic systems. Secure emergency operation will therefore have to be based on photovoltaic systems in combination with other, seasonally independent energy sources. However, the integration of several energy sources in a common emergency grid will further increase the already considerable technical complexity of emergency operation.

The various field tests in the project have clearly shown that grid management in the island grid is anything but trivial in practice. Several black start attempts failed due to faulty settings or defective components. However, it is also important to realise that after a successful grid setup, stable emergency operation could be established without any problems. It was also shown during field tests that different renewable energy generation technologies can be combined for emergency operation if the appropriate technical conditions are met. During various tests, the biogas plant and the photovoltaic plant were simultaneously active in the emergency grid.

Both during the theoretical project work and during the field tests, it was possible to identify conceptual weaknesses and gaps in emergency operation with decentralised plants. One example is the technically insufficient or financially unattractive retrofitting of existing plants.

Finally, a fundamental challenge emerged in informing the affected farms. Since spring 2022 at the latest, there has been a great deal of interest in the topic of emergency power supply and the sector seems to be more aware of the issue. However, there is still a considerable need for information in the sector. Concepts tailored specifically to agriculture would also be necessary in order to adequately mitigate the risks of prolonged power outages.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**

Résumé **4**

Summary **5**

Inhaltsverzeichnis **6**

1 Einleitung **7**

2 Vorgehen und Methode **7**

3 Arealnetz «Holzhof» **9**

4 Grundlagen zum Notbetrieb **10**

4.1 Voraussetzungen für den Notbetrieb 10

4.2 Potential der dezentralen Notstromversorgung 12

4.3 Integration von Photovoltaik und Batteriespeicher ins Notnetz 14

5 Ergebnisse aus den Feldtests **17**

5.1 Notbetrieb stellt hohe Anforderung an Personal und Technik 17

5.2 Netzqualität im Notnetz ausserhalb der Norm EN 50160 20

5.3 Gelungene Integration der Photovoltaikanlage ins Notnetz 22

5.4 Monitoring muss ausgebaut werden 24

6 Identifizierte Lücken **27**

6.1 Sicherstellung der Netzqualität in Inselnetzen 27

6.2 Nachrüstung von bestehenden Photovoltaikanlagen 27

6.3 Zusammenspiel Photovoltaik mit weiteren Energiequellen 27

6.4 Sensibilisierung der Öffentlichkeit 28

7 Zusammenfassung und Ausblick **29**

8 Anhang **30**

8.1 Beispielprotokoll eines Feldtests 30

Quellenverzeichnis **32**

Abbildungsverzeichnis **33**

1 Einleitung

Länger anhaltende Stromausfälle («Blackouts») sind für die Schweizer Bevölkerung und alle Wirtschaftsbereiche eine ernstzunehmende Bedrohung. Dazu gehört in besonderem Masse die Landwirtschaft, da das Tierwohl und damit die Existenzgrundlage vieler Betriebe bei einem andauernden Ausfall von Lüftungen, Melkanlagen oder Heizungen bereits nach kurzer Zeit stark gefährdet sind.

Ein Notstrombetrieb mit dedizierten, dieselbetriebenen Notstromaggregaten wie im Fall von Krankenhäusern oder Flughäfen ist zwar denkbar. Die Umsetzung scheitert aber meist an den Investitionskosten und den hohen Anforderungen an das Diesellager. Zudem sind Anlagen, die nur sehr selten eingesetzt werden, erfahrungsgemäss schlechter gewartet als Anlagen, die täglich im Einsatz stehen. Schliesslich ist auch der Landwirt selbst generell wenig vertraut mit dem Betrieb von Notstromanlagen. Daher fokussiert das Projekt «BackupFlex» auf eine Notversorgung mit in der Landwirtschaft verbreiteten Erzeugungseinheiten bei möglichst minimalen Anpassungen.

Landwirtschaftsbetriebe verfügen heute bereits vielfach über Photovoltaik- und Biogasanlagen und somit über das Potential, auch während eines langandauernden Stromausfalls die Stromversorgung von kritischen Stromverbrauchern sicherstellen zu können. Dies ist mit der aktuellen technischen Ausrüstung der Anlagen aber meist nicht möglich. Aus Sicherheitsgründen (und regulatorisch vorgegeben) sind diese Produktionsanlagen so konfiguriert, dass sie bei einem Ausfall des Netzes keinen Strom mehr einspeisen.

Das Projekt «BackupFlex» hat sich zum Ziel gesetzt, diese bestehenden Stromproduktionsanlagen mit minimalen Anpassungen für einen Notbetrieb in einem klar definierten Notnetz verfügbar zu machen. Umfangreiche Feldtests sind denn auch ein entscheidender Aspekt des Projekts, um die Umsetzbarkeit des Lösungskonzepts praktisch belegen zu können.

2 Vorgehen und Methode

Das Pilotprojekt wurde thematisch in drei Arbeitsblöcke gegliedert:

1. Erarbeitung der theoretischen Grundlagen, insbesondere zu den Voraussetzungen und zum Potential des Notbetriebs
2. Vorbereitung des Arealnetzes für den Notbetrieb, inklusive der Entwicklung und Installation von Messeinrichtungen
3. Durchführung der Feldtests

Die Zuordnung der einzelnen Arbeitspakete auf die drei Arbeitsblöcke ist in Abbildung 1 dargestellt: Ein weiteres Arbeitspaket bestand zudem in der breiten Kommunikation der Ergebnisse (AP09).

Arbeitsblock	**Arbeitspaket**	**Inhalt**
Grundlagen	AP01	Startup
	AP02	Potentialanalyse
	AP03	Vertiefung Photovoltaik und Batteriespeicher
	AP04	Technik, Betriebskonzept und Schnittstellen
Vorbereitung	AP05	Entwicklung und Installation Monitoring
	AP06	Vorbereitung Feldtests

Arbeitsblock	Arbeitspaket	Inhalt
Erprobung	AP07	Durchführung Feldtests
	AP08	Auswertung und Dokumentation
	AP09	Kommunikation

Abbildung 1: Arbeitspakete im Projekt

Die Grundlagen im ersten Arbeitsblock mit den Arbeitspaketen AP01 bis AP04 wurden im Projekt hauptsächlich durch Fleco Power erarbeitet. Dabei wurde das Unternehmen von zahlreichen weiteren Akteuren massgeblich unterstützt (siehe Abbildung 2). Im gemeinsamen Austausch wurden einerseits die technischen und operationellen Abhängigkeiten zwischen dem Regelbetrieb und dem geplanten Notbetrieb identifiziert. Andererseits wurden die Möglichkeiten und Voraussetzungen für eine praktische Erprobung des gewählten Lösungsansatzes untersucht.

Rolle	Firma	Details
Systemlieferanten	Avesco AG	Lieferant BHKW
	SMA	Lieferant Wechselrichter Photovoltaikanlage
	Gebr. Willi Elektro AG	Lieferant Elektroverteilung, Notstromkonzept
	Iqonics GmbH	Lieferant Software Monitoring
Systemintegratoren	MBRsolar AG	Lieferant Photovoltaikanlage
	Rey Automation AG	Lieferant Leittechnik Biogasanlage und Lastmanagement
Forschungspartner	HES-SO Wallis	Simulationsstudien und Labortests
Weitere	Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS	Beratende Partei
	Gemeinde Amlikon-Bissegg	Verteilnetzbetreiber
	EKT AG	Vorlieferant

Abbildung 2: Ins Projekt eingebundene Akteure

Der zweite Arbeitsblock für die Vorbereitung der Feldtests wurde zwischen den Projektpartnern aufgeteilt: Für die Konzeption und Umsetzung der Monitoring Lösung in Arbeitspaket AP05 zeichnete sich die Firma Fleco Power mit der Lösungspartnerin Iqonics GmbH verantwortlich. Die Vorbereitung des Arealnetzes und der Notstromfähigkeit in Arbeitspaket AP06 erfolgte durch den Projektpartner Otto Wartmann mit Unterstützung der Elektroinstallationsfirma Gebr. Willi Elektro AG.

Die Erarbeitung des dritten Arbeitsblocks mit der Durchführung der Feldtests im Arbeitspaket AP06 erfolgte in gemeinsamer Verantwortung der Partner Otto Wartmann und Fleco Power, wobei je nach Notwendigkeit die technischen Ansprechpartner ebenfalls involviert wurden bzw. während den Feldtests vor Ort zugegen waren. Ebenso haben beide Projektpartner zur Auswertung und Dokumentation der Feldtests in Arbeitspaket AP08 und der Öffentlichkeitsarbeit in AP09 beigetragen.

3 Arealnetz «Holzhof»

Alle Feldtests wurden auf dem Landwirtschaftsbetrieb «Holzhof» des Projektpartners Otto Wartmann durchgeführt. Der Betrieb umfasst eine Käserei, einen Milchwirtschaftsbetrieb, eine Schweinezucht und den Betrieb einer Biogasanlage sowie von drei Photovoltaikanlagen.

Das in sich geschlossene Areal mit einem hohen Stromverbrauch und mehreren Stromproduktionsanlagen stellt ein ideales Testgelände für die Notstromversorgung dar. Es kann auf dem Areal sowohl die Versorgung von privaten Endkunden (Wohnhaus), als auch gewerblichen (Käserei) und landwirtschaftlichen Verbrauchern (Milchkühe, Schweinezucht) untersucht werden.

Zudem wurden bei einer vor wenigen Jahren durchgeführten Erweiterung der Biogasanlage die Grundlagen für einen Notstrombetrieb gelegt. Im vorliegenden Projekt wurden diese Grundlagen auf der Seite der Anlagensteuerung und -automatisierung erweitert. Zudem wurde eine neu errichtete Photovoltaik-Eigenverbrauchsanlage in das Arealnetz integriert.

In Abbildung 3 sind die diversen Produktionseinheiten (Blockheizkraftwerke der Biogasanlage und Photovoltaikanlagen) sowie die Verbrauchsstätten im Arealnetz abgebildet. Im Notbetrieb dient das Blockheizkraftwerk 3 mit 320 kVA Nennleistung als netzführende Spannungsquelle. Für die Feldtests wurde die neue Photovoltaik-Eigenverbrauchsanlage auf der Substratlagerhalle in das Notnetz eingebunden. Das gesamte Areal weist eine Grundlast in der Grössenordnung von gegen 100 kW auf.

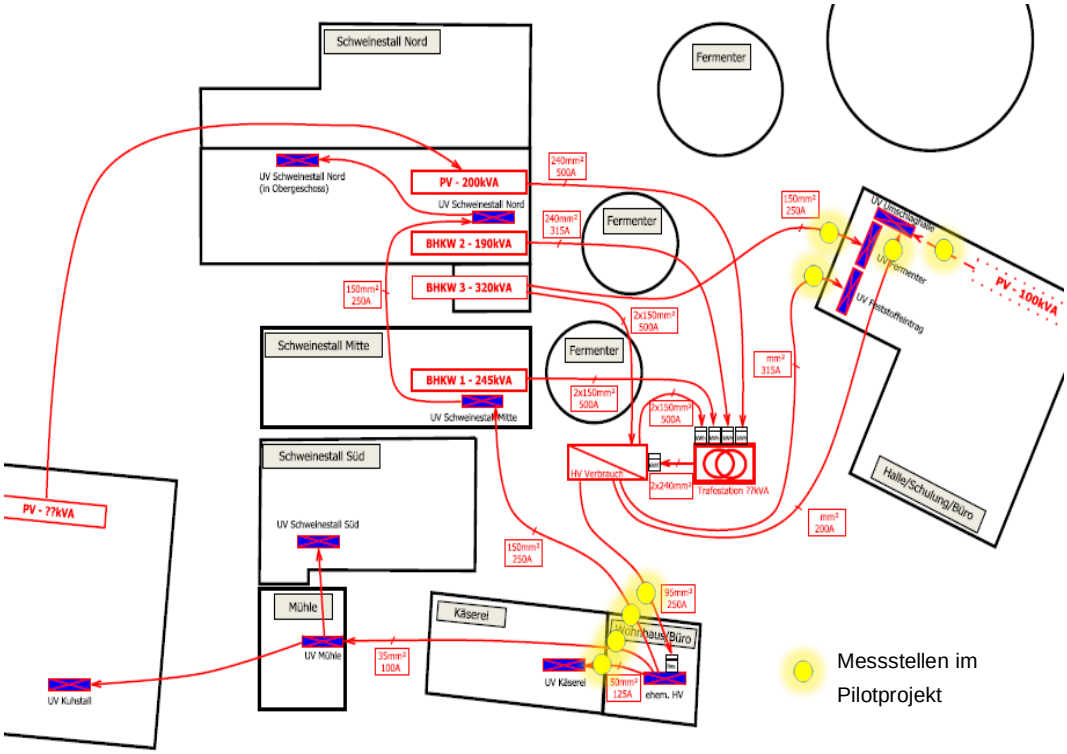

Abbildung 3: Übersichtsschema Energieverteilung Holzhof mit Messstellen fürs Monitoring

4 Grundlagen zum Notbetrieb

4.1 Voraussetzungen für den Notbetrieb

Als erster wichtiger Baustein im Bereich der Grundlagenarbeit wurden die Voraussetzungen für einen Notbetrieb auf Landwirtschaftsbetrieben untersucht. Einerseits wurden die für den Notbetrieb notwendigen Vorarbeiten sowie die regulatorischen Rahmenbedingungen näher untersucht. Andererseits standen die technischen Anforderungen im Fokus.

4.1.1 Notwendige Vorarbeiten

Ausgangspunkt für die Konzeption eines sicheren und stabilen Notbetriebs muss eine auf den jeweiligen Landwirtschaftsbetrieb zugeschnittene Risikoanalyse [1] sein. Die Betriebsleiterfamilie sollte sich mit den potenziellen Schäden eines langandauernden Stromausfalls und insbesondere den entsprechenden Konsequenzen in der Tierhaltung auseinandersetzen. Dabei kann von verschiedenen Szenarien ausgegangen werden, in denen als entscheidende Variable die Dauer eines Stromausfalls variiert wird (z.B. zwei Stunden / zwei Tage / zwei Wochen).

Je kleiner die für die in den Szenarien identifizierten kritischen Verbraucher bereitzustellende elektrische Leistung ausfallen kann und je kleinräumiger das Notnetz dimensioniert wird, desto einfacher ist die Umsetzung in der Praxis. Die Reduktion der Komplexität des Notbetriebs sollte aufgrund der Erfahrungen aus dem Pilotprojekt oberstes Gebot haben.

Ebenfalls bereits in der Konzeptphase des zukünftigen Notnetzes ist eine möglichst optimale Abstimmung von Produktion und Verbrauch vorzunehmen und zugleich auch die gleichmässige Verteilung der Lasten auf alle Phasen. Durch diese Massnahmen werden grössere Regeleingriffe im Betrieb des Notnetzes reduziert und die Netzqualität passiv verbessert, was wiederum die Sicherheitsmargen erhöht.

Im Unterschied zur Überbrückung von kurzfristigen Stromausfällen (wenige Stunden), werden bei längeren Ausfällen (Tage bis Wochen) die Charakteristiken des lokalen Verbrauchs deutlich wichtiger. Während z.B. Schieflasten im kurzzeitigen Notstrombetrieb noch toleriert werden können, können diese im Dauerbetrieb zur thermischen Überlastung von elektrischen Motoren führen. Zusätzlich müssen im langfristigen Betrieb unter Umständen auch empfindliche Verbraucher wie Steuerungen von Melkrobotern versorgt werden, welche bei kurzzeitigen Stromausfällen noch vom Netz getrennt bleiben können. In diesem Fall steigen die Risiken, dass bei unzureichender Netzqualität Schäden entstehen.

4.1.2 Weitere Voraussetzungen

Aufgrund der Limitierung des Notbetriebs auf ein vom restlichen Stromnetz abgekoppeltes Inselnetz haben sich die Anforderungen an die Schnittstellen und der Abstimmungsbedarf mit weiteren Akteuren im Energiesystem als äusserst unproblematisch erwiesen.

Das Notnetz wird somit komplett unabhängig vom vorgelagerten Verteilnetz betrieben und ist dabei jederzeit über den Netztrennschalter galvanisch getrennt. Ebenso wird ausdrücklich von einer Rücksynchronisation mit dem Verteilnetz abgesehen. Somit werden die Auflagen des Eidgenössischen Starkstrominspektorats (ESTI) für den Betrieb eines Inselnetzes erfüllt [2]. Für die Sicherheit im Inselnetz, die Einhaltung der Spannungsqualität gemäss EN 50160 [3] und der Frequenz ist der Betreiber verantwortlich, ebenso für die entsprechende Anmeldung beim ESTI. Dagegen besteht keine weitergehende Anforderung zur Koordination mit dem örtlichen Verteilnetzbetreiber.

4.1.3 Technische Voraussetzungen

Als technische Voraussetzungen für einen erfolgreichen Notbetrieb muss ein Notnetz über mindestens die folgenden Komponenten und Systeme verfügen:

Komponente/System	**Details**
Netztrennschalter	- Möglichkeit, das gewünschte Notnetz galvanisch vom übergeordneten Verteilnetz zu trennen und auf die gewünschten Verbraucher und Produzenten zu beschränken - Sicherheitselement, verhindert (bei richtiger Konzeption) fehlerhafte Rücksynchronisationen des Notnetzes mit dem Verteilnetz
Netzführende Komponente	- Im Notnetz als Spannungsquelle betriebene Produktionseinheit (Generator, Wechselrichter) - Zeichnet sich während des Notbetriebs für die Netzstabilität bzw. -qualität verantwortlich
Produktions- bzw. Laststeuerung	- Automatische und kontinuierliche produktions- und/oder lastseitige Feinabstimmung zwischen Produktion und Verbrauch im Notnetz - Kann durch eine Speicherkomponente ergänzt werden
Monitoring	- Laufende Überwachung aller sicherheitsrelevanter Komponenten und Parameter für den Notbetrieb (sowie im Regelbetrieb![1]) - Möglichkeit zur frühzeitigen Alarmierung

4.1.4 Fazit

Der Notbetrieb eines Inselnetzes bringt generell eine hohe technische Komplexität mit sich und stellt hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit der Energiequelle(n). Daher sind bei der Konzeption nur absolut notwendige Verbraucher zu berücksichtigen. Je nach Betriebstyp kann das Resultat der Risikoanalyse auch sein, dass für den fraglichen Landwirtschaftsbetrieb kein Notbetrieb vorgesehen werden muss.

Aufgrund der hohen Komplexität der verschiedenen Fragestellungen sollte der Notbetrieb möglichst in Zusammenarbeit zwischen der Betriebsleiterfamilie und Fachpersonen mit hoher elektrotechnischer Kompetenz konzipiert und umgesetzt werden. So ist sichergestellt, dass kein Betriebsprozess vergessen geht und dass sämtliche technische «Fallstricke» bei der Implementierung eines Notnetzes umgangen werden können.

Die Auslegung eines Notnetzes als Inselnetz mit galvanischer Entkoppelung vom vorgelagerten Stromnetz vereinfacht die organisatorischen und regulatorischen Anforderungen erheblich. Es stellen sich hauptsächlich technische Herausforderungen in der Konzeption und vor allem im Langzeitbetrieb des Notnetzes.

[1] Das Monitoring im Regelbetrieb ist entscheidend, um Veränderungen am Notnetz (z.B. Installation von neuen Verbrauchern oder Erzeugungseinheiten), die einen Einfluss auf den Notbetrieb haben können, frühzeitig zu identifizieren. Erfahrungsgemäss wird die Anpassung der Notversorgungs-konzepte in solchen Situationen oft vergessen, was im Notfall zu Problemen führen kann

4.2 Potential der dezentralen Notstromversorgung

Die Autoren gehen davon aus, dass heute bereits mehrere Tausend Photovoltaikanlagen auf Landwirtschaftsbetrieben in der Schweiz installiert sind. Diese Zahl wird in den nächsten Jahren weiter stark zunehmen. Die installierte Leistung der Photovoltaikanlagen auf Landwirtschaftsbetrieben übersteigt dabei oftmals die installierte Last, da grosse Dachflächen zur Verfügung stehen. Die Nutzung der Photovoltaik für den Notbetrieb bietet sich daher an und hat grosses Potential, Investitionen in dedizierte Notstromlösungen zu reduzieren bzw. bestenfalls ganz zu substituieren.

Ein weiterer wichtiger Baustein bei der Erarbeitung der Grundlagen bestand daher in der Abschätzung des Potentials der dezentralen Notstromversorgung in der Landwirtschaft und mit Fokus auf die Photovoltaik als dezentrale Energiequelle.

4.2.1 Potentialabschätzung

Basis der Potentialabschätzung bilden die 15-minuten Lastprofile von sechs Landwirtschaftsbetrieben aus dem Kanton Aargau [4]. Bei vier von diesen sechs Betrieben ist der Hauptbetriebszweig Milchwirtschaft und bei je einem die Schweinemast bzw. Legehennen. Für alle Betriebe wurde zudem die mögliche Stromproduktion einer Photovoltaikanlage für die tatsächliche geographische Lage und verfügbare Dachfläche simuliert.

Im Folgenden sind die Resultate der Analyse exemplarisch für einen der Milchwirtschaftsbetriebe dargestellt. Der Jahresverbrauch (Abbildung 4) weist eine starke Haushaltskomponente auf. Wie zudem zu erwarten war, macht der Anteil des Stromverbrauchs, welcher der Milchproduktion zugeordnet werden kann, fast 50% des Gesamtverbrauchs aus.

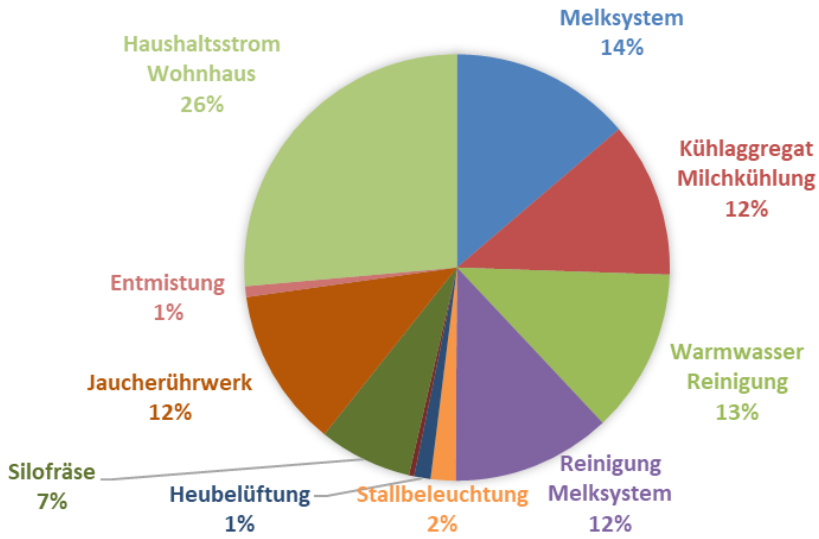

Abbildung 4: Aufteilung des Jahresverbrauchs des untersuchten Milchwirtschaftsbetriebs

Die Tageslastprofile (Abbildung 5) weisen aufgrund des morgendlichen und abendlichen Melkens der 88 Kühe des Milchwirtschaftsbetriebs charakteristische Lastspitzen auf, die maximale Last liegt bei 37.2 Kilowatt.

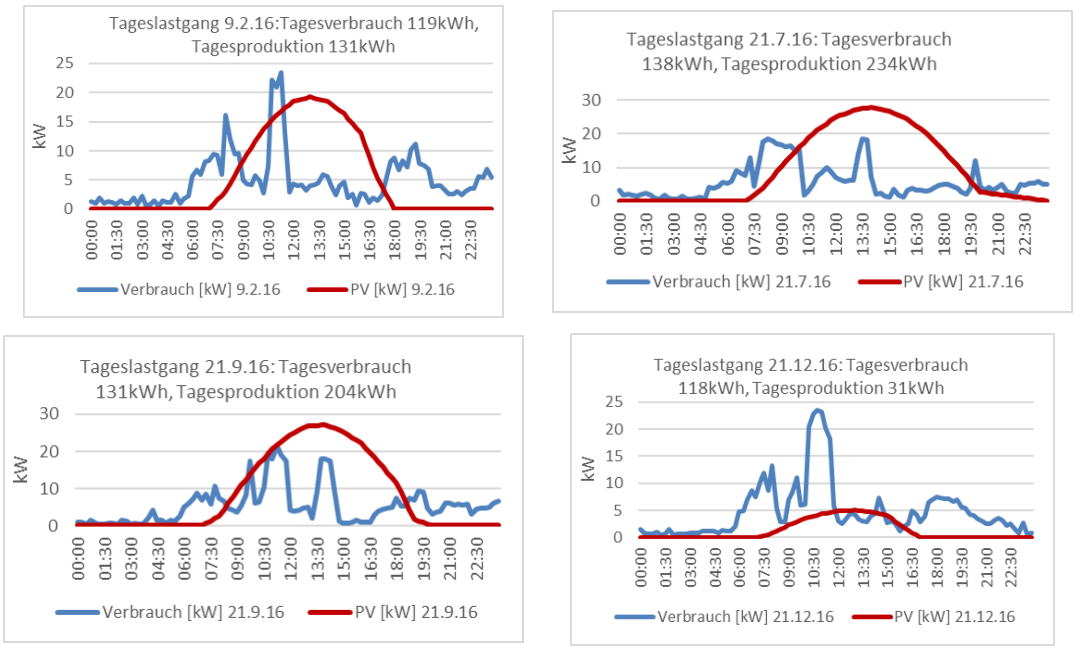

Abbildung 5: Aufteilung des Jahresverbrauchs des Milchwirtschaftsbetriebs

Eine kumulative Betrachtung des Energiebedarfs über 24 Stunden (Abbildung 6) zeigt für die vier Beispieltage, dass in allen Fällen vor dem Mittag ein Energiedefizit besteht. Ausser im Dezember wandelt sich das Defizit aber in allen Fällen ab jeweils Mittag in einen Energieüberschuss. In den meisten Monaten wird also durch den Einsatz eines Batteriespeichers eine Versorgung des gesamten Betriebes über 24 Stunden mit ausschliesslich vor Ort produziertem PV-Strom möglich sein. Im Gegensatz dazu wächst das Defizit für die Kurve vom 21.12.16 im Tagesverlauf weiter an. Um die Energielücke zu schliessen, ist eine weitere Energiequelle nötig.

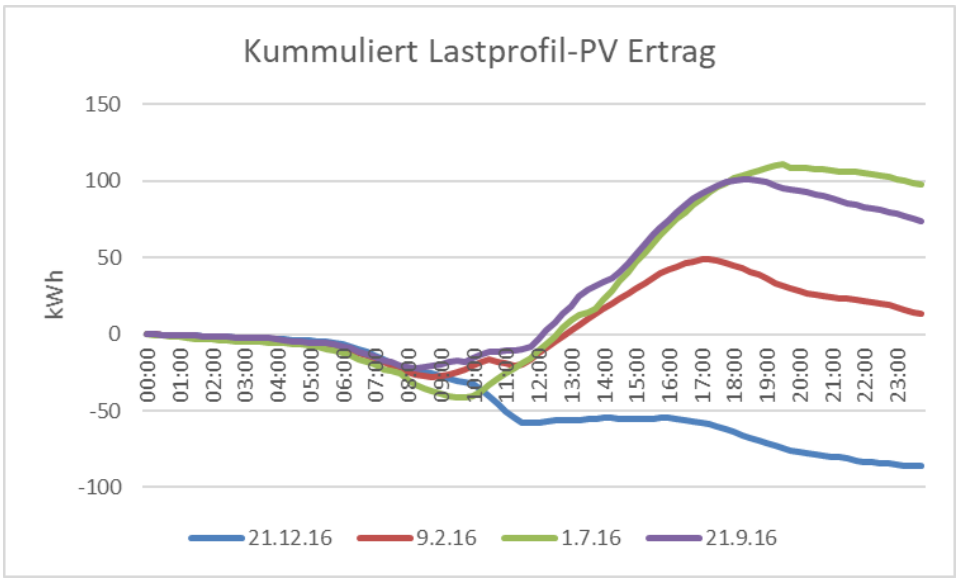

Abbildung 6: Kumuliertes Profil – Last abzüglich PV Produktion

4.2.2 Fazit

Für eine Umsetzung des Konzepts der dezentralen Notstromversorgung ist der Einbezug von Photovoltaikanlagen entscheidend. Diese Technologie ist bereits heute sehr weit verbreitet und hat unbestritten das grösste Ausbaupotential.

Die Analyse der Landwirtschaftsbetriebe im Jahresverlauf zeigt, dass die Versorgung der Höfe mit Strom von den eigenen Dächern und unter Einbezug von genügend Speicherkapazität zumindest in den wärmeren Jahreszeiten sichergestellt werden könnte.

Die Analyse zeigt aber auch, dass die Photovoltaik als alleinige Energiequelle für einen sicheren Ganzjahreseinsatz nicht genügt. Denn es muss davon ausgegangen werden, dass langandauernde Stromausfälle gerade in den kritischen Wintermonaten erhebliche Konsequenzen nach sich ziehen würden. Die identifizierte (lokale) Energielücke muss daher für einen zuverlässigen Notbetrieb in jedem Fall adressiert werden.

Entsprechend erfordert das Konzept der dezentralen Notstromversorgung für Landwirtschaftsbetriebe den Einbezug von zusätzlichen Energiequellen oder alternativ ein striktes Lastmanagement bzw. eine Kombination dieser Möglichkeiten. Gleichzeitig muss bei jeder gewählten Massnahme sichergestellt sein, dass auf den Betrieben trotz möglicher Einschränkungen die notwendigen Arbeitsgänge weiter durchgeführt werden können (z.B. Melken, Füttern, etc.).

4.3 Integration von Photovoltaik und Batteriespeicher ins Notnetz

Wie im vorangehenden Kapitel beschrieben, weist die Photovoltaik in der Landwirtschaft erhebliches (energetisches) Potential auf. Es stellt sich daher die Frage, inwiefern sich der aktuelle Stand der Technik, insbesondere auch von Batteriespeichern, für den Notbetrieb adaptieren lässt.

4.3.1 Ohne spezielle Vorkehrungen kein Notbetrieb

Photovoltaikanlagen für den Netzparallelbetrieb, bei welchen in der Anlagenplanung keine zusätzlichen Vorkehrungen getroffen wurden, eignen sich nicht für einen Notbetrieb. Die Wechselrichter sind als Stromquellen konfiguriert und unterbrechen die Einspeisung schnellstmöglich, sobald bei einem Stromausfall die Netzspannung wegfällt. Eine zusätzliche Schutzvorrichtung, der sogenannte Netz- und Anlagenschutz (kurz N/A-Schutz), stellt dieses durch die Regulierung vorgegebene Verhalten zusätzlich sicher.

4.3.2 Rolle von Photovoltaikanlagen im Notnetz

Mit den entsprechenden technischen Zusatzkomponenten, wie sie in Kapitel 4.1.3 beschrieben wurden, könnten Photovoltaikanlagen und deren Wechselrichter in einem Notnetz aber sowohl als primäre Energiequellen (im Sinne der netzführenden Spannungsquelle) wie auch als sekundäre Energiequellen (Betrieb als zusätzliche Stromquelle) eingesetzt werden.

Für den Einsatz als primäre Energiequelle muss eine Photovoltaikanlage mit sogenannten Hybridwechselrichtern ausgestattet sein. Diese sind sowohl für den Netzparallelbetrieb wie auch für den Inselbetrieb im Notnetz konzipiert, letzteres meistens im Zusammenspiel mit einem Batteriespeicher.

Für den Einsatz als sekundäre Energiequelle in einem Notnetz eignen sich im Prinzip alle für den Netzparallelbetrieb ausgelegten Wechselrichter. Die Voraussetzung für die störungsfreie Funktion ist jedoch, dass im Notnetz sowohl eine netzführende Spannungsquelle als auch ein System zur Produktions- bzw. Laststeuerung vorhanden ist, so dass die Spannungsqualität nach der Norm EN 50160 jederzeit eingehalten werden kann.

4.3.3 Rolle von Batteriespeichern im Notnetz

Eine der technischen Voraussetzungen für einen erfolgreichen Notbetrieb ist die Produktions- bzw. Laststeuerung (siehe auch Kapitel 4.1.3), so dass die Bilanz zwischen Einspeisung und Verbrauch im Notnetz automatisch ausgeglichen werden kann. Langfristige Abweichungen in dieser Bilanz (z.B. während der Nacht) können mit einem entsprechenden Lastmanagement adressiert werden, ein eigens hierfür dimensioniertes Speichersystem wäre wirtschaftlich nicht interessant.

Kurzzeitige Abweichungen (z.B. beim Start eines elektrischen Motors) könnten dagegen gut mit einem Batteriespeicher ausgeglichen werden. Dafür muss das Speichersystem analog einer primären Energiequelle konzipiert werden, d.h. mit Hybridwechselrichtern für den Inselbetrieb. In dieser Ausstattungsvariante übernimmt der Batteriespeicher zugleich die Rolle der netzführenden Spannungsquelle. Die kurzen Latenzzeiten und hohen Leistungsgradienten der Wechselrichter tragen zu einer sehr guten Spannungsqualität in derartig konzipierten Notnetzen bei.

Ist der Batteriespeicher mit Wechselrichtern für den Netzparallelbetrieb ausgerüstet, lässt sich das System nur im Zusammenspiel mit einem übergeordneten Energiemanagementsystem einsetzen. Dieses muss den Energiebezug bzw. die Einspeisung des Speichers im Zusammenspiel mit den weiteren Komponenten im Notnetz koordinieren. Entsprechend höher ist die technische Komplexität des Gesamtsystems.

4.3.4 Am Markt verfügbare Lösungen

Die Autoren haben im Rahmen des Pilotprojektes verschiedene am Markt erhältliche Hybrid-Systeme analysiert. Es handelt sich dabei um Gesamtsysteme, deren Photovoltaikanlagen den erzeugten Strom sowohl im Netzparallelbetrieb wie auch im Inselbetrieb einspeisen können, sich also für den angedachten Notbetrieb eignen würden.

Alle untersuchten Konzepte setzen dabei auf Hybridwechselrichter als netzführende Spannungsquellen. Ein zweites Element, welches in allen Marktlösungen integriert wird, ist ein Batteriespeicher. Es gibt dabei Lösungen, welche die Speicher auf einen gemeinsamen DC-Bus parallel zu den Photovoltaikmodulen koppeln [5]. Andere Lösungen setzen auf die AC seitige Kopplung [6] mit entsprechend aufwändiger Kommunikationsinfrastruktur zur Abstimmung der Komponenten.

Allen Systemen ist gemein, dass es sich um proprietäre Lösungen der jeweiligen Systemlieferanten handelt (herstellerspezifische Komponenten und Kommunikationslösungen). Die Interoperabilität mit Komponenten anderer Hersteller ist daher nicht garantiert. Dieser Aspekt stellt bei der Konzeption von Neuanlagen generell kein Problem dar, ist aber bei der Nachrüstung von Bestandsanlagen problematisch. Im schlimmsten Fall müssen bestehende Komponenten durch andere des jeweiligen Systemlieferanten nachgerüstet werden.

Ein zweiter Punkt betrifft die verfügbaren Leistungsklassen: Es existieren diverse Kompaktlösungen für den Einsatz in Einfamilienhäusern. Ebenfalls existiert ein Markt für professionelle Lösungen in grösseren Leistungsklassen, z.B. für den Betrieb von autonomen «Microgrids» in schlecht erschlossenen Weltgegenden. Systeme für Leistungsklassen, wie sie typischerweise in der Landwirtschaft benötigt werden (50-100 kW), sind am Markt als fertige Lösungen aber nicht erhältlich und müssen individuell zusammengestellt werden. Dies führt in aller Regel zu höheren Systemkosten.

Ein dritter Punkt betrifft ebendiese Systemkosten: Hybridsysteme für den Betrieb im Netzparallelbetrieb als auch im Inselbetrieb gehören heute immer noch zur Kategorie der Speziallösungen. Zwar findet im Markt aufgrund der aktuellen Versorgungssituation in Europa ein Umdenken statt und mehrere Systemanbieter arbeiten an neuen Lösungen. Sämtliche untersuchten Systeme für den Notbetrieb sind aber immer noch um Grössenordnungen (rund 5-10-mal) teurer als Standardlösungen für den Netzparallelbetrieb, selbst wenn letztere ebenfalls mit einem Batteriespeicher ergänzt werden.

4.3.5 Zusammenspiel mit in der Landwirtschaft etablierten Notstrom-Systemen

Der vielleicht wichtigste Punkt betrifft das Zusammenspiel mit in der Landwirtschaft etablierten Notstrom-Systemen, um die in Kapitel 4.2 identifizierte Energielücke zuverlässig schliessen zu können. Dabei stehen insbesondere die sogenannten Zapfwellengeneratoren im Fokus, welche heute bereits auf vielen Landwirtschaftsbetrieben im In- und Ausland eingesetzt werden.

Zapfwellengeneratoren sind eine preiswerte Alternative zu konventionellen Notstromaggregaten, da die mechanische Antriebsleistung vom Traktor bezogen wird. Die Geräte sind in der Regel mit Synchrongeneratoren, einer Spannungsregelung und einer mehr oder weniger rudimentären elektrischen Schutzeinrichtung ausgestattet. Die Frequenzregelung der Ausgangsspannung erfolgt indirekt über die Drehzahlregelung des Traktors.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Systeme besteht darin, dass diese in wenigen Handgriffen betriebsbereit sind und wenig Unterhalt benötigen. Zudem sind Traktoren in aller Regel gut gewartete Maschinen und sind daher mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in Notsituationen betriebsbereit. Schliesslich verfügen praktisch alle Landwirtschaftsbetriebe über einen örtlich lagernden Treibstoffvorrat. Somit wären Zapfwellengeneratoren die idealen Kandidaten, um im Zusammenspiel mit Photovoltaikanlagen (und zukünftig auch Batteriespeichern) den ganzjährigen Notbetrieb auf Landwirtschaftsbetrieben sicherzustellen.

Leider existieren nach dem Wissensstand der Autoren heute am Markt noch keine Gesamtlösungen, welche genau diese Anforderungen erfüllen würden. Das hauptsächliche Problem ist dabei, dass Zapfwellengeneratoren aufgrund der Konfiguration (keine Synchronisierungsvorrichtung) nur als primäre Spannungsquellen eingesetzt werden können. Sie können wegen der Limitierungen in der Regelung (Frequenz und Spannung) keine ausreichende Netzqualität nach der Norm EN 50160 garantieren, so dass ein Parallelbetrieb von Wechselrichtern nicht möglich ist. Es gibt deshalb Hersteller, welche an Lösungen für die Ausrüstung von Zapfwellengeneratoren mit Gleichrichtern zur DC seitigen Kopplung mit Hybridwechselrichtern arbeiten. Auch diese Systeme sind aber noch nicht am Markt erhältlich.

4.3.6 Fazit

Für die Einbindung von handelsüblichen Photovoltaikanlagen und Batteriespeichern in ein Notnetz bleiben mit dem aktuellen Stand der Technik zahlreiche Herausforderungen zu lösen, denn Standardkomponenten sind nicht für die duale Verwendung im Normal- und Notbetrieb konzipiert.

Für die Erstausrüstung sind am Markt herstellerspezifische Hybridlösungen erhältlich, jedoch meistens nicht in den für die Landwirtschaft notwendigen Leistungsklassen. Zudem liegen die Kosten für diese Systeme in einem Bereich, welche viele Landwirte vom Kauf zurückschrecken lassen.

Auch für die Nachrüstung von Bestandsanlagen für den Notbetrieb sind am Markt keine zufriedenstellenden Lösungen erhältlich. Die Integration der Anlagen in ein Notnetz mit einer zusätzlichen netzführenden Spannungsquelle ist ein möglicher Lösungsansatz für dieses Problem und bildet den Kern der Feldversuche im Pilotprojekt.

Ungelöst bleibt aber das Problem des Zusammenspiels von Zapfwellengeneratoren mit weiteren Energiequellen in einem Notnetz, insbesondere Photovoltaikanlagen. Diese Kombination hätte in der Landwirtschaft das grösste Potential zur Abfederung der negativen Folgen von langanhaltenden Stromausfällen.

5 Ergebnisse aus den Feldtests

5.1 Notbetrieb stellt hohe Anforderung an Personal und Technik

5.1.1 Versuchsanordnung

Ziel der diversen Feldtests war die Demonstration der Schwarzstartfähigkeit und die Etablierung eines stabilen Notbetriebs über einen längeren Zeitraum, d.h. von einigen Stunden bis hin zu einem ganzen Tag. Alle Versuche wurden über einen Zeitraum von rund 18 Monaten während unterschiedlichen Jahreszeiten und Witterungsbedingungen auf dem Landwirtschaftsbetrieb «Holzhof» des Projektpartners Otto Wartmann durchgeführt (siehe auch Kapitel 3).

Während allen Feldtests war das grösste Blockheizkraftwerk der Biogasanlage mit 320 kVA Nennleistung für den Netzaufbau sowie die Netzführung (Spannungs- und Frequenzregelung, produktionsseitig) verantwortlich. Das zusätzliche Lastmanagement wurde über die Leittechnik der Biogasanlage sichergestellt. Die Versuche zur Integration der Photovoltaikanlage ins Notnetz wurden mit der neu erstellten Photovoltaik-Eigenverbrauchsanlage (Nennleistung 150 kWp) durchgeführt.

Nachfolgend aufgeführte Feldtests waren Teil des Pilotprojekts.

Test	**Fokus**
Feldtest 1, 20.09.2021	- Test des Notbetriebs mit der Biogasanlage, Validierung Schwarzstartfähigkeit und Notbetrieb über mehrere Stunden
Feldtest 2, 17.02.2022	- Test des Notbetrieb mit der Biogasanlage und der Integration der Photovoltaik-Eigenverbrauchsanlage
Feldtest 3, 04.04.2023	- Test des Notbetrieb mit der Biogasanlage und der Integration der Photovoltaik-Eigenverbrauchsanlage über 24 Stunden

5.1.2 Ergebnisse

Ein erstes wichtiges Ergebnis ist, dass die Abkopplung vom Verteilnetz durch eine initiale Netztrennung, welche den ersten Schritt in der Umschaltung vom Normalbetrieb in den Notbetrieb darstellt, in allen durchgeführten Tests sehr gut funktioniert hat. Ebenso problemlos gestaltete sich die Kopplung mit dem Verteilnetz nach Beendigung des Notbetriebs.

Dieses Ergebnis ist nicht zuletzt der durchdachten und sorgfältig umgesetzten Umschaltlogik mit entsprechenden Zeitverzögerungsfunktionen zu verdanken (siehe Abbildung 7). Zudem ist die Bedienung sehr einfach und intuitiv gehalten. Sie vermittelt dem Bedienpersonal Sicherheit, so dass Fehleinschätzungen und Fehlmanipulationen weitestgehend ausgeschlossen werden können.

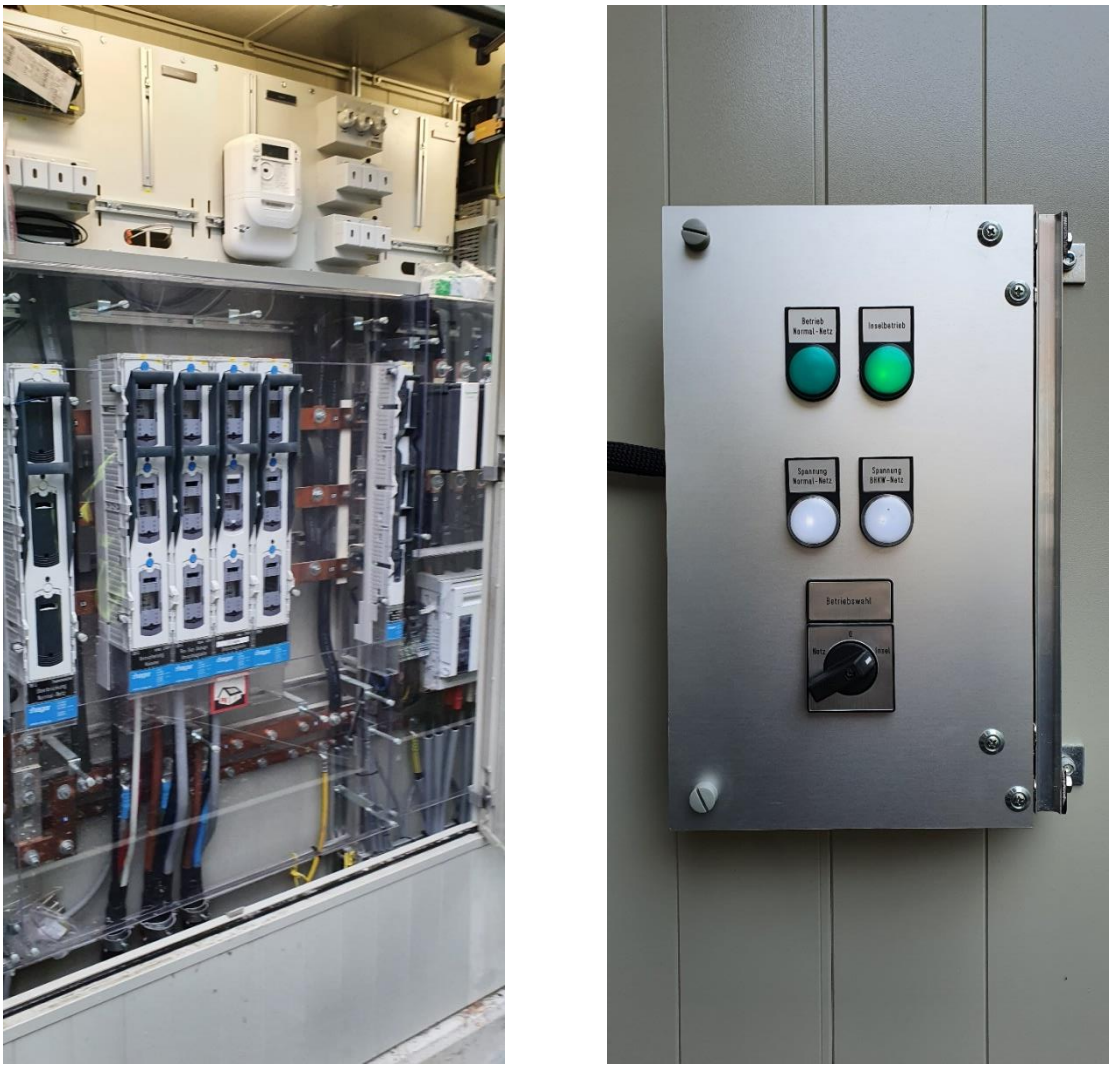

Abbildung 7: Hauptverteilung und Schalter Betriebsmodus auf Inselbetrieb

Ein zweites wichtiges Ergebnis ist, dass alle durchgeführten Feldtests deutlich aufgezeigt haben, dass der nächste Schritt im Aufbau der Notversorgung, der Schwarzstart und der Netzaufbau des Notnetzes, grosse (technische) Herausforderungen mit sich bringen. Bei zahlreichen Startversuchen während den Feldtests 1 und 3 haben technische Probleme dazu geführt, dass ein Notbetrieb nur nach langwieriger Fehlersuche oder im schlimmsten Fall gar nicht etabliert werden konnte. Nachfolgend sind exemplarisch einige während der Tests identifizierte Fehlerquellen aufgelistet:

Fehlerquelle	**Effekt**
Netzwerkkomponente im Notnetz nicht verfügbar	- Die Speisung einer für die Kommunikation im Notnetz benötigten Netzwerkkomponente war selbst nicht ins Notnetz integriert. Die im Stromausfall gestörte Kommunikation führte dazu, dass der Notbetrieb nicht etabliert werden konnte.

Fehlerquelle	Effekt
Keine aktuelle Software auf Steuerungscomputer	- Ein für das Lastmanagement unabdingbarer Steuerungscomputer war nicht mit einer Stützbatterie (USV) ausgestattet. Zudem war das Windows-Betriebssystem nicht auf dem neusten Stand. Nach dem Neustart des Computers im Notbetrieb sollte daher zuerst ein anstehendes Windows-Update installiert werden. Da die Verbindung zum Internet im simulierten Szenario nicht möglich war, konnte das Update nicht abgeschlossen werden und das Lastmanagement stand nicht zur Verfügung. In der Konsequenz konnte der Notbetrieb nicht etabliert werden.
FI-Schalter mit zu engen Auslösekriterien	- Ein für den Ausgleich von Last und Produktion notwendiger Verbraucher ist durch einen FI-Schalter abgesichert, welcher bei den ersten Feldtests permanent ausgelöst hat. Weil deshalb dieser Verbraucher im Notnetz nicht zur Verfügung stand, war die Gesamtlast im Verhältnis zur Erzeugungsleistung zu tief. Der stabile Notbetrieb konnte in der Folge nicht etabliert werden. - In der darauffolgenden Analyse hat sich gezeigt, dass der FI-Schalter während der Erstinbetriebnahme wohl mit zu engen Auslösekriterien eingestellt wurde.
Nicht überwachte Stützbatterie (USV) an den Hilfsbetrieben	- Eine defekte Stützbatterie (USV) am Gasgebläse für das Blockheizkraftwerk blockierte die Durchführung dritten Feldtests für längere Zeit. Ohne Gasgebläse kann der notwenige Gasdruck zum Start des Blockheizkraftwerks nicht aufgebaut werden. Somit ist auch kein Schwarzstart und ergo auch kein Notbetrieb möglich. Aufgrund der speziellen Natur der benötigten Batterie war eine schnelle Ersatzbeschaffung nicht möglich. - Dass Defekte auftreten können, ist zu akzeptieren. Dass diese aber an betriebswichtigen Komponenten über Wochen und Monate unbemerkt bleiben, ist ein schwerwiegendes Problem. Hier müssen Verbesserungsmassnahmen getroffen werden, entweder technischer Natur (Überwachung und Alarmierung) oder durch Implementierung entsprechender Prozesse (regelmässige Kontrollen und Tests).

Als dritte und letzte Erkenntnis bleibt festzuhalten, dass in allen Tests nach einem gelungenen Schwarzstart der eigentliche Betrieb des Notnetzes ausgesprochen problemlos funktioniert hat. Die Netzführung durch das Blockheizkraftwerk und die Laststeuerung durch die Leittechnik der Biogasanlage haben einwandfrei funktioniert. So konnten sowohl der kurzzeitige als auch der Notbetrieb während 24 Stunden am Stück ohne Störung gewährleistet werden. Ebenso waren nach einem gelungenen Notbetrieb die jeweils kurz darauffolgenden Schwarzstartversuche erfolgreich.

5.1.3 Fazit

Es ist aufgrund der Ergebnisse aus den Feldtests wahrscheinlich, dass ein Notbetrieb auf einem Landwirtschaftsbetrieb mit dem aktuellen Stand der Technik auch über einen längeren Zeitraum erfolgreich aufrechterhalten werden kann.

Voraussetzung ist einerseits das Vorhandensein einer Primärenergiequelle mit einer genügend grossen Energiereserve. Andererseits muss der Aufbau des Notnetzes aber auch gelingen. Genau in diesem Punkt verorten die Autoren den grössten Handlungsbedarf.

Die technischen Installationen und insgesamt das ganze Notnetz auf dem untersuchten Areal weisen eine sehr hohe Komplexität auf. Dies führt zu einer kritischen Abhängigkeit des Notbetriebs von der Verfügbarkeit der Technik und nicht zuletzt vom Betriebspersonal. Die Feldversuche haben schonungslos aufgezeigt, dass schon einzelne Ausfälle von Komponenten genügen, damit der Netzaufbau verunmöglicht wird.

Die Autoren sehen deshalb zwei mögliche Ansätze, um den Notbetrieb in der Praxis robuster gestalten zu können: Erstens kann der notwendige Effort in Personalschulung, Prozesse (Kontrollen und regelmässige Tests) und Technik (Redundanzen, Überwachung und Alarmierung) investiert werden. Abhängig vom jeweiligen Kontext ist dieser Ansatz gerechtfertigt oder gar alternativlos.

Zweitens kann ein Notbetrieb aber auch radikal einfach gedacht werden. Jeder Verzicht auf die Versorgung eines Verbrauchers durch das Notnetz verbessert die Gesamtverfügbarkeit des Systems. Passive Lösungen sind in diesem Zusammenhang besser als aktive. Als Beispiel aus der Praxis sei hier die frostsichere Verlegung von Wasserleitungen zu nennen, statt diese mit einer Begleitheizung auszurüsten.

Gerade für den Einsatz in der Landwirtschaft sollte ein Kombination aus beiden Ansätzen verfolgt werden. Der Notbetrieb muss generell mit wenig, dafür robuster Technik möglich sein. Eine entsprechende Schulung des Betriebspersonals muss zwingend erfolgen und auch regelmässige Kontrollen und Testläufe sind Teil der Gesamtlösung. Dagegen darf spezifisches elektrotechnisches Fachwissen keine Voraussetzung sein, um im Fehlerfall direkt vor Ort schnell Abhilfe schaffen zu können.

5.2 Netzqualität im Notnetz ausserhalb der Norm EN 50160

5.2.1 Versuchsanordnung

Im September 2021 wurden im Rahmen eines ersten Feldversuchs mit einem Netzanalysemessgerät sämtliche Netzparameter aufgenommen. Die Messperiode dauerte vom 20. September 2021, 10:31 Uhr bis zum 21. September 2021, 02:41. Während der Messung wurden alle Spannungen und die Ströme in den Aussenleitern (L1,L2, L3) sowie im Neutralleiter (N) aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgte durch die Firma IBG Engineering AG mit einer entsprechenden Software.

5.2.2 Ergebnisse

Die Messwerte und die durch die Firma IBG Engineering AG durchgeführten Auswertungen der Messungen des ersten Feldtests [7] zeigen, dass die Anforderungen an die Netzqualität nach Norm EN 50160 für mehrere Parameter verletzt wurden. Die Werte für die gesamte harmonische Verzerrung (Total Harmonic Distorsion, THD), Spannungssymmetrie und Spannungsharmonische werden stark überschritten (siehe Abbildung 8). Ebenso werden die nach D-A-CH-CZ beurteilten maximalen Pegel für harmonische Stromoberschwingungen für alle Frequenzen massiv überschritten.

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die gemessene Frequenz respektive die Spannungen der drei Phasen während des Feldtests. Die Spannungen bewegen sich in einem akzeptablen Bereich, die gemessenen Abweichungen von der Normfrequenz sind jedoch problematisch.

5.2.3 Fazit

Die Vorgaben der Norm EN 50160 erlauben die Beurteilung der Qualität der Spannungsversorgung im Notnetz. Für den langfristig störungsfreien Betrieb der Verbraucher ist eine den Normen entsprechende Spannungsversorgung unerlässlich. Diese konnte während den Feldversuchen nicht gewährleistet werden.

Die Abweichung der Parameter von der Norm war für den Notbetrieb während einzelner Stunden kein Problem, an den Verbrauchern im Netz wurden keine negativen Auswirkungen festgestellt. Bei einem Betrieb über einen längeren Zeitraum (Tage und Wochen) sind jedoch Probleme zu erwarten, z.B. durch eine erhöhte thermische Belastung von Motoren. Für das bestehende Notnetz müssen daher in weiteren Untersuchungen Optimierungsmassnahmen identifiziert werden.

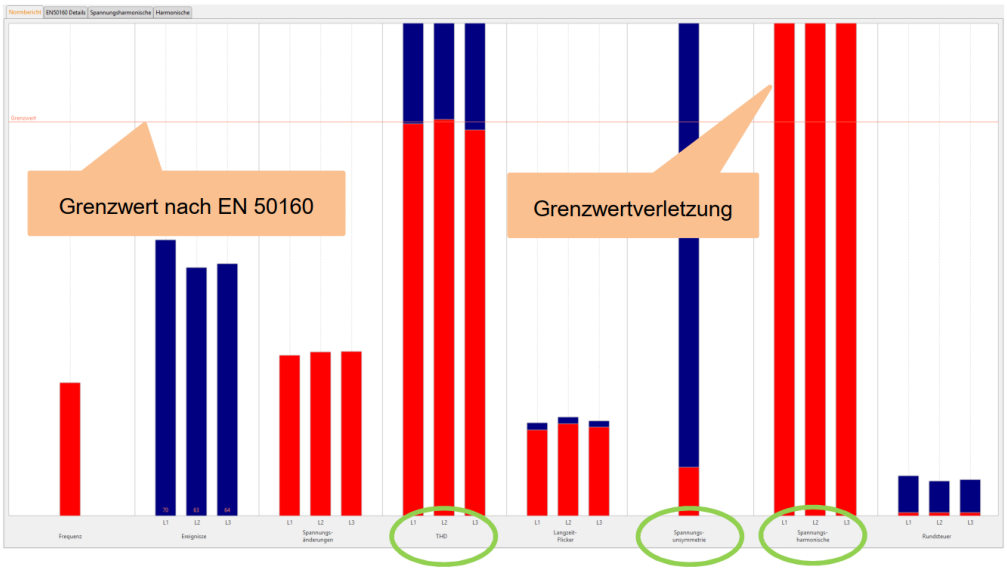

Abbildung 8: Auswertung Feldtest nach EN 50160 (Quelle: IBG Engineering AG)

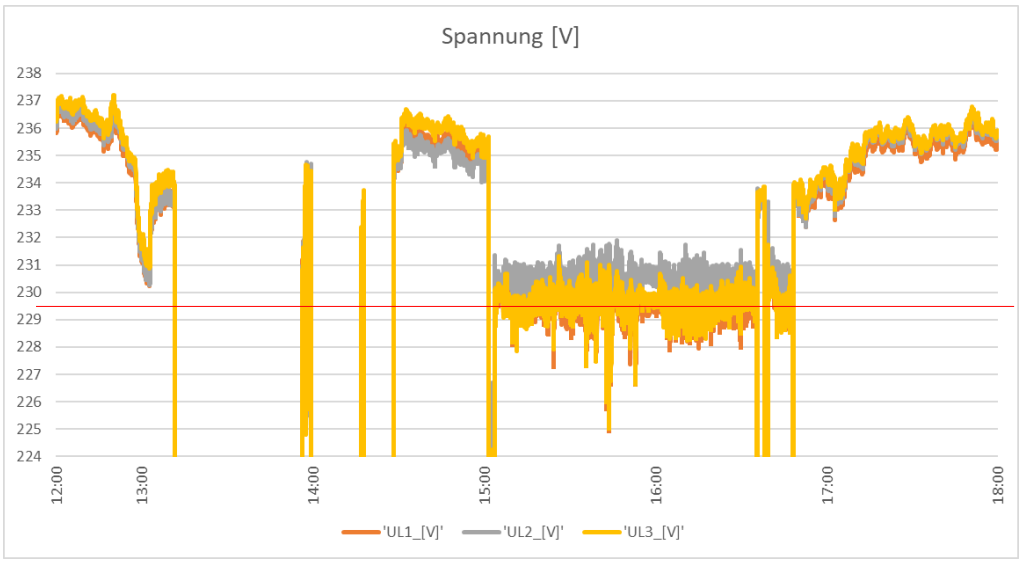

Abbildung 9: Auswertung der Spannungsmessung während des Feldtests

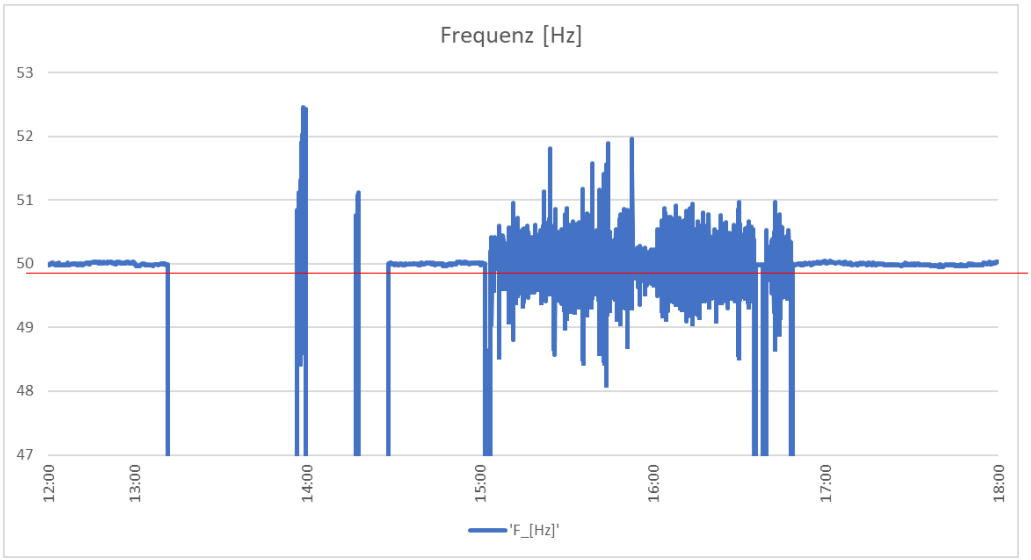

Abbildung 10: Auswertung der Frequenzmessung während des Feldtests

5.3 Gelungene Integration der Photovoltaikanlage ins Notnetz

5.3.1 Versuchsanordnung

Primäres Ziel von Feldtest 2 war die Integration der Photovoltaik-Eigenverbrauchsanlage ins Notnetz. Aufgrund der während Feldtest 1 ermittelten Defizite bei der Spannungsqualität (siehe Kapitel 5.2) musste jedoch eine Lösung gefunden werden, um den Parallelbetrieb der Wechselrichter mit dem netzführenden Blockheizkraftwerk auch im Notbetrieb zu ermöglichen. Standardmässig verhindern geräteeigene Schutzmechanismen eine Einspeisung, wenn die Qualität der am Gerät gemessenen Netzspannung nicht innerhalb enger Grenzen liegt. Desgleichen gilt für den zusätzlichen N/A-Schutz der Photovoltaikanlage.

Die Parametrierung der Wechselrichter kann jedoch bei Bedarf angepasst werden, so dass eine Einspeisung in ein «schwaches» Notnetz mit situativ stark schwankenden Frequenz- und Spannungswerten möglich wird. Der Systemlieferant SMA stellt hierzu für seine Geräte den sogenannten «off grid» Modus zur Verfügung. Dieser muss an den Geräten selbst durch einen autorisierten Systemtechniker konfiguriert werden. Diese Anpassungen wurden zeitlich begrenzt für den Betrieb der Wechselrichter im Notnetz vorgenommen und nach Beendigung der jeweiligen Tests wieder rückgängig gemacht.

Wie oben erwähnt, musste im Rahmen der Notbetriebs auch für den N/A-Schutz eine Lösung gefunden werden. Dieser hätte in der Standardkonfiguration die Einspeisung der Photovoltaikanlage blockiert. Für die Dauer der Tests (und nur während der vollständigen Trennung des Notnetzes vom Verteilnetz) wurde der N/A-Schutz der Photovoltaikanlage durch Fachpersonal deaktiviert.

5.3.2 Ergebnisse

Die Messungen während Feldtest 2 und Feldtest 3 zeigen, dass die Einspeisung der Photovoltaikanlage während des Notbetriebs grundsätzlich realisierbar ist. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen einerseits den Frequenzverlauf über die Dauer des Tests (blaue Kurve) und die zeitgleiche Einspeisung der Photovoltaikanlage (grüne Kurve). Über die gesamte Dauer des Tests wurde der Notbetrieb und die Einspeisung durch die Wechselrichter aufrechterhalten, auch wenn sich die Frequenz im Notnetz teilweise stark ausserhalb der Norm bewegte.

Die Einspeisung der Photovoltaikanlage wurde während der Tests durch eine Voreinstellung am Wechselrichter auf maximal 30 kW limitiert. Damit wurde sichergestellt, dass sich die Produktionssteuerung des Blockheizkraftwerks immer im Regelbereich befand. In der Praxis müsste hierfür eine zusätzliche Kommunikation zwischen der netzführenden Spannungsquelle (Blockheizkraftwerk) und den zusätzlichen Stromquellen (Wechselrichter) etabliert werden.

Grosse Leistungsgradienten in der Einspeisung der Wechselrichter hatten in den Tests tendenziell einen negativen Einfluss auf die Spannungsqualität im Notnetz. Dies lässt sich mit der (technologiebedingt) relativ trägen Drehzahlregelung der Gasmotoren erklären. Sollte das Konzept in der Praxis Anwendung finden, müssten die Regelkreise der einzelnen Energiequellen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden.

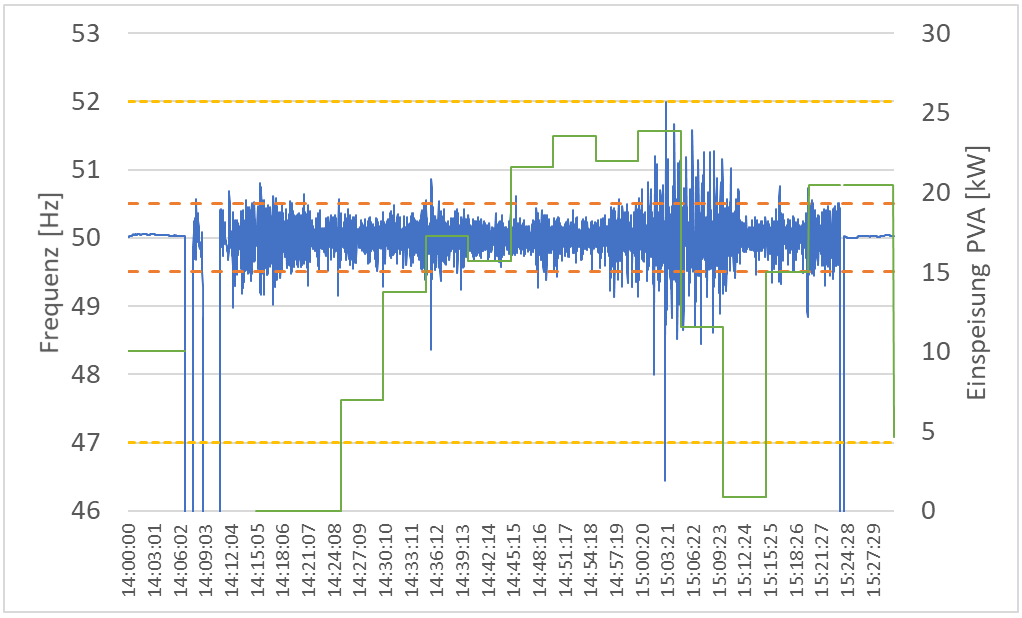

Abbildung 11: Einspeisung der Photovoltaikanlage (in grün) während Feldtest 2

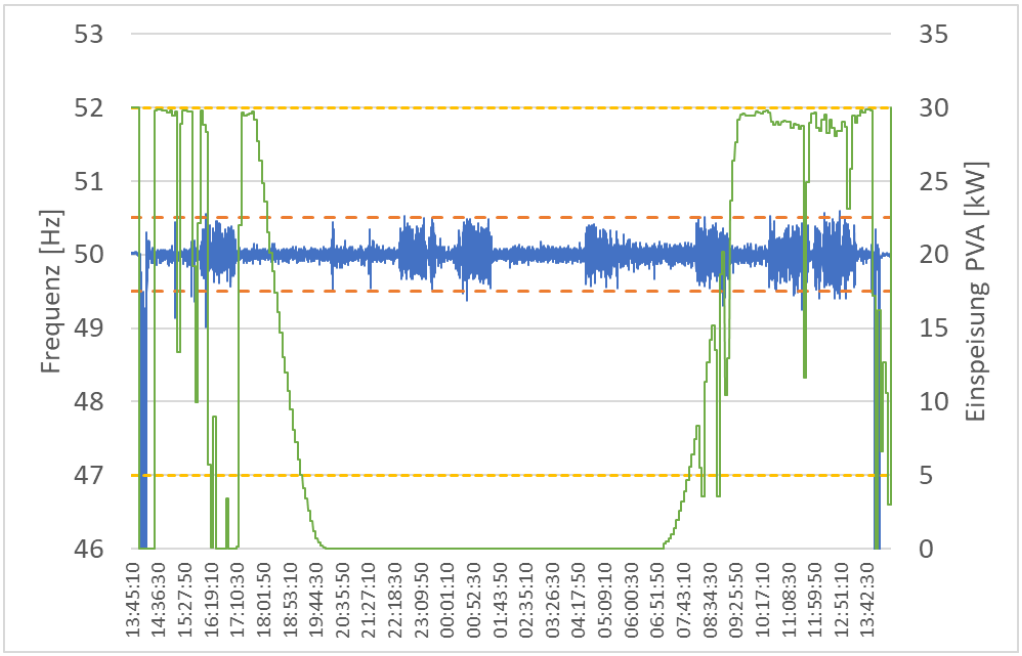

Abbildung 12: Einspeisung der Photovoltaikanlage (in grün) während Feldtest 3

5.3.3 Fazit

Unter den richtigen Voraussetzungen könnten auch Photovoltaikanlagen, die «nur» für den Netzparallelbetrieb konzipiert wurden, einen wichtigen Beitrag zum Notbetrieb leisten. Mit Feldtest 2 und Feldtest 3 konnte der praktische Nachweis erbracht werden.

Die technischen Hürden für die Umsetzbarkeit in der Praxis sind aber mit dem aktuellen Stand der Technik (noch) zu hoch: Erstens wäre im Notnetz zwingend eine zusätzliche netzführende Spannungsquelle erforderlich. Zweitens müsste diese Spannungsquelle die Netzqualität in sehr engen Grenzen halten können (siehe Norm EN 50160), damit Wechselrichter in der Standardkonfiguration einspeisen können und auch der N/A-Schutz keine Hürde darstellt. Drittens müsste für den stabilen Betrieb zusätzlich die Koordination zwischen allen im Notnetz vorhandenen Energiequellen sichergestellt werden. Mit einer technischen Lösung, welche alle diese Kriterien erfüllt, wäre der untersuchte Ansatz aber definitiv eine vielversprechende Lösungsoption für die Ertüchtigung von Bestandsanlagen für den Notbetrieb.

Alternativ könnten die technischen Hürden herabgesetzt werden, wenn die Umstellung auf den Inselbetrieb (Überbrückung N/A-Schutz, Parametrierung Wechselrichter) und die anschliessende Last- und Produktionssteuerung manuell vorgenommen würden. Dies setzt jedoch speziell geschultes Personal voraus und ist in den Augen der Autoren für die Anwendung in der Breite kein praktikabler Ansatz.

5.4 Monitoring muss ausgebaut werden

5.4.1 Versuchsanordnung

Im Rahmen des Pilotprojektes wurden verschiedene Lösungen für das einzusetzende Mess- und Monitoringkonzept evaluiert. Da die Durchführung der Feldtests und damit die Demonstration der

Machbarkeit im Zentrum standen, lassen sich die Anforderungen an die Messtechnik wie folgt zusammenfassen:

- Monitoring der Phasenspannungen, -ströme und Lastflüsse in 15-minütlicher Auflösung
- Messung der Netzqualität nach EN50160 im Notbetrieb

Die Überwachung der Phasenspannungen und -ströme sowie der Lastflüsse an zahlreichen Punkten im Notnetz (siehe Abbildung 3) wurden durch das eigens für das Pilotprojekt konzipierte Monitoringsystem vorgenommen.

Die Messung der Netzqualität war entscheidend zur Beurteilung der Zielerreichung im Rahmen des Pilotprojektes. Eine Evaluation der am Markt erhältlichen Messmittel hat jedoch gezeigt, dass Klasse-A Spannungs-/Strom-Messgeräte, welche für Analysen der Netzqualität nach EN 50160 eingesetzt werden, sowohl bei der zeitlichen Auflösung als auch der Messtoleranz die Anforderungen des Monitorings bei weitem übertreffen. Sie hätten daher nicht kosteneffizient eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wurde ein entsprechendes Messgerät in den Feldversuchen nur punktuell eingesetzt. Die so gewonnen Daten dienten der Auswertung der Versuche und der Erfolgskontrolle, waren aber nicht Teil des Monitoringsystem.

5.4.2 Ergebnisse

Die Erfahrungen aus den Feldtests zeigen den Mehrwert des Monitoringsystems, wobei der Hauptnutzen aus der laufenden Überwachung (auch im Normalbetrieb!) des Notnetzes resultiert. So können Abweichungen von der Norm automatisch detektiert und alarmiert werden. Auswertungen zum Monitoringsystem zeigen, dass die gestellten Anforderungen in Punkto Messgenauigkeit erfüllt wurden. Im Vergleich zu den Messdaten vom «Smart Meter» weisen die eingesetzten Leistungsmessgeräte nur geringfügige Abweichungen auf. Erhebungen im Rahmen der Feldtests ergaben, dass 99% aller Messwerte weniger als ein Prozent von den hoheitlichen Messdaten abweichen, siehe dazu Abbildung 13.

Während den Feldversuchen wurde aber auch deutlich, dass in der Praxis Messdaten in hoher Auflösung insbesondere für die schnelle Fehlersuche und -analyse unabdingbar sind. Im Pilotprojekt waren diese Daten über die Steuerungssysteme der Biogasanlage und des Blockheizkraftwerks abrufbar.

Schliesslich lieferte im Pilotprojekt auch die zusätzliche Messung der Netzqualität nach EN 50160 essenzielle Ergebnisse. Ohne diese Daten wären wichtige Schlussfolgerungen zum sicheren Notbetrieb nicht möglich gewesen.

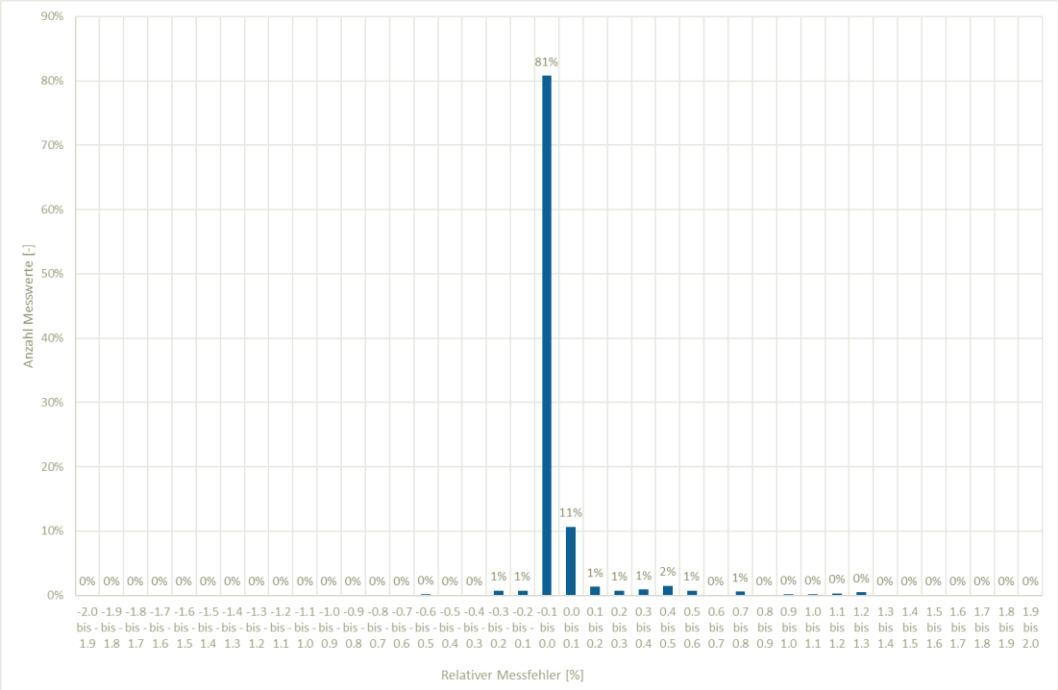

Abbildung 13: Auswertung Feldversuch Leistungsmessung, Verteilung relativer Messfehler

5.4.3 Fazit

Für die Überführung des Konzeptes «Notbetrieb» in die Praxis ist die kontinuierliche Überwachung wichtiger elektrischer Kenngrössen im Notnetz von elementarer Bedeutung.

Das für das Pilotprojekt neu konzipierte Monitoringsystem schliesst eine wichtige Lücke in der Messkette. Es können die Lastflüsse im Notnetz kontinuierlich erfasst und in Echtzeit ausgewertet werden. Aufgrund der eingesetzten Technologien des «Internet of Things» (IoT) und die Übermittlung von viertelstündlichen Mittelwerten sind die Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur (z.B. Bandbreite) gering.

Für eine breite Anwendung in der Praxis müsste das Monitoringsystem aber um einen zusätzlichen «offline» Modus ergänzt werden, welcher die lokale Visualisierung von Messdaten in hoher Auflösung ermöglicht. Zusätzlich sollten in diesem Modus auch die wichtigsten Kenngrössen für die Beurteilung der Netzqualität nach der Norm EN 50160 ermittelt werden.

Eine Erweiterung des im Projekt entwickelten Monitoringsystems in diese Richtung ist möglich. Die eingesetzte Messtechnik erfüllt die Anforderungen, die notwendigen Anpassungen müssten softwareseitig erfolgen.

6 Identifizierte Lücken

6.1 Sicherstellung der Netzqualität in Inselnetzen

Laut der ESTI Weisung «Anforderungen an Energieerzeugungsanlagen» [2] muss die Spannungs- und Frequenzregulierung bei Inselanlagen den normierten Toleranzbereichen nach der Norm EN 50160 entsprechen. Abgeleitet von den Erfahrungen aus den Feldversuchen (siehe Kapitel 5.2) und unter Berücksichtigung der in der Landwirtschaft weit verbreiteten sonstigen Notstromlösungen (insbesondere Zapfwellengeneratoren) ist anzunehmen, dass diese Anforderungen in der Praxis häufig nicht erfüllt werden.

Gerade während Stromausfällen von langer Dauer (Tage bis Wochen) spielt aber die Netzqualität im Notbetrieb eine entscheidende Rolle. Beispielsweise reagieren elektronische Steuerungen sehr empfindlich auf Überspannungen und Schiefspannungen können zur thermischen Überlastung von Asynchronmotoren führen. Ein sicherer Langzeitbetrieb ist also nur gewährleistet, wenn die Netzqualität jederzeit innerhalb der Norm garantiert werden kann.

Als grösste Herausforderung haben die Autoren in diesem Zusammenhang ein geringes Problembewusstsein seitens aller beteiligten Akteure (Systemlieferanten, Händler und Landwirte) identifiziert. Dies ist nachvollziehbar, da sich mögliche Auswirkungen vermutlich erst während einem längeren Notbetrieb zeigen werden. Ein solcher wird in der Praxis – wenn überhaupt – jedoch nur während Tests für Minuten oder wenige Stunden etabliert. Zusätzlich erschwerend kommt hinzu, dass für die Ermittlung der Netzqualität hochwertige Messtechnik und ausgebildetes Fachpersonal hinzugezogen werden müsste.

6.2 Nachrüstung von bestehenden Photovoltaikanlagen

Das grosse Potential für einen Notbetrieb mit Photovoltaikanlagen konnte in Kapitel 4.2 aufgezeigt werden. Ebenso existieren heute am Markt technisch ausgereifte Systemlösungen, welche einen Notbetrieb ermöglichen (siehe Kapitel 4.3.4).

Allerdings wurde im Rahmen des Pilotprojekts die Nachrüstung von bestehenden Photovoltaikanlagen als Lücke identifiziert. Die grosse Mehrheit der Bestandsanlagen ist für den ausschliesslichen Netzparallelbetrieb konzipiert. Zudem muss davon ausgegangen werden, dass auch ein Grossteil der zukünftig neu erstellten Photovoltaikanlagen in der gleichen Art und Weise konzipiert werden (z.B. ohne Hybridwechselrichter bzw. Batteriespeicher). Dies aufgrund der wesentlich höheren Investitionskosten für inselfähige Gesamtsysteme.

Daher muss festgehalten werden: Soll das Konzept der dezentralen Notstromversorgung mit Photovoltaikanlagen in der Breite etabliert werden, muss für die Nachrüstung von bestehenden Photovoltaikanlagen zuerst noch eine innovative Lösung gefunden werden. Denn aus Sicht der Autoren ist der vorzeitige Austausch der Bestandskomponenten gegen inselfähige zwar ein praktikabler Ansatz. Aufgrund von wirtschaftlichen Überlegungen wird er sich in der Praxis aber vermutlich nicht durchsetzen.

6.3 Zusammenspiel Photovoltaik mit weiteren Energiequellen

In Kapitel 4.3.5 wurde aufgezeigt, dass die bei Photovoltaikanlagen drohenden Energielücken in der Landwirtschaft optimal mit Zapfwellengeneratoren adressiert werden könnten.

Die im Pilotprojekt identifizierte Lücke ist das fehlende Zusammenspiel der beiden Technologien, beziehungsweise das Fehlen der erforderlichen technischen Standardlösung. Die hierzu durchgeführten Analysen führen zu einer ähnlichen Schlussfolgerung wie im vorhergehenden Abschnitt: Grundsätzlich sind im Markt erste Ansätze vorhanden, die auf individueller Basis umgesetzt

werden könnten. Für die Anwendung in der Breite sind diese Lösungen aber wirtschaftlich nicht interessant, weil sie entweder Zusatzkomponenten erfordern (Batteriespeicher) oder den vorzeitigen Austausch von bereits bestehenden Komponenten.

6.4 Sensibilisierung der Öffentlichkeit

Die Projektpartner haben im Rahmen des Pilotprojekts erhebliche Anstrengungen in der Sensibilisierung der Branche für die Problematik einer fehlenden oder mangelhaften Notstromversorgung auf Landwirtschaftsbetrieben unternommen. Die Information des Fachpublikums erfolgte über die eigene Internetpräsenz (Website, Social Media, Newsletter), über Zeitungsartikel (z.B. Bauernzeitung, Print und online [8]) oder im Rahmen von Fachtagungen (Powerloop-Forum 2021, ACT Fachtagung 2022). Ein noch breiteres Publikum wurde über zwei TV-Beiträge des Schweizer Fernsehens (RTS und TSI) in der französischen und italienischen Schweiz erreicht.

Als grosse Herausforderung stellte sich zu Beginn des Pilotprojektes ein geringes Problembewusstsein der Branche heraus – ähnlich wie schon in Kapitel 6.1 beschrieben. Diese Aussage stützt sich auf Rückmeldungen zu den publizierten Beiträgen und persönlichen Gesprächen der Autoren mit Akteuren aus dem landwirtschaftlichen Umfeld.

Im Frühjahr 2022 nahm aufgrund der ausserordentlichen Lage in Europa das Interesse am Pilotprojekt zwar schlagartig zu und die Branche scheint nun insgesamt besser sensibilisiert zu sein. Es besteht aber nach wie vor ein erheblicher Informationsbedarf, sowohl bei den betroffenen Landwirten als auch in der Branche als Ganzes. Dringend notwendig wären zudem auf die Landwirtschaft zugeschnittene Konzepte und ein entsprechender praktischer Leitfaden, wie Landwirtschaftsbetriebe den Risiken von langandauernden Stromausfällen konkret begegnen sollen.

Ein entsprechendes Informationsangebot ist innerhalb der Branche aber bis zum heutigen Tag erst ansatzweise aufgebaut worden. Exemplarisch kann hier die Information vom Schweizer Bauernverband zur Strommangellage angeführt werden [9].

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt «BackupFlex» hat sich zum Ziel gesetzt, die bestehenden Stromproduktionsanlagen – mit einem speziellen Fokus auf Photovoltaikanlagen – für einen längerfristigen Notbetrieb, z.B. während eines grossräumigen Blackouts, verfügbar zu machen. Das gesteckte Ziel wurde erreicht und die Umsetzbarkeit des Lösungskonzepts in mehreren Feldtests auf dem Versuchsbetrieb «Holzhof» praktisch belegt.

Durch die Grundlagenarbeit im Projekt konnte auch die ursprüngliche Hypothese bestätigt werden, dass die Notstromversorgung mit dezentralen Erzeugungseinheiten der erneuerbaren Energien für die Landwirtschaft ein geeigneter Lösungsansatz darstellt. Die Analysen zeigen aber auch, dass problematische Energielücken auftreten können, wenn das Konzept auf Photovoltaikanlagen limitiert wird. Ein sicherer Notbetrieb wird daher auf Photovoltaikanlagen in Kombination mit weiteren, saisonal unabhängigen, Energiequellen aufbauen müssen.

Sowohl in der Grundlagenarbeit als auch durch die praktischen Feldtests konnten zudem weitere Schwächen und Lücken des untersuchten Lösungsansatzes identifiziert werden. Zum einen ist die Etablierung eines stabilen Notbetriebs bereits in einer minimalen Ausgestaltung mit einer einzigen Energiequelle sehr anspruchsvoll. Die Integration von zusätzlichen regenerativen Energiequellen mit einer dargebotsabhängigen Einspeisung erhöht die bereits hohe Komplexität noch zusätzlich. Zum anderen limitieren inkompatible technische Ausstattungen das Zusammenspiel von sich im Prinzip sehr gut ergänzenden Erzeugungstechnologien. Im landwirtschaftlichen Kontext ist hier das Beispiel von Photovoltaikanlagen in Kombination mit Zapfwellengeneratoren zu nennen. Beide Technologien sind auf Landwirtschaftsbetrieben weit verbreitet, lassen sich aber mit dem aktuellen Stand der Technik nicht kombinieren.

Basierend auf den Erkenntnissen aus «BackupFlex» sollten daher in weiterführenden Untersuchungen innovative technische Lösungen identifiziert werden, welche die Komplexität der landwirtschaftlichen Notstromlösungen radikal reduzieren. Für eine breite Anwendbarkeit muss dabei der gleichzeitige Notbetrieb von Zapfwellengeneratoren und Photovoltaikanlagen möglich sein. Die Lösung sollte zudem auch die einfache und kosteneffiziente Nachrüstung von Bestandsanlagen gewährleisten können. Schlussendlich sind unbedingt Lösungen zu favorisieren, die ausgesprochen fehlertolerant sind. Sie müssen sich durch das betriebseigene Personal auch in sehr stressigen Situationen jederzeit sicher überwachen und bedienen lassen.

Ebenfalls sollten unbedingt weitere Anstrengungen unternommen werden, die Landwirtschaft im Hinblick auf eine mögliche Strommangellage und deren potenziellen Folgen enger zu begleiten. Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Pilotprojekt erscheint der Informationsbedarf nach wie vor sehr gross. Dieser könnte beispielsweise mit praxisnahen Leitfäden und durch die Branche selbst erarbeiteten Handlungsempfehlungen adressiert werden.

8 Anhang

8.1 Beispielprotokoll eines Feldtests

Der erste Feldtest wurde am Montag, 20. September 2021 in der Zeit von 10:00 – 17:00 durchgeführt. Im Folgenden sind der detaillierte Ablauf des Tests aufgeführt:

Schritt	Beschreibung
1. Einrichtung und Anpassungen	Nach Abschluss von Planungs- und Vorbereitungsarbeiten, welche ab 10:00 durchgeführt wurden, erfolgte die erste Netztrennung um kurz nach 13:00 (Stellung Schalter Betriebswahl von «Netz» auf «0»). Anschliessend wurden durch die Elektromonteure die geplanten Meldekontakte an den Schützen installiert und diese vom Steuerungsbauer in die Anlagensteuerung aufgenommen. Bei der Überprüfung der Verkabelung des Notnetzes konnten noch wenige Fehler gefunden und korrigiert werden. Die Firma IBG Engineering AG hatte bereits vorgängig ein Netzanalysemessgerät in der Hauptverteilung installiert.
2. Erster Schwarzstartversuch	Nach Abschluss der Anpassungsarbeiten wurde der Netzbetrieb manuell von «0» auf «Insel» geschaltet. Die im Projekt implementierte, automatische Schwarzstartroutine des Aggregats wurde nach einer kurzen Wartezeit gestartet und das Aggregat in einen Teillastbetrieb von ca. 20-30% aufgenommen. Nach einer gewissen ruhigen Laufzeit begann die elektrische Outputleistung des Aggregats plötzlich zu oszillieren, was zu einem charakteristischen «sägenden» Motorengeräusch führte. Nach einiger Zeit musste die Anlage gestoppt werden, da der Katalysator durch das in diesem Betrieb nur unvollständig verbrennende und daher viel zu fette Abgas übermässig stark erhitzt wurde. Bei der Untersuchung der Gründe für das Verhalten des Aggregats zeigte sich, dass ein F/I Schalter in einem der Stromkreise ausgelöst hatte und deshalb die erwartete Grundlast für den Startbetrieb nicht zur Verfügung stand. Der Schalter konnte angepasst werden und der Katalysator nach einer ca. 30-minütigen Wartezeit wieder in einen für den Betrieb zulässigen Temperaturbereich gebracht werden. Da der Akku einer der unterbrechungsfreien Notstromversorgung durch die zahlreichen Startversuche fast leer war, wurde kurz auf normalen Netzbetrieb umgestellt, um alle Batterien neu aufzuladen.

Schritt	Beschreibung
3. Zweiter Schwarzstartversuch	Im zweiten Versuch konnte der Schwarzstart des Notnetzes erfolgreich durchgeführt werden. Nach einem anfänglichen Teillastbetrieb mit der im Netz verfügbaren «Grundlast» wurden durch die Steuerung schrittweise die grossen Lasten (v.a. Rührwerke und Querstromzerspaner) auf das Netz geschaltet, die Leistung des Biogas-Aggregats erhöhte sich dementsprechend. Ein stabiler Betrieb konnte bereits nach kurzer Zeit erreicht und über mehr als eine Stunde gehalten werden. In dieser Zeit wurden alle Verbraucher im Arealnetz Holzhof wie im Normalbetrieb vollumfänglich durch die dezentrale Stromerzeugung mit Spannung versorgt.
4. Weitere Tests	Im Anschluss an den Test des stabilen Betriebs wurde ein weiterer Test der Schwarzstartroutine durchgeführt. Dieser erfolgte ebenfalls vollautomatisch und ohne Probleme.

Quellenverzeichnis

[1] N. Gobat, «AgroCleanTech,» 16 November 2022. [Online]. Available: https://www.agrocleantech.ch/de/fuer-fachleute/tagung.html. [Zugriff am 23 November 2022].

[2] E. S. ESTI, «Anforderungen an Energieerzeugungsanlagen, ESTI Weisung Nr. 220 / Version 0621,» Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI, 01 Juli 2021. [Online]. Available: https://www.esti.admin.ch/inhalte/ESTI_220_0621.pdf. [Zugriff am 23 November 2022].

[3] EVU-MESSTECHNIK, «www.eco-grid.eu,» [Online]. Available: https://eco-grid.eu/wp-content/uploads/2016/05/EVU-DIN_EN_50160.pdf. [Zugriff am 01 Dezember 2022].

[4] S. Kenzelmann, «R&D Report – «BackupFlex», Project: 115073,» HES-SO Valais-Wallis, Sion, 2022.

[5] S. Innotec, «USV mit Solar-Backup und Solar-Priorität,» Studer Innotec, [Online]. Available: https://www.studer-innotec.com/de/applications/versorgungssicherheit-24-7/unterbrechungsfreie-stromversorgungen/usv-mit-solar-backup-und-solar-priorita%CC%88t-mit-wechselrichter-batterielader-xtender-5423. [Zugriff am 26 November 2022].

[6] S. S. T. AG, «Inselnetzsysteme mit SUNNY ISLAND 3.0M / 4.4M / 6.0H / 8.0H,» SMA Solar Technology AG, [Online]. Available: https://files.sma.de/downloads/Off-Grid-IS-de-33W.pdf. [Zugriff am 26 November 2022].

[7] I. E. AG, «PQ BHKW WARTMANN AMLIKON-BISSEGG,» IBG Engineering AG, St. Gallen, 2022.

[8] J. Schuller, ««Machen Sie sich bewusst, wie Ihr Betrieb elektrisch funktioniert»,» Bauernzeitung, 18 September 2022. [Online]. Available: https://www.bauernzeitung.ch/artikel/landtechnik/machen-sie-sich-bewusst-wie-ihr-betrieb-elektrisch-funktioniert-440012. [Zugriff am 01 Dezember 2022].

[9] H. v. Ballmoos-Hofer, «Strommangellage in der Landwirtschaft,» Schweizer Bauernverband, 23 September 2022. [Online]. Available: https://www.sbv-usp.ch/fileadmin/sbvuspch/05_Themen/220921_Strommangellage_Landwirtschaft_D.pdf. [Zugriff am 01 Dezember 2022].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspakete im Projekt 8
Abbildung 2: Ins Projekt eingebundene Akteure 8
Abbildung 3: Übersichtsschema Energieverteilung Holzhof mit Messstellen fürs Monitoring 9
Abbildung 4: Aufteilung des Jahresverbrauchs des untersuchten Milchwirtschaftsbetriebs 12
Abbildung 5: Aufteilung des Jahresverbrauchs des Milchwirtschaftsbetriebs 13
Abbildung 6: Kumuliertes Profil – Last abzüglich PV Produktion 13
Abbildung 7: Hauptverteilung und Schalter Betriebsmodus auf Inselbetrieb 18
Abbildung 8: Auswertung Feldtest nach EN 50160 (Quelle: IBG Engineering AG) 21
Abbildung 9: Auswertung der Spannungsmessung während des Feldtests 21
Abbildung 10: Auswertung der Frequenzmessung während des Feldtests 22
Abbildung 11: Einspeisung der Photovoltaikanlage (in grün) während Feldtest 2 23
Abbildung 12: Einspeisung der Photovoltaikanlage (in grün) während Feldtest 3 24
Abbildung 13: Auswertung Feldversuch Leistungsmessung, Verteilung relativer Messfehler 26