Teil I – Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Berlin

Förderkennzeichen: 03SF0684A (BMFTR)

Vorhabenbezeichnung: Smart microgrids as a solution for agriculture farms electrification (MG FARM)

Laufzeit des Vorhabens: 05/2022 – 02/2026

Berichtsart: Teil I – Kurzbericht zum Verwendungsnachweis

Autor*innen: Khadidja Sakhraroui, Florian Rzepka, Christian von Hirschhausen, Julia Kowal

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Beiträge der Technischen Universität Berlin – Fachgebiete WIP und EET

Aufgabenstellung und Ausgangslage

Beitrag TU Berlin – Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (TUB-WIP)

Im Verbundprojekt MG-FARM untersuchte TUB-WIP die sozio-technischen, regulatorischen und systemischen Voraussetzungen für den Einsatz digitalisierter Microgrids in der Landwirtschaft in Marokko und Algerien. Im Mittelpunkt standen die Verknüpfung von Energie-, Wasser- und Landwirtschaftssystemen im Sinne des Water-Energy-Food Nexus, die Entwicklung einer strukturierten Datengrundlage für die Demonstrationsfarmen sowie die Übertragung der Ergebnisse auf regionale Modellierungs- und Transformationspfade.

Beitrag TU Berlin – Fachgebiet Elektrische Energiespeichertechnik (TUB-EET)

Das TUB-EET entwickelte die simulations- und hardwareseitigen Grundlagen für den sicheren, effizienten und alterungsbewussten Einsatz von Batteriespeichern in PV-basierten landwirtschaftlichen Microgrids in Marokko und Algerien. Ausgangspunkt waren wechselnde Klima- und Lastbedingungen sowie der Bedarf an zuverlässiger Zellüberwachung, Zustandsschätzung, Schutztechnik und Kommunikation. Anknüpfend an den Stand der Technik zu Lithium-Eisenphosphat-Zellen (LFP) wurden elektrische, thermische und alterungsbezogene Modelle mit einem projektspezifischen Batteriemanagementsystem (BMS) verbunden.

Ablauf des Vorhabens

Beitrag TUB-WIP

Die Arbeiten von TUB-WIP umfassten Beiträge zu WP2, WP3, WP4, WP5, WP6, WP9, WP10 und WP11. Zunächst wurden energie-, wasser- und landwirtschaftspolitische sowie institutionelle Rahmenbedingungen in Marokko und Algerien untersucht. Parallel wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ein Data Collection and Analysis Framework (DCAF) entwickelt. Hierzu gehörten ein digitales Datenerhebungstool, ein englisch- und französischsprachiges Handbuch sowie Trainingsmaterialien und Schulungen für lokale Datensammler.

Die erhobenen Daten wurden anschließend für Baseline-, Monitoring- und Modellierungsarbeiten aufbereitet. Darauf aufbauend entwickelte TUB-WIP einen regionalen Modellierungsansatz für landwirtschaftliche Microgrids unter Nutzung von Julia, AnyMOD und CROPWAT 8.0. Ergänzend wurden Trainings-, Monitoring-, Stakeholder- und Disseminationsaktivitäten in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern durchgeführt.

Beitrag TUB-EET

Die Arbeiten in WP7 bauten stufenweise aufeinander auf und die Ergebnisse wurden in mehreren Deliverable-Reports beschrieben. D7.1 beschrieb die Laborparametrierung sowie ein skalierbares elektrisches Ersatzschaltkreis-, Elektrothermie- und Alterungsmodell. In D7.2 wurde LFP als geeignete Zelltechnologie ausgewählt und das integrierte Batteriemodell für Winston-LiFeYPO4-Zellen mit 100 Ah in MATLAB/Simulink umgesetzt. D7.3 kombinierte zyklische und kalendarische Alterungstests, statistische Versuchsplanung und 21 Simulationsszenarien zur Bewertung verschiedener Betriebsweisen.

Darauf aufbauend wurde in D7.4 ein BMS-Prototyp für drei bis vier in Reihe geschaltete Zellen mit Mess-, Balancing-, Schutz- und Kommunikationsfunktionen entwickelt. D7.11 überführte diesen Ansatz in eine vollständig aufgebaute und funktionsfähige 4s-Laborplattform mit eingebetteter SoC-/SoH-Schätzung, isolierter RS485-/UART-Kommunikation und erweiterten Mess- und Steuerschnittstellen.

Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit

Beitrag TUB-WIP

Die Arbeiten zeigten das Potenzial erneuerbarer Microgrids für eine integrierte Energie- und Wasserversorgung landwirtschaftlicher Betriebe. Die Modellierung untersuchte unter anderem Bewässerungs- und Energiebedarf, PV-Erzeugung, Batteriespeicher, Wasserreservoire, Netzanschluss sowie den Energieaustausch zwischen landwirtschaftlichen Betrieben. Für die untersuchten Szenarien zeigte sich, dass PV-basierte Microgrids einen sehr hohen Anteil des landwirtschaftlichen Strombedarfs decken können und Wasserreservoire eine kosteneffiziente Flexibilitätsoption darstellen. Darüber hinaus wurden Potenziale von Netzeinspeisung und regionalem Energieaustausch zwischen Farmen untersucht.

Die Ergebnisse wurden durch wissenschaftliche Publikationen, Dissertationen und internationale Konferenzbeiträge verwertet. Workshops und Trainings in Marokko und Algerien unterstützten den Austausch mit Landwirten, Studierenden, Forschungseinrichtungen, lokalen Behörden und weiteren Stakeholdern. Die Arbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit insbesondere mit MEI sowie den marokkanischen und algerischen Projektpartnern, wodurch empirische Erkenntnisse aus den Demonstrationsfarmen mit den sozio-technischen und modellbasierten Analysen von TUB-WIP verbunden werden konnten.

Beitrag TUB-EET

Die Versuche und Simulationen zeigten, dass insbesondere hohe Entladeraten und größere Entladetiefen die zyklische Alterung beschleunigen; für die kalendarische Alterung sind vor allem Temperatur und Ladezustand relevant. Innerhalb des untersuchten Bereichs war der Einfluss der Laderate geringer. Die finale 4s-Plattform erfasst Zellspannungen, Strom und Temperaturen, führt Balancing und Schutzfunktionen aus und verarbeitet Zustandsalgorithmen autonom auf einem Dual-Core-Mikrocontroller.

TUB-EET arbeitete als beitragender Partner im von UDES-CDER geführten WP7 und richtete Modell, Prüfprofile und Kommunikationsschnittstellen an den Anforderungen der Pilotstandorte und der übergeordneten Microgrid-Steuerung aus. Das Ergebnis ist eine validierte Laborplattform; Langzeitzyklen und die Übertragung auf höhere Spannungen bis zu einer künftigen 16s-/48-V-Variante bleiben Gegenstand der Weiterentwicklung.

Es wurden mehrere Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge erstellt und mehrere Abschlussarbeiten betreut.

Teil II – Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Berlin

Förderkennzeichen: 03SF0684A (BMFTR)

Vorhabenbezeichnung: Smart microgrids as a solution for agriculture farms electrification (MG FARM)

Laufzeit des Vorhabens: 05/2022 – 02/2026

Berichtsart: Teil II – Eingehende Darstellung zum Verwendungsnachweis

Autor*innen: Khadidja Sakhraroui, Florian Rzepka, Christian von Hirschhausen, Julia Kowal

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Beiträge der Technischen Universität Berlin – Fachgebiete WIP und EET

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Beitrag TU Berlin – Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (TUB-WIP)

TUB-WIP bearbeitete im MG-FARM-Projekt insbesondere sozio-technische und institutionelle Analysen, die Entwicklung und Anwendung des Data Collection and Analysis Frameworks (DCAF), die Aufbereitung von Daten der Demonstrationsfarmen, die Modellierung von Energie-, Wasser- und Landwirtschaftssystemen sowie Training, Monitoring und Stakeholder-Integration. Die Arbeiten bauten aufeinander auf: Politik- und Rahmenbedingungen aus WP2 flossen in die Datenerhebung in WP3 ein; die erhobenen Daten bildeten die Grundlage für Baseline- und Monitoringarbeiten in WP4, die Smart-Farming-Empfehlungen in WP5 und die Modellierung in WP6. Ergebnisse wurden über WP9–WP11 in Trainings, Monitoringaktivitäten und Stakeholder-Workshops übertragen.

WP2 – Analyse der Energie-, Wasser- und Landwirtschaftspolitiken und -strategien

TUB-WIP analysierte die regulatorischen, institutionellen und sozio-technischen Rahmenbedingungen für die Integration erneuerbarer Energien und digitalisierter Microgrids in landwirtschaftlichen Anwendungen in Marokko und Algerien. Hierzu wurden relevante energie-, wasser- und landwirtschaftspolitische Strategien und Dokumente ausgewertet und qualitative sowie quantitative Bewertungskriterien entwickelt. Methodisch wurde das Triple-Embeddedness-Framework genutzt, um institutionelle Rahmenbedingungen, technische Entwicklungen und sozio-politische Bedingungen gemeinsam zu betrachten.

- Analyse der Energie-, Wasser- und Landwirtschaftspolitiken in Marokko und Algerien.
- Bewertung regulatorischer und institutioneller Herausforderungen für dezentrale Energiesysteme.
- Integration des Water-Energy-Food Nexus sowie sozio-technischer Transformationsaspekte.
- Identifikation von Datenlücken und Anforderungen für das DCAF in WP3.
- Beiträge zu D2.1 „Policy analysis report“ und D2.2 „Stakeholder mapping and analysis report“.

WP3 – Aufbau des Data Collection and Analysis Framework (DCAF)

Ziel von WP3 war die Schaffung eines einheitlichen Rahmens für die Erhebung und Analyse qualitativer und quantitativer Daten aus den Demonstrationsfarmen und relevanten Institutionen. TUB-WIP definierte Datenbedarfe und Analysemethoden, entwickelte Datenerhebungsinstrumente und unterstützte die Rekrutierung und Schulung lokaler Datensammler. Die Instrumente wurden pilotiert und anhand der Erfahrungen aus den Projektregionen angepasst.

- Entwicklung eines digitalen Datenerhebungstools sowie eines praktischen Handbuchs in Englisch und Französisch.
- Entwicklung der Schulungsmaterialien für Datensammler (D3.1) und Durchführung von Trainings in Algerien.
- Rekrutierung und Schulung lokaler Studierender, Forschender und Kooperationspartner für die Datenerhebung.
- Pilotierung, Anpassung und Harmonisierung der Datenerhebungsinstrumente.
- Feldbesuche und Austausch mit Landwirten, lokalen Institutionen und Projektpartnern.
- Finalisierung der DCAF-Dokumentation D3.2 gemeinsam mit MEI.

Während der Projektverlängerung wurden die Datensätze weiter validiert und harmonisiert und für die nachfolgenden Modellierungs- und Auswertungsarbeiten aufbereitet.

WP4 – Baseline Report und Monitoringstrategie

Die im DCAF erhobenen Daten wurden verarbeitet und zur Beschreibung des Ausgangszustands der Demonstrationsfarmen genutzt. Im Fokus standen landwirtschaftliche Aktivitäten, Energie- und Wasserverbrauch sowie sozioökonomische, politische und regulatorische Rahmenbedingungen. TUB-WIP unterstützte damit die Erstellung des Baseline Reports und die Entwicklung einer Monitoringstrategie als Grundlage für die spätere Bewertung der Projektauswirkungen.

- Verarbeitung und Analyse der erhobenen Farm- und Kontextdaten.
- Analyse sozioökonomischer, politischer und regulatorischer Ausgangsbedingungen.

- Beitrag zu D4.1 „Baseline report“ und D4.2 „Monitoring strategy“.
- Bereitstellung aufbereiteter Daten für die Modellierungsarbeiten in WP6.

WP5 – Entwicklung optimierter Smart-Farming-Prozesse

TUB-WIP führte Ergebnisse aus WP3 und WP4 zusammen und unterstützte die Ableitung von Empfehlungen für optimierte Energie- und Wasserflüsse in landwirtschaftlichen Systemen. Berücksichtigt wurden erneuerbare Erzeugung, Speicheroptionen und typische Lastprofile der Demonstrationsfarmen. Die Arbeiten trugen zu D5.1 mit Empfehlungen für eine optimierte Energie- und Wasserversorgung, -nutzung und -speicherung sowie zur Einordnung neuer Anwendungsmöglichkeiten digitalisierter Microgrids im MENA-Kontext bei.

- Integration der Datenerhebungs- und Baseline-Ergebnisse in die Smart-Farming-Analyse.
- Unterstützung von Empfehlungen zu Batterie-, Wasserreservoir- und Microgrid-Konzepten.
- Beitrag zu regionalen Szenarien und techno-ökonomischen Bewertungen.

WP6 – Modellierung optimierter Energie-, Wasser- und Materialflüsse

WP6 bildete einen Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten von TUB-WIP. Aufbauend auf den Daten und Erkenntnissen aus WP2–WP5 wurde ein regionaler Modellierungsansatz entwickelt, mit dem landwirtschaftliche Microgrids von der Ebene einzelner Demonstrationsfarmen auf regionale Anwendungen übertragen werden konnten. Die Modellierung kombinierte Julia und AnyMOD mit CROPWAT 8.0 zur Abbildung des Bewässerungsbedarfs und verband damit Energie-, Wasser- und Landwirtschaftsaspekte im Water-Energy-Food Nexus.

- Modellierung von landwirtschaftlichem Energie- und Bewässerungsbedarf, PV-Erzeugung, Batteriespeichern und Wasserreservoiren.
- Analyse isolierter Farmen, netzgekoppelter Farmen und regional verbundener Microgrids.
- Integration empirischer Daten der Pilotfarmen sowie Durchführung von Szenario- und Sensitivitätsanalysen.
- Analyse von Netzeinspeisung, Energieaustausch zwischen Farmen und regionalen Skalierungsoptionen.
- Beitrag zu D6.1 „Impact of Digitized Microgrids and Smart Storages for the energy, water and agriculture sector in the Maghreb region“.

Die untersuchten Szenarien zeigten, dass PV-basierte Microgrids einen sehr hohen Anteil des landwirtschaftlichen Strombedarfs decken können; in den modellierten Fällen wurden Werte von bis zu 97 % erreicht. Wasserreservoire erwiesen sich als kosteneffiziente Flexibilitätsoption, da Wasserförderung zeitlich von der Bewässerungsnachfrage entkoppelt werden kann. Darüber hinaus zeigten die Analysen, dass Einspeiseanreize zusätzliche PV-Kapazitäten begünstigen können und regionale Microgrids den Energieaustausch zwischen benachbarten Farmen unterstützen.

WP9 – Training von Datensammlern, Landwirten und Microgrid-Nutzern

TUB-WIP unterstützte die Entwicklung und Durchführung von Trainings- und Capacity-Building-Maßnahmen, die eng mit dem DCAF verknüpft waren. Ziel war es, lokale Akteure zur strukturierten Datenerhebung und zur Nutzung der im Projekt entwickelten Methoden zu befähigen.

- Entwicklung zielgruppenspezifischer Trainingsmaterialien und -formate.
- Durchführung von Schulungen in Algerien für Datensammler, Studierende, Forschende und Projektpartner.
- Wissensvermittlung zu Datenerhebung, digitalisierten Microgrids sowie Energie- und Wasserdaten.
- Beitrag zu D9.1 durch Trainingsaktivitäten, Dokumentation von Trainingsmaterialien und Informationen zu geschulten Akteuren.

WP10 – Monitoring von Wasser- und Energieverbrauch sowie landwirtschaftlicher Produktion

TUB-WIP unterstützte die Integration und Auswertung der im Projekt erhobenen Monitoringdaten. Die Arbeiten dienten dazu, Wasser-, Energie- und Produktionsdaten der Demonstrationsfarmen strukturiert aufzubereiten und für die Bewertung von Bewässerung, Microgridbetrieb und weiterführenden Analysen nutzbar zu machen.

- Integration erhobener Daten in die im Projekt genutzte Dateninfrastruktur.
- Analyse von Wasser-, Energie- und Produktionsdaten sowie Ableitung relevanter Auswertungsthemen.
- Unterstützung periodischer Monitoringberichte und Stakeholder-Präsentationen (D10.1–D10.6).

WP11 – Partizipative Stakeholder-Workshops

Die Stakeholder-Aktivitäten dienten dazu, Projektergebnisse mit Akteuren aus Landwirtschaft, Energie, Wasser, Forschung und Verwaltung zu diskutieren und regionale Perspektiven in die Projektarbeiten einzubeziehen. TUB-WIP unterstützte die Themenentwicklung, Präsentation und Diskussion von Ergebnissen sowie die wissenschaftliche Aufbereitung der Rückmeldungen.

- Stakeholder-Workshop in Marrakesch, Marokko (2023): Vorstellung des Online-DCAF-Tools und Austausch mit regionalen Akteuren.
- Stakeholder-Aktivitäten in Algier, Tipaza und Tlemcen, Algerien (2024): Präsentation der MG-FARM-Technologien und Diskussion lokaler Herausforderungen.
- Integration von Stakeholder-Perspektiven in Berichte, wissenschaftliche Arbeiten und Disseminationsaktivitäten.
- Beiträge zu D11.1–D11.12 durch Präsentationsmaterialien und Unterstützung der Stakeholder-Workshops.

Beitrag TU Berlin – Fachgebiet Elektrische Energiespeichertechnik (TUB-EET)

TUB-EET bearbeitete im MG-FARM-Projekt die Modellierung, experimentelle Untersuchung und hardwareseitige Überwachung von Batteriespeichern für landwirtschaftliche Microgrids. Die Deliverables D7.1, D7.2, D7.3, D7.4 und D7.11 bilden eine zusammenhängende Entwicklungskette: von elektrischen, thermischen und alterungsbezogenen Zell- und Packmodellen über Laborversuche und Betriebsanalysen bis zu einer aufgebauten 4s-BMS-Laborplattform mit eingebetteter Zustandsberechnung. Modellparameter, Prüfprofile und Schnittstellen wurden auf die Klima-, Erzeugungs- und Lastbedingungen der MG-FARM-Pilotstandorte in Algerien und Marokko ausgerichtet.

D7.1 – Entwicklung des Batteriemodells

Zu Beginn wurden Modellansätze unterschiedlicher Komplexität hinsichtlich Genauigkeit, Parametrierbarkeit und Rechenaufwand bewertet. Für die Kopplung mit der Microgrid-Simulation wurde ein skalierbares Ersatzschaltkreismodell gewählt, da elektrochemische beziehungsweise molekulare Modelle für den vorgesehenen Systemeinsatz einen deutlich höheren Parameter- und Rechenbedarf aufweisen. Das elektrische Zellmodell basiert auf einem Thevenin-Ersatzschaltbild zweiter Ordnung mit einem ohmschen Widerstand und zwei RC-Gliedern. Kapazitäts-, quasi-statische OCV- und Hybrid-Pulse-Power-Characterization-Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen und Ladezuständen lieferten die benötigten Kennfelder und Parameter.

Das Packmodell bildet die Verschaltung mehrerer Zellen unter den dokumentierten Annahmen homogener Zellen, Temperaturen und Belastungen als äquivalente Zelle ab. Dadurch können Anzahl sowie Reihen- und Parallelschaltung für unterschiedliche Speicherkonfigurationen variiert werden. Das elektrische Modell wurde mit einem Elektrothermiemodell gekoppelt, das Joule-Wärme, Wärmeleitung, natürliche Konvektion und Wärmestrahlung berücksichtigt. Ergänzend wurden zyklische und kalendarische Alterung über Kapazitätsverlust und Zunahme des Innenwiderstands beschrieben. Der Ladezustand wird über Coulomb Counting fortgeschrieben; der Gesundheitszustand ergibt sich aus den kombinierten Alterungsanteilen.

- Parametrierung eines recheneffizienten Zellmodells aus standardisierten Laborprotokollen.
- Skalierbare Übertragung auf Batteriepackebene für Smart-Grid- und Microgrid-Simulationen.
- Rückkopplung von Temperatur und Alterung auf Kapazität, Innenwiderstand und elektrische Modellparameter.
- Vorbereitung der späteren SoC-/SoH-Schätzung sowie der Schutz- und Steuerungsfunktionen des BMS.

Für die Anwendung im Gesamtenergiesystem wurden die Modellgrenzen transparent festgehalten. Die Annahme homogener Zellzustände und einer einheitlichen Packtemperatur ermöglicht schnelle Szenariorechnungen, bildet jedoch keine lokale Zellstreuung oder einzelne thermische Hotspots ab. Messwerte außerhalb der parametrierten Temperatur- und SoC-Stützstellen müssen inter-

beziehungsweise extrapoliert werden. Für Schutzentscheidungen auf Hardwareebene wurde das Simulationsmodell deshalb später durch direkte Einzelzell- und Mehrpunkt-Temperaturmessungen des BMS ergänzt.

D7.2 – Zelltechnologie und integriertes Simulationsmodell

Nach einem technischen, funktionalen und wirtschaftlichen Vergleich wurde Lithium-Eisenphosphat (LFP) als geeignete Zelltechnologie für den stationären Einsatz ausgewählt. Für die Projektarbeiten kamen prismatische Winston-WB-LYP100AHA(B)-LiFeYPO4-Zellen mit 3,3 V Nennspannung und 100 Ah Nennkapazität zum Einsatz. Die Zellen wurden bei TUB-EET vermessen und parametriert. LFP verbindet eine hohe thermische Stabilität und Zyklenfestigkeit mit einer für stationäre Anwendungen geeigneten Leistungsfähigkeit; zugleich erfordert der flache Spannungsverlauf eine belastbare Zustandsberechnung.

Das in MATLAB/Simulink implementierte integrierte Batteriepackmodell verknüpft elektrisches Zellmodell, Elektrothermie sowie zyklische und kalendarische Alterung. Als äußere Eingangsgrößen dienen unter anderem PV-Leistung und Umgebungstemperatur. Berechnet werden Pack- und Zellstrom, Klemmenspannung, Ladezustand, Temperatur, äquivalente Vollzyklen und Gesundheitszustand. Die Zelltemperatur aktualisiert gemeinsam mit dem Ladezustand die elektrischen Parameter; C-Rate und Temperatur speisen das Alterungsmodell. Kapazität und Innenwiderstand werden anschließend in den elektrischen Modellpfad zurückgeführt. Damit kann das Modell Dimensionierungs- und Betriebsvarianten unter konsistenten elektrischen, thermischen und lebensdauerbezogenen Annahmen vergleichen.

Für die verwendete Zelle dokumentiert D7.2 neben der Nennspannung und -kapazität ein Betriebsfenster von 2,8 V bis 4,0 V sowie herstellerseitige Strom- und Temperaturgrenzen. Diese Werte dienten als technischer Referenzrahmen; die simulationsseitigen Betriebsfenster wurden für die Lebensdaueranalyse konservativer gewählt. Die Verknüpfung von PV-Leistung, Packspannung und Strom macht sichtbar, ob ein Szenario elektrische Grenzen erreicht und wie häufig bestimmte SoC-, Temperatur- und C-Rate-Bereiche auftreten. Damit wurden die Modellgrößen unmittelbar für die spätere Festlegung von BMS-Schwellen und Prüfprofilen nutzbar.

D7.3 – Betriebsweisen, Alterung, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit

Die Alterungsuntersuchungen kombinierten statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE), Laborversuche und Systemsimulation. Zyklische Tests variierten Lade- und Entladerate sowie Entladetiefe; kalendarische Tests untersuchten Temperatur und Ladezustand bei 25 °C, 35 °C und 45 °C. Vollfaktorielle Versuchspläne und ein Central-Composite-Design wurden mittels Varianzanalyse ausgewertet. Dadurch ließen sich Haupteffekte und Wechselwirkungen systematisch von zufälligen Streuungen unterscheiden.

Für die anwendungsbezogene Simulation wurden ein 30-kWp-PV-System, ein Jahresverbrauch von 15 MWh und Einstrahlungsdaten für Oran verwendet. In 21 Szenarien wurden Laderaten von 0,25 C bis 1,5 C, Entladeraten von 0,25 C bis 1 C und maximale Entladetiefen von 30 % bis 90 % untersucht. Reale PV- und Lastprofile führten dazu, dass vorgegebene Grenzwerte nicht in jedem Szenario vollständig erreicht wurden; dies wurde bei der Ergebnisinterpretation ausdrücklich berücksichtigt.

- Die Entladerate war ein besonders maßgeblicher Einflussfaktor der zyklischen Alterung; höhere Entladeraten beschleunigten die Degradation.
- Größere Entladetiefen führten im Allgemeinen zu niedrigeren Endwerten des State of Health und zu mehr wirksamen Vollzyklen.
- Temperatur und Ladezustand bestimmten wesentlich die kalendarische Alterung; thermische Führung und geeignete SoC-Fenster sind daher zentrale Betriebsgrößen.
- Der Einfluss der Laderate war im untersuchten Bereich geringer; nach 100 äquivalenten Vollzyklen lagen die SoH-Werte der verglichenen Laderaten eng beieinander.

Die Simulation bestätigte damit wesentliche Trends der DoE-Auswertung. Aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht erlaubt die Kopplung von Betriebsgrenzen und Alterungsmodell, Speichernutzung, Lebensdauer, Ersatzbedarf und Ressourcenverbrauch gemeinsam zu bewerten. Insbesondere die Begrenzung hoher Entladeraten und sehr großer Entladetiefen bietet einen Ansatz, Degradation zu reduzieren, ohne die Funktion des Microgrids aus dem Blick zu verlieren.

Bei der Variation des Ladestroms lagen die berechneten SoH-Werte nach 100 äquivalenten Vollzyklen zwischen rund 0,9749 und 0,9752 und damit sehr dicht beieinander. Diese geringe Spreizung stützt die DoE-Aussage, dass im betrachteten Bereich andere Größen dominieren. Die Ergebnisse sind jedoch

nicht als allgemeingültige Rangfolge sämtlicher Alterungseinflüsse zu verstehen: Zellchemie, Temperaturführung, tatsächliche Grenzwertausnutzung und die Dauer des Betriebsprofils bestimmen die Übertragbarkeit. Für MG-FARM dienten die Szenarien vor allem dazu, robuste Stellgrößen für einen lebensdauerbewussten Microgridbetrieb zu identifizieren.

D7.4 – Entwicklung des Batteriemanagementsystems

D7.4 überführte die Modell- und Versuchsergebnisse in einen BMS-Prototyp für drei bis vier in Reihe geschaltete Zellen. Der TLE9012DQU übernimmt Zellspannungs-, Strom- und Temperaturmessung sowie passives Balancing. Ein STM32H755 mit Cortex-M4- und Cortex-M7-Kern trennt zeitkritische Überwachungs-, Schutz- und Kommunikationsaufgaben von rechenintensiveren SoC-/SoH-Algorithmen. Messdaten werden über gemeinsam genutzten Speicher zwischen den Prozessorkernen ausgetauscht, ohne die kontinuierliche Zellüberwachung zu blockieren.

Die Leiterplatte umfasst bidirektionale Strommessung, schaltbaren Schutzpfad und serielle Kommunikation. Das RS485-Protokoll arbeitet mit 115200 Baud und strukturiert Telegramme über Bus-ID, Befehl, Nutzdatenlänge, Nutzdaten und Prüfsumme. Firmware und Protokoll wurden modular angelegt, sodass neue Befehle und Zustandsverfahren ergänzt werden können. Die Hardware entstand in KiCad, die Mikrocontroller-Firmware in STM32CubeIDE; ein Python-basiertes Werkzeug unterstützt Protokolltests und Datenlogging. Während der Inbetriebnahme identifizierte Kommunikationsprobleme der Ein-Draht-UART-Verbindung wurden durch eine robustere Empfangsführung behoben.

- Validierung der Messung, des passiven Balancings, der Schutzabschaltung und der seriellen Telemetrie.
- Aufteilung von Sicherheits- und Kommunikationsaufgaben sowie Zustandsalgorithmen auf die beiden Mikrocontrollerkerne.
- Dokumentation von Leiterplatte, Firmware, Kommunikationsprotokoll, Inbetriebnahme und Erweiterungsmöglichkeiten.

Für Inbetriebnahme und Reproduzierbarkeit wurden außerdem der Aufbau aus bestückter BMS-Platine, 4s-Zellpack, NTC-Sensorik, Strompfad, ST-LINK sowie USB-RS485-Anbindung und externer Versorgung dokumentiert. Die Anzeige von Zellspannungen, Temperaturen und Strom diente zunächst der Plausibilitätsprüfung; anschließend wurden Zustandsalgorithmen und Protokollfunktionen unter variierenden Betriebsbedingungen getestet. Damit stand nicht nur ein Schaltungsentwurf, sondern eine nachvollziehbar betreibbare Laborumgebung zur Verfügung.

Die Firmwarearchitektur hält die zyklische Zellüberwachung auch dann aufrecht, wenn auf dem zweiten Kern umfangreichere Zustandsberechnungen oder Kommunikationszugriffe ausgeführt werden. Alarm- und Schutzpfade bleiben dadurch von nicht zeitkritischen Auswertungen getrennt. Für die serielle Anbindung wurden Adressierung, Befehlsauswahl, Nutzdaten und Prüfsumme eindeutig strukturiert; neue Kommandos lassen sich an die bestehende Verarbeitung anbinden. Diese Aufteilung war wesentlich, um die Laborplattform sowohl als Schutzsystem als auch als flexibel erweiterbaren Forschungsaufbau verwenden zu können.

D7.11 – Finalisierung und Validierung des BMS

D7.11 finalisierte den Prototyp zu einer vollständig aufgebauten und betriebsfähigen 4s-Laborplattform. Die Zustandsalgorithmen laufen auf der Zielhardware; Zellspannungen, Strom, Temperaturen, SoC-/SoH-Ergebnisse und Alarmzustände werden lokal und über galvanisch getrennte RS485- beziehungsweise UART-Schnittstellen bereitgestellt. Das Protokoll wurde um Parameterübertragung, Kalibrierroutinen und gepufferte Datensätze erweitert und blieb zu den in D7.4 eingeführten Nachrichten kompatibel.

Die überarbeitete Hardware ergänzt PWM-Ausgänge für externe Aktoren, weitere NTC-Anschlüsse für Mehrpunkt-Temperaturmessungen, eine externe 5-V-Versorgung für den Laborbetrieb und getrennte Schaltmöglichkeiten für Lade- und Entladepfad. Verkürzte und verbreiterte Hochstrompfade, kontrollierte Rückstromführung und verbesserte Entkopplung verringern parasitäre Impedanzen, Messrauschen und thermische Hotspots. Die isolierte UART-Brücke zwischen Zellüberwachung und Controllerbereich verbessert die Robustheit gegenüber Potentialunterschieden.

Zur Validierung wurden repräsentative Lade- und Entladeprofile der algerischen und marokkanischen Pilotstandorte ausgeführt. Das BMS erfasste Spannungsdrift, Stromwelligkeit und Temperaturgradienten, während die Zustandsberechnung autonom auf dem Controller lief. Balancing, Schutz, Telemetrie und Kommunikation wurden auf der aufgebauten Hardware geprüft. Die aktuelle 4s-Ausführung ist eine validierte Laborplattform und noch kein für den Feldeinsatz freigegebenes Gerät.

Langzeitzyklen zur weiteren Parametrierung und die Qualifizierung des analogen Frontends für größere Stacks bilden die nächsten Schritte; eine 16s-/48-V-Variante kann auf dem bestehenden Steuerungs-, Firmware- und Kommunikationskonzept aufbauen.

Die Inbetriebnahmesequenz umfasste die Montage des Zell- und Temperatursensor-Harnesses, die getrennte Versorgung des Controllerbereichs, das Flashen beider STM32-Kerne über SWD sowie einen skriptgestützten Selbsttest des Schaltpfads. UART-Aktivität, Sensorplausibilität und Schaltzustände wurden vor den dynamischen Profilen kontrolliert. Die Schritte wurden an mehreren Hardwaremustern wiederholt. Die zusätzlich gepufferten Datensätze erlauben, kurzzeitige Ereignisse auch bei unterbrochener Hostverbindung nachträglich auszuwerten und die Zustandsmodelle mit hochaufgelösten Messdaten zu vergleichen.

Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojekts

TUB-EET arbeitete als beitragender Partner im von UDES-CDER geführten WP7. Die Abstimmung mit den Partnern betraf Zelltechnologie, Packannahmen, Standortprofile, Datenformate und die Schnittstelle zur übergeordneten Microgrid-Steuerung. Prüfprofile und Validierungsdaten aus Algerien und Marokko stellten den Anwendungsbezug her; die Deliverables dokumentieren die schrittweise Rückführung von Labor- und Simulationsergebnissen in Hardware und Firmware.

Bewertung der Zielerreichung und verbleibende Grenzen

Die für TUB-EET vorgesehene Entwicklungskette wurde von der Zellcharakterisierung über das integrierte Packmodell und die Untersuchung alterungsrelevanter Betriebsweisen bis zur funktionsfähigen 4s-BMS-Plattform umgesetzt. Die Modellierung liefert die für Microgrid-Szenarien erforderlichen elektrischen, thermischen und lebensdauerbezogenen Zustandsgrößen; die Laborplattform verbindet diese Ergebnisse mit realer Mess-, Schutz-, Balancing- und Kommunikationshardware. Abzugrenzen ist das Projektergebnis von einem serien- oder feldreifen Speichersystem: Zellstreuungen, Langzeitstabilität, EMV- und Sicherheitsqualifikation sowie die Skalierung des analogen Frontends auf höhere Spannungen sind in weiteren Entwicklungsschritten zu prüfen. Diese Grenzen wurden in D7.11 ausdrücklich als Ausgangspunkt für die 16s-/48-V-Weiterentwicklung und fortlaufende Langzeitzyklen dokumentiert.

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Beitrag TUB-WIP

Die Arbeiten von TUB-WIP waren erforderlich, um die technischen Entwicklungen des Verbundprojekts mit belastbaren Daten, sozioökonomischen und regulatorischen Analysen sowie einem übertragbaren Modellierungsrahmen zu verbinden. Die DCAF-Arbeiten schufen eine einheitliche Datengrundlage für unterschiedliche Pilotstandorte. Baseline- und Monitoringarbeiten ermöglichten die Einordnung der Demonstrationsfarmen, während die Modellierung die Bewertung von Einzelbetrieben und regionalen Microgrid-Konfigurationen erlaubte. Trainings und Stakeholder-Aktivitäten waren notwendig, um lokale Akteure einzubinden, Datenqualität zu sichern und die Anwendbarkeit der Projektergebnisse zu erhöhen.

Beitrag TUB-EET

Die Arbeiten waren erforderlich, weil Batteriespeicher in landwirtschaftlichen Microgrids schwankenden PV-Leistungen, Lastprofilen und Umgebungstemperaturen ausgesetzt sind. Eine rein elektrische Betrachtung hätte weder thermisch beschleunigte Alterung noch die Wirkungen von Ladezustand, Stromrate und Entladetiefe ausreichend erfasst. Die Kombination aus Zellparametrierung, Elektrothermie, Alterungsmodell, DoE und realitätsnaher Systemsimulation war deshalb angemessen, um Betriebsgrenzen und Lebensdauerwirkungen nachvollziehbar abzuleiten. Ebenso notwendig war die Umsetzung auf eigener Hardware: Erst dort konnten Messpfade, Balancing, Schutzabschaltung, eingebettete Zustandsalgorithmen und Kommunikation gemeinsam geprüft werden. Der stufenweise Aufbau von D7.1 bis D7.11 begrenzte technische Risiken und erlaubte, Erkenntnisse aus Versuchen und Simulation unmittelbar in Hardware und Firmware zu übertragen.

3. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Beitrag TUB-WIP

Die Ergebnisse von TUB-WIP können in zukünftigen Forschungs-, Demonstrations- und Transferprojekten zu nachhaltigen Energiesystemen und landwirtschaftlicher Transformation im

Maghreb weiterverwendet werden. Das DCAF, die Datenerhebungsinstrumente und die Trainingsmaterialien bieten eine methodische Grundlage für weitere Pilotprojekte. Der entwickelte Modellierungsansatz kann für die Analyse weiterer Regionen und landwirtschaftlicher Systeme angepasst werden. Die wissenschaftliche Verwertung erfolgt über Publikationen, Dissertationen, Konferenzbeiträge und die Weiterentwicklung der Arbeiten im Water-Energy-Food-Nexus.

Beitrag TUB-EET

Das integrierte Simulationsmodell kann zur Dimensionierung und lebensdauerorientierten Betriebsoptimierung stationärer LFP-Speicher eingesetzt und auf weitere Packgrößen, Standorte und Lastprofile angepasst werden. Die Alterungsergebnisse unterstützen die Wahl geeigneter Strom-, Temperatur- und Ladezustandsgrenzen und verbinden technische Lebensdauer mit Ersatzkosten und Ressourcenbedarf. Die 4s-BMS-Plattform ist für Lehre, Laborvalidierung, Fault-Injection-Versuche, Algorithmusvergleich und die Erzeugung hochaufgelöster Trainings- und Validierungsdaten nutzbar. Durch die Trennung von Sicherheits- und Zustandsfunktionen, modulare Schnittstellen und das erweiterbare Protokoll können neue modellbasierte oder datengetriebene SoC-/SoH-Verfahren integriert werden. Nächste Entwicklungsschritte sind Langzeitvalidierung, Kalibrierung und die Qualifizierung für höhere Spannungen.

Die Verwertung ist dabei modular möglich: Das Simulationsmodell kann unabhängig von der konkreten Laborplatine für Systemstudien verwendet werden; Mess- und Kommunikationskomponenten der Plattform können separat für Prüfstände oder Lehrversuche eingesetzt werden. In einer Anschlussentwicklung lassen sich zunächst Zellzahl und Analog-Frontend erweitern, während Protokoll, Dual-Core-Aufgabenteilung und Zustandsalgorithmen weitgehend fortgeführt werden. Dies reduziert den Entwicklungsaufwand für größere stationäre Speichersysteme und erhält zugleich die im Projekt geschaffene Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Hardwaremessung.

4. Fortschritt bei anderen Stellen

Beitrag TUB-WIP

Während der Projektdurchführung wurden keine externen Ergebnisse bekannt, die eine grundlegende Änderung der Zielsetzung oder der TUB-WIP-Arbeiten erforderlich gemacht hätten. Relevante wissenschaftliche und technologische Entwicklungen wurden im Rahmen der Literatur-, Politik- und Marktanalysen berücksichtigt.

Beitrag TUB-EET

Die Entwicklung knüpfte an etablierte Ersatzschaltkreis-, Elektrothermie- und semiempirische Alterungsmodelle sowie an Referenzdesigns und Anwendungshinweise der eingesetzten BMS- und Mikrocontroller-Hersteller an. Diese externen Ansätze wurden für MG-FARM ausgewertet und an die ausgewählte LFP-Zelle, die 4s-Laborhardware und die vorgesehenen Microgrid-Profile angepasst. In den zugrunde gelegten Deliverables ist kein externer Fortschritt dokumentiert, der eine grundlegende Änderung der Projektziele oder des eingeschlagenen Entwicklungspfads erforderlich gemacht hätte.

5. Veröffentlichungen, Abschlussarbeiten und Konferenzbeiträge

Beitrag TUB-WIP

Veröffentlichungen

- Agadi, Redha; Sakhraoui, Khadidja; Dupke, Richard Karl Moritz; Wiebrow, Enno; von Hirschhausen, Christian (2023): „Integration of Renewable Energy Resources into the Water–Energy–Food Nexus – Modeling a Demand Side Management Approach and Application to a Microgrid Farm in Morocco.“ Frontiers in Environmental Economics, Vol. 2, Article 1200703.
- Sakhraoui, Khadidja; Agadi, Redha; von Hirschhausen, Christian; Ege, Gülşah S. (2024): „Energy Policy in Morocco: Analysis of the National Energy Strategy's Impact on Sustainable Energy Supply and Transformation.“ Next Research, Vol. 1, Article 100072.
- Agadi, Redha; Sakhraoui, Khadidja; von Hirschhausen, Christian; Kebir, Nabil (2023): „Sustainable Farming through Decentralized Energy Systems: Opportunities and Barriers.“ E3S Web of Conferences.

- Agadi, Redha et al. (2025): „Macro-level Modelling Framework for Agricultural Microgrids in Morocco using Julia, AnyMOD and CROPWAT.“ Eingereicht bei Sustainable Energy Technologies and Assessments (SETA).

Dissertationen

- Agadi, Redha (22.10.2025): „Smart Microgrids and Agriculture in the Global Energy Transformation Discourse: A Model for the Maghreb Countries.“ Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Sakhraoui, Khadidja (16.10.2025): „Energy Transformation in the MENA Region: Sustainable Pathways for Algeria and Morocco.“ Dissertation, Technische Universität Berlin.

Konferenzen

- 6th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2023), Brest, Frankreich, 23.–25.08.2023 – Redha Agadi: „Smart Farming and Energy Transition: Renewable Energy Solutions for Sustainable Agricultural Systems.“
- 45th IAEE International Conference, Istanbul, Türkei, 26.06.2024 – Khadidja Sakhraoui: „Macro Model for Microgrid Connections in Morocco: Implications for the Water-Energy-Food Nexus.“
- 45th IAEE International Conference, Istanbul, Türkei, 26.06.2024 – Redha Agadi: „Microgrids Application and Business Models in Agriculture: a Case Study of Algerian Farms.“

Beitrag TUB-EET

Die hier zusammengefassten Arbeiten und Ergebnisse sind in den folgenden Projektberichten dokumentiert:

- D7.1 „Simulation model of the battery system will be finalized based on laboratory tests and the results of energy management“ (Februar 2023).
- D7.2 „Finished design of the battery system simulation model based on the laboratory tests“ (Februar 2023).
- D7.3 „Analysis of battery system operating modes in terms of economy and sustainability“ (Januar/Februar 2024).
- D7.4 „Fully programmed BMS adapted to usage behaviour and cell type“ (September 2024).
- D7.11 – Finalisierung und Anpassung des BMS nach Auswertung der Felddaten (Oktober 2025).

Veröffentlichungen

- F. Rzepka, P. Hematty, M. Schmitz, J. Kowal, Neural Network Architecture for Determining the Aging of Stationary Storage Systems in Smart Grids, Energies 16 (2023), 6103. https://doi.org/10.3390/en16176103.

Dissertationen, Bachelor- und Masterarbeiten

- Rzepka, Florian (wird bald eingereicht): „ Deployment-Oriented Neural Network State-Estimation Methods for Battery Management Systems: Ageing Estimation, Robustness Benchmarking, Embedded Optimization, and Hardware Integration“, Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Evaluierung zur Eignung des Batterie-Management-IC L9963E von ST für den Rennwagen des FaSTTUBe Formula-E Teams (30. Januar 2024)
- Modeling the relationship between electrical stress and aging effects in lithium-ion cells using machine learning methods (23. Januar 2024)
- Modellierung und Simulation einer Lithium-Eisenphosphat-Zelle für Fahrzeuganwendungen anhand von zwei Parameteridentifikation-Ansätzen: LuT-Methode und RLS-Algorithmus (09. Januar 2024)
- Enhancing Battery Performance and Sustainability: A DOE-Based Study of Lithium-Ion Battery Aging under Variable Operating Conditions- (10. April 2024)
- Anwendungsbasierte Optimierung der Energiespeicherung in netzgekoppelten Microgrids unter Einsatz eines Energiemanagementsystems (03. Juli 2024)
- “Entwicklung einer Deep-Learning-basierten Simulationsumgebung zur Echtzeit-Überwachung von SOC und SOH in Batteriemanagementsystemen“ (2025)

- „Entwicklung und Benchmarktest ressourceneffizienter Deep-Learning Modelle zur SOC- und SOH-Bestimmung von Batterien“ (2025)
- „A Time Series-Driven Incremental Deep Learning Model for Battery State Estimation“ (2025)

Konferenzen

- EMCEI 2024 Marrakesh, Marocco: Optimizing SOC and SOH Estimations in LFP Cells Using a N-Beats Network for Stationary Energy Storage Management in Microgrids (Florian Rzepka 16. Mai 2024)
- EMCEI 2025, Reggio Calabria, Italien: “Real-Time Neural Network State Estimation on an Experimental Battery Management System“ (Florian Rzepka, Juni 2025)