



## SynErgie

*Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung*

Schlussbericht Teilvorhaben:

Energieflexibles Automobilwerk (03SFK3D1-2)

01.11.2019 – 31.10.2022

- Öffentlicher Teil -

Datum: 30.04.2023

**KOPERNIKUS**  
SynErgie **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Teil I: Kurze Darstellung .....	3
1 Aufgabenstellung .....	3
2 Voraussetzungen .....	4
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	5
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	6
Teil II: Eingehende Darstellung.....	7
1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	7
1.1 Cluster II: Produktionsinfrastruktur / TP 2.3: Thermische Speicher im Automobilwerk ..	7
1.1.1 MS II.2.3.1: Systemanalyse der Referenz .....	7
1.1.2 MS II.2.3.2: Auslegung und Dimensionierung des Labordemonstrators .....	8
1.1.3 MS II.2.3.3: Analyse der Wirkung von thermischen Speichern im Kälteversorgungssystem .....	8
1.1.4 MS II.2.3.4: Analyse und Bewertung möglicher Use-Cases.....	8
1.1.5 MS II.2.3.5: Aufbau und Inbetriebnahme des Labordemonstrators .....	9
1.1.6 MS II.2.3.6: Validierung der Ergebnisse und Erstellung eines Planungsleitfadens.	9
<b>1.2 Cluster IV: Markt- und Stromsystem / TP 4.2: Last- und Flexibilitätsmanagement</b>	<b>10</b>
1.2.1 MS II.4.2.1: Beschreibung der Systemkomponenten und regelungstechnische Anforderungen (Lead IPA).....	10
1.2.2 MS II.4.2.3: Analyse der Use-Cases (Lead MB Group AG) .....	11
1.2.3 MS II.4.2.4: Entwicklung des Prognosewerkzeugs (Lead EEP) .....	11
1.2.4 MS II.4.2.6: Erstellung des Simulationsmodells (Lead MG Group AG) .....	11
1.2.5 MS II.4.2.7: Implementierung des Betriebsalgorithmus in das Simulationsmodell (Lead EEP).....	12
1.2.6 MS II.4.2.8: Definition der Testszenarien (Lead MB Group AG) .....	12
1.2.7 MS II.4.2.9: Konzeptionierung der Visualisierungsoberfläche (Lead EEP).....	12
1.2.8 MS II.4.2.10: Validierung des Betriebsalgorithmus und Dokumentation der Ergebnisse (Lead EEP) .....	13
1.2.9 MS II.4.2.11: Erstellung des Planungsleitfadens (Lead MB Group AG) .....	13
2 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen .....	14
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	16
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	16
Schlussbericht Energieflexibles Automobilwerk (03SFK3D1-2)	1



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	16
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses.....	16

Beachten Sie bei der Erstellung des Schlussberichts bitte sämtliche Hinweise, die Sie vom Projektträger Jülich erhalten haben und insbesondere die Anlage 2 zu den Nebenbestimmungen des BMBF.

Hinweis: Sie dürfen sich bei der Erstellung des Schlussberichts (Teil I+II) durchaus kurzfassen. Eine Darstellung und Formulierung in 10-15 Seiten ist möglich, auch für große Zuwendungsempfänger. Verändern Sie nicht die Überschriften erster Ordnung. Die Strukturierung mit Überschriften zweiter und dritter Ordnung in Teil II, Kapitel 1 ist frei wählbar.

## Teil I: Kurze Darstellung

### 1 Aufgabenstellung

Aufbauend auf bereits identifizierten und bewerteten Flexibilisierungspotentialen relevanter Kernprozesse sollen im Rahmen von SynErgie 2 konkrete Systembausteine für ein künftiges Netz- und Verbrauchermanagement weiterentwickelt und auf die Anforderungen der industriellen Anwendung bewertet werden. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung eines Konzepts für ein cloud-basiertes Last- und Flexibilitätsmanagement und einer hierbei integrierten intelligenten Steuerungslogik. Hierbei sind die spezifischen, technischen Anforderungen der Verfahrens- und Anlagentechnik, aber auch die betrieblichen Planungs- und Gestaltungsrichtlinien zu berücksichtigen. Darüber hinaus soll anhand eines realen Fallbeispiels die Möglichkeit der Integration eines thermischen Speichers zur flexiblen Kälteversorgung untersucht und bewertet werden. Ebenso soll als Ergebnis die techno-ökonomische Auslegung des optimierten Kälteversorgungssystems unter Einbindung des Kältespeichers in einem Planungsleitfaden für eine nachfolgende Pilotierung im Realumfeld dargestellt werden.

Weitere Fragestellungen:

- Wie kann der Stromlastgang eines Automobilwerks durch die Einbindung eines thermischen Speichers in das Kälteversorgungssystem eines Standortes optimiert werden (II.2.3)?
- Wie kann Flexibilität durch kostenoptimierte Kälteerzeugung in verschiedenen Tarifmodellen erhöht werden (II.2.3)?
- Durch welche Use-Cases und Betriebsstrategien lässt sich eine wirtschaftliche Integration eines Kältespeichers in Brown- oder Greenfieldprojekten realisieren (II.2.3)?
- Welche Anforderungen muss eine zukünftige „Flexibilitätsleitwarte“ erfüllen und welche neuen Schnittstellen sind zu beachten (II.4.2)?
- Wie ist der kombinierte Einsatz unterschiedlicher Flexibilitätsmaßnahmen in einem Industrienetz geregelt (II.4.2)?
- Welche Wechselwirkungen müssen zwischen einzelnen Systemkomponenten im Betrieb berücksichtigt werden (II.4.2)?
- Wie kann ein bestehendes System aus Energieerzeugern, -speichern und -verbrauchern mithilfe eines übergeordneten Last- und Flexibilitätsmanagements optimiert werden?

## 2 Voraussetzungen

Das Projekt wurde in einem interdisziplinären Projektteam, bestehend aus Projektleitung, Projektleitungsunterstützung, studentischen Hilfskräften und diversen unternehmensinternen Experten, in Kooperation mit dem Fraunhofer IPA und dem Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart durchgeführt. Im Unternehmen wurden zuvor bereits im Rahmen von SynErgie 1 umfassende Analysen bzgl. des Energieflexibilitätspotenzials eines Automobilwerks durchgeführt, an welche unmittelbar angeknüpft werden konnte. Der Umfang der Arbeitspakete in SynErgie 2 wurde aufbauend auf diesen Erkenntnissen beschrieben.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

(Kurze Darstellung Ihrer individuellen Planung und des Projektablaufs)

Anhand eines realen Fallbeispiels soll die Möglichkeit der Integration eines thermischen Speichers zur flexiblen Kälteversorgung untersucht und bewertet werden. Hierzu wird ein Laboremonstrator in Form eines flexiblen Kältespeichers errichtet mit dessen Hilfe vor- und nachgelagerte Prozesse angesteuert werden sollen (z.B. Kältemaschinen und Kälteverbraucher). Aus der Analyse sollen energieflexible Betriebsstrategien bewertet werden. Als Ergebnis dieses Arbeitspakets soll ein Planungsleitfaden für eine energieflexible techno-ökonomische Auslegung des optimierten Kälteversorgungssystems unter Einbindung eines Kältespeichers für das reale Fallbeispiel an einem Standort der Mercedes-Benz Group AG entwickelt werden.

Um für das Last- und Flexibilitätsmanagement einen übergeordneten Betriebsalgorithmus entlang eines realen Referenzobjektes zu entwickeln, werden zunächst die regelungstechnischen Anforderungen und Rahmenbedingungen aller Systemkomponenten identifiziert. Ein zu entwickelndes Subregelungssystem ist das Pooling von Energieflexibilitätsmaßnahmen in den Kategorien Energiespeicher, Energieträgerwechsel und Regelungsparameteranpassung. Um das wirtschaftlichste Einsatzszenario von Energieflexibilitätsmaßnahmen zu ermitteln, sind daher konkrete Use-Cases und deren Kombinationsmöglichkeiten in Abhängigkeit aller internen (z.B. Ladezustand des Energiespeichers) und externen Systemkomponenten (z.B. Strompreise) zu analysieren. Durch eine zielgerichtete Veränderung der Regelgrößen soll der Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen kontinuierlich optimiert werden.

Der Hauptbestandteil des Betriebsalgorithmus ist ein Prognosewerkzeug für elektrische Lasten und Erzeugungseinheiten unter Beachtung produktionstechnischer Randbedingungen zur Festlegung der zeitlichen Einsatzreihenfolge der Flexibilitätsmaßnahmen. Der Betriebsalgorithmus wird simulativ modelliert und getestet. Anhand techno-ökonomischer Gütekriterien wird die Belade- und Entladestrategie für energetische Speicher entwickelt und bewertet sowie die Entscheidungslogiken für den Energieträgerwechsel und die Regelungsparameteranpassung (z.B. Hallenlüftung) evaluiert. Im Anschluss an die simulativen Tests erfolgt die Implementierung und Be-

wertung des Betriebsalgorithmus in einer Laborumgebung. Abschließend soll eine geeignete Visualisierungsoberfläche zur Darstellung der Funktionalitäten des Last- und Flexibilitätsmanagements konzipiert werden.

## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

(Kurze Darstellung des Stands der Wissenschaft und Technik, an den Sie individuell angeknüpft haben. Gehen Sie insbesondere ein auf:

- Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,
- Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste)

Im Unternehmen werden bereits verschiedene Techniken angewandt um den Energiebedarf von Maschinen vom Energieangebot zu koppeln bzw. zu flexibilisieren. So lässt sich in den Fertigungsstraßen unter anderem die Roboterinfrastruktur individuell abschalten und aktivieren. Ferner verfügen die Laserschweißgeräte über bis zu fünf Betriebsmodi, wodurch nur bedarfsgerecht Energie in das zu fertigende Bauteil eingebracht wird. Die Mercedes-Benz Group AG engagiert sich darüber hinaus stark auf dem Gebiet der Stromspeicher, hierzu gibt es auch auf Basis von Tarifstrukturen nichteuropäischer Staaten wirtschaftliche Anwendungsbeispiele. In die Versorgungsstrukturen der Produktionsstätten sind weitestgehend bereits Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplungsprozesse eingebunden. In der ersten Förderphase des SynErgie-Projekts konnten eine Vielzahl möglicher Flexibilitätsmaßnahmen im Bereich Produktions- und Gebäudesysteme identifiziert und quantifiziert werden. Daraus wurden vielversprechende Pilotprojekte mit dem Ausblick einer Realisierung in den kommenden Jahren entwickelt. Die Integration von Energiespeichern (elektrisch und thermisch) und damit die Entkoppelung von Produktionsprozessen von der übergeordneten Versorgungsstruktur werden als relevante Stellhebel für die Prozessabsicherung im Falle einer volatilen Stromversorgung gesehen. Zur Befähigung flexibler Verbraucher wird eine übergeordnete intelligente Leitsteuerung mit Einbindung von Prognosesystemen (Wettervorhersage, Strommarkt, etc.) entwickelt um eine kostenoptimierte und effiziente Laststeuerung sicherzustellen.

Beispiele:

- Analyse und Erprobung von Speichermedien (Batterie, Flywheel, ...) in DC- Inselnetzen
- Wirtschaftlichkeitsanalyse und geplantes Pilotprojekt zum Einsatz einer stationären Batterie zur Tarifoptimierung
- Strom- oder wärmegeführte Steuerung von Eigenerzeugungsanlagen
- Analysen zur Teilnahme am Regenergiemarkt
- Konzeptentwicklung und Erprobung einer zentralen Einspeisekompensation eines Produktionswerks zur Spannungsstabilisierung
- Parametergeführte Steuerung von Prozessabluftanlagen z.B. über die Stromaufnahme der Produktion beim Schweißprozess
- Laufzeit- und Prozessfenstersteuerung bei der Applikationstechnik in der Lackierung



## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

(Kurze Darstellung Ihrer individuellen Zusammenarbeit mit anderen Partnern im Projekt)

Eine enge Zusammenarbeit erfolgte mit dem Fraunhofer IPA und dem Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart als direkter/ assoziierter Partner. Während der 3-jährigen Projektlaufzeit erfolgte ein kontinuierlicher Informationsaustausch durch wöchentliche Regeltermine und diverse Workshops.

## Teil II: Eingehende Darstellung

### 1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

(Eingehende Darstellung Ihrer individuell im Projekt erzielten Ergebnisse als detaillierte Begründung der Verwendung der Zuwendung und Gegenüberstellung mit vorgegebenen Zielen. Empfehlung: Bei umfangreichen Arbeiten empfiehlt sich eine Strukturierung nach Clustern oder Teilprojekten mit Überschriften zweiter Ordnung, um eine übersichtliche Darstellung zu erreichen.)

#### 1.1 Cluster II: Produktionsinfrastruktur / TP 2.3: Thermische Speicher im Automobilwerk

(Beachten Sie bitte die Hinweise zu Beginn von Kapitel 1 im Teil II. Empfehlung: Stellen Sie die Ziele des Clusters/Teilprojekts dar, gehen Sie auf die Vorgehensweise ein und erläutern Sie Ihre Ergebnisse. Führen Sie dabei auch einen Zielabgleich durch. Achtung: Ergebnisse müssen hier individuell für Ihre Organisation dargestellt werden, ein einfacher Hinweis auf das SynErgie Fachbuch ist nicht ausreichend!)

Die Potenzialberechnungen aus der ersten Förderphase für den Einsatz eines thermischen Speichers im Produktionsumfeld eines Automobilwerks weisen vielversprechende Möglichkeiten auf. Diese Möglichkeiten liegen in der optimierten Dimensionierung eines Kältespeichers und den damit zusammenhängenden Investitions- und Betriebskosten. Aufbauend auf diesem Zielsystem soll anhand eines realen Fallbeispiels die Möglichkeit der Integration eines thermischen Speichers zur flexiblen Kälteversorgung untersucht und bewertet werden. Zu diesem Zweck soll ein Labordemonstrator in Form eines flexiblen Kältespeichers errichtet werden. Mithilfe dieses Demonstrators sollen sowohl der Kältespeicher als auch die vor- und die nachgelagerten Prozesse flexibel angesteuert werden (z. B. Kompressionskältemaschine und Kälteverbraucher). Damit sollen energieflexible Betriebsstrategien bewertet werden. Als Ergebnis dieses Arbeitspakets soll ein Planungsleitfaden für eine energieflexible techno-ökonomische Auslegung des optimierten Kälteversorgungssystems unter Einbindung eines Kältespeichers für das reale Fallbeispiel an einem Standort der Mercedes-Benz Group AG entwickelt werden.

Die Ziele aller Meilensteine wurden vollumfänglich erreicht.

##### 1.1.1 MS II.2.3.1: Systemanalyse der Referenz

Ziel dieses Meilensteins war es geeignete Referenzobjekte für nachfolgende Analysen und Pilotierungen zu definieren. Daraufhin sollten alle hierfür relevanten Daten und Informationen von der Mercedes-Benz Group AG beschafft und an das Fraunhofer IPA übermittelt werden.

Die für die Projektlaufzeit gültigen Referenzen wurden definiert. Die wichtigsten Daten und Informationen bezüglich vorhandener Sprinklertanks, Kälteverbrauchern (Lastprofile) und der standortspezifischen Versorgungsinfrastruktur wurden in einer Excel Datei übersichtlich aufgelistet und

mit den zugehörigen Dokumenten verknüpft. Die befüllte Excel Liste sowie die Datensätze wurden an das Fraunhofer IPA und das EEP kommuniziert.

### **1.1.2 MS II.2.3.2: Auslegung und Dimensionierung des Labordemonstrators**

Ziel dieses Meilensteins war die Auslegung und Dimensionierung des Kühlwasserversorgungssystems in Form eines Labordemonstrators.

Die Kühlleistung von 12 kW wird aus dem Gebäudekaltwassernetz über einen Wasser-Wasser-Wärmetauscher dem Kühlwasserversorgungssystem zur Verfügung gestellt. Der geforderte flexible Betrieb der Anlage wird durch 13 mögliche Betriebsmodi, eine steuerbare PtH-Anlage als zusätzliche thermische Last sowie weitere Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten gewährleistet. Durch den thermischen Energiespeicher können die Verbraucher unabhängig von der Energieversorgung betrieben werden. Das Speichervolumen beträgt 550 l und das Speichermedium ist eine Wasser-Glykol-Mischung. Je nach Temperaturdifferenz können so die Verbraucher bis zu eine Stunde von der Energieversorgung unabhängig betrieben werden.

### **1.1.3 MS II.2.3.3: Analyse der Wirkung von thermischen Speichern im Kälteversorgungssystem**

Das Ziel dieses Meilensteins war die Erstellung eines Simulationsmodells für ein repräsentatives Kälteversorgungssystem inkl. Kältespeicher. Das Modell soll als Werkzeug dienen, um unterschiedliche Betriebsstrategien des Kältesystems untersuchen und um eine optimale Dimensionierung des Kältespeichers für künftige Pilotprojekte durchführen zu können.

Die Use-Cases, die mit dem Modell abgebildet werden sollen, wurden unter technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekten unter Berücksichtigung vorherrschender Rahmenbedingungen des realen Referenzobjektes priorisiert. Dabei handelt es sich um (1) Lastverschiebung (Peak Shifting), (2) Steigerung der Energieeffizienz, (3) Teilnahme an Spot- und Energiemärkten und (4) Regelenergievermarktung. Dabei wurde erkannt, dass die Priorisierung der Use-Cases stark von den vorherrschenden Rahmenbedingungen (z.B. Prognostizierbarkeit der Erlöse, Tarif- und Erlösstrukturen) und des zugrundeliegenden KPI (z.B. Kosten, Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emissionen) abhängt. Ebenfalls stellen die beschriebenen Use-Cases nur eine Auswahl der aktuell aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvollsten Ansätze dar. Weitere Use-Cases können im Verlauf des Projektes ergänzt und untersucht werden.

### **1.1.4 MS II.2.3.4: Analyse und Bewertung möglicher Use-Cases**

Das Ziel dieses Meilensteins war es, verschiedene Anwendungsfälle zu analysieren und zu bewerten, um mögliche Betriebsstrategien für das definierte Kältespeichersystem zu beschreiben.



Es wurden verschiedene Szenarien erstellt und das Modell wurde unter verschiedenen Einflussparametern simuliert. Über die Anpassung entscheidender Einflussparameter wurden erste Ergebnisse mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse erzeugt. Auf Basis der Simulationsergebnisse konnten erste Ansätze für verschiedene Betriebsstrategien des Kältesystems abgeleitet und eine optimale Dimensionierung des Kältespeichers für ein ausgewähltes Referenzobjekt durchgeführt werden.

Zentrale Erkenntnisse waren unter anderem:

- Use-Cases, wie Peak Shaving und Effizienzsteigerung, haben einen entscheidenden Einfluss auf die Anwendbarkeit des Kältespeichersystems im definierten Referenzprojekt.
- Die Teilnahme am SPOT-Markt ist stark abhängig von den gegebenen Rahmenbedingungen (z. B. Vorhersagbarkeit der Erlöse, Tarif- und Erlösstrukturen) und den zugrundeliegenden KPIs (z. B. Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emissionen).
- Unter den gegebenen Rahmenbedingungen ist der Einsatz eines Kältespeichersystems derzeit aus ökonomischer und ökologischer Sicht ein sinnvoller Ansatz.

#### **1.1.5 MS II.2.3.5: Aufbau und Inbetriebnahme des Labordemonstrators**

Das Ziel dieses Meilensteins ist es, energieflexible Betriebsstrategien eines realen Kälteversorgungsverbundes im Labormaßstab abzubilden und den Laboraufbau dahingehend zu bewerten. Dafür wurde ein Labordemonstrator bestehend aus einem thermischem Speicher, einem Kälteerzeuger, einem Kälteverbraucher, Pumpen, Ventile und Sensorik entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Um die Abbildbarkeit energieflexibler Betriebsstrategien innerhalb des Labordemonstrators zu untersuchen und zu bewerten, wurden auf Basis dieses Aufbaus Versuchsreihen definiert und durchgeführt.

Das Abfahren der Versuche unter verschiedenen Randbedingungen hat gezeigt, dass der Labordemonstrator in der Lage ist, die Betriebsstrategien Peak-Shifting und Energieeffizienter Betrieb der Kältemaschinen darzustellen. Zudem konnte durch die Variation der Randbedingungen gezeigt werden, dass mit Hilfe des Labordemonstrators verschiedene, an den realen Betrieb eines industriellen Kälteversorgungssystems angelehnte Zustände untersucht und bewertet werden können.

#### **1.1.6 MS II.2.3.6: Validierung der Ergebnisse und Erstellung eines Planungsleitfadens**

Ziel dieses MS-Berichtes ist die Validierung der Simulationsergebnisse anhand des Labordemonstrators und die Beschreibung eines Planungsleitfadens für die Integration eines Kältespeichersystems in einem Realprojekt.

Bezüglich der Validierung der Simulationsergebnisse wurden Tests am Labordemonstrator durchgeführt. Hierbei ging es vor allem, um die Funktionsvalidierung der Betriebsstrategien (z.B. Peak-Shaving) und die Überprüfung der Annahme, ob die Vernachlässigung der Wärmeverluste

des Speichers, wie sie in der Simulation getroffen wurde, zulässig ist. Aufbauend auf den Validierungsergebnissen wurde eine Handlungsempfehlung für den realen Betrieb des Kältespeichersystems erarbeitet. Bezüglich der Beschreibung eines Planungsleitfadens für die Integration eines Kältespeichersystems im Realprojekt wurde neben dem Hauptdokument ein Konzept erstellt, welches sicherstellen soll, dass der Planungsleitfaden von künftigen Anwendergruppen genutzt werden kann. Insbesondere wurde sichergestellt, dass die Inhalte auch für „Nicht-Experten“ verständlich aufbereitet wurden.

## **1.2 Cluster IV: Markt- und Stromsystem / TP 4.2: Last- und Flexibilitätsmanagement**

Für eine kaskadierte Lastflussregelung als Kernfunktionalität des Last- und Flexibilitätsmanagements bedarf es eines Frameworks, das die unterschiedlichen inneren (Industrienetzregelung) und äußeren (Versorgungsnetzregelung) Regelungsziele identifiziert sowie deren Abhängigkeiten und gegenseitigen Rückwirkungen beschreibt. Die Regelungsstrecke „Industrienetz“ ist zusätzlich hinsichtlich möglicher Subregelsysteme zu analysieren und beschreiben. Hierbei ist die Industrienetzregelung als überlagerte Regelung interner Systemkomponenten (z.B. Energiespeicher, Antriebsregelungen) zu verstehen. Mit der Erweiterung der Lastflussregelung um die Versorgungsnetzregelung sind zudem alle externen Systemkomponenten (z.B. Energiepreis, Wetter, Netzsituation), die Einfluss auf die Entscheidungslogik des Last- und Flexibilitätsmanagements haben, zu beschreiben.

Die Entwicklung eines Planungsleitfadens dient als konkrete Anforderungsbeschreibung zur Weiterentwicklung eines zukünftigen Lastmanagementsystems im Realumfeld mit dem Ziel, ein energieoptimiertes und wirtschaftliches Zusammenspiel aller Systemkomponenten in Echtzeit zu ermöglichen.

Die Ziele aller Meilensteine wurden vollumfänglich erreicht.

### **1.2.1 MS II.4.2.1: Beschreibung der Systemkomponenten und regelungstechnische Anforderungen (Lead IPA)**

Das Ziel dieses Meilensteins war die regelungstechnische Anforderungsanalyse eines elektrischen Hallennetzes bei der Mercedes-Benz Group AG.

Durch den Datenaustausch zwischen dem Fraunhofer IPA und der Mercedes-Benz Group AG konnte zunächst die Systemgrenze des Untersuchungsobjekts abgesteckt werden. Daraufhin wurden Datenmodelle für die verschiedenen Netzteilnehmer entwickelt und in Simulationsbausteine überführt. Jedes Teilmodell verfügt über Mess-, Stell- und inhärente Größen, die den Baustein vollständig beschreiben. Um den Betriebsalgorithmus in der Simulation im Laufe des Projekts technisch und wirtschaftlich bewerten zu können, wurden Gütekriterien entwickelt. Der Betriebsalgorithmus basiert auf einer mathematischen Optimierungsfunktion zur Minimierung der Gesamtkosten. In Abstimmung mit dem Industriepartner wurde eine Übersicht über die relevanten Energiemärkte erstellt und eine Auswahl für das elektrische Netz getroffen.

### 1.2.2 MS II.4.2.3: Analyse der Use-Cases (Lead MB Group AG)

Die Ziele des Meilensteins waren es, die Use-Cases eines Lastmanagement-Systems zu beschreiben und zu priorisieren sowie die Kennzahlen und Voraussetzungen zur Bewertung dieser zu definieren.

Die Use-Cases wurden unter technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekten der Gegebenheiten des realen Referenzobjektes priorisiert. Dabei handelt es sich um (1) Lastverschiebung (Peak Shifting), (2) Unterbrechungsfreie Stromversorgung, (3) Teilnahme an Spot- und Energiemärkten und (4) Regelenergievermarktung. Die Voraussetzungen zur Bewertung der Use-Cases basieren auf aktuell gültigen Gesetzen und Verordnungen zum Regeln von Stromnetzentgelten, von Energiemarkt-Produkten und von technischen Anforderungen zur Bereitstellung von Regelenergie.

Die geplanten Umfänge des Meilensteins mit der Bewertung und Priorisierung möglicher Use-Cases für die Implementierung eines Last- und Flexibilitätsmanagement-Systems konnten erreicht werden. Dabei wurde erkannt, dass Priorisierung der Use-Cases stark von den vorherrschenden Rahmenbedingungen (z.B. Prognostizierbarkeit der Erlöse, Tarif- und Erlösstrukturen) und des zugrundeliegenden KPI (z.B. Kosten, Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emissionen) abhängt. Ebenfalls stellen die beschriebenen Use-Cases nur eine Auswahl der aktuell aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvollsten Ansätze dar.

### 1.2.3 MS II.4.2.4: Entwicklung des Prognosewerkzeugs (Lead EEP)

Das Ziel dieses Meilensteins war die Entwicklung eines Prognosewerkzeugs für elektrische Lasten und Erzeugereinheiten zur Verbesserung der Leistung des gesamten Last- und Flexibilitätsmanagements des betrachteten elektrischen Systems.

Um ein für die jeweiligen Problemstellungen geeignetes Prognosewerkzeug zu definieren und zu implementieren, wurden in der ersten Phase die vom Partner zur Verfügung gestellten Daten analysiert und die in der Literatur beschriebenen Prognosemethoden aufgearbeitet. Datenanalyse und der Überblick über die Prognosemethoden wurden genutzt eine geeignete Prognosemethode auszuwählen. In der mathematischen und logischen Beschreibung des Werkzeugs werden die verwendeten Eingangs- und Ausgangs-Variablen sowie die Modelle vorgestellt. Die Werkzeuge wurden in der Simulationsumgebung (MATLAB/Python) implementiert. Anhand von definierten technischen Metriken wurden die mit den Werkzeugen generierten Ergebnisse validiert und bewertet.

### 1.2.4 MS II.4.2.6: Erstellung des Simulationsmodells (Lead MG Group AG)

Das Ziel dieses Meilensteins war die Erstellung eines Simulationsmodells von einem Lastmanagementsystem, das eine Batterie, Ladesäulen und flexible Lasten steuern soll. Das Modell soll als Werkzeug dienen, um die Wirkung vom Lastmanagementsystem untersuchen zu können.

Die im MS Bericht II.4.2.3 definierten Use-Cases können mit dem Modell abgebildet werden. Dabei handelt es sich um Lastverschiebung (Load Shifting & Peak Shaving möglich), unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), Teilnahme an Spot- und Terminmärkten und Regelernergievermarktung. Das Modell wurde mit der Simulationssoftware TOP-Energy aufgebaut und dessen Struktur, Funktionen und Komponenten wurden beschrieben.

### **1.2.5 MS II.4.2.7: Implementierung des Betriebsalgorithmus in das Simulationsmodell (Lead EEP)**

Das Ziel dieses Meilensteins war die Implementierung des Betriebsalgorithmus in das Simulationsmodell und dessen Modellierung

Der Betriebsalgorithmus ist in der Lage, Energieflexibilitätsmaßnahmen auf Basis von simulierten Use-Cases und Aktivierungskosten der Energieflexibilitätsmaßnahmen zu reservieren und zu aktivieren. Er basiert auf einer Optimierung einer Kostenfunktion, die Markt und Flexibilitätsmaßnahmenpreise enthält und die durch die Use-Cases auferlegten Beschränkungen berücksichtigt. Das Ergebnis ist die optimale Kombination von zu aktivierenden Energieflexibilitätsmaßnahmen und das optimierte Lastprofil. Verschiedene Use Cases können einzeln oder in Kombination simuliert und analysiert werden. Schließlich berechnet der Betriebsalgorithmus die Gesamtkosten für die Energieversorgung, die Aktivierung der Energieflexibilitätsmaßnahmen und die Erträge aus dem Angebot der Regelleistung am Regelleistungsmarkt.

### **1.2.6 MS II.4.2.8: Definition der Testszenarien (Lead MB Group AG)**

Das Ziel dieses Meilensteins waren die Entwicklung und Simulation von Testszenarien des Last- und Flexibilitätsmanagements.

Die Szenarien wurden auf Basis der Wechselwirkungen zwischen den Märkten, bestehenden Energieflexibilitätsmaßnahmen und Eigenschaften der Systemkomponenten definiert. Die Einflussparameter auf potenzielle Kostenreduktionen und Erlöse wurden durch eine Sensitivitätsanalyse identifiziert. Dafür wurden zukünftige Energiepreise in Zusammenarbeit mit der Mercedes-Benz Group AG abgeschätzt und entsprechende Preistrends definiert. Außerdem wurden Key-Performance-Indicators (KPIs) für die Bewertung des Last- und Flexibilitätsmanagements definiert und verwendet. Schließlich wurden die profitabelsten Szenarien identifiziert und innerhalb von Testszenarien für weiteren Testphasen beschrieben.

### **1.2.7 MS II.4.2.9: Konzeptionierung der Visualisierungsoberfläche (Lead EEP)**

Ziel dieses Meilensteins war es, ein Konzept für eine Visualisierungsoberfläche eines Energiemanagementsystems zu erstellen, welches in Kooperation mit der Mercedes Benz Group AG erarbeitet wurde.

Das Konzept wurde auf Basis des Usability Engineerings erstellt. In Zusammenarbeit mit der Mercedes-Benz Group AG wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt, potentielle Nutzer der Visualisierungsoberfläche identifiziert, als auch die zu visualisierenden Lastmanagementsituationen definiert, welche auf den Anwendungsfall der definierten Referenz zugeschnitten sind. Aufbauend darauf, wurden prototypische Nutzer und User Stories erstellt, um die Ziele der potentiellen Nutzer konkret zu definieren. Die Funktionalität der zukünftigen Visualisierungsoberfläche wurde in Use-Cases festgehalten. Szenarien beschreiben, wie potentielle Nutzer mit dem geplanten System interagieren können. Des Weiteren wurde ein visueller Prototyp der Visualisierungsoberfläche mit dem Tool Prezi erstellt. Im Visualisierungskonzept wird Energieflexibilität aus verschiedenen Perspektiven visualisiert und ermöglicht Nutzern ohne fachspezifischen Hintergrund das Konzept von Energieflexibilität zu verstehen. Die ökonomischen Vorteile von Energieflexibilität werden dabei hervorgehoben.

#### **1.2.8 MS II.4.2.10: Validierung des Betriebsalgorithmus und Dokumentation der Ergebnisse (Lead EEP)**

Ziel dieses MS Berichtes war die Umsetzung und Validierung des im AP entwickelten Betriebsalgorithmus, das Last und Flexibilitätsmanagement, auf Basis von Testszenarien in einer Laborumgebung am EEP der Universität Stuttgart.

Das Last und Flexibilitätsmanagement reduziert durch die Nutzung der lokalen Energieflexibilität die industriellen Betriebskosten. Die Reduktion erfolgt unter Berücksichtigung von ausgewählten Use-Cases in Bezug auf den Energiemarkt und reduzierte Netzentgelte. Die Use-Cases können durch das Last- und Flexibilitätsmanagement frei kombiniert werden, um die Wirtschaftlichkeit mehreren Marktkombinationen zu verbessern. Die Testszenarien wurden auf dynamische Strompreise, Netzentgeltreduktion und atypische Netznutzung und die Kombination der Szenarien beschränkt. Die Umsetzung im Labor war erfolgreich und die Ergebnisse zeigen, dass der Gesamtverbrauch des Systems am Netzanschlusspunkt durch die implementierte Logik geregelt werden kann.

#### **1.2.9 MS II.4.2.11: Erstellung des Planungsleitfadens (Lead MB Group AG)**

Ziel dieses MS-Berichtes war die Beschreibung eines Planungsleitfadens für die Integration eines Last- und Flexibilitätsmanagements in einem Realprojekt.

Der Planungsleitfaden umfasst die Beschreibung der Anforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung eines Kältespeichers inkl. Lastmanagement in einem Realprojekt bei Mercedes-Benz Group AG. Neben dem Hauptdokument wurden Checklisten und ein Kalkulationstool zur Abschätzung der Einsparpotenziale (mit dem Fokus auf den Use-Case Energieeffizienz) entwickelt, die während der Projektphase angewandt werden können. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, dass die Inhalte auch für „Nicht-Experten“ verständlich aufbereitet sind.



## 2 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen

(Aufführen der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises)

### Personal

Nachname*	Vorname*	Email*	Institution*	Straße*	Hausnummer*	PLZ*	Stadt*
Hofmann	Philipp	<a href="mailto:philipp.hofmann@mercedes-benz.com">philipp.hofmann@mercedes-benz.com</a>	Mercedes-Benz Group AG	Benzstraße	Tor 7	71059	Sindelfingen
Yilmaz	Neslihan	<a href="mailto:neslihan.yilmaz@mercedes-benz.com">neslihan.yilmaz@mercedes-benz.com</a>	Mercedes-Benz Group AG	Benzstraße	Tor 7	71059	Sindelfingen

### Kalkulation der Selbstkosten:

Position	Kalkulation in €
Personalkosten	272.695,92
Reisekosten	0
Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	169.219,49
<b>Summe unmittelbare Vorhabenkosten</b>	<b>441.915,41</b>
Verwaltungskosten	2.633,44
<b>Gesamte Selbstkosten des Vorhabens</b>	<b>444.548,85</b>

### Nachweis der Finanzierung und Berechnung des Bundesanteils:

Position	Kalkulation
Gesamte Selbstkosten	<b>444.548,85</b>
Förderquote	48 %
Bewilligte Zuwendung (Höchstbetrag)	354.117,16 €
<b>Bundesanteil</b>	<b>213.383,45 €</b>
<b>Eigenanteil</b>	<b>231.165,40 €</b>



Abrechnung des Bundesanteils:

	<b>Erhaltene Bundesmittel</b>
am 24.06.2020	25.180,30 €
am 05.08.2020	45.412,46 €
am 27.11.2020	32.568,78 €
am 26.07.2021	42.322,34 €
am 04.10.2021	12.181,11 €
am 12.11.2021	9.390,96 €
am 13.12.2021	9.700,39 €
am 03.05.2022	3.070,44 €
am 23.05.2022	10.314,19 €
am 16.08.2022	9.095,32 €
am 09.11.2022	10.069,85 €
<b>insgesamt</b>	<b>209.306,14 €</b>
<b>Abzüglich Bundesanteil</b>	<b>213.383,45 €</b>
<b>Noch nicht erhaltene Bundesmittel</b>	<b>4077,31 €</b>

### **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

(Begründung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.)

Die durchgeführten Untersuchungen tragen maßgeblich zur Standortsicherung Deutschlands und zur Entwicklung von innovativen und neuen Technologien in Deutschland bei. Sie helfen, die mit der Energiewende verbundenen technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen für die produzierenden Unternehmen an den deutschen Standorten zu meistern. Dies wird dadurch erreicht, indem neue technologische, wirtschaftliche und organisatorische Maßnahmen entwickelt werden, welche es u.a. der Automobilproduktion ermöglicht auf die zunehmend fluktuierende Stromversorgung in Deutschland in den kommenden Jahren reagieren zu können. Zusätzlich steigert die interdisziplinäre Auseinandersetzung im Bereich der Energieflexibilität und des Demand-Side-Managements auch das Know-how zur nachhaltigen (CO<sub>2</sub>-neutralen) und energieeffizienten Versorgung der Produktionsstandorte.

### **4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses**

(Ausführliche Darstellung des voraussichtlichen Nutzens Ihrer individuell im Projekt erzielten Ergebnisse sowie deren Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.)

Die Arbeiten unterstützen das Unternehmen, um aktiv auf die Anforderungen der Energiewende und deren Auswirkungen auf Energiekosten, Verfügbarkeit und Fluktuation sowie Energiequalität reagieren zu können. Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch den energieflexiblen Betrieb vorhandener oder neuer Anlagen (z.B. Energiespeicher) die Energiekosten deutlich reduzieren lassen und neue Geschäftsmodelle (z.B. Stromhandel am SPOT-Markt) entwickeln können. Ebenfalls sollen auf Basis der Ergebnisse erste Pilotprojekte in den kommenden Jahren realisiert werden, um die technische Machbarkeit und den wirtschaftlichen Nutzen zu validieren.

### **5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens**

(Ausführliche Darstellung von Fortschritten auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen, die Ihnen während der Projektlaufzeit bekannt geworden sind.)

Es konnte ein kontinuierlicher Fortschritt in den Bereichen Energieeffizienz, Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Energieflexibilität festgestellt werden. Zunehmende Fortschritte werden innerhalb der dritten Förderphase mit dem Fokus auf Pilotierung im Industrieumfeld zur Validierung der tatsächlichen Umsetzbarkeit und Wirkweise erwartet.

### **6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses**

(Auflistung von erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Projektergebnisse)

- SynErgie Fachbuch (Förderphase 2)
- Abschlussbericht SynErgie 2 (dieser Bericht)



Wenn zur Wahrung Ihrer berechtigten Interessen oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so haben Sie den Zuwendungsgeber ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Empfehlung: Integrieren Sie zur Vereinfachung des Prozesses in diesen öffentlichen Teil I+II keine vertraulichen Informationen und stellen Sie diese stattdessen im separaten, nicht öffentlichen Teil III dar.