

# ÜBERBLICK & ERGEBNISSE

## Forschungsprojekt MobiGrid

Integration von Elektromobilität in die Verteilnetze durch Nutzung dezentraler Flexibilität



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

## EINLEITUNG

Um den Zielen des Pariser Klimaabkommens Rechnung zu tragen, beschloss die Europäische Union im Rahmen des europäischen Klimagesetzes, bis 2050 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Diese immensen Anstrengungen beinhalten die Transformation unseres auf fossilen Brennstoffen beruhenden Energiesystems hin zu einer klimafreundlichen Energieversorgung, welche gemäß dem deutschen Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) verlässlich und bezahlbar bleiben soll. Eine starke Importabhängigkeit bei Energieträgern kann die Stabilität der Energieversorgung eines Landes gefährden und zu großen Beeinträchtigungen eines Wirtschaftsstandorts führen. Ein resilientes Energieversorgungssystem wird in Zukunft auf unterschiedlichen erneuerbaren Ressourcen und dezentraler Erzeugung basieren. Mit einem zunehmenden Anteil volatiler Energieerzeugung muss entweder der Energieverbrauch zeitlich stärker an der Energieverfügbarkeit ausgerichtet oder Ausgleichsspeicherkapazitäten installiert werden. Hinzu kommt, zumindest in Deutschland, ein starkes regionales Ungleichgewicht zwischen Energieerzeugungspotenzial und Energiebedarf. Dies führt einerseits zu einem erheblichen Ausbaubedarf der Transportnetzkapazität. Gleichzeitig entsteht aber auch ein Ausbaubedarf auf Verteilnetzebene, da die steigende Erzeugungsleistung und die vor allem aufgrund der Sektorenkopplung zunehmende Last die Transportkapazität der Verteilnetze übersteigt.

Die Installation von Speicherkapazitäten wäre eine Möglichkeit, das System Stromversorgung ohne Steuerung oder gar Einschränkung des Verbraucherverhaltens zu stabilisieren und den erforderlichen Stromnetzausbau zu begrenzen bzw. zumindest zeitlich zu strecken. In Ergänzung zu Speicherkapazitäten bietet die Nutzung steuerbarer Verbrauchseinrichtungen und Prozesse für Flexibilitätspotenziale die Möglichkeit, Erzeugung und Bedarf mit moderaten Investitionen und ohne Energieverluste durch Speicherung in Einklang zu bringen. Die Erhöhung ebendieser Flexibilitätspotenziale ist ein wichtiger Baustein der Energiewende.

---

*Die EU plant bis 2050 Treibhausgasneutralität, was eine Umstellung auf erneuerbare Energien erfordert. Der Netz- und Speicherausbau sowie flexible Verbrauchseinrichtungen sind dabei entscheidend.*

---

## ZIELSETZUNG

Das Forschungsprojekt MobiGrid widmete sich den Herausforderungen, die durch den steigenden Marktanteil von Elektrofahrzeugen und die zunehmende Einspeisung dezentraler Energiequellen entstehen. Diese Entwicklungen stellen Verteilnetzbetreiber vor neue Aufgaben, da die steigenden Batteriekapazitäten und der Wunsch nach kurzen Ladezeiten die Bezugsleistung in den Verteilnetzen erhöhen. MobiGrid zielte darauf ab, durch die gezielte Einbindung dezentraler Flexibilitäten, wie beispielsweise stationärer Ladesäulen, Wallboxen, Heimspeicher und Wärmepumpen, den Netzausbau zu entschleunigen und die System- und Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dies kann durch innovative Technologien und Konzepte erreicht werden, die eine effiziente Nutzung der vorhandenen Infrastrukturen ermöglichen.

Zielsetzung war es zu untersuchen, ob und unter welchen Voraussetzungen die intelligente Nutzung dezentraler Flexibilitätsoptionen dazu beitragen kann, die Versorgungssicherheit der Stromversorgung bei stetig zunehmender Belastung der Betriebsmittel der Stromnetze zu gewährleisten und mögliche Netzengpässe oder Betriebsmittelüberlastungen prädictiv zu vermeiden. Ein Netzengpass liegt vor, wenn die Betriebsmittel sich in einer Überlastsituation befinden und dadurch die langfristige Versorgungssicherheit durch den zuständigen Netzbetreiber nicht gewährleistet werden kann. Die Beurteilungskriterien eines Netzengpassens im Bereich der Stromnetze sind u.a. die Über- oder Unterschreitung eines technischen normativ definierten Grenzwertes durch die Spannungen und Ströme einer beliebigen Netzebene. Getroffene Maßnahmen innerhalb der Netzbetriebsführung zur Vermeidung von Netzengpässen werden als Netzengpassmanagement bezeichnet.

Die Untersuchungen im Verbundvorhaben bezogen sich auf Niederspannungsverteilnetze. Im Vergleich zu Stromnetzen höherer Nennspannungsebenen gibt es in Niederspannungsverteilnetzen lediglich begrenzte Möglichkeiten für ein Netzengpassmanagement. Im Wesentlichen beschränken sich diese Möglichkeiten auf den Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren, die Anpassung der Wirkleistung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen, PV-Anlagen oder Batteriespeichern sowie den Bezug oder die Einspeisung von Blindleistung durch Anlagen, welche an Umrichter gekoppelt sind, z.B. Ladestationen oder PV-Anlagen.

Im Fokus des Verbundvorhabens MobiGrid stand der Flexibilitätseinsatz mit Anpassung des Bezugs und der Einspeisung von Wirkleistung als Maßnahme des Netzengpassmanagements. Die Untersuchungen erfolgten beispielhaft in einem Feldtestgebiet der e-netz Südhessen AG. Das Feldtestgebiet ist ein Niederspannungsverteilnetz mit einer für Deutschland typischen Netztopologie und charakteristischen Betriebsmitteln. Insofern hat das ausgewählte Feldtestgebiet den Charakter eines Referenznetzes und die im Verbundvorhaben erarbeiteten Erkenntnisse können auf andere Niederspannungsverteilnetze übertragen werden.

Als Flexibilitätsoptionen wurden im Projekt MobiGrid steuerbare Bezugsanlagen (Verbraucher) in Haushalten (z.B. Wärmepumpen, Wallboxen, Speicher) sowie im öffentlichen Raum (Ladestationen für Elektrofahrzeuge, Quartierspeicher) einbezogen. Besondere Beachtung galt dabei der Steuerung des Ladeverhaltens von Ladestationen für Elektrofahrzeuge, da diese aufgrund ihrer hohen Ladeleistung bei entsprechenden Gleichzeitigkeiten zu einer Überlastungssituation führen können. Eine vorausschauende Vermeidung von Netzengpässen sollte prinzipiell auf den folgenden iterativ ablaufenden Prozessschritten aufbauen:

- Erstellung zeitlich rollierender Prognosen für die Wirkleistung für Einspeiseanlagen, Bezugsanlagen und Betriebsmittel
- Ausführung von Lastflussberechnungen zur Detektion von Netzengpässen im Stromnetz auf Basis der Prognosen
- Berechnungen möglicher Flexibilitätspotenziale und erforderlicher Flexibilitätsbeiträge von Bezugs- und Einspeiseanlagen und Zuordnung zu steuerbaren Anlagen
- Simulative Ansteuerung der entsprechenden Bezugs- und Einspeiseanlagen mit Lastflussberechnungen

Dabei erfolgten die Prognose- und Steuerungsprozessschritte im Teilsystem FlexManager und die Prozessschritte zur Berechnung des Netzzustands und erforderlicher Flexibilitätsbeiträge (Lastflussberechnungen) im Netzberechnungsprogramm ATPDesigner. Das Netzberechnungsprogramm ATPDesigner diente im Projekt MobiGrid als Forschungs- und Entwicklungsplattform, um neue und innovative Modelle, Verfahren und Methoden zu konzeptionieren, zu entwickeln und in einer komfortablen Windows-basierten Benutzeroberfläche den Anwendern zur Verfügung zu stellen.

Eine weitere Zielsetzung des Projektes bestand in der Untersuchung und Bewertung von Einsatzmöglichkeiten einer Middleware zur Entflechtung der verschiedenen Teilsysteme in der Prozesskette. Als Middleware wurde die frei verfügbare Industrie-4.0-Middleware BaSyx genutzt. Hierbei sollte insbesondere untersucht werden, ob das Konzept und der Einsatz eines *Digitalen Zwilling*s auf die Energiewirtschaft übertragen werden kann und welche Vorteile in Bezug auf effizientere Datenverarbeitung, Skalierbarkeit und Interoperabilität, insbesondere heterogener Teilsysteme, im Vergleich zu einer herkömmlichen IKT-Struktur entstehen können.

Ein Havarie-Konzept im Sinne des während der Projektlaufzeit konkretisierten §14a EnWG war nicht Ziel des Projektes. Der Fokus des Projekts MobiGrid lag auf der Entwicklung und Bewertung technischer Maßnahmen eines *präventiven* Netzengpassmanagements in Niederspannungsverteilnetzen, insbesondere hinsichtlich der Integration von Elektromobilität. Mögliche Marktmodelle zum Anreiz eines netzdienlichen Verhaltens von Verbrauchern wurden nicht berücksichtigt. Perspektivisch interessant, aber im Vorhaben nicht untersucht, ist auch der mögliche Flexibilitätsbeitrag von bidirektional arbeitenden Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

---

*Das Forschungsprojekt MobiGrid untersuchte, wie dezentrale Flexibilitäten genutzt werden können, um Netzengpässe in Niederspannungsverteilsnetzen zu vermeiden und die Versorgungssicherheit trotz steigender Belastungen durch Elektrofahrzeuge zu gewährleisten.*

---

## STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Aus dem Bundesbericht Energieforschung 2022 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz geht hervor, dass es eine Vielzahl an Forschungsaktivitäten im Bereich der Energieversorgung gibt. Im Rahmen der SINTEG-Schaufenster wurden fünf Großprojekte realisiert, deren Ergebnisberichte mittlerweile vorliegen. Nachfolgend werden einige Herausforderungen und Erfolgsfaktoren genannt, welche in den SINTEG-Schaufenstern herausgearbeitet und in *MobiGrid* zum Teil berücksichtigt und zum anderen Teil verifiziert wurden:

- Für die Erschließung von Flexibilitätspotenzialen bedarf es einem beschleunigten Rollout intelligenter Messsysteme und der Standardisierung digitaler Schnittstellen
- Geschäftsmodelle für den wirtschaftlichen Einsatz von Flexibilitäten erfordern in vielen Fällen zusätzliche Anreize
- Maßnahmen, die zu mehr Datentransparenz und einer besseren Beobachtbarkeit in Verteilsnetzen führen, müssen umgesetzt werden
- Die Bereitstellung von Daten sollte für verbesserte Energieprognosen regulatorisch unterstützt werden
- Die Herstellung von Marktfähigkeit und Akzeptanz ist ein Kernaspekt der Digitalisierung

Um den Einfluss der Integration dezentraler Flexibilitätsoptionen und deren Wechselwirkungen mit dem Stromverteilsnetz untersuchen zu können, wurde das Netzplanungsprogramm *Simona* ins Systemcockpit von Designnetz, einem der SINTEG-Schaufenster, integriert. Der Simulator berechnet den Leistungsfluss und mögliche Netzengpässe für das betrachtete Stromnetz sowie Spannungssensitivitäten für die Bestimmung des netzorientierten Flexibilitätseinsatzes. Dieser Einsatz stellt ein Optimierungsproblem dar, welches durch die eingesetzte Heuristik COHDA gelöst wird. Dabei wird aus anlagenscharfen Fahrplanscharen einer der möglichen Fahrpläne einer Flexibilität ausgewählt.

In Abgrenzung zum Designnetz Systemcockpit wurden in *MobiGrid* schwerpunktmäßig das Verbrauchsverhalten und die Flexibilitätspotenziale im Niederspannungsverteilsnetz betrachtet. Netzberechnung und Heuristik sind Teil einer gemeinsamen Software. Die Ermittlung des optimalen Flexibilitätseinsatzes erfolgt in Anlehnung an die Spezifikation der Standardlastprofile nach VDEW für ein 15min-Intervall mit Auswirkung auf die nachfolgenden 15min-Intervalle. Anstelle von Fahrplanscharen fließen dabei die Stellbereichsgrenzen von Flexibilitäten  $[P_{\max}, P_{\min}]$  je 15min-Intervall sowie der benötigte Energiebedarf der Anlagen direkt in die Heuristik mit ein.

Die Ermittlung eines Flexibilitätseinsatzes mit Hilfe von Spannungssensitivitäten wurde ebenfalls in dem Projekt „Das Proaktive Verteilsnetz“ untersucht. Hierbei wurde mit einer Flexibilitätseinschränkungsliste gearbeitet, welche im Diskussionspapier des BDEW „Konkretisierung des Ampelkonzepts im Verteilsnetz“ beschrieben wird. In *MobiGrid* wurde der Ansatz über eine solche Liste nicht weiterverfolgt. Stattdessen wurden mit Hilfe der Sensitivitäten unmittelbar Fahrpläne für steuerbare Anlagen ermittelt.

Im Zuge der Anpassungen des EnWG im Juli 2022 hat der Gesetzgeber die Bundesnetzagentur dazu ermächtigt, Festlegungen zur netzorientierten Steuerung von Verbrauchseinrichtungen in Niederspannungsnetzen (§14a EnWG) zu treffen. Daraufhin eröffnete die BNetzA im November 2022 zu diesem Thema ein Festlegungsverfahren mit öffentlicher Konsultation. Das Festlegungsverfahren fiel damit in den Projektzeitraum von *MobiGrid*. Das dort beschriebene Modell und die getroffenen Festlegungen sind in die Projektergebnisse von *MobiGrid* miteingeflossen und kontrovers diskutiert worden.

Es ist allerdings zu erwähnen, dass das im Projektverlauf entwickelte Verfahren zur netzorientierten Steuerung einem präventiven Netzengpassmanagement entspricht und daher eher im Bereich der Regelungen des §14c EnWG (marktgestützte Beschaffung von Flexibilitätsdienstleistungen) verortet ist, während die netzorientierte Steuerung nach §14a EnWG gemäß BNetzA-Verfahren nur bei unmittelbar bevorstehenden Netzengpässen zum Einsatz kommen soll. Außerdem wird nach §14a EnWG eine gleichmäßige Aussteuerung von Flexibilitäten innerhalb eines bestimmten Netzbereichs vorgeschrieben. Diese Forderung wurde in *MobiGrid* explizit nicht zugrunde gelegt, da u.a. untersucht wurde, inwieweit eine Priorisierung von Flexibilitäten nach technischen Kriterien die insgesamt notwendigen Leistungsänderungen reduzieren kann.

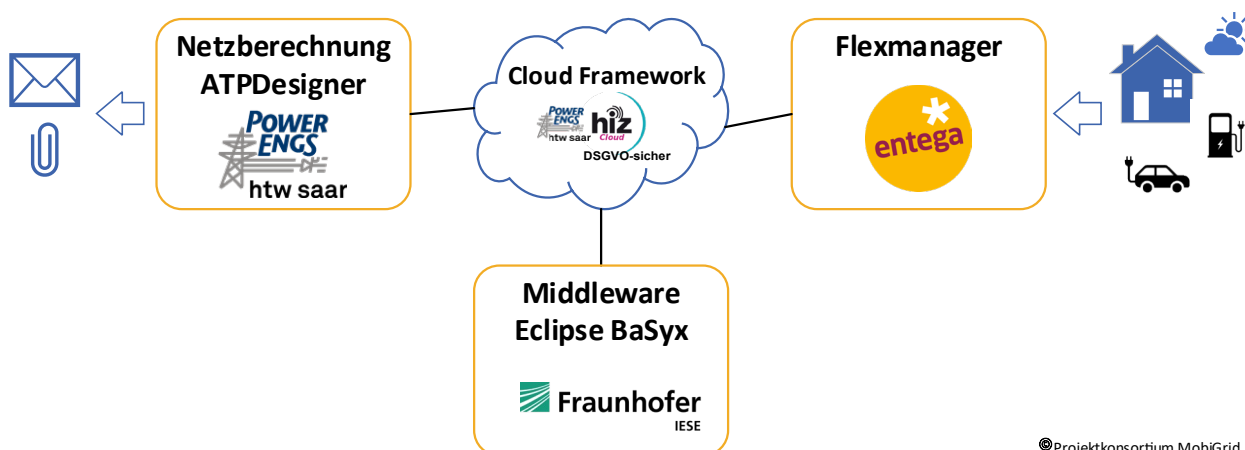
---

*Der Bundesbericht Energieforschung 2022 hebt die Bedeutung intelligenter Messsysteme und standardisierter Schnittstellen hervor. MobiGrid untersuchte speziell die Flexibilitätspotenziale in Niederspannungsverteilnetzen und integrierte die Erkenntnisse zur netzorientierten Steuerung, wobei der Fokus auf präventivem Netzengpassmanagement lag.*

---

## PROJEKTIDEE

Durch den Einsatz von Flexibilitäten können Netzengpässe vermieden werden, noch bevor sie entstehen. Durch den Einbau moderner Messtechnik und Ladeinfrastruktur zusammen mit einem Flexmanager (virtuelles Kraftwerk) sollte in einem Feldtestgebiet das Ladeverhalten der Zukunft aufgezeichnet werden. Ziel war es, Netzengpässe prädiktiv zu erkennen und Maßnahmen zu deren Vermeidung zu ermitteln. Dazu tauschte der Flexmanager mit dem Netzberechnungssystem ATPDesigner über ein gesichertes Cloud Framework mit JSON-Schnittstelle Daten aus: Betriebsmitteldaten, wie z. B. Verfügbarkeiten oder Leistungen vom Flexmanager zum ATPDesigner, die Ergebnisse von Netzzustandsanalysen und -diagnosen, z. B. Fahrpläne für Flexibilitäten. Der Prozess wurde zusätzlich über die Middleware BaSyx abgebildet, um die Verwendung von Digitalen Zwillingen für ein dezentrales Energiemanagement zu erforschen und erste Schritte in Richtung Service-orientiertes digitales Ökosystem zu gehen. Die Integration von weiteren Dienstleistern sollte so für die Zukunft vereinfacht werden. BaSyx bot dabei Verwaltung und Betrieb von Diensten, welche über die Middleware kommunizieren können, sowie die Verwaltung von Digitalen Zwillingen als einheitliche Datenquellen. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Zusammenarbeit der drei Teilsysteme.



©Projektkonsortium MobiGrid

Abbildung 1: Systemlandschaft in Zusammenarbeit der Systeme





## DIGITALE ZWILLINGE IN DER STROMVERSORGUNG

Digitale Zwillinge in der Stromversorgung sind virtuelle Modelle, die reale Stromnetze und ihre Komponenten digital abbilden. Sie ermöglichen den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Systemen und bringen weitere Vorteile, wie eine effiziente Überwachung, Optimierung und Planung der Netze mit sich. Durch die Simulation verschiedener Szenarien können Engpässe vermieden und die Integration erneuerbarer Energien verbessert werden. Diese Technologie hilft, die Zuverlässigkeit der Stromversorgung zu steigern und Wartungskosten zu senken.

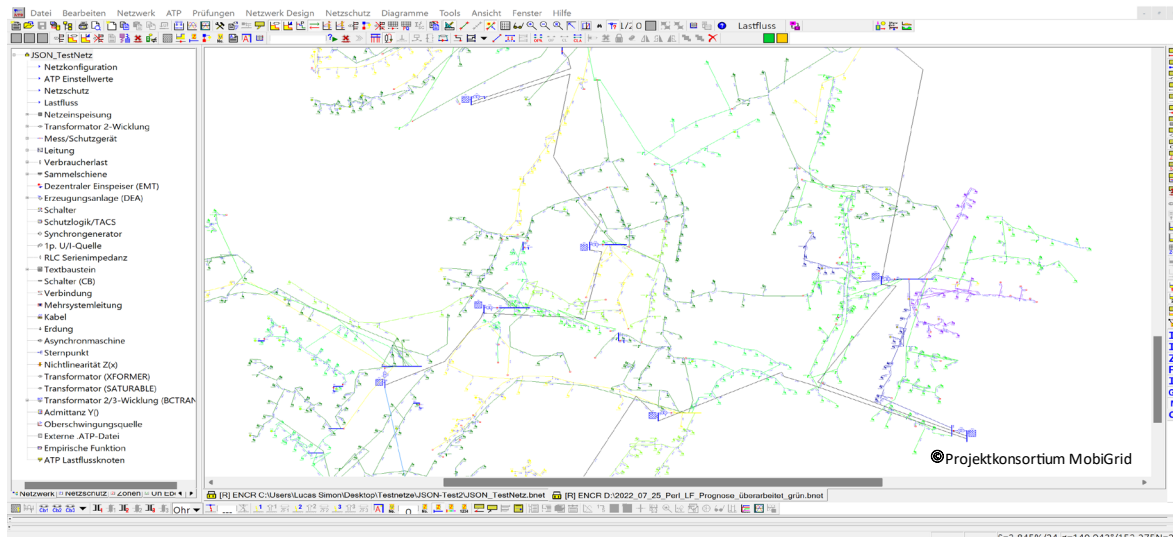


Abbildung 3: Stromnetzberechnungen mit ATPDesigner

Erweitert wird der Digitale Zwilling um eine vernetzende Middleware. Die Middleware Eclipse BaSyx der Fraunhofer IESE, diente als gemeinsame Datenschnittstelle und gewährleistete Herstellerneutralität und Zukunftsfähigkeit durch die Nutzung des JSON-Datenformats. Eine zentrale Herausforderung war die Integration von Simulationsmodellen einzelner Digitaler Zwillinge in eine Gesamtsystems simulation, die MobiGrid erfolgreich adressierte.

Digitale Zwillinge repräsentieren nicht nur physische Objekte, wie beispielsweise mechanische Bauteile, sondern auch nichtphysische Objekte, wie Prozesse und Dienstleistungen. Im Bereich der Stromnetze handelt es sich dabei häufig um Simulationsmodelle, welche die Eigenschaften des Zwillings aus der realen Welt in geeigneter Weise nachbilden. So sind klassische Netzberechnungsprogramme, wie beispielsweise ATPDesigner ([www.atpdesigner.de](http://www.atpdesigner.de), Abbildung 3), ebenfalls Digitale Zwillinge, welche als Stand der Technik bereits seit mehreren Jahrzehnten Anwendung in den heterogenen Systemlandschaften der Netzbetreiber finden. Ursprünglich wurden Netzberechnungsprogramme als Stand-alone-Lösung verwendet.

In Erweiterung dazu zielen neuartige Digitale Zwillinge darauf ab, einen übergreifenden Informationsaustausch zwischen Stand-alone-Lösungen in einem standardisierten Datenformat zu ermöglichen. Der Vorteil hierbei ist, dass relevante Daten nur einmal erhoben und mit Hilfe des Digitalen Zwillings in alle notwendigen Prozessschritte migriert werden. In klassischen Systemlandschaften von Stromnetzbetreibern wird das Netzberechnungsprogramm in der Regel durch proprietäre, d.h. nicht genormte Schnittstellen, an weitere Softwaresysteme angekoppelt. Die Einbindung künftig benötigter Softwaresysteme, wie beispielsweise die Datenbank eines Flexibilitätsaggregators, ist hierbei mit großem Aufwand verbunden und bedarf immer einer individuellen Lösung, inklusive der Entwicklung einer neuen proprietären Datenschnittstelle. Die Vision vom übergreifenden Datenaustausch stößt heute dort an Grenzen, wo unterschiedliche Werkzeuge und Plattformen genutzt werden, um Digitale Zwillinge zu realisieren. Eine zentrale Herausforderung für die Realisierung von Digitalen Zwillingen ist daher die Integration von Simulationsmodellen einzelner Digitaler Zwillinge in eine Simulation des Gesamtsystems. Daher hatte sich MobiGrid u.a. das Ziel gesetzt, die Softwaresysteme durch einen Digitalen Zwilling zusammenzuführen. Abbildung 4 zeigt den schematischen Systemaufbau und die Interaktion der in MobiGrid zum Einsatz gekommenen Softwaresysteme über die Open Source Middleware Eclipse BaSyx ([www.eclipse.org/basyx](http://www.eclipse.org/basyx)), wo der Digitale Zwilling betrieben wird.

Die Middleware dient hierbei zudem als gemeinsame und einheitliche Datenschnittstelle zwischen allen angekoppelten Softwaresystemen. Sie stellt Herstellerneutralität sowie Interoperabilität sicher und ermöglicht außerdem den Aufbau einer digitalen Daten- und Dienste-Plattform für die Energiewirtschaft. Dadurch können sowohl Stromnetzbetreiber untereinander als auch weitere Marktteilnehmer Daten zur Verfügung stellen oder Mehrwertdienste anbieten. Die Verwendung des JSON-Datenformates nach dem ECMA-404 Standard garantiert dabei die Zukunftsfähigkeit des Digitalen Zwillinges. Erweiterungen des bestehenden Datenformates können wegen der objektorientierten Struktur rückwärtskompatibel durchgeführt werden.

*Digitale Zwillinge in der Stromversorgung sind virtuelle Modelle, die reale Netze digital abbilden und den Informationsaustausch zwischen Systemen ermöglichen. MobiGrid nutzte eine Middleware, um Softwaresysteme herstellerneutral zu integrieren und eine Gesamtsystemsimulation zu schaffen, was die Zuverlässigkeit steigert, und Wartungskosten senkt.*

## FLEXIBILITÄTSMANAGEMENT MIT HILFE DIGITALER ZWILLINGE

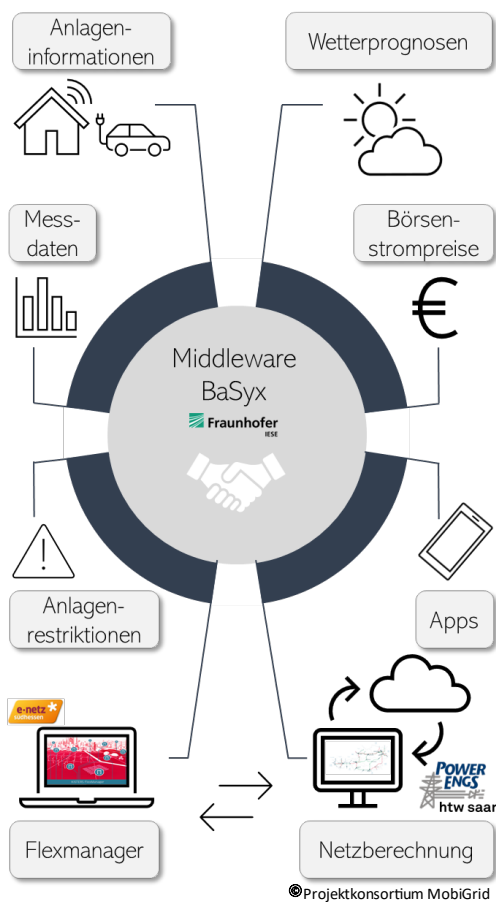


Abbildung 4: Systemaufbau MobiGrid

Eine Wegmarke von MobiGrid war es, mit Hilfe aggregierter Informationen über den Netzzustand, die Wetterverhältnisse und das Nutzerverhalten von Netzteilnehmern, Fahrpläne für Flexibilitäten innerhalb des Stromnetzes zu generieren. Diese Flexibilitätsfahrpläne basieren auf dem Erzeuger- und Verbrauchermanagement. D.h. in MobiGrid erhielten flexible Netzteilnehmer und intelligente Anlagen des Netzbetreibers einen Fahrplan, mit dem sie u. a. einen Beitrag zur Einhaltung der normativ geforderten Grenzen der Netzspannung und der maximal zulässigen Belastung der Betriebsmittel leisteten. Zur Ermittlung dieser Fahrpläne wurden alle relevanten Informationen, wie beispielsweise historische Messwerte, Wetterprognosen, aktuelle Börsenstrompreise, Anlageninformationen etc. durch die Middleware aggregiert. Sie war zu diesem Zweck an die in Abbildung 4 gezeigten Softwaresysteme angebunden, welche wiederum die relevanten Daten erhoben und vorverarbeiteten.

Die gesammelten Informationen wurden anschließend dem Netzberechnungsprogramm ATPDesigner zur Fahrplanermittlung über eine JSON-Schnittstelle übermittelt. Um beliebige Datenmengen weiterverarbeiten zu können, ist das Netzberechnungsprogramm als skalierbare Systemplattform aufgebaut. Die für die Datenverarbeitung notwendige Rechenleistung kann somit in einer Cloud-Infrastruktur flexibel an die Anforderungen der Anwender angepasst werden.

Das Netzberechnungsprogramm wurde im Projekt MobiGrid um ein Verfahren erweitert, welches unter Berücksichtigung der netzphysikalischen Zusammenhänge und der Netztopologie mit Hilfe der durch die Middleware aggregierten Daten die avisierten Flexibilitätsfahrpläne erstellte. Grundlage des Verfahrens bildete eine Sensitivitätsanalyse, welche die physikalischen Auswirkungen der Flexibilitätsoptionen auf den Netzzustand ermittelte.



Dazu wurden die Leistungsflussgleichungen des Stromnetzes um ihren Arbeitspunkt herum linearisiert. Darauf aufbauend fand eine monetäre Bewertung der Fahrpläne durch den Flexmanager der e-netz Süd Hessen AG unter Berücksichtigung von rechtlichen Rahmenbedingungen statt. Hierbei standen abschaltbare Lasten, wie z.B. stationäre Ladesäulen, elektrische Wärmepumpen, heimische Wallboxen, aber auch lokale Speicher und Erzeugungsanlagen, im Fokus. Der geschilderte Prozessablauf ist schematisch in Abbildung 5 zu sehen. Parallel zur Simulation innerhalb der Softwaresysteme fand das geplante Flexibilitätsmanagement in einem Feldtestgebiet der e-netz Süd Hessen AG statt. Hier koordinierte der Flexmanager als Bindeglied zwischen Softwaresystem und dezentralen Flexibilitäten die geplanten Flexibilitätsabrufe.

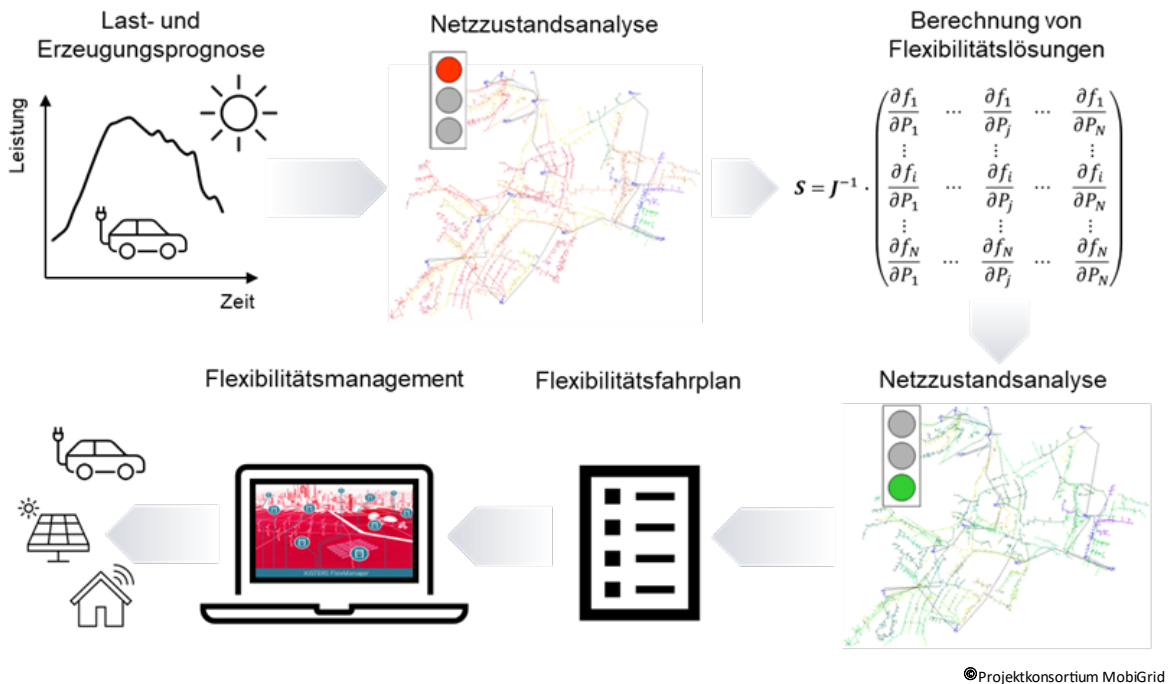


Abbildung 5: Prozessablauf MobiGrid

*MobiGrid nutzte Digitale Zwillinge, um Flexibilitätsfahrpläne für das Stromnetz zu erstellen, indem aggregierte Daten wie Wetterprognosen und Nutzerverhalten analysiert wurden. Diese Fahrpläne halfen, Netzspannungsgrenzen einzuhalten und Betriebsmittel zu entlasten, während der Flexmanager die wirtschaftliche Bewertung und Koordination der Flexibilitäten übernahm.*

## UMSETZUNG IM PROJEKT

Das Softwaresystem Flexibilitätsmanager, welches später näher vorgestellt wird, hatte die Aufgabe, aus der Kombination von Messdaten und ergänzenden Informationen Prognosen im Sinne von Zeitreihen von Leistungen mit einer zeitlichen Auflösung von 15min-Intervallen für die zu erwartenden Leistungsprofile der Anlagen und Netzbetriebsmittel zu erstellen sowie Abschätzungen zum Flexibilitätspotenzial von steuerbaren Anlagen vorzunehmen. Außerdem übernahm der FlexManager die Ansteuerung der konkreten Anlagen im Falle eines Flexibilitätsabrufs.

Das Netzberechnungsprogramm ATPDesigner, das am Institut für elektrische Energiesysteme der htw saar in der Forschung und Lehre verwendet wird, wurde als performante Forschungs- und Entwicklungsplattform eingesetzt. Es handelt sich um eine Software zur Berechnung von elektrischen Spannungen, Strömen, Leistungen etc. in Stromversorgungsnetzen aller Spannungsebenen. Es stellt Funktionen aus dem Bereich der Netzschutztechnik zur Verfügung und kann das Verhalten von Schutzorganen nachbilden. ATPDesigner verwendet eine intuitive grafische Benutzeroberfläche, um Stromversorgungsnetze aufzubauen und

untersuchen zu können. Darauf aufbauend bietet das Netzberechnungsprogramm ATPDesigner höherwertige Funktionen, wie z.B. Lastflussberechnungen oder Zeitreihenberechnungen mit Lastprofilen.

Auch eine Verarbeitung von Daten in Formaten wie z.B. JSON und die automatisierte Generierung von Berichten im Office Open XML-Format sind verfügbar.

Im Projekt diente das Programm dazu, Berechnungen von stationären Netzzuständen (Netzberechnungen) mit Zeitreihen (Lastprofilen) durchzuführen, normativ unzulässige Betriebszustände festzustellen, Sensitivitätsbetrachtungen durchzuführen und Fahrpläne für Flexibilitäten zu ermitteln. Diese Aufgaben sind in der Prozesslandkarte unter dem Begriff „Netzberechnung“ zusammengefasst.

Stationäre Lastflussberechnungen bzw. Leistungsflussberechnungen, wie auch Zeitreihenberechnungen, werden im Netzberechnungsprogramm ATPDesigner über eine Knotenpotentialanalyse mit Strom- bzw. Lastiteration, basierend auf dem Stromiterationsverfahren, umgesetzt. Die Knotenpotentialanalyse erfolgt innerhalb des als Background-Rechenkern eingebundenen ATP (**A**lternative **T**ransients **P**rogram). Da ATPDesigner keinen Zugriff auf die im ATP verwendete Knotenpunkt-Admittanzmatrix für ein Stromnetz hat, wurde die Netzberechnungssoftware im Rahmen von *MobiGrid* um einen Rechenkern erweitert, welcher auf Basis des Newton-Raphson-Verfahrens die Knotenpunkt-Admittanzmatrix eines Stromnetzes generiert und die Ermittlung der elektrischen Wirkung (Sensitivität) von Flexibilitäten auf andere Betriebsmittel im Mitsystem des Stromnetzes erlaubt.

---

*Die netzphysikalische Beschreibung von Stromnetzen mit Hilfe der symmetrischen Komponenten stellt eine Alternative zur Beschreibung von Stromnetzen in Leitergrößen dar. Stromnetze können mit den drei Komponentensystemen Mit-, Gegen- und Nullsystem vollständig beschrieben werden. Im Falle eines symmetrischen Stromnetzbetriebes unter der Annahme elektrisch symmetrischer Betriebsmittel ist es ausreichend, das Stromnetz nur im Mitsystem zu beschreiben.*

---

Das Softwaresystem BaSyx hat die Aufgabe, eine Entkopplung von FlexManager und ATPDesigner zu bewerkstelligen und durch die Einführung standardisierter Schnittstellen, bevorzugt aus dem Open Source Bereich, zwischen den Teilprozessschritten die Weiterentwicklung der Systeme und ihre Interoperabilität mit ggf. später hinzukommenden Systemen zu erleichtern.

## PROZESSAUFBAU

Im Forschungsprojekt wurde die nachfolgend dargestellte Prozesslandkarte (Abbildung 6) entwickelt. Innerhalb der Prozesslandkarte wurden drei Teilsysteme definiert: Flexmanager, Stromnetzberechnung und Middleware.

Die Prozesslandkarte diente dazu, die Interaktionen und Informationsflüsse zwischen den Softwaresystemen der Projektpartner zu dokumentieren und die Aufgaben der Systeme im Gesamtprozess darzustellen. Sie bildete die Schritte von der Erkennung von Grenzwertverletzungen im Stromnetz bis zur Umsetzung von Lösungen ab und half, Schnittstellenprobleme frühzeitig zu erkennen. Durch die Unterscheidung zwischen dynamischen und statischen Informationsobjekten wurde der Informationsaustausch strukturiert. Die Karte ermöglichte auch die Simulation von Szenarien, wie der Verbreitung von Elektrofahrzeugen, um deren Auswirkungen auf die Netzstabilität zu evaluieren. Die gewonnenen Informationen können zur Optimierung

von Prognosemodellen genutzt werden, wobei die datenschutzkonforme Dokumentation bei der Steuerung realer Anlagen berücksichtigt werden muss.

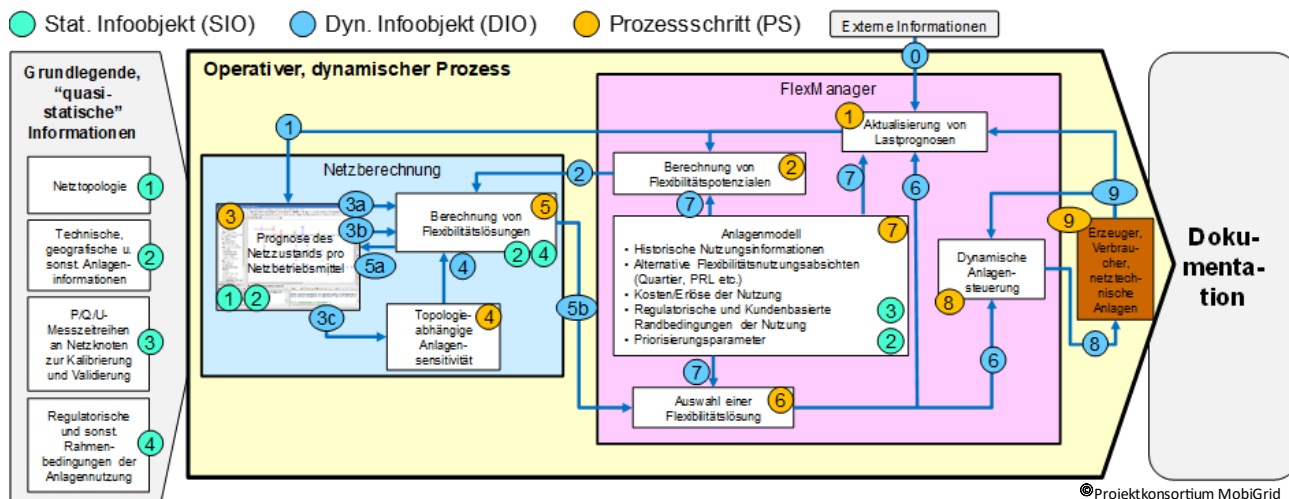


Abbildung 6: Prozesslandkarte ohne BaSys

*Die Prozesslandkarte dokumentierte die Interaktionen und Informationsflüsse zwischen den Softwaresystemen im Projekt und unterstützte die Entwicklung der Teilsysteme, um Schnittstellenprobleme zu vermeiden.*

## FLEXMANAGER

Der Flexmanager stellt eine hochentwickelte, intelligente Softwarelösung dar, die in enger Kooperation mit der Firma KISTERS über einen ausgedehnten Zeitraum maßgeschneidert für die spezifischen Bedürfnisse von e-netz Süd Hessen AG entwickelt wurde. Im Zuge einer Vielzahl von Projekten konnte hierauf basierend ein Prognosetool entwickelt werden, das als Grundlage für den systemischen Aufbau der Systemlandkarte genügt. Dieses System zeichnet sich durch seine adaptive Systemarchitektur aus, die es ermöglicht, kontinuierlich auf die evolutionären Entwicklungen und regulatorischen Anpassungen im Energiesektor zu reagieren.

Im Fokus des Projektes MobiGrid wurde der Flexmanager dahingehend angepasst, eine Synthese aus den Messdaten dezentraler Energieerzeugungsanlagen und den volatilen Marktdaten zu schaffen, um einen Digitalen Zwilling des Reallabors zu modellieren. Aus dieser Synthese wurden präzise Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen der einzelnen Erzeuger und Verbraucher abgeleitet, die die Grundlage für die Berechnung der Flexibilitätsoptimierung waren. Durch die Integration von Prognosen, aktuellen Marktdaten und vorhandenen Messwerten wurde ein monetär optimales Prognosemodell für das Verteilnetz ermittelt, das nicht nur wirtschaftlich, sondern auch technisch effizient ist.

Der Flexmanager gliedert sich in zwei Hauptkomponenten: Das Energiedatenmanagement-System, das für die Erfassung, Verarbeitung und Validierung der Daten zuständig ist und diese in aufbereiteter Form an die zweite Komponente, das Prognosetool, weiterleitet. Letzteres nutzt ein Variantenmodell, um fundierte Prognosen zu erstellen, die dem Netzberechnungsprogramm ATPDesigner zur Verfügung gestellt werden. Die Lösung der Firma KISTERS, Dienstleister für IT-Lösungen, Umwelt-Monitoring und Datenmanagement, die für die Verarbeitung großer Datenmengen konzipiert ist, bietet Verteilnetzbetreibern eine optimale Unterstützung bei der Überwachung von Niederspannungsnetzen. Sie ermöglicht es, potenzielle Engpässe frühzeitig zu identifizieren und geeignete präventive sowie unmittelbare Maßnahmen zu kalkulieren und später umzusetzen.

Der Flexmanager ist eine intelligente Softwarelösung, entwickelt mit KISTERS für die e-netz Süd Hessen AG, die Prognosen für Energieerzeugung und -verbrauch erstellt, um Flexibilitätsoptionen zu berechnen. Er integriert Messdaten und Marktdaten, um potenzielle Netzengpässe frühzeitig zu identifizieren und Maßnahmen zu planen.

## NETZBERECHNUNG – ERMITTLUNG VON FLEXIBILITÄTSLÖSUNGEN

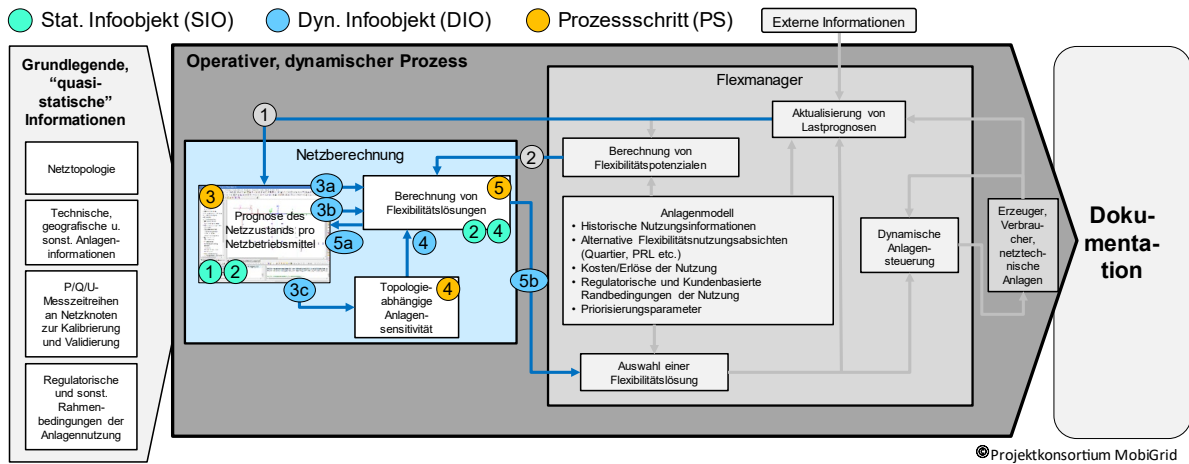


Abbildung 7: Teilsystem Netzberechnung – Ermittlung von Flexibilitätsoptionen in der Prozesslandkarte

Das Teilsystem *Netzberechnung – Ermittlung von Flexibilitätsoptionen* hatte innerhalb des entwickelten Gesamtprozesses die Aufgabe, Flexibilitätsoptionen in Form von Flexibilitätsoptionen zu generieren. Der Begriff der Flexibilitätsoption beschreibt im Projekt *MobiGrid* die Gesamtheit aller umzusetzenden Wirkleistungsanpassungen der Flexibilitätsoptionen innerhalb des Prognosezeitraumes, die zum Ziel haben, normativ unzulässige Betriebszustände im Stromnetz zu beheben oder zu verhindern.

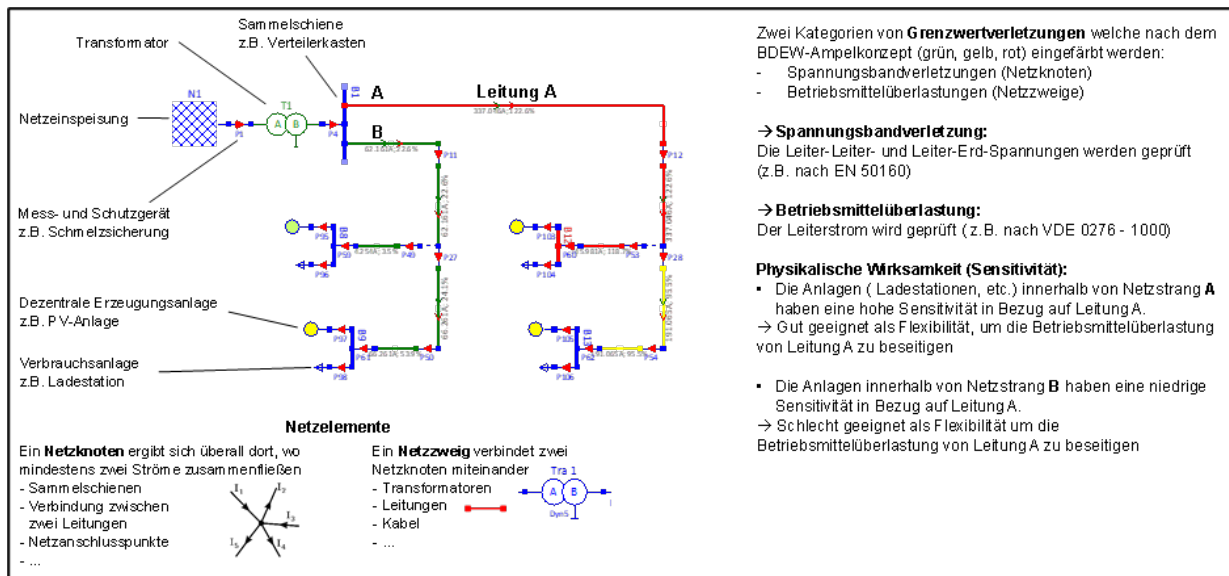


Abbildung 8: Beispielhafte Beschreibung einer Netztopologie

Zur Ermittlung der Flexibilitätsoptionen wurde in dem Teilsystem das Netzberechnungsprogramm ATPDesigner eingesetzt, das den Netzzustand des Stromnetzes mit Hilfe von Lastflussberechnungen berechnet, unter Verwendung von normativen und anwenderspezifischen Vorgaben bewertet und als Ergebnis die Flexibilitätsoptionen ermittelt. Die Kennzeichnungen der nachfolgend genannten Prozessschritte sind Abbildung 5 zu entnehmen.

Gemäß Prozessschritt ③ erfolgte zunächst durch das Netzberechnungsprogramm die Berechnung des erwarteten Netzzustands auf Basis der vom Flexmanager in 15min-Intervallen erstellten Lastprognosen. Die Berechnung des erwarteten Netzzustandes erfolgte mit Lastflussberechnungen und war der initiale Netzzustand zur Ermittlung der Flexibilitätslösungen. Bei den Lastprognosen handelte es sich um Bezugs- und Einspeiseleistungen, die in einer Zeitreihe von 15min-Intervallen angegeben wurden. Die 15min-Intervalle des Prognosezeitraums wurden in zeitlich aufsteigender Reihenfolge bearbeitet, für jedes 15min-Intervall wurde eine Lastflussberechnung nach dem Newton-Raphson-Verfahren durchgeführt.

Innerhalb des Prozessschrittes ⑤ wurden Nachholeffekte (Lastverschiebungen) *aufgrund vorangehender Flexibilitätseinsätze* ermittelt. Diese Lastverschiebungen stellten eine Anpassung der Lastprognosen dar, die in dem internen Informationsobjekt DIO5a enthalten waren. Auf Basis dieser angepassten Lastprognosen ergab sich ein korrigierter Netzzustand (DIO3b). In diesem Fall wurde in Prozessschritt ③ allerdings keine erneute Lastflussberechnung durchgeführt, sondern ein Linearisierungsansatz auf Basis der zuvor durchgeführten Lastflussberechnung verwendet.

---

*Unter dem Begriff Netzengpass werden in diesem Zusammenhang eine oder mehrere Abweichungen vom normativ zulässigen stationären Netzzustand des Stromnetzes verstanden. Ein normativ unzulässiger Netzzustand liegt vor, wenn normative Grenzwerte für Spannungen und/oder Ströme, wie z.B. das nach EN 50160 zulässige Spannungsband oder die nach VDE 0276-1000 definierte Dauerbelastbarkeit, über- oder unterschritten werden.*

---

Prognostizierten die Berechnungsergebnisse einen oder mehrere Netzengpässe für ein 15min-Intervall, erfolgte innerhalb des Prozessschrittes ⑤ die Berechnung der zur Vermeidung von Netzengpässen notwendigen Leistungsänderungen von Flexibilitäten für dieses 15min-Intervall.

Um die Steuerwerte der Flexibilitätslösung, d.h. die anzupassenden Wirkleistungswerte als Eingangsgrößen der Flexibilitäten, für jedes 15min-Intervall des Prognosezeitraums zu bestimmen, mussten zuvor in Prozessschritt ④ Anlagensensitivitäten ermittelt werden.

Die Anlagensensitivität ist abhängig vom Netzknoten, an dem die Anlage angeschlossen ist, der Netztopologie und den Impedanzen der Betriebsmittel des Stromnetzes, aber auch von dem vorliegenden Netzzustand. Anlagensensitivitäten können über eine Sensitivitätsanalyse bestimmt werden, die auf der mathematisch-physikalischen Beschreibung des Stromnetzes mit der Jacobi-Matrix beruht. Grundsätzlich muss die Anlagensensitivität in eine spannungsbezogene und eine zweigstrombezogene Anlagensensitivität unterschieden werden. Mit den Sensitivitäten einer Anlage kann deren Wirkung im Falle einer Wirk- und/oder Blindleistungsänderung der Anlage auf die Spannungen an allen Netzknoten und Strömen in allen Netzzweigen des Stromnetzes quantifiziert werden. Die Sensitivitätsanalyse ist daher von grundlegender Bedeutung für die Berechnung der Flexibilitätseinsätze im Prognosezeitraum, um die Behebung von Netzengpässen mit einer technisch und perspektivisch auch wirtschaftlich geeigneten Auswahl von Flexibilitäten aus der Menge der verfügbaren Flexibilitäten zu treffen.

Das im Rahmen des Projektes *MobiGrid* konzipierte und als Demonstrator im Netzberechnungsprogramm ATPDesigner implementierte Verfahren *Prognose mit Flexibilitäten* berechnete als Flexibilitätslösung insgesamt fünf unterschiedliche Flexibilitätseinsätze, in denen Wirk- und optional Blindleistungswerte für alle in den Lastprognosen enthaltenen Anlagen zu jedem 15min-Intervall des Prognosezeitraums ausgegeben werden konnten. Waren wie im Projekt zugrunde gelegt in den Lastprognosen keine Eingangswerte zur Blindleistung der Flexibilitäten enthalten, wurden in den Lastflussberechnungen die im mathematisch-physikalischen Modell des Stromnetzes vorgegebenen Blindleistungen, definiert durch den anlagenspezifischen Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi$ , als Ersatzwerte verwendet. Abbildung 9 zeigt die Eingangs- und Ausgangsdateien des Verfahrens, die einerseits vom Flexmanager und andererseits dem Flexmanager zur Verfügung gestellt wurden.



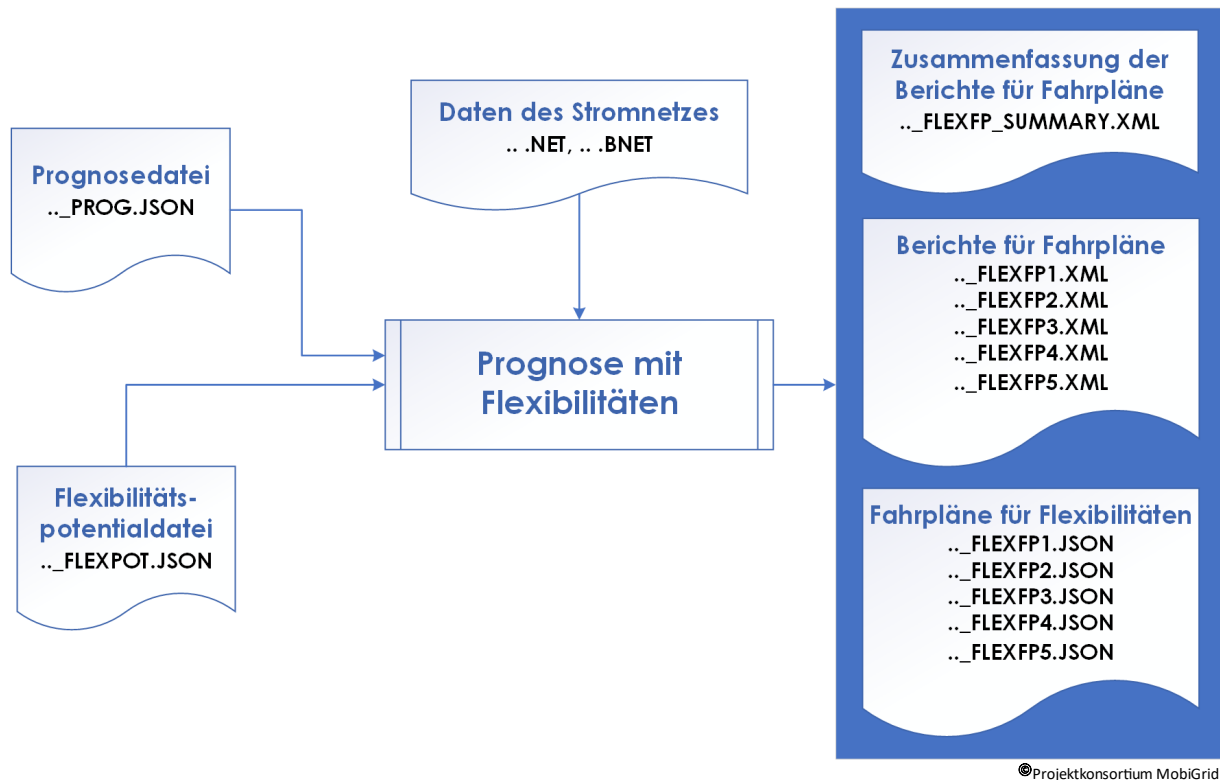


Abbildung 9: Eingangs- und Ausgangsdaten im Teilsystem Netzberechnung – Ermittlung von Flexibilitätslösungen

Die Berichte für Fahrpläne, im Folgenden auch Fahrplanberichte genannt, enthalten ausgewählte Ergebnisse der Netzberechnung und die zur Erstellung der Fahrpläne führenden davon abgeleiteten Berechnungsergebnisse im Office Open XML-Format und können als Dokumentation der Flexibilitätslösung verwendet werden. Die Fahrpläne für Flexibilitätën enthalten die direkt zur maschinellen Weiterverarbeitung geeigneten Fahrpläne im JSON-Format.

Vorgaben von Steuerwerten für die Flexibilitätën ergeben sich aus dem Vergleich der Leistungswerte je 15min-Intervall der Prognosedatei und einer Fahrplandatei. Die Fahrplanberichte stellen diese und weitere Informationen dar, z.B. Lastverschiebungen zwischen 15min-Intervallen oder ggfs. nicht behebbare Netzengpässe.

Die Fahrpläne in den Fahrplandateien unterscheiden sich bzgl. der Einsatzreihenfolge der Flexibilitätën unter Bewertung der Anlagensensitivitäten zur Auswahl geeigneter Flexibilitätën. Ein Fahrplan behält nur seine Gültigkeit, wenn er in seiner Gesamtheit umgesetzt wird. Die Kombination von Steuerwerten aus den vom Verfahren berechneten Fahrplänen zu einem neuen resultierenden „Misch“-Fahrplan ist unzulässig, da in diesem Fall nicht sichergestellt werden kann, dass das Stromnetz innerhalb der normativ zulässigen Grenzwerte betrieben wird.

Wenn keine Leistungsanpassungen im Vergleich zur Prognose erfolgen, beispielsweise da keine Netzengpässe identifiziert wurden, reicht die Ausgabe eines Fahrplans aus. Die dort enthaltenen Leistungswerte entsprechen denen der Prognosedatei.

Basierend auf den Fahrplanberichten und den Fahrplänen sind perspektivisch weiterführende Auswertungen, Analysen und Darstellungen möglich, die dem Anwender die komplexe und vielschichtige Entscheidungsfindung des Verfahrens Prognose mit Flexibilitätën zur Berechnung der Flexibilitätslösung noch transparenter und übersichtlicher darstellen könnten. Durch die Verwendung von standardisierten Datenaustauschformaten ist eine Weiterverarbeitung der Ergebnisdateien durch nicht im Forschungsvorhaben verwendete Softwarelösungen sichergestellt.

## MIDDLEWARE

Eclipse BaSyx ist die Open-Source-Plattform für fortschrittliche, innovative Automatisierungslösungen der nächsten Generation. Sie bietet gemeinsame und wiederverwendbare Industrie 4.0-Komponenten und ein Software Development Kit, das die Entwicklung neuer Industrie 4.0-Softwarekomponenten unterstützt, um die schnelle Entwicklung von Industrie 4.0-Lösungen zu ermöglichen. Diese Eclipse BaSyx-Plattform wird darüber hinaus Referenzanwendungsszenarien für gängige Industrie 4.0-Herausforderungen bereitstellen. Eclipse BaSyx wurde aktiv unterstützt durch das Forschungsprojekt BaSys 4.0 (Homepage: <https://eclipse.dev/basyx/>), das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Förderkennzeichen 01IS16022) gefördert wurde. BaSys 4.0 erforschte und spezifizierte Schlüsselkonzepte von Industrie 4.0, beteiligte sich an Standardisierungsaktivitäten und integrierte bestehende Standards und Technologien in eine Industrie 4.0-Middleware.

Die frei verfügbare Industrie 4.0-Middleware BaSyx 4.0 wurde für den Einsatz im Projekt MobiGrid individuell angepasst. Aufbauend auf ihren technischen Grundlagen, Konzepten und Modellen (insbesondere dem Digitalen Zwilling) soll sie einen Industrie 4.0-kompatiblen Einsatz in der Energiewirtschaft ermöglichen.

BaSyx als Middleware nutzt bekannte Internet-basierte Technologien zur Umsetzung der Kommunikation zwischen den Teilnehmern. Middleware-Architekturen abstrahieren Bus-Technologien, indem sie mehreren Kommunikationsteilnehmern den Datenaustausch ermöglichen und den Entwicklern durch definierte Schnittstellen zugänglich machen. Die Middleware organisiert den Datenaustausch und definiert die Steuerung des Datenflusses.

Die Steuerung des Datenflusses erfolgt durch verschiedene zeit- und eventgesteuerte Modi, die entweder push- oder pull-basiert sein können. Die Middleware kontrolliert die Datenweiterleitung mittels Authentifikationsverfahren, wobei gängige Verfahren wie HTTPS mit ITU X509.3-basierten Zertifikaten verwendet werden. Zugriffsrechte auf Anwendungsebene ermöglichen eine feinere Steuerung. Die Middleware überwacht die Datenweiterleitung und kann bei Fehlern oder detektierten Ereignissen eingreifen sowie durch Timeouts und Watchdogs fehlende Daten signalisieren.

Für die Datenübertragung von den Teilnehmern zur Middleware sind standardisierte Schnittstellen erforderlich, entweder vorgefertigte Programmierschnittstellen oder standardisierte Protokolle wie UDP oder TCP/IP. BaSyx nutzt den JSON-Datei-Austausch mithilfe von HTTP und HTTPS-Protokollen, wobei HTTP(S) auf TCP/IP aufbaut.

Die Kommunikation in BaSyx ist rein Ereignis-getriggert, jedoch können zeitbasierte Kommunikationen durch die Einführung von Watchdogs auf Anwendungsebene realisiert werden. BaSyx bietet einen HTTP-Server an und akzeptiert HTTP GET- und POST-Anfragen. Es kann auch selbst als Client aktiv werden und bekannten Middleware-Teilnehmern HTTP GET- und POST-Anfragen senden. BaSyx wertet die empfangenen Nachrichten auf HTTP-Ebene als JSON-Dateien aus und leitet sie ungefiltert an weitere Teilnehmer weiter.

Zusätzlich zu diesen Grundfunktionalitäten kann BaSyx weitere Aufgaben erfüllen, um die Qualität der Datenweiterleitung zu erhöhen. Dazu gehört das Filtern von Nachrichten, das Puffern von Nachrichten im Falle einer Nichtverfügbarkeit eines Systems, die Plausibilitätsprüfung von Nachrichteninhalten, das Ergänzen von Nachrichteninhalten sowie die Überwachung des Zustands der gesamten Kommunikation und die Reaktion auf hohe Lastsituationen oder ungewollte Systemzustände anhand von Regeln.

---

*BaSyx ist eine Middleware, die Internet-basierte Technologien nutzt, um den Datenaustausch zwischen Teilnehmern zu organisieren und zu steuern, wobei sie Authentifikationsverfahren und standardisierte Schnittstellen wie HTTP(S) verwendet. Sie ermöglicht ereignisgesteuerte Kommunikation, bietet zusätzliche Funktionen wie Nachrichtenfilterung und -pufferung und überwacht die Kommunikationsqualität.*

---

## PROGNOSEMODELLE

Im Projekt MobiGrid spielten Prognosen eine zentrale Rolle, um das Verbrauchs- und Erzeugungsverhalten in Niederspannungsnetzen zu analysieren. Besonders im Hinblick auf die Integration von E-Mobilität und die Nutzung dezentraler Flexibilitätspotenziale sind präzise Vorhersagen unerlässlich.

Haus- und quartierbezogene Prognosen ermöglichen es, maßgeschneiderte Lösungen für Energieeffizienz und die Nutzung erneuerbarer Energien zu entwickeln. Diese Vorhersagen berücksichtigen Faktoren wie das Verbraucherverhalten, die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und die Kapazität der Ladeinfrastruktur. Intelligente Messsysteme liefern dabei entscheidende Daten, die helfen die Netzstabilität zu gewährleisten und Engpässe zu vermeiden.

Die zunehmende Verbreitung von E-Fahrzeugen stellt eine neue Herausforderung für die Netzstabilität dar. Prognosen helfen, das Ladeverhalten zu analysieren und die Infrastruktur entsprechend anzupassen. Dies ist entscheidend, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten und die Energiewende zu unterstützen. Darüber hinaus ermöglichen Prognosen die effiziente Nutzung von Flexibilitätspotenzialen, indem sie die Steuerung von PV-Anlagen, Wärmepumpen und Heimspeichern optimieren. Dies trägt dazu bei, eine nachhaltige Energieversorgung zu fördern und die Umweltauswirkungen zu minimieren.

Für die Erstellung von Prognosen für das Projekt MobiGrid wurde eine Vielzahl von zu prognostizierenden Elementen festgelegt (Abbildung 10). Diese wurden im Vorfeld in quartierbezogene Prognosen und hausbezogene Prognosen unterteilt und orientierten sich an den lokalen Bedingungen im Feldtestgebiet. Unterschieden wurden dabei Prognosemodelle für Verbraucher und Erzeuger.

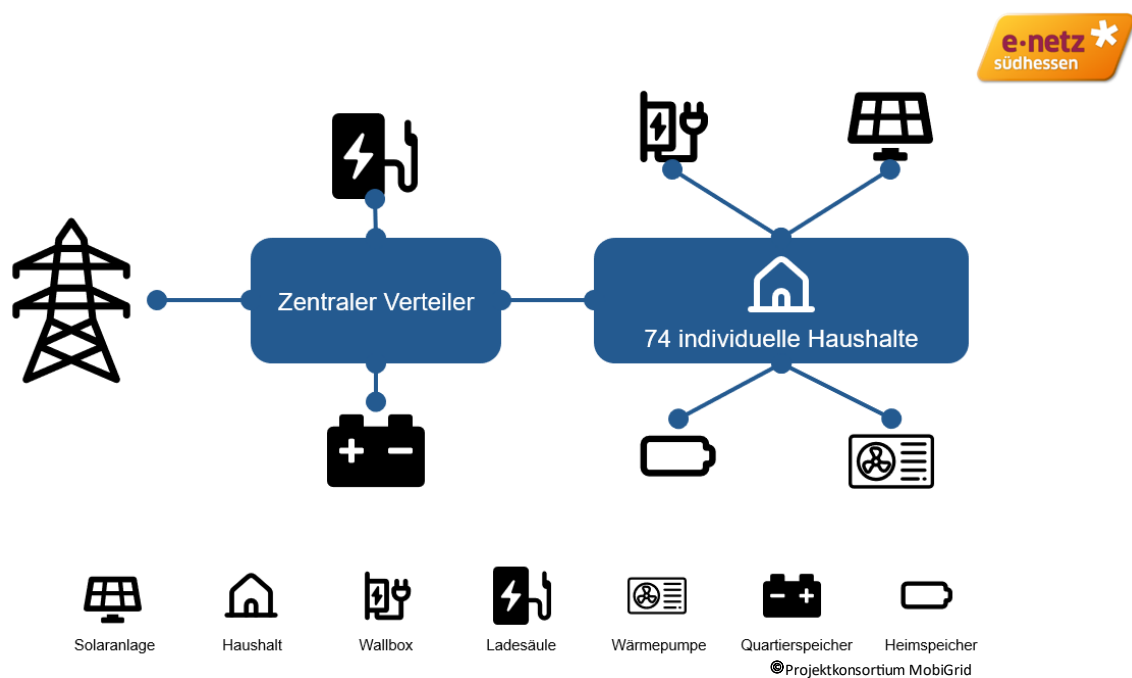


Abbildung 10: Schematische Darstellung der verschiedenen Prosumer

*Insgesamt bieten die im Projekt MobiGrid erstellten Prognosen wertvolle Einblicke, um die Herausforderungen der modernen Energiewirtschaft zu meistern. Sie unterstützen die Integration erneuerbarer Energien, helfen Kosten zu sparen und verbessern die Lebensqualität der Bewohner, indem sie eine nachhaltige und effiziente Energiezukunft gestalten.*

## FELDVERSUCH ZUR ÜBERPRÜFUNG DER PRAXISTAUGLICHKEIT

Der Einfluss der E-Mobilität wurde in MobiGrid in einem Feldversuch im Stromverteilnetz untersucht. Der Fokus lag dabei auf einem Wohn-Mischgebiet mit dominierender Ein- und Mehrfamilienhausbebauung, konkret in einem Neubaugebiet in Groß-Umstadt. Das Stromnetz dort ist teilweise vermascht und nahezu alle Gebäude besitzen eine PV-Anlage. Die Bewohner pendeln überwiegend zur Arbeit. Die Ladung von Elektrofahrzeugen erfolgte daher eher in den Abendstunden und am Wochenende mit Leistungen von 4 bis 22 kW. Netzengpässe konnten daher aus einer hohen Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge resultieren. Die Feldtestgebiete wurden im Netzberechnungssystem ATPDesigner aufgebaut und das E-Mobil-Ladeverhalten sowie das PV-Einspeiseverhalten durch 15 min-Werte (Lastprofile) nachgebildet. Das E-Mobil-Ladeverhalten wurde vergleichend mit Messwerten durch Gleichzeitigkeitsfaktoren und probabilistische Ladeprofile simuliert.



Abbildung 11: stationäre Ladestation, Transformatorstation und Quartierspeicher im Feldtestgebiet

Als Lösungsansatz wurde auch die Nutzung eines vorhandenen Quartierspeichers (Abbildung 11), der die Pufferung der PV-Anlagenüberschüsse der Haushalte unterstützen kann, untersucht. Der Quartierspeicher entkoppelte die Ladevorgänge vom AC-Netz und wurde vom Flexmanager der ENTEGA gesteuert und überwacht. Im Projektverlauf wurden am Standort des Speichers zusätzlich zur stationären Ladestation auch mobile Ladestationen (Abbildung 12) installiert und den Bewohnern wurden Elektrofahrzeuge als Car-Sharing-Modell zur Verfügung gestellt. Zu diesem Zweck schaffte ENTEGA zwei vollelektrische Pkw an, die den Bewohnern im Testgebiet ab September 2021 im Wechsel für jeweils zwei Monate zur individuellen Nutzung zur Verfügung gestellt wurden. Beide Pkw wurden mit Telematikeinheiten ausgestattet, um eine kontaktlose Fahrzeugübergabe zu ermöglichen. Im ersten Projektjahr wurden zwei Wallboxen als mobile Ladesäulen im Wohngebiet installiert.

---

*Im Rahmen eines Feldversuchs in Groß-Umstadt analysierte MobiGrid den Einfluss der Elektromobilität auf das Stromverteilnetz, insbesondere in Korrelation mit weiteren Trends der Energiewende, wie dem Anstieg von Wärmepumpen, Heimspeichern und dezentralen Erzeugungseinheiten.*

---





Abbildung 12: Zwei Ladestationen (Wallboxen) und ein Baustromzähler im Feldtestgebiet

Da ein wesentlicher Aspekt von MobiGrid auch die Untersuchung des Nutzungsverhaltens von Elektrofahrzeugen und die daraus resultierenden Anforderungen an die NS-Stromnetze war, wurden die Pkw-Nutzer im Vorfeld gebeten, an einer Nutzerbefragung teilzunehmen. Diese Umfrage erfolgte bewusst vor der Nutzung der Fahrzeuge. Erwartungen an die Nutzung von Elektrofahrzeugen sollten hierdurch eruiert und analysiert werden. Eine weitere Umfrage nach Abschluss der Fahrzeugnutzung wurde ergänzend durchgeführt.

---

*Im Forschungsprojekt MobiGrid wurden verschiedene Facetten der Elektromobilität untersucht, wie beispielsweise Carsharing, das Laden zu Hause und im öffentlichen Raum. Dabei erfolgte die Erhebung von Primärdaten direkt bei realen Verbrauchern in allen untersuchten Clustern. Ergänzt wurden die Primärdaten durch die Befragung der Nutzergruppen und die Netzengpassanalyse zu erweitern.*

---

Neben der Verbrauchsgruppe des Carsharings haben auch Ladeparks einen individuellen Gleichzeitigkeitsfaktor und auf Basis dessen ein unterschiedliches Verbrauchs- und Prognoseprofil. Um diese Profile prognostizieren und im Rahmen von Szenariomodellen auswerten zu können, wurde ein Ladepark der ENTEGA mit moderner Messtechnik ausgestattet. Der Ladepark beinhaltet mehrere Ladesäulen und eine Schnellladesäule, wie in Abbildung 13 zu sehen.



Abbildung 13: Ladepark der ENTEGA AG auf dem Grosso Gelände



## NETZBETRIEB DER ZUKUNFT

Mit Beginn der Untersuchungen in Quartal 3 2020 startete das Konsortium MobiGrid noch weit vor der Ratifizierung des aktuellen §14a EnWG. Es war bereits zu Beginn abzusehen, dass eine zukunftsgerichtete Netzführung nur dann gelingt, wenn eine resiliente Modellierung von Netztopologien in einem Netzberechnungssystem in der Niederspannung die Analyse der Netzinfrastruktur ermöglicht und eine Simulation des Netzzustandes gewährleistet.

Die Analyse und Bewertung des Netzschutzkonzeptes ermöglicht es, die Resilienz des Niederspannungsstromnetzes gegenüber Störungen zu sichern. Zudem ist die strategische Einsatzplanung und Steuerung von Flexibilitätsanlagen essenziell, um auf Energieangebots- und Nachfrageschwankungen reagieren und die Netzstabilität sicherstellen zu können.

Das Verbundvorhaben MobiGrid wählte hierzu einen transinterdisziplinären Ansatz zur Untersuchung der Forschungsthemen in einem Reallabor. Es wurden neben einer weitreichenden Digitalisierung einer Ortsnetzstation auch Messungen bei den Endkunden und öffentlichen Verbrauchern, vornehmlich Ladesäulen und Quartierspeicher, installiert. Neben der Erfassung und Auswertung von Messdaten spielte das Einbeziehen von Anlagenbetreibern der unterbrechbaren Verbrauchseinrichtungen eine zentrale Rolle.

Vor allem im Kontext der aktuellen Regelungen des §14a EnWG kann eine zielführende Umsetzung nur gelingen, wenn diese integrativ betrachtet wird. Hier sind Anlagenbetreiber, im weitesten Sinne Haushaltkunden, hervorzuheben. Die hohe Komplexität der Steuerprozesse zeigte sich bereits in der Durchführung des Redispatch 2.0 für Gewerbekunden. Eine Vereinfachung ist durch §14a EnWG nicht zu erwarten, weshalb eine umfangreiche Kundenkommunikation für die Netzbetreiber entscheidend sein wird.

Neben zentralen Erkenntnissen in der Kommunikationsstrecke ergaben qualitative Befragungen Kennwerte für den Aufbau des Prognosemodells. Rückschlüsse durch sozioökonomische Kriterien, wie z.B. Beschäftigungsverhältnis oder Familienstand, geben direkte Indikatoren für das Verbrauchs- und Ladeverhalten einzelner Haushalte bzw. unterbrechbarer Verbrauchseinheiten wie Wallboxen an. So ist z.B. von einem Haushalt, bei dem sich alle Mitbewohner im Home-Office befinden, ein anderes Ladeverhalten an den Wallboxen zu erwarten als von einem Mehrpersonenhaushalt, bei dem sich alle Erwerbstätigen im Schichtdienst befinden. Dies konnte mit den erhobenen Messwerten bestätigt werden. Aus den qualitativen Experteninterviews ging außerdem hervor, dass z.B. Vehicle-to-Grid-Anwendungen ein hohes theoretisches Potenzial innehaben, jedoch auf die Kundenbedürfnisse abgestimmt sein müssen. Die Veränderung der Nutzungsgewohnheiten muss hier berücksichtigt werden, um ein perspektivisches zielführendes Marktmodell aufzubauen.

Neben neuartigen Verbrauchern soll hierbei auch die Adressierung historischer Muster berücksichtigt werden. Die Haushaltsverbrauchsprognose nimmt eine zentrale Rolle bei der Netzzustandsberechnung im Niederspannungsnetz ein. Die gemittelten Standardlastprofile müssen dynamischer gestaltet werden. Technokulturelle Änderungen, aber auch der Zuwachs an unterbrechbaren Verbrauchern und Erzeugern ändern das Lastprofil eines Haushaltes weitreichend und individualisieren dieses stark. Neben dem Zuwachs müssen auch neue Parameter bei der Netzplanung Beachtung finden. Ein Beispiel sind die bestehende Baustruktur und Bauphysik. Es lassen sich relevante Kennzahlen in der Effizienzklasse des Hauses finden, welche in direkter Korrelation mit Prognosebildung und Netzplanung stehen müssen. Das Flexibilitätspotenzial von Wärmepumpen ist bei Neubaugebieten deutlich geringer als im Altbaubestand, da die Leistungsklassen und die Bezugsleistungen der Wärmepumpen deutlich geringer sind. Zudem ergibt sich ein Flexibilitätspotenzial auch im Sommer, da Wärmepumpen als Klimaanlage eingesetzt werden können.

Dies rückt einen zentralen Aspekt der zukünftigen Netzplanung und Steuerung in den Fokus: Qualität und Verfügbarkeit der Daten. Ein Smart Grid kann nur dann aufgebaut werden, wenn die eher getrennt arbeitenden Bereiche Messstellenbetrieb und Netzbetrieb stärker kooperieren und integrativ betrachtet werden. Die Bedeutung der Datenqualität und der daraus abgeleiteten Prognosegüte kann nicht hoch genug eingeschätzt werden, da sie für die Überwachung und Steuerung des Stromnetzes unerlässlich ist. Die Zuverlässigkeit von

Prognosen hängt maßgeblich von der Qualität und der Aktualität der Daten ab. Die Herausforderungen für die Netzplanung sind umso besser zu bewältigen, je mehr Daten der Netzplanung vorliegen. Wird z.B. mit den Daten der minimalen PV-Leistung sowie einem umfangreichen Heizkonzept im Neubaugebiet geplant, können Hochlaufszenerarien effizient in die Netzplanung integriert werden.

*Das Projekt MobiGrid betonte die Bedeutung robuster Netztopologien und Flexibilitätssteuerung zur Netzstabilität. Durch Digitalisierung und Messungen wurden Erkenntnisse über Verbrauchsverhalten gewonnen, wobei die Datenqualität als entscheidend für Prognosen und Netzplanung hervorgehoben wurde.*

## TECHNOLOGIEFOLGEABSCHÄTZUNG VON UNTERBRECHBAREN VERBRAUCHERN

Abgeleitet aus den Prognosezeitreihen und den anlagenspezifischen Daten, wurde die Netzzustandsbewertung im Prognosezeitraum für das Niederspannungsnetz des Reallabors evaluiert. Im Sinne von §14a EnWG oder §14c EnWG muss eine ausreichende Netztransparenz hergestellt werden. Darauf aufbauend konnten Szenarien berechnet werden. Es wurden neben reinen Hochlaufszenerarien von unterbrechbaren Verbrauchseinrichtungen auch hohe Gleichzeitigkeiten, welche z.B. durch ein Marktsignal im Sinne des §14c EnWG ausgelöst werden könnten, betrachtet.

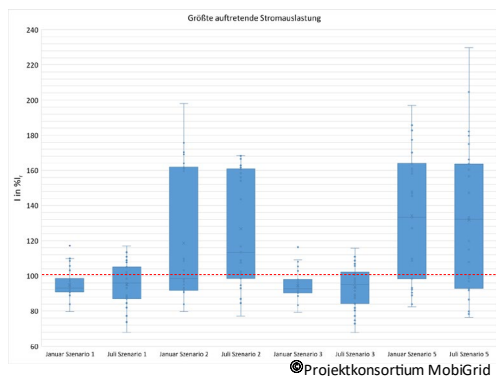


Abbildung 14: Ergebnisse Szenario Methodik

$$S = J^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_j} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial P_j} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial P_N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial P_j} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial P_N} \end{pmatrix}$$

©Projektkonsortium MobiGrid

Abbildung 15: Sensitivitätsmatrix

Die Prognosen werden im JSON-Format mit dem im Netzberechnungsprogramm ATPDesigner integrierten Webserver empfangen und Flexibilitätsfahrpläne berechnet. Der Webserver ermöglicht eine dezentrale Netzberechnung innerhalb des Intranets des Netzbetreibers. Das Netzberechnungsprogramm, das z.B. in einer Cloud-Infrastruktur mit virtuellen Maschinen arbeitet, kann flexibel an die Anforderungen der Anwender angepasst werden. Ein REST-API sorgt für eine effiziente Nutzung der Infrastruktur, während ATPDesigner die netzphysikalischen Zusammenhänge und die Netztopologie berücksichtigt.

Die Flexibilitätsfahrpläne wurden mit einer Sensitivitätsanalyse berechnet, welche die physikalischen Auswirkungen der Flexibilitätsoptionen auf den Netzzustand ermittelt. Dazu werden die Leistungsflussgleichungen des Stromnetzes im Arbeitspunkt linearisiert.

Die Sensitivitätsmatrix  $S$  in Abbildung 15 ergibt sich dabei aus der Multiplikation der Inversen der Jakobimatrix  $J^{-1}$  mit, der Matrix der partiellen Ableitungen der Leistungsflussgleichungen ( $f_1 \dots f_i \dots f_N$ ) und der Knotenleistungen ( $P_1 \dots P_j \dots P_N$ ).

Schon beim aktuellen Stand der Technik war zu erkennen, dass das bestehende Netzschutzkonzept unter Beachtung der Flexibilitätsfahrpläne die Netzstabilität sichert. Aus Ergebnissen der Szenarien-Methodik ließen sich Indikatoren für den planerischen Netzbetrieb ableiten. In Abbildung 14 soll hierzu die Kennzahl der größten auftretenden Stromleistung am Transformator dienen.

Im Niederspannungsnetz des Reallabors von MobiGrid stellten Hochlaufszenerarien von PV-Anlagen, E-Mobilität und Wärmepumpen keine nennenswerte Netzbelastung dar. Anders verhält sich dies bei hoher Gleichzeitigkeit.

Hier können Heimspeicher zwar als netzpuffernd wirken, dies gilt aber nicht, falls diese gleichzeitig durch ein Marktsignal agieren. Des Weiteren dürfen Nachholeffekte bei der E-Mobilität nicht unterschätzt werden. In den E-Mobilhochlaufszszenarien verstärken Nachholeffekte teilweise bereits bestehende Netzbelastungen.

Die Analyse der Netzstabilität lässt erkennen, dass nicht jede Abweichung von etablierten Betriebsnormen zwangsläufig zu Versorgungsproblemen führt. Thermische Regelsysteme und Energiespeicher können zur Sicherstellung der Netzstabilität beitragen, um Netzengpässe zu beheben. Bei Sicherheitsgefährdungen greifen weitere Schutzorgane ein, um die Netzsicherheit zu gewährleisten. Die Klärung von Vorrangrechten ist entscheidend für eine effiziente und diskriminierungsfreie Verteilung der Netzkapazitäten, ebenso wie die strategische Netzplanung und der Netzausbau. Dabei ist zu beachten, dass der Netzausbau, abhängig von der Häufigkeit der Netzüberlastungen, nicht immer durch alternative Maßnahmen ersetzt werden kann.

---

*Im MobiGrid-Reallabor wurden Prognosen und anlagenspezifische Daten genutzt, um die Netzstabilität im Niederspannungsnetz zu bewerten. Flexibilitätsfahrpläne und Szenarien zeigten, dass hohe Gleichzeitigkeiten Herausforderungen darstellen, während thermische Regelsysteme und Energiespeicher zur Netzstabilität beitragen können. Strategische Netzplanung bleibt entscheidend, um Netzkapazitäten effizient zu verteilen.*

---

## UMGANG MIT HOHER NETZLAST

Die Untersuchungen in MobiGrid zeigen, dass kritische Netzzustände durch den gezielten Einsatz von Flexibilitätspotenzialen prädiktiv aufgelöst werden können. Problematisch erscheint, dass die Regelungen von §14a EnWG einen Flexibilitätseinsatz erst bei Eintritt eines kritischen Netzzustands erlauben und der Einsatz mit extrem kurzer Vorlaufzeit erfolgen muss.

In MobiGrid wurde der Ansatz verfolgt, durch eine rollierende Prognose von Netzzustand und Flexibilitätspotenzialen einen präventiven Einsatz von Flexibilität zu ermöglichen und damit das Eintreten kritischer Netzzustände zu vermeiden. Die damit verbundenen längeren Vorlaufzeiten bieten zusätzlichen Spielraum, in einem Marktprozess eine optimale Auswahl zu aktivierender Flexibilitäten zu treffen, die die Bedürfnisse von Netzbetreibern und Haushalten gleichermaßen berücksichtigt. Haushaltsbefragungen im Rahmen des Feldtests ergaben eine starke Präferenz für diesen Ansatz.

Die Empfehlung der Projektpartner geht dahin, dass die Ausgestaltung von §14c EnWG einen geeigneten Rechtsrahmen für einen präventiven Flexibilitätseinsatz schafft. Der bestehende §14a EnWG stellt dann eine Ergänzung bzw. Rückfallposition dar, wenn die marktliche Beschaffung von Flexibilität nicht in ausreichendem Umfang gelingt. Wie die explorative Szenario-Methodik in MobiGrid zeigte, stellt eine hohe Gleichzeitigkeit eine nicht intendierte Netzbelastung dar. Es gilt geeignete Marktmechanismen zu entwickeln, um die vollen Synergiepotenziale der Steuerinfrastruktur anheben zu können. Neben einem Flexibilitätseinsatz besteht auch die Möglichkeit, kritische Netzsituationen durch Infrastrukturmaßnahmen, d.h. Ersatzneubau oder Netzausbau, zu vermeiden.

Nach den Erkenntnissen von MobiGrid kann z.B. eine gezielte Verstärkung der Bemessungsleistung eines Transformators und/oder zentraler Stammstrecken in der Nähe des Transformators einen wesentlichen Beitrag hierzu leisten. Hingegen zeigt der Einsatz regelbarer Transformatoren einen eher geringen Beitrag, da kritische Netzsituationen überwiegend strom- und nur selten spannungsbedingt sind. Der gezielte Einsatz von Blindleistung aus Wechselrichtern kann den Bedarf an Wirkleistungsanpassungen reduzieren. Grundlage hierfür ist die VDE-AR-N 4105. Die Maßnahmen sind im verwendeten Netzberechnungsprogramm integriert, wurden in MobiGrid aber nur prinzipiell untersucht.

Ebenfalls nur prinzipiell untersucht wurde der Einsatz von DC-Netzen. Für E-Mobilität könnten DC-Netze mit einem Quartierspeicher und DC-Ladesäulen eine Option darstellen, hohe Leistungsschwankungen im AC-Netz zu vermeiden. Allerdings erscheint ein paralleler Aufbau eines DC-Netzes zu einem vorhandenen AC-Netz

wirtschaftlich nicht sinnvoll. Eine reine DC-Netzinfrastruktur im urbanen Umfeld erscheint nicht ausgeschlossen, ist aber aktuell von eher geringer Relevanz.

---

*Die Untersuchungen in MobiGrid zeigen, dass kritische Netzzustände durch präventiven Einsatz von Flexibilitätspotenzialen vermieden werden können, was längere Vorlaufzeiten und eine optimale Auswahl aktivierbarer Flexibilitäten ermöglichen. Die Projektpartner empfehlen, §14c EnWG als Rechtsrahmen für präventiven Flexibilitätseinsatz zu gestalten, während §14a EnWG als Ergänzung dient, wenn marktliche Flexibilitäten nicht ausreichen. Infrastrukturmaßnahmen wie die Verstärkung von Transformatoren können ebenfalls zur Netzstabilität beitragen.*

---

## PROJEKTERGEBNIS

Das Projekt MobiGrid hat erfolgreich die Integration von Digitalen Zwillingen und der BaSyx-Middleware in die Energiewirtschaft demonstriert. Durch die Modellierung von Netzelementen und die Nutzung von Flexibilitätspotenzialen konnten Netzengpässe effektiv vermieden werden. Die Implementierung von Asset Administration Shells (AAS) ermöglichte eine präzise Abbildung und Steuerung der physischen Anlagen, was die Netzstabilität und Effizienz erheblich steigerte.

MobiGrid hat gezeigt, dass die Nutzung Digitaler Zwillinge die Netzplanung und -steuerung erheblich verbessern kann. Die Herausforderungen in der Datenintegration und der Systemkomplexität wurden erfolgreich adressiert, was die Grundlage für eine nachhaltige und effiziente Energiezukunft legt. Die Projektergebnisse unterstreichen die Bedeutung von Flexibilitätsmanagement und digitaler Vernetzung in der modernen Energiewirtschaft.

---

**Das Projekt MobiGrid hat erfolgreich gezeigt, dass Digitale Zwillinge die Netzstabilität und Effizienz in der Energiewirtschaft erheblich verbessern und Netzengpässe sogar vermeiden können.**

---

## BEURTEILUNG & AUSBLICK

Die Novellierung des §14a des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG), die eine weitreichende Prägung für die Gestaltung der zukünftigen Netzwirtschaft verspricht, zielt darauf ab, schon jetzt die Weichen für umfassende Transformationen zu stellen. Im Verbundvorhaben MobiGrid wurde empirisch untersucht, unter welchen Bedingungen der strategische Einsatz dezentraler Flexibilitätsoptionen einen substantiellen Beitrag zur Sicherstellung der Stromversorgung leisten kann, gerade angesichts der progressiv steigenden Beanspruchung der Netzinfrastruktur, und wie sich dadurch potenzielle Netzengpässe sowie die Überlastung von Betriebsmitteln prädictiv verhindern lassen können.

Zukünftig könnte die Integration von Echtzeitdaten die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Netzsteuerung weiter verbessern. Die Einführung von marktlichen Mechanismen zur Flexibilitätsnutzung, wie im §14c EnWG angedacht, könnte die wirtschaftliche Effizienz steigern und die Akzeptanz bei den Nutzern erhöhen. Die Erkenntnisse aus MobiGrid bieten eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung smarterer Energienetze.

---

**Die Novellierung des §14a EnWG zielt darauf ab, die Netzwirtschaft durch den strategischen Einsatz dezentraler Flexibilitätsoptionen zu transformieren, um Netzengpässe zu vermeiden. Das Projekt MobiGrid hat gezeigt, dass Echtzeitwerte und marktliche Mechanismen die Flexibilität und wirtschaftliche Effizienz zukünftig weiter steigern könnten.**

---

## PROJEKTTEAM

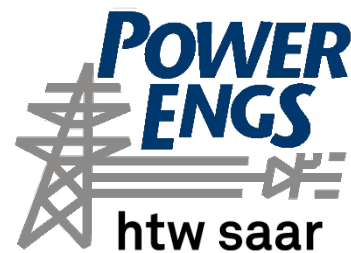
### e-netz Süd Hessen AG

Die e-netz Süd Hessen AG ist sowohl Netzbetreiber und Dienstleister für ihre Kunden als auch Partner der Kommunen. Verankert in Darmstadt, kümmert sich die e-netz als Tochterunternehmen der ENTEGA AG mit rund 600 Mitarbeitern um die sichere Energieversorgung und um die funktionierende Infrastruktur für rund eine Million Menschen in der Region. e-netz stellt jeden Tag sicher, dass ihre Kunden rund um die Uhr mit Strom und Gas versorgt werden. Angesichts des Systemwandels im Rahmen der Energiewende erfordert die sichere Versorgung der Kunden immer mehr Abstimmung mit den großen überregionalen Netzen sowie von Produktion und Verbrauch. Über das eigene Funknetz der e-netz ist die Sprach- und Datenkommunikation immer gesichert – und damit auch die Energieversorgung.



### Institut für Elektrische Energiesysteme der htw saar

Das Institut für Elektrische Energiesysteme ([www.powerengs.de](http://www.powerengs.de)) ist ein Institut der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar) mit den Arbeitsgebieten der Elektrischen Energieversorgung sowie der Leistungselektronik und elektrischen Antriebstechnik. Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten sind Fragestellungen zur Netzintegration dezentraler Erzeugungsanlagen, elektrochemischer Energiespeicher und der Elektromobilität in Stromverteilnetzen der Hoch-, Mittel- und Niederspannung sowie die Entwicklung von geeigneten Konzepten zum Umbau der Stromnetze hinsichtlich der zu erwartenden Anforderungen im Sinne von Smart Grids. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von algorithmischen Software-Modellen von Netzschutzeinrichtungen sowie darauf adaptierte Berechnungsmethoden, die in quasistationären und dynamischen Netzberechnungen zur Beurteilung des Systemverhaltens von Stromnetzen eingesetzt werden können. Darüber hinaus stehen automatisierte Methoden der Netzzustandsanalyse im Fokus der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten.



### Fraunhofer IESE

Das Fraunhofer IESE entwickelt innovative Methoden und Lösungen zur Entwicklung qualitativ hochwertiger, komplexer Informationssysteme und eingebetteter Systeme. Um einen unmittelbaren Mehrwert zu bieten, wendet IESE seine Methoden direkt in der Produktentwicklung seiner Kunden an bzw. transferiert seine Methoden und Lösungen an seine Kunden. Im Forschungsbereich führt IESE Auftragsforschungen für seine Kunden sowie Forschung in öffentlichen Projekten durch. IESE hat seine Kompetenzen auf die Herausforderungen seiner Kunden in den Bereichen Informationssysteme und eingebettete Systeme ausgerichtet und zugeschnitten.



### StoREgio

Der Verein StoREgio Energiespeichersysteme e.V. bietet Unternehmen und akademischen Einrichtungen eine Plattform, um gemeinsam an Aufgaben zur Anwendung von Energiespeichersystemen in Energiesystemen auf Basis erneuerbarer Energien zu arbeiten.





## PROJEKTFILM

Im Rahmen des Projektes MobiGrid wurde ein Kurzfilm erstellt. Dieser ist über die Microsite [www.entega.de/mobigrid](http://www.entega.de/mobigrid) sowie auf YouTube unter <https://youtu.be/-VCBlj9UjAQ> abrufbar.

## WEITERE VERÖFFENTLICHUNGEN

Im Rahmen des Projektes MobiGrid wurden mehrere Veröffentlichungen erstellt. Diese können Sie unter [www.entega.de/mobigrid](http://www.entega.de/mobigrid) einsehen.

Marktgestützte Beschaffung von Flexibilitätsdienstleistungen im Verteilnetz - Vorstellung der Ergebnisse über das Forschungsprojekt „MobiGrid“ im ew Magazin 9/2024

Digitaler Zwilling zur Erzeugung von Flexibilitätsfahrplänen-Bericht im ew Magazin 11/2022 über das Forschungsprojekt „MobiGrid“

Integration der E-Mobilität durch Nutzung dezentraler Flexibilität - Fachartikel im ew Magazin 12/2021 zu Feldversuchen und Praxistauglichkeit

ENTEKA erweitert Netzlabor um Ladeinfrastruktur und Elektromobilität - Bericht in netzpraxis 11-12/2021 über das Forschungsprojekt „MobiGrid“ – Einweihung des Quartierspeichers „Am Umstädter Bruch“ in Groß-Umstadt

## AUFTRAGGEBER

Das Projekt wurde unter dem Förderkennzeichen 03EI4016B im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung „Innovationen für die Energiewende“ nach Art. 25 der Verordnung (EU) Nr. 651/2014 der Europäischen Kommission durchgeführt. Die fachliche Begleitung erfolgte durch den Projektträger Jülich.

## DANKSAGUNG

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Zuwendungen und dem Projektträger Jülich für die freundliche Unterstützung.

## PROJEKTLAUFZEIT

Das Projekt wurde im Zeitraum vom 01.09.2020 bis 30.04.2024 durchgeführt.

## COPYRIGHT

Alle Inhalte dieser Kurzbroschüre zum Abschlussbericht im Projekt MobiGrid, insbesondere Fotografien und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt bei Projekt Konsortium MobiGrid.

## IMPRESSUM

Veröffentlichung: Oktober 2024  
Herausgeber: e-netz Südhessen AG  
Forschung & Entwicklung  
Tel. 06151-701 8030  
[smartgrids@e-netz-suedhessen.de](mailto:smartgrids@e-netz-suedhessen.de)

Diese Broschüre des Forschungsprojektes MobiGrid ist eine Zusammenfassung des ausführlichen Abschlussberichts, der von allen Projektpartnern gemeinsam erstellt wurde.