

## Forschungsberichtsblatt

|                      |  |
|----------------------|--|
| Thema:               | Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur Erbringung von Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen (FELSEN)                    |
| Zuwendungsempfänger: | Universität Stuttgart,<br>Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH),<br>Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) |
| Projektleiter:       | Prof. Dr.-Ing. Krzysztof Rudion  |
| Projektlaufzeit:     | 01.07.2018 bis 31.12.2020  |
| Förderkennzeichen:   | BWSGD 18003  |

### 1. Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts FELSeN wurde untersucht, inwieweit Logistikzentren zukünftig in der Lage sind, auf eine fluktuierende Energieerzeugung reagieren zu können und welche Auswirkungen dies auf die logistischen Prozesse und das Stromnetz hat. Dazu kooperierten das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) und das Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart mit der Firma Häfele, dem Intra-logistik-Netzwerk in Baden-Württemberg sowie dem Netzbetreiber Netze BW.

Die wichtigsten Ergebnisse und sich daraus ableitenden Kernthesen aus FELSeN sind im Folgenden dargestellt. So hat sich gezeigt, dass eine vorausschauende Planung des Netzanschlusses von Logistikzentren unumgänglich ist. Dabei muss nicht nur der Leistungs- und Platzbedarf, sondern auch zukünftig Ladeinfrastruktur für E-PKW und E-LKW berücksichtigt werden. Diese konnte je nach Automationsgrad, Lage und Größe des Logistikzentrums sowie dem Elektromobilitätshochlauf im LKW-Bereich die Maximallast im Projekt bis zu verdreifachen und so die bestehende Last von Logistikzentren und auch ganzen Industriegebieten deutlich erhöhen. Ein Ausbau der installierten PV-Leistung am Logistikzentrum hat sich als vielversprechend erwiesen, den Eigenverbrauch des Logistikzentrums sowie den zusätzlichen Energiebedarf von Elektromobilität zu decken. Die Netzauswirkungen durch Elektromobilität am Logistikzentrum befanden sich im untersuchten Netzgebiet noch innerhalb der zulässigen Grenzen. Ein Hochlauf von Elektromobilität im gesamten Industriegebiet anstelle des einzelnen Logistikzentrums kann hierbei die Effekte jedoch deutlich verstärken.

Die Messkampagne der Verbraucher im Logistikzentrum hat gezeigt, dass das interne Flexibilitätspotential hauptsächlich durch automatisierte Anlagen (Hochregallager), Unstetigförderer (Flurförderfahrzeuge) sowie die Arbeitszeiten geprägt ist. Durch eine Senkung der Gleichzeitigkeit innerhalb der Hochregallager sowie eine Verschiebung der Ladevorgänge der Flurförderfahrzeuge in Zeiträume außerhalb der Arbeitszeiten können Spitzenlasten in diesem Bereich reduziert und dadurch auch Kosteneinsparungen erzielt werden. Die Integration eines Speichers inklusive eines Energiemanagementsystems am Logistikzentrum konnte im betrachteten Fall das Flexibilitätspotential weiter deutlich erhöhen und auch einen netzdienlichen Einsatz der Flexibilität gewährleisten. Auch das Laden von E-PKW der Mitarbeiter hat sich in Kombination mit dem Einsatz eines Lademanagementsystems als steigernd für das Flexibilitätspotential des Logistikzentrums erwiesen. Hierfür sind jedoch wirtschaftliche Rahmenbedingungen zum Angebot von Ladeinfrastruktur aber auch zur Flexibilitätsbereitstellung nötig.

Alles in Allem hat sich gezeigt, dass bei der Betrachtung der Energieversorgung und Elektromobilität rund um den Logistik-Sektor eine enge Zusammenarbeit von Stromnetz und Logistik unumgänglich ist. Nur so kann garantiert werden, dass Flexibilisierungen, die dem Stromnetz zugutekommen, nicht zu ungünstigen Auswirkungen auf die logistischen Prozesse führen oder umgekehrt. Die Bedeutung alternativer Antriebe wird im Wirtschaftsverkehr besonders im leichten und mittelschweren Segment weiter zunehmen. Die Erzeugung des Ladestroms aus Erneuerbaren Energien sowie die Analyse und Minimierung der Netzauswirkungen sind relevante Themen auch für die zukünftige weiterführende Forschung.

## 2. Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

Im Rahmen des Forschungsprojekts FELSeN konnte das Flexibilitätspotential von Logistikzentren aus Stromnetz- und Logistiksicht ermittelt werden. Mithilfe einer umfangreichen Messkampagne wurde zunächst das Verhalten der Prozesse in einem Logistikzentrum umfangreich ermittelt und charakterisiert. Dadurch konnten nicht nur neue Erkenntnisse zum Last- und Energieverbrauchsreduktionspotential gewonnen werden, sondern auch der Mehrwert einer PV-Anlage für ein Logistikzentrum praktisch untersucht werden. Darauf aufbauend wurde im nächsten Schritt eine neuartige elektrisch-logistische Simulations- und Planungsumgebung entwickelt, welche es erlaubt, das Logistikzentrum sowie das umliegende Mittelspannungsnetz zu modellieren und die Auswirkungen von Flexibilisierungen und neuen Komponenten auf Stromnetz und logistische Prozesse zu untersuchen. Die einzigartige enge Kopplung von Logistik und Stromnetz im Projekt ermöglichte dabei die Generation besonders realitätsnaher Ergebnisse. Die entwickelte Umgebung kann auch für andere Logistikzentren und Industrieunternehmen genutzt werden.

Um die Auswirkungen von Elektromobilität am Logistikzentrum betrachten zu können, wurden komplexe Modelle basierend auf Basis realer E-Fahrzeugparameter sowie Mobilitätsdaten konventioneller Fahrzeuge zur Nachbildung realitätsnaher Ladeprofile elektrischer LKW und PKW entwickelt und erprobt. Diese erlauben nicht nur eine Bewertung der Auswirkungen von Ladevorgängen auf den Netzanschlusspunkt eines Logistikzentrums, sondern auch eine Analyse der Belegung von Laderampen und somit deren Einfluss auf die logistischen Prozesse. Das im Projekt entwickelte Verfahren zur Berechnung des Ladebedarfs elektrischer LKW und der Belegung der Ladepunkte bzw. Laderampen ist eine große Neuerung im bestehenden Forschungsumfeld. Es ermöglicht auch in Zukunft eine Analyse der Realisierbarkeit eines elektrischen Lieferverkehrs aus Stromnetz- und Logistik-Perspektive. Um zusätzlich das Potential einer erhöhten PV-Erzeugung sowie eines Energiespeichers am Logistikzentrum untersuchen zu können, wurden diese zusammen mit einem Energiemanagementsystem ebenfalls in die Simulationsumgebung integriert. Dadurch konnte deren Mehrwert für das Flexibilitätspotential des Logistikzentrums ermittelt werden und mittels zeitreihenbasierter probabilistischer Netzsimulationen auch deren direkter Einfluss auf das Stromnetz.

## 3. Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Die im Rahmen des Forschungsprojekts FELSeN erzielten Erkenntnisse betreffen alle Akteure rund um das Logistikzentrum und können damit vielseitig weiter praktisch verwendet werden.

Für Logistikbetreiber und Gebäudeentwickler bieten die Ergebnisse der Messkampagne und die Empfehlungen hinsichtlich Lastflexibilisierungen bei Flurförderfahrzeugen und Hochregallagern einen Überblick über charakteristische Verbraucher im Logistikzentrum und damit einen

Anknüpfungspunkt für eigene Messungen zur Energieverbrauchs-, Last- und Kostenreduktion. Das Verfahren zur Ermittlung des Ladebedarfs für elektrische PKW und LKW kann Logistikzentren dabei unterstützen, ihre Ladeinfrastruktur bedarfsgerecht zu dimensionieren und zukünftige Bedürfnisse an den Netzanschluss fundiert abzuschätzen. Die entwickelte elektrisch-logistische Simulations- und Planungsumgebung erlaubt darüber hinaus die Bestimmung der Auswirkungen von Elektromobilität auf logistische Prozesse sowie das Stromnetz und die Untersuchung der Effekte eines Speichers, einer PV-Anlage und eines Energie- oder Lademanagementsystems am Logistikzentrum. Erste Anhaltspunkte über deren Mehrwert liefern dabei die Ergebnisse des bereits im Projekt untersuchten Beispiellogistikzentrums.

Auch die Netzbetreiber können die Projektergebnisse zur Weiterentwicklung ihrer Netzplanungsgrundsätze nutzen. So ermöglichen die im Projekt entwickelten Modelle besonders zur Bestimmung des Ladebedarfs elektrischer LKW nicht nur die Ermittlung von deren Auswirkungen auf den Netzanschlusspunkt von Industrieunternehmen. Auch die durchgeführten probabilistischen Netzsimulationen liefern Erkenntnisse zur den Netzauswirkungen von Elektromobilität in einem industriellen Netzgebiet, welche auf andere Anwendungsfälle und Netzgebiete übertragbar sind. Die Ermittlung des Flexibilitätspotentials der logistischen Prozesse sowie zusätzlicher Komponenten wie Speicher, Energiemanagementsystem und PV-Anlagen bietet Netzbetreibern Anhaltspunkte zur Entscheidung über Alternativmaßnahmen zum Netzausbau.

#### 4. Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die Entwicklungen und Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt FELSeN wurden in zahlreichen Publikationen und Vorträgen einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Zur Validierung der Annahmen und Publikation der Zwischenergebnisse wurde ein Workshop durchgeführt. Zudem wurde im Rahmen des Projekts ein Leitfaden für alle beteiligten Akteure rund um das Logistikzentrum, wie Netz- und Logistikbetreiber, Spediteure und Politik, verfasst. Dieser gibt konkrete Handlungsempfehlungen für die Gestaltung einer flexiblen Energieversorgung an Logistikzentren unter Berücksichtigung von Elektromobilität und Erneuerbaren Energien und ermöglicht so nicht nur den Einbezug der Erkenntnisse in die Stromnetzplanung, sondern auch in die Infrastrukturplanung der Logistikbetreiber.

Auf Grundlage der Forschungsergebnisse wird darüber hinaus eine Doktorarbeit am IEH und IFT der Universität Stuttgart durchgeführt. Auch wurden basierend auf Fragestellungen des Projekts einige studentische Arbeiten abgeschlossen. Ergebnisse aus dem Projekt FELSeN werden auch weiterhin in zukünftige Forschungsprojekte sowie Forschung und Lehre mit einfließen.

Folgende Beiträge wurden im Rahmen des Forschungsprojekts veröffentlicht:

- 2018: Beitrag und Vortrag „Logistikwerkstatt“ in Graz; Projektvorstellung  
D. Pfleger, “Auswirkungen der Elektromobilität auf den Betrieb von Logistikzentren,” in *Energiebedarf und Effizienz in der Intralogistik*, C. Landschützer and M. Schedler, Eds. 2018, pp. 1--16.
- 2019: Vortrag auf Messe LogiMAT in Stuttgart; Projektvorstellung
- 2019: Durchführung einer Umfrage mithilfe eines Fragebogens zum Thema Elektromobilität

- 2019: Workshop in Stuttgart: Vorstellung erster Ergebnisse / Diskussion zu Elektromobilität
- 2019: Beitrag in Fachzeitschrift „Logistik Heute“; Thema: Umfrage zu Rampen  
D. Pflieger and K. Walz, “E-Mobilität flexibel: Elektromobilität wird in der Logistik zunehmend wichtiger. Ein Forschungsprojekt untersucht, welche Rolle Logistikzentren für die Ladeinfrastruktur und die Netzstabilität spielen können.,” *LOGISTIK HEUTE Logistik-Immobilien und Standorte*, vol. Sonderheft 2019, pp. 26–27, 2019.
- 2020: Interview mit BME; Thema: Elektromobilität  
„Damit Stromladen zur Logistik passt“ in *Best in Procurement*, Ausgabe 3, Eschborn, 2020, pp. 44-45
- 2020: Beitrag bei CIRED Workshop; Vorstellung der neuen E-LKW-Modellierung  
K. Walz, D. Contreras and K. Rudion, "Synthetic Charging Profiles Development of Battery-Electric Trucks for Probabilistic Grid Planning," in *CIRED 2020 Berlin Workshop*, Berlin, 2020.
- 2020: Beitrag bei der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik; Ergebnisvorstellung  
D. Pflieger, K. Walz, R. Schulz, K. Rudion, J. Maurer und C.-M. Moraw, „Ermittlung des logistischen und energetischen Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums unter Berücksichtigung von Elektromobilität,“ in *Tagungsband zum 16. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V.*, Hamburg, Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V., 2020, pp. 219-228.
- 2020: Vortrag bei einer Veranstaltung des Intralogistik-Netzwerks BW; Ergebnisvorstellung
- 2021: Abschlussbericht und Leitfaden