

Forschungsbericht BWPLUS

**Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur
Erbringung von Systemdienstleistungen in elektrischen
Netzen (FELSEN)**

von

Kathrin Walz, David Pflieger, Krzysztof Rudion, Robert Schulz

Universität Stuttgart
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
Institut für Fördertechnik und Logistik

Förderkennzeichen: BWSGD 18003

Laufzeit: 01.07.2018 – 31.12.2020

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

März 2021

Ansprechpartner

| Unternehmen/Institution | Ansprechpartner |
|--|--|
| <p>Universität Stuttgart Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik</p> <p>Pfaffenwaldring 47 70569 Stuttgart Deutschland</p> | <p>Prof. Dr.-Ing Krzysztof Rudion Email: rudion@ieh.uni-stuttgart.de</p> <p>Kathrin Walz Email: kathrin.walz@ieh.uni-stuttgart.de</p> |
| <p>Universität Stuttgart Institut für Fördertechnik und Logistik</p> <p>Holzgartenstraße 15 B 70174 Stuttgart Deutschland</p> | <p>Prof. Dr.-Ing Robert Schulz Email: robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de</p> <p>David Pflieger Email: david.pflieger@ift.uni-stuttgart.de</p> |
| <p>Häfele SE & Co KG</p> <p>Adolf-Häfele-Str. 1 72202 Nagold Deutschland</p> | <p>Joachim Maurer Email: info@haefele.de</p> |
| <p>Netze BW GmbH</p> <p>Schelmenwasenstraße 15 70567 Stuttgart Deutschland</p> | <p>Cristina-Maria Moraw Email: c.moraw@netze-bw.de</p> |
| <p>Intralogistik-Netzwerk in Baden-Württemberg e.V. (I.N.)</p> <p>Sombartstraße 33 70565 Stuttgart Deutschland</p> | <p>Kristin Wedekind Email: info@intralogistik-bw.de</p> |

Kurzfassung

Die deutsche Bundesregierung hat sich bereits 2016 im Klimaschutzplan zum Ziel gesetzt, 2050 eine weitgehende Treibhausgasneutralität zu erreichen. Auch im Klimaschutzgesetz des Landes Baden-Württemberg werden Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen adressiert. Regenerative Energiequellen und Elektromobilität können dazu beitragen, diese Ziele zu erreichen. Das Forschungsprojekt FELSeN untersucht daher die flexible netzdienliche Integration von Logistikzentren unter Berücksichtigung regenerativer Energiequellen und Ladeinfrastruktur für Elektromobilität. Das Projektkonsortium zeigt, inwiefern Logistikzentren dazu geeignet sind, durch eine situative Anpassung der logistischen Prozesse auf Schwankungen der Energieerzeugung (Photovoltaikanlage) oder zusätzliche Verbraucher (Elektromobilität) reagieren zu können. Darüber hinaus wird der Einfluss dieser Anpassungen auf das Energienetz betrachtet. Mithilfe einer gekoppelten elektrischen und logistischen Simulation wird das Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums evaluiert. Dabei hat sich gezeigt, dass das interne Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums vor allem durch automatisierte Anlagen (Hochregallager) und Unstetigförderer geprägt ist. Darüber hinaus wurde die zukünftige Entwicklung der Elektromobilität (PKW und LKW) mit deren Auswirkungen auf das elektrische Energienetz und das Logistikzentrum untersucht. Sie führt zur deutlichen Erhöhung der elektrischen Last, worauf sich der Netzbetreiber vorbereiten muss. Energiespeicher sowie Energiemanagementsysteme erhöhen das Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums und können netzdienlich eingesetzt werden. Zusammenfassend gilt für alle Beteiligten (Logistikzentrum, Spedition, Netzbetreiber und Kommune), dass eine vorausschauende Planung des Netzanschlusses von Logistikzentren unumgänglich ist.

Handlungsempfehlungen des Projekts

Zur Gestaltung einer flexiblen Energieversorgung unter Berücksichtigung erneuerbaren Energien und Elektromobilität wurden mithilfe der Ergebnisse des Projekts FELSeN Handlungsempfehlungen definiert. Dies betrifft nicht nur den Betreiber eines Logistikzentrums. Folgende Akteure werden adressiert:

- Betreiber eines Logistikzentrums bzw. Gebäudeentwickler,
- Spediteure,
- Netzbetreiber und
- die Kommunal-/Landes-/Bundespolitik

Aufgrund der schweren Prognostizierbarkeit der Entwicklung im Bereich Elektromobilität besonders im LKW-Segment werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet. Das Konservative Szenario betrachtet einen Hochlauf von E-PKW sowie leichten und mittelschwere E-LKW. Aufgrund der niedrigen Batteriekapazitäten und der daraus resultierenden durchschnittlichen Reichweite von 200 km wird der Einsatz schwerer E-LKW zunächst ausgeschlossen. Im Pro-Elektromobilitäts-Szenario wird der Hochlauf von allen E-PKW und E-LKW betrachtet.

| Adressat | Betreiber Logistikzentrum / Gebäudeentwickler  | |
|--|--|--------------------------------|
| Szenario | Konservatives Szenario | Pro-Elektromobilitäts-Szenario |
|  Planung Netzan-schluss | Eine vorausschauende Planung des Netzan-schlusses von Logistikzentren ist notwendig (Leistungs-/ Platzbedarf) → Elektromobilität als zukünftiger Verbraucher. Bereits heute sollte daher eine Identifizierung möglicher Elektrifizierungspotentiale erfolgen. | |
|  Klassische Verbraucher | <p>Automatisierte Anlagen (z. B. Hochregallager) mit Regalbediengeräten sind oft die größten Verbraucher im Logistikzentrum und verursachen hohe, kurze Lastspitzen. Eine Verringerung kann durch Reduktion der Gleichzeitigkeit, weniger steiles Anfahren, Änderung der Lagerlogik, Powercaps, etc. erreicht werden. Bei Neuanschaffung oder Modernisierung sollte die Wirtschaftlichkeit von Energieflexibilitätsmaßnahmen mittels einer Kosten-Nutzen-Analyse überprüft werden.</p> <p>Flexible Lasten sind Ladevorgänge von Flurförderfahrzeugen, diese sollten in Off-Peak-Zeiten (abhängig vom Arbeitszeitmodell) verschoben werden (manuell oder durch Ladekonzept).</p> <p>Arbeitszeitmodelle beeinflussen den Lastgang und können diesen optimieren. Eine Identifikation außerhalb der Arbeitszeiten laufender Verbraucher kann Energiekosten reduzieren.</p> | |
|  Elektromobilität als neuer Verbraucher | <p>Aufgrund der regionalen Lage des betrachteten Versandzentrums und der typischen Pendlerstrecken unter 20 km ist das Heimladen für elektrische Mitarbeiterfahrzeuge ausreichend. Eine Mindest-Ladeinfrastruktur für Mitarbeiter und Gäste beim Arbeitgeber wäre dennoch empfehlenswert.</p> <p>Der Hochlauf von Mitarbeiterladen erhöht die Last eines Logistikzentrums deutlich. Die Notwendigkeit und Auslegung der Ladeinfrastruktur ist von der Wohnsituation der Mitarbeiter, der regionalen Lage und dem Automatisierungsgrad des Logistikzentrums abhängig. Im betrachteten Versandzentrum ist eine Verdopplung der Last denkbar. Lademanagement bietet hier ein großes Lastreduktionspotential.</p> | |

| Adressat | Betreiber Logistikzentrum / Gebäudeentwickler  | |
|--|--|---|
| Szenario | Konservatives Szenario | Pro-Elektromobilitäts-Szenario |
|  <p>Elektromobilität als neuer Verbraucher</p> | <p>Aus heutiger Perspektive werden Logistikzentren in Zukunft voraussichtlich kein Ladedienstleister für E-LKW. Eine Not-Ladeinfrastruktur wäre eine Empfehlung. Voraussichtlich laden leichte und mittelschwere E-LKW mit Tagesfahrleistungen unter 200 km am eigenen Spediteurstandort oder im umliegenden Industriegebiet. Batterieladevorgänge schwerer E-LKW mit größeren Fahrleistungen führen zu Prozessverzögerungen und werden vermutlich vorerst weiter mit Verbrennungsmotor betrieben.</p> | <p>Logistikzentren werden aufgrund erhöhter Anzahl an E-LKW (alle Gewichtsklassen und Tagesfahrleistungen über 200 km) in Zukunft Ladeinfrastruktur anbieten müssen. Hohe Ladeleistungen (ab 150 kW) verkürzen die Ladezeiten und verringern Prozessverzögerungen deutlich. Die Ladeinfrastruktur ist kostenintensiv. Enge Platzverhältnisse an den Rampen müssen bei der Installation berücksichtigt werden. Geschäftsmodelle zum Angebot einer Ladeinfrastruktur-Vermarktung bringen neue Chancen. Regulatorische Rahmenbedingung müssen vorab geregelt werden.</p> |
|  <p>Regenerative Erzeuger</p> | <p>Regenerative Energien (z.B. PV-Anlagen) ermöglichen die Glättung des eigenen Lastgangs sowie eine Reduktion der aus dem Netz bezogenen Energie durch Eigenverbrauch. Im Zuge von Neubauten und Modernisierungen sollte dies besonders in den Fokus rücken.</p> | |
|  <p>Flexibilitätspotential</p> | <p>Eine Glättung und Senkung der Spitzenlast führt zu Kosteneinsparungen → kleinere Transformatorstation, geringere Netzentgelte, geringerer Baukostenzuschuss beim Ausbau.</p> <p>Abgesehen von Hochregallagern und Flurförderfahrzeugen konnten im untersuchten Versandzentrum keine weiteren Flexibilitäten identifiziert werden, ohne den Durchsatz zu beeinträchtigen.</p> <p>Ein Energiemanagement ermöglicht kombiniert mit einem Speicher und Ladeinfrastruktur eine Reduktion der Maximallast, ohne logistische Prozesse verschieben zu müssen. Außerdem kann der Eigenverbrauch aus einer PV-Anlage erhöht werden.</p> | <p>Der Hochlauf an elektrischen Mitarbeiterfahrzeugen bietet neues Flexibilitätspotential durch Lademanagement zusätzlich zum Flexibilitätspotential der konventionellen Verbraucher.</p> |

| Adressat | Spediteure  | |
|--|---|--|
| Szenario | Konservatives Szenario | Pro-Elektromobilitäts-Szenario |
|  Elektromobilität als neuer Verbraucher | <p>Elektromobilität von Nutzfahrzeugen kann besonders im Nahverkehr neuer Energieverbraucher an Spediteurstandorten werden. Die neue Last muss rechtzeitig in der Planung des Netzanschlusses vorgesehen werden. Bereits heute sollte daher eine Identifizierung möglicher Elektrifizierungspotentiale erfolgen. Die Entwicklung ist abhängig von politischen Vorgaben und der Wirtschaftlichkeit elektrischer Antriebskonzepte.</p> | |
|  Portfolio E-LKW | <p>Derzeit verfügbare E-LKW-Modelle sind großteils für Entfernungen bis 200 km einsetzbar. Dann ist kein Zwischenladen erforderlich und das Laden kann beispielsweise in der Nacht am Spediteurstandort erfolgen. Bei längeren Strecken kann Laden während der Zustelltour notwendig sein und zu Prozessverzögerungen führen (v.a. bei Ladeleistungen bis 50 kW).</p> | <p>E-LKW (aller Gewichtsklassen) können auf Strecken über 200 km betrieben werden, wenn der Ladevorgang/-ort in der Routenplanung berücksichtigt wird. Für Strecken unter 200 km ist dies ohne Zwischenladung heute schon realisierbar.</p> |
|  Ladeinfrastruktur | <p>Ladeinfrastruktur ist kostenintensiv (Kosten-Nutzen-Analyse vorab nötig). Enge Platzverhältnisse an den Rampen erschweren die Installation von Ladeinfrastruktur.</p> <p>Im Falle einer Notwendigkeit von Zwischenladen können höhere Ladeleistungen Prozessverzögerungen reduzieren. Ladeleistungen von 350 kW sind bereits verfügbar, höhere Ladeleistungen im MW-Bereich sind Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Beim Nachladen sind abhängig von der Standzeit auch niedrigere Ladeleistungen möglich.</p> | |

| Adressat | Netzbetreiber  | |
|--|---|---|
| Szenario | Konservatives Szenario | Pro-Elektromobilitäts-Szenario |
|  Planung Netzan-schluss | <p>Bei Netzanschlussbegehren von Industrieunternehmen sollten diese standardmäßig nach zukünftigen Planungen zur Elektromobilität befragt werden, um diese rechtzeitig einzuplanen.</p> <p>Logistikzentren besitzen durch die geregelten Produktionsprozesse einen eher glatten Lastgang während der Arbeitszeiten.</p> <p>In der 15 min-Lastgangmessung des Netzbetreibers werden kurze, hohe Spitzen, wie durch die Hochregallager, nur durch den maximalen Ausschlag des Schleppzeigers gesehen.</p> | |
|  Elektromobilität als neuer Verbraucher | <p>Mit dem Hochlauf der Elektromobilität wird an Logistikzentren zumindest eine Notladeinfrastruktur für Mitarbeiter und LKW empfohlen, auch wenn zunächst ein „Heimladen“ erwartet werden kann. Die großzügige Dimensionierung von Industrienetzen führt nur zu geringen Netzauswirkungen in diesem Falle.</p> | <p>Elektromobilität kann die Last von Logistikzentren in Zukunft erhöhen. Je nach Automationsquote eines Logistikzentrums, dem Angebot an Mitarbeiterladeinfrastruktur und Hochlauf der Elektromobilität im LKW-Bereich variiert dies. Im betrachteten Versandzentrum ist eine Verdreifachung der Last denkbar. Die Betrachtung der Entwicklung des gesamten Industriegebiets ist hier für die Netzauswirkungen relevant.</p> |
|  Regenerative Erzeuger | <p>Eine verstärkte Nutzung von PV-Anlagen in Industriegebieten kann die bestehende Maximallast und Last durch Elektromobilität sinnvoll verringern. Dabei muss die Situation im Winter (geringe Erzeugung) und am Wochenende (Rückspeisung) mit betrachtet werden.</p> | |
|  Flexibilitäts-potential | <p>Eine Steuerung von Lasten innerhalb des Logistikzentrums ist aufgrund von Produktivitätseinbußen nur begrenzt möglich.</p> | <p>Die Kombination von PV-Anlagen, Speichern und Elektromobilität kann das Flexibilitätspotential von Logistikzentren und ganzen Industriegebieten deutlich steigern und auch netzdienlich eingesetzt werden.</p> |

| Adressat | Kommunal-/Landes-/Bundespolitik  | |
|---|---|--------------------------------|
| Szenario | Konservatives Szenario | Pro-Elektromobilitäts-Szenario |
|  Strategie | <p>Die Erstellung eines Fahrplans für Elektromobilität von Nutzfahrzeugen ist für die Planungssicherheit aller Unternehmen maßgeblich (Öffentliche Ladeinfrastruktur in Industriegebieten, Einfahrverbote, E-Fahrzeug-Förderung).</p> <p>Kommunen sollten frühzeitig analysieren, in welche Richtung der Elektromobilitätshochlauf bei ihnen tendiert. Ein frühzeitiger Dialog mit dem Netzbetreiber ist wichtig, um Auswirkungen auf die Netzauslastung gemeinsam zu evaluieren.</p> | |
|  Förderung | <p>Um Baden-Württemberg/Deutschland als wichtigen Wirtschaftsstandort zu erhalten, muss das Stromnetz rechtzeitig auf den Hochlauf von Elektromobilität auch in Industriegebieten vorbereitet werden. Eine Forschungs- und Infrastrukturförderung (Ladeinfrastruktur, Modernisierung) in diesem Bereich ist notwendig.</p> <p>Der Ausbau regenerativer Energieträger im Industriesektor hilft, die Netzauswirkungen von Elektromobilität zu reduzieren und das Flexibilitätspotential von Logistikzentren zu erhöhen. Dieser sollte daher fokussiert werden.</p> | |
|  Standards | <p>Angaben zu E-Fahrzeugparametern im Nutzfahrzeugbereich sind oft uneinheitlich (Verbrauch/Beladung). Eine Vereinheitlichung, z.B. hinsichtlich der Beladung bei der Verbrauchsermittlung, wäre hilfreich.</p> | |
|  Rechtliche Grundlagen | <p>Durch den Hochlauf der Elektromobilität können Logistikzentren zum Anbieter von Ladedienstleistungen („Energielieferanten“) für Speditionen werden. Hierfür müssten rechtliche Grundlagen geschaffen und vereinfacht werden.</p> | |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2-1: Materialfluss in einem Logistikzentrum | 5 |
| Abbildung 2-2: Prozesse des Wareneingangs | 5 |
| Abbildung 2-3: Lagertypen | 6 |
| Abbildung 2-4: Prozesse des Warenausgangs | 8 |
| Abbildung 2-5: Fördermittel | 9 |
| Abbildung 2-6: Einordnung der Rampe als Bauwerk und Schnittstelle beim Umschlag von Waren | 9 |
| Abbildung 2-7: Strukturkomponenten für den Warenumschlag über Rampen | 10 |
| Abbildung 2-8: Anordnungen von Rampen | 11 |
| Abbildung 2-9: Aufbau eines Logistikzentrums und dessen Verbraucher | 12 |
| Abbildung 2-10: Übersicht der Netzebenen | 12 |
| Abbildung 2-11: Unterschiedliche Antriebskonzepte | 14 |
| Abbildung 2-12: Anzahl der BEV LKW in Deutschland | 15 |
| Abbildung 2-13: LKW Ladeverfahren | 16 |
| Abbildung 3-1: Layout des Beispiellogistikzentrums | 19 |
| Abbildung 3-2: Anteil der Lagerentnahmen | 20 |
| Abbildung 3-3: Elektrischer Aufbau eines exemplarischen Logistikzentrums | 22 |
| Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des aufgebauten Messkoffers | 24 |
| Abbildung 3-5: Wirkleistung eines Logistikzentrums in p.u. – gemessene Viertelstunden-Mittelwerte | 24 |
| Abbildung 3-6: Hochregallager mit 18 RBG - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Wirkleistung | 25 |
| Abbildung 3-7: Hochregallager mit 18 RBG - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Blindleistung | 25 |
| Abbildung 3-8: Sekunden-Messwerte und Viertelstunden-Mittelwerte eines HRL | 26 |
| Abbildung 3-9: Leistung verschiedener Bewegungstypen eines Regalbediengeräts | 26 |
| Abbildung 3-10: Einphasige Ladeleistung eines Flurförderfahrzeugs – gemessene Minutenwerte | 27 |
| Abbildung 3-11: Förderbandanlagen - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Wirkleistung | 28 |
| Abbildung 3-12: Förderbandanlagen - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Blindleistung | 28 |
| Abbildung 3-13: Heizungsverteiler - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Wirkleistung | 29 |
| Abbildung 3-14: Heizungsverteiler - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Blindleistung | 29 |
| Abbildung 3-15: Erzeugung der PV-Anlage - gemessene Viertelstundenwerte | 30 |
| Abbildung 3-16: Erzeugte Leistung der Photovoltaikanlage in p.u. im Jahr | 30 |
| Abbildung 3-17: Wirkleistung des Logistikzentrums mit und ohne PV | 31 |
| Abbildung 3-18: Durchschnittliche Anzahl an Fahrten (Prozesse) je Viertelstunde eines Tags | 31 |
| Abbildung 3-19: Häufigkeit der Logistikzentrum-Gesamtlast innerhalb eines Jahres ohne und mit PV-Leistung | 33 |
| Abbildung 3-20: Häufigkeit der Logistikzentrum-Gesamtlast innerhalb eines Jahres ohne und mit doppelter PV-Leistung | 33 |
| Abbildung 3-21: Häufigkeit der Logistikzentrum-Gesamtlast innerhalb eines Jahres ohne und mit fünffacher PV-Leistung | 34 |
| Abbildung 4-1: Exemplarisches reales Mittelspannungsnetzmodell | 35 |
| Abbildung 4-2: Ablaufdiagramm einer Simulationsstudie | 37 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 4-3: Logistisches Modell des Beispiellogistikzentrums in 3D-Ansicht | 37 |
| Abbildung 4-4: Kopplung und Schnittstellen zwischen elektrischem und logistischem Modell | 38 |
| Abbildung 4-5: Übersicht der beteiligten Komponenten im Energiemanagementsystem | 39 |
| Abbildung 4-6: Einfluss des Speichers auf die Lastkurve des Logistikzentrums..... | 40 |
| Abbildung 5-1: Ablauf der PKW-Ladeprofilgeneration..... | 42 |
| Abbildung 5-2: Untersuchtes Arbeitszeitmodell 1..... | 43 |
| Abbildung 5-3: Untersuchtes Arbeitszeitmodell 2..... | 43 |
| Abbildung 5-4: Mittlere (hellblau), maximale (dunkelblau), minimale (grau) Wirkleistung des Mitarbeiterladens werktags in kW nach Konzept 1 für Arbeitszeitmodell 1 (links) und Arbeitszeitmodell 2 (rechts)..... | 44 |
| Abbildung 5-5: Wirkleistungsbedarf des Mitarbeiterladens werktags in kW mit Lademanagement für Arbeitszeitmodell 1 (links) und Arbeitszeitmodell 2 (rechts)..... | 44 |
| Abbildung 5-6: Konzepte zur Integration der Ladeinfrastruktur..... | 45 |
| Abbildung 5-7: Typischer Aufbau einer Ladesäule mit Steckverbindung | 47 |
| Abbildung 5-8: Untersuchung der Platzverhältnisse an der Rampe (zwischen den LKW)..... | 48 |
| Abbildung 5-9: Aufstellmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur | 48 |
| Abbildung 5-10: Modellierung der Ladeprofile elektrischer LKW aus Marktanalyse und Mobilitätsverhalten | 50 |
| Abbildung 5-11: Batteriekapazität und Reichweite der recherchierten batterieelektrischen LKW-Modelle in Abhängigkeit der Größenklasse..... | 51 |
| Abbildung 5-12: Modellierung der Ladeprofile für elektrische LKW unter Berücksichtigung der Rahmendaten des Logistikzentrums | 52 |
| Abbildung 5-13: Mittlere und maximale Wirkleistung des LKW-Ladens bei verschiedenen Ladeleistungen mit und ohne Begrenzung der Ladedauer | 53 |
| Abbildung 5-14: Jahreslastgang aller LKW-Ladevorgänge am Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von 100 % und einer Ladeleistung von 150 kW | 54 |
| Abbildung 5-15: Jahreslastgang aller LKW-Ladevorgänge an einem „großen“ Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von 100 % und einer Ladeleistung von 150 kW..... | 54 |
| Abbildung 5-16: Ablauf der Simulation unter Berücksichtigung der Stand-/Ladezeiten | 55 |
| Abbildung 5-17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien 1a-1d des großen Logistikzentrums | 56 |
| Abbildung 5-18: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien 2-4b des großen Logistikzentrums | 57 |
| Abbildung 6-1: Tageslastkurve eines Hochregallagers der Simulationsexperimente..... | 60 |
| Abbildung 6-2: Jahreslastgang des Logistikzentrums bei Einsatz eines Speichers zur PV-Eigenverbrauchsoptimierung..... | 62 |
| Abbildung 6-3: Jahreslastgang des Logistikzentrums bei Dimensionierung des Speichers zur Lastglättung..... | 62 |
| Abbildung 6-4: Residuallast des Logistikzentrums mit PV-Anlage bei maximaler PV-Erzeugung an einem Tag maximaler Last..... | 63 |
| Abbildung 6-5: Residuallast des Logistikzentrums mit PV-Anlage bei Verdopplung der PV-Erzeugung an einem Tag maximaler Last..... | 64 |
| Abbildung 6-6: Jahres-Residuallast des Logistikzentrums mit PV-Anlage bei Verdopplung der PV-Erzeugung..... | 64 |
| Abbildung 6-7: Jahres-Residuallast des Logistikzentrums mit und ohne Mitarbeiterladen im Vergleich | 64 |
| Abbildung 6-8: Auswirkungen eines Lademanagementsystems zur maximalen Lastreduktion am Logistikzentrum | 65 |
| Abbildung 6-9: Auswirkungen eines Lademanagementsystems zur Einhaltung der Anschlussleistung am Logistikzentrum | 65 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 6-10: Jahres-Residuallast des Logistikzentrums mit und ohne Mitarbeiter- und LKW-Laden im Vergleich..... | 66 |
| Abbildung 6-11: Auswirkungen eines PKW-Lademanagementsystems zur Einhaltung der Anschlussleistung am Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von PKW und LKW | 67 |
| Abbildung 6-12: Auswirkungen eines PKW-Lademanagementsystems zur Einhaltung der Anschlussleistung am Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von PKW und LKW bei einem erhöhten LKW-Aufkommen | 68 |
| Abbildung 6-13: Potential von Lademanagement und Energiespeicher zur Reduktion der Maximalleistung und Erhöhung des Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums der Zukunft | 69 |
| Abbildung 6-14: Probabilistische Analyse der täglichen Auslastung des Umspannwerk-Transformators über ein Jahr | 70 |
| Abbildung 6-15: Auswirkungen der betrachteten Szenarien auf die Auslastung der Netzbetriebsmittel..... | 71 |
| Abbildung 6-16: Auswirkungen der betrachteten Szenarien auf die Spannungshaltung im Netz | 72 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 3-1: Symbole der neuen Methode | 18 |
| Tabelle 3-2: Dauer und Anzahl gleichzeitig auftretender Fahrten und Lastspitzen des HRL in einer Woche | 32 |
| Tabelle 4-1: Kenndaten des modellierten Batteriespeichers | 40 |
| Tabelle 5-1: Elektrifizierungsszenarien | 49 |
| Tabelle 5-2: Ergebnisse des Szenario 1a | 58 |
| Tabelle 5-3: Ergebnisse des Szenario 4a | 58 |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Ansprechpartner..... | II |
| Kurzfassung | III |
| Handlungsempfehlungen des Projekts..... | IV |
| Abbildungsverzeichnis..... | IX |
| Tabellenverzeichnis..... | XII |
| 1 Inhaltliche und organisatorische Rahmenbedingungen | 1 |
| 1.1 Einleitung und Motivation | 1 |
| 1.2 Bedeutung des Vorhabens für das Land Baden-Württemberg und Relevanz im Themenbereich Smart Grids..... | 1 |
| 1.3 Zielsetzung des Projekts | 2 |
| 1.4 Struktur des Berichts | 3 |
| 2 Stand der Technik..... | 4 |
| 2.1 Logistikzentrum | 4 |
| 2.1.1 Wareneingang..... | 5 |
| 2.1.2 Lagerbereiche/-technik..... | 6 |
| 2.1.3 Kommissionieren..... | 7 |
| 2.1.4 Verpackung | 7 |
| 2.1.5 Warenausgang..... | 8 |
| 2.1.6 Transportsysteme | 8 |
| 2.1.7 Die Laderampe als Schnittstelle zwischen inner- und außerbetrieblichem Transport..... | 9 |
| 2.1.8 Aufbau eines Logistikzentrums | 11 |
| 2.2 Das elektrische Energienetz..... | 12 |
| 2.2.1 Anschluss von Industriekunden und Elektromobilität im Stromnetz..... | 12 |
| 2.2.2 Herausforderungen im Stromnetz durch neue Erzeuger und Verbraucher..... | 13 |
| 2.2.3 Flexibilität in elektrischen Energiesystemen | 13 |
| 2.3 Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr | 14 |
| 2.3.1 Antriebsarten elektrischer LKW..... | 14 |
| 2.3.2 Analyse des Fahrzeugmarktes..... | 15 |
| 2.3.3 Ladeinfrastruktur für batterie-elektrische LKW | 15 |
| 3 Charakterisierung des Verbrauchsprofils der Prozesse in einem Logistikzentrum | 17 |
| 3.1 Erfassung der logistischen Prozesse in einem exemplarischen Logistikzentrum | 17 |
| 3.1.1 Logistischer Aufbau des Logistikzentrums..... | 19 |
| 3.1.2 Verbrauchsintensive Anlagen bzw. Prozesse | 20 |
| 3.2 Bestimmung des elektrischen Verbrauchs der identifizierten Prozesse..... | 21 |
| 3.2.1 Elektrischer Aufbau eines Logistikzentrums | 21 |
| 3.2.2 Vorstellung der verwendeten Methoden zur Ermittlung von Energieverbrauch und Lastgang | 22 |
| 3.2.3 Aufbau des verwendeten Messsystems..... | 23 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.4 | Lastgang eines Logistikzentrums | 24 |
| 3.2.5 | Einzellastgänge der wichtigsten logistischen Prozesse | 25 |
| 3.2.6 | PV-Erzeugung | 29 |
| 3.3 | Resultierende Gleichzeitigkeit aus den Lastgängen..... | 31 |
| 3.3.1 | Betrachtung der Hochregallager | 31 |
| 3.3.2 | Betrachtung des gesamten Logistikzentrums | 32 |
| 4 | Entwicklung einer gekoppelten simulationsbasierten Demonstrationsumgebung | 35 |
| 4.1 | Modellierung des elektrischen Netzes | 35 |
| 4.2 | Modellierung der logistischen Prozesse | 36 |
| 4.3 | Kopplung der elektrischen und logistischen Simulationsmodelle | 38 |
| 4.3.1 | Schnittstellen zwischen elektrischem und logistischem Modell..... | 38 |
| 4.3.2 | Integration eines Energiemanagementsystems inklusive Speicher | 38 |
| 5 | Integration von Elektromobilität am Logistikzentrum..... | 42 |
| 5.1 | Mitarbeiterladen am Logistikzentrum..... | 42 |
| 5.1.1 | Modellierung des Mitarbeiterladens | 42 |
| 5.1.2 | Lastgang des Mitarbeiterladens am Versandzentrum..... | 43 |
| 5.1.3 | Integration eines Lademanagements | 44 |
| 5.2 | LKW-Laden am Versandzentrum | 45 |
| 5.2.1 | Verfügbare Ladekonzepte | 45 |
| 5.2.2 | Betrachtete LKW-Elektrifizierungsszenarien | 49 |
| 5.2.3 | Modellierung des LKW-Ladens | 49 |
| 5.2.4 | Lastgang des LKW-Ladens am Versandzentrum | 51 |
| 5.2.5 | Auswirkungen einer LKW-Elektrifizierung auf logistische Prozesse | 55 |
| 6 | Analyse des Flexibilitätspotentials von Logistikzentren | 59 |
| 6.1 | Flexibilitätspotential der Prozesse in einem Logistikzentrum | 59 |
| 6.1.1 | Logistische Prozesse | 59 |
| 6.1.2 | Energiespeicher | 61 |
| 6.1.3 | PV-Anlage | 63 |
| 6.1.4 | Mitarbeiter-PKW | 64 |
| 6.1.5 | LKW-Laden | 66 |
| 6.1.6 | Logistikzentrum der Zukunft..... | 68 |
| 6.2 | Netzauswirkungen der flexiblen zukünftigen Last von Logistikzentren | 69 |
| 6.2.1 | Betriebsmittelauslastungen | 70 |
| 6.2.2 | Spannungsband | 71 |
| 6.2.3 | Zusammenfassende Beurteilung der Netzauswirkungen..... | 72 |
| 7 | Fazit und Ausblick | 73 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 75 |
| 9 | Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Projekts FELSeN..... | 79 |
| 10 | Anhang..... | 80 |

1 Inhaltliche und organisatorische Rahmenbedingungen

Zur Fortführung der Energiewende ist die Gestaltung einer flexiblen Energieversorgung unabhkmmlich. Logistikzentren spielen dafür als flexibler Erzeuger, flexibler Verbraucher und flexibler Speicher eine besondere Rolle. Die Bedeutung dieser Aussage wird mithilfe der Motivation und der Bedeutung des Projekts im folgenden Kapitel dargestellt. Anschließend wird neben der Zielsetzung der Aufbau des Berichts beschrieben.

1.1 Einleitung und Motivation

Die deutsche Bundesregierung strebt bereits seit 2016 durch den Klimaschutzplan eine weitgehende Treibgashausneutralität für 2050 an [1]. Im Jahr 2020 wurden die Klimaziele der Bundesregierung dank COVID-19 und durch den Emissionsrückgang erreicht [2, p. 9]. Hingegen wird mit einer Erholung der Wirtschaft der Treibhausgas-Ausstoß wieder steigen. Daher ist neben Maßnahmen zum CO₂-Ausgleich eine Reduktion der Emissionen unumgänglich. Die Energiewirtschaft, die Industrie und der Verkehr gelten als die größten Emissionstreiber. Besonders im Bereich Verkehr stieg der Ausstoß in den letzten Jahren an. Einen Ansatzpunkt zur Erreichung der Klimaschutzziele, besonders in urbanen Räumen, ist die Nutzung von Elektromobilität. Eine Kombination mit erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung wird dies ergänzend fördern [3]. Angesichts hoher installierter Leistungen erneuerbarer Erzeuger ist eine Steuerung des Energieverbrauchs wesentlich. Denn durch die Steuerung kann neben der Maximierung des Nutzungsgrads der erneuerbaren Energien auch der Einfluss von Verbrauchern und Erzeugern auf das Stromnetz reduziert werden. Ein Ausbau des Stromnetzes kann somit teilweise vermieden werden.

Im Hinblick auf eine in Deutschland stetig wachsende Logistikbranche ist neben dem dadurch steigenden Verkehrsaufkommen auch das Flexibilitätspotential im Logistikzentrum bzw. in der Intralogistik signifikant. Hierzu muss quantifiziert werden, inwieweit Prozesse aus energetischen Gründen verschoben werden können, ohne logistische Abläufe zu gefährden oder die Produktivität von Unternehmen einzuschränken. Auch zukünftige mögliche Verbraucher sollten nicht vernachlässigt werden, denn die Elektromobilität wird in der Logistik immer bedeutender. Die Zustellung von Paketen wird bereits gegenwärtig teilweise durch elektrisch betriebene Transporter realisiert. Erste Vorserienfahrzeuge von schweren Lastkraftwägen (LKW) sind bei den Speditionen angekommen und werden in Pilotprojekten betrieben. Eine Herausforderung stellt das Laden der elektrischen LKW (E-LKW) dar. Die Anforderungen an die Infrastruktur der Logistikzentren, logistischen Prozesse sowie das elektrische Netz sind größtenteils noch unbekannt und somit für Logistik- und Netzbetreiber von großem Interesse. Im Forschungsprojekt „Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur Erbringung von Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen (FELSeN)“ des Instituts für Fördertechnik und Logistik und des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart wurde daher das Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums sowohl aus elektrischer als auch logistischer Perspektive bestimmt und der Einfluss neuer Verbraucher wie der Elektromobilität unter Einbezug Erneuerbarer Energien untersucht.

1.2 Bedeutung des Vorhabens für das Land Baden-Württemberg und Relevanz im Themenbereich Smart Grids

Neue Angebote im Bereich der Elektromobilität finden zukünftig einen verstärkten Einsatz in der Logistik. So setzen Paketdienstleister bereits heute rein elektrisch betriebene Fahrzeuge in der Zustellung ihrer Pakete ein. Das Land Baden-Württemberg leistet beispielsweise durch „e-mobil BW“, das „Cluster Elektromobilität Süd-West“ sowie den Strategiedialog Automobilwirtschaft einen großen Beitrag zu diesem Wandel. Die Bundesregierung hat sich das Ziel

gesetzt, bis zum Jahr 2030 sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge auf den Straßen zu haben [4]. Diese hohe Anzahl an elektrischen Fahrzeugen (privat genutzte PKWs aber auch Transporter und LKW) bringen neue Herausforderungen im Hinblick auf die elektrischen Netze. Die Netzurückwirkungen im größeren Ausmaß sind weitestgehend unbekannt aber von erheblichem Interesse für die Netzbetreiber. Insbesondere gehen Netzbetreiber häufig von einem starken Netzausbau durch den zunehmenden Verbrauch der Elektromobilität aus. Dieser begründet sich durch die Auslegung der elektrischen Verteilnetze auf die Extremfälle des elektrischen Verbrauchs. Eine Flexibilisierung des Verbrauchs, wie im Projekt FELSeN anhand von Elektromobilität in Kombination mit Logistikzentren untersucht, kann einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung des Netzausbaus liefern.

Die Durchführbarkeitsstudie FELSeN trägt dazu bei, die Logistikbranche als aktiven Teilnehmer in einem flexiblen Energiesystem der Zukunft zu etablieren und damit einen Beitrag zur Energiewende in Baden-Württemberg zu leisten. Insbesondere in Ländern, in denen die Industrie einen hohen Anteil an der Bruttowertschöpfung hat, wie in Baden-Württemberg, ist ebenfalls die Logistik ein starker Geschäftsbereich, da die Waren und Güter für die Industrie transportiert werden müssen. Durch die Logistikbranche existieren in Baden-Württemberg große Verbraucher elektrischer Energie, welche zur Flexibilisierung eingesetzt und in ein Smart Grid eingebunden werden können. Die Durchführbarkeitsstudie FELSeN leistet hier für den Themenbereich Smart Grids einen Beitrag durch die Erschließung neuer Flexibilitätspotenziale und deren netzdienlichen Einsatz.

1.3 Zielsetzung des Projekts

Die Logistik stellt, auch durch den hohen Anteil produzierender Unternehmen im Land, traditionell eine sehr wichtige Branche in Baden-Württemberg dar. Sogenannte Logistikzentren, wie sie zahlreich in Baden-Württemberg zu finden sind, stellen eine wichtige Komponente dieser Branche dar. In ihnen werden unterschiedliche Ressourcen eingesetzt, um damit die logistischen Prozesse bewerkstelligen zu können. Genutzt werden dazu neben der klassischen Fördertechnik automatisierte Hochregallager, elektrische Flurförderzeuge wie Gabelstapler, Handhabungsroboter, aber auch Klimatechnik und Beleuchtungseinrichtungen. Der Energiebedarf eines solchen Logistikzentrums hängt neben der Größe der Anlage auch von dessen Automatisierungsgrad und der Art der eingelagerten Artikel ab. Ein Logistikzentrum mittlerer Größe (ca. 15.000 m²) mit einem durchschnittlichen Automatisierungsgrad verbraucht ca. 850.000 kWh Strom pro Jahr [5]. Das Wissen über den tatsächlichen Stromverbrauch und die durch die genutzten Ressourcen verursachten Lastkurven sind häufig nicht vorhanden. Lastverschiebungspotenziale innerhalb der Logistikzentren sind durch die flexiblen Prozesse durchaus möglich. Durch die Größe der Dachflächen eignen sich Logistikzentren zudem als Standort für die Installation von Photovoltaikanlagen.

Beim Projekt FELSeN handelt es sich um eine Durchführbarkeitsstudie zur flexiblen Netzintegration von Logistikzentren unter Berücksichtigung regenerativer Energiequellen und der Elektromobilität. Untersucht werden soll, inwiefern Logistikzentren dazu geeignet sind, durch eine situative Anpassung der logistischen Prozesse auf Schwankungen der Energieerzeugung (eigene Photovoltaikanlage) oder zusätzliche Verbraucher (Elektromobilität) reagieren zu können. Dies führt zu einer Sektorkopplung im Bereich Verkehr und Strom (Transporte mit Strom aus erneuerbaren Energien). Darüber hinaus soll auch der Einfluss dieser Anpassungen auf das Energienetz betrachtet werden.

Im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie soll resultierend aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Leitfaden erstellt werden, der den Unternehmen im Land eine Hilfestellung bei der Nutzung regenerativer Energiequellen in deren Logistikzentren sowie der Verknüpfung mit der Elektromobilität bieten soll.

Die Zielsetzung lässt sich in einzelne Teilziele der Durchführbarkeitsstudie ableiten:

- Charakterisierung des Verbrauchsprofils der logistischen Prozesse
- Entwicklung einer gekoppelten simulationsbasierten Demonstrationsumgebung
- Abschätzung des Flexibilitätspotential von Elektromobilität
- Analyse des netzdienlichen Einsatzes der Flexibilität des Logistikzentrums
- Entwicklung eines Leitfadens zur Flexibilisierung von Logistikzentren

1.4 Struktur des Berichts

Zu Beginn des Abschlussberichts wurde in Kapitel 1 neben der Motivation und der Bedeutung des Forschungsprojekts dessen Zielsetzung und Struktur beschrieben. Nachfolgend wird im zweiten Kapitel der Grundstein zum Verständnis der Arbeit vermittelt. Daher beinhaltet dieses Kapitel die Grundlagen des Logistikzentrums, des elektrischen Netzes und der Elektromobilität. Die Kapitel 3 bis 5 beschreiben die Vorgehensweisen und die Ergebnisse zur Erreichung der jeweiligen Teilziele des Projekts. In Kapitel 6 wird das aus diesen Untersuchungen resultierende Flexibilitätspotential von Logistikzentren erörtert. Zum Abschluss fasst das Kapitel 7 die wichtigsten Ergebnisse dieses Projekts zusammen. Der entstandene Leitfaden ist im Anhang zu finden.

2 Stand der Technik

Das folgende Kapitel dient zum Einstieg in die Themengebiete Logistik, Energienetz und Elektromobilität. Beginnend mit den Grundlagen eines Logistikzentrums werden alle relevanten Prozesse und Bereiche beschrieben. Daraufhin ist ein Überblick zum elektrischen Energienetz und dem neuen Verbraucher Elektromobilität gegeben.

2.1 Logistikzentrum

Logistik kann in Inter-, Extra- und Intralogistik unterteilt werden. Jede Art der Logistik hat spezifische Leistungen zu erbringen. Die innerbetriebliche Logistik ist ein Teilbereich der Unternehmenslogistik, die auf die Betriebsstätte bezogene Aufgabenbereiche der Beschaffungs- und Distributions- sowie der Produktionslogistik abdeckt. Die wichtigsten operativen Funktionen sind Umschlagen, Lagern, Transportieren, Kommissionieren und Verpacken, wobei ein Logistikzentrum nicht zwangsläufig alle diese operativen Funktionen umfassen muss [6, p. 9]. Um die genannten operativen Funktionen zentral zu realisieren, werden diese in einem Logistikzentrum erbracht, da sich in einem Logistikzentrum Beschaffungs- und Distributionsströme bündeln lassen [7, p. 21].

Ein Logistikzentrum wird als die Betriebsstätte eines Industrie-, Handels- oder Dienstleistungsunternehmens einer selbständigen Betreibergesellschaft verstanden. Es verfügt über einen Straßenanschluss und in besonderen Fällen auch über einen Wasser- oder Schienenanschluss. In einem Logistikzentrum befinden sich die Leistungsquellen in einem zusammenhängenden Gebäudekomplex, der von einer nach außen abgegrenzten Verkehrsfläche umgeben ist. Typische Logistikzentren sind Verteilerzentren, Distributionszentren, Lagerzentren oder Versorgungszentren. [7, p. 22]

Die meisten Logistikzentren bieten standardmäßig folgende drei operativen Leistungen [7, p. 22]:

- Lagern der Waren eines oder mehrerer Lieferanten
- Kommissionieren der Aufträge für viele Kunden
- Umschlagen von Transferware vieler Lieferanten für viele Kunden

Die oben genannten Standardleistungen werden in verschiedenen operativen Leistungsbereichen verrichtet. Dazu gehören der Wareneingang (WE), die Lagerbereiche, die Kommissioniersysteme, die Transportsysteme, die Sortiersysteme und der Warenausgang (WA). Dies ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Außerdem verfügt die Mehrzahl der Logistikzentren über weitere administrative Leistungsbereiche wie Auftragsdisposition, Arbeitsvorbereitung, Datenverarbeitung, Transport- und Frachtdisposition und Betriebsleitung. [7, p. 22]

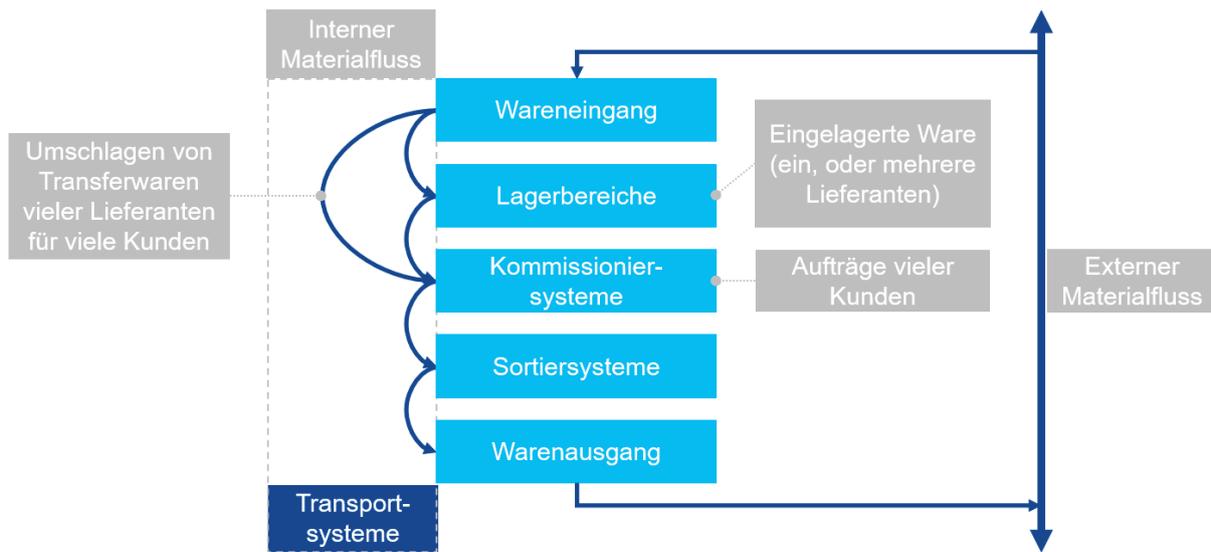


Abbildung 2-1: Materialfluss in einem Logistikzentrum (Eigendarstellung in Anlehnung an [7, pp. 21-23])

2.1.1 Wareneingang

Der Transport von Waren wechselt an der Schnittstelle Rampe (Warenannahme) von außerbetrieblich in innerbetrieblich. In der ersten innerbetrieblichen Station, dem WE, werden die Lieferungen auf Lieferberechtigung, Identität und Menge geprüft. In einigen Fällen werden Transportschäden und Transportverluste untersucht. [8, p. 43]

Im WE findet der erste Prozess in der Lieferkette eines Logistikzentrums statt. Zu den Tätigkeiten, die notwendig für die Warenannahme sind, gehört das Identifizieren und Zuordnen der Waren zu Wareneingangspuffern. Die Waren verbleiben in diesen Puffern, bis eine Qualitätskontrolle bezüglich Identität, Menge, Termin, Art, Abmessung, Gewicht usw. durchgeführt wird. Bei fehlerhaften Waren, Verpackungen oder ungeeigneten Ladungsträgern erfolgt eine Nachbearbeitung der Stückgüter. Waren, bei denen der Fehler nicht behoben werden kann, sendet das Logistikzentrum zum Lieferanten zurück. Diese Prozesse werden in Abbildung 2-2 dargestellt. [9, p. 12]

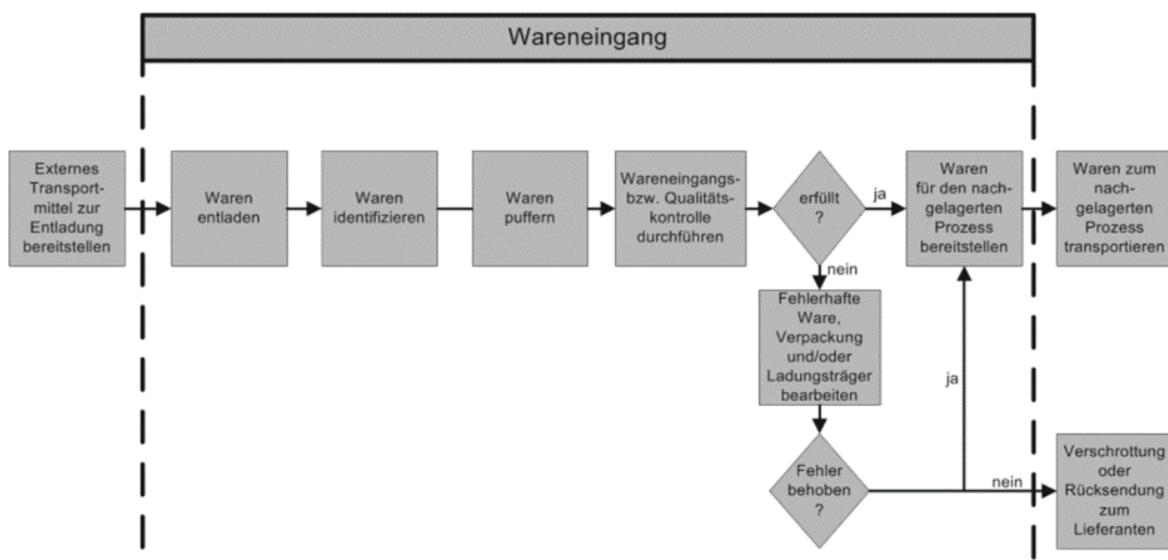


Abbildung 2-2: Prozesse des Wareneingangs [9, p. 13]

2.1.2 Lagerbereiche/-technik

Lagern ist das Aufbewahren und Bereithalten bestimmter Mengen von Artikelbeständen. Das Lagern wird in drei Teilprozesse unterteilt: [7, p. 565]

- Einlagern der Lagereinheiten mit einem Transportgerät
- Aufbewahren und Bereithalten der Lagereinheiten auf den Lagerplätzen
- Auslagern der Lagereinheiten mit einem Lagergerät

„Die grundlegende Aufgabe eines Lagers besteht in der wirtschaftlichen Abstimmung unterschiedlich dimensionierter Güterströme“ [10, p. 235]. Lager lassen sich nach unterschiedlichen Faktoren klassifizieren, wie Standort, Verwaltung des Lagers, Sortierung, Zentralisierungsgrad usw. Bei der Betrachtung der technischen Gestaltungsmöglichkeiten von Lägern ergeben sich ebenfalls unterschiedliche Lagertypen. Die Lagertypen werden hierbei in Abhängigkeit von der Lagerung unterschieden (siehe Abbildung 2-3).

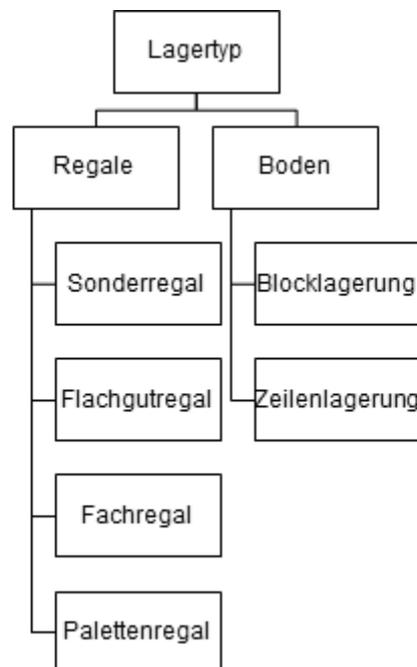


Abbildung 2-3: Lagertypen (Eigendarstellung in Anlehnung an [10, p. 240])

Die Ausführung der drei Teilprozesse beim Lagern wird mit unterschiedlichen Lagergeräten realisiert. Nach dem Fahrverhalten dieser Lagergeräte lassen sich vier Arten unterscheiden: [7, p. 589]

- Eindimensionale Lagergeräte
- Zweidimensionale Lagergeräte
- Dreidimensionale Lagergeräte
- Kombinierte Lagergeräte

Ein Beispiel für ein eindimensionales Lagergerät ist der Hubwagen. Zu den zweidimensionalen Geräten zählen flurgebundene Regalbediengeräte (RBG), die sowohl eine Hub- als auch eine Fahrbewegung aufweisen. Zu den dreidimensionalen Geräten gehören Hub- oder Staplerkräne.

2.1.3 Kommissionieren

„Das Kommissionieren ist die schwierigste Aufgabe der innerbetrieblichen Logistik“ [7, p. 659]. Beim Kommissionieren werden bestimmte Teilmengen (Artikel) aus einer bereitgestellten Gesamtmenge (Sortiment) auf Basis von Bedarfsinformationen (Auftrag) vereint. Es erfolgt eine Zustandsänderung von lagerspezifisch zu verbrauchsspezifisch [10, p. 265].

Aufgrund der erhöhten Anzahl an Einzelvorgängen in der Kommissionierung entsteht ein hoher Koordinations- und Steuerungsaufwand. Daher gibt es erhebliches Rationalisierungs- und Optimierungspotential. Nach [7, p. 659] besteht das Kommissionieren aus folgenden Teilprozessen:

- Bereitstellung von Ware in Bereitstellereinheiten
- Fortbewegung des Kommissionierers zum Bereitstellplatz
- Entnahme der geforderten Warenmenge aus den Bereitstellereinheiten
- Abgabe in Sammelbehälter auf ein Fördersystem oder ein Transportgerät
- Zusammenführen der Sammelbehälter oder Waren an einem Sammelplatz
- Beschickung der Bereitstellplätze mit Nachschub

Die Bereitstellung kann statisch (Person zur Ware) oder dynamisch (Ware zur Person) erfolgen. Der Unterschied zwischen den zwei Arten der Bereitstellung ist, dass sich bei der statischen der Kommissionierer zur Ware hinbewegt und bei der dynamischen die Ware durch automatisierte Geräte zum Kommissionierer transportiert wird. [11, pp. 231-232]

Die Entnahme bei der Kommissionierung erfolgt manuell, wenn ein Mensch die Ware nimmt, mechanisch, wenn ein Mensch die Ware mit Hilfe eines Geräts (z. B. Gabelstapler) entnimmt, oder automatisch, wenn die Ware durch automatisierte Geräte entnommen wird. Das heißt ohne ein Eingreifen des Menschen. Die Art der Entnahme richtet sich nach der Art der Ware sowie nach deren Volumen, Gewicht, usw. [12, p. 413]

Als Fortbewegung ist die Bewegung zu und zwischen den Entnahmepunkten zu verstehen, diese erfolgt entweder ein- oder zweidimensional. Bei der eindimensionalen Fortbewegung bewegt sich der Kommissionierer nur auf einer Fläche und in einem beschränkten Bereich. Bei der zweidimensionalen Bewegung bewegt sich der Kommissionierer horizontal sowie vertikal, hierbei sind die Kommissioniergeräte von Bedeutung, die elektrisch angetrieben werden und dem Kommissionierer bei der Fortbewegung helfen. [12, p. 417]

2.1.4 Verpackung

Die Verpackungslogistik sorgt für die Verbindung der Prozesse und Strukturen der Logistik mit den Prozessen und Strukturen der Verpackung. Der Einfluss reicht von der Produktion über den Transport zum Endkonsumenten bis hin zur Entsorgung [13]. Zu den Aufgaben der Verpackungslogistik gehört, dass

- das Material kostengünstig und wiederverwendbar ist,
- die Form des Produkts und die Abmessungen zu den Ladeeinheiten passen,
- die Handlingkosten für das Kommissionieren und Lagern möglichst gering sind [7, p. 554].

Als Verpackung wird „die Umhüllung eines Packgutes zum Schutz der Umgebung oder des Packgutes selbst, zur Portionierung für Produktion, Verwendung und Transport, zur Lagerung und zur Vermarktung“ [13] verstanden. Die Bestandteile der Verpackung sind somit der Packstoff, das Material, und das Packmittel, der Umhüllung für das Material und Packhilfsmitteln. Das Packmittel verhilft zum Verpacken, Verschließen und zur Versandvorbereitung [13].

2.1.5 Warenausgang

Der innerbetriebliche Materialfluss eines Distributionszentrums endet im WA [9, p. 15]. Die Funktionsfähigkeit eines Lagers hängt stark von der Gestaltung und Dimensionierung des Warenausgangs ab, deswegen ist der Warenausgang ein wichtiger Teil der Logistikkette. Der Warenausgang erfüllt verschiedene Funktionen, wie den Transport der vorbereitenden Ware zur Verladung, die Identifizierung sowie die Verladung der Waren in Transportmittel. Mit dem Abschluss der Verladung ist der Prozess im WA und somit der Materialfluss in einem Logistikzentrum abgeschlossen [9, p. 15]. Die Prozesse werden in Abbildung 2-4 dargestellt.

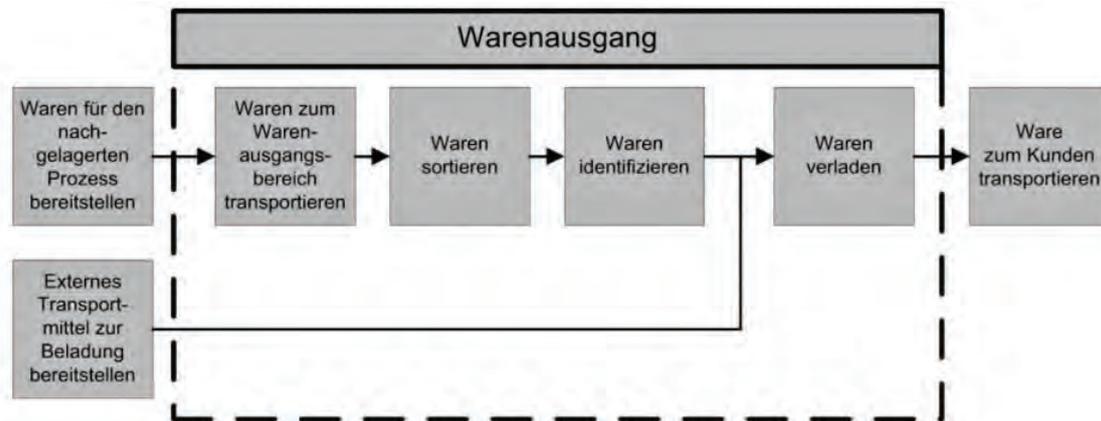


Abbildung 2-4: Prozesse des Warenausgangs [9, p. 15]

Die präzise Planung und Steuerung des gesamten Materialflusses spielt eine wichtige Rolle in der Logistikkette und somit auch für den Energieverbrauch in einem Logistikzentrum, da eine gute Lagerplanung und Betriebsstrategie Bearbeitungszeiten reduziert, was die Basis für einen effizienten Energieverbrauch bildet.

2.1.6 Transportsysteme

Die Funktion der Transportsysteme ist das Transportieren von Waren von einem Platz zu einem anderen. In der Logistik wird zwischen außerbetrieblichem und innerbetrieblichem Transport unterschieden, im Rahmen des Projekts soll der Fokus jedoch auf den innerbetrieblichen Transportsystemen (Fördermittel) liegen.

„Ein Transportsystem ist so zu gestalten, zu dimensionieren, zu organisieren und zu disponieren, dass ein bestimmter Beförderungsbedarf unter Berücksichtigung der räumlichen, zeitlichen, technischen und ökologischen Randbedingungen kostenoptimal erbracht wird.“ [7, p. 771].

Fördermittel lassen sich in die folgenden zwei Kategorien unterteilen und sind in Abbildung 2-5 dargestellt.

- die kontinuierliche Beförderung/Stetigförderer
- die diskontinuierliche Beförderung/Unstetigförderer

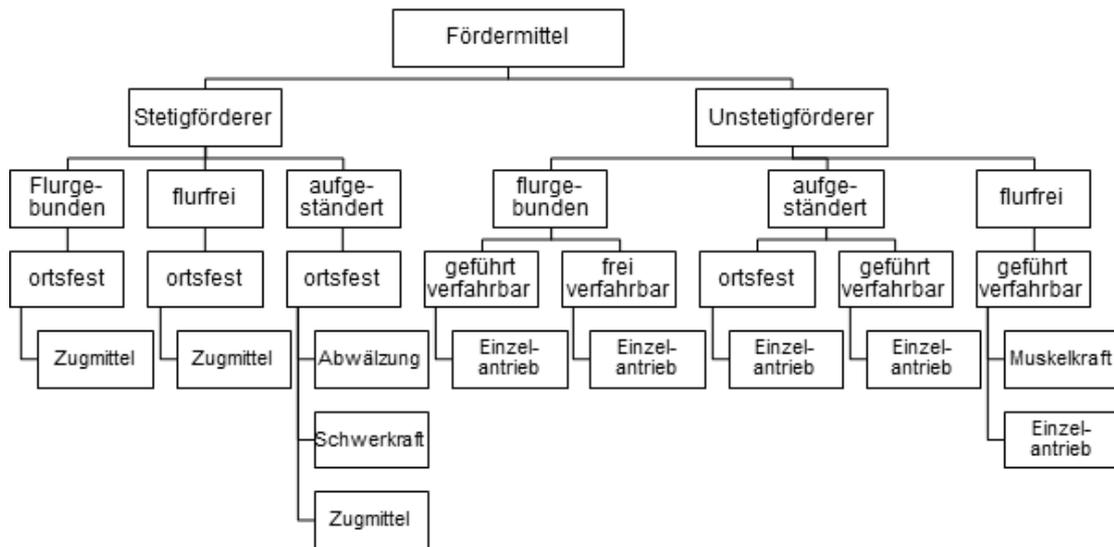


Abbildung 2-5: Fördermittel (Eigendarstellung in Anlehnung an [14, p. 129])

Stetigförderer zeichnen sich durch einen kontinuierlichen oder diskret kontinuierlichen Fördergutstrom aus [14, p. 133]. Beispiele hierfür wären der Rollen- oder Kettenförderer. Im Gegensatz dazu erzeugen Unstetigförderer, wie Flurförderer (Gabelstapler, Hubwagen, etc.) oder RBG, keinen kontinuierlichen Fördergutstrom und arbeiten auf eine intermittierende Weise [14, p. 161]. Dieser Unterschied zwischen kontinuierlichem oder intermittierendem Fördergutstrom ist ein Faktor bei der Analyse von Leistungsverlauf und Energiebedarf eines Fördermittels.

2.1.7 Die Laderampe als Schnittstelle zwischen inner- und außerbetrieblichem Transport

In einem Transportsystem wechseln Warenströme auf dem Weg vom Absender zum Empfänger, oder umgekehrt, das Transportmittel. Dies kann ein Warenumschlag innerhalb von Verkehrsmitteln des Güterverkehrs (Straße, Schiene und Gewässer) sein, oder es wird zwischen inner- und außerbetrieblichem Transport gewechselt. Als Schnittstellen zum Außerbetrieblichen werden die Laderampen im WE sowie WA betrachtet. Die folgende Grafik zeigt die Einordnung der Laderampe als Bauwerk und Schnittstelle beim Umschlag von Waren.

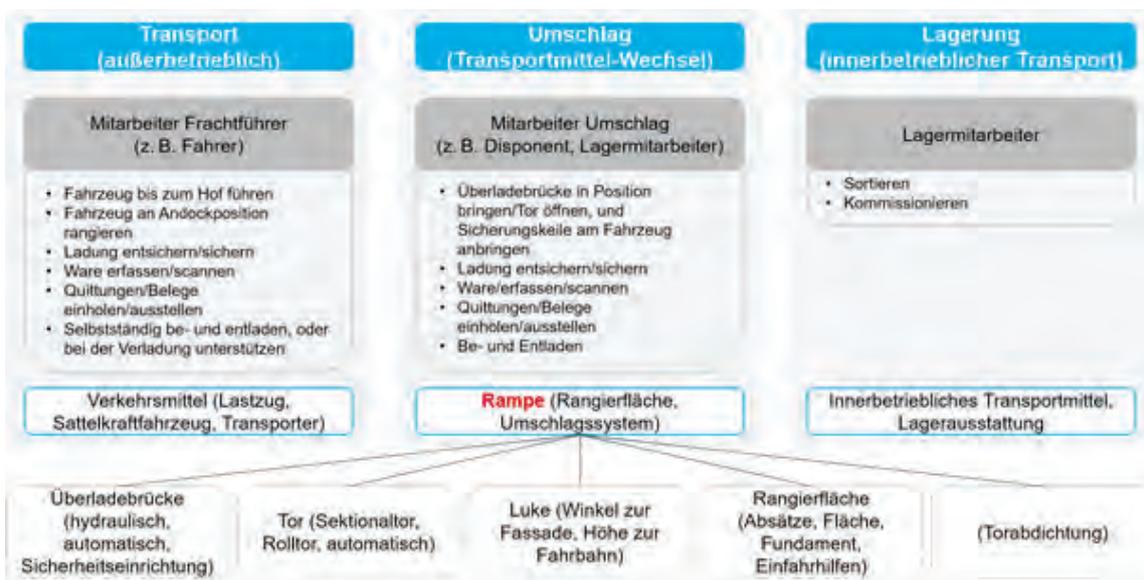


Abbildung 2-6: Einordnung der Rampe als Bauwerk und Schnittstelle beim Umschlag von Waren (Eigendarstellung in Anlehnung an [6, pp. 203, 204, 262, 15, pp. 294-320])

Im Bereich Umschlagen kommt der Begriff Rampe bzw. Laderampe vor, was im Prinzip eine Konstruktion zum Überbrücken von Höhenunterschieden beschreibt. Die Ladeflächen bei Verkehrsmitteln, wie LKW und Zügen, haben ein individuelles Höhenniveau, wodurch sich eine Höhendifferenz zwischen Ladefläche des Transportmittels und der Lagerfläche des Bauwerks bildet. Krane können diesen Unterschied selbstständig ausgleichen, jedoch werden meist Flurförderer eingesetzt. Sie bewegen sich mittels Rollen bzw. Räder und können möglichst nah an das Transportgut herangeführt werden. In der folgenden Abbildung sind die Strukturkomponenten für einen Warenumschlag über Rampen dargestellt. [6, p. 311]

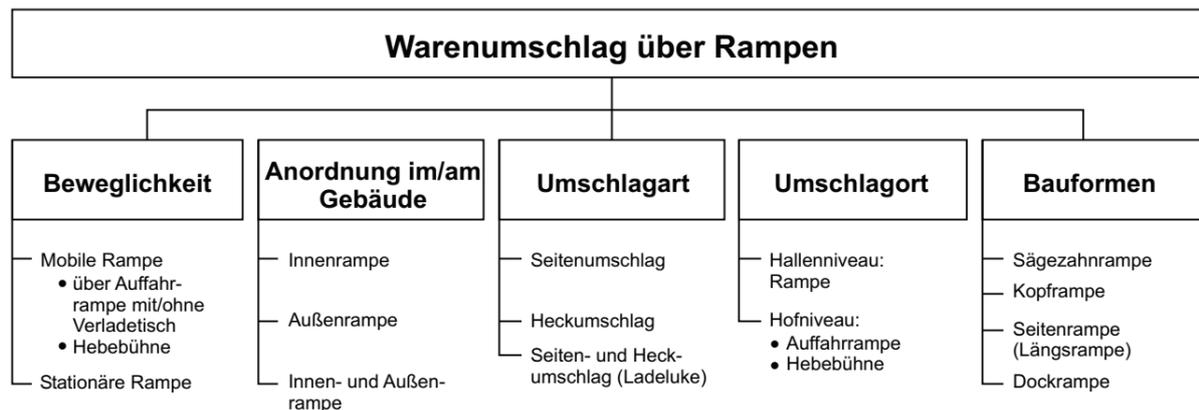


Abbildung 2-7: Strukturkomponenten für den Warenumschlag über Rampen [6, p. 311]

Für den Großteil des Warenumschlags werden stationäre Rampen mit einer Luke in der Hallenwand genutzt, an die der LKW mit dem Heck andockt. Diese Art kommt vorwiegend im Großraum Stuttgart vor.¹ Sobald der Hallenboden auf dem gleichen Niveau wie die Hoffläche ist, werden mobile Rampen genutzt. Es sind verfahrbare Verladetische, welche eine Heck- oder Seitenentladung/-beladung mit einem Stapler ermöglichen [6, p. 311]. Bei stationären Rampen sorgt eine Überladebrücke für eine stabile und ebene Fahrbahn ohne hohe Kanten und somit für eine sichere Beförderung, besonders von hohen Lasten. Diese Verbindung von Lagerfläche auf Ladefläche kann mit einem auf den Spalt zwischen Lager und Fahrzeug gelegten Blech erfolgen. Jedoch sind ausgereifere Produkte verfügbar, die in modernen Logistikzentren integriert werden. Solche Lösungen können rampenseitig am Boden verankert und in Richtung Fahrzeug in begrenztem Maß höhenverstellbar sein. Es werden meist auch Abstände in Vorschubrichtung ausgleichen. Der Antrieb erfolgt dabei hydraulisch, oder manuell mit Hebeln. [16, p. 14]

Weil gegenwärtig Gebäudebeheizung effizient erfolgen soll, sind in oft genutzten Verladebereichen meist Tore mit Abdichtungen vorhanden. Diese Torabdichtungen bilden einen Rahmen und besitzen flexible Seitenbereiche, die von der Fassade herausragen, um beim Heranfahren eines Transportfahrzeugs mit dessen Kontur möglichst bündig abzuschließen und nicht gleich beschädigt zu werden [6, p. 311]. Der heute häufige Einsatz von Laderampen mit Sektional-, oder Rolltoren und Torabdichtung macht Vordächer für Lagergebäude überflüssig und ist meist kostengünstiger, jedoch gibt es auch Verladestationen mit Vordachkonstruktionen. Das Dach bietet dann Schutz gegen Wettereinflüsse. Vorteile bietet diese Bauart beispielsweise, wenn das Transportfahrzeug nicht über Heck, sondern von der Seite entladen werden soll und nicht direkt an eine Öffnung des Gebäudes andockt werden kann. Die Anordnung der Hallenöffnungen kann als Kopf- oder Sägezahnrampen erfolgen (siehe Abbildung 2-8). Bei den Kopframpen schließen die Luken bündig mit der Fassade des Lagergebäudes ab, wohingegen bei einer Sägezahnordnung die Richtung der Öffnung einen Winkel zur Fassade bildet. LKW

¹ Eine Recherche via Satellitenfotos (Google Maps) bestätigt dies.

rangieren für die Heckentladung so, dass in der Endposition zum Entladen die Fahrtrichtung vertikal zur Luke weist. [6]

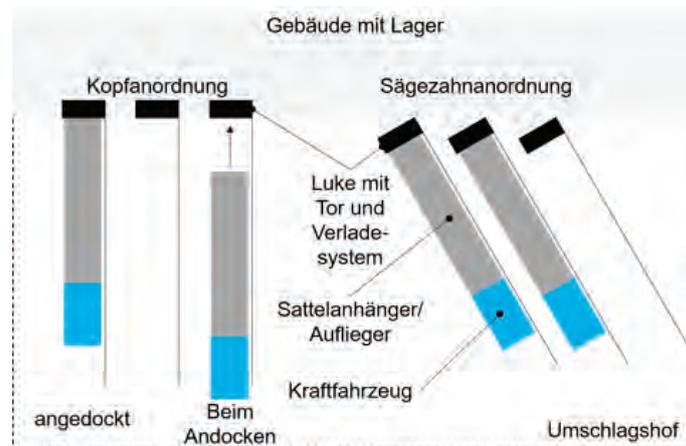


Abbildung 2-8: Anordnungen von Rampen (Eigendarstellung in Anlehnung [6, p. 331])

Im Gebäude, direkt hinter der Luke, müssen alle Glieder in der Prozesskette zum Warenbereitstellen oder -abtransportieren optimal ausgelegt sein und zusammenarbeiten, sodass zu jeder Zeit kein Glied auf ein Nachbarglied warten muss. Ist dies nicht gewährleistet, kann mit einer Zwischenlagerung der Warenstrom gepuffert werden, um im Endeffekt einen maximalen Warenstrom durch die Rampe zu erhalten [17, p. 61]. Entgegen, große Puffer anzulegen, soll jedoch im Wareneingang und -ausgang die Aufenthaltsdauer der Güter so kurz wie möglich gehalten werden. In diesem Bereich stehen die Bewegungsprozesse im Vordergrund. Im Vergleich mit einem Einheitenlager wird in den Schnittstellenbereichen flexibel erfasst, bewegt und sortiert, was in engen Gassen platztechnisch schlecht möglich ist [18, p. 133]. Die benötigte Anzahl von Rampen in einem Logistikzentrum ist abhängig vom Warenfluss, der Anzahl der Anlieferungen, dem Zeitpunkt, an dem die meisten Waren erhalten werden, der Zeit, die für das Entladen und die Beförderung aller erhaltenen Waren zum Bestimmungsort aufgewendet wird und der Anzahl an verfügbaren Fördermitteln [19].

2.1.8 Aufbau eines Logistikzentrums

Ein Logistikunternehmen kann in die drei Bestandteile Gebäude, Lager und Fuhrpark unterteilt werden. Als Gebäude können Büros, Umkleieräume oder Pausenräume identifiziert werden. Diese Bereiche erfüllen administrative Zwecke. Unter dem Begriff „Lager“ wird der Ort verstanden, an dem Waren ein- und ausgelagert, kommissioniert und verpackt werden und an dem sich die operativen Leistungsbereiche befinden. Gebäude und Lager zählen zu den innerbetrieblichen Bereichen. Der Fuhrpark (falls vorhanden) ist der Ort, an dem die firmeneigenen LKWs geparkt werden und zählt als außerbetrieblicher Bereich. Außerbetriebliche Bereiche eines Logistikzentrums werden im Rahmen dieses Abschlussberichts nicht analysiert. Abbildung 2-9 zeigt diesen Aufbau sowie eine Klassifikation der wichtigsten Verbraucher für jeden Teilbereich. Dabei wurden nur die wesentlichen Energieverbraucher in einem Logistikzentrum dargestellt. Es ist zu berücksichtigen, dass zudem noch verschiedene kleinere Verbraucher wie elektrische Werkzeuge oder Bürozubehör in die Gesamtenergiebilanz eines Logistikzentrums eingehen.

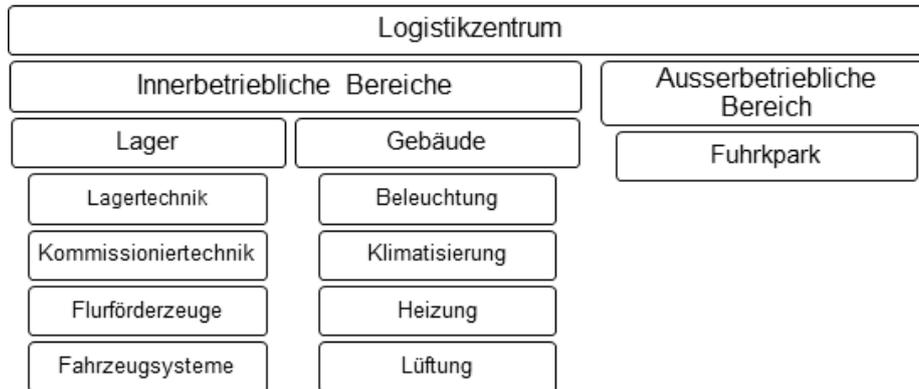


Abbildung 2-9: Aufbau eines Logistikzentrums und dessen Verbraucher (Eigendarstellung in Anlehnung an [20, p. 22])

2.2 Das elektrische Energienetz

Als Basis für die Modellierung des Energienetzes und zur Bewertung der identifizierten Flexibilität sind in diesem Kapitel einige grundlegende Informationen über das elektrische Energienetz zusammengestellt.

2.2.1 Anschluss von Industriekunden und Elektromobilität im Stromnetz

Das elektrische Energienetz lässt sich in das Verteilnetz und das Übertragungsnetz unterteilen. Die Aufgabe des Übertragungsnetzes ist es, Energie über große Entfernungen zu transportieren. Das Verteilnetz ist für die Verteilung der Energie an einzelne Verbraucher zuständig. Die verschiedenen Spannungsebenen des Energienetzes sind in Abbildung 2-10 dargestellt.

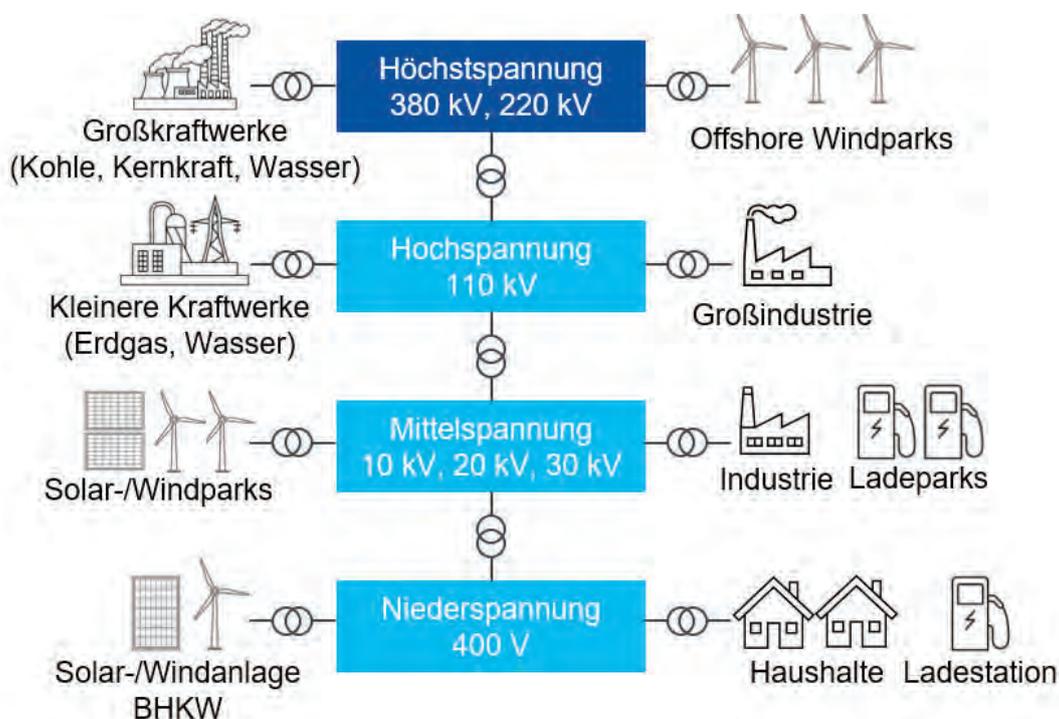


Abbildung 2-10: Übersicht der Netzebenen

Die für das Forschungsprojekt relevante Netzebene ist das Verteilnetz. Großindustrien sind typischerweise an die 110 kV Hochspannungsebene und kleinere Industrieunternehmen an

die Mittelspannungsebene angeschlossen. Die für die Elektromobilität notwendigen Ladestationen sind in Form größerer Ladeparks an das Mittelspannungsnetz und vereinzelt an das Niederspannungsnetz angebunden.

Zur Bestimmung des Entgeltes der Industrie für die Netznutzung sind verschiedene Einflussfaktoren von besonderer Bedeutung. Der Preis richtet sich nach der Entnahmeebene, der Jahresarbeit (kWh/a) und der Jahreshöchstlast (kW). Bei Netzkunden mit Eigenerzeugung kann gegebenenfalls eine Netzreservekapazität (kW) vereinbart werden. Auf diese kann beim Ausfall der Erzeugungsanlagen zurückgegriffen werden. Die Beantragung eines Bandkundenstatus ist möglich, wenn der Verbrauch im Jahr bei mindestens 10 GWh und die Benutzungsdanzahl bei mindestens 7.000 Stunden im Jahr liegt. In diesem Fall wird ein individuelles Netzentgelt festgelegt. [21]

2.2.2 Herausforderungen im Stromnetz durch neue Erzeuger und Verbraucher

Der Anstieg an Erneuerbaren Energien in Deutschland stellt das Stromnetz vor neue Herausforderungen. Zum einen muss die Energie aus den Windparks im Norden des Landes in den Süden transportiert werden, zum anderen muss mit der dezentralen Erzeugung von Energie durch die steigende Anzahl an privaten Photovoltaikanlagen umgegangen werden. So kann es in den Verteilnetzen durch das Hinzukommen neuer Erzeuger zu Überspannungen kommen. Aber auch die neuen Verbraucher, wie zum Beispiel Elektrofahrzeuge, führen zu neuen Herausforderungen. Der starke Anstieg durch Elektromobilität kann vor allem in der Niederspannungsebene zu starken Netzauslastungen führen. Die Transformatoren und die Leitungen müssen mehr Energie übertragen und sind somit auch stärker ausgelastet. Aber auch die Netzqualität kann durch Elektrofahrzeuge beeinflusst werden. Eine Schwierigkeit ist der große Planungshorizont, der für den Netzausbau an kritischen Punkten benötigt wird. Oft ist ein Planungszeitraum von mehreren Jahren vonnöten. Jedoch ist durch die dezentrale Verteilung der neuen Erzeuger und Verbraucher nicht vorhersehbar, an welchen Stellen das Netz in Zukunft am stärksten ausgelastet wird.

Die Auswirkungen von Elektromobilität auf das Energienetz können durch "Vehicle2Grid"-Konzepte oder durch Lademanagementsysteme auch positiv sein. So kann zu Spitzenzeiten der Photovoltaikanlagen überschüssige Energie aufgenommen und Blindleistung bereitgestellt werden. Daraus resultieren ein stabileres Netz und geringere Verluste. Eine ähnliche Möglichkeit wäre, Energiespeicher in das Netz zu integrieren. Der Ausbau des Netzes durch neue Leitungen oder leistungsstärkere Transformatoren ist ebenfalls möglich.

2.2.3 Flexibilität in elektrischen Energiesystemen

Die Abkehr von konventionellen Energiequellen hin zu volatilen Erneuerbaren Erzeugungsanlagen kann zu hohen Tagesschwankungen in der Energieerzeugung führen. Dadurch können Energieangebot und -nachfrage tageszeitabhängig voneinander abweichen. Um diesem Problem vorzubeugen, wird das Stromnetz zunehmend digitalisiert und intelligent vernetzt (Smart Grid). Diese Zunahme an Informations- und Kommunikationstechnik ermöglicht eine Flexibilisierung der Energieversorgung. Flexibilität bezeichnet dabei die Fähigkeit von Erzeugungs-, Verbrauchs- oder Speicheranlagen schnell und mit finanziell geringem Aufwand auf Markt- oder Systemsignale des Energiesektors zu reagieren [22]. Die Nutzung dieser Flexibilitäten ermöglicht nicht nur eine Entlastung stark belasteter Netzsegmente und dadurch eine Vermeidung von Netzengpässen, sondern auch eine Senkung des zukünftigen Regelleistungsbedarfs durch Ausgleich des Ungleichgewichts zwischen Erzeugung und Verbrauch.

In der dena-Netzflexstudie wird empfohlen, Flexibilitätpotenziale von Netznutzern durch Kosten- und Einkommensanreize zu fördern [23]. So weisen auch produzierende Unternehmen Möglichkeiten auf, Prozesse zu verschieben und ihren Energieverbrauch zu flexibilisieren. In

der DIN SPEC 91366 wurde dazu bereits ein „Referenzmodell zur Charakterisierung der Energieflexibilität von Industrieunternehmen“ geschaffen. Ein Lastmanagementsystem dient dabei durch Lasterhöhung, -senkung und -verschiebung der Lastgangflexibilisierung. Während ein innerbetriebliches Lastmanagementsystem den internen Strombezug optimiert, kann ein überbetriebliches Lastmanagementsystem sogar zur Stabilisierung des Energiesystems beitragen. [22]

Damit bei der praktischen Nutzung von Flexibilität möglichst alle Interessen berücksichtigt werden, ist eine Interaktion zwischen Netz und Markt erforderlich. Eine Möglichkeit diese Interaktion transparent abzubilden, ist die Nutzung eines Netzampelkonzepts [24]. Dabei wird die Situation im Netz in drei Phasen orientiert nach den Ampelfarben „grün“, „gelb“ und „rot“ eingeordnet. Die grüne Phase bezeichnet die Marktphase. Alle Marktteilnehmer können ihre Pläne verwirklichen und das Preissignal wird durch das Marktgeschehen bestimmt. Der Netzbetreiber greift hier nicht ein. Die gelbe Phase symbolisiert die Übergangsphase. Ein Netzengpass zeichnet sich ab und die angebotene Flexibilität wird durch den Netzbetreiber abgerufen. Übrigbleibende Flexibilität kann weiterhin marktdienlich genutzt werden. Die rote Phase ist die Netzphase. Die Netzbetreiber greifen zur Gewährleistung der Netzstabilität dabei direkt steuernd und regelnd in Betriebsmittel und Marktgeschehen ein.

2.3 Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr

Durch die Prognose des Anstiegs der weltweiten Güterbeförderungsleistung, ist eine Zunahme des Bestandes von Nutzfahrzeugen zu erwarten [25]. Bei LKW mit einer Fahrleistung von mindestens 100.000 km pro Jahr, machen die Kraftstoffkosten über 40 % der Gesamtkosten aus. Da die Kraftstoffkosten durch alternative Antriebe stark gesenkt werden können, ist das Marktpotential alternativer Antriebsmöglichkeiten abhängig von den Betriebskosten der LKW [15]. Alternative Antriebstechnologien zeichnen sich im Vergleich zu Diesel-LKW durch höhere Anschaffungspreise aber niedrigere Betriebskosten aus [26].

2.3.1 Antriebsarten elektrischer LKW

Es existieren unterschiedliche Antriebskonzepte für Elektrofahrzeuge, welche für PKW als auch LKW gelten. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Speichertechnologie und des Elektrifizierungsgrades. In Abbildung 2-11 sind die unterschiedlichen Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionell angetriebenen Fahrzeug (engl.: Internal Combustion Engine Vehicle – ICEV) dargestellt.

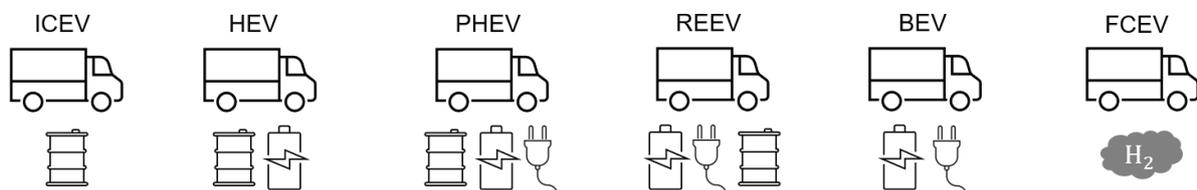


Abbildung 2-11: Unterschiedliche Antriebskonzepte

Bis auf den ICEV haben alle anderen dargestellten Modelle mindestens einen Elektromotor verbaut. Hybrid-Fahrzeuge (engl.: Hybrid Electric Vehicle – HEV), Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (engl.: Plug-In Hybrid Electric Vehicle – PHEV) sowie reichweitenverlängerte Fahrzeuge (engl.: Range Extended Electric Vehicle – REEV) besitzen neben dem Verbrennungsmotor auch einen Elektromotor, welcher seine Energie aus einer Batterie bezieht. Im Gegensatz zum

HEV können beim PHEV und REEV die Batterie von außen aus dem Stromnetz geladen werden. Beim REEV dient der Verbrennungsmotor nur zu Reichweitenverlängerung und nicht zum Antrieb des Fahrzeuges. [26], [27]

Die letzten beiden Antriebskonzepte, batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle – BEV) und Brennstoffzellenfahrzeug (engl.: Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV), sind rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Beide besitzen keinen Verbrennungsmotor, unterscheiden sich jedoch in ihrer Art der Energiespeicherung. Im FCEV wird die elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt, während im BEV die Energie in der Batterie gespeichert ist und von außen geladen werden muss. Das FCEV hat größere Reichweiten und kann schneller betankt werden als das BEV. Jedoch verbraucht dieses das 2,4-fache der Energie eines BEV aufgrund des schlechteren Wirkungsgrades [28].

2.3.2 Analyse des Fahrzeugmarktes

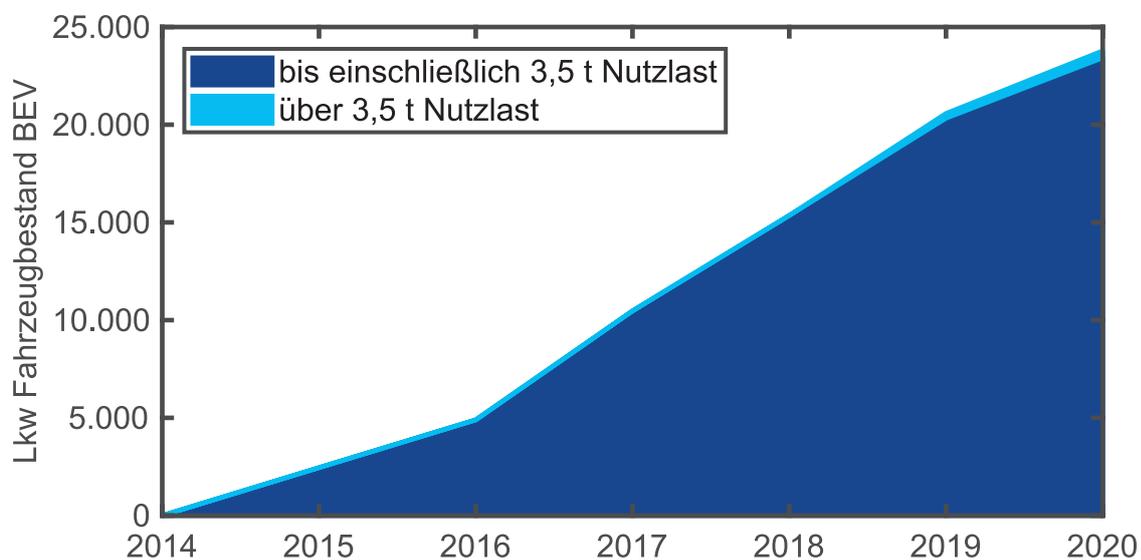


Abbildung 2-12: Anzahl der BEV LKW in Deutschland, eigene Darstellung, Daten aus [29]

Im Jahr 2020 beträgt die Anzahl an LKW in Deutschland 3.385.763 [30]. In Abbildung 2-12 ist die Gesamtzahl der BEV LKW dargestellt. In dunkelblau ist die Zahl der LKW bis 3,5 t Nutzlast und in hellblau über 3,5 t Nutzlast abgebildet. Insgesamt beträgt die Anzahl der elektrischen LKW 23.780 und machen 0,007 % der LKW in Deutschland aus. Der Großteil dieser LKW entfällt mit 23.420 auf LKW bis 3,5 t Nutzlast. Die meisten Modelle davon sind mit 63 % die StreetScooter Work und zum Großteil bei der Deutschen Post im Einsatz [29]. Elektrische LKW mit einer Nutzlast von über 3,5 t weisen im Vergleich mit 360 Exemplaren eine geringere Menge auf.

2.3.3 Ladeinfrastruktur für batterie-elektrische LKW

Aufgrund der großen Batteriekapazität von LKW ist eine höhere Ladeleistung als bei PKW erforderlich. Aktuell existieren in Deutschland 632 öffentliche Ladesäulen mit einer Mindestladeleistung von 150 kW. Davon haben 394 Ladesäulen eine Ladeleistung von 350 kW [31]. Da jedoch nicht immer die notwendige Fläche für LKW gegeben ist, werden neue Ladeverfahren untersucht. Diese sind in Abbildung 2-13 dargestellt.

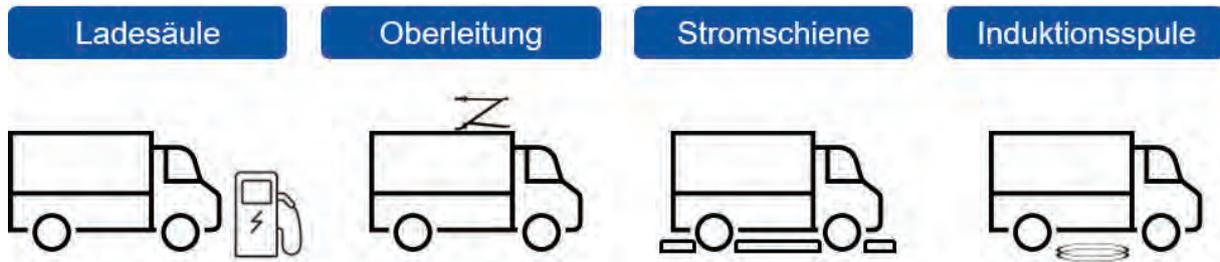


Abbildung 2-13: LKW Ladeverfahren

Die Oberleitung und die Stromschiene versorgen den LKW bei Kopplung mit Gleichstrom und sind konduktive Ladeverfahren. Für die Versorgung über eine Oberleitung werden mehrere Komponenten benötigt. Diese beinhalten die Energieeinspeisung aus dem Mittelspannungsnetz, Umspannstation an der Autobahn, Masten und Oberleitungen. Aufgrund geringeren Strombedarfs und gleichmäßiger Verteilung über das Streckennetz besitzen Oberleitung-LKWs einen energiewirtschaftlichen Vorteil [32]. Aktuell werden in Deutschland die Oberleitungen auf zwei Teststrecken untersucht. Die Stromschienen ersetzen die Masten und Oberleitungen durch konduktive Ladeschienen. Das Laden mithilfe von Induktionsspulen erfolgt kontaktlos und ist in der Leistungsfähigkeit beschränkt. Die Induktionsspulen werden unter der Fahrbahn installiert und es werden zusätzlich eine Transformatorstation und Wechselrichter benötigt.

3 Charakterisierung des Verbrauchsprofils der Prozesse in einem Logistikzentrum

Im folgenden Kapitel wird das Vorgehen der Prozessaufnahme bzw. IST-Analyse des Logistikzentrums beschrieben. Nachfolgend werden der Aufbau sowie die relevantesten Prozesse und Bereiche des Beispiellogistikzentrums dargestellt. Ebenfalls ist für die im Projekt durchzuführende Simulation der elektrische Aufbau des Logistikzentrums sowie der elektrische Verbrauch elementar. Abschließend erfolgt die Darstellung der ermittelten Lastgänge relevanter Verbraucher sowie identifizierte Gleichzeitigkeiten.

3.1 Erfassung der logistischen Prozesse in einem exemplarischen Logistikzentrum

Um Prozesse für ein vorliegendes System abbilden zu können, muss zu Anfang eine Ist-Aufnahme durchgeführt werden. Diese Ist-Aufnahme dient dazu, das vorliegende System zu erfassen, dessen Schnittstellen zu ermitteln und den aktuellen Zustand zu beurteilen. Eine Ist-Aufnahme gilt als Grundlage unter anderem der Konzeptentwicklung, Planung von neuen Arbeiten und als Hilfestellung für die Auswahl neuer Betriebsmittel. [11, p. 234]

Zu Beginn einer Ist-Aufnahme oder auch Ist-Analyse wird das zu untersuchende System ausreichend erfasst. Hierfür wird ein Konzeptmodell erstellt, welches Auskunft über die Systemgrenzen, die vorhandenen Elemente und ihrer Beziehungen zueinander gibt. Folglich wird die Gestaltung des Konzeptmodells Einfluss auf die Genauigkeit im späteren Modell nehmen. Um Fehler in der späteren Modellierungsphase zu vermeiden, müssen getroffene Festlegungen ausreichend dokumentiert werden. [33, p. 151ff.]

Die Ist-Aufnahme startet mit der eindeutigen Zielbeschreibung. Hinzu kommt die Beschreibung des zu untersuchenden Systems samt deren Schnittstellen. Ist das System definiert, so müssen je nach Zielsetzung unterschiedliche Parameter erhoben werden. Diese sind mit Hilfe von bereits bekannten oder noch zu ermittelnden Daten zu erfassen. Beispiele für solche Parameter sind [11, pp. 234-237]:

- Prozesse des Materialflusses
- Informationsbearbeitungssysteme
- Daten des Materials, der Fördergüter oder Fördereinheiten
- Daten vorhandener Fördermittel und Lageranlagen
- Produktionstechnische Daten
- Daten externen Warentransports
- Betriebswirtschaftliche Daten
- sonstige Parameter

Mit der darauffolgenden Darstellung des Ist-Zustands endet die Ist-Aufnahme [11, pp. 234-237].

Parallel oder aufbauend auf die Ist-Aufnahme kann zusätzlich eine Ablaufstudie erstellt werden. Diese Ablaufstudie soll die Vorgänge im Materialfluss und im Informationsfluss samt deren Abhängigkeiten aufzeigen. Dies kann mit Hilfe einfacher Skizzen geschehen. [11, p. 242]

Im Anschluss auf die Ablaufstudie kann zusätzlich eine Belastungsstudie erhoben werden. Bei der Erfassung beispielsweise eines Materialflusses beinhaltet diese Informationen über den Weg, die Zeit und die transportierte Menge. Des Weiteren beinhaltet die Belastungsstudie in diesem Fall noch Informationen über den Personaleinsatz und die verwendeten Fördermittel. [11, p. 244f]

Da ein Prozess modelliert werden soll, muss das Konzeptmodell eine passende Prozessdarstellung umfassen. Zur Prozessdarstellung gibt es viele unterschiedliche Methoden, die je nach Verwendungszweck mehr oder weniger geeignet sind. In vorherigen Arbeiten des IFT wurde die Methode VDI 3300 zur Prozessaufnahme mittels einer Nutzwertanalyse am höchsten bewertet. Durch die visuelle Abbildung des Materialflusses auf einer Materialflussskizze und der Datenerfassung mit Hilfe des Materialflussbogens erfüllt diese Methode die geforderten Kriterien am besten.

Dennoch sind nicht alle erforderlichen Kriterien im vollen Umfang erfüllt. So ist der Ablauf des Materialflusses zu erkennen, dieser kann jedoch bei komplexen Logistikprozessen unübersichtlich werden. Auch Ebenenwechsel sind nicht explizit aufgeführt. Zusätzlich beinhaltet die VDI 3300 einige für die Aufnahme eines Materialflusses nicht benötigte Daten. Sie soll daher im Folgenden angepasst werden. Angelehnt an die VDI 3300 wird eine neue Methode entwickelt, welche möglichst alle aufgestellten Kriterien erfüllt. Die Untergliederung in Materialflussskizze und des Materialflussbogens wird bei dieser Methode beibehalten und weiterentwickelt. Diese weiterentwickelten Unterlagen werden als „Materialflussskizze der Logistik“ beziehungsweise „Materialflussbogen der Logistik“ betitelt. Im Folgetext werden sie vereinfacht als Materialflussbogen und Materialflussskizze bezeichnet.

In der Materialflussskizze der Logistik wird aus Gründen der Übersicht, anders als bei der VDI 3300-Materialflussskizze, mit Farben gearbeitet. So werden durch die Farbgebung einzelnen Transportwege nachvollziehbar. Fertig verpackte, absendebereite oder auch leere Ladeeinheiten können ebenso mit Hilfe von Farben gekennzeichnet werden. Breite, farbige Pfeile stehen für einen Transport mit stetigen Fördermitteln. Dünne, schwarze Pfeile machen den Transport über unstetige Fördermittel ersichtlich. In Tabelle 3-1 sind alle eingeführten Symbole aufgezeigt.

Tabelle 3-1: Symbole der neuen Methode

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
|  | Transport über Stetigförderer (z. B. über Kettenförderer) |
|  | Richtungswechsel oder Drehen (z. B. durch Drehtisch) |
|  | Ebenenwechsel (z. B. durch Aufzug) |
|  | Transport über Unstetigförderer (z. B. über Stapler) |
|  | Handhaben, Kontrollieren und Liegen |
|  | Strecken Kennzeichnung bei Transport auf einer Ebene |

Da der VDI-Materialflussbogen nicht im vollen Umfang benötigt wird und einige Dinge ergänzt werden sollen, ist auf dieser Grundlage der Materialflussbogen der Logistik entstanden. Dieser neue Materialflussbogen unterscheidet sich in einigen Inhalten vom VDI 3300 Materialflussbogen. Der ursprüngliche Materialflussbogen der VDI 3300 ist in Anhang 1 aufgezeigt. Ein Beispiel für einen Materialflussbogen/-skizze der Logistik findet sich in Anhang 2. Wenn nötig, kann die Materialflussskizze aus Gründen der Übersichtlichkeit in mehrere einzelnen Abschnitte geteilt werden. Deren Lage sollte jedoch mit Hilfe einer Gesamtübersicht verdeutlicht werden.

Diese Methodik wird zur Ist-Aufnahme beim assoziierten Partner Häfele angewendet. Die Aufnahme wird aus Datenschutzgründen im Abschlussbericht nicht dargestellt. In den folgenden

Unterkapiteln werden lediglich der Aufbau und logistische Prozesse mit hohem Einflussfaktor beschrieben.

3.1.1 Logistischer Aufbau des Logistikzentrums

Das betrachtete Logistikzentrum entspricht dem klassischen Aufbau, wie er bereits in Kapitel 2.1 beschrieben ist. Es stellt ein typisches Versandzentrum dar, welches zum Versand von Waren dient. Durch externe LKW werden Waren angeliefert und durch Bestellungen von Kunden abgeholt. Das Versandzentrum hat im Wareneingang 14 Rampen mit Toren, davon drei am WE A und elf am WE B. Der Wareneingang ist nicht aufgeteilt und verfügt über 28 Rampen. Die Abbildung 3-1 stellt den Umriss des beispielhaften Versandzentrums dar.

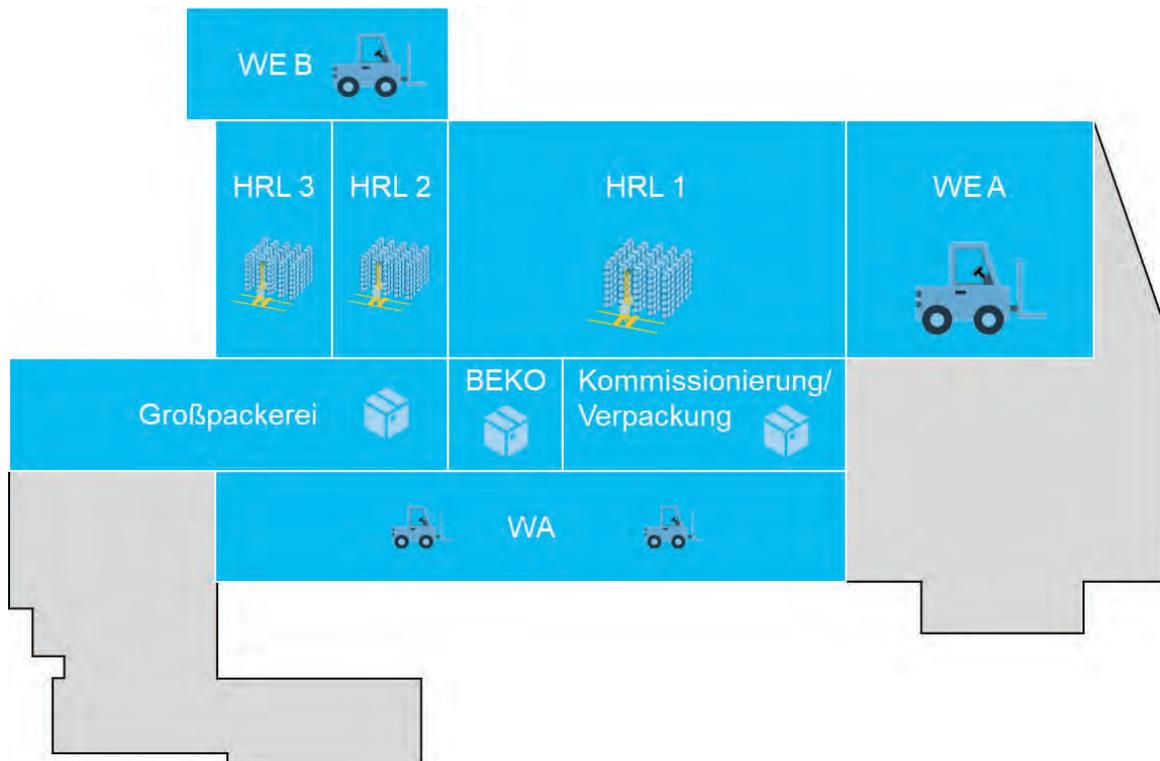


Abbildung 3-1: Layout des Beispiellogistikzentrums (Eigendarstellung)

Der Wareneingang A (WE A) beliefert über Flurförderfahrzeuge und Fördertechnik hauptsächlich das HRL 1, während das HRL 2 und das HRL 3 über Wareneingang B (WE B) beliefert werden. Neben den drei HRL gibt es im Beispiellogistikzentrum ein Flachlager, ein Sperrgutlager, ein Anbruchlager, ein Musterlager, ein Messelager und ein Stangenlager. Mit einem Kundenauftrag werden nach der Auslagerung und Kommissionierung die Waren wahlweise in die Großpackerei, Kleinpackerei oder durch Behälterkommissionierung² (BEKO) transportiert. Diese unterscheiden sich vor allem in dem Gewicht und der Menge der zu verpackenden Lieferung. Kundenaufträge mit schweren oder großen Waren werden in der Großpackerei zusammengestellt, verpackt und über Flurförderfahrzeuge zu der jeweiligen Rampe im WA transportiert. Die Flurförderfahrzeuge haben stationäre Ladepunkte bzw. Ladestationen in den einzelnen Bereichen. Die Kleinpackerei und BEKO stellen Kundenaufträge mit kleineren, leichteren Paketen zusammen. Diese werden anschließend über ein Förderband zum WA befördert. Im Wareneingang werden die Waren nach ihren Zielorten sortiert und in die LKWs verladen. Größere Kundenaufträge werden über Paletten in die LKW mit Flurförderfahrzeugen verladen.

² In der Behälterkommissionierung werden die einzelnen Behälter mit kommissionierten Waren zusammengefasst und anschließend durch Personal verpackt.

Zur Abgrenzung des Systems werden aus der folgenden Betrachtung das Flachlager, das Sperrgutlager, das Anbruchlager, das Musterlager, das Messelager sowie das Stangenlager ausgeschlossen. Auch alle indirekten Bereiche der Produktion, der Instandhaltung und der Boxenbau bzw. Messebau werden nicht weiter betrachtet. Die Abwicklung von Fehlerprozessen (beispielsweise der Differenzenstelle) und Retourprozessen sind ebenfalls nicht Gegenstand dieses Forschungsprojekts.

3.1.2 Verbrauchsintensive Anlagen bzw. Prozesse

Als verbrauchsintensive Anlagen bzw. Prozesse mit dem meisten Druchsatz haben sich durch die IST-Aufnahme und den Messungen des elektischen Verbauchs (beschrieben in Kapitel 3.2) folgende herausgestellt:

- Hochregallager
- Flurförderfahrzeuge als Unstetigförderer
- Behälterkommissionierung
- Stetigförderer

Hochregallager:

Die drei HRL besitzen unterschiedliche Automatisierungsgrade. In allen Hochregallagern wird im Untergeschoss eingelagert und in einem der Obergeschosse ausgelagert. Alle HRL werden mittels eines chaotischen Lagersystem betrieben. Dies bedeutet, dass jede neue Einlagerung einen eigenen Lagerplatz bekommt, unabhängig davon, ob derselbe Artikel bereits auf einem anderen Lagerplatz steht. Aus dem HRL 1 wird aufgrund der hohen Lagerplatzanzahl mit 76 % am meisten Ware entnommen. Mit 16 % sind Sonstige Entnahmen die zweit größte Position. Sie enthalten unter anderem Entnahmen aus dem Flachlager, dem Messelager, dem Anbruchlager oder dem Stangenlager. Das HRL 3 ist mit 6 % das HRL mit den zweitmeisten Entnahmen. Das HRL 2 hat mit 2 % einen sehr geringen Entnahmeanteil. Der Anteil der Lagerentnahmen ist in der Abbildung 3-2 dargestellt.

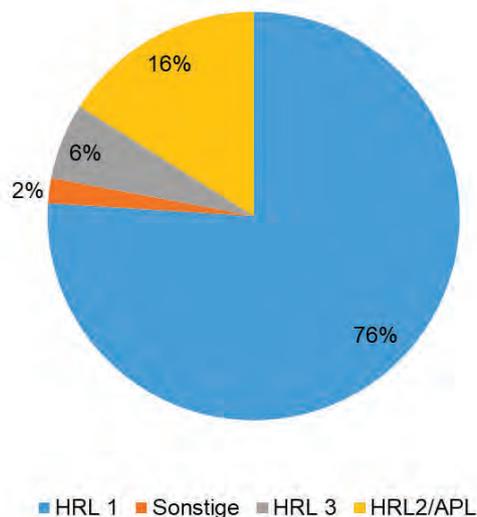


Abbildung 3-2: Anteil der Lagerentnahmen (Eigendarstellung)

Flurförderfahrzeuge als Unstetigförderer:

Im Beispiellogistikzentrum gibt es 93 Flurförderfahrzeuge, welche in Hochhubwagen, Deichselhochhubwagen und Gabelstapler unterscheiden werden. Deichselhochhubwagen können über das normale Stromnetz mit 230 V geladen werden. Alle anderen, ausgenommen der mit

Gas betriebene Gabelstapler, besitzen jeweils eine eigene Ladestation in der jeweiligen Abteilung. Zusätzlich gibt es jeweils in den Wareneingängen, dem Warenausgang und dem Stangenlager die Möglichkeit Ladevorgänge bei hoher Belastung mit Hilfe von Wechselbatterien zu überbrücken.

Behälterkommissionierung:

Vorwiegend bekommt die BEKO die einzelne Ware in blauen Behältern über Förderbänder von dem HRL 1, in dem sie bereits vorkommissioniert wurde. Daraufhin stellt die BEKO die Kundenaufträge selbststeuernd zusammen. Jeder Behälter enthält ausschließlich eine Position des Kundenauftrags. Auf den direkt anschließenden Packstationen werden die Aufträge verpackt. Die BEKO wird als ein gesamtes System betrachtet. Da nicht ausreichend Daten zur Verfügung gestellt werden und der Stromverbrauch nicht eindeutig zugeordnet werden kann, wird die BEKO im Projekt nicht weiter betrachtet.

Stetigförderer:

Transporte mit Hilfe von aufgeständerten Stetigförderern werden im Beispiellogistikzentrum über Rollenförderer, Kettenförderer und Förderbänder getätigt. Mit Hilfe von Drehtischen ist ein Richtungswechsel dieser Förderer möglich. Während der Prozesse kommt es immer wieder zu Wechseln zwischen Kettenförderer und Rollenförderer. Ein Wechsel zwischen stetigen und unstetigen Fördermitteln wird bis auf wenige Ausnahmen über Hubtische realisiert. In der Kleinpackerei werden zusätzlich stetig fördernde flurfreie Hängeförderer für die Zuführung von Packmaterial und Füllmaterial an die einzelnen Packstationen verwendet.

3.2 Bestimmung des elektrischen Verbrauchs der identifizierten Prozesse

Um Simulationen des Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums durchführen zu können, ist der elektrische Verbrauch der einzelnen logistischen Komponenten und Prozesse relevant. Daher wird in diesem Unterkapitel zunächst der elektrische Aufbau eines Logistikzentrums in Form von an die Transformatorstation angeschlossenen Einzelverbrauchern vorgestellt, ehe die verwendeten Methoden zur Erfassung des Verbrauchs im Forschungsprojekt thematisiert werden. Abschließend erfolgt die Darstellung der ermittelten Lastgänge relevanter Verbraucher sowie identifizierte Gleichzeitigkeiten.

3.2.1 Elektrischer Aufbau eines Logistikzentrums

Das Versandzentrum kann elektrisch als kumulierte Last aller Verbraucher dargestellt werden, und ist über eine MS/NS-Transformatorstation an einem Strang des Mittelspannungsnetzes angeschlossen. Die Position des Versandzentrums auf dem Strang ist abhängig von seiner Entfernung zum versorgenden HS/MS-Umspannwerk. Das untersuchte Versandzentrum besitzt zusätzlich eine PV-Anlage, welche ebenfalls am selben Knoten im Mittelspannungsnetz angeschlossen ist. Eine solche Darstellung kann allgemein auch auf andere Logistikzentren übertragen werden (mit oder ohne PV-Anlage). Je nach Anzahl an Gebäuden und benötigter Anschlussleistung kann ein Logistikzentrum auch über mehrere solcher Netzanschlusspunkte verfügen. Der Übersicht halber wurde in diesem Bericht jedoch die Darstellung mit einem Netzanschlusspunkt thematisiert.

Die Last eines Logistikzentrums lässt sich nun mit den Analysen aus 3.1 auf die einzelnen Verbraucher aufteilen. Während der Netzbetreiber lediglich die kumulierte Last am Netzanschlusspunkt misst, können interne Messungen innerhalb eines Logistikzentrums Aufschluss über diese einzelnen Energieverbräuche geben. Abbildung 3-3 zeigt den internen elektrischen

Aufbau eines exemplarischen Logistikzentrums, welches sich beispielsweise aus Förderanlagen, Hochregallagern, Ladestationen von elektrischen Flurförderfahrzeugen und anderen Lagertypen zusammensetzt. Diese sind niederspannungsseitig an die Transformatorstation des Logistikzentrums angeschlossen. Die Abbildung thematisiert dabei „konventionelle“ bereits vorhandene Anlagen im untersuchten Versandzentrum. Elektromobilität und Energiespeicher als zukünftige Komponenten werden in 4.3.2 und 5 thematisiert.

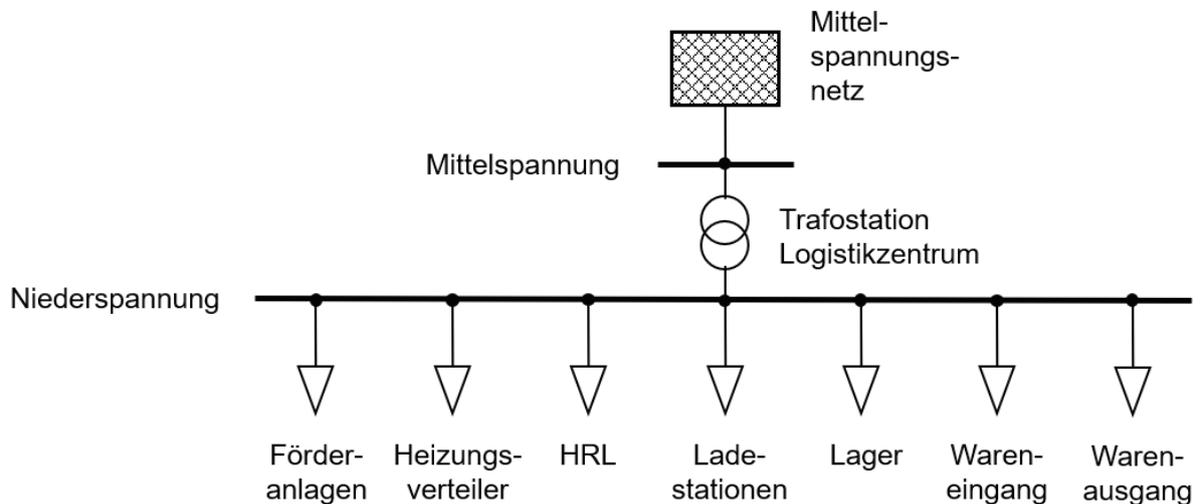


Abbildung 3-3: Elektrischer Aufbau eines exemplarischen Logistikzentrums

3.2.2 Vorstellung der verwendeten Methoden zur Ermittlung von Energieverbrauch und Lastgang

Im Rahmen des Projektes wurden drei verschiedene Methoden genutzt, um Energiebedarf und Lastgang der in 3.1 ermittelten Prozesse in einem Logistikzentrum zu bestimmen:

- Messung des Netzbetreibers am Netzanschlusspunkt
- Messungen innerhalb des Versandzentrums
- Simulation zum Hochrechnen gemessener Profile

Die standardmäßige Messung des Netzbetreibers am Netzanschlusspunkt von Kundenstationen (MS/NS) wurde im ersten Schritt dazu genutzt, einen Überblick über die aggregierte Last des gesamten Versandzentrums zu erhalten. Für die Charakterisierung der Last und Einspeisung des Zentrums ist ein Nachteil dieser Messung jedoch, dass nur Netzbezug oder Netzurückspeisung ersichtlich sind und nicht die tatsächlichen Größen von Verbrauch und Erzeugung. Die Lastgangmessung des Netzbetreibers enthält Zeitreihen von Wirk- und Blindleistungsbezug sowie Wirk- und Blindleistungseinspeisung aufgelöst in 15-Minuten-Mittelwerten.

Messungen der einzelnen Verbraucher und Erzeuger innerhalb des Versandzentrums bieten daher nicht nur die Möglichkeit, den tatsächlichen kumulierten Verbrauch und die tatsächliche PV-Erzeugung zu ermitteln, sondern ermöglichen auch eine Charakterisierung wichtiger Einzelverbraucher. Die Zeitauflösung der Messung kann hier innerhalb der Grenzen der verwendeten Messgeräte frei variiert werden, was auch die Abbildung kurzfristiger Spitzen ermöglicht, die im 15-Minuten-Mittelwert möglicherweise nicht ersichtlich sind. Zur Messung der Einzelverbraucher wurde im Projekt ein eigenes Messsystem zusammengestellt, dessen Aufbau in 3.2.3 beschrieben wird. Ergänzend konnte auf Daten des Versandzentrums-eigenen Messsystems zurückgegriffen werden.

Ein Großteil der Verbraucher war im Projekt messbar, jedoch konnte durch die Verwendung von Hochrechnungen die Datenbasis noch weiter vergrößert werden. So wurde aus den Daten

der gemessenen Gänge der Hochregallager ein Datensatz für das gesamte Hochregallager erstellt. Auch zukünftig mögliche Verbraucher wie Elektromobilität konnten durch Simulation trotz nicht vorhandener Messdaten nachgebildet werden.

3.2.3 Aufbau des verwendeten Messsystems

Die genaue Anzahl der erforderlichen Messgeräte wurde nach einem Besuch der Räumlichkeiten des Versandzentrums ermittelt. Anhand der Verteilung der relevanten Verbraucher innerhalb des Logistikzentrums und der bereits im Gebäude installierten Messtechnik (Eigentum des Versandzentrums), wurde ein entsprechendes Messsystem dimensioniert. Insgesamt wurden 41 Verbraucher identifiziert, an denen eine Lastgangmessung denkbar war. Aufgrund der großen räumlichen Verteilung der zu messenden Verbraucher wurde als Lösung ein Einsatz von 6 mobilen Netzanalysatoren geplant. Jeder Netzanalysator wurde mit 4 Messgeräten ausgerüstet und kann autark betrieben werden. Trotz der mobilen Ausführung wurde auf eine berührungssichere Bauweise geachtet. Dadurch konnten die Netzanalysatoren ohne große Eingriffe in die Infrastruktur der örtlichen Gegebenheiten installiert werden. Ein variabler Einsatzort der Messungen an verschiedenen Verbrauchergruppen war so ebenfalls gegeben.

Für die Messtechnik wurden die Netzanalysatoren UMG 604-E von Janitza ausgewählt. Diese Geräte bieten eine hochaufgelöste Messwertaufzeichnung, wodurch die relativ kurzen Arbeitsintervalle (<1 Minute) der Verbraucher berücksichtigt werden. Ein weiterer Vorteil der Messgeräte von Janitza ist ihre Plug-&-Play Fähigkeit sowie der offene Zugriff auf das unterstützte Modbus-Protokoll. Vergleichbare Angebote anderer Hersteller boten entweder nicht die entsprechende Funktionalität (Synchronisierbarkeit der Messstellen, Kommunikationsschnittstelle, zeitliche Auflösung) oder skalierten schlechter durch einen höheren Bedarf an Peripheriegeräten und -software.

Insgesamt wurden für die Erfassung der Zeitreihen 24 Janitza UMG 604 benötigt. Zusätzlich gestützt werden sollte die Untersuchung durch 2 Geräte der Bauart UMG 508, die eine ausführliche Power Quality Analyse ermöglichen. Dadurch konnten sich detaillierte Rückschlüsse auf die Spannungs- und Stromqualität innerhalb des elektrischen Industrienetzes ziehen lassen. Durch die Typklasse 0,2S des UMG 508 war eine der Aufgabe entsprechende hohe Messgenauigkeit gegeben.

Eine schematische Darstellung des Aufbaus eines Messkoffers mit vier Messgeräten zeigt Abbildung 3-4. Ein Messgerät misst dabei den Strom jedes Verbrauchers über vier eigene Stromwandler (L1/L2/L3/N). Die Spannung am Anschlusspunkt der Verbraucher wird einmal pro Messkoffer 5-polig (L1/L2/L3/N/PE) ermittelt. Dadurch können Strom, Spannung, Frequenz, Wirk- und Blindleistung sowie die Harmonischen Oberschwingungen von Strom und Spannung bis zur 40. Harmonischen ermittelt werden. Der Messkoffer ist zur Sicherung der Daten mit einem Server vor Ort verbunden, auf dem die GridVis Software der Firma Janitza läuft. Die Messwerte werden zunächst intern auf den Messgeräten gespeichert und einmal stündlich abgerufen und in GridVis auf dem Server gespeichert. Einmal pro Tag werden die Daten als csv-Datei exportiert. Der Datenzugriff wurde mithilfe eines Remote Access zum Server auch aus der Ferne ermöglicht. Die Messgeräte ermöglichten im Projekt vor allem eine detaillierte Messung der einzelnen Gänge der Hochregallager, wodurch der Zusammenhang zwischen Bewegungsrichtungen und Lastgang ermittelt werden konnte.



Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des aufgebauten Messkoffers

3.2.4 Lastgang eines Logistikzentrums

In Abbildung 3-5 ist der Lastgang des Logistikzentrums einer Woche dargestellt. In der Darstellung wurde dabei die Wirkleistung auf die Nennleistung der das Logistikzentrum versorgenden Transformatorstation normiert.

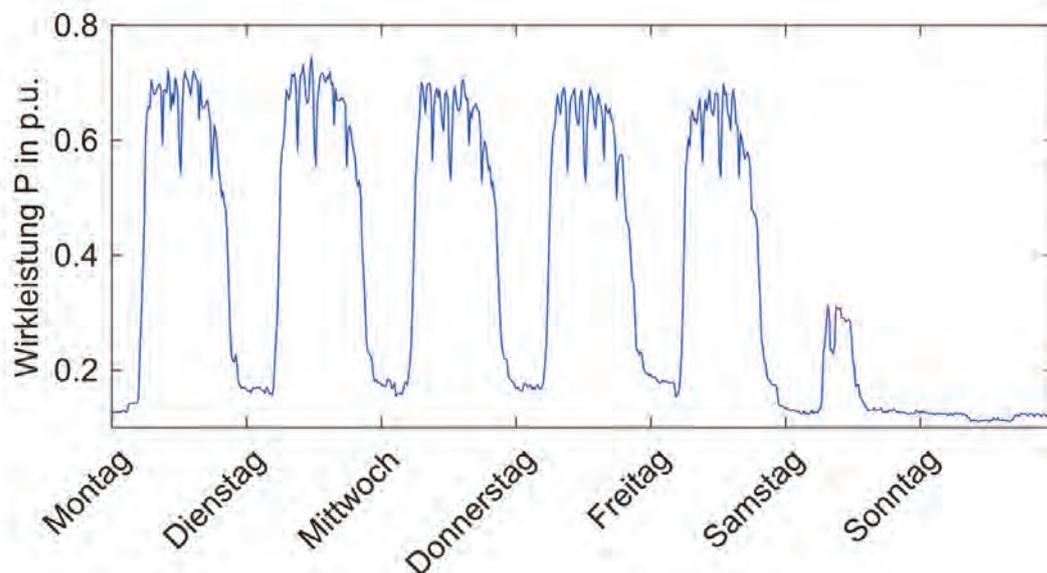


Abbildung 3-5: Wirkleistung eines Logistikzentrums in p.u. – gemessene Viertelstunden-Mittelwerte

Ein Wert von 1 p.u. würde somit bedeuten, dass ein zukünftiger Ausbau des Transformators in Betracht gezogen werden muss. Diese Betrachtungsweise ist besonders bei einer Untersuchung von zukünftig hinzukommenden Lasten wie der Elektromobilität interessant. Im Lastgang ist deutlich der Tagbetrieb der fünf Werktage zu erkennen. Der Einbruch in der Leistung ist auf den Schichtwechsel der Großverbraucher zurückzuführen. An Samstagen ist die Last

stark reduziert, da nur sehr wenige Mitarbeiter im Logistikzentrum tätig sind. Insgesamt erreicht das Logistikzentrum eine maximale Leistung von 0,74 p.u..

3.2.5 Einzellastgänge der wichtigsten logistischen Prozesse

Im Folgendem sind die Lastgänge der wichtigsten logistischen Prozesse dargestellt. Dabei wurde für alle Lastgänge die gleiche Woche im Januar gewählt. Diese ist eine normale Woche ohne gesonderte Feiertage und das Logistikzentrum befindet sich im Normalbetrieb.

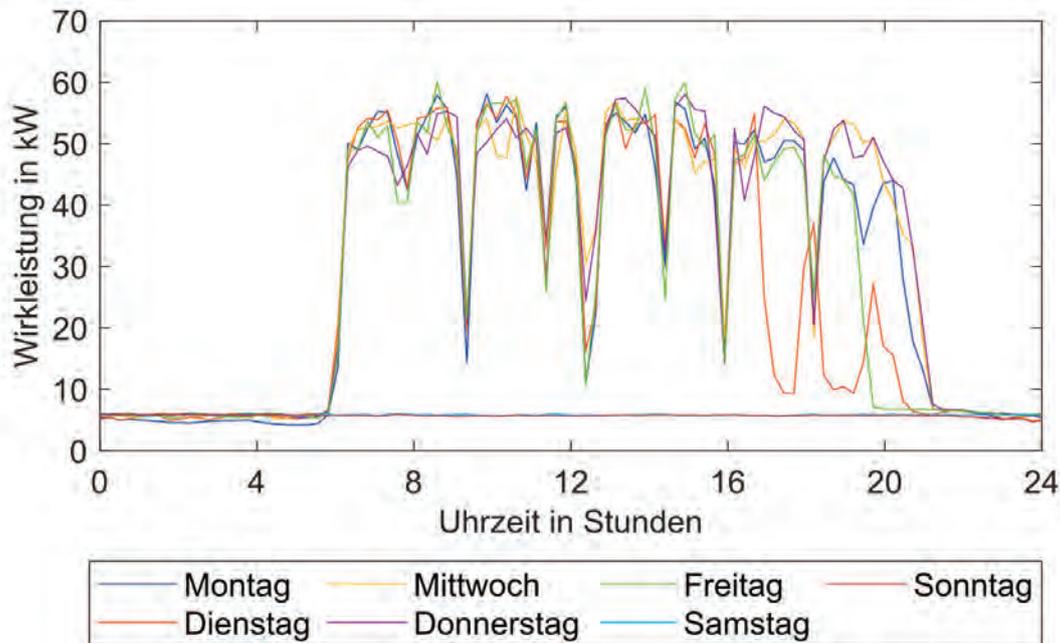


Abbildung 3-6: Hochregallager mit 18 RBG - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Wirkleistung

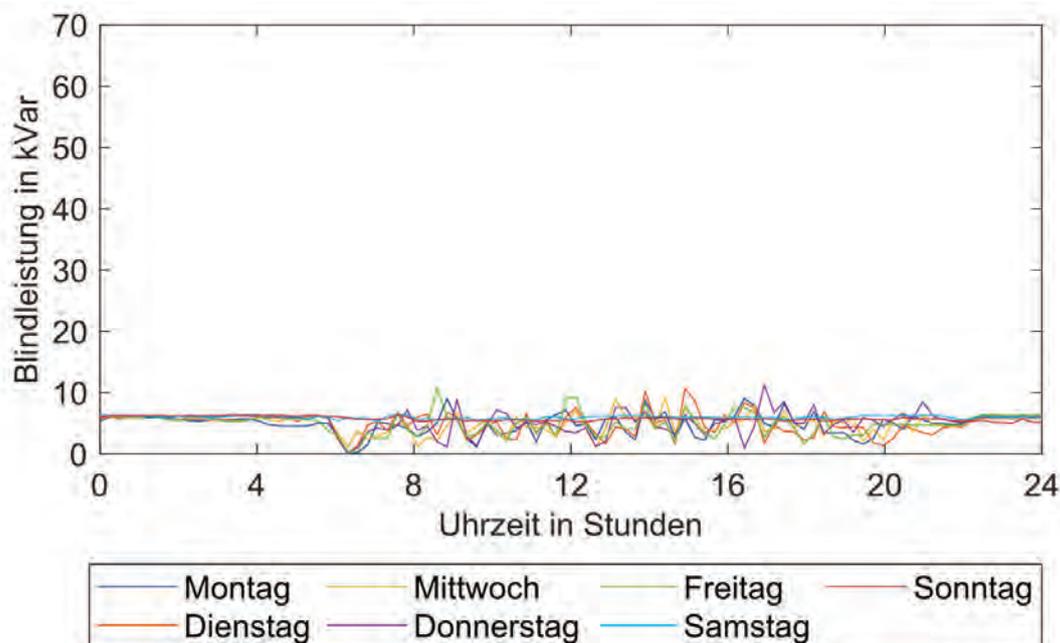


Abbildung 3-7: Hochregallager mit 18 RBG - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Blindleistung

In Abbildung 3-6 ist die Wirkleistung eines Hochregallagers (HRL) mit Viertelstunden-Mittelwerten dargestellt. Der Einbruch im Verbrauch ist auf die Schichtwechsel der Großverbraucher zurückzuführen. Insgesamt wurde in der Woche eine maximale Wirkleistung von rund 60 kW

erreicht. In nachfolgender Abbildung 3-7 ist die Blindleistung des Hochregallagers über den gleichen Zeitraum dargestellt. Das Maximum der Blindleistung liegt bei 11,28 kVar. Da die RGB-Prozesse sehr hohe Leistungen im Sekundenbereich erreichen, wurden für ein HRL zusätzlich Sekundenwerte gemessen.

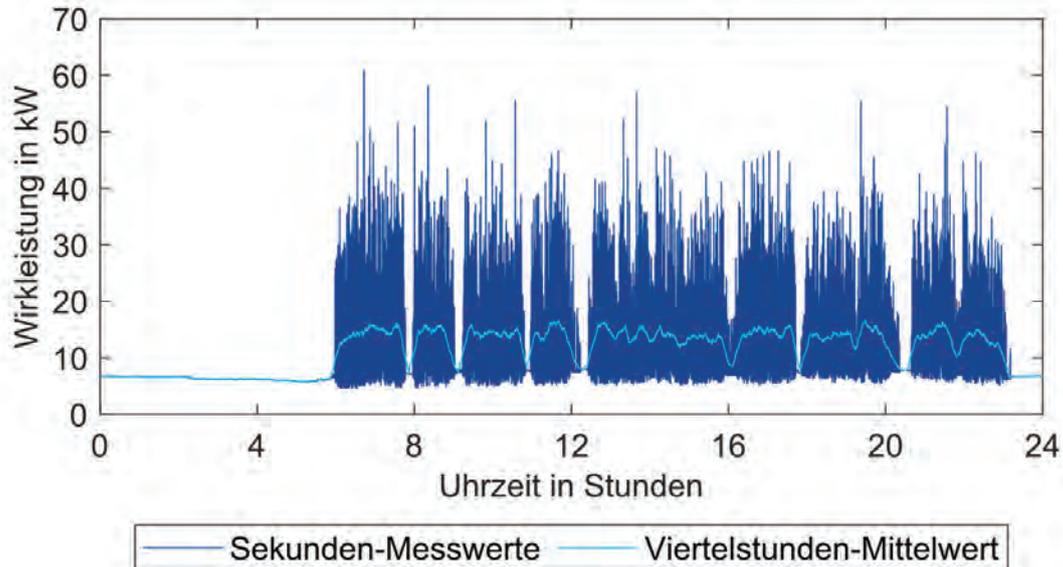


Abbildung 3-8: Sekunden-Messwerte und Viertelstunden-Mittelwerte eines HRL

In Abbildung 3-8 ist zu erkennen, dass die Lastspitzen der Sekunden-Messwerte deutlich über den Viertelstunden-Mittelwerten liegen. Während die Sekundenwerte ein Maximum von 60,88 kW erreichen, beträgt an gleicher Stelle der Viertelstunden-Mittelwert 14,48 kW. Die Hochregallager im Logistikzentrum sind mit Abstand die größten Verbraucher und machen zwischen einem Viertel und einem Drittel des Gesamtverbrauchs aus.

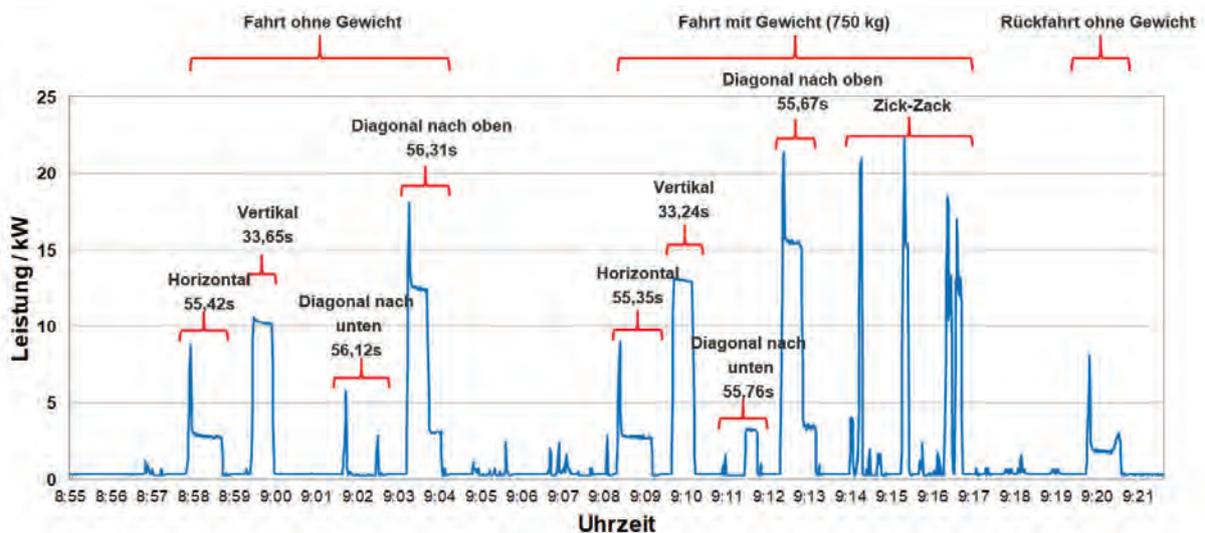


Abbildung 3-9: Leistung verschiedener Bewegungstypen eines Regalbediengeräts

Um den Verbrauch der einzelnen Regalbediengeräte eines HRL genauer zu charakterisieren, wurde eine Testfahrt mit einem dieser RGB durchgeführt und der resultierende Verbrauch verschiedener Bewegungsformen gemessen. Die RGB fahren sowohl horizontal als auch vertikal. In Abbildung 3-9 ist die Testfahrt mit und ohne Gewicht dargestellt. Bei der Testfahrt wurde

ein Gang in der gesamten Länge und Höhe abgefahren. Durch das Anfahren bei der horizontalen Fahrt und bei der vertikalen Fahrt nach oben kommt ein hoher Leistungsbedarf zustande. Die diagonale Fahrt nach oben setzt sich aus den Profilen der vertikalen und horizontalen Fahrt zusammen. Das Gewicht spielt nur bei der vertikalen Fahrt eine Rolle.

Neben den HRL sind Flurförderfahrzeuge eine wichtige Komponente von Logistikzentren. Diese können batterieelektrisch betrieben sein und so als mobile Speicher an Interesse gewinnen. In Abbildung 3-10 sind die einphasigen Ladevorgänge einer Woche eines Flurförderfahrzeugs zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das Fahrzeug immer nachts geladen wird. Dabei wird eine maximale Wirkleistung von 1,57 kW und eine maximale Blindleistung von 0,83 kVar erreicht. Flurförderfahrzeuge können auch dreiphasig geladen werden. Auch dazu wurden Messungen durchgeführt. Dabei betrug die Wirkleistung maximal 2,02 kW und die Blindleistung 1,46 kVar. Rechnet man die Messergebnisse auf alle 93 Flurförderfahrzeuge um, beträgt die Wirkleistung im Worst-Case Szenario 146,01 kW einphasig bzw. 187,86 kW dreiphasig bei gleichzeitigen Ladevorgängen. Wird eine Batteriekapazität von 15 kWh pro Fahrzeug angenommen, beträgt die Gesamtkapazität aller Fahrzeuge 1.395 kWh. Diese Kapazität könnte als Zwischenspeicherung überschüssiger Energie oder zur Glättung der Last genutzt werden.

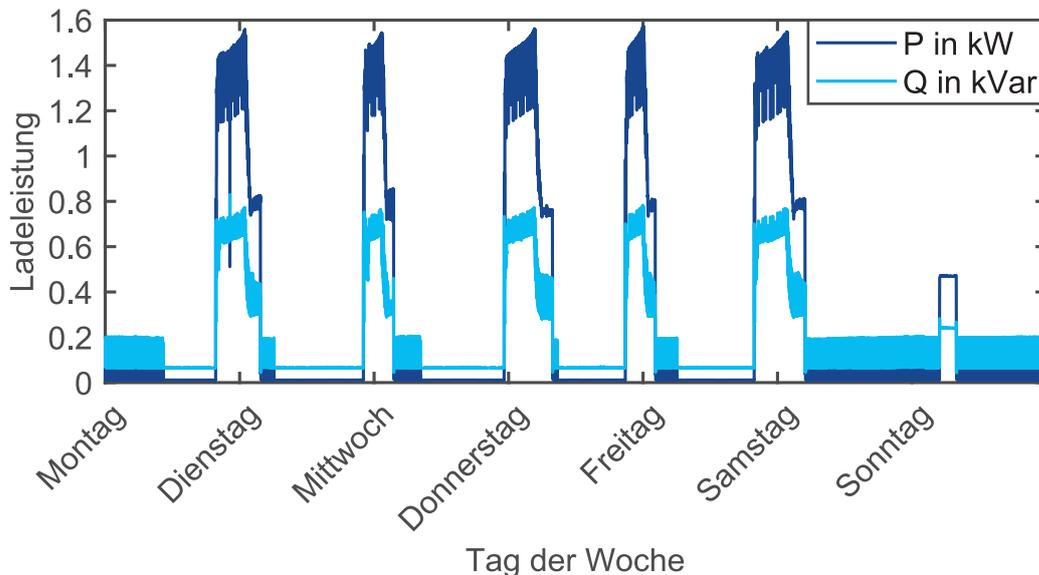


Abbildung 3-10: Einphasige Ladeleistung eines Flurförderfahrzeugs – gemessene Minutenwerte

Während es sich bei den Flurförderfahrzeugen um sogenannte Unstetigförderer handelt, gibt es auch wichtige Stetigförderer im Logistikzentrum: die Förderbänder. In Abbildung 3-11 sind gemessene Lastprofile der Förderbandanlagen im Logistikzentrum dargestellt. Es ist zu sehen, dass diese kontinuierlich betrieben werden. Dabei beträgt die maximale Wirkleistung 27,81 kW. In Abbildung 3-12 ist die Blindleistung der Förderbandanlagen abgebildet. Die Blindleistung beträgt maximal 23,45 kVar.

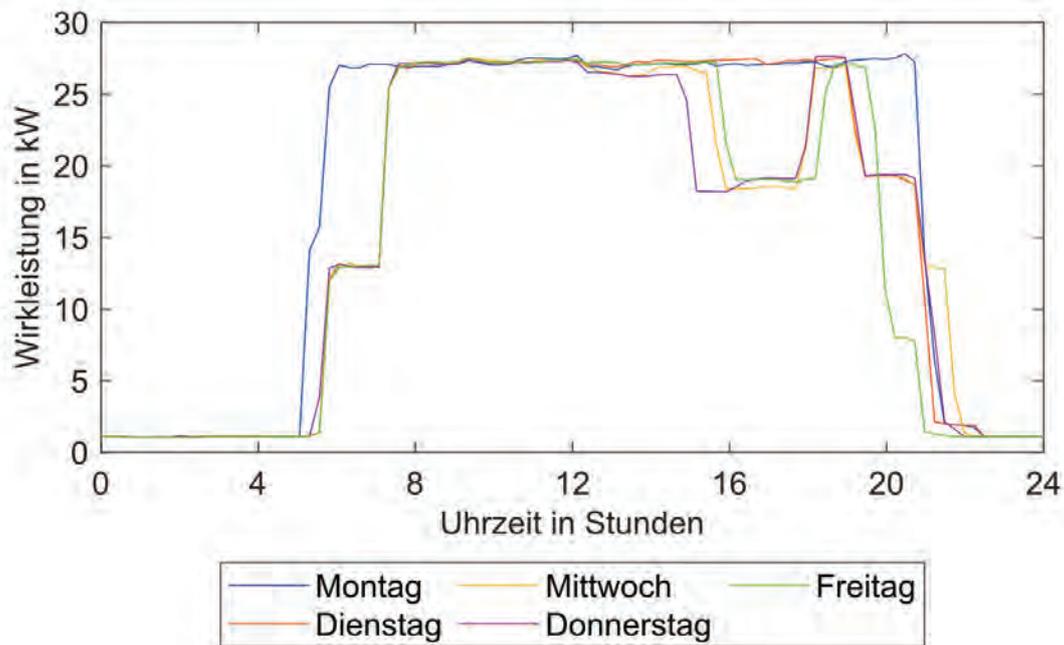


Abbildung 3-11: Förderbandanlagen - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Wirkleistung

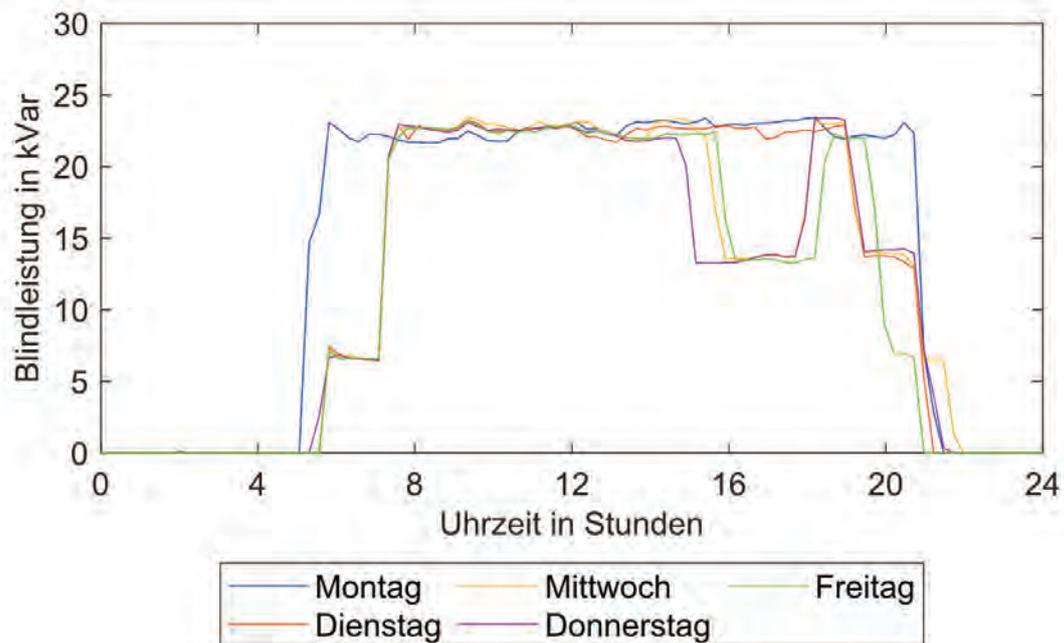


Abbildung 3-12: Förderbandanlagen - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Blindleistung

Neben den logistischen Komponenten sind auch zusätzliche Komponenten der Gebäudeinfrastruktur, wie die Heizungsverteiler nicht zu vernachlässigen. Deren Wirkleistung ist in Abbildung 3-13 zu sehen. Der Verlauf ist relativ konstant. In den Morgenstunden nimmt die Wirkleistung zu, da die Heizung zum Arbeitsbeginn höhergestellt wird. Das Maximum der Wirkleistung beträgt 24,36 kW. Die Blindleistung des Heizungsverteilers ist in Abbildung 3-14 zu sehen. Hier beträgt das Maximum 13,94 kVar. Insgesamt ergibt sich nur eine geringe Leistungsaufnahme, da das Logistikzentrum vorwiegend mit Gas beheizt wird. Dennoch sorgen gerade die Heizungsverteiler für eine auch außerhalb der Arbeitszeiten verbleibende Last.

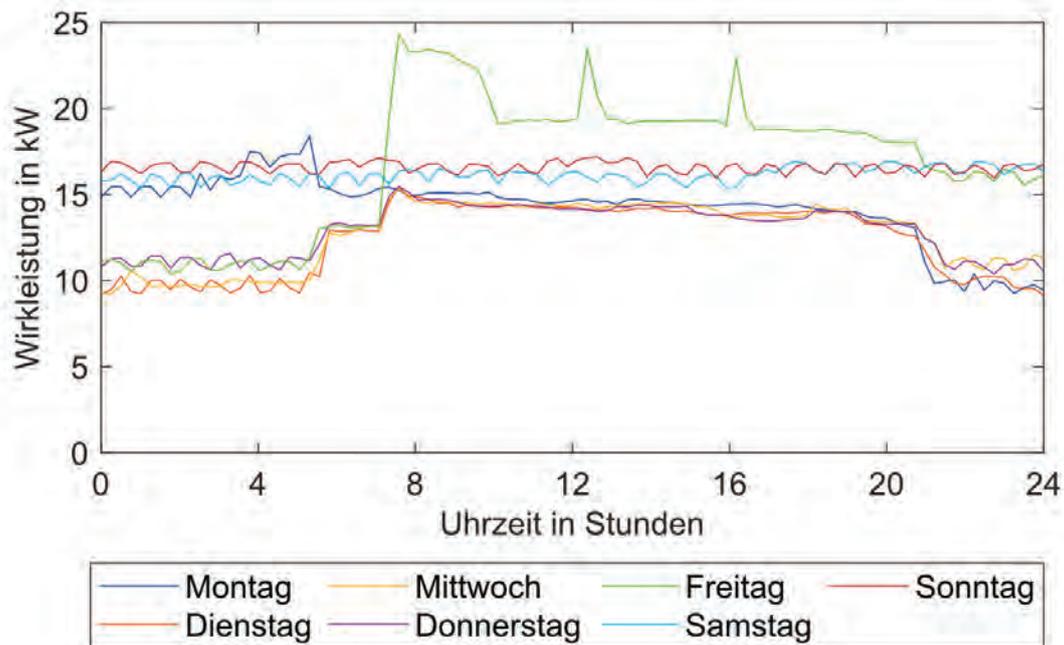


Abbildung 3-13: Heizungsverteiler - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Wirkleistung

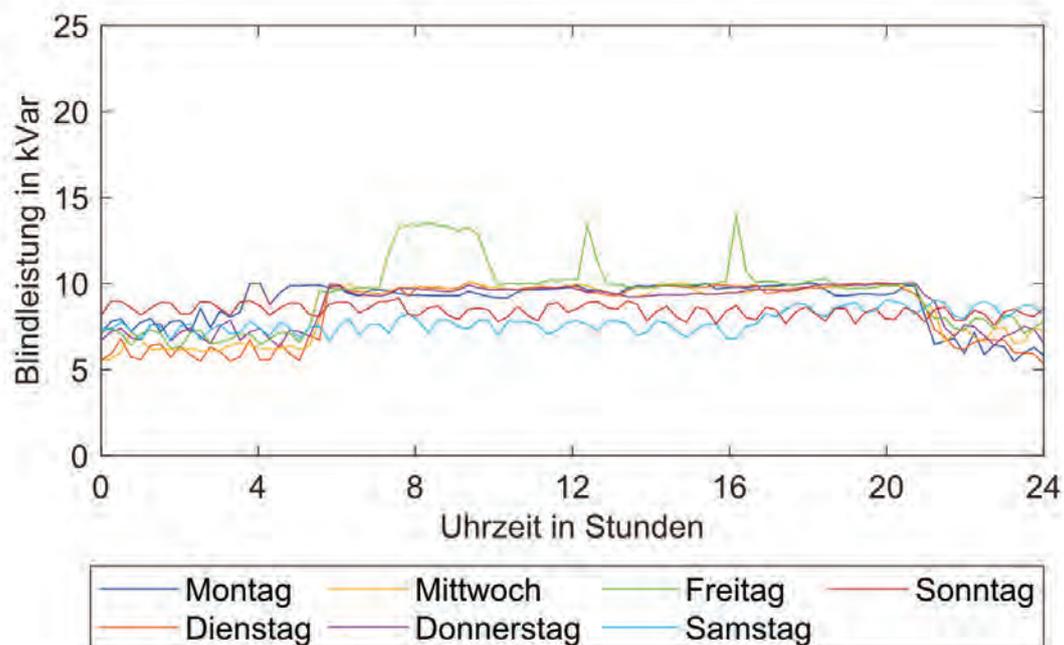


Abbildung 3-14: Heizungsverteiler - gemessene Viertelstunden-Mittelwerte der Blindleistung

3.2.6 PV-Erzeugung

Das Logistikzentrum verfügt bereits heute über eine eigene PV-Anlage. Deren Erzeugung an einem Tag ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Dabei beschreibt der dunkelblaue Verlauf den Tag mit der höchsten Erzeugung. Es wird eine maximale Wirkleistung von 0,21 p.u. erreicht. Im Jahr 2018 wurden von der PV-Anlage 250 MWh erzeugt. Der hellblaue Verlauf kennzeichnet die durchschnittliche PV Erzeugung an einem Tag. Hier ist der für eine Solaranlage typische glockenförmige Verlauf gut zu erkennen. Die minimale PV Erzeugung wird an Tagen, an denen die Module mit Schnee bedeckt sind, mit 0 p.u. erreicht.

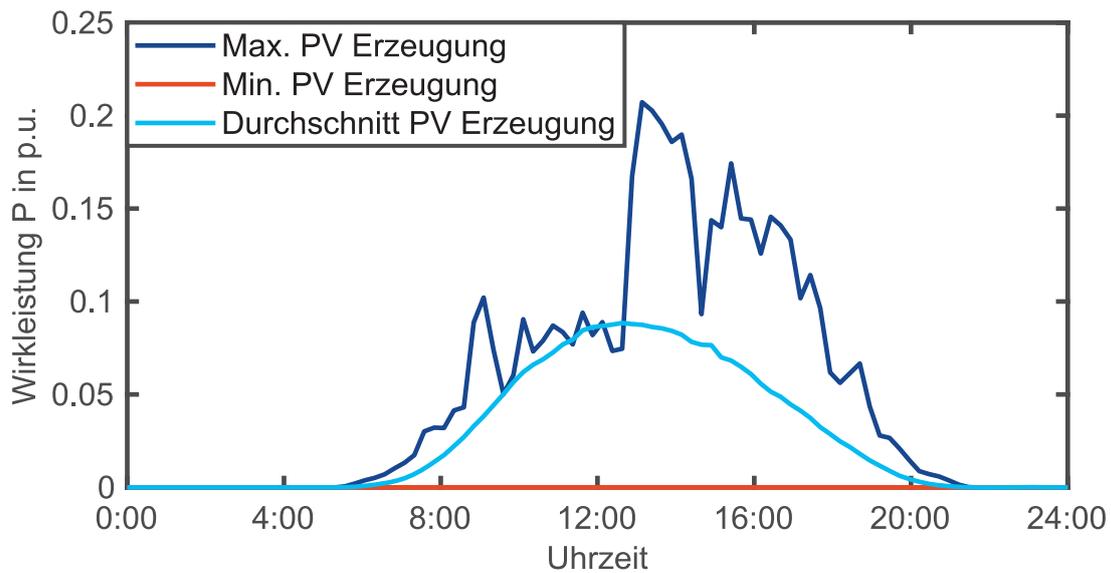


Abbildung 3-15: Erzeugung der PV-Anlage - gemessene Viertelstundenwerte

Wird statt des täglichen Verlaufs das jährliche Verhalten der PV-Erzeugung in Abbildung 3-16 betrachtet, so ist zu erkennen, dass im Sommer wesentlich mehr Energie als im Winter erzeugt wird.

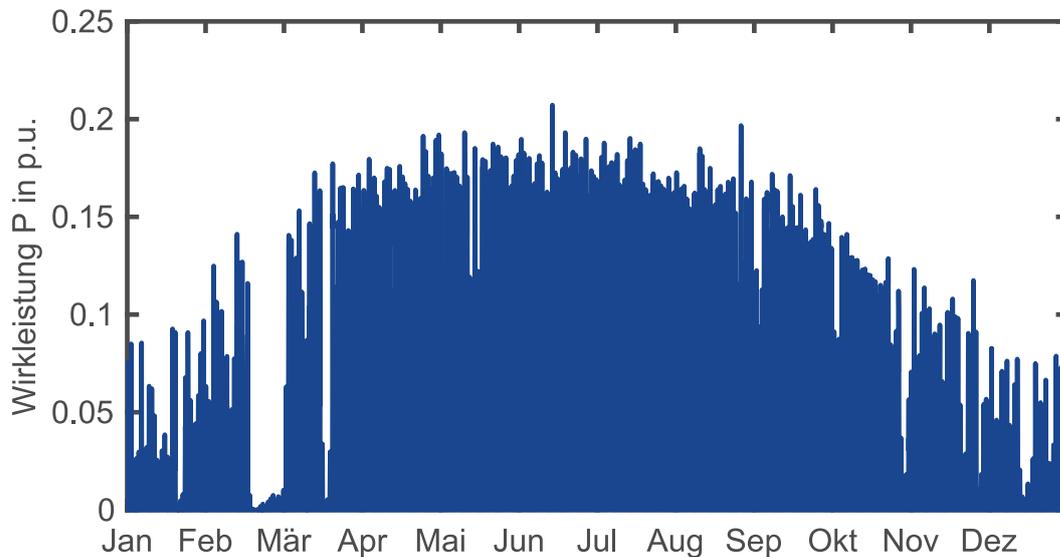


Abbildung 3-16: Erzeugte Leistung der Photovoltaikanlage in p.u. im Jahr

Neben der alleinigen Betrachtung der PV-Erzeugung ist die kombinierte Betrachtung mit der Last des Logistikzentrums von Interesse. Abbildung 3-17 stellt die durchschnittliche Wirkleistung des Logistikzentrums mit und ohne PV-Anlage über eine Woche dar. Dabei beschreibt der dunkelblaue Verlauf die Wirkleistung ohne die PV-Anlage und der rote Verlauf die Residuallast aus Logistikzentrum und PV-Anlage. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wirkleistung des Logistikzentrums in den Mittagstunden gesenkt werden kann.

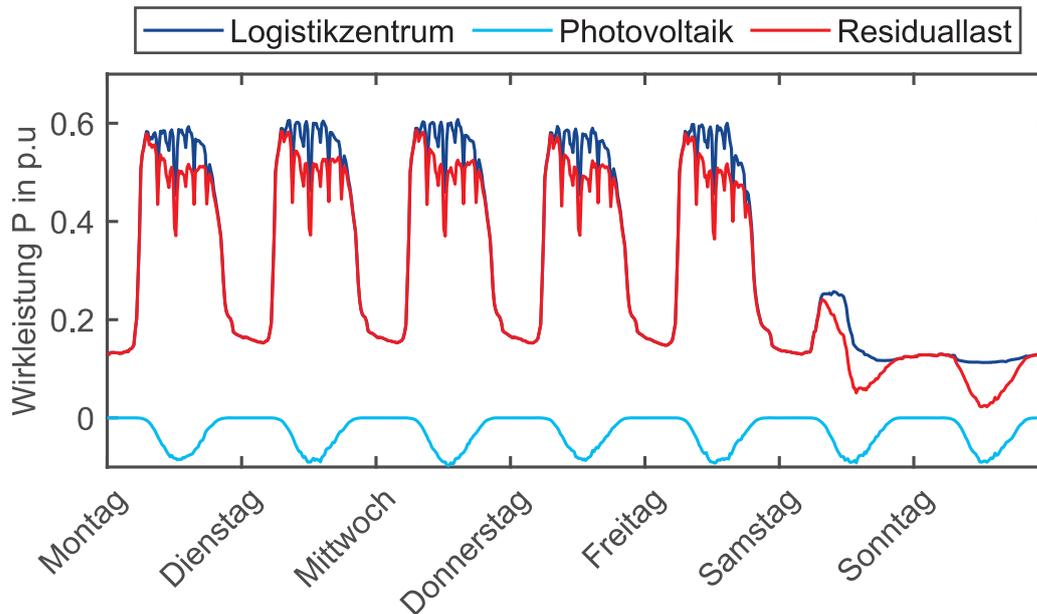


Abbildung 3-17: Wirkleistung des Logistikzentrums mit und ohne PV

3.3 Resultierende Gleichzeitigkeit aus den Lastgängen

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen den einzelnen gemessenen Verbrauchern im Sinne der Gleichzeitigkeit genauer dargestellt. Ein Hauptaugenmerk wurde dabei auf den größten identifizierten Verbraucher des untersuchten Versandzentrums, das Hochregallager gelegt. Die Untersuchung der Gleichzeitigkeit im Gesamtlastgang des Logistikzentrums ist im zweiten Teil dieses Kapitels dargestellt.

3.3.1 Betrachtung der Hochregallager

Die Gleichzeitigkeiten innerhalb eines Hochregallagers werden am Beispiel eines Hochregallagers mit 10 gemessenen Regalbediengeräten untersucht.

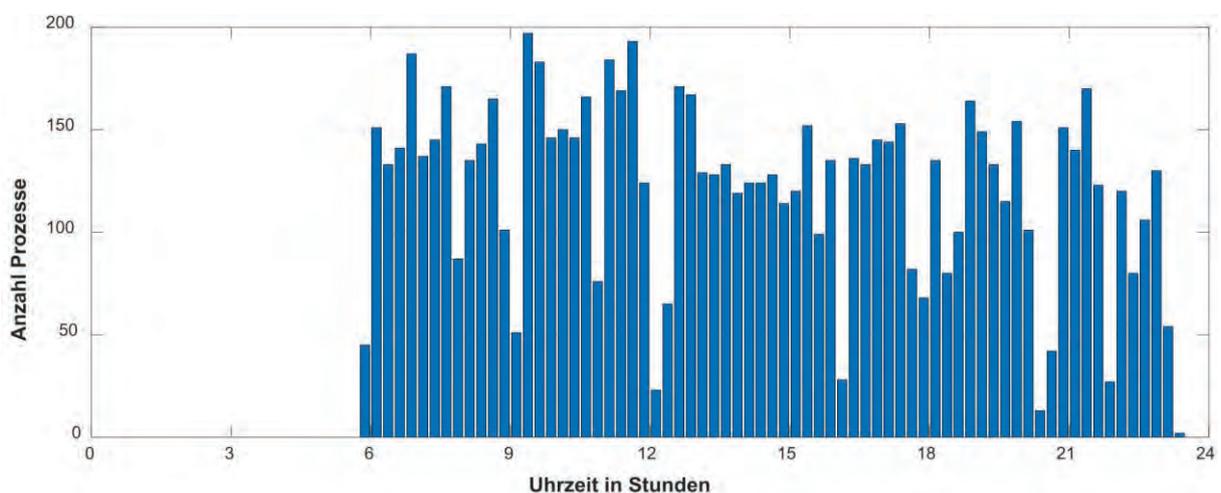


Abbildung 3-18: Durchschnittliche Anzahl an Fahrten (Prozesse) je Viertelstunde eines Tags nach [34]

In Abbildung 3-18 ist die Anzahl der Fahrten von zehn RBG über einen Tag dargestellt. Die Werte sind über eine Woche gemittelt. Der Schichtbetrieb des Logistikzentrums von 6 Uhr bis

23 Uhr ist deutlich zu erkennen. Ein Rückgang der Fahrten ist um 12 Uhr aufgrund der Mittagspause und danach aufgrund von Schichtwechseln zu sehen. Insgesamt werden vormittags mehr Fahrten als nachmittags abgewickelt.

Da die Lastspitzen einzelner Fahrten nicht verringert werden können, sind die parallel auftretende Fahrten genauer zu betrachten. Dazu wurde für die 10 RBG die Dauer der parallel auftretenden Fahrten einer Woche ausgewertet. Das Ergebnis ist in Tabelle 3-2 dargestellt. In der ersten Spalte ist die Anzahl der parallel auftretenden Fahrten aufgelistet. Dass 9 und 10 RBG gleichzeitig aktiv sind, kommt nicht vor. In der zweiten Spalte ist die Dauer summiert, wie lange es in dieser Woche zu parallelen Fahrten kommt. So ist zum Beispiel die Gesamtdauer, dass drei Fahrten gleichzeitig ausgeführt werden, 21.545 Sekunden, was 5 % des gesamten Zeitraums (432.000 Sekunden) ausmacht. Obwohl die Werte für sechs bis acht gleichzeitig auftretende Fahrten nur im Minuten- bis Sekundenbereich liegen, sind diese Werte dennoch relevant. Wenn in eine Sekunde acht Fahrten gleichzeitig laufen, kann dies für einen Viertelstundenabschnitt hohe Lastspitzen verursachen.

Tabelle 3-2: Dauer und Anzahl gleichzeitig auftretender Fahrten und Lastspitzen des HRL in einer Woche

| Anzahl paralleler Fahrten | Auftrittsdauer in s | Auftrittshäufigkeit in % |
|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 98.490 | 22,80 |
| 2 | 56.531 | 13,09 |
| 3 | 21.545 | 5,00 |
| 4 | 5.964 | 1,38 |
| 5 | 1.220 | 0,28 |
| 6 | 154 | 0,04 |
| 7 | 19 | <0,01 |
| 8 | 2 | <0,01 |

3.3.2 Betrachtung des gesamten Logistikzentrums

Im Folgenden wird die Häufigkeit der auftretenden Leistung am Netzanschlusspunkt des Logistikzentrums über ein Jahr betrachtet. Dabei beträgt eine gemessene Leistung von 1,00 p.u. eine 100 % Auslastung des Transformators. Eine negative Leistung entspricht einem Energieüberschuss. In nachfolgender Abbildung 3-19 ist die gemessene Leistung des Logistikzentrums ohne (dunkelblau) und mit (hellblau) PV-Anlage dargestellt. Am häufigsten tritt ein Wert zwischen 0,12 und 0,14 p.u. auf. Dies lässt sich auf die ähnlichen und vergleichsweise konstanten Leistungen in den Nächten zurückführen (vgl. Abbildung 3-5). Durch die PV-Anlage des Logistikzentrums kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Leistung am Netzanschlusspunkt zwischen 0,52 p.u. und 0,76 p.u. gesenkt werden. Außerdem können Leistungen kleiner als 0,08 p.u. erreicht werden.

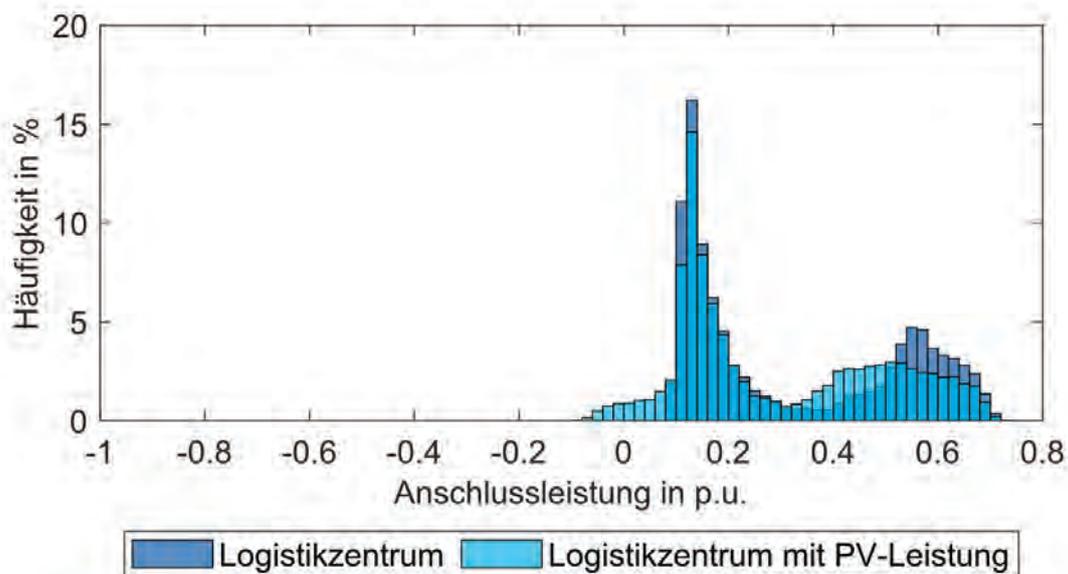


Abbildung 3-19: Häufigkeit der Logistikzentrum-Gesamtlast innerhalb eines Jahres ohne und mit PV-Leistung

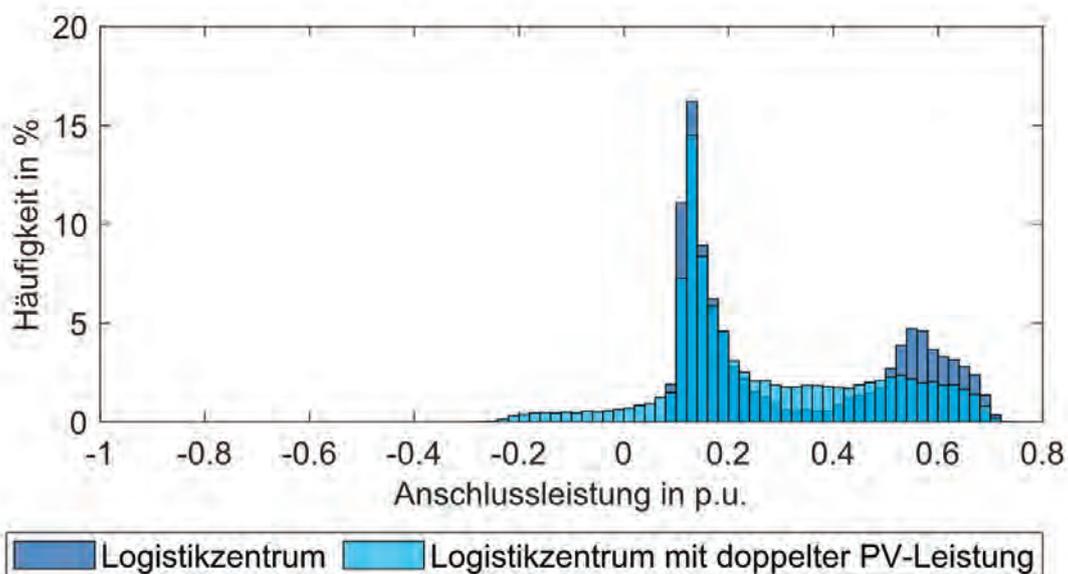


Abbildung 3-20: Häufigkeit der Logistikzentrum-Gesamtlast innerhalb eines Jahres ohne und mit doppelter PV-Leistung

In Abbildung 3-20 ist die Häufigkeit des Auftretens der gemessenen Leistung am Netzanschlusspunkt des Logistikzentrums ohne und mit doppelter PV-Leistung abgebildet. Dadurch konnten die Auswirkung eines Ausbaus der PV-Anlage untersucht werden. Durch das Verdoppeln der PV-Leistung wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Leistungsbezügen zwischen 0,50 p.u. und 0,76 p.u. gesenkt. Außerdem wird ein höherer Energieüberschuss erreicht.

Mit einer Verfünffachung der PV-Leistung kann der Verlauf am stärksten geglättet werden (Abbildung 3-21). Die Häufigkeit eines Energieüberschusses nimmt stark zu. Durch Speicherung der überschüssigen Energie und Nutzung dieser bei hohen Leistungsbezügen, kann die Häufigkeit weiter gesenkt werden.

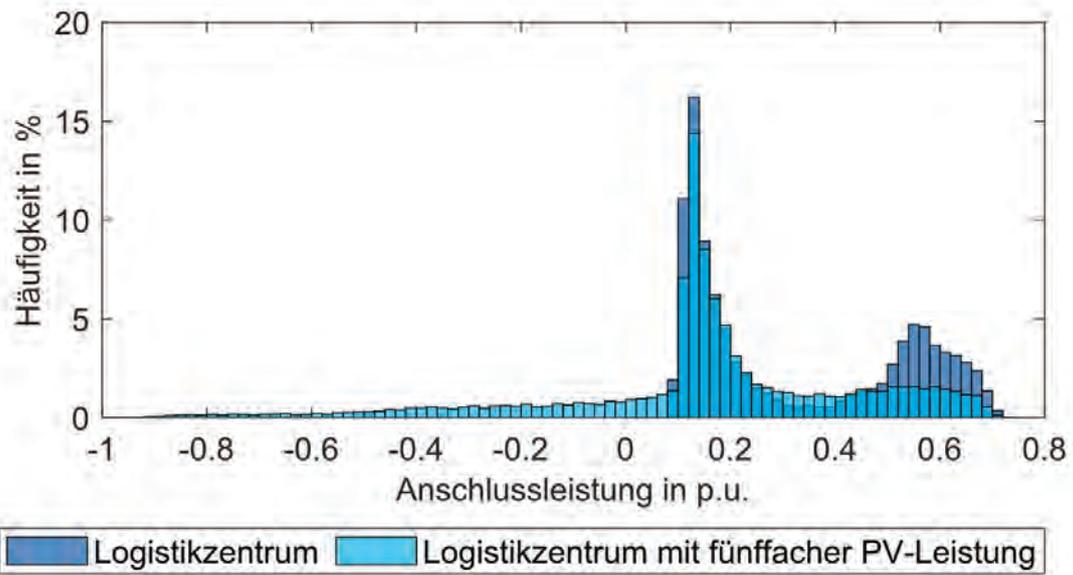


Abbildung 3-21: Häufigkeit der Logistikzentrum-Gesamtlast innerhalb eines Jahres ohne und mit fünfmaliger PV-Leistung

4 Entwicklung einer gekoppelten simulationsbasierten Demonstrationsumgebung

Um die Auswirkungen von Prozessveränderungen, Flexibilisierungen und Elektromobilitätshochläufen auf das Logistikzentrum, den Netzanschlusspunkt und das übergeordnete Mittelspannungsnetz untersuchen zu können, muss das Logistikzentrum modelliert werden. Dies betrifft sowohl die elektrischen als auch die logistischen Aspekte. Daher wurden im Projekt die Modellierung des elektrischen Netzes und der logistischen Prozesse verbunden, um fachübergreifende Ergebnisse zu erhalten. Im Folgenden sind die beiden Modelle sowie deren Kopplung beschrieben.

4.1 Modellierung des elektrischen Netzes

In Abbildung 4-1 ist ein exemplarisches reales Netzmodell dargestellt, in welchem ein Logistikzentrum typischerweise angeschlossen werden kann. Dabei versorgt ein Umspannwerk (hier: UW 1) mehrere Mittelspannungsstränge (hier: A1 – A7). Während die Abgänge A1 bis A6 im betrachteten Beispiel kumuliert dargestellt sind, ist der Abgang A7 schematisch inklusive seiner Knoten 1 bis 18 aufgeführt. An diesen Knoten können Industrieunternehmen wie Logistikzentren, Ortsnetzstationen und/oder regenerative Energieerzeuger angeschlossen sein. Im Falle eines Ausfalls kann der Abgang A7 auch über ein weiteres Umspannwerk (hier: UW 2) versorgt werden.

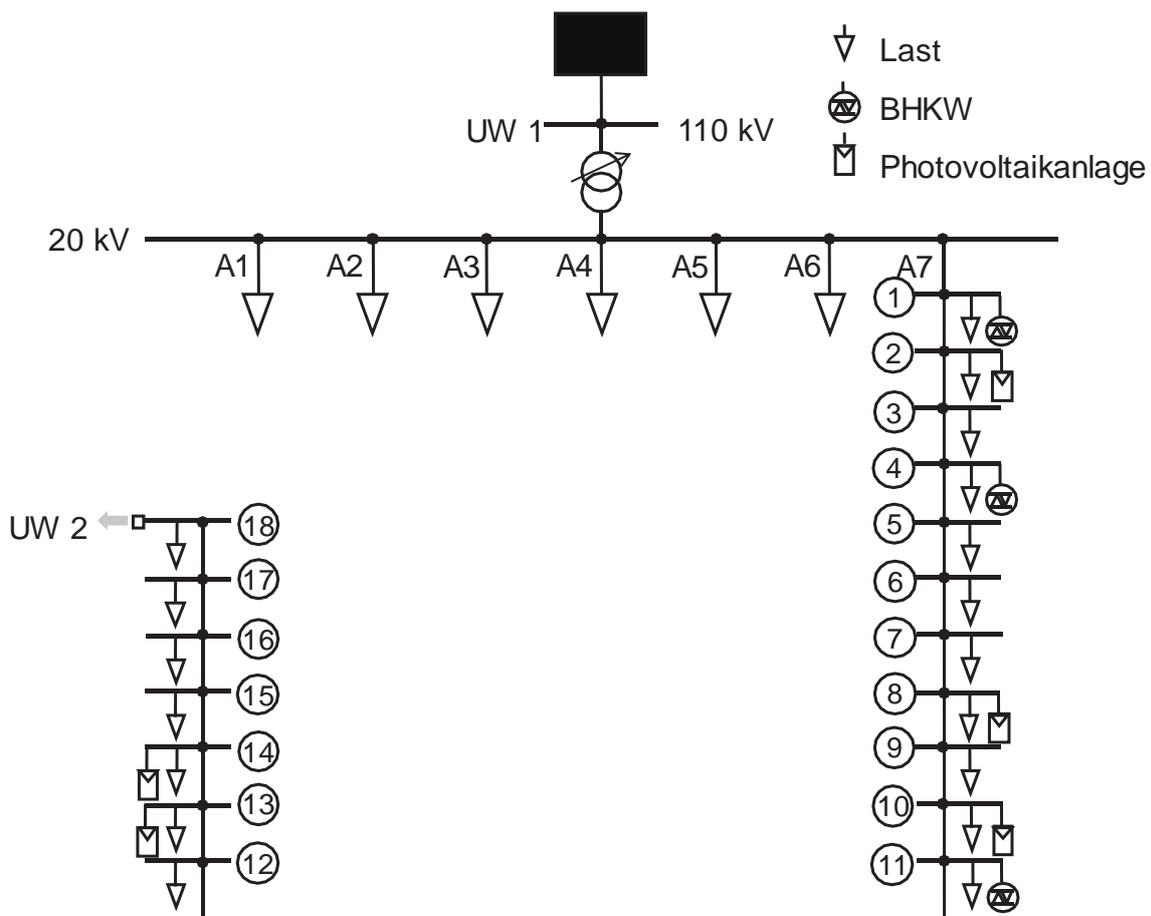


Abbildung 4-1: Exemplarisches reales Mittelspannungsnetzmodell

Das betrachtete Netz wurde in der Simulationsumgebung des IEH implementiert. Die dafür notwendigen Daten der Netzstruktur wurden durch den zuständigen Netzbetreiber bereitgestellt. Zudem wurde hinterlegt, welche Lasten und Erzeuger an welchen Knoten angeschlossen sind. Die Verbraucher und Erzeuger des Stranges, in dem auch das Logistikzentrum angeschlossen ist, wurden dabei mithilfe der gemessenen Zeitreihen der Wirk- und Blindleistung realitätsgetreu nachgebildet. Alle anderen Abgänge wurden als gemessene kumulierte Wirk- und Blindleistungszeitreihen modelliert. Das Modell erlaubt nicht nur eine realistische Berechnung zeitreihenbasierter Lastflüsse und deren probabilistische Untersuchung, sondern auch eine flexible Variation der Parameter, z. B. durch die Anpassung der Verbrauchs- und Einspeisezeitreihen, und somit Analyse diverser Szenarien.

4.2 Modellierung der logistischen Prozesse

Zur Durchführung einer Simulationsstudie von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen gibt es laut VDI 3633 folgende Phasen [35]:

- Aufgabendefinition
- Systemanalyse
- Modellformalisierung
- Implementierung
- Experimente und Analyse

Parallel dazu verlaufen noch folgende beiden Phasen, um die anderen Phasen zu unterstützen [35]:

- Datenbeschaffung
- Datenaufbereitung

Für das Projekt FELSeN wurde die Vorgehensweise leicht abgewandelt (siehe Abbildung 4-2). Dieses Vorgehen wurde durch die Dissertation von Sommer definiert [36]. Im Unterschied zur VDI 3633 wird hier das Datenerheben und -aufbereiten nicht als parallele Phase gesehen, sondern findet nach der Aufgaben- und Zieldefinition statt. Dies entspricht der sogenannten „Ist-Aufnahme“, welche den Ist-Zustand des Systems darstellt und bereits Elemente der Systemanalyse beinhaltet. Das Betrachten der Ist-Aufnahme als Phase nach der Aufgaben- und Zieldefinition ist der Grund, weshalb das Vorgehen in Abbildung 4-2 für das Projekt gewählt wurde. Anhand dieser erfassten Daten (siehe Kapitel 3) wird dann ein Simulationsmodell erstellt und verifiziert. Dies entspricht in der VDI-Richtlinie der Phasen Modellformalisierung und Implementierung. Anschließend werden, wie in der VDI-Richtlinie beschrieben, Simulationsläufe durchgeführt und die Ergebnisse analysiert, wobei das in Form zweier aufeinander folgenden Phasen durchgeführt wird. Insgesamt unterscheidet sich vor allem die Benennung der Phasen. Das grundsätzliche Vorgehen entspricht weitgehend dem der VDI 3633.

Zur Simulation wurde die Software Plant Simulation von der Firma Siemens PLM Software verwendet. Plant Simulation ist eine Software zur Simulation komplexer Produktionssysteme und Logistikprozesse. Die Erstellung des logistischen Simulationsmodells basiert auf den Daten des AP 1. Hierfür wurden beispielsweise Energieverbrauchs- bzw. Leistungsmessungen im Hochregallager sowie an einem einzelnen RBG, welches manuell gesteuert wird, durchgeführt. Das RBG wurde jeweils horizontal, vertikal, diagonal nach oben und unten mit und ohne Gewicht (750 kg) bewegt. In Abbildung 3-9 sind die Lastgänge dieser Bewegungsabläufe dargestellt. Aus der Größe der Flächen unterhalb der Lastgänge lässt sich der Energiebedarf ableiten. So wird ersichtlich, dass beispielsweise eine Bewegung „diagonal nach unten“ eine wesentlich geringere Lastspitze inklusive eines geringeren Energiebedarfs verursacht als „diagonal nach oben“. Für die Simulation werden aus diesen Ergebnissen der Energieverbrauch

und die Lastspitze pro Zeiteinheit und Bewegung ermittelt. Eine simulative und energetische Untersuchung des kompletten Logistikzentrums konnte aufgrund der nicht zu Verfügung gestellten Daten durchgeführt werden. Die Modellierung erfolgte daher nur auf Materialflussebene. Die anschließende simulative Analyse mit Fokus Flexibilitätspotential, wofür die Messdaten einzeln hinterlegt wurden, betrachtet die relevantesten Prozesse bzw. Bereiche. Der Schwerpunkt liegt auf den HRL. In Abbildung 4-3 ist das Modell des Logistikzentrums visuell dargestellt.

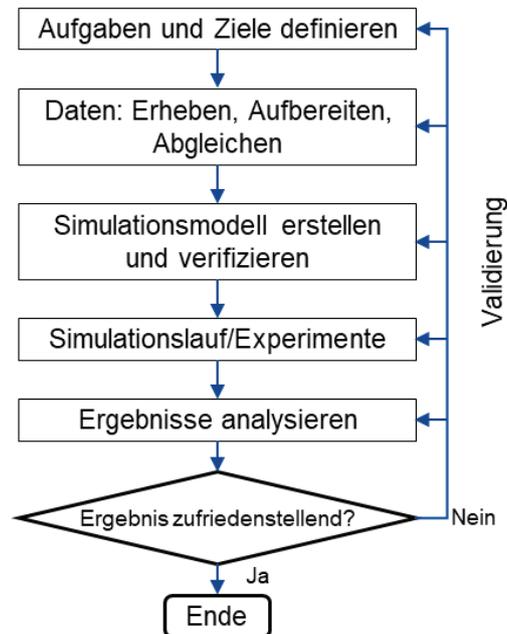


Abbildung 4-2: Ablaufdiagramm einer Simulationsstudie (eigene Darstellung in Anlehnung an [36])

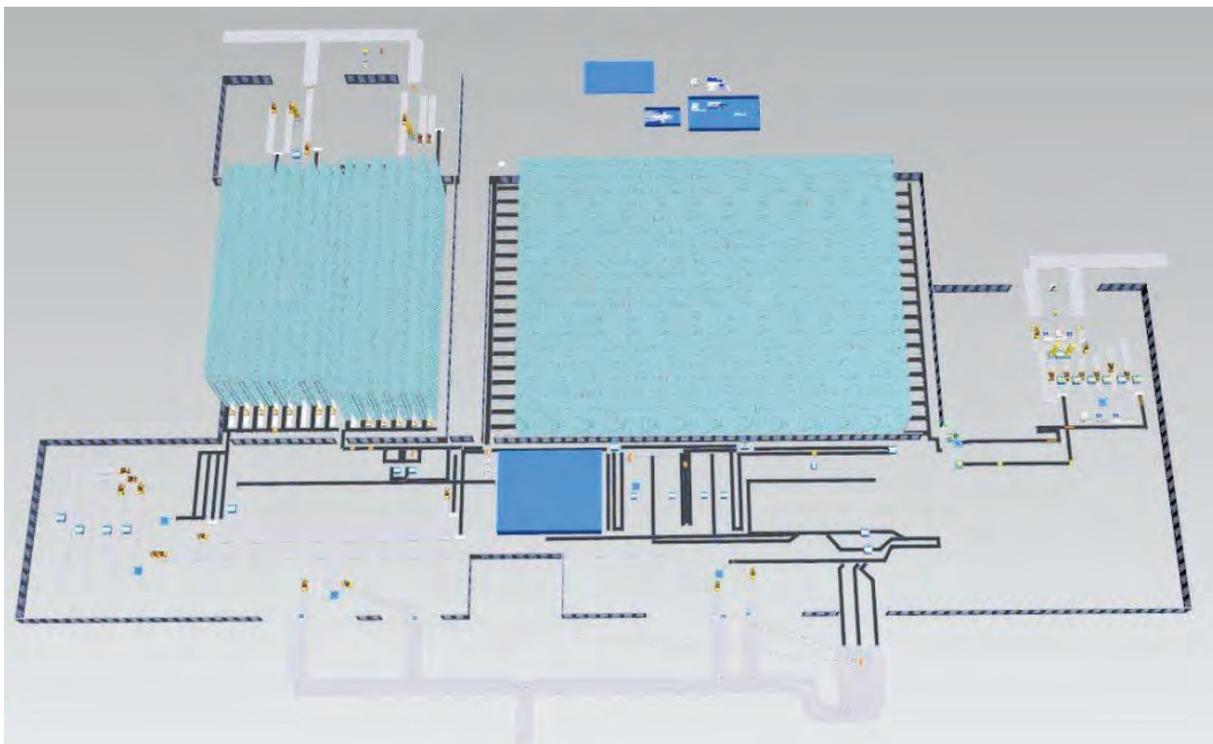


Abbildung 4-3: Logistisches Modell des Beispiellogistikzentrums in 3D-Ansicht

4.3 Kopplung der elektrischen und logistischen Simulationsmodelle

Das folgende Unterkapitel beschreibt die Kopplung des elektrischen und logistischen Modells. Neben den Schnittstellen wird die Integration eines Netzampelkonzepts und eines Energiemanagementsystems inklusive Speicher dargestellt.

4.3.1 Schnittstellen zwischen elektrischem und logistischem Modell

Während dem Aufbau des elektrischen und logistischen Modells war eine interdisziplinäre Arbeitsweise der Projektpartner entscheidend. Von Beginn an ist der Datenaustausch elementar, um mit den Materialfluss-sowie Verbrauchsdaten den Aufbau der Modelle zu gewährleisten. Zusätzlich wurden während der Modellierung die entsprechenden Schnittstellen berücksichtigt und entwickelt. Diese werden für die abschließende Evaluation benötigt. Die Schnittstellen ermöglichen, die logistischen bzw. elektrischen Flexibilitäten zu validieren. Die logistische Flexibilität wird somit über die Schnittstelle ins elektrische Modell übertragen und bewertet. Ebenfalls kann dies umgekehrt analysiert werden. Die Kopplung wird mit den Schnittstellen in Abbildung 4-4 dargestellt.

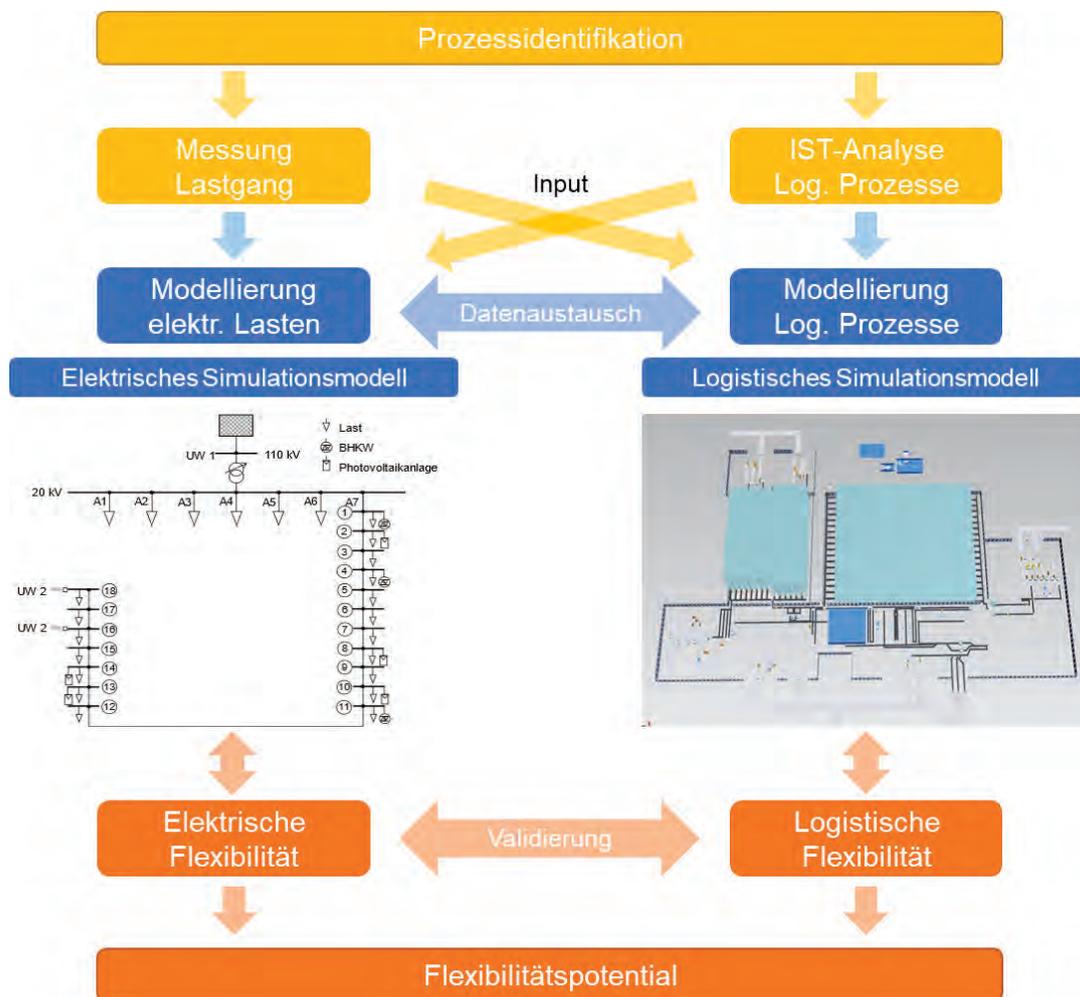


Abbildung 4-4: Kopplung und Schnittstellen zwischen elektrischem und logistischem Modell

4.3.2 Integration eines Energiemanagementsystems inklusive Speicher

Um das Flexibilitätspotential des Logistikzentrums nutzen zu können, wurde das Modell um ein Energiemanagementsystem ergänzt. Dieses kann die als flexibel identifizierten Verbraucher und Erzeuger steuern. Dabei werden nicht nur die bestehenden Komponenten, sondern

auch ein Speicher und später die Ladeinfrastruktur der Elektromobilität sowie deren sich bietende Flexibilität ergänzt. Es wurden dabei mit Betrachtung eines Netzampelkonzepts, des Netzanschlusspunktes und der logistischen Prozesse drei Ziele fokussiert:

1. Glättung des Lastgangs (grüne Ampelphase)
2. Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs (grüne Ampelphase)
3. Nutzung der Flexibilität für netzdienliche Zwecke (gelbe Ampelphase)

Eine Übersicht des Energiemanagementsystems und der darin berücksichtigten Komponenten zeigt Abbildung 4-5.

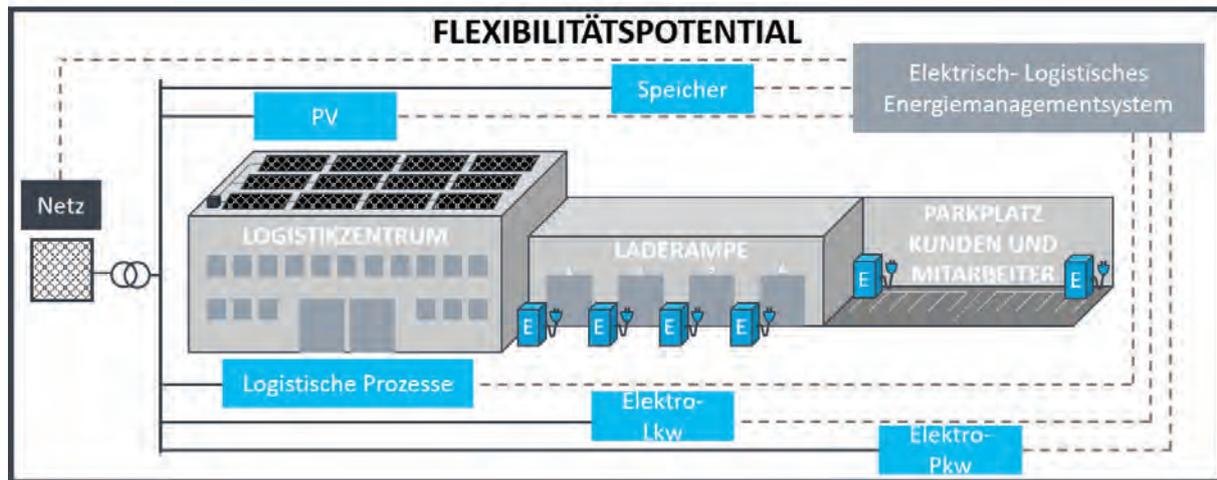


Abbildung 4-5: Übersicht der beteiligten Komponenten im Energiemanagementsystem

Mithilfe des Energiemanagementsystems wurden mehrere Szenarien getestet und deren Auswirkungen auf den Lastgang, das Stromnetz und das sich bietende Flexibilitätspotential untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind Gegenstand von Kapitel 6. Es wurden dabei folgende Maßnahmen getestet:

- Reduktion der Gleichzeitigkeit der Hochregallager-Prozesse,
- Untersuchung der Auswirkungen einer Erhöhung der installierten PV-Leistung,
- Verschiebung der PKW-Ladevorgänge mittels Lademanagement,
- Einsatz eines Speichers zur Eigenverbrauchsoptimierung und Lastglättung.

Dabei wird einerseits untersucht, wie die Anschlussleistung des Logistikzentrums optimiert werden kann (grüne Ampelphase) und andererseits, ob die sich bietende Flexibilität vom Netzbetreiber genutzt werden kann, um Netzengpässe zu vermeiden (gelbe Ampelphase).

Zur Nachbildung des Batteriespeichers wurde dessen Modellierung in der elektrischen Simulationsumgebung ergänzt. Darin wurde der Speicher als modulares System bestehend aus einer variablen Anzahl an Akkupacks vorgesehen. Die Daten der Akkupacks orientieren sich an einem auf dem Markt befindlichen modularen System von Tesla, dessen Kerndaten in Tabelle 4-1 dargestellt sind.

Zu Dimensionierung des Speichers wurde einerseits untersucht, welche Größe für eine Maximierung des PV-Eigenverbrauchs durch den Überschuss am Wochenende benötigt werden würde und andererseits eine Minimierung der Maximallast untersucht. Die Betrachtung gesamtwirtschaftlicher Aspekte stand nicht im Fokus des Forschungsprojekts, sondern die Bestimmung der maximal möglichen Flexibilität unter Berücksichtigung logistischer und elektrischer Aspekte.

Tabelle 4-1: Kenndaten des modellierten Batteriespeichers

| Parameter | Wert |
|------------------------|-------------------|
| Akkupack Energiegehalt | 232 kWh |
| c-Rate | 0,6 |
| Wirkungsgrad | 88 % |
| Kosten Akkupack | 116.666 US-Dollar |
| Kosten Inverter | 56.000 US-Dollar |

Zur Verwendung für den Eigenverbrauch wurde eine Speichergröße von 427 kWh aus dem sich maximal ergebenden Energieüberschuss am Wochenende kalkuliert. Wird statt der Eigenverbrauchsoptimierung eine Lastglättung am Logistikzentrum fokussiert, ist, je nach Ausmaß der Glättung, eine wesentlich größere Speicherdimensionierung notwendig. In Abbildung 4-6 wurde die Glättung bei maximaler Last und gleichzeitig hoher PV-Einspeisung untersucht. Theoretisch wäre aufgrund der bezogenen Energie eine maximale Glättung auf 0,58 p.u. möglich, dazu würde eine Speichergröße von 1390 kWh benötigt werden. Obwohl energetisch ausreichend, kann die Glättung am untersuchten Maximaltag nicht vollständig durchgeführt werden. Dies liegt einerseits an der langen Niedriglastphase über die gesamte Nacht, die dazu führt, dass der Speicher in den frühen Morgenstunden bereits voll ist und eine weitere Erhöhung der Last somit nicht möglich wird. Andererseits wird durch den tagsüber konstant stattfindenden Hochlastzeitraum gegen Abend der Speicher geleert sein, wodurch eine letzte Lastspitze nicht geglättet werden kann. Dieser Fall tritt jedoch nur an wenigen Tagen des Jahres auf, wodurch es wenig realistisch scheint, den Speicher für diese Tage extra noch größer anzulegen.

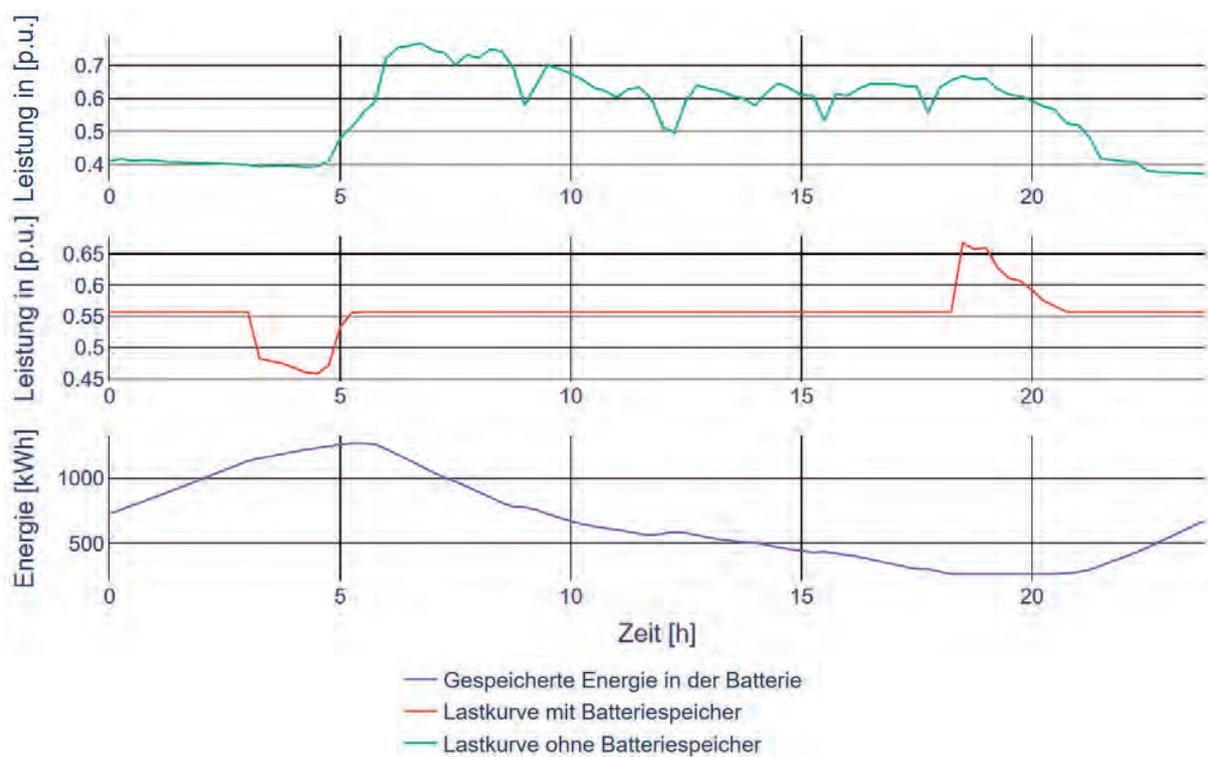


Abbildung 4-6: Einfluss des Speichers auf die Lastkurve des Logistikzentrums

Zudem wurde in beiden Fällen eine Entladung des Speichers auf minimal 20 % Ladezustand (engl.: State of Charge – SOC) zum Alterungsschutz und für Notfälle vorgesehen. Dieser kann bei voller Entladung des Speichers von der SpeichergroÙe abgezogen werden und so theoretische letzte Spitzen glätten oder für Netzdienstleistungen im Notfall zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse weiterer verschiedener Speicherdimensionierungen und das sich daraus ergebende Flexibilitätspotential sind Gegenstand von 6.1.2.

Die beiden Speicherdimensionierungen zum Eigenverbrauch und zur maximalen Lastgangglättung bieten nun einen Orientierungskorridor, innerhalb derer sich eine Realisierung des Speichereinsatzes am Logistikzentrum bewegen könnte.

5 Integration von Elektromobilität am Logistikzentrum

In Zukunft können neben den klassischen Verbrauchern neue Erzeuger und Verbraucher an Logistikzentren auftreten. Während sich bereits heute PV-Anlagen auch im industriellen Bereich immer weiter verbreiten, wird in Zukunft die Elektromobilität eine zunehmende Rolle spielen. Daher widmet sich dieses Kapitel der Darstellung, wie elektrische PKW und LKW am Logistikzentrum modelliert und in das Simulationsmodell eingebunden werden können. Dies dient dazu, dass bei der späteren Flexibilitätspotentialbestimmung des Logistikzentrums auch zukünftige Szenarien, die eine Integration dieser Komponenten beinhalten, berücksichtigt werden können. In 5.1 und 5.2 wird daher die Elektromobilität an einem zukünftigen Logistikzentrum und deren Modellierung behandelt.

Mittels einer durchgeführten Umfrage und dem Workshop am 04. April 2019 wurde die Offenheit der Unternehmen gegenüber Elektromobilität bestätigt. Mehr als 70 Prozent der befragten Firmen sind bereit, den Elektronutzfahrzeugen künftig eine Lademöglichkeit während der Aufenthaltszeit anzubieten. Ebenso sind die Betreiber von Logistikzentren bereit, den Mitarbeitern Lademöglichkeiten für E-PKW anzubieten. [37]

5.1 Mitarbeiterladen am Logistikzentrum

Während der Projektlaufzeit war am Logistikzentrum keine Ladeinfrastruktur für PKW vorhanden oder vorgesehen. Ein mögliches zukünftiges Laden der Mitarbeiter musste daher auf Basis von Simulationen untersucht werden. In diesem Kapitel wird gezeigt, wie diese Modellierung erfolgt ist, welche Auswirkungen das Laden auf den Lastgang des Logistikzentrums hat, was ein Lademanagement hier bringen könnte und welche Elektrifizierungsszenarien generell untersucht wurden.

5.1.1 Modellierung des Mitarbeiterladens

Zur Modellierung von PKW-Ladeprofilen wurde der am IEH entwickelte „Ladeprofilgenerator“ genutzt. Das Verfahren auf dem er basiert ist in [38] vorgestellt. Der Ladeprofilgenerator durchläuft die in Abbildung 5-1 dargestellten Schritte zur Erzeugung realistischer individueller Ladeprofile.

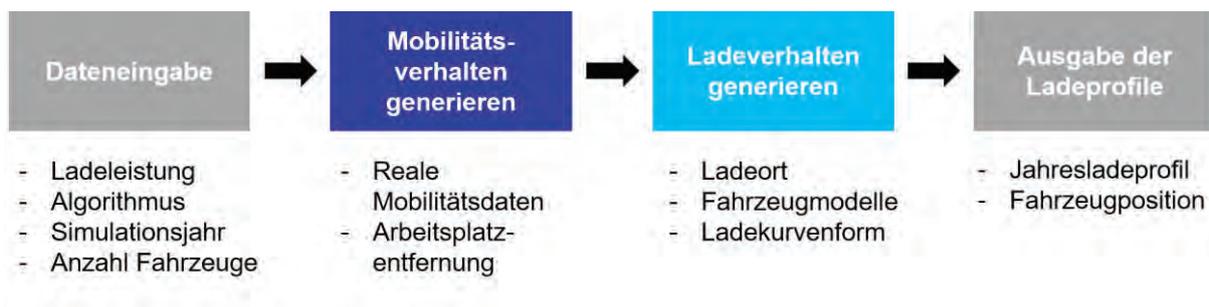


Abbildung 5-1: Ablauf der PKW-Ladeprofilgeneration

Nach Auswahl der Anzahl gewünschter Ladeprofile, der Ladeleistung und dem Ladeort (zu Hause, am Arbeitsplatz, beides) wird für jedes Fahrzeug ein Jahresladeprofil generiert. Dazu wird auf Basis einer Studie zum deutschen Mobilitätsverhalten [39] für jedes Fahrzeug ein zufälliges Mobilitätsprofil erzeugt, welches Arbeits-, Freizeit- und Heimfahrten samt deren Uhrzeit, Dauer und Strecke enthält. So wird für die Ladeprofilgeneration, beispielsweise für einen Werktag, eine zufällige Arbeitsfahrt mit Startzeit, Dauer und Streckenlänge aus dem Mobilitätsdatensatz gezogen und nach einer festgelegten Arbeitszeit mit einer Rückfahrt nach Hause

sowie zufälligen Freizeitfahrten kombiniert. Aus den Mobilitätsdaten können dann, mithilfe charakteristischer Daten realer E-PKW, Ladeprofile erzeugt werden, indem der SOC des Fahrzeugs abhängig der gefahrenen Strecken variiert wird. Erreicht das Fahrzeug im Mobilitätsprofil einen Ladeort der Wahl (z. B. den Arbeitsplatz) wird so lange geladen, bis der SOC wieder 100 % beträgt oder das Fahrzeug laut Mobilitätsprofil den Ladeort wieder verlässt. Bis zu einem SOC von 80 % wird dabei eine konstante Ladeleistung, darüber eine gemäß einer e-Funktion abfallende Ladeleistung, modelliert.

Die beschriebene Modellierung erlaubt eine sehr realistische Abbildung eines zukünftigen Mitarbeiterladens und somit eine gute Analyse der zukünftigen Netzanschlussbelastung durch Elektromobilität. Die Anpassung der Ladeprofile an das Logistikzentrum sowie deren resultierendes kumuliertes Lastprofil wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

5.1.2 Lastgang des Mitarbeiterladens am Versandzentrum

Um das Laden am Logistikzentrum nachzubilden, wird nun für jeden Mitarbeiter ein Elektrofahrzeug samt dessen Ladeprofil simuliert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Mitarbeiter am Logistikzentrum im Schichtbetrieb tätig sind und somit zu verschiedenen Zeiten am Arbeitsplatz ankommen. Da nicht bekannt ist, ob die Wohnsituation der Mitarbeiter eine Heimpladeeinrichtung in Zukunft erlauben würde, wird als Worst-Case-Szenario angenommen, dass alle Mitarbeiter nur am Versandzentrum laden können und hier der Ladebedarf somit maximiert ist. Im Mobilitätsdatensatz ist eine maximale Arbeitsstrecke von 650 km verzeichnet. Diese Dimension scheint für die Betrachtung des Versandzentrums im Projekt weniger relevant. Daher werden die Arbeitsstrecken im Projekt auf unter 60 km begrenzt.

Bei der Analyse des Ladens am Versandzentrum wurden zwei verschiedene Schichtkonzepte untersucht. Dabei wurden 450 täglich am Versandzentrum tätige Mitarbeiter auf einen Zweischichtbetrieb sowie eine zusätzliche normale Ganztagsarbeitszeit verteilt. Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 zeigen die untersuchten Arbeitszeitmodelle. Die farbigen Balken markieren dabei die Arbeitszeit der Mitarbeiter, die grauen Zonen davor und danach ein mögliches früheres Ankommen am Arbeitsplatz, um pünktlich zur Schicht zu erscheinen. Die Arbeitszeitmodelle unterscheiden sich hauptsächlich in der Überschneidung von Schicht 1 und 2.



Abbildung 5-2: Untersuchtes Arbeitszeitmodell 1 [40]

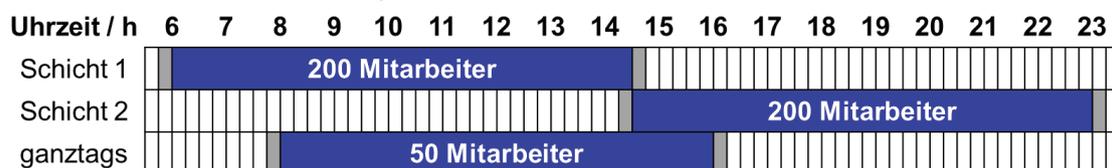


Abbildung 5-3: Untersuchtes Arbeitszeitmodell 2 [40]

Werden nun alle Ladeprofile der Mitarbeiter addiert ergibt sich der in Abbildung 5-4 dargestellte Lastgang des Mitarbeiterladens bei 100 % Elektrofahrzeugen. Es zeigt sich, dass die Arbeitszeitmodelle einen großen Einfluss auf die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge und somit auch auf die Maximalleistung haben. So entstehen bei Arbeitszeitmodell 1 besonders durch die Überschneidung von Schicht 1 und der Ganztagsarbeitszeit um 8:00 Uhr sowie durch die Überschneidung von Schicht 2 mit der Ganztagsarbeitszeit um 12:30 Uhr hohe Spitzen.

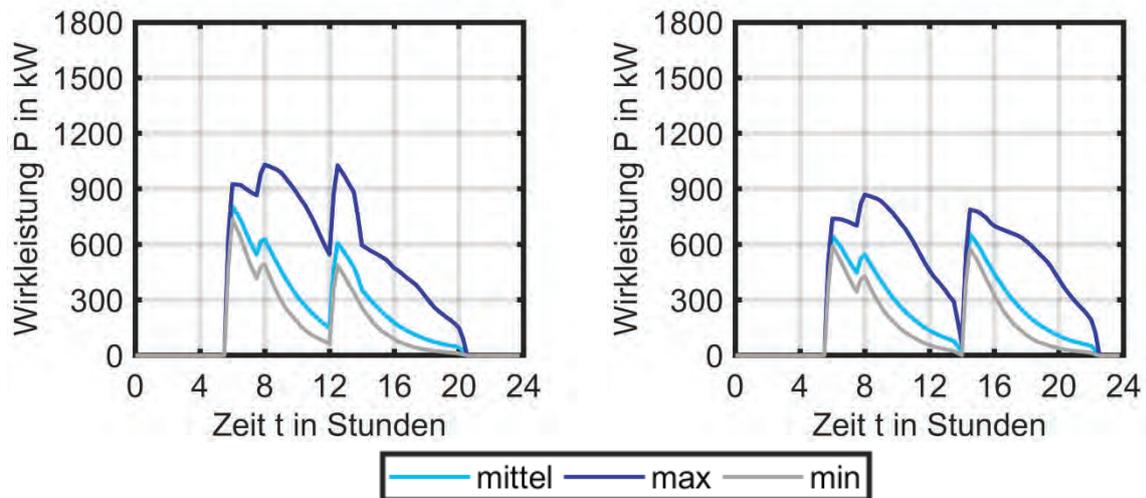


Abbildung 5-4: Mittlere (hellblau), maximale (dunkelblau), minimale (grau) Wirkleistung des Mitarbeiterladens werktags in kW nach Konzept 1 für Arbeitszeitmodell 1 (links) und Arbeitszeitmodell 2 (rechts) [40]

5.1.3 Integration eines Lademanagements

Die Integration und Funktionsweise eines Energiemanagementsystems am Versandzentrum wurde bereits in 4.3.2 behandelt. Dieses Energiemanagementsystem greift auch auf die Ladeprozesse der Elektrofahrzeuge zu. Das dadurch entstehende Flexibilitätspotential wird in 6.1.4 genauer thematisiert. Dennoch soll auch hier ein kurzer Ausblick auf das Potential eines Lademanagementsystems auf dem Mitarbeiterparkplatz des Versandzentrums gegeben werden.

Um das maximale Potential des Lademanagements abschätzen zu können wird zunächst versucht, die Ladevorgänge der Mitarbeiter innerhalb der jeweiligen Arbeitszeiten so gleichmäßig wie möglich zu verteilen und die Überschneidung der Schichten zu verringern, um möglichst niedrige Spitzenlasten zu erreichen. Dabei wurde jeder Schicht abhängig der in ihr vorhandenen Elektrofahrzeuge ein Ladefreigabezeitraum gewährt. Dies erlaubt eine Reduktion der Spitzenlast der Ladevorgänge und deren Verlaufsglättung nach Abbildung 5-5. Bei Arbeitszeitmodell 2 ist die Glättung durch die fehlende Überschneidung der Schichten nun weniger gut möglich.

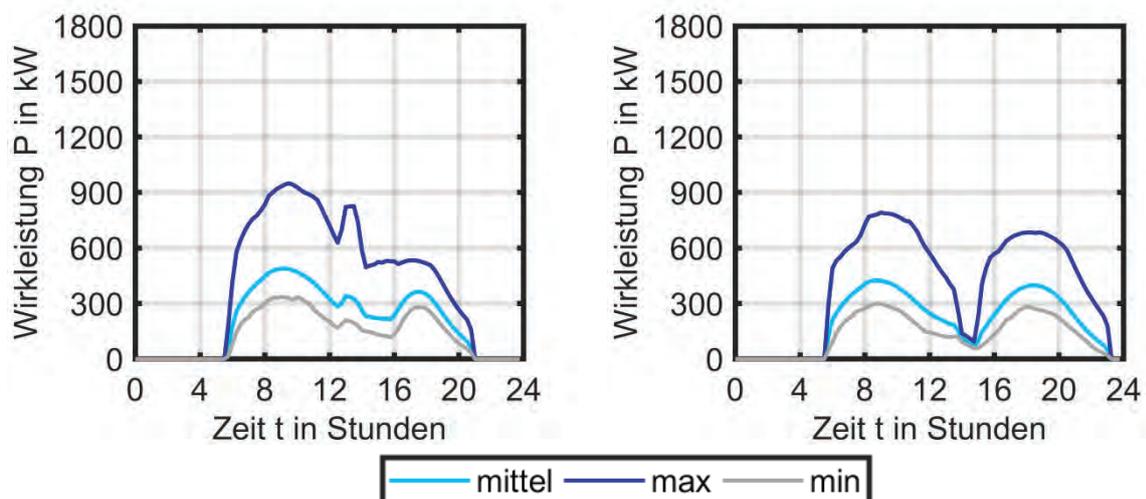


Abbildung 5-5: Wirkleistungsbedarf des Mitarbeiterladens werktags in kW mit Lademanagement für Arbeitszeitmodell 1 (links) und Arbeitszeitmodell 2 (rechts) [40]

Die Betrachtung in diesem Kapitel liefert nur einen kurzen Ausblick darauf, was ein Lademanagement bereits bei einem vom restlichen Lastgang isolierten Betrieb des Mitarbeiterparkplatzes liefern könnte, die Auswirkungen, wenn das Lademanagement zusätzlich auf die bereits belegte Anschlussleistung eingeht, werden eingehend in Kapitel 6.1.4 behandelt.

5.2 LKW-Laden am Versandzentrum

In diesem Abschnitt wird ein mögliches zukünftiges Laden von E-LKW am betrachteten Versandzentrum behandelt. Dabei wird nicht nur untersucht, welche Ladekonzepte an Logistikzentren realisierbar wären und welche Randbedingungen sie mit sich bringen, sondern auch, wie sich Ladeprofile von E-LKW modellieren lassen und welcher gesamte Ladebedarf sich beim Laden am untersuchten Versandzentrum ergibt. Zur Vermeidung von Unklarheiten werden zunächst die Fachbegriffe Standzeit, Ladezeit und Aufenthaltsdauer definiert:

- Standzeit: Mit der „Standzeit“ wird der Zeitraum beschrieben, in der die Be- oder Entladung von Gütern stattfindet [41].
- Ladezeit: Mit der „Ladezeit“ wird der Zeitraum beschrieben, in der die elektrische Ladung der LKW-Batterie stattfindet.
- Aufenthaltsdauer: Die Standzeit bzw. Ladezeit (die längere Zeit wird gewählt) summiert mit der Wartezeit (Zeit bis Eintritt der Be- und Entladung) ergibt die „Aufenthaltsdauer“ [41].

5.2.1 Verfügbare Ladekonzepte

Zum Batterieladen des E-LKW am Logistikzentrum sind verschiedene Ladeanschlussmöglichkeiten bzw. Ladekonzepte nutzbar. Diese sind zwangsläufig von der Ausstattung des E-LKWs abhängig. Insgesamt werden fünf verschiedene Konzepte aufgestellt, welche in Abbildung 5-6 dargestellt sind und im Folgenden näher beschrieben werden.

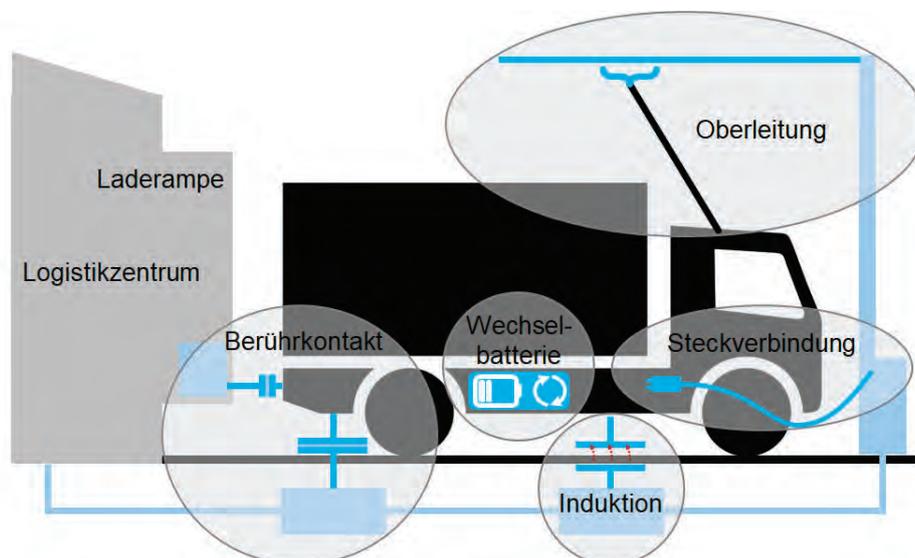


Abbildung 5-6: Konzepte zur Integration der Ladeinfrastruktur [3]

Steckverbindung:

Bei den E-PKW und E-LKW gilt die Steckverbindung als die meist verbreitete und eine standardisierte Technik. Die etablierteste Technik ist das CCS-System (Combined Charging System) als einheitliche AC/DC-Schnittstelle in Europa und den USA [39]. Mit dieser sind die Prototypen bzw. erste Serienfahrzeuge ausgestattet. Im LKW wird kaum zusätzlicher Platz benötigt. Allerdings ist im Logistikzentrum an jeder Rampe eine Ladesäule mit dem entsprechenden

Ladekabel und Stecker vorzusehen. Ein zusätzlicher Platzbedarf resultiert dadurch, welcher baulich einfach realisierbar wäre. Zusätzlich benötigt der Ein- und Aussteckvorgang Zeit und Personal. Des Weiteren ergibt sich durch dieses Konzept eine hohe Ladeleistung sowie ein hoher Wirkungsgrad. Andererseits können durch hohe Ladeströme Verluste entstehen und es ist eine Kühlung des Kabels und Steckers relevant. Defekte an der Ladeinfrastruktur sind einfach zu beheben. Somit ist das Konzept vergleichsweise kostengünstig und kann möglicherweise durch einen Roboter übernommen werden. [3]

Berührkontakt:

Berührkontakte beruhen auf der Verbindung zwischen zwei Konnektoren, welche flexibel am Fahrzeug und Gebäude angebracht werden können. Beispielsweise ist eine Anbringung am hinteren Teil des E-LKW und direkt an der Rampe oder unter dem E-LKW und auf dem Boden möglich (siehe Abbildung 5-6). Bei der letzteren Befestigung entsteht die Möglichkeit während des Fahrens zu laden. Hierfür gilt die Bedingung, dass die Straßen mit einer Stromschiene ausgelegt sind (Beispielprojekt in Schweden der Firma „eRoadArlanda“). Ein Einsteckvorgang bzw. eine menschliche Bedienung ist nicht erforderlich und es können ähnliche Ladeleistungen, wie bei dem Konzept Steckverbindung, erreicht werden. Nachteilig sind die fehlende Standardisierung aufgrund der geringen Anbieteranzahl, der zusätzliche Anbau am E-LKW und genaues Einparken an der Laderampe. [3]

Stromabnehmer/Pantograph:

Der Stromabnehmer ist ein sehr altes bewährtes System, welches 1881 bereits vorgestellt wurde [42]. Noch heute wird es bei Zügen und Straßenbahnen verwendet. Im Jahr 2019 wurde im Rahmen eines Feldversuchs auf der A5 die erste von drei geplanten Teststrecken eines sogenannten eHighways eröffnet. Dabei laden die E-LKW über Oberleitungen ähnlich zum Bahnverkehr. Der E-LKW fährt zwischen der Autobahn und dem Logistikzentrum nur mithilfe seiner Batterie. Am Logistikzentrum mit einer Oberleitung an der Laderampe kann der E-LKW ebenfalls seinen Stromabnehmer ausfahren und während dem Warenladen die Batterie laden. Mithilfe dieser Kombination von Ladezyklen ist eine kleinere Batteriekapazität sowie ein geringerer Ladebedarf am Logistikzentrum ausreichend. Somit wird keine menschliche Bedienung benötigt. Jedoch fehlt die Standardisierung und der Stromabnehmer hat einen zusätzlichen Platz- und Gewichtsbedarf am E-LKW. Bei einem zusätzlichen Laden an der Rampe sind größere bauliche Änderungen am Logistikzentrum erforderlich. Demnach ist das Konzept aufgrund der eHighways eine kostenintensive Gesamtlösung. [3]

Induktion:

Laden von E-PKW durch Induktion wird bereits seit Jahren in Forschungsprojekten getestet. Die Technik kann auch auf E-LKW übertragen werden. Somit kann der E-LKW durch eine bauliche Änderung und ohne menschliche Bedienung an der Rampe induktiv geladen werden. Jedoch ist genaues Einparken sowie der zusätzliche Einbau einer Induktionsspule an Rampe und E-LKW erforderlich. Die geringe Ladeleistung, weswegen eine lange Ladezeit benötigt wird, und die fehlende Standardisierung ergeben Nachteile. Dennoch forschen Unternehmen an Induktionsschleifen, eingelassen in Straßen mit hoher Verkehrsdichte (z. B. magnetischer Beton der Firma MAGMENT). Dadurch kann zukünftig ein Ladevorgang beim Fahren stattfinden, wodurch Induktionsstraßen (ähnlich wie eHighways) betrieben werden können. [3]

Wechselbatterie:

Abnehmbare Batterien am E-LKW sind bei diesem Konzept vorgesehen. Sie können bei Bedarf am Logistikzentrum gewechselt werden. Dadurch wird ein LKW-unabhängiger Ladevorgang erreicht, welcher langsamer und batterieschonender ablaufen kann. Eine Verlängerung

der Batterielebensdauer resultiert. Zudem ist es möglich, die Batteriekapazität je nach zu fahrender Strecke auszuwählen. Die Nutzung von eingelagerten Batterien als Energiespeicher bzw. Netzbooster (zur Netzstabilisierung) durch die Unternehmen steht ebenfalls zur Verfügung. Durch die Wechsellinfrastruktur entsteht allerdings am Wechselort ein höherer Platzbedarf. Daher wird das Wechseln nicht an der Rampe, sondern an einen zusätzlichen Ort empfohlen. Der Austausch erfordert sehr wahrscheinlich eine persönliche Schutzausrüstung und eine Fortbildung. Mit diesem Konzept werden die Ladevorgänge unabhängiger und es entsteht großes Potential. Unternehmensübergreifende Lösungen sind doch sehr unwahrscheinlich, da die LKW-Hersteller keine standardisierten Batterien für unterschiedliche E-Nutzfahrzeuge anbieten werden. Sie wird eher als eine interne Lösung einer Spedition verwendbar sein. [3]

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird sich das Konzept „Steckverbindung“ aufgrund der Standardisierung und der Einfachheit etablieren. Es ist bereits heutzutage an allen Prototypen bzw. Serienfahrzeuge verbaut. Daher befasst sich das Projekt im Folgenden nur mit diesem Konzept. Die anderen Ladeanschlussmöglichkeiten sind noch im Entwicklungsstatus und werden daher nicht weiter betrachtet.

Die typische Bauweise einer Ladesäule mit durchschnittlichen Maßen ist in Abbildung 5-7 zu sehen. Um Anfahrtschäden zu vermeiden, wird meist ein Rammschutz angebaut. Dieser ist im LKW-Bereich besonders an der Rampe erforderlich. Durch das Rückwärtsfahren an die Rampe kann die Ladesäule übersehen werden. Die Beschaffungskosten einer Säule liegen zwischen 20.000 und 60.000 €. In diesem Preis sind zusätzlich die Ladekabel, das Betonfundament, der Versand, die Eichrechtskonformität und das Bezahlssystem inkludiert. Zudem ist er je nach Absatz sehr variabel. Die Kosten für den Netzanschluss und die baulichen Maßnahmen sind nicht inbegriffen. Zur groben Abschätzung der finanziellen Auswirkungen für den Aufbau von Ladeinfrastruktur an Logistikzentren werden folgende Daten genutzt³:

- 50 kW Ladesäule (Compleo Cito 500): 29.058 €
- 150 kW Ladesäule (Hypercharger 150): 37.595 €
- 350 kW Ladesäule (Hypercharger 350): 58.736 €

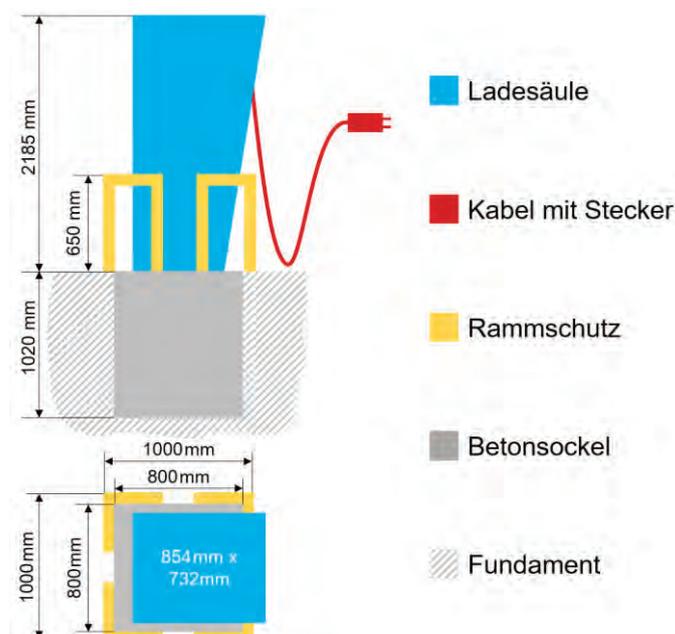


Abbildung 5-7: Typischer Aufbau einer Ladesäule mit Steckverbindung

³ Die Kostenberechnungen stammen aus Angeboten von Ladeinfrastrukturanbietern.

Aufgrund enger Platzverhältnisse an den Rampen ist der Aufstellort einer Ladesäule ebenfalls relevant. Eine Untersuchung dieser Verhältnisse an Logistikzentren zeigt, dass zwischen den LKW hauptsächlich kleine Zwischenräume vorhanden sind. Der verbleibende Platz liegt zwischen einem bis 2,4 Meter. In der Abbildung 5-8 ist dies an zwei Beispiellogistikzentren dargestellt.

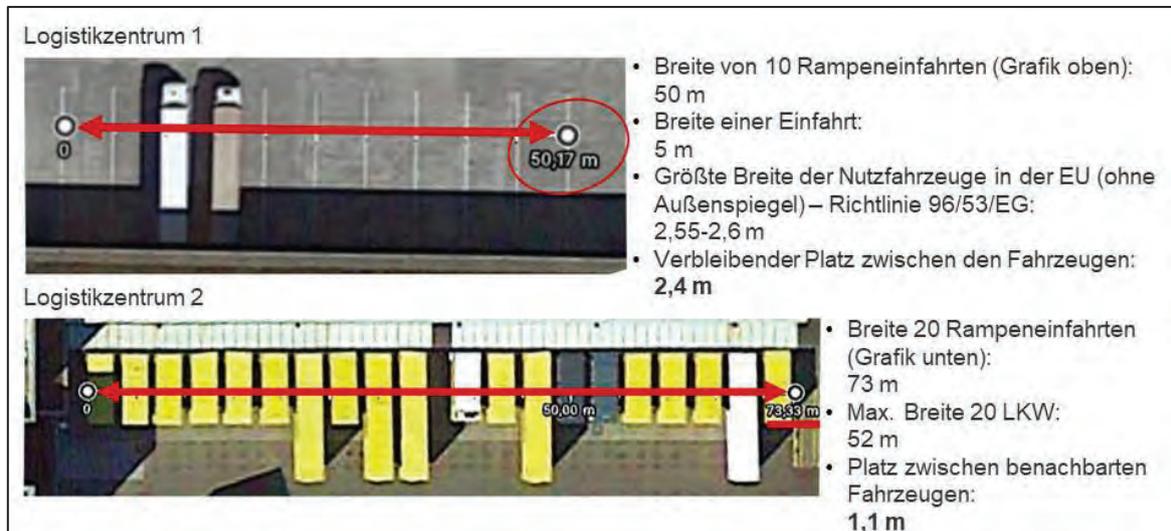


Abbildung 5-8: Untersuchung der Platzverhältnisse an der Rampe (zwischen den LKW)

Eine Installation der Ladesäule zwischen bzw. seitlich der LKW, wie beim PKW, ist aufgrund des geringen Platzbedarfes bei den meisten Zentren nicht möglich. Eine ausreichende Rangiermöglichkeit muss garantiert sein. Bei dieser Aufstellmöglichkeit ist in Logistikzentrum 2 in Abbildung 5-8 zwischen Ladesäule und LKW ein Abstand von fünf Zentimetern. Daher werden in Abbildung 5-9 weitere Installationspunkte aufgezeigt. Neben der Anbringung zwischen den LKW, besteht die Möglichkeit die Ladestation im Boden zu versenken, auf dem Vordach bzw. einem Podest oder im Gebäude aufzustellen. Bei letzterem wird ein sehr langes Ladekabel benötigt. Hierdurch kann es zu Ladeverlusten führen. Die Versenkung und Vordachanbringung sind durch die räumliche Nähe sehr vorteilhaft.

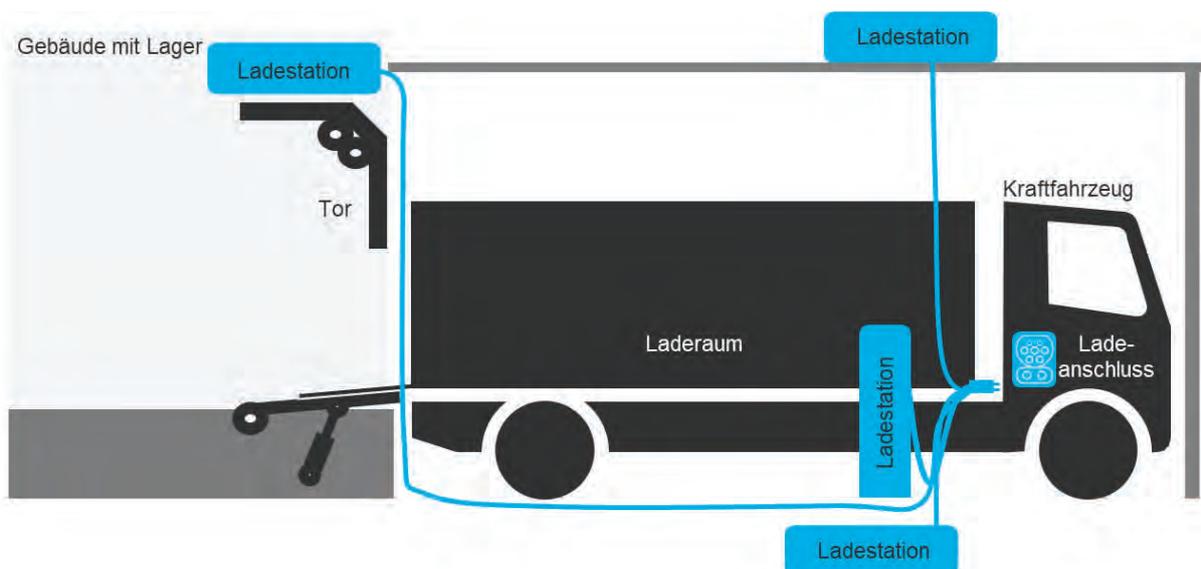


Abbildung 5-9: Aufstellmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur

5.2.2 Betrachtete LKW-Elektrifizierungsszenarien

Die Elektrifizierung von LKW wird im Projekt in vier Hauptszenarien eingeteilt und simulativ untersucht. Es wird die volle Elektrifizierung aller LKW von der leichten (bis 7,5 t) bis zur schweren (bis 40 t) Gewichtsklasse betrachtet. Im Szenario 1 werden alle LKW unabhängig der Gewichtsklasse elektrifiziert. Aufgrund der derzeitigen Entwicklung der Elektromobilität wird das Szenario unterteilt in 100 %, 75 %, 50 % und 25 % Elektrifizierung aller LKW, sodass es einen Hochlauf darstellt. Szenario 2 stellt die Elektrifizierung aller leichten und mittelschweren LKW ohne Fahrleistungsbegrenzung (bis 18 t) dar. Eine durchgeführte Marktanalyse bestätigt, dass zurzeit hauptsächlich LKW bis 18 t verfügbar bzw. geplant sind. Um die schweren LKW abzudecken, dient das Szenario 3. Allerdings werden nur Reichweiten bis 200 km betrachtet, da diese (Stand heute) mit einer Batteriekapazität durchschnittlich erreichbar sind. Hierzu folgt eine Recherche in Kapitel 5.2.3, in der alle verfügbaren LKW-Modelle mit batterieelektrischem Antrieb mit Batteriekapazität und Reichweite in Abhängigkeit der Größenklasse dargestellt sind. Diese Recherche, Interviews mit Speditionen, eine Umfrage und die politische Ausrichtung zeigen jedoch, dass zeitnah eine Kombination aus Szenario 2 und 3 sich am realistischsten darstellt. Daher betrachtet das Szenario 4 alle LKW bis 18 t und einer Fahrleistung bis 200 km. Es wird unterteilt durch einen Hochlauf in 100 % und 50 % Elektrifizierung. Dies ist in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Elektrifizierungsszenarien

| Szenario | | Elektrifizierung in Prozent | Kleines Logistikzentrum | Großes Logistikzentrum |
|----------|--|-----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1 | Alle LKW werden elektrifiziert | 100 | X | X |
| | | 75 | X | X |
| | | 50 | X | X |
| | | 25 | X | X |
| 2 | LKW bis 18 t | 100 | | X |
| 3 | LKW mit Fahrleistung unter 200 km | 100 | | X |
| 4 | LKW bis 18 t und mit Fahrleistung unter 200 km | 100 | | X |
| | | 50 | | X |

Das *kleine Logistikzentrum* stellt in den Untersuchungen das Beispiellogistikzentrum bzw. Versandzentrum dar. Auf Basis der IST-Analyse werden in einer Woche 475 ankommende LKW prognostiziert. Hierfür werden sieben der zehn vorhandenen Rampen benötigt. Für das *große Logistikzentrum* wurden die Daten hochskaliert. Es werden 2507 LKW in der Woche erwartet. Das Zentrum verfügt über 30 Rampen, wovon 26 benötigt werden. Die Anzahl der ankommenden LKW hat sich verfünffacht. Die Skalierung dient auch zur Übertragung der Ergebnisse auf größere Logistikzentren. Szenario 1 wird anhand beider Logistikzentren untersucht. Szenario 2-4 wird nur anhand des großen analysiert.

5.2.3 Modellierung des LKW-Ladens

Zur Modellierung der Ladeprofile von E-LKW wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches schematisch in Abbildung 5-10 dargestellt ist und in [43] vorgestellt wurde. Dabei wird der

Energiebedarf aus dem Mobilitätsverhalten sowie Fahrzeugparametern von realen E-LKW-Modellen hergeleitet.

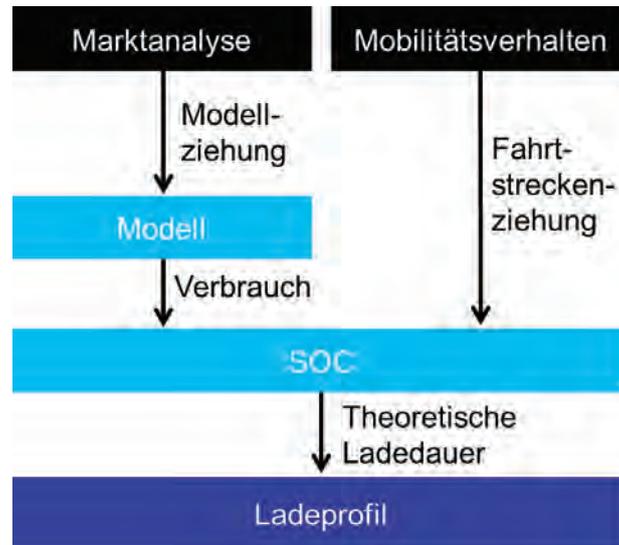


Abbildung 5-10: Modellierung der Ladeprofile elektrischer LKW aus Marktanalyse und Mobilitätsverhalten [40]

Für eine Datenbasis an Fahrzeugparametern wurde eine Marktanalyse von aktuell verfügbaren oder angekündigten E-LKW-Modellen durchgeführt. Dabei wurde eine Unterscheidung nach dem zulässigen Gesamtgewicht gemacht, was ein allgemeines Vorgehen bei der Klassifizierung von LKW, z. B. in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) [44] oder in Veröffentlichungen des Kraftfahrtbundesamt (KBA) [45], ist. Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Gewichts-Eingruppierungen, der Übersicht halber wurde sich im Rahmen des Projekts auf vier Klassen beschränkt: LKW unter 3,5 t, leichte LKW unter 7,5 t, mittelschwere LKW bis 18 t und schwere LKW bis 40 t.

Innerhalb der Recherche konnten 35 LKW-Modelle mit batterieelektrischem Antrieb ermittelt werden. Von den 35 Fahrzeugen entfallen jeweils acht Modelle auf die kleinste Klasse unter 3,5 t und auf die Klasse der 18-Tonner. Weitere sechs Modelle sind den 7,5-Tonnern zuzuordnen und 13 Fahrzeuge den schweren LKW bis 40 t. Diese Verteilung unterstreicht die Wichtigkeit der Fahrzeuge im Fernverkehr, da besonders viele Modelle im schweren Segment angekündigt wurden, obwohl deren Elektrifizierung mit annehmbarer Reichweite vermutlich am komplexesten zu realisieren ist. Ein Grund für das Interesse der Fahrzeughersteller in dieser Klasse können auch deren Marktanteil und somit die Profitmöglichkeiten sein.

Eine Übersicht der technischen Daten der recherchierten Modelle hinsichtlich Reichweite und Batteriekapazität bietet Abbildung 5-11. Dabei sind die Größenklassen farblich gekennzeichnet. Je größer die Gewichtsklasse dabei ist, desto mehr orientieren sich die Werte hin zu größeren Batteriekapazitäten. Im Segment der 40-Tonner ist eine große Streuung der Herstellerangaben ersichtlich. Die meisten Modelle befinden sich jedoch über alle Größenklassen hinweg in einem Bereich zwischen 100 und 400 km Reichweite sowie unter 400 kWh Batteriekapazität. Knapp die Hälfte der Fahrzeuge besitzt eine Reichweite zwischen 200 und 300 km, die Größenklassen unterscheiden sich hierbei kaum.

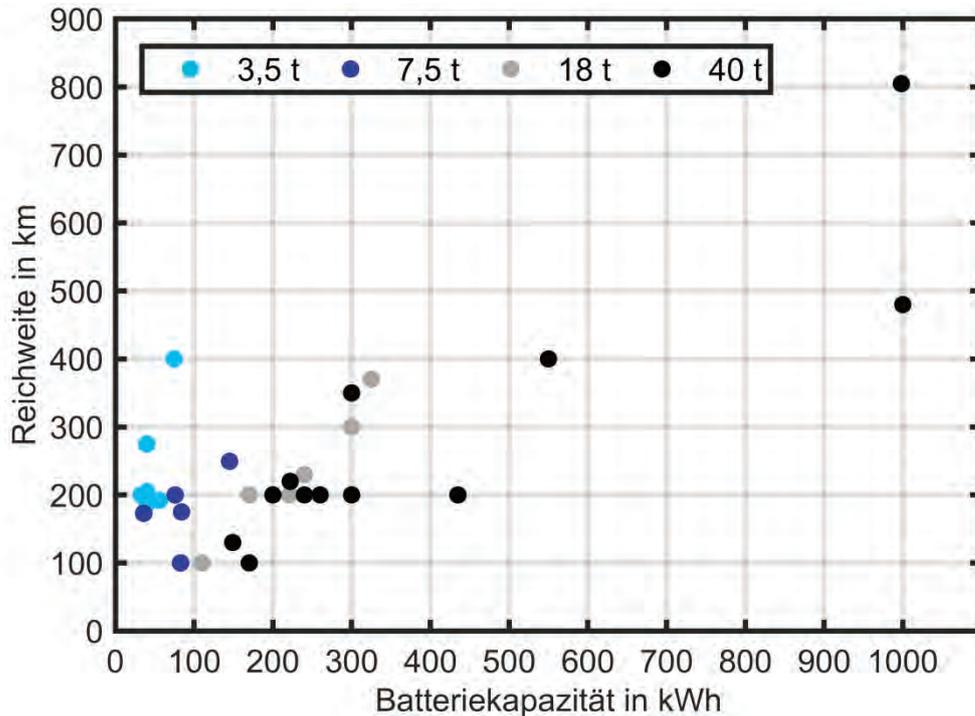


Abbildung 5-11: Batteriekapazität und Reichweite der recherchierten batterieelektrischen LKW-Modelle in Abhängigkeit der Größenklasse [40]

Neben technischen Daten der Fahrzeuge werden für die Modellierung der Ladeprofile Daten von deren Mobilitätsverhalten benötigt. Dazu werden Daten der Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD) aus [46] genutzt. Aus der Studie können Streckenlänge, Abfahrtszeit und Fahrtendauer von nahezu 120.000 Profilen von 70.000 Fahrzeugen entnommen werden. Zur Erzeugung von Ladeprofilen werden diese Strecken zufällig neu kombiniert und einem am Logistikzentrum ankommenden LKW zugewiesen. Aus der zuvor gefahrenen Strecke sowie einem zufälligen Fahrzeugtyp samt Batteriegröße und Verbrauch lässt sich dann der SOC bei Ankunft am Logistikzentrum und daraus der notwendige Nachladebedarf bestimmen. Die erzeugten Ladeprofile können für unterschiedliche Ladeleistungen generiert werden. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens ist in [43] zu finden.

5.2.4 Lastgang des LKW-Ladens am Versandzentrum

Um den gesamten Lastgang durch LKW-Laden am Logistikzentrum ermitteln zu können, wird die LKW-Ladeprofilmodellierung aus 5.2.3 um Rahmenbedingungen des Versandzentrums ergänzt. Weitere Informationen über den Aufbau des Logistikzentrums, die Anzahl und Art der ankommenden LKW, den Ankunftszeitraum und die Aufenthaltsdauer werden dazu benötigt. So zeigt Abbildung 5-12 die Erweiterung der Abbildung 5-10 in den grau hinterlegten Schritten.

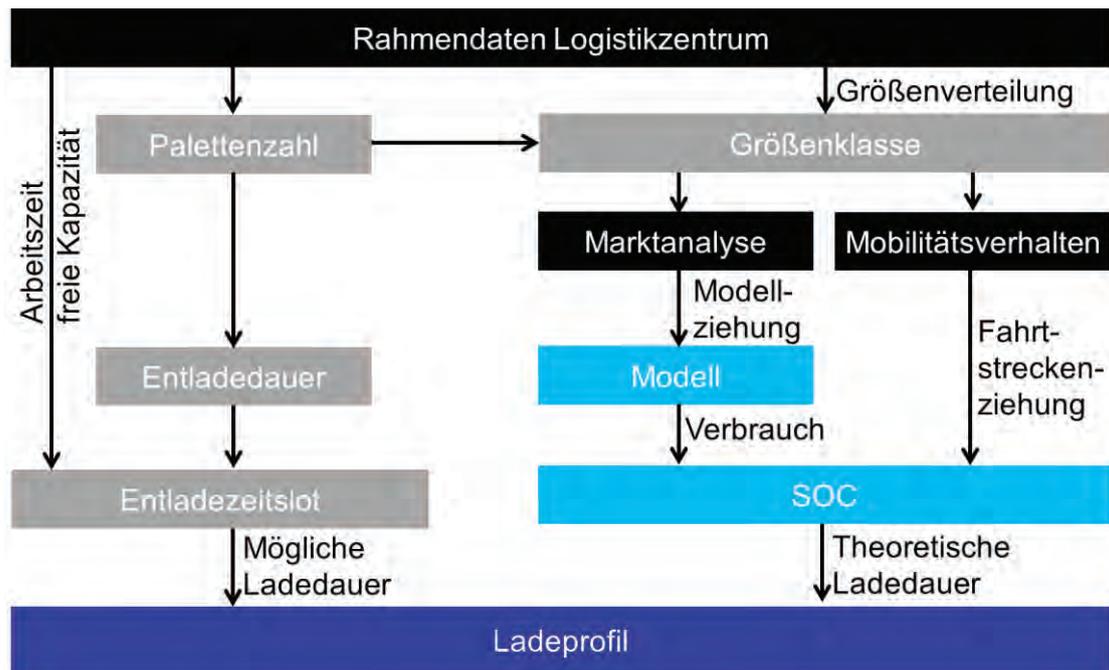


Abbildung 5-12: Modellierung der Ladeprofile für elektrische LKW unter Berücksichtigung der Rahmendaten des Logistikzentrums [40]

An einem Logistikzentrum können LKW sowohl zur Belieferung des Wareneingangs als auch zur Abholung von Waren am Warenausgang eingesetzt werden. Dabei können auch mehrere Warenausgänge und -eingänge vorhanden sein. Jeder Aus- und Eingang verfügt über eine festgelegte Anzahl an Toren. An diesen kann jeweils ein LKW halten und be- oder entladen werden. Zudem stellen einige LKW am Warenausgang ihre Brücken ab und verlassen während der Beladung das Logistikzentrum. Dadurch können sie während der Beladung nicht elektrisch aufgeladen werden. Aus der logistischen IST-Aufnahme vom Versandzentrum sind die Anzahl der Tore je Wareneingang- und -ausgang sowie deren Öffnungszeiten bekannt.

Zur Generation der Ladeprofile eines Werktags wird zunächst die Anzahl der ankommenden LKW bestimmt. Diesen wird eine Beladung in Form von Paletten aus historischen Daten des Logistikzentrums zugewiesen. Mittels einer prozentualen Verteilung an ankommenden LKW-Größenklassen kann dem LKW danach unter Berücksichtigung der geladenen Paletten eine Größenklasse und damit auch ein E-LKW-Modell zufällig zugewiesen werden. Aus der Palettenanzahl lässt sich mithilfe einer vorher festgelegten fixen Entladezeit je Palette die komplette Standzeit des LKW am Logistikzentrum bestimmen. Für diese Zeitspanne wird nun ein freier Zeitslot im Terminplan des Logistikzentrums gesucht. Sobald ein freies Tor zum gewünschten Zeitpunkt verfügbar ist, wird dem LKW dieser Termin als Ankunftszeitpunkt zugewiesen. Die Terminvergabe entspricht auch dem normalen Vorgehen am Logistikzentrum wobei die Lieferanten über ein Planungstool online einen freien Zeitslot buchen. Am gewünschten Zeitpunkt wird nun ein nach 5.2.3 generiertes Ladeprofil hinterlegt.

Die so generierten LKW-Profile liefern nicht nur eine Aussage über den Lastgang durch LKW-Laden, aus ihnen kann auch aus logistischer Sicht die Verzögerungen durch Blockieren von Toren durch E-Ladevorgänge im Vergleich zu konventionellen LKW untersucht werden. Dies ist Gegenstand von Kapitel 5.2.5. In Abbildung 5-13 ist die sich bei verschiedenen Ladeleistungen ergebende Last durch LKW-Laden am Versandzentrum dargestellt. Dabei wird das auf die ursprüngliche Standzeit begrenzte Laden dem unbegrenzten Laden bis 80% SOC gegenübergestellt. Es wird ersichtlich, dass Ladeleistungen im Bereich von 50 kW kein 80 %-Voll-

den der LKW innerhalb eines akzeptablen Zeitraums gewährleisten können. Die Ladevorgänge verschieben sich stark in die Nacht. Ladeleistungen von 150 kW oder 350 kW sind hier besser geeignet, jedoch führen sie zu sehr hohen Lastspitzen.

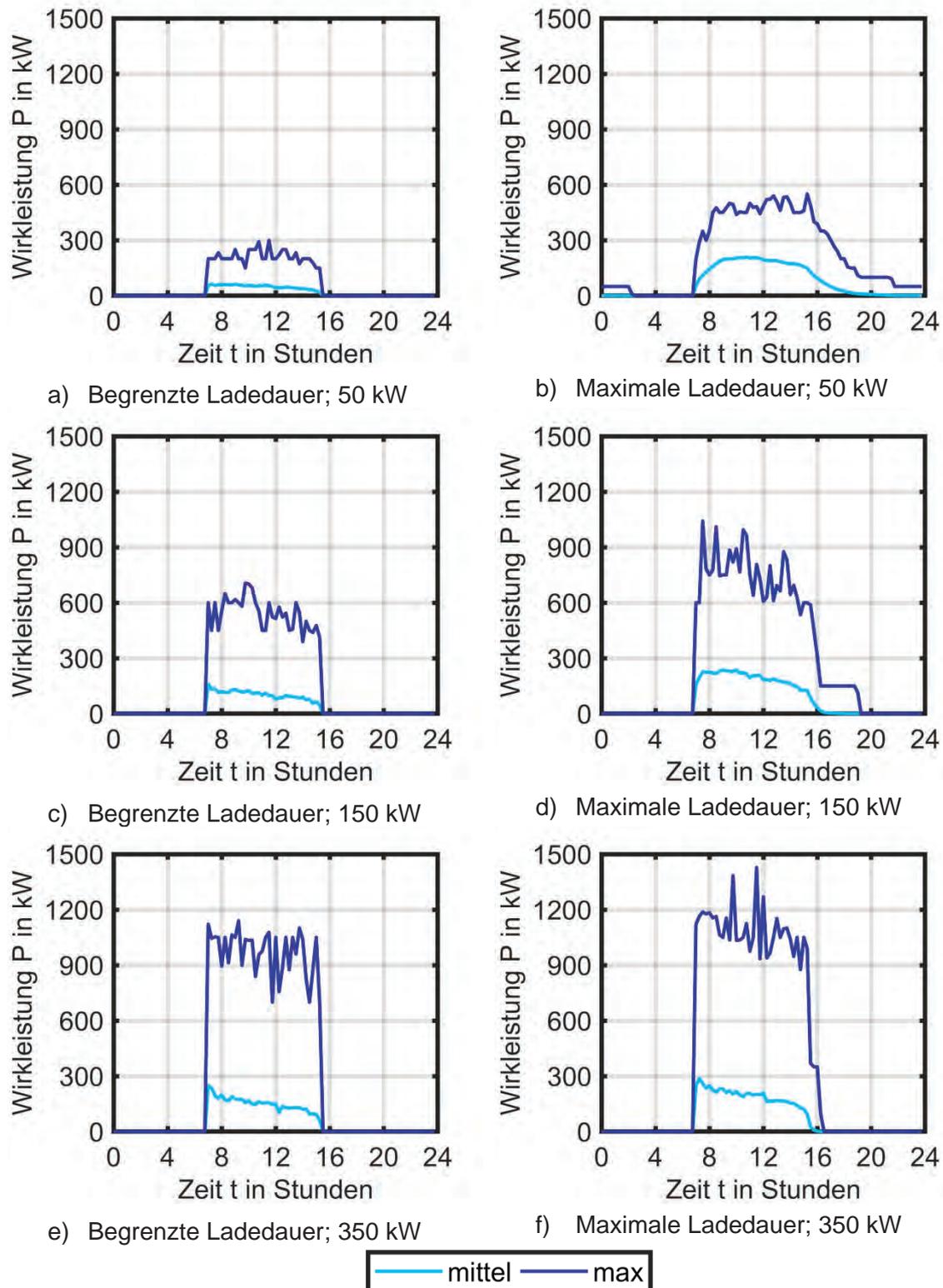


Abbildung 5-13: Mittlere und maximale Wirkleistung des LKW-Ladens bei verschiedenen Ladeleistungen mit und ohne Begrenzung der Ladedauer

Wird nun das unbegrenzte Laden mit 150 kW sowohl auf den Warenein- als auch Warenausgang des im Projekt betrachteten Logistikzentrums hochgerechnet, ergibt sich der in Abbildung 5-14 dargestellte Jahreslastgang aller LKW-Ladevorgänge. Die Maximalleistung ist dabei auf die Transformator-Nennleistung des Logistikzentrums normiert. Das bedeutet, dass bei einem Wert von 1 p.u. die Transformator-Nennleistung des Zentrums allein durch das Laden der elektrischen LKW gedeckt wäre. Es ist zu erkennen, dass durch die hohen Ladeleistungen hohe Spitzen entstehen, die bei der 100 % Elektrifizierung aller LKW in Kombination mit der Residuallast des Logistikzentrums einen Ausbau des Netzanschlusspunktes nötig machen würden.

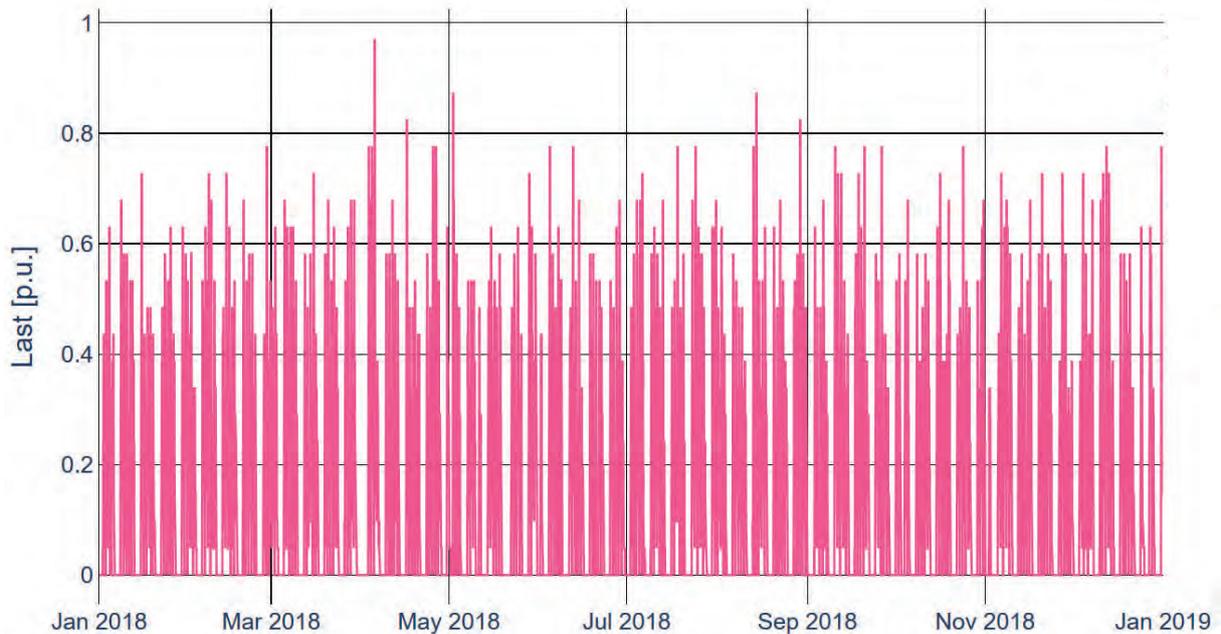


Abbildung 5-14: Jahreslastgang aller LKW-Ladevorgänge am Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von 100 % und einer Ladeleistung von 150 kW

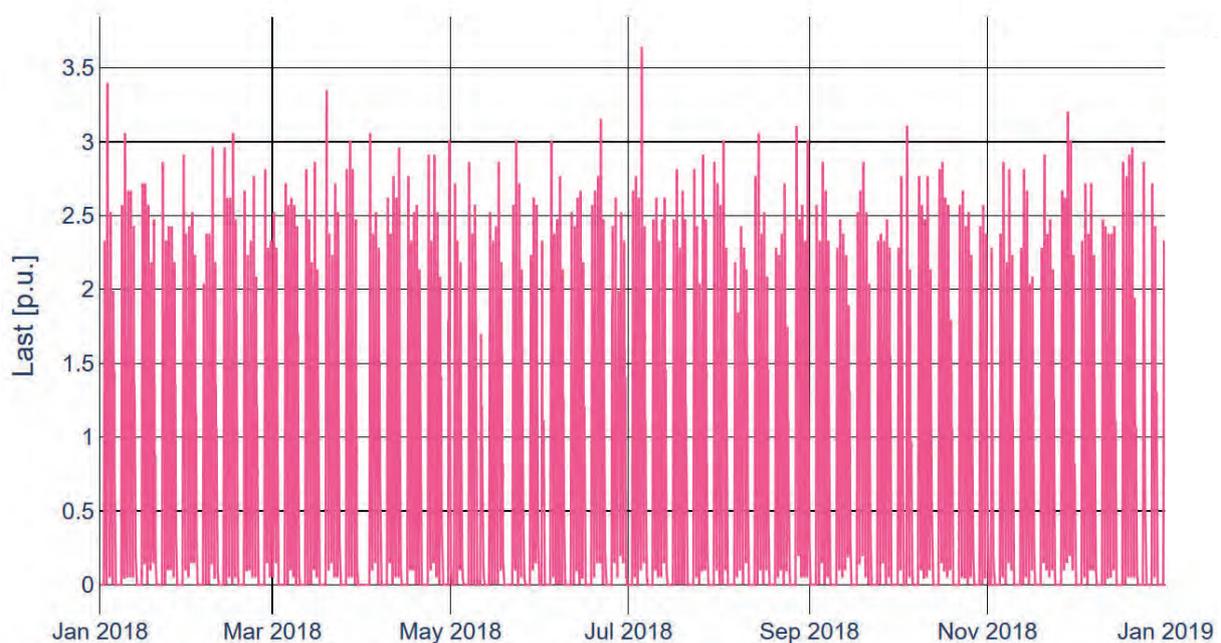


Abbildung 5-15: Jahreslastgang aller LKW-Ladevorgänge an einem „großen“ Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von 100 % und einer Ladeleistung von 150 kW

Wird nun statt den aktuell am Logistikzentrum ankommenden LKW ein noch stärker von LKW angefahrenes Zentrum betrachtet, würde sich bei 100 % Elektrifizierung und einer Ladeleistung von 150 kW die in Abbildung 5-15 dargestellte Kurve der kumulierten Ladevorgänge ergeben. Zur Berechnung wurde die Anzahl an LKW so hochgerechnet, dass die Rampen am Logistikzentrum zu 90 % der Zeit vollständig ausgelastet sind. Die Spitzenlast fällt dann entsprechend höher aus und die Netzauswirkungen werden noch wesentlich deutlicher, wie in 6.1.5 gezeigt wird.

5.2.5 Auswirkungen einer LKW-Elektrifizierung auf logistische Prozesse

Mithilfe der Daten der Ladeprofilsimulation werden die Auswirkungen der dadurch verlängerten Aufenthaltszeiten analysiert. Der Analysezeitraum liegt bei einer Woche, welche zufällig gewählt wurde. Der Ausgangszustand ohne Elektromobilität ist bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben. Es werden dieser Simulation keine Wechselbrückenfahrzeuge⁴ untersucht, weshalb die genannte Rampenanzahl bei zehn bzw. 30 liegt. Beim Wechselbrücken-Verkehr ist das Laden der Batterie erschwert, da die Aufenthaltszeit eines LKW sehr kurz ist. Im WA werden mehrere Rampen für diesen Zweck genutzt, weshalb die Anzahl auf neun reduziert ist.

Basierend auf dem Ausgangszustand und der Ladeprofilsimulation wird in dieser Simulation über die Stand- bzw. Ladezeit dem LKW eine Rampe zugewiesen. Im ersten Schritt wird geprüft, ob die Standzeit größer gleich der Ladezeit ist. Ist die Standzeit länger als die Ladezeit, wird die Standzeit für die Simulation genutzt. Anderenfalls wird die Ladezeit genutzt. Daraufhin wird über die ausgewählte Zeit t dem LKW ein Tor zugewiesen. Falls der Wareneingang oder -ausgang voll belegt ist, wird der LKW abgewiesen und somit nicht am Logistikzentrum bedient. Der Ablauf wird in Abbildung 5-16 dargestellt. [3]

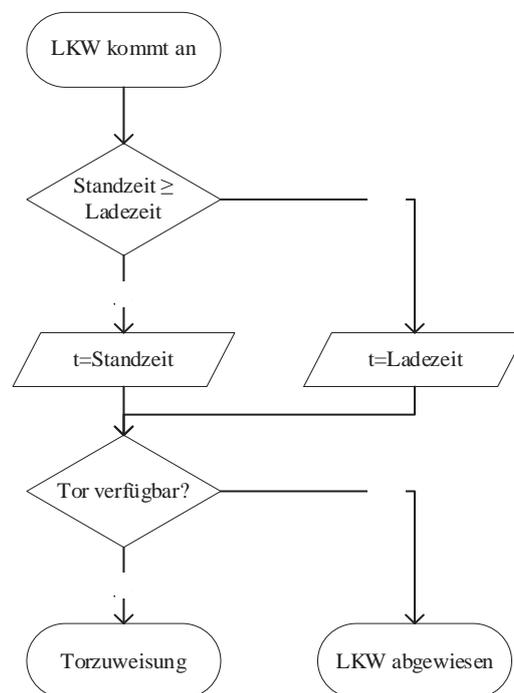


Abbildung 5-16: Ablauf der Simulation unter Berücksichtigung der Stand-/Ladezeiten [3]

Die Auswertungen der Simulationsergebnisse werden im Folgenden beschrieben. In Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 werden die wichtigsten Ergebnisse aller Szenarien für das

⁴ Wechselbrückenfahrzeuge bringen die leeren Wechselbrücken (austauschbarer Ladungsträger für LKW und Anhänger, ähnlich zum Container) zum Logistikzentrum und nehmen die vollgeladenen wieder mit.

große Logistikzentrum zusammengefasst. Allgemein wird unter verschiedenen Elektrifizierungsgraden und Größen von Logistikzentren die Auswirkung des Ladens der LKW-Batterien unter unterschiedlichen Ladeleistungen betrachtet. Es ist dargestellt, wie viele Ladepunkte im jeweiligen Szenario am großen Logistikzentrum zum Beladen der Batterien benötigt werden. Berücksichtigt werden das Laden an der Rampe oder im Hof. Rampenladen bedeutet, dass der LKW während der Be- und Entladung von Waren die Batterie lädt. Dies kann auch länger als der Warenumsatz andauern. Beim Hofladen fährt der LKW nach dem Be- und Entladen an der Rampe auf den Hof und lädt dort ausschließlich die Batterie.

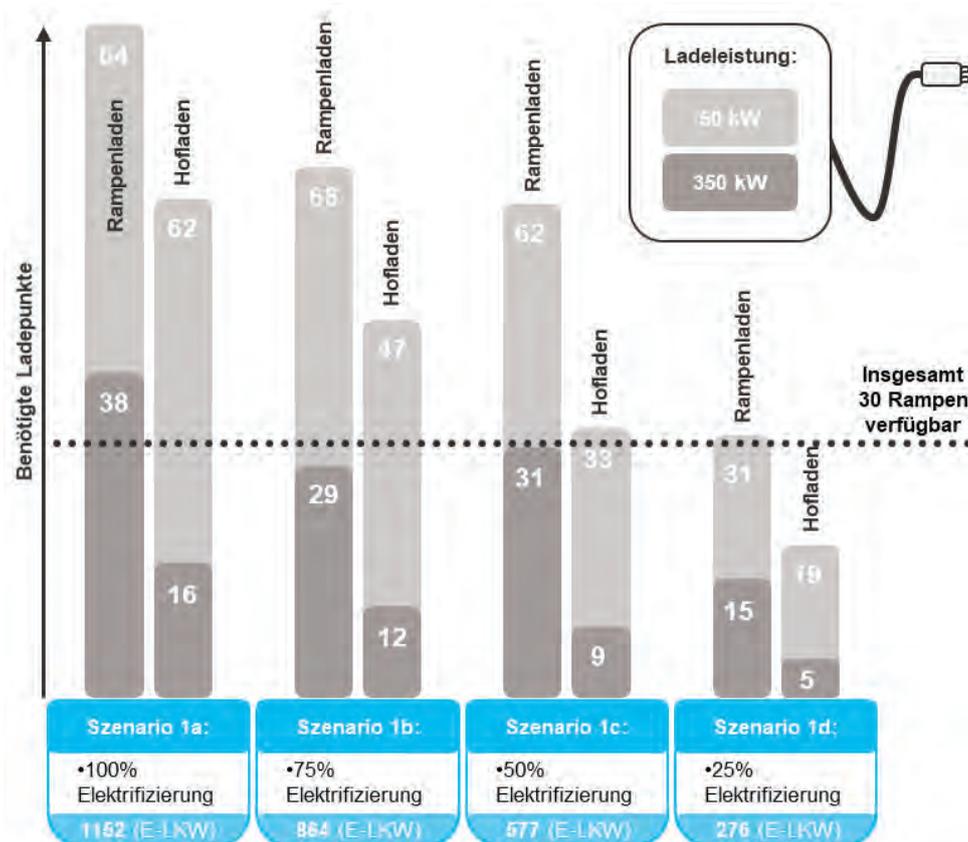


Abbildung 5-17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien 1a-1d des großen Logistikzentrums

Allgemein werden 45-50 % der LKW ihre Batterie am Logistikzentrum nachladen. Diese Zahl resultiert aus der Nachbildung des Ladebedarfs aus den gefahrenen Strecken. Wird nur eine kurze Strecke im Voraus gefahren und der SOC der Batterie beträgt noch über 80 %, findet keine Nachladung am Logistikzentrum statt. Bei 25-42 % aller LKW unabhängig der Ladeleistung überschreitet die Ladezeit die ursprünglich nötige Standzeit. Bei einer Ladeleistung von 350 kW beträgt die Ladezeit nur ein Siebtel der Zeit im Vergleich zu 50 kW. Beim 50 kW Laden entsteht eine durchschnittliche Ladezeit von über zwei Stunden, vereinzelt sogar bis zu 16 Stunden. Die Überschreitung der Standzeit führt zu einer verlängerten Belegung der 30 verfügbaren Rampen im Vergleich zur Nutzung konventioneller Fahrzeuge. Dadurch werden sie für neu ankommende Fahrzeuge blockiert, welche dann teilweise abgewiesen werden. Das Logistikzentrum kann so weniger Fahrzeuge abfertigen. Am Beispiel des großen Logistikzentrums mit niedrigen Ladeleistungen (50 kW) entsteht eine Abweisungsquote von 55 %. Um alle LKW zu bedienen, werden bis zu 84 Ladepunkte benötigt. Diese hohen Ladezeiten sowie Flächen können Spediteure sowie Betreiber von Logistikzentrum im Realbetrieb nicht tolerieren. Abhilfe würden zum Beispiel zusätzliche Parkplätze mit Ladeinfrastruktur auf dem Hof oder in der Nähe des Logistikzentrums schaffen. Zudem könnte ein Zeitfenstermanagement zur An-

gabe der Ladezeit hilfreich sein. Hohe Ladeleistungen (350 kW und mehr) sind wiederum ausreichend (außer bei kompletter Elektrifizierung) für das Abfertigen aller LKW und dem Laden elektrifizierten Fahrzeuge.

Beim Hofladen bzw. Laden auf alternativen Flächen am Logistikzentrum wird die Aufenthaltszeit des LKW länger, da der Warenumschlag und das Batterieladen getrennt werden. Allerdings werden deutlich weniger Ladestationen benötigt. Die Investitionskosten reduzieren sich beträchtlich. Zudem sind keine neuen baulichen Maßnahmen zur Erhöhung der Rampenanzahl notwendig. In der Abbildung 5-18 werden die Ergebnisse der Szenarien 2-4b für das große Logistikzentrum dargestellt. In den Szenarien 4a und b, welche durch Interviews, Marktanalyse und politischer Ausrichtung in naher Zukunft am realistischsten eingeschätzt werden, erreichen 191 bzw. 99 LKW das Logistikzentrum mit deutlich geringeren Ladezeiten als in den Szenarien 1a-d. Daher sind wesentlich weniger Ladepunkte und somit eine geringere Investition notwendig. Zwischen den Szenarien 2 und 4a gibt es nur einen minimalen Unterschied, da alle elektrifizierte LKW unter 18 Tonnen meist eine Fahrleistung unter 200 km haben. In Szenario 3 werden auch elektrifizierte 40 t-LKW mit einer Fahrleistung unter 200 km betrachtet. Somit ist die Anzahl aller E-LKW deutlich höher. Es werden bis zu 49 Ladepunkte benötigt. Zudem haben 40 t-LKW größere Batteriekapazitäten, weshalb der Ladevorgang länger dauert.

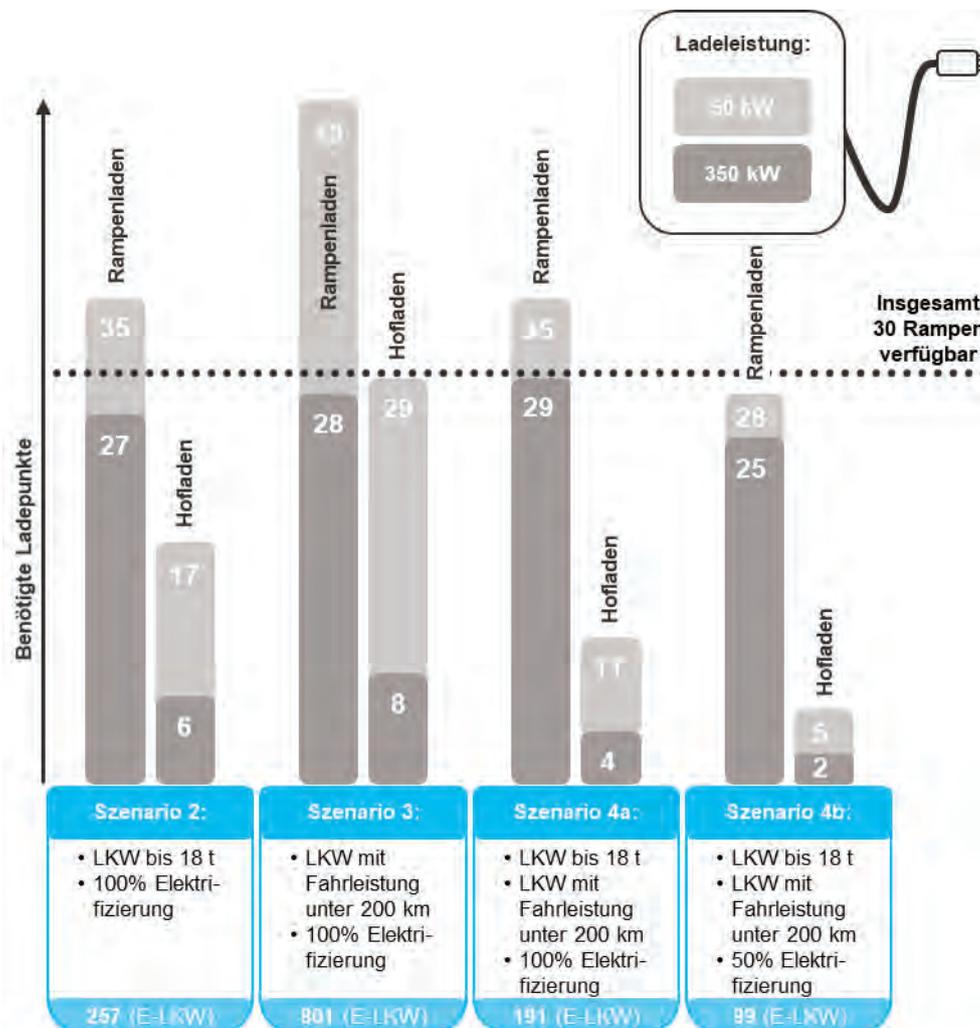


Abbildung 5-18: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien 2-4b des großen Logistikzentrums

In Tabelle 5-2 werden die detaillierten Ergebnisse des Szenario 1a mit einer 100 % Elektrifizierung des kleinen und großen Logistikzentrums aufgezeigt. Ein kleines Logistikzentrum benötigt beim Rampenladen fast die Anzahl der verfügbaren Rampen des großen Logistikzentrums. Zusätzlich wird im Vergleich zu den beiden vorherigen Abbildungen in den folgenden Tabellen eine Kostenbetrachtung mit den Daten aus Kapitel 5.2.1 durchgeführt. Es fallen alleine für die Ladeinfrastruktur Kosten von bis zu 2,7 Mio. Euro an. Neben dem Rampenladen und Hofladen wird zusätzlich die folgende Kombination betrachtet: der E-LKW lädt während dem Warenumschlag an der Rampe und wechselt anschließend auf den Hof. In der Auswertung wird ersichtlich, dass die Kombination mehr Ladepunkte als das Rampenladen benötigt, weshalb diese Variante finanziell nicht rentabel ist.

Tabelle 5-2: Ergebnisse des Szenario 1a

| Szenario 1a 100% Elektrifizierung | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|------------|------------------------|----------------|------------|
| kleines Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 697.392,00 € | 24 | 50 kW | 2.440.872,00 € | 84 |
| 150 kW | 563.925,00 € | 15 | 150 kW | 1.917.345,00 € | 51 |
| 350 kW | 881.040,00 € | 15 | 350 kW | 2.231.968,00 € | 38 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 726.450,00 € | 25 | 50 kW | 2.673.336,00 € | 92 |
| 150 kW | 676.710,00 € | 18 | 150 kW | 2.180.510,00 € | 58 |
| 350 kW | 881.040,00 € | 15 | 350 kW | 2.525.648,00 € | 43 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 464.928,00 € | 16 | 50 kW | 1.801.596,00 € | 62 |
| 150 kW | 338.355,00 € | 9 | 150 kW | 1.165.445,00 € | 31 |
| 350 kW | 293.680,00 € | 5 | 350 kW | 939.776,00 € | 16 |

In Tabelle 5-3 sind die Ergebnisse des Szenario 4a und b mit elektrifizierten LKW unter 18 t und einer Fahrleistung bis zu 200 km für das große Logistikzentrum dargestellt. Hier können Kosten für die Ladeinfrastruktur von bis zu zwei Mio. Euro entstehen. Die Auswertungsergebnisse der weiteren Szenarien sind im Anhang 3 ebenfalls tabellarisch dargestellt.

Tabelle 5-3: Ergebnisse des Szenario 4a

| Szenario 4 - LKW bis 18 t und Fahrleistung unter 200 km | | | | | |
|---|----------------|------------|-------------------------|----------------|------------|
| a) 100% Elektrifizierung | | | b) 50% Elektrifizierung | | |
| großes Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 1.017.030,00 € | 35 | 50 kW | 813.624,00 € | 28 |
| 150 kW | 1.127.850,00 € | 30 | 150 kW | 939.875,00 € | 25 |
| 350 kW | 1.703.344,00 € | 29 | 350 kW | 1.468.400,00 € | 25 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 1.162.320,00 € | 40 | 50 kW | 871.740,00 € | 30 |
| 150 kW | 1.315.825,00 € | 35 | 150 kW | 1.090.255,00 € | 29 |
| 350 kW | 1.938.288,00 € | 33 | 350 kW | 1.585.872,00 € | 27 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 319.638,00 € | 11 | 50 kW | 145.290,00 € | 5 |
| 150 kW | 225.570,00 € | 6 | 150 kW | 150.380,00 € | 4 |
| 350 kW | 234.944,00 € | 4 | 350 kW | 117.472,00 € | 2 |

6 Analyse des Flexibilitätspotentials von Logistikzentren

In diesem Kapitel wird das Flexibilitätspotential der in den vorherigen Abschnitten identifizierten Prozesse, Verbraucher und zukünftigen Komponenten wie Energiespeicher und Elektromobilität dargestellt. Dazu wurde das Flexibilitätspotential durch die Betrachtung der sich ergebenden Lastgänge analysiert und die Auswirkungen auf die logistischen Prozesse sowie das Stromnetz identifiziert. In 6.1 wird das Flexibilitätspotential vorgestellt. Die Netzauswirkungen der flexibilisierten Last werden in 6.2 thematisiert.

6.1 Flexibilitätspotential der Prozesse in einem Logistikzentrum

Zunächst wird das interne Flexibilitätspotential in 6.1.1 aus logistischer Sicht und dessen elektrische Auswirkungen dargestellt. 6.1.2 behandelt das Potential eines externen Speichers am Logistikzentrum und 6.1.3 untersucht, welches Potential eine Vergrößerung der installierten PV-Leistung zur Folge hätte. In 6.1.4 wird die deutlich erhöhte Flexibilität durch das Mitarbeiterladen betrachtet. Abschließend werden in 6.1.5 und 6.1.6 zusätzlich die E-LKW und das zukünftig mögliche Gesamtsystem inklusive aller neuen Komponenten behandelt.

6.1.1 Logistische Prozesse

Im Logistikzentrum bieten sich verschiedene Bereiche und Komponenten sowie Prozesse an, durch die eine Energieeffizienz und/oder eine Energieflexibilität erreicht werden kann. Besonders bei den Stetig- und den Unstetigförderern können Potentiale entstehen. Bei den Unstetigförderern wird auf die Regalbediengeräte und Flurförderfahrzeuge eingegangen, da diese die größte Anpassungsfähigkeit aufweisen. Die Gebäudeinfrastruktur, wie z. B. Luft- und Druckluftversorgung, wurde im Forschungsprojekt nicht berücksichtigt.

Unstetigförderer:

Bei *Regalbediengeräten* ergeben sich verschiedene Ansatzpunkte zur Energiebedarfsreduktion sowie Flexibilisierung. Diese lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- mechanische Konstruktion,
- elektrische und elektrotechnische Konfiguration,
- Lagerbewirtschaftungsstrategien und
- Bewegungssteuerung [36].

Die *mechanische Konstruktion* bewirkt besonders die Minderung der Masse bewegter Körper, die Reduktion der Radien rotierender Körper sowie die Verringerung der Reibung bei jeder Bewegung [36]. Dadurch kann sich der Energiebedarf senken und es können Lastspitzen verringert werden. Eine Energieflexibilität ist dadurch nicht erreichbar.

Elektrische und elektrotechnische Konfigurationen, wie die Zwischenkreiskopplung, die Energierückspeisung und die Energiespeicherung, ermöglichen, freiwerdende Energie weiterzuverwenden oder einzuspeisen [36]. Mithilfe der verbauten Antriebe im Generatormodus (z. B. beim Senken einer Last oder beim Verzögern) wird die Energie zurückgewonnen. Es ergibt sich eine erhöhte Energieflexibilität. Neben der Glättung der Lastspitzen, die durch das Beschleunigen entstehen, können Speicher auf Netzschwankungen reagieren [47, pp. 14-17]. Die Integration von Energiespeichern (Powercaps bzw. Kondensatoren) führt jedoch zu einer höheren Masse des RBG [3, p. 3]. Damit wird die Optimierung im Bereich der mechanischen Konstruktion behindert und der Integrationsort des Speichers ist besonders relevant.

Für einen effizienten Betrieb von Hochregallagern mit deren RBG sind *Lagerbewirtschaftungsstrategien* elementar. Diese werden in Strategien zur Lagerplatzvergabe und Strategien zur

Ein- und Auslagerung gegliedert [14, p. 110]. Laut [36] erwirken Lagerbewirtschaftungsstrategien eine Reduktion des Energiebedarfs bei sinkenden Fahrzeiten. Ebenfalls können durch die Strategien Fahrten anders modelliert, Prozesse verschoben und somit eine Energieflexibilität ermöglicht werden [3, pp. 2-3]. Aufgrund der Untersuchungen von [36] wird auf diese Kategorie im Projekt nicht näher eingegangen.

Die Bewegungssteuerung dient zur Steuerung und Überwachung des Bewegungsablaufs von Ladeeinheiten in allen Freiheitsgraden, x-Richtung (Fahrwerksbewegung; horizontal), y-Richtung (Hubwerksbewegung, vertikal) und z-Richtung (Gabelbewegung) [48]. Im zweidimensionale Bewegungsbereich in x- und y- Richtung besteht das größte Potential, den Energiebedarf, den Verschleiß, das Schwingungsverhalten und die Spielzeiten zu senken [36]. Zudem kann die Bewegungssteuerung Flexibilitätspotentiale begünstigen. Dies wurde anhand einer Simulationsuntersuchung bestätigt und ist im Folgenden beschrieben.

Hierzu dient das Simulationsmodell aus AP2. Zur Vereinfachung wurde das HRL mit zehn Gassen und deren RBG ausgewählt. Die RBG werden durch Mitarbeitende (manuell oder startet die Bewegung) gesteuert. Zudem kommissionieren die Mitarbeitenden verschiedene Artikel in Sammelbehälter und übergeben diese über das Förderband an die Packerei. Die Aufträge werden über Wellen freigegeben. Zum Nachweis der Energieflexibilität wurden verschiedene Experimente mit dem Simulationsmodell durchgeführt. Hierfür wurde die Gleichzeitigkeit der RBG reduziert. Gleichzeitigkeit stellt das parallele und zum exakt gleichen Zeitpunkt startende Anfahren von mehreren RBGs durch die Steuerung oder den Mitarbeitenden (z. B. bei Auftragsfreigabe) dar. Eine Reduktion wird durch eine verzögerte Startzeit (Wartezeit) des RBG erreicht. Für die Wartezeit wurde eine Zufallszahl einer Gleichverteilung eines vorbestimmten Zeitraums gezogen. Es fanden Untersuchungen zu Wartezeiten zwischen 0 bis zu 80 sec statt. [3, p. 3]

Die experimentellen Ergebnisse weisen, dass durch die Reduktion der Gleichzeitigkeit die Lastspitzen deutlich reduziert werden können. Dies wird in Abbildung 6-1 mit dem Energieverbrauch eines RBG pro Tag von zwei Experimenten exemplarisch dargestellt. Der Versuch ohne Wartezeit (ohne Verzögerung) legt dar, dass sich sehr hohe Lastspitzen entwickeln. Eine Verringerung bzw. Verlegung der Spitzen kann durch einen Wartezeitraum von 0 bis 10 sec erreicht werden. Die Spitzenlast kann um ca. 50 Prozent reduziert werden. Folgt eine weitere Erhöhung des Wartezeitraums, ergibt sich keine weitere Reduktion der Lastspitzen. Durch den Einflussfaktor Mensch ist allerdings die komplette Gleichzeitigkeit nie gegeben, welche jedoch nie ausgeschlossen werden kann. Daher ist es empfehlenswert, dies durch die Bewegungssteuerung des RBGs zu beachten. Die Prozesse im Logistikzentrum werden durch die geringe Zeitverschiebung im Sekundenbereich nicht beeinträchtigt. [3, pp. 3-4]

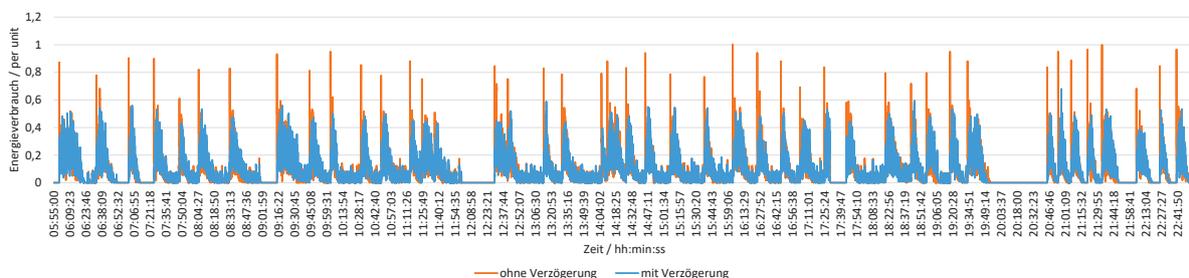


Abbildung 6-1: Tageslastkurve eines Hochregallagers der Simulationsexperimente [3]

Weitere Unstetigförderer sind *Flurförderfahrzeuge* (z. B. ein Gabelstapler), welche sich mit folgenden Antriebsarten bewegen:

- Batterieelektrischer Antrieb
- Verbrennungsmotorischer Antrieb

Zum batterieelektrischen Antrieb von Flurförderfahrzeugen verhelfen Elektromotoren. Diese haben Vorteile wie Abgasfreiheit, geringe Lärmentwicklung und geringe Vibrationen, welche besonders in Gebäuden von Interesse sind [49]. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren werden eher zum Heben schwerer Lasten verwendet. Effizientere elektrische Fahrzeuge bzw. Motoren verstärken diese Vorteile und verbessern den Energieverbrauch. Zudem fördert eine verbesserte Routenplanung den Verbrauch. Weiteres Flexibilitätspotential eines elektrischen Flurförderfahrzeugs besteht in der Batterie. Besonders interessant sind die Nutzung von Wechselbatterien. Ladezeiten könnten bei geringem Gesamtenergieverbrauch gering (je nach Schichtkonzept z. B. nachts) oder bei hoher Eigenerzeugung durch PV-Anlagen (z. B. mittags) stattfinden. Auch ein gleichzeitiges Laden der Fahrzeuge nach Schichtende sollte vermieden werden. Versetztes Laden würde somit Lastspitzen reduzieren und Lastsenken auffüllen. Es folgt eine Glättung des Lastgangs. Um diese Lade-Organisation dem Mitarbeitenden abzunehmen, könnte ein Unternehmen die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge über ein Lademanagement regeln. Lademanagement sorgt ebenfalls für eine vereinfachte Ladeverwaltung von festverbauten Batterien. Zur Glättung von weiteren Lastspitzen dienen freie Wechselbatterien, welche außerhalb des Flurförderfahrzeuges nicht nur geladen, sondern bedarfsweise entladen werden. [3]

Stetigförderer:

Stetigförderern (z. B. ein Kettenförderer) transportieren das Fördergut kontinuierlich oder diskret kontinuierlich [14]. Aufgrund der Kontinuität erschweren Förderer die Erzeugung von Energieflexibilität. Ähnlich wie beim RBG können mechanische Konstruktion, die elektrische und elektrotechnische Konfiguration sowie Sensorik und die Steuerung Energieverbräuche senken und somit die Energieeffizienz zu verbessern. [3]

6.1.2 Energiespeicher

Der Einsatz eines Energiespeichers kann das Flexibilitätspotential des Logistikzentrums deutlich beeinflussen. Die Auslegung des Speichers und mögliche Einsatzzwecke (Lastgangglättung, Eigenverbrauchsoptimierung und Bereitstellung von Netzdienstleistungen) wurden bereits in 4.3.2 thematisiert. In diesem Abschnitt werden die sich daraus ergebenden Ergebnisse für das Flexibilitätspotential betrachtet.

Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 zeigen die sich verändernden Jahreslastgänge des Logistikzentrums bei Optimierung von Eigenverbrauch und Lastgang. Mit der Auslegung zum vollen Eigenverbrauch der PV-Erzeugung bei einer Speichergröße von 427 kWh erfolgt jedoch noch keine umfassende Lastglättung. Wie in Abbildung 6-2 ersichtlich wird, ist der Speicher in diesem Fall vor allem im Sommer genutzt und könnte damit im Winter für Netzdienstleistungen zur Verfügung stehen. Wird statt der Eigenverbrauchsoptimierung eine Lastglättung am Logistikzentrum fokussiert, ist, je nach Ausmaß der Glättung eine wesentlich größere Speicherdimensionierung notwendig. In Abbildung 6-3 mit einer Speichergröße von 1390 kWh konnte der Lastgang bis auf 0,58 p.u. geglättet werden. In beiden Fällen wurde eine Entladung des Speichers auf minimal 20 % SOC zum Alterungsschutz und für Notfälle vorgesehen. Dieser Puffer kann bei voller Entladung des Speichers von der Speichergröße abgezogen werden. Im Fall der Lastglättung ist der Speicher vor allem im Winter durch das Logistikzentrum in Benut-

zung, da hier auch aufgrund der PV-Anlage eine höhere Residuallast als im Sommer vorhanden ist. In diesem Fall könnte der Speicher im Sommer für Netzdienstleistungen zur Verfügung stehen.

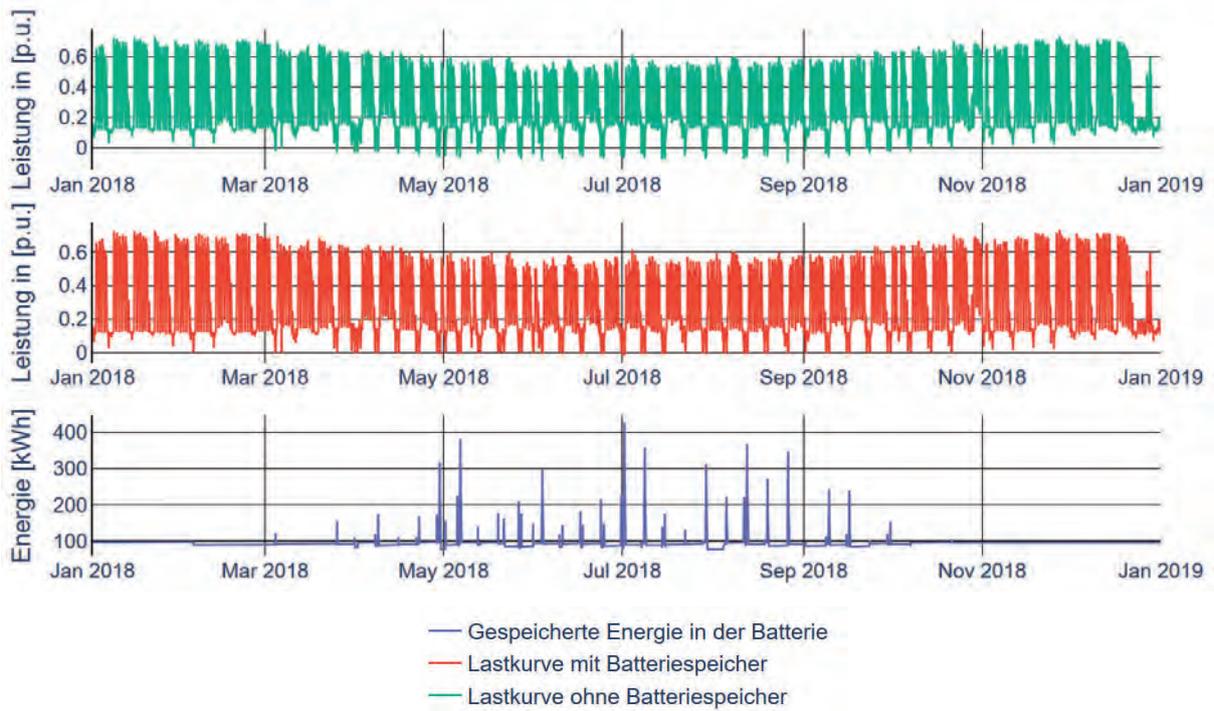


Abbildung 6-2: Jahreslastgang des Logistikzentrums bei Einsatz eines Speichers zur PV-Eigenverbrauchsoptimierung

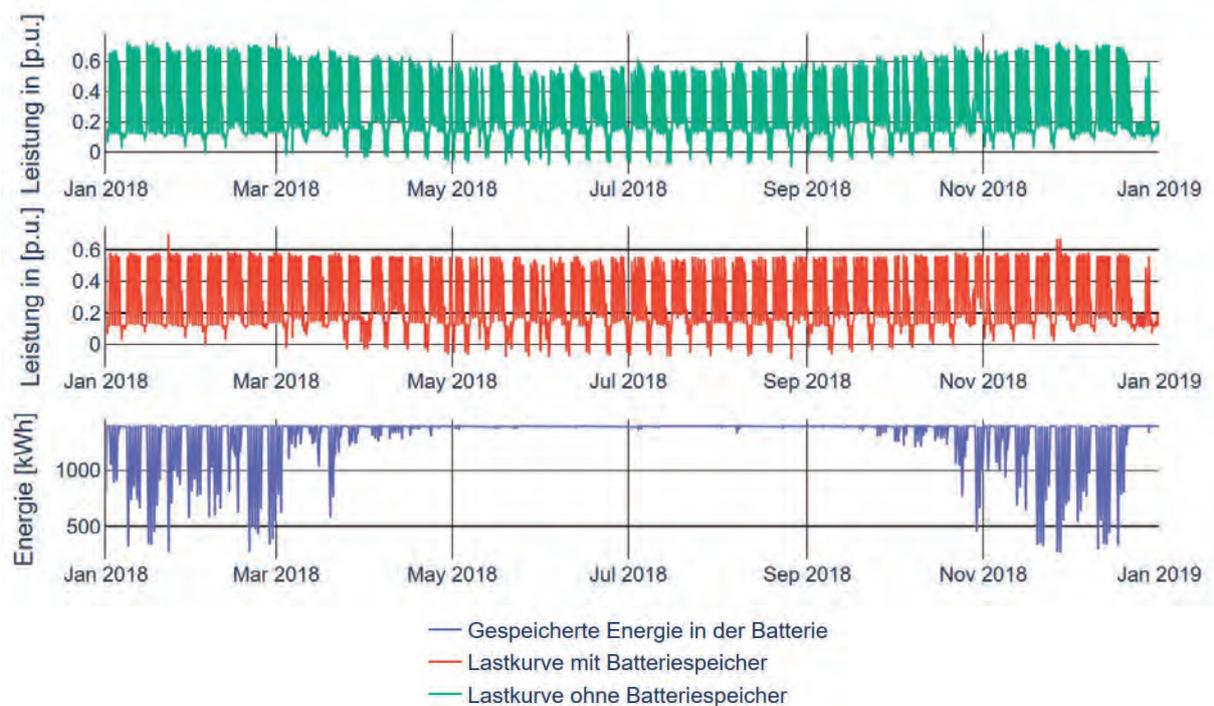


Abbildung 6-3: Jahreslastgang des Logistikzentrums bei Dimensionierung des Speichers zur Lastglättung

6.1.3 PV-Anlage

Die Auswirkungen des Einsatzes einer PV-Anlage auf den Lastgang und damit des Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums wurden anhand der Messungen der bestehenden PV-Anlage des Logistikzentrums untersucht. Die Analyse der Messdaten wurde bereits in 3.2.6 sowie die Auswirkungen auf die Häufigkeit der auftretenden Leistungsbezüge in 3.3.2 thematisiert. Die Residuallast des Logistikzentrums am Tag maximalen Verbrauchs kombiniert mit der maximalen PV-Erzeugung ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Ab ca. 8:00 Uhr morgens können die ersten Auswirkungen der PV-Anlage in der Lastsenkung erkannt werden, welche bis zum Abend anhalten. Die PV-Anlage erreicht eine maximale Wirkleistungserzeugung von 0,21 p.u. und damit ein Fünftel der maximalen Anschlussleistung des Logistikzentrums. Im Verhältnis zur maximal auftretenden Last des Logistikzentrums von 0,74 p.u. beträgt diese bereits 28 %. Dadurch kann vor allem im Sommer und um die Mittagszeit eine deutliche Reduktion der Maximallast erreicht werden, welcher auch die hohe Gleichzeitigkeit von Arbeitszeiten und PV-Erzeugung zugutekommt. Am Logistikzentrum besitzt die PV-Anlage somit ein hohes Potential zur Lastreduktion und damit auch ein hohes Potential zur Erhöhung der Flexibilität.



Abbildung 6-4: Residuallast des Logistikzentrums mit PV-Anlage bei maximaler PV-Erzeugung an einem Tag maximaler Last

Da das untersuchte Logistikzentrum über weitere freie Dachflächen verfügt, auf denen eine PV-Anlage installiert werden könnte, wurde in einem zweiten Schritt die installierte PV-Leistung simulativ verdoppelt. Die resultierende Residuallastkurve eines Tages zeigt Abbildung 6-5. Die Last des Logistikzentrums konnte zwischen 8:00 Uhr und 20:00 Uhr weiter deutlich auf bis zu 0,33 p.u. gesenkt werden. Abgesehen von einer verbleibenden Spitze am frühen Morgen und einer etwas niedrigeren am Abend wird die Last sehr gut geglättet. Eine Erhöhung der PV-Leistung am Logistikzentrum ist somit in diesem Fall eine vielversprechende Möglichkeit. Dabei muss jedoch in jedem Fall die Tragfähigkeit der Dachkonstruktion bei Bestandsgebäuden berücksichtigt werden, die trotz vorhandener Flächen den Ausbau verhindern kann. Auch sollte die entstehende Rückspeisung am Wochenende, welche bei einer Vergrößerung der PV-Leistung auftreten kann, nicht außer Acht gelassen werden, da das untersuchte Logistikzentrum besonders an Sonntagen außer Betrieb ist. Die Residuallastkurve über ein Jahr inklusive der durch die Verdopplung der PV-Leistung ausgeprägten Rückspeisung an den Wochenenden zeigt Abbildung 6-6. All die genannten Punkte müssen bei der Überlegung einer PV-Installation gegenübergestellt werden, die Vorteile sind jedoch besonders bei Neubauten überwiegend.

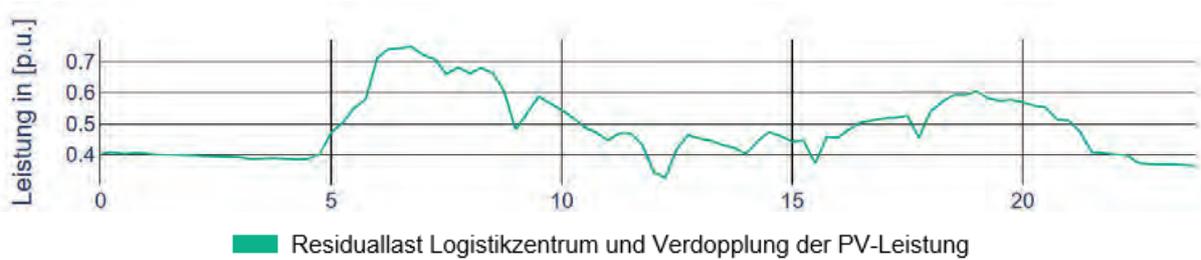


Abbildung 6-5: Residuallast des Logistikzentrums mit PV-Anlage bei Verdopplung der PV-Erzeugung an einem Tag maximaler Last



Abbildung 6-6: Jahres-Residuallast des Logistikzentrums mit PV-Anlage bei Verdopplung der PV-Erzeugung

6.1.4 Mitarbeiter-PKW

Das zukünftige Laden von elektrischen Mitarbeiter-PKW kann die Last eines Logistikzentrums in Zukunft verändern. Abbildung 6-7 zeigt die aktuelle Residuallast des Logistikzentrums über ein Jahr im Vergleich zur durch Mitarbeiterladen erhöhten Residuallast. Dabei wurde für die Worst-Case-Abschätzung eine 100 %-Elektrifizierung der Mitarbeiter-PKW betrachtet. Es wird ersichtlich, dass sich in diesem Fall die Last des Logistikzentrums verdoppeln könnte. Das Ausmaß des Lastanstiegs ist jedoch abhängig von der regionalen Lage, Ladeinfrastruktur-Strategie sowie des Automationsgrades des Logistikzentrums. So sind städtische Logistikzentren gegebenenfalls stärker von einer Elektrifizierung betroffen und müssen mehr Ladeinfrastruktur anbieten, wenn Mitarbeiter über keine eigene Heimpladeinfrastruktur verfügen. Auch der Automationsgrad spielt, da er die Zahl der Mitarbeiter maßgeblich prägt, eine wichtige Rolle bei der zu erwartenden Last durch Mitarbeiterladen.

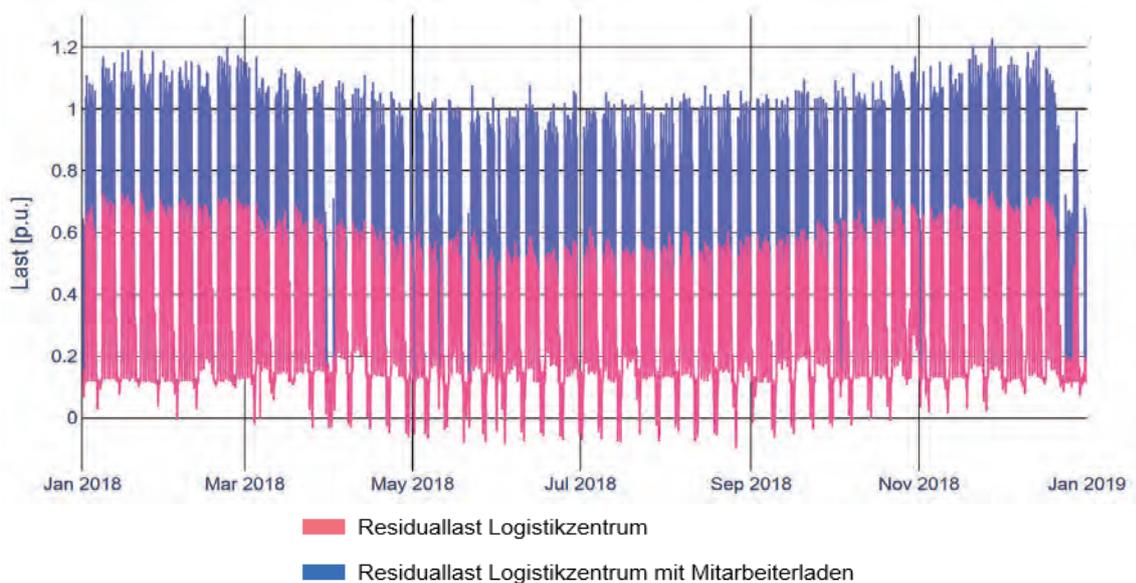


Abbildung 6-7: Jahres-Residuallast des Logistikzentrums mit und ohne Mitarbeiterladen im Vergleich

Dass ein Lademanagement in diesem Fall ein immenses Lastreduktionspotential bietet, wurde bereits in 5.1.3 behandelt. Wie groß dieses ausfallen kann, zeigen Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9. Durch eine Verschiebung der Ladevorgänge in Zeiträume geringerer Last während der Arbeitszeiten kann die Residuallast des Logistikzentrums mit Mitarbeiterladen auf die bisherige Maximallast von 0,74 p.u. gesenkt und damit auf gleichem Niveau wie vor einer Elektrifizierung der Mitarbeiter-PKW gehalten werden. Dadurch muss der Deckungsbeitrag des von den Mitarbeiter-PKW benötigten Energiebedarfs lediglich leicht auf 89 % abgesenkt werden. Ist das Ziel nicht die Glättung auf die bisherige Maximalleistung, sondern ausschließlich die Einhaltung der Anschlussleistung von 1 p.u., d.h. die Vermeidung einer Anschlussverstärkung mit neuer Station am Logistikzentrum, könnte mithilfe eines Lademanagements der Ladebedarf sogar zu 99,5 % und damit nahezu vollständig gedeckt werden, ohne dass eine Erhöhung der Anschlussleistung am Logistikzentrum nötig wird.

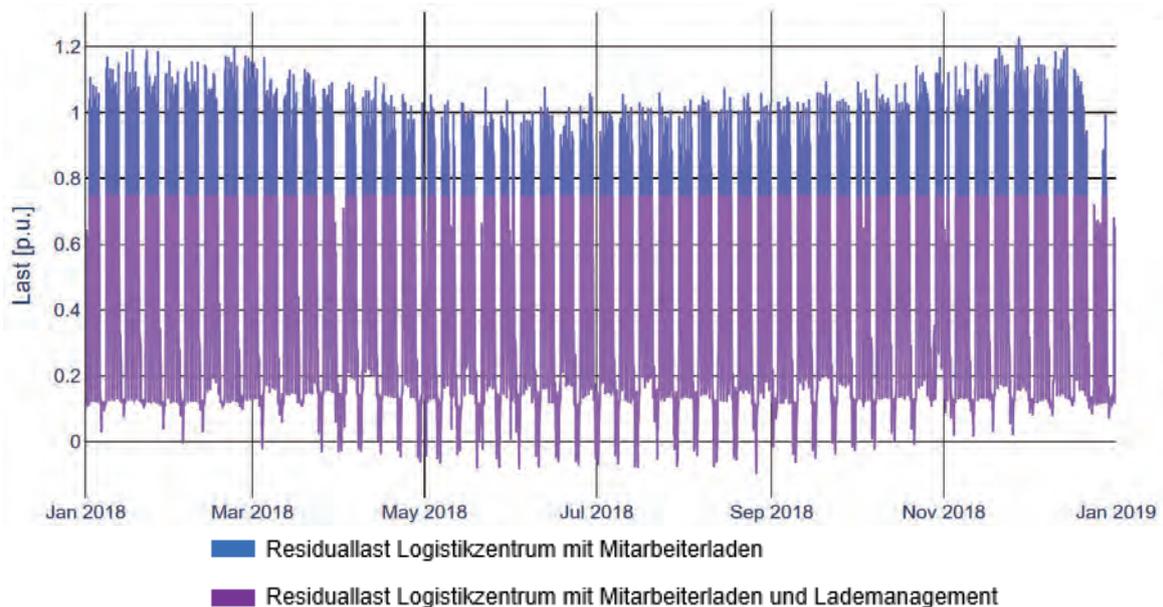


Abbildung 6-8: Auswirkungen eines Lademanagementsystems zur maximalen Lastreduktion am Logistikzentrum

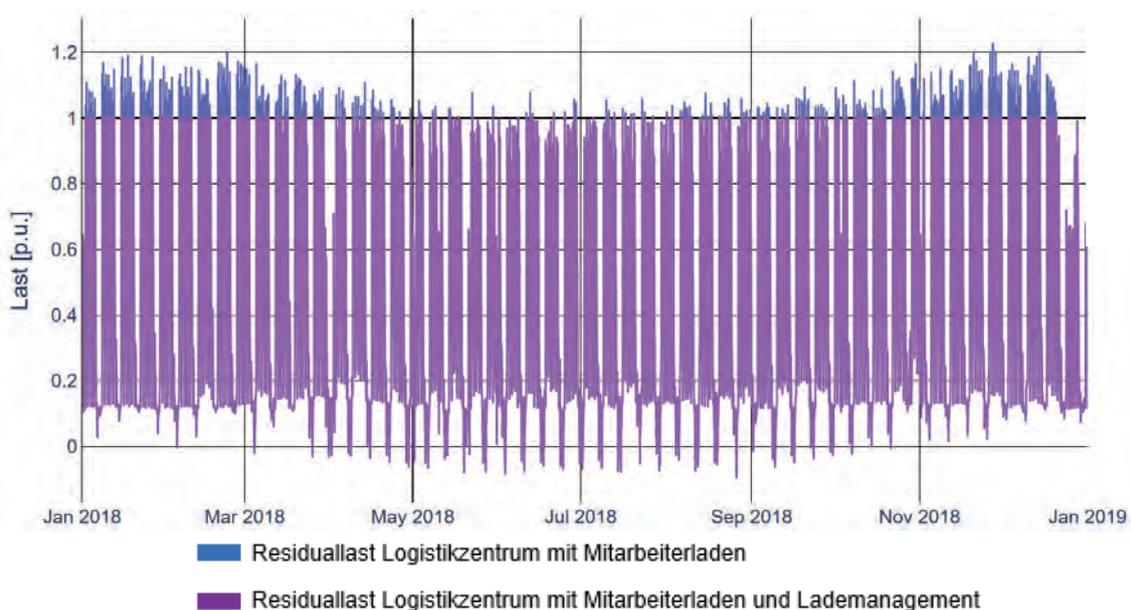


Abbildung 6-9: Auswirkungen eines Lademanagementsystems zur Einhaltung der Anschlussleistung am Logistikzentrum

Insgesamt zeigt sich, dass der Hochlauf von Mitarbeiterladen am Logistikzentrum die Last zwar deutlich erhöhen kann, sich dadurch aber auch ein neues wesentlich größeres Flexibilitätspotential ergibt, welches es ermöglicht, ohne Aufrüstung des Netzanschlusses Ladeinfrastruktur zu integrieren. Dies ist abhängig von der bestehenden Anschlussleistung des Logistikzentrums und zeigt, dass eine vorausschauende Planung und Auslegung des Netzanschlusses deutliche Vorteile in der Zukunft bieten kann.

6.1.5 LKW-Laden

Das Laden von elektrischen LKW zusätzlich zu den Mitarbeiter-PKW, sorgt für eine zusätzliche Last am Logistikzentrum. Abbildung 6-10 zeigt die Erhöhung der Residuallast um Mitarbeiter- und LKW-Laden. So kann sich unter Berücksichtigung von beiden Ladearten die Spitzenlast des betrachteten Logistikzentrums verdreifachen. Das LKW-Laden alleine würde bereits für eine Verdopplung der Spitzenlast sorgen. In dieser Analyse wurde das Laden am Warenein- und -ausgang bei einer Elektrifizierung aller aktuell am Logistikzentrum ankommenden LKW betrachtet. Als Ladeleistung wurden 150 kW und das Worst-Case-Szenario des unbegrenzten Ladens bis auf 80 % SOC ausgewählt (nähere Informationen zu den Ladeleistungen und Ladeszenarien sind in 5.2 zu finden). Durch den engen Zeitplan der Lieferprozesse bieten kabelgebunden ladende elektrische LKW ein geringes Flexibilitätspotential, da ihre Ladevorgänge aufgrund von Wirtschaftlichkeitseinbußen nicht beliebig verschoben oder verzögert werden können. Eine Betrachtung einer anderen Ladetechnik, wie Batteriewechselsysteme, könnte das Flexibilitätspotential jedoch noch einmal deutlich erhöhen.

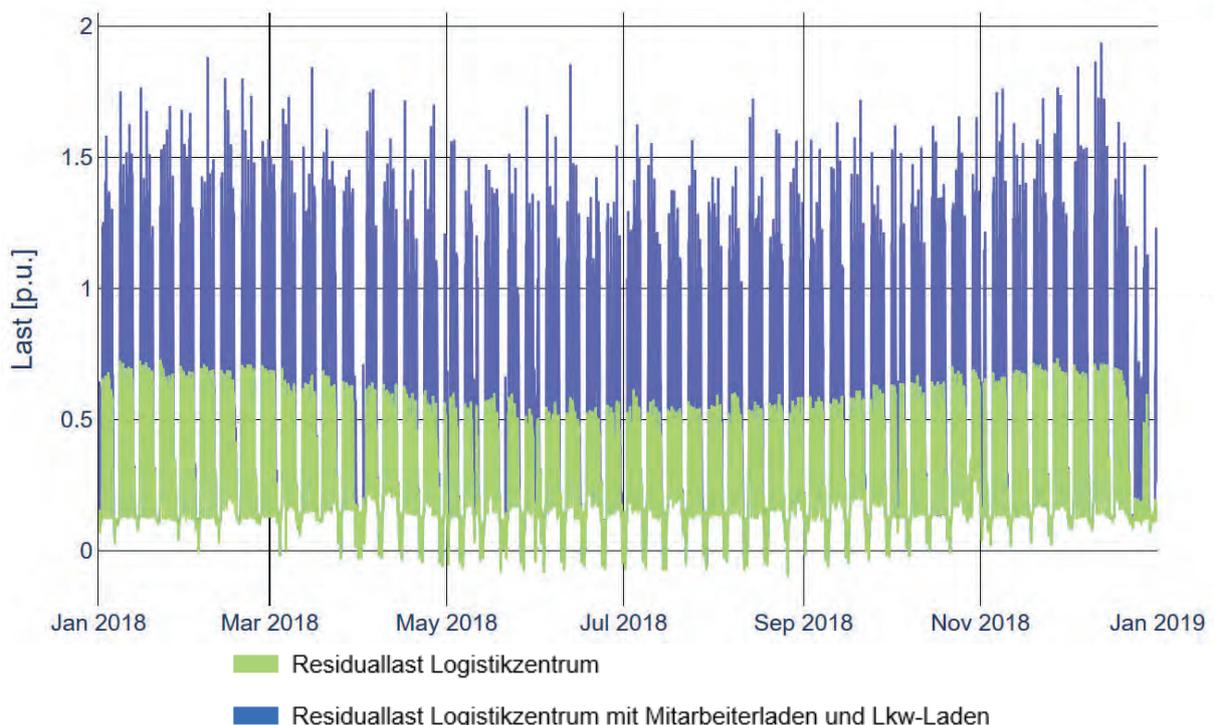


Abbildung 6-10: Jahres-Residuallast des Logistikzentrums mit und ohne Mitarbeiter- und LKW-Laden im Vergleich

Beim kabelgebundenen Laden von elektrischen LKW werden zusätzliche Komponenten, wie das Lademanagement der PKW oder eine Batterie benötigt, um hier Flexibilisierungen zu erreichen. Abbildung 6-11 zeigt, inwiefern das Lademanagement der PKW die von den PKW und LKW verursachten Lastspitzen glätten kann. Obwohl sich das Lademanagement bei Betrachtung der PKW alleine noch als sehr leistungsstark gezeigt hat, ist die zusätzliche Last durch die LKW nicht mehr vollständig auf die maximale Anschlussleistung reduzierbar. Es wird

zwar eine Reduktion erreicht und die PKW-Ladevorgänge werden beim LKW-Laden fast vollständig abgeregelt, doch das reicht nicht aus. Die Residuallast mit PKW- und LKW-Laden sowie Lademanagement der PKW überschreitet die Grenze der Anschlussleistung von 1 p.u.. Trotz der starken Abregelung der PKW konnte deren Energiebedarf immer noch zu 84,6 % gedeckt werden, da in Zeitabschnitten ohne LKW-Laden noch ein großer Puffer zwischen maximaler Last des Logistikzentrums und Anschlussleistung vorhanden ist. Die hohen Ladeleistungen beim LKW-Laden und die daraus entstehenden schlagartigen hohen Lastsprünge erschweren jedoch eine komplette Glättung.

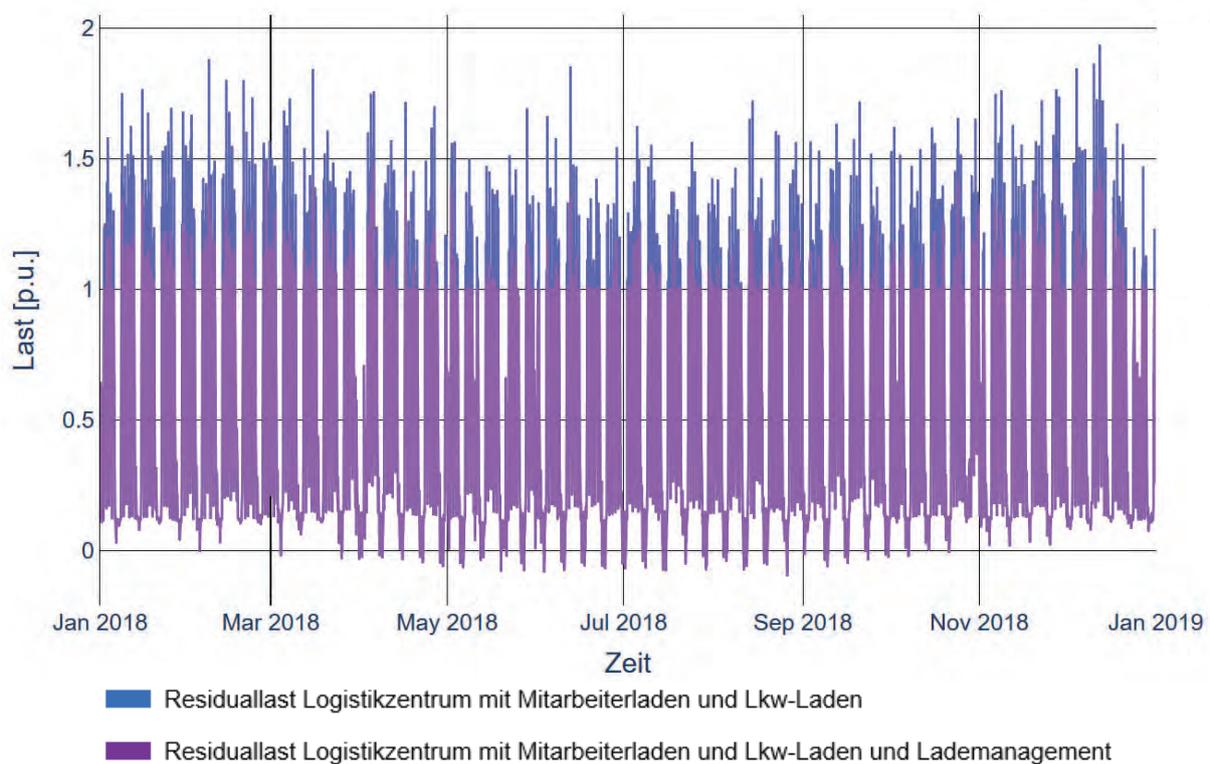


Abbildung 6-11: Auswirkungen eines PKW-Lademanagementsystems zur Einhaltung der Anschlussleistung am Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von PKW und LKW

Wie in 5.2 thematisiert, verfügt das untersuchte Logistikzentrum über mehr Rampen, als aktuell durch LKW ausgelastet werden. Um neben dem bestehenden Logistikzentrum ein größeres zu simulieren, wurde die aktuelle Auslastung an anfahrenenden LKW auf 90 % erhöht. Das bedeutet, dass die Infrastruktur am Logistikzentrum voll ausgenutzt wird. Dementsprechend würden wesentlich mehr LKW am Logistikzentrum ankommen, was bei einer Elektrifizierung von diesen auch die Last durch die LKW-Ladevorgänge aus elektrischer Sicht deutlich erhöht. Abbildung 6-12 zeigt, wie sich damit die Last im Vergleich zur Residuallast des Logistikzentrums verändert, sowie die dann noch erzielten Ergebnisse eines PKW-Lademanagements. Es wird ersichtlich, dass trotz einer Reduktion der an die PKW bereitgestellten benötigten Energie auf nur noch 15 %, das Lademanagement der PKW kaum noch etwas gegen die Lastspitzen der LKW auszurichten vermag. Ein Logistikzentrum der Zukunft könnte zu diesem Zweck noch über einen eigenen Speicher zur Lastglättung verfügen. Wie sich der Lastgang an einem solchen Logistikzentrum verhalten könnte und welche Auswirkungen und Flexibilitätspotentiale sich bieten würden, wird im nächsten Kapitel thematisiert.

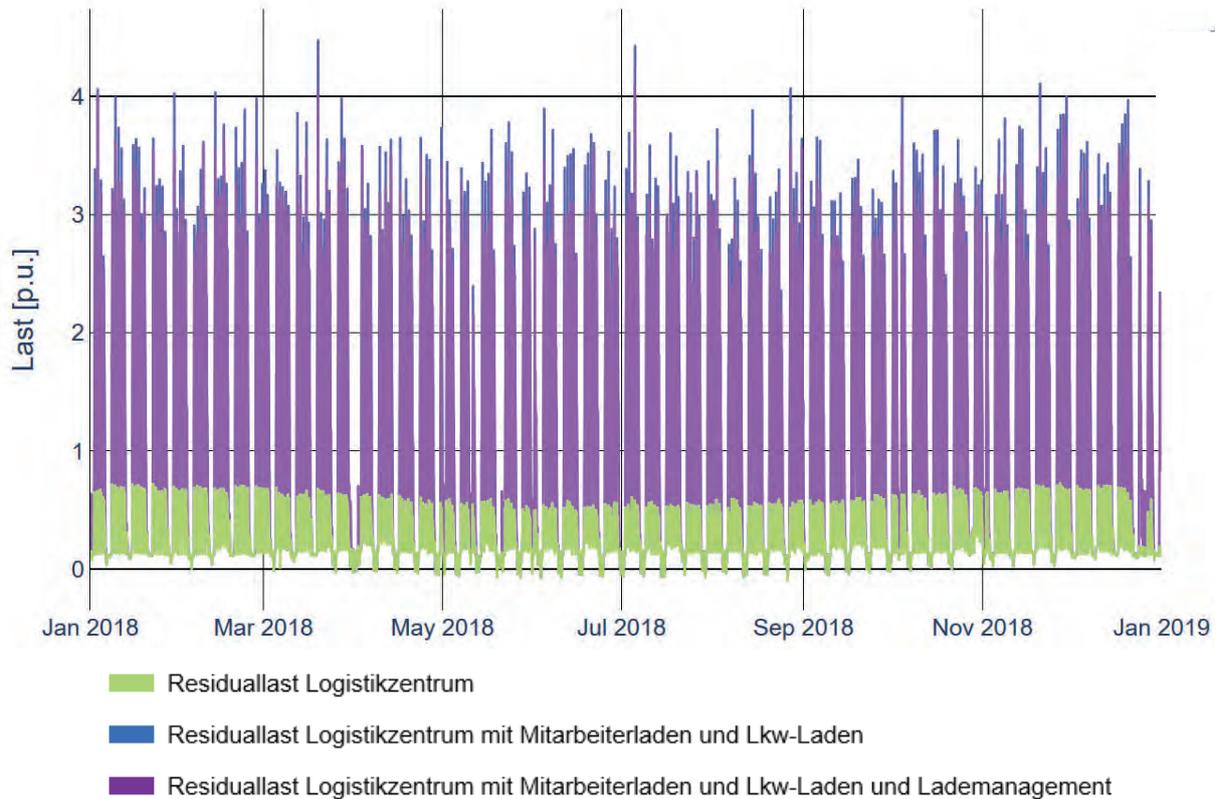


Abbildung 6-12: Auswirkungen eines PKW-Lademanagementsystems zur Einhaltung der Anschlussleistung am Logistikzentrum bei einer Elektrifizierung von PKW und LKW bei einem erhöhten LKW-Aufkommen

6.1.6 Logistikzentrum der Zukunft

Die vorangegangenen Kapitel haben die Auswirkungen der identifizierten Einzelkomponenten (logistische Prozesse, PV-Anlage, Speicher und Elektromobilität) auf den Lastgang und das Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums verdeutlicht. Es hat sich gezeigt, dass gerade bei Mitberücksichtigung elektrischer LKW das Lademanagement der PKW nicht genug Flexibilität liefern kann, um die Last des Logistikzentrums optimal zu glätten. In diesem letzten Unterkapitel soll daher noch einmal eine Kombination der vorgestellten Elemente eines zukünftigen Logistikzentrums untersucht werden, um einen Blick auf das theoretisch auftretende Flexibilitätspotential der Zukunft zu werfen.

Das Logistikzentrum der Zukunft wird im Rahmen dieses Kapitels folgendermaßen charakterisiert: die Residuallast des Logistikzentrums wird als gleichbleibend zum aktuellen Stand angenommen. Auch wird eine PV-Anlage in der Größe der aktuell installierten PV-Leistung vorgesehen. Zusätzlich sollen alle Mitarbeiter am Logistikzentrum mit einem elektrischen PKW fahren und diesen auch am Logistikzentrum laden können. Auch alle aktuell am Logistikzentrum ankommenden LKW an Wareneingang und -ausgang werden in diesem Szenario elektrifiziert. Da die Analyse in 6.1.5 gezeigt hat, dass eine alleinige Lastglättung durch das Lademanagement der Mitarbeiter-PKW nicht ausreichend sein wird, wurde zusätzlich noch ein Batteriespeicher für das Logistikzentrum vorgesehen. Dieser kann nicht nur die Last glätten, sondern auch die Rückspeisung ins Stromnetz am Wochenende reduzieren.

Abbildung 6-13 zeigt die Ergebnisse der Analyse. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln thematisiert, kann sich in diesem Szenario die Spitzenlast des Logistikzentrums durch Elektromobilität bis zu verdreifachen. Durch die PV-Anlage werden Lastspitzen vor allem im Winter höher ausfallen. Mithilfe des Lademanagements und des Einsatzes eines Speichers kann die Last

jedoch auf die bisherige Anschlussleistung reduziert werden und somit ein Ausbau des Netzanschlusses verzögert werden. Bei der Abregelung der Mitarbeiterladevorgänge kann noch 84,6 % von deren Energiebedarf gedeckt werden. Eine weitere Abregelung der PKW-Ladevorgänge ist nicht vonnöten, da sie nicht gleichzeitig mit den Lastspitzen der LKW anfallen. Zur restlichen Reduktion der Last auf die Anschlussleistung von 1 p.u. wurde ein Speicher mit einer Größe von 2088 kWh dimensioniert. Aufgrund der installierten PV-Leistung ist der Speicher vor allem in den Wintermonaten stärker genutzt und könnte im Sommer auch für Netzdienstleistungen zur Verfügung stehen.

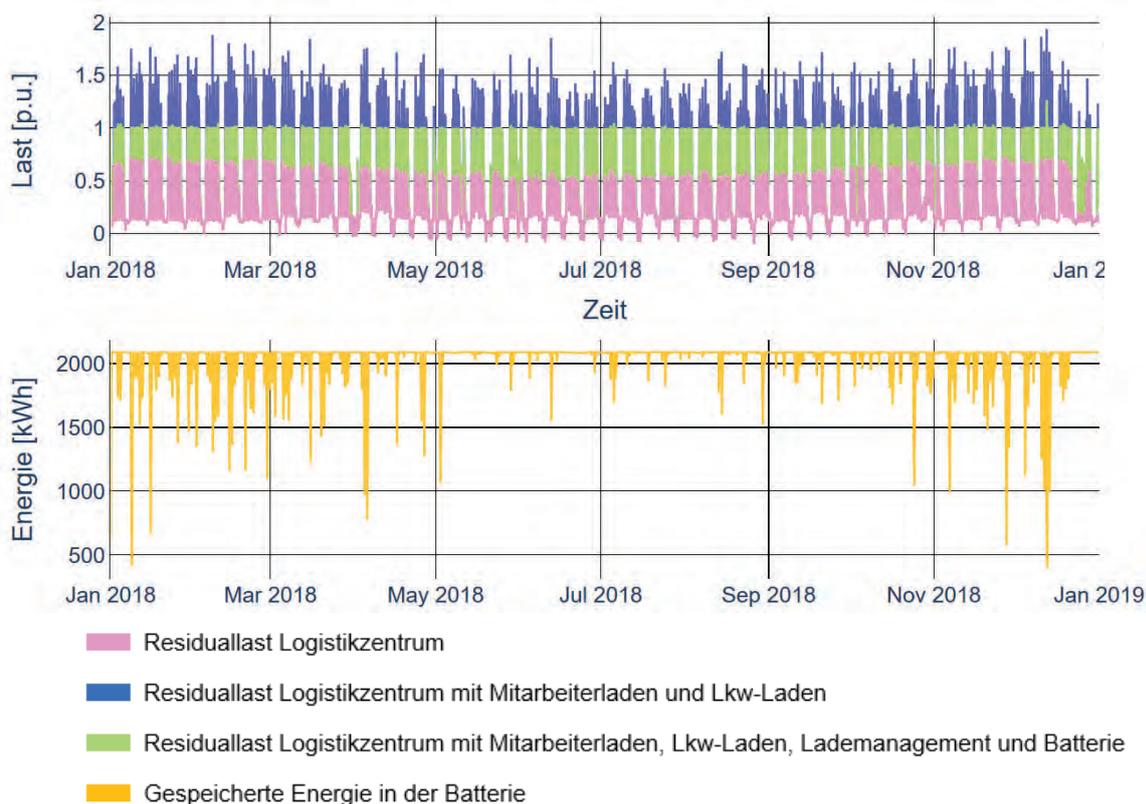


Abbildung 6-13: Potential von Lademanagement und Energiespeicher zur Reduktion der Maximalleistung und Erhöhung des Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums der Zukunft

6.2 Netzauswirkungen der flexiblen zukünftigen Last von Logistikzentren

Um die Auswirkungen der neuen Last und auch die Vorteile von deren Flexibilisierung auf das Stromnetz untersuchen zu können, wurden mithilfe der Ergebnisse für die Lastgänge aus 6.1 und des Netzmodells aus 4.1 zeitreihenbasierte probabilistische Netzsimulationen durchgeführt und ausgewertet. Folgende unterschiedliche Szenarien am Logistikzentrum und deren Einfluss auf das überlagerte Mittelspannungsnetz wurden dabei betrachtet:

- Reale Auslastung des Stromnetzes im aktuellen Zustand (1)
- Residuallast des Logistikzentrums mit 100 % Mitarbeiterladen (2)
- Residuallast des Logistikzentrums mit 100 % Mitarbeiterladen und PKW-Lademanagement (Reduktion auf Maximalleistung (3) und Reduktion auf Anschlussleistung (4))
- Residuallast des Logistikzentrums mit 100 % Mitarbeiter- und LKW-Laden (5)
- Residuallast des Logistikzentrums mit 100 % Mitarbeiter- und LKW-Laden und PKW-Lademanagement (Reduktion auf Maximalleistung (7) und Reduktion auf Anschlussleistung (6))

- Residuallast des Logistikzentrums mit 100 % Mitarbeiter- und LKW-Laden und einer Erhöhung der LKW-Auslastung auf 90 % (8)
- Residuallast des Logistikzentrums mit 100 % Mitarbeiter- und LKW-Laden und PKW-Lademanagement sowie Batteriespeicher (9)

Die Ergebnisse der zeitreihenbasierten probabilistischen Netzsimulationen sind im Folgenden dargestellt. Abbildung 6-14 zeigt den mittleren Verlauf der Transformatorauslastung an allen Werktagen des Jahres 2018 am Umspannwerk. Zudem sind mit dem 50 %- und 90 %-Korridor die Bereiche markiert, in denen sich 50 % beziehungsweise 90 % aller Werte bewegen. Absolut betrachtet beträgt die Auslastung minimal 4,4 % und maximal 28,5 %. Der Transformator ist somit nur schwach ausgelastet, ein Anschluss von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität ist möglich. Der mittlere Verlauf der Auslastung weist dabei einen Anstieg ab 6:00 Uhr von 14 % auf 22 % auf und sinkt ab 20 Uhr wieder auf das nächtliche Niveau ab.

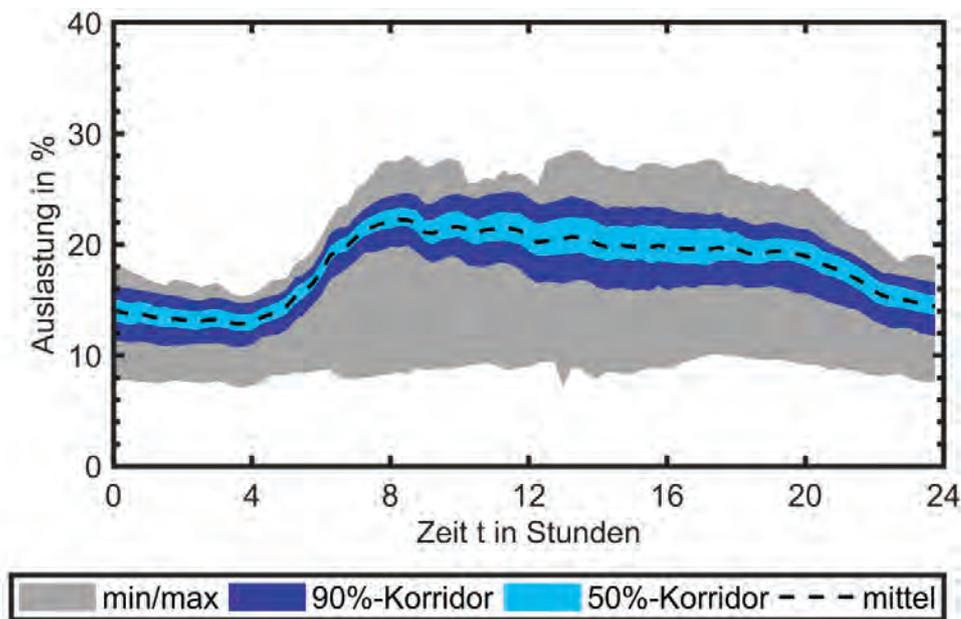


Abbildung 6-14: Probabilistische Analyse der täglichen Auslastung des Umspannwerk-Transformators über ein Jahr [40]

6.2.1 Betriebsmittelauslastungen

Ein Gradmaß zur Ermittlung der Netzauswirkungen ist, wie sich die Auslastung am Umspannwerk durch die oben beschriebenen Szenarien verändert und welche Auswirkungen die Lastflexibilisierung durch Lademanagement und Batterie nicht nur am Netzanschlusspunkt, sondern im gesamten Netz zeigen. In Abbildung 6-15 sind die Transformatorauslastung am Umspannwerk sowie die Auslastung der am stärksten belasteten Leitung des Abgangs dargestellt. Dabei wird zwischen dem aktuellen Ist-Zustand und den verschiedenen Szenarien unterschieden. Zur Übersicht erfolgt die Darstellung im Rahmen von Boxplots. Das bedeutet, alle Viertelstundenwerte der Auslastung eines Jahres sind im Rahmen eines Elements zusammengefasst.

Die maximale Transformatorauslastung im Basisfall liegt bei 28,5 % und die Hälfte aller Werte zwischen 10 % und 20 %. Der Hochlauf von Elektromobilität sowohl im PKW- als auch im LKW-Bereich führt zu einer leichten jedoch kaum merklichen Erhöhung der Transformatorauslastung, was auch dadurch zu erklären ist, dass nur das Logistikzentrum betrachtet wurde. Eine deutlichere Veränderung ist nur im Szenario (8) zu sehen, welches die Auswirkungen einer Elektrifizierung eines „großen“ Logistikzentrums zeigt. Hier sind die Auswirkungen der LKW-Ladevorgänge auch am Umspannwerk deutlich sichtbar.

Bei der Betrachtung der Leitungsauslastung sind die verschiedenen Szenarien unterschiedlicher. Durch das PKW-Laden am Logistikzentrum in Szenario (2) kann die maximale Auslastung an der stärksten belasteten Leitung des Stranges auf über 40 % steigen. Es wird ersichtlich, dass die Lastglättung durch ein Lademanagement in den Szenarien (3) und (4) auch einen direkten Einfluss auf die Maxima der Leitungsauslastung hat. Dies liegt daran, dass die Ladevorgänge gleichzeitig zu bestehenden Hochlastzeiten im Netz stattfinden und eine Verringerung ihrer Spitzenlast sich somit günstig auf das gesamte Netz auswirkt. Das LKW-Laden (5) führt zu noch weiteren Erhöhungen der maximalen Leitungsauslastungen, die auch durch Lademanagement ((6) und (7)) der PKW nicht stark verringert werden können. Lediglich der Einsatz eines Batteriespeichers kann hier die Netzauswirkungen reduzieren (9). Eine Elektrifizierung eines „großen“ Logistikzentrums (8) zeigt wiederum einen sehr deutlichen Anstieg in der Leitungsauslastung auf über 70 %. Bedenkt man, dass es sich hierbei nur um ein einzelnes „großes“ Logistikzentrum handelt, könnte gerade bei mehreren solchen Firmen im Strang die Auslastung noch weiter bis in den Bereich einer Überlastung steigen.

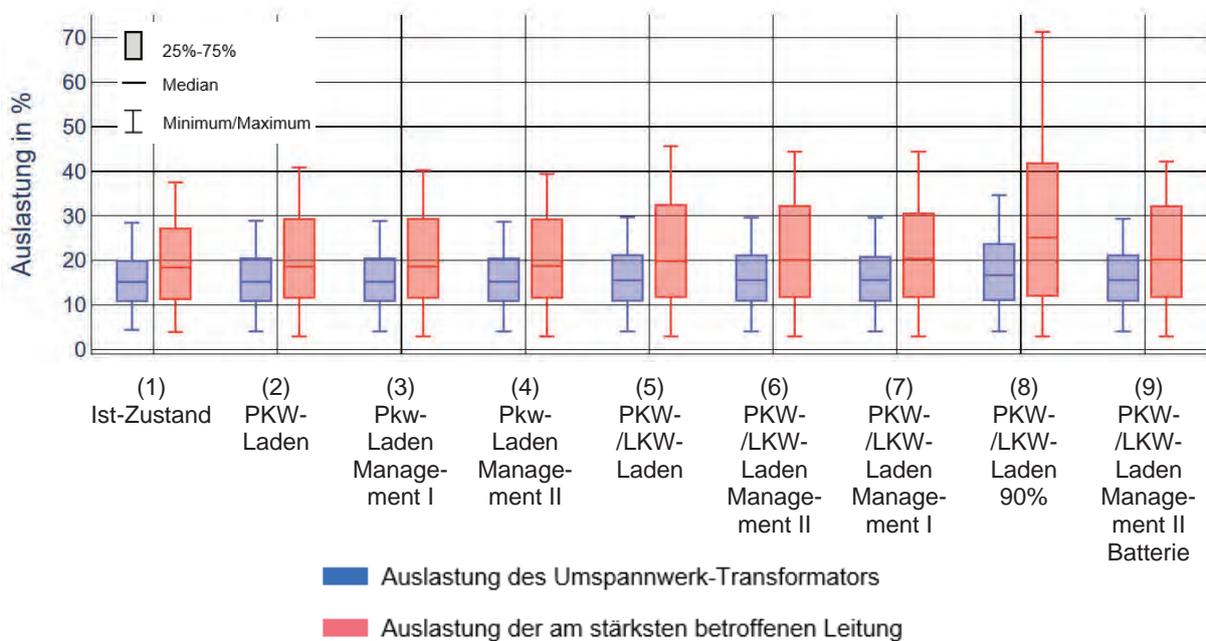


Abbildung 6-15: Auswirkungen der betrachteten Szenarien auf die Auslastung der Netzbetriebsmittel

6.2.2 Spannungsband

Durch die neue Last der Elektromobilität kann die Spannung im Netz besonders in Richtung Strangende absinken. Daher ist die Betrachtung der Spannungsbandeinhaltung neben den Betriebsmittelauslastungen von entscheidender Bedeutung für einen zuverlässigen Netzbetrieb. Abbildung 6-16 zeigt die Knotenspannungen des am weitesten vom Umspannwerk entfernten Knotens für alle Szenarien. Im Ist-Zustand liegt sie im betrachteten Netzgebiet etwas über 1 p.u. aber deutlich im zulässigen Bereich von $\pm 10\%$ der Nennspannung. Die Szenarien führen im Netz zu einer leichten Spannungsabsenkung, die jedoch stets im zulässigen Bereich bleibt.

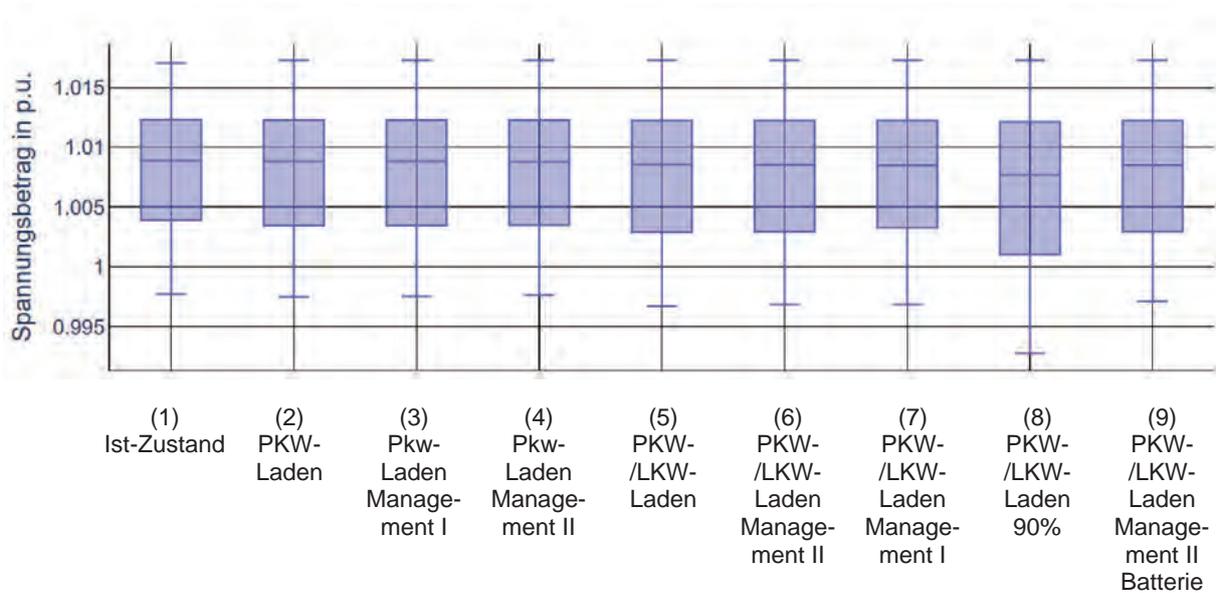


Abbildung 6-16: Auswirkungen der betrachteten Szenarien auf die Spannungshaltung im Netz

6.2.3 Zusammenfassende Beurteilung der Netzauswirkungen

Zusammenfassend befinden sich die Netzauswirkungen der betrachteten Elektrifizierungsszenarien am Logistikzentrum alle im zulässigen Betriebsbereich. Die Flexibilisierungsmöglichkeiten durch Lademanagement und Speichereinsatz haben sich nicht nur für die Reduktion der nötigen Anschlussleistung am Logistikzentrum, sondern auch bei Betrachtung ihrer Netzdienlichkeit als hilfreich erwiesen. Das Ausmaß der Netzauswirkungen kann jedoch stark variieren und ist einerseits vom jeweiligen Netzgebiet und andererseits vom Umfang der Elektrifizierung in der Region abhängig. Im Rahmen des Projekts wurde ein robustes noch relativ gering ausgelastetes industrielles Mittelspannungsnetz betrachtet, welches einen Zubau an Elektromobilität am Logistikzentrum auch in den betrachteten Maximalszenarien bereits heute stemmen könnte. Ein bereits im Ist-Zustand stärker belastetes Netz könnte hier jedoch andere Ergebnisse zeigen. Auch ist es für die Zukunft unerlässlich, mit den im Projekt entwickelten Methoden zur Bestimmung des Ladebedarfs von LKW und PKW mehrere Logistikstandorte auf einmal zu untersuchen. Nur dadurch zeigen sich die tatsächlichen Auswirkungen im gesamten Stromnetz. Die Ergebnisse des Projekts liefern dabei einen guten Ansatzpunkt für weitere tiefgehende Forschungen.

7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts FELSeN wurden aktuelle und zukünftige Prozesse und Verbraucher innerhalb eines Logistikzentrums umfassend untersucht und dabei deren Flexibilitätspotential sowie die Auswirkungen auf das elektrische Energieversorgungssystem bestimmt. Die enge Kopplung von Forschung im Bereich der elektrischen Energieversorgung mit der Logistik sowie die aktive Beteiligung der assoziierten Partner aus Logistik- und Stromnetzbranche erlaubte eine umfassende und realitätsnahe Betrachtung der Thematik.

Die Prozesse innerhalb des Logistikzentrums wurden umfassend aufgenommen sowie hinsichtlich ihres zeitlichen und leistungsbezogenen Verhaltens charakterisiert. Dazu wurde eine umfangreiche Messkampagne im Logistikzentrum durchgeführt, welche neue Erkenntnisse zum Last- und Energieverbrauchsreduktionspotential liefern konnte. Auch der Einsatz und Mehrwert einer PV-Anlage für das Logistikzentrum konnte praktisch untersucht werden. Aufbauend auf der Ist-Analyse wurde ein neuartiges elektrisch-logistisches Simulationsmodell des Logistikzentrums sowie des umliegenden Mittelspannungsnetzes aufgebaut, welches die Auswirkungen von Flexibilisierungen und neuen Komponenten sowohl aus elektrischer als auch logistischer Perspektive erlaubt. Um auch die Auswirkungen der Elektromobilität auf ein Logistikzentrum der Zukunft erproben zu können, wurden komplexe Modelle zur Simulation realitätsgetreuer Ladeprofile am Logistikzentrum basierend auf realen E-Fahrzeug-Modellparametern sowie realen Fahrtenstrecken integriert. 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 und ermöglicht auch in Zukunft eine Analyse der Realisierbarkeit eines elektrischen Lieferverkehrs aus Stromnetz- und Logistik-Perspektive. Zusätzlich wurde im Forschungsprojekt der Einsatz eines Energiespeichers und das Potential für eine Erhöhung der lokalen PV-Erzeugung untersucht. Alle Komponenten wurden in ein Energiemanagement eingebunden, welches es erlaubt, die Flexibilität des Logistikzentrums in der Zukunft auch aus Stromnetz-Perspektive zu bestimmen. Neben Fach-Workshops und Vorträgen in der Logistikbranche wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen und Zeitschriftenbeiträge sowie Interviews zum Thema realisiert.

Aus den Projektergebnissen lassen sich folgende besonders wichtige Kernthesen ableiten. Eine vorausschauende Planung des Netzanschlusses von Logistikzentren ist unumgänglich. Hier muss nicht nur der zukünftige Leistungs- sondern auch der Platzbedarf sowie das Thema der Elektromobilität im PKW- als auch im LKW-Bereich berücksichtigt werden. Dies kann in Zukunft zu einer Erhöhung der bestehenden Last von Logistikzentren aber auch in ganzen Industriegebieten führen, worauf sich die Netzbetreiber auch in industriellen Netzgebieten vorbereiten sollten. Ein Ausbau von PV-Anlagen hat sich im Projekt als vielversprechend erwiesen, um den Eigenverbrauch und vor allem den zusätzlichen Energiebedarf der Elektromobilität decken zu können. Das interne Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums ist vor allem durch automatisierte Anlagen (Hochregallager) und Unstetigförderer (Flurförderfahrzeuge) geprägt. Hier sollte die Gleichzeitigkeit reduziert und Ladevorgänge in Zeiten außerhalb des Betriebs verschoben werden. In Kombination mit einem Speicher sowie einem Energiemanagementsystem kann sich das Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums noch einmal deutlich erhöhen und netzdienlich eingesetzt werden. Auch die Elektromobilität besonders im PKW-Bereich kann durch Lademanagementsysteme das Flexibilitätspotential von Logistikzentren steigern. Hier sind wirtschaftliche Rahmenbedingungen zum Angebot von Ladeinfrastruktur aber auch zur Flexibilitätsbereitstellung nötig.

Im Allgemeinen hat sich gezeigt, dass in der im Projekt betrachteten Thematik der Energieversorgung und Elektromobilität im Logistik-Sektor eine Kopplung von Stromnetz und Logistik

unumgänglich sind. Alternative Antriebe werden im Wirtschaftsverkehr besonders bei leichten und mittelschweren LKW an Bedeutung zunehmen. Die Versorgung von deren Ladeinfrastruktur durch Erneuerbare Energien sowie die Reduktion der Netzauswirkungen der Ladevorgänge sind relevante Themen für zukünftige weitergehende Forschungen besonders in urbanen Räumen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), „Klimaschutzplan 2050,“ 2016. [Online]. Available: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf. [Zugriff am 10 03 2021].
- [2] Agora Energiewende , „Die Energiewende im Corona-Jahr: Stand der Dinge 2020,“ 2021. [Online]. Available: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2020_01_Jahresauswertung_2020/200_A-EW_Jahresauswertung_2020_WEB.pdf. [Zugriff am 10 03 2021].
- [3] D. Pfleger, 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.
- [4] Bundesregierung, „Website der deutschen Bundesregierung,“ Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>. [Zugriff am 29 April 2021].
- [5] Vanderlande, „Green Logistics - Hype oder Muss?,“ 2010. [Online]. Available: https://logistik-heute.de/sites/default/files/public/data-statische-seiten/green_logistics_2010_07_jahn_pdf_16512_0.pdf. [Zugriff am 30 03 2021].
- [6] H. Martin, *Transport- und Lagerlogistik : Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [7] T. Gudehus, *Logistik : Grundlagen - Strategien - Anwendungen*, Berlin ; Heidelberg: Springer, 2010.
- [8] H. Arnolds, *Versorgungs- und Vorratswirtschaft : logistische und dispositive Aspekte*, Wiesbaden: Gabler, 1993.
- [9] J. Wisser, *Der Prozess Lagern und Kommissionieren im Rahmen des Distribution center reference model (DCRM)*, Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe, 2009.
- [10] C. Schulte, *Logistik : Wege zur Optimierung der Supply Chain*, München: Verlag Franz Vahlen, 2017.
- [11] D. Arnold und K. Furmans, *Materialfluss in Logistiksystemen*, Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- [12] H. Ehrmann, *Logistik*, Herne: Kiehl, 2017.
- [13] „LOGISTIKKNOWHOW - Die Verpackungslogistik,“ [Online]. Available: <https://logistikknowhow.com/sorter-packerei/die-verpackungslogistik/>.

- [14] M. Ten Hompel, T. Schmidt und J. Dregger, Materialflusssysteme : Förder- und Lagertechnik, Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [15] P. Wittenbrink, Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr, Grundlagen - Optimierungspotentiale - Green Logistik, 2011.
- [16] N.-L. Entertainment, „Energie sparend und hoch effizient,“ *element + BAU*, pp. 14-15, 1 2013.
- [17] T. Gudehus, Dynamische Disposition : Strategien, Algorithmen und Werkzeuge zur optimalen Auftrags-, Bestands- und Fertigungsdisposition, Berlin; Heidelberg: Springer, 2012.
- [18] H.-C. Pfohl, Logistiksysteme : betriebswirtschaftliche Grundlagen, Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2018.
- [19] „Mecalux - Die Verteilung der Laderampen im Lager,“ [Online]. Available: <https://www.mecalux.de/handbuch-lagerlogistik/lagerplanung/laderampe>.
- [20] „INDUSTRIE UND HANDELKAMMER STUTTGART - Energie und Energieeffizienz im Überblick,“ <https://www.stuttgart.ihk24.de/fuer-unternehmen/innovation/energie/energieeffizienz/leitfaden-energieeffizienz-in-der-logistik-4319128>. [Online].
- [21] Netze BW GmbH, „Veröffentlichungen,“ [Online]. Available: <https://www.netze-bw.de/unternehmen/veroeffentlichungen#3-1-3>. [Zugriff am 16. Dezember 2020].
- [22] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), „Referenzmodell zur Charakterisierung der Energieflexibilität von Industrieunternehmen (DIN SPEC 91366),“ Beuth-Verlag, 2018.
- [23] dena Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), „dena-NETZFLEXSTUDIE Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung,“ 2017.
- [24] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Smart Grids Ampelkonzept,“ Berlin, 2015.
- [25] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Verkehrsverflechtungsprognose 2030, Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs, 2014.
- [26] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Fraunhofer ISI, Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid - Oberleitungs - Lkw, 2017.
- [27] Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Strukturstudie BW e mobil, Stuttgart: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2010.
- [28] S. Gräbener, Methodische Entwicklung und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für innerstädtische Nutzfahrzeuge, Berlin, 2017.

- [29] European Alternative Fuels Observatory, „vehicles and fleet,“ 01. Dezember 2020. [Online]. Available: <https://www.eafo.eu/vehicles-and-fleet/overview>. [Zugriff am 14. Dezember 2020].
- [30] Kraftfahrt-Bundesamt, „Vierteljährlicher Bestand,“ 01. Oktober 2020. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Vierteljaehrlicher_Bestand/b_vierteljaehrlich_inhalt.html?nn=2601598. [Zugriff am 14. Dezember 2020].
- [31] Bundesnetzagentur, „Ladesäulenkarte,“ 05. November 2020. [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/E-Mobilitaet/Ladesauelelkarte/start.html [Zugriff am 08. Dezember 2020].
- [32] T. Gnann, Technologiebericht, Hybrid-Oberleitungs-Lkw energiewirtschaftliche Aspekte, 2018.
- [33] K. Gutenschwager, M. Rabe, S. Spiekermann und S. Wenzel, Simulation in der Produktion und Logistik - Grundlagen und Anwendungen, Springer Vieweg, 2017.
- [34] L. John, Untersuchung des Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums zur Erbringung von Netzdienstleistungen, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2019.
- [35] VDI-Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb, VDI 3633: Simulation of systems in materials handling, logistics and production - Terms and definitions, VDI-Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb, 2018.
- [36] T. Sommer, „Entwicklung und Bewertung von Lagerstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz in automatischen Hochregallagern unter Betrachtung des Umschlags,“ Universität Stuttgart, 2015.
- [37] D. Pfleger und 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*, pp. 26-27, 2019.
- [38] K. Walz, D. Contreras, K. Rudion und P. Wiest, „Modelling of Workplace Electric Vehicle Charging Profiles based on Trip Chain Generation,“ in *ISGT Europe*, Den Haag, 2020.
- [39] A. Karle, Elektromobilität - Grundlagen und Praxis, München: Hanser, 2018.
- [40] K. Walz, „Netzintegration von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität in der Logistikbranche,“ Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2018.
- [41] Bundesamt für Güterverkehr (BAG), „Marktbeobachtung Güterverkehr – Sonderbericht zur Situation an der Laderampe,“ Köln, 2011.
- [42] N. Kuschinski, „Ausstellungs-Straßenbahnen,“ *Verkehrsgeschichtliche Blätter*, Bd. 3, p. 60–68, 1988.

- [43] K. Walz, D. Contreras and K. Rudion, "Synthetic Charging Profiles Development of Battery-Electric Trucks for Probabilistic Grid Planning," in *CIREC 2020 Berlin Workshop*, Berlin, 2020.
- [44] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz; Bundesamt für Justiz, „Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO),“ 2012. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/BJNR067910012.html. [Zugriff am 8 April 2019].
- [45] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Lkw am 1. Januar 2018 nach zulässiger Gesamtmasse,“ [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Groessenklassen/2018/2018_b_groessenklassen_tabellen.html?nn=3524630&fromStatistic=3524630&yearFilter=2018&fromStatistic=3524630&yearFilter=2018 [Zugriff am 16 Februar 2019].
- [46] DLR Clearingstelle für Verkehr, *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2012.
- [47] R. Irrgang, „Stromspitzen aus dem Speicher,“ *Hebezeuge Fördermittel*, Nr. 5, 2016.
- [48] Engl. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, VDI 2681: Übersichtsblätter, Lagereinrichtungen; Steuerungen für Regalbediengeräte, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik , 1993-11.
- [49] V.-F. T. Logistik, „VDI 2695 - Ermittlung der Betriebskosten für Diesel- und Elektro-Gabelstapler,“ VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2010.
- [50] VDI-Fachbereich Technische Logistik , „VDI 3300 (ersatzlos zurückgezogen): Materialfluß-Untersuchungen,“ VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik , 1973.

9 Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Projekts FELSeN

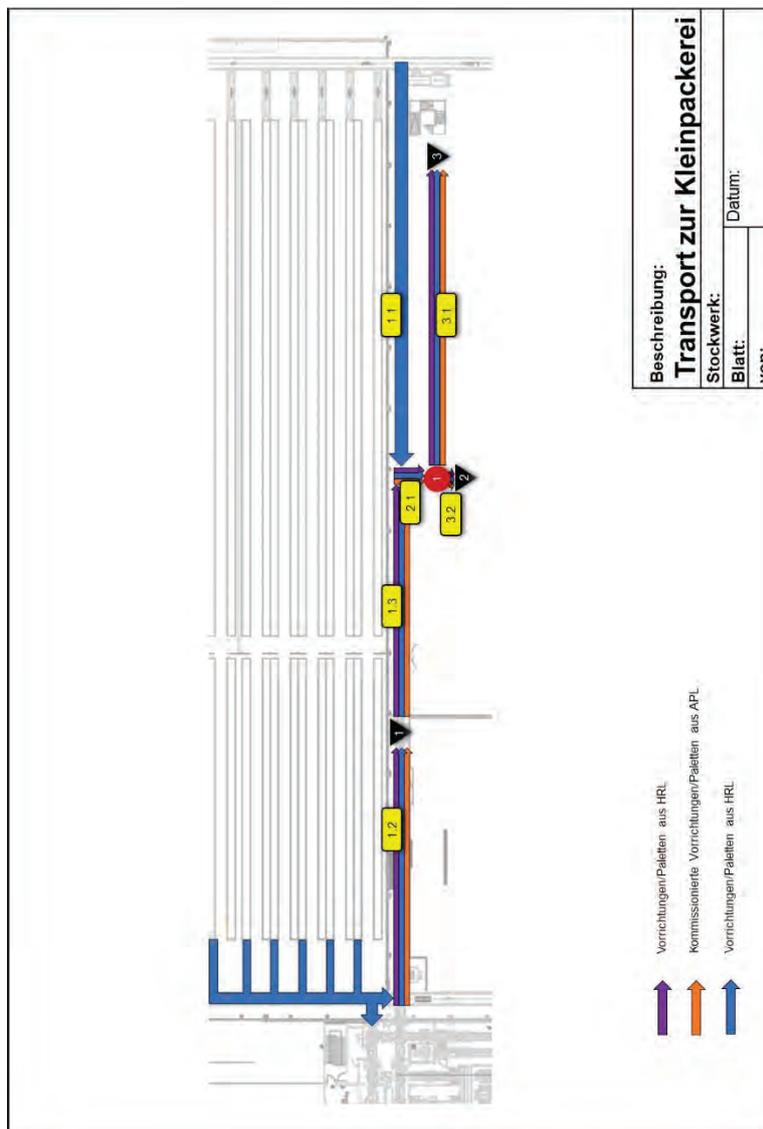
Im Forschungsprojekt wurde folgende Öffentlichkeitsarbeiten durchgeführt und wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht:

- 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. Pfleger 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. Pfleger, K. Walz, R. Schulz, K. Rudion, J. Maurer und C.-M. Moraw, „Ermittlung des logistischen und energetischen Flexibilitätpotentials 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
- 2021: Vortrag zur Ergebnisvorstellung (in Planung)

Anhang 2: Materialflussbogen der Logistik mit Beispieldaten

| Firma/Werk/Kostenstelle: Logistikzentrum | | Materialflussbogen für Logistik | | | | | | Blatt Nr.: | [Wert] |
|---|--|--|----------------------|----------------|--------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|---|
| Bearbeiter: Muster | | | | | | | | Datum: TT.MM.JJJJ | Transport zur Kleinpackerei - HRL zu Kleinpackerei |
| Ud. Nr. | Vorgang | Fördermenge | | Strecke in [m] | Fördermittel | Geschwindigkeit in [m/s] | gemessene Zeit in [h] | berechnete Zeit in [h] | |
| | | Zahl | Einheit | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1.1 | Transport von HRL bis Drehtisch | 1 | Paletten/Vorrichtung | [Wert] | K&R | [Wert] | [Wert] | [Wert] | 1 mal Umsetzen |
| 2.1 | Transport von Zusammenlauf bis Drehtisch | 1 | Paletten/Vorrichtung | [Wert] | K&R | [Wert] | [Wert] | [Wert] | 1 mal Umsetzen |
| 1 | Drehen um 90° | 1 | Paletten/Vorrichtung | [Wert] | Drehtisch | [Wert] | [Wert] | [Wert] | |
| 3.1 | Transport bis Aufzug | 1 | Paletten/Vorrichtung | [Wert] | K&R | [Wert] | [Wert] | [Wert] | |
| 3 | Aufzug | 1 | Paletten/Vorrichtung | [Wert] | Aufzug | [Wert] | [Wert] | [Wert] | |

K&R = Ketten- und Rollenförderer ; ü = Wert von gemessener Zeit übernommen



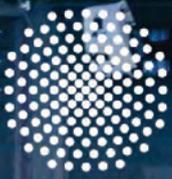
Anhang 3: Weitere Auswertungen der Simulationsergebnisse

| Szenario 1a - 100% Elektrifizierung | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|------------|------------------------|----------------|------------|
| kleines Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 697.392,00 € | 24 | 50 kW | 2.440.872,00 € | 84 |
| 150 kW | 563.925,00 € | 15 | 150 kW | 1.917.345,00 € | 51 |
| 350 kW | 881.040,00 € | 15 | 350 kW | 2.231.968,00 € | 38 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 726.450,00 € | 25 | 50 kW | 2.673.336,00 € | 92 |
| 150 kW | 676.710,00 € | 18 | 150 kW | 2.180.510,00 € | 58 |
| 350 kW | 881.040,00 € | 15 | 350 kW | 2.525.648,00 € | 43 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 464.928,00 € | 16 | 50 kW | 1.801.596,00 € | 62 |
| 150 kW | 338.355,00 € | 9 | 150 kW | 1.165.445,00 € | 31 |
| 350 kW | 293.680,00 € | 5 | 350 kW | 939.776,00 € | 16 |
| Szenario 1b - 75% Elektrifizierung | | | | | |
| kleines Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 581.160,00 € | 20 | 50 kW | 2.092.176,00 € | 72 |
| 150 kW | 526.330,00 € | 14 | 150 kW | 1.729.370,00 € | 46 |
| 350 kW | 704.832,00 € | 12 | 350 kW | 2.055.760,00 € | 35 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 581.160,00 € | 20 | 50 kW | 2.005.002,00 € | 69 |
| 150 kW | 601.520,00 € | 16 | 150 kW | 1.729.370,00 € | 46 |
| 350 kW | 822.304,00 € | 14 | 350 kW | 2.114.496,00 € | 36 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 319.638,00 € | 11 | 50 kW | 1.365.726,00 € | 47 |
| 150 kW | 263.165,00 € | 7 | 150 kW | 789.495,00 € | 21 |
| 350 kW | 234.944,00 € | 4 | 350 kW | 704.832,00 € | 12 |
| Szenario 1c - 50% Elektrifizierung | | | | | |
| kleines Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 435.870,00 € | 15 | 50 kW | 1.801.596,00 € | 62 |
| 150 kW | 488.735,00 € | 13 | 150 kW | 1.428.610,00 € | 38 |
| 350 kW | 704.832,00 € | 12 | 350 kW | 1.820.816,00 € | 31 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 523.044,00 € | 18 | 50 kW | 1.685.364,00 € | 58 |
| 150 kW | 563.925,00 € | 15 | 150 kW | 1.541.395,00 € | 41 |
| 350 kW | 763.568,00 € | 13 | 350 kW | 1.938.288,00 € | 33 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 261.522,00 € | 9 | 50 kW | 958.914,00 € | 33 |
| 150 kW | 225.570,00 € | 6 | 150 kW | 639.115,00 € | 17 |
| 350 kW | 234.944,00 € | 4 | 350 kW | 528.624,00 € | 9 |

| Szenario 1d - 25% Elektrifizierung | | | | | |
|------------------------------------|--------------|------------|------------------------|----------------|------------|
| kleines Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 377.754,00 € | 13 | 50 kW | 1.191.378,00 € | 41 |
| 150 kW | 413.545,00 € | 11 | 150 kW | 1.165.445,00 € | 31 |
| 350 kW | 587.360,00 € | 10 | 350 kW | 1.644.608,00 € | 28 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 435.870,00 € | 15 | 50 kW | 1.249.494,00 € | 43 |
| 150 kW | 526.330,00 € | 14 | 150 kW | 1.240.635,00 € | 33 |
| 350 kW | 763.568,00 € | 13 | 350 kW | 1.762.080,00 € | 30 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 145.290,00 € | 5 | 50 kW | 552.102,00 € | 19 |
| 150 kW | 150.380,00 € | 4 | 150 kW | 300.760,00 € | 8 |
| 350 kW | 176.208,00 € | 3 | 350 kW | 293.680,00 € | 5 |

| Szenario 2 - LKW bis 18 t | | | Szenario 3 - LKW mit Fahrleistung unter 200 km | | |
|---------------------------|----------------|------------|--|----------------|------------|
| großes Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 1.017.030,00 € | 35 | 50 kW | 1.423.842,00 € | 49 |
| 150 kW | 1.127.850,00 € | 30 | 150 kW | 1.240.635,00 € | 33 |
| 350 kW | 1.585.872,00 € | 27 | 350 kW | 1.644.608,00 € | 28 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 1.191.378,00 € | 41 | 50 kW | 1.511.016,00 € | 52 |
| 150 kW | 1.278.230,00 € | 34 | 150 kW | 1.428.610,00 € | 38 |
| 350 kW | 1.762.080,00 € | 30 | 350 kW | 1.879.552,00 € | 32 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 493.986,00 € | 17 | 50 kW | 842.682,00 € | 29 |
| 150 kW | 338.355,00 € | 9 | 150 kW | 488.735,00 € | 13 |
| 350 kW | 352.416,00 € | 6 | 350 kW | 469.888,00 € | 8 |

| Szenario 4 - LKW bis 18 t und Fahrleistung unter 200 km | | | | | |
|---|----------------|------------|-------------------------|----------------|------------|
| a) 100% Elektrifizierung | | | b) 50% Elektrifizierung | | |
| großes Logistikzentrum | | | großes Logistikzentrum | | |
| Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte | Ladeleistung | Gesamtkosten | Ladepunkte |
| Laden: Rampe | | | Laden: Rampe | | |
| 50 kW | 1.017.030,00 € | 35 | 50 kW | 813.624,00 € | 28 |
| 150 kW | 1.127.850,00 € | 30 | 150 kW | 939.875,00 € | 25 |
| 350 kW | 1.703.344,00 € | 29 | 350 kW | 1.468.400,00 € | 25 |
| Laden: Rampe und Hof | | | Laden: Rampe und Hof | | |
| 50 kW | 1.162.320,00 € | 40 | 50 kW | 871.740,00 € | 30 |
| 150 kW | 1.315.825,00 € | 35 | 150 kW | 1.090.255,00 € | 29 |
| 350 kW | 1.938.288,00 € | 33 | 350 kW | 1.585.872,00 € | 27 |
| Laden: Hof | | | Laden: Hof | | |
| 50 kW | 319.638,00 € | 11 | 50 kW | 145.290,00 € | 5 |
| 150 kW | 225.570,00 € | 6 | 150 kW | 150.380,00 € | 4 |
| 350 kW | 234.944,00 € | 4 | 350 kW | 117.472,00 € | 2 |



Universität Stuttgart

LEITFADEN

zur Gestaltung einer flexiblen Energieversorgung von Logistikzentren unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien und Elektromobilität



Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

IFT

Institut für Fördertechnik und Logistik

DANKSAGUNG

Das Projekt Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur Erbringung von Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen (FELSeN) wurde vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Förderprogramm „Demonstrationsvorhaben Smart Grids und Speicher“ beim Projektträger Karlsruhe (Förderkennzeichen BWSGD 18003) gefördert.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA
UND ENERGIEWIRTSCHAFT

IMPRESSUM

Titel: Leitfaden zur Gestaltung einer flexiblen Energieversorgung von Logistikzentren unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien und Elektromobilität

Herausgeber:

Universität Stuttgart

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH)

Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart
Deutschland

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)

Holzgartenstraße 15 B
70174 Stuttgart
Deutschland

Redaktion:

Kathrin Walz, M.Sc. (IEH)
David Pflieger, M.Sc. (IFT)
Prof. Dr.-Ing Krzysztof Rudion (IEH)
Prof. Dr.-Ing Robert Schulz (IFT)

Titelbild und Hintergrundbild: Bild von [Pixabay](#)

Publikationen als pdf: www.ieh.uni-stuttgart.de und www.ift.uni-stuttgart.de

Stand: März 2021 (Version 1.0)

Der Text dieser Broschüre wird freigegeben unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen, Version 3.0 Deutschland (CC BY-SA 3.0 de)



MOTIVATION



Um die Klimaschutzziele der Bundesregierung und des Landes Baden-Württemberg zu erreichen, müssen im Verkehrssektor signifikante Emissionsreduktionen angestrebt werden. Einen Ansatz dazu bietet die Elektromobilität in Kombination mit der Nutzung von Lade-strom aus Erneuerbaren Energien. Um den Strombezug aus Erneuerbaren Quellen zu optimieren, ist jedoch zusätzlich eine Flexibilisierung der bestehenden und zukünftigen Verbraucher nötig.

Auch in der stetig wachsenden Logistikbranche kommt diese Thematik immer mehr auf. Es stellt sich die Frage, inwieweit die Prozesse in einem Logistikzentrum in Verbindung mit der Nutzung Erneuerbarer Energien flexibilisiert werden können und welche Auswirkungen eine mögliche Elektrifizierung von Mitarbeiter- und Lieferfahrzeugen auf Prozesse, Energieverbrauch und Netzanschluss der Zentren haben.

Mit diesen neuen Herausforderungen beschäftigten sich das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) und das Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) im durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojekt FELSeN („Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur Erbringung von Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen“). Die Studie untersuchte, inwiefern Logistikzentren dazu geeignet sind, durch eine situative Anpassung der logistischen Prozesse auf Schwankungen der Energieerzeugung (eigene PV-Anlage) oder zusätzliche Verbraucher (Elektromobilität) zu reagieren. Dabei wurden nicht nur Auswirkungen auf die logistischen Prozesse und auf das elektrische Energienetz betrachtet, sondern auch die Interaktion beider Seiten gestärkt. Die unumgängliche enge Kopplung von Elektrik und Logistik sowie die aktive Beteiligung der assoziierten Industriepartner aus Energienetz- und Logistikbranche ermöglichten dabei die Generation besonders realitätsnaher Ergebnisse.

PROJEKT-VORSTELLUNG



MEHRWERT



Wie können die verschiedenen Akteure rund um das Logistikzentrum eine flexible Energieversorgung unter Berücksichtigung Erneuerbarer Energien und Elektromobilität gestalten?

Die Antwort auf diese Frage finden Sie in diesem Leitfaden. Dazu werden nicht nur die in Zukunft zu erwartenden Herausforderungen an Logistikzentren thematisiert. Es wird auch ein praktisch umsetzbarer Weg skizziert, um die Logistikzentren fit für die Zukunft zu machen! Die zu diesem Zwecke eigens im Projekt entwickelte und praktisch getestete elektrisch-logistische Simulations- und Planungsumgebung, welche neuartig in ihrer Kopplung zwischen Logistik und Elektrik ist, wird dazu näher vorgestellt. Außerdem werden konkrete Handlungsempfehlungen für beteiligte Akteure von Logistikbetreibern über Speditionen, Netzbetreiber bis hin zu Kommunal- und Landespolitik gegeben. Einige Nachschlagewerke für tiefergehende Fragen liefert die Übersicht weiterführender Literatur am Ende.

INHALTE DES FORSCHUNGSPROJEKTS

Im Forschungsprojekt FELSeN wurde untersucht, inwieweit sich die Prozesse in einem Logistikzentrum an fluktuierende Erneuerbare Erzeugung anpassen können, welche neuen Herausforderungen die Elektromobilität in Zukunft bringt und welchen Einfluss dies auf das elektrische Stromnetz hat. Dazu wurde ein reales Logistikzentrum im Großraum Stuttgart und das industrielle Mittelspannungsnetz, in welchem das Logistikzentrum angeschlossen ist, untersucht.

Eine Übersicht der Projektinhalte zeigt Abbildung 1. Nach einer umfassenden Analyse und Verbrauchsmessung der logistischen Prozesse wurde das Logistikzentrum in einer neu entwickelten elektrisch-logistischen Simulations- und Planungsumgebung modelliert. Dies erlaubte die Untersuchung verschiedener Zukunftsszenarien und ihrer Auswirkungen auf Logistik und Stromnetz. Neben einer Verschiebung der Prozesse zur Senkung der Spitzenlast des Logistikzentrums wurde der Einsatz einer PV-Anlage, eines Speichers sowie eines Energiemanagementsystems und deren Mehrwerte für Logistik- und Netzbetreiber umfassend betrachtet. Auch der Hochlauf von Elektromobilität am Logistikzentrum, sowohl für Mitarbeiter-PKW als auch elektrische LKW, konnte realitätsnah simuliert werden. Dies erlaubte Erkenntnisse hinsichtlich zu erwartendem Elektrifizierungspotential, Netzausbau- sowie Ladeinfrastrukturbedarf und Auswirkungen auf logistische Abläufe.

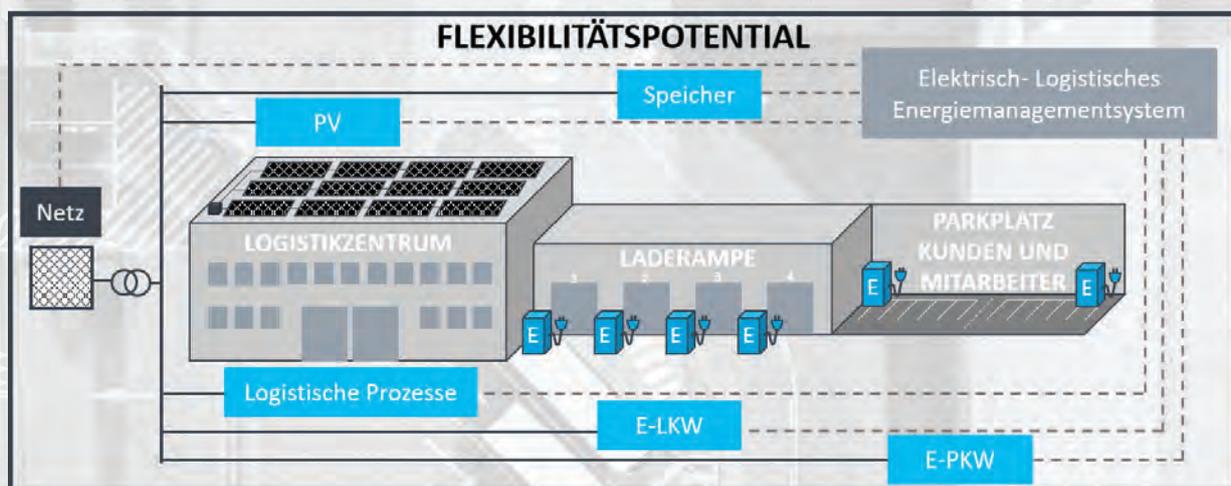


Abbildung 1: Übersicht der Projektinhalte aus FELSeN

KERNERGEBNISSE

Insgesamt hat sich gezeigt, dass in der im Projekt betrachteten Thematik der Energieversorgung und Elektromobilität im Logistik-Sektor eine Kopplung von Stromnetz und Logistik unumgänglich ist. Alternative Antriebe werden im Wirtschaftsverkehr besonders bei leichten und mittelschweren LKW an Bedeutung zunehmen. Die Versorgung von deren Ladeinfrastruktur durch Erneuerbare Energien sowie die Reduktion der Netzauswirkungen der Ladevorgänge ist ein relevantes Thema besonders in urbanen Räumen. Für die Akteure rund um das Logistikzentrum ergeben sich folgende zukünftige Herausforderungen:

- Eine **vorrauschauende Planung des Netzanschlusses** von Logistikzentren (Leistungs-/ Platzbedarf) ist nötig.
- **Elektromobilität im PKW- und LKW-Bereich** kann die logistische Auslastung sowie elektrische Last von Logistikzentren in Zukunft deutlich erhöhen.
- Das **Stromnetz** muss rechtzeitig auf den Hochlauf von **Elektromobilität in Industriegebieten** vorbereitet werden.
- Ein **Ausbau von PV-Anlagen** sollte angestrebt werden, um den zusätzlichen Energiebedarf von Elektromobilität zu decken.
- **PV-Anlagen, Speicher und Elektromobilität im Energiemanagement** können das Flexibilitätspotential von Logistikzentren steigern und **Vorteile** für Logistik- und Netzbetreiber bringen. Dazu sind wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie Geschäftsmodelle nötig.

WIR MACHEN IHR LOGISTIKZENTRUM FIT FÜR DIE ZUKUNFT!

Sie wissen nicht, wie Sie mit den oben genannten Herausforderungen umgehen sollen? Kein Problem, dafür haben wir im Projekt ein universelles Vorgehen und die notwendigen Tools entwickelt. Dies beinhaltet die folgenden Schritte.



Erfassung aller Verbraucher und Prozesse im Logistikzentrum

Mit unseren eigens entwickelten Messsystemen können wir Ihren Energieverbrauch optimal erfassen und so Einsparpotentiale ermitteln. Durch eine Ist-Analyse Ihrer internen Prozesse kann der aktuelle Zustand bewertet und eine Grundlage zu möglichen Optimierungen und Modernisierungen geschaffen werden.



Modellierung in der elektrisch-logistischen Simulationsumgebung

Im Projekt wurde eine neuartige Simulationsumgebung entwickelt, welche die Modellierung von Logistikzentren aus logistischer und elektrischer Perspektive gekoppelt ermöglicht. Nur so sind realistische Ergebnisse zu erreichen, welche die Integration zukünftiger Elemente ohne Nachteile auf bisherige Prozesse erlauben. In diesem zweiten Schritt wird auch Ihr Logistikzentrum in der gekoppelten elektrisch-logistischen Simulationsumgebung nachgebildet.



Elektromobilitätshochlauf prüfen

Mithilfe von Informationen zu regionalen Besonderheiten können wir den zukünftigen Ladebedarf an Ihrem Standort realitätsnah prognostizieren und den notwendigen Ladeinfrastrukturaufbau ableiten. Mit der neu entwickelten Modellierung elektrischer LKW können wir gemeinsam mit Ihnen mögliche Elektrifizierungspotentiale und deren Auswirkungen auf die Prozesse sowie Ihren Netzanschluss erarbeiten.



Flexibilitätspotentiale ermitteln

Mittels Simulationen in der elektrisch-logistischen Simulationsumgebung kann untersucht werden, welche wirtschaftlichen Potentiale das Verschieben von Prozessen an Ihrem Logistikzentrum hat. Auch ohne die Prozessverschiebung können wir den Einsatz eines Energiemanagementsystems, eines Batteriespeichers und/oder einer PV-Anlage an Ihrem Standort prüfen.



Strategie entwickeln

Gemeinsam mit Ihnen können wir anhand der Ergebnisse der vorherigen Schritte ein zukunftsfähiges Konzept für Ihr Logistikzentrum entwickeln. Sie werden erfahren, wie sich die Elektromobilität an Ihrem Standort entwickeln wird und ob Ihr Netzanschluss dazu ausgebaut werden sollte. Außerdem erkennen Sie, ob eine interne Optimierung von logistischen Prozessen sinnvoll wäre und ob sich eine PV-Anlage, ein Batteriespeicher oder ein Energiemanagementsystem für Sie lohnen könnte.

SO FUNKTIONIERT DIE ELEKTRISCH-LOGISTISCHE SIMULATIONS- UND PLANUNGsumGEBUNG

Zur Gestaltung einer flexiblen Energieversorgung von Logistikzentren unter Berücksichtigung Erneuerbarer Energien und Elektromobilität ist eine gekoppelte Untersuchung von Elektrik und Logistik unumgänglich. Nur so kann garantiert werden, dass die Veränderung logistischer Prozesse nicht zu Grenzwertverletzungen am Netzanschlusspunkt führen, oder umgekehrt, eine elektrische Flexibilisierung zwar Vorteile für das Stromnetz bringt, die Prozesse im Logistikzentrum jedoch unwirtschaftlich verzögert. Aus diesem Grund wurde im Forschungsprojekt FELSeN eine neuartige elektrisch-logistische Simulationsumgebung entwickelt, die auf einer engen Kopplung von Elektrik und Logistik basiert. Eine Übersicht der Simulations- und Planungsumgebung zeigt die untenstehende Abbildung 2.

Der Modellierung liegen eine Identifikation, Analyse und Messung aller aktuellen und zukünftigen Prozesse im Logistikzentrum zugrunde. Diese Daten dienen als Input sowohl für den elektrischen als auch logistischen Part der Modellierung. Während die elektrische Modellierung im Rahmen einer Simulation der einzelnen Verbraucher und Erzeuger integriert in das Energieversorgungsnetz erfolgt, besteht die logistische Modellierung auf Materialflüssen. Zwischen den beiden Teilen findet ein stetiger Informations- und Datenaustausch über Schnittstellen statt. Dies erlaubt nicht nur die individuelle, sondern auch die realitätsnahe Modellierung eines Logistikzentrums. Mithilfe der elektrisch-logistischen Simulationsumgebung kann das Flexibilitätspotential des Logistikzentrums bei Verschiebung von Prozessen oder Integration neuer Komponenten wie Speichern oder Elektromobilität sowie deren Realisierbarkeit ermittelt werden. Dabei bildet die Validierung der Ergebnisse hinsichtlich elektrischer und logistischer Restriktionen einen wichtigen Teil des Modells.

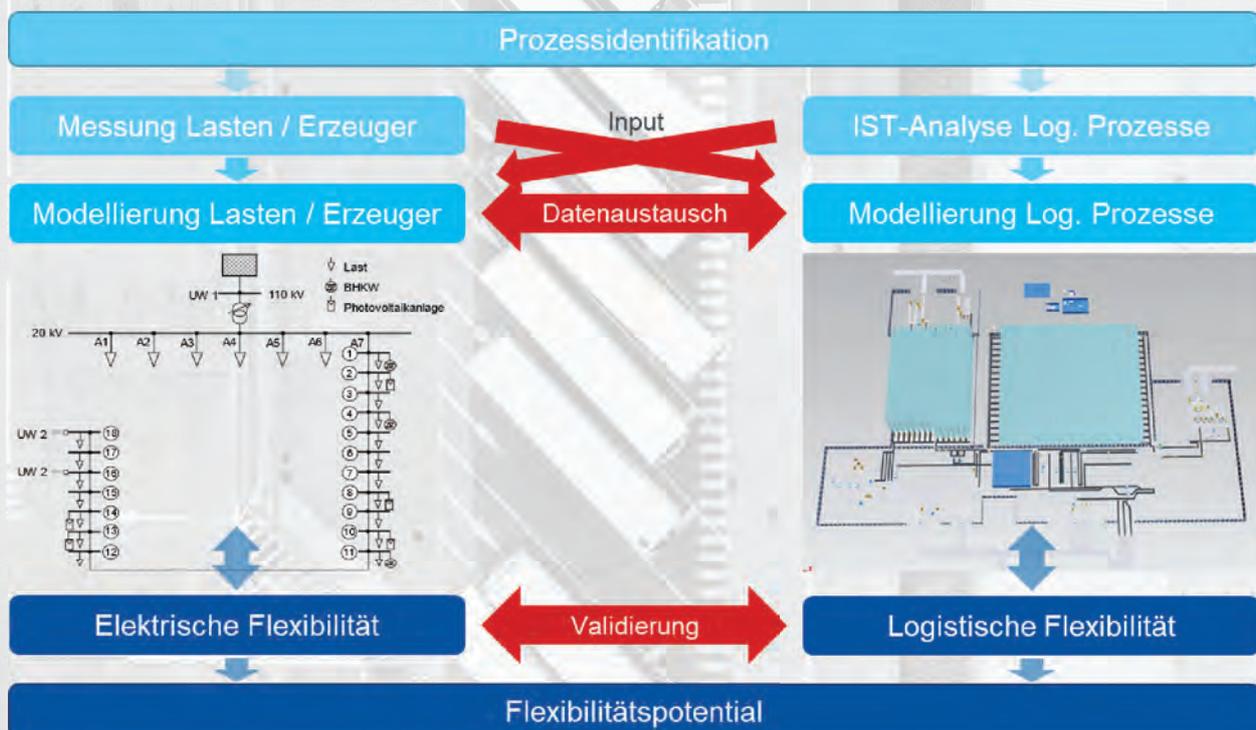


Abbildung 2: Kopplung und Schnittstellen zwischen elektrischem und logistischem Modell

UNSERE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR BETEILIGTE AKTEURE RUND UM DAS LOGISTIKZENTRUM

Betreiber Logistikzentrum / Gebäudeentwickler

- Vorausschauende Planung des Netzanschlusses von Logistikzentren (Leistungs-/ Platzbedarf) und Berücksichtigung von Elektromobilität als zukünftigen Verbraucher.
- Analyse des Verbrauchs automatisierter Anlagen, Flurförderfahrzeuge und Arbeitszeitmodelle zur Senkung von Lastspitzen und Ermittlung der Flexibilität → Glättung und Senkung der Spitzenlast führt zu Kosteneinsparungen.
- Analyse des individuellen Elektromobilitätsbedarfs der Mitarbeiter (Mindestladeinfrastruktur/ Lasterhöhung bis Verdopplung denkbar) und der Nutzfahrzeuge (Berücksichtigung der Kosten/ Platzverhältnisse der Ladeinfrastruktur).
- Prüfung der Wirtschaftlichkeit eines Einsatzes von Erneuerbaren Energien, eines Speichers und Energiemanagements zur Lastgangglättung.

Speditionen

- Einbindung von Elektromobilität als neuen Energieverbraucher an Spediteursstandorten in rechtzeitige Planung des Netzanschlusses.
- Berücksichtigung des Ladevorgangs/-orts in der Routenplanung. Strecken unter 200 km sind bei heutigen E-LKW-Reichweiten schon ohne Zwischenladung denkbar.
- Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse beim Aufbau eigener Ladeinfrastruktur.
- Ein Ladevorgang kann zu Prozessverzögerungen führen. Deren Reduktion durch höhere Ladeleistungen ist möglich. Beim Nachladen sind niedrigere Ladeleistungen realisierbar.
- Enge Platzverhältnisse an den Rampen erschweren die Installation von Ladeinfrastruktur. Diese müssen bei der Installation berücksichtigt werden.

Netzbetreiber

- Bei Netzanschlussbegehren von Industrieunternehmen sollten diese standardmäßig nach zukünftigen Planungen zur Elektromobilität befragt werden, um diese rechtzeitig einzuplanen.
- Elektromobilität kann die Last von Logistikzentren erhöhen. Dies variiert je nach Automationsquote, Mitarbeiterladeinfrastruktur und Elektromobilitätshochlauf im LKW-Bereich. Sowohl für E-PKW als auch E-LKW wird zumindest eine Notladeinfrastruktur empfohlen.
- Eine verstärkte Nutzung von PV-Anlagen in Industriegebieten kann die bestehende Maximallast und Last durch Elektromobilität sinnvoll verringern.
- Die Laststeuerung innerhalb des Logistikzentrums ist aufgrund von Produktivitätseinbußen nur begrenzt möglich. Die Kombination von PV-Anlagen, Speichern und Elektromobilität kann das Flexibilitätspotential deutlich steigern und auch netzdienlich eingesetzt werden.

Politik

- Erstellung eines Fahrplans für Elektromobilität von Nutzfahrzeugen für die Planungssicherheit aller Unternehmen (Öffentliche Ladeinfrastruktur in Industriegebieten, Einfahrverbote, E-Fahrzeugförderung)
- Analyse des Ausmaßes des Elektromobilitätshochlauf
- Förderung zur Vorbereitung des Stromnetzes auf den Hochlauf von Elektromobilität besonders in Industriegebieten in Kombination mit regenerativen Energieträgern (z. B. Photovoltaik)
- Vereinheitlichung von E-Fahrzeugparametern im Nutzfahrzeugbereich (z. B. Verbrauch/Belastung oft uneinheitlich)
- Schaffung bzw. Vereinfachung von rechtlichen Grundlagen für Anbieter von Ladedienstleistungen (Logistikzentrum als Anbieter)

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

- Beitrag und Vortrag „Logistikwerkstatt“ in Graz; Projektvorstellung
D. Pflieger, “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.
- 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.,” in LOGISTIK HEUTE Logistik-Immobilien und Standorte, vol. Sonderheft 2019, pp. 26–27, 2019.
- 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.
- 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.
- Abschlussbericht des Projekts FELSeN
K. Walz, D. Pflieger, K. Rudion, R. Schulz, „Forschungsbericht zum Projekt Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur Erbringung von Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen (FELSEN)“, 2021.

SIE HABEN FRAGEN ODER BENÖTIGEN UNTERSTÜTZUNG?

Kontaktieren Sie uns gerne!

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH)

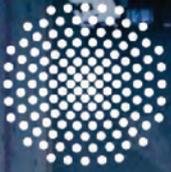
Prof. Dr. Ing. Krzysztof Rudion
rudion@ieh.uni-stuttgart.de

Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart
Deutschland

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)

Prof. Dr. Ing. Robert Schulz
robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de

Holzgartenstraße 15 B
70174 Stuttgart
Deutschland



Universität Stuttgart

IEH
Institut für Energieübertragung und
Hochspannungstechnik

IFT

Institut für Fördertechnik
und Logistik