

# Ermittlung des logistischen und energetischen Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums unter Berücksichtigung von Elektromobilität

Determination of the logistical and energetic flexibility potential of a logistics centre under consideration of electric mobility

David Pfleger<sup>1</sup>  
Kathrin Walz<sup>2</sup>  
Robert Schulz<sup>1</sup>  
Krzysztof Rudion<sup>2</sup>  
Joachim Maurer<sup>3</sup>  
Cristina-Maria Moraw<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut für Fördertechnik und Logistik  
Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
Universität Stuttgart

<sup>2</sup> Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik  
Fakultät für Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik  
Universität Stuttgart

<sup>3</sup> Häfele GmbH & Co KG

<sup>4</sup> Netze BW GmbH

**D**ie Elektromobilität im Bereich der Nutzfahrzeuge entwickelt sich zu einem brisanten Thema in der Logistikbranche. Unbekannte Herausforderungen und Auswirkungen an den Logistikzentren und deren elektrischen Netzanschluss werden entstehen. Diese Thematik wird von der Universität Stuttgart und weiteren Projektpartnern in diesem Beitrag untersucht. Zudem werden die energetischen Herausforderungen von logistischen Komponenten betrachtet.

[Schlüsselwörter: Elektromobilität, Energieflexibilität, Logistikzentrum, Standzeit, Ladezeit]

**E**lectric mobility in the commercial vehicle sector is developing into an explosive topic in the logistics industry. Unknown challenges and effects on logistics centres and their grid connection will arise. This topic is investigated by the University of Stuttgart and other project partners in this article. Furthermore, the energetic challenges of logistic components are considered.

[Keywords: electric mobility, energy flexibility, logistics centre, idle time, charging time]

## 1 EINLEITUNG

Die deutsche Bundesregierung hat sich bereits 2016 im Klimaschutzplan zum Ziel gesetzt, 2050 eine weitgehende Treibhausgasneutralität zu erreichen [BMU16]. Bei einem deutschen Treibhausgasausstoß von 805 Millionen Tonnen im Jahr 2019 [Bun20] ist neben Maßnahmen zum CO<sub>2</sub>-Ausgleich eine Reduktion der Emissionen unabdingbar. Die größten Anteile der Emissionen entfallen auf Energiewirtschaft, Industrie und Verkehr. Während 2019 die Emissionen in Energiewirtschaft und Industrie im Vergleich zum Vorjahr sanken, stiegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr weiter an [Bun20]. Die Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung bietet in Kombination mit einer Verkehrswende hin zur Elektromobilität einen Ansatzpunkt zur Erreichung der Klimaschutzziele. Eine hohe installierte Leistung erneuerbarer Erzeuger macht es jedoch notwendig, den Energieverbrauch zu steuern. Dadurch kann nicht nur der Nutzungsgrad der erneuerbaren Energien maximiert, sondern auch der Einfluss von Verbrauchern und Erzeugern auf das Stromnetz reduziert, und damit ein Stromnetzausbau vermieden werden.

Im Hinblick auf eine in Deutschland stetig wachsende Logistikbranche ist es dabei relevant, das Flexibilitätspotential von Logistikzentren zu ermitteln. Das bedeutet, es muss quantifiziert werden, inwieweit Prozesse aus energie-

tischen Gründen verschoben werden können, ohne logistische Abläufe zu gefährden oder die Produktivität von Unternehmen einzuschränken. Dabei dürfen auch künftige mögliche Verbraucher an Logistikzentren nicht außer Acht gelassen werden. So nimmt in der Logistik die Elektromobilität immer mehr an Bedeutung zu. Bereits heute setzen Paketdienstleister rein elektrisch betriebene Transporter in der Zustellung ihrer Pakete ein. Erste Vorserienfahrzeuge von schweren Lastkraftwagen (LKW) sind bei den Expeditionen angekommen und werden in Pilotprojekten betrieben. Das Laden der elektrischen LKW (E-LKW) bringt neue größtenteils noch unbekannte Anforderungen an die Infrastruktur der Logistikzentren, logistischen Prozesse sowie das elektrische Netz mit sich, und ist daher für Logistik- und Netzbetreiber von großem Interesse.

Kann ein Logistikzentrum durch situatives Anpassen der logistischen Prozesse oder Einbindung der Elektromobilität auf Schwankungen der Energieerzeugung reagieren und somit eine Stabilität des Netzes gewährleisten? Diese Frage wird das 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 beantworten. In diesem Beitrag wird dabei vorgestellt, aus welchen Verbrauchern sich das Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums zusammensetzen kann, inwieweit diese flexibilisierbar sind und welche Auswirkungen sich dadurch auf die logistischen Prozesse ergeben.

In Kapitel 2 wird zunächst der Begriff der Energieflexibilität definiert. Anschließend erfolgt eine Analyse der konventionellen Verbraucher im Logistikzentrum sowie deren Flexibilitätspotentials. Kapitel 3 widmet sich einer möglichen zukünftigen Last: dem Laden von E-LKW. Es wird dargestellt, wie diese am Logistikzentrum integriert werden könnte, der Ladebedarf im Rahmen des Projekts modelliert wird und wie groß die Auswirkungen auf die Produktivität sein können. Abschließend folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

## 2 ENERGIEFLEXIBILITÄT IM LOGISTIKZENTRUM

Zur Ermittlung des Flexibilitätspotentials müssen die betreffenden Verbraucher des Logistikzentrums zunächst analysiert werden. Dazu wird zuerst das Thema der Energieflexibilität definiert, ehe auf konkrete Maßnahmen an den identifizierten Verbrauchern eingegangen wird.

### 2.1 DEFINITION VON ENERGIEFLEXIBILITÄT

Energieflexibilität in Produktionssystemen ist definiert als die „Fähigkeit eines Produktionssystems, den Energiebedarf mit geringem finanziellem Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen“ [Abe11; Rei12;

Gra14]. Das bedeutet, dass im Gegensatz zur Energieeffizienz die benötigte Gesamtenergiemenge nicht unbedingt verringert wird, sondern die Energie zu anderen Zeitpunkten nachgefragt wird. So kann beispielsweise die Nutzung eigens erzeugter Energie durch PV-Anlagen priorisiert werden, um die Energiekosten zu senken. Auch bietet es die Möglichkeit, auf variable Stromtarife zu reagieren, mit denen Netzbetreiber einen Anreiz schaffen können, bei stark über- oder unbelastetem Stromnetz „netzdienlich“ zu handeln.

Durch die Verschiebung des Energiebedarfs auf andere Zeitpunkte ändert sich nicht zwingend die bezogene Energie, jedoch der Lastgang eines Verbrauchers. Dieser gibt die elektrische Leistung an, die ein Verbraucher zu einem bestimmten Zeitpunkt bezieht. Dadurch kann die maximale Anschlussleistung eines Verbrauchers am Stromnetz verringert werden. Dies hilft nicht nur, Überlastungen im Stromnetz zu vermeiden, sondern kann auch die Kosten für den Betreiber des Logistikzentrums senken. So müssen geringere Entgelte an den Netzbetreiber entrichtet werden, die u.a. abhängig von der maximalen Anschlussleistung sind. Außerdem kann die Ausnutzung von vorhandener elektrischer Infrastruktur (Transformatorstationen) verbessert und dadurch ein zusätzlicher Puffer für in Zukunft neu hinzukommende Verbraucher, wie das Laden von E-LKW geschaffen werden. Dies hat den Vorteil, dass das Logistikzentrum dann gegebenenfalls nicht oder erst später in den Erwerb und die Installation einer neuen Transformatorstation investieren muss. Eine derartige Energieflexibilität kann entweder durch die zeitliche Verschiebung interner Prozesse im Logistikzentrum oder durch die Nutzung eines Energiespeichers erreicht werden. Im Folgenden wird der direkte Einfluss der Verbraucher untersucht.

### 2.2 IDENTIFIKATION DER VERBRAUCHER IM LOGISTIKZENTRUM UND MÖGLICHE FLEXIBILISIERUNGSMABNAHMEN

Im Logistikzentrum gibt es verschiedene Bereiche und Komponenten sowie Prozesse, durch die eine Energieeffizienz und/oder eine Energieflexibilität erreicht werden kann. Potentiale entstehen besonders bei den Stetig- und den Unstetigförderern. Bei den Unstetigförderern wird in diesem Beitrag auf die Regalbediengeräte (RBG) und Flurförderfahrzeuge eingegangen, da diese die größte Anpassungsfähigkeit aufweisen. Die Gebäudeinfrastruktur, wie z. B. Luft- und Druckluftversorgung, wurde im Forschungsprojekt nicht berücksichtigt.

#### Unstetigförderer:

Im Falle von Regalbediengeräten gibt es verschiedene Ansatzpunkte zur Energiebedarfsreduktion sowie Flexibilisierung. Diese lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- mechanische Konstruktion,
- elektrische und elektrotechnische Konfiguration,

- Lagerbewirtschaftungsstrategien und
- Bewegungssteuerung [Som15].

Bei der *mechanischen Konstruktion* können besonders die Minderung der Masse bewegter Körper, die Reduktion der Radien rotierender Körper sowie die Verringerung der Reibung bei jeder Bewegung den Energiebedarf senken [Som15]. Hierdurch können Lastspitzen verringert werden. Die Erreichung einer Energieflexibilität bezüglich Prozessverschiebungen ist dadurch nicht möglich.

Durch *elektrische und elektrotechnische Konfiguration*, wie die Zwischenkreiskopplung, die Energierückspeisung und die Energiespeicherung, wird ermöglicht, freiwerdende Energie weiterzuverwenden oder einzuspeisen [Som15]. Die Energie wird durch die verbauten Antriebe im Generatormodus (z. B. beim Senken einer Last oder beim Verzögern) zurückgewonnen. Hierdurch entsteht eine erhöhte Energieflexibilität. Neben der Glättung der Lastspitzen, die beim Beschleunigen entstehen, können Speicher auf Netzschwankungen reagieren [Irr16]. Allerdings kann durch die Integration von Energiespeichern eine höhere Masse des RBGs entstehen und damit die Optimierung im Bereich der mechanischen Konstruktion behindern. Daher ist der Integrationsort des Speichers von besonderer Bedeutung.

*Lagerbewirtschaftungsstrategien* sind für einen effizienten Betrieb von Hochregallagern mit deren RBGs zwingend erforderlich. Diese werden in Strategien zur Lagerplatzvergabe und Strategien zur Ein- und Auslagerung gegliedert [Hom18]. Laut [Som15] ermöglichen Lagerbewirtschaftungsstrategien eine Reduktion des Energiebedarfs bei sinkenden Fahrzeiten. Zudem können durch die Strategien die Fahrten anders gestaltet, Prozesse verschoben und somit eine Energieflexibilität realisiert werden. Aufgrund der Untersuchungen von [Som15] wird auf diese Kategorie im folgenden Beitrag nicht näher eingegangen.

Die *Bewegungssteuerung* steuert und überwacht den Bewegungsablauf von Ladeeinheiten in allen Freiheitsgraden, x-Richtung (Fahrwerksbewegung; horizontal), y-Richtung (Hubwerksbewegung, vertikal) und z-Richtung (Gabelbewegung) [VDI2681]. Besonders der zweidimensionale Bewegungsbereich in x- und y- Richtung verhilft den Energiebedarf, den Verschleiß, das Schwingungsverhalten und die Spielzeiten zu senken [Som15]. Flexibilitätspotentiale können ebenfalls durch die Bewegungssteuerung entstehen. Dies wurde anhand einer Simulationsuntersuchung bestätigt und ist im Folgenden beschrieben.

Für die Datenbasis der Simulation wurden in einem Logistikzentrum 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 1 sind die Lastgänge dieser Bewegungsabläufe dargestellt. Aus Gründen der Anonymisierung erfolgt die Darstellung in p.u., d.h. die Leistungswerte sind auf die

maximale Leistung normiert. 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.

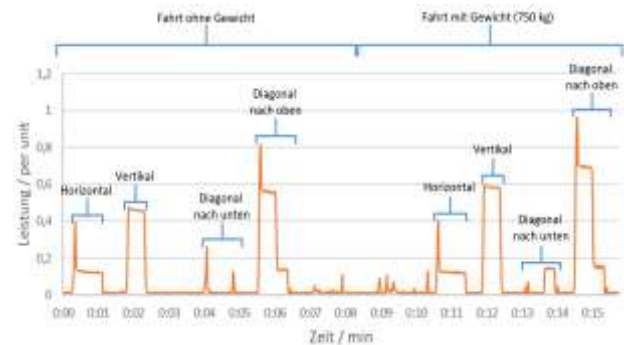


Abbildung 1. Messergebnisse verschiedener Fahrzyklen eines RBGs (eigene Darstellung)

Darauf aufbauend wurde das Simulationsmodell mit den dazugehörigen Eingangs- und Ausgangsdaten entwickelt. Das Modell basiert auf einer manuellen Kommissionierung im Hochregallager mit 10 Gassen. Hierbei steuert der Mitarbeitende das RBG (manuell oder startet die Bewegung), kommissioniert verschiedene Artikel in einen Sammelbehälter und übergibt diesen über das Förderband an die Packerei. Zudem werden die Aufträge über Wellen freigegeben. Zur Überprüfung der Energieflexibilität wurden Experimente mit dem Modell durchgeführt, in denen die Gleichzeitigkeit der RBGs reduziert wurde. Mit Gleichzeitigkeit ist das parallele und zum exakt gleichen Zeitpunkt startende Anfahren von mehreren RBGs durch die Steuerung oder den Mitarbeitenden (z. B. bei Auftragsfreigabe) gemeint. Durch eine verzögerte Startzeit (Wartezeit) des RBGs kann eine Reduktion ermöglicht werden. Die Wartezeit ist eine Zufallszahl einer Gleichverteilung eines vorbestimmten Zeitraums. In den Versuchen wurden Wartezeiten von 0 bis zu 80 sec geprüft.

Als Ergebnis der Experimente zeigt sich, dass durch die Reduktion der Gleichzeitigkeit die Lastspitzen deutlich reduziert werden können. In Abbildung 2 ist dies mit dem Energieverbrauch eines RBGs pro Tag von zwei Experimenten dargestellt. Das Experiment ohne eine Wartezeit (ohne Verzögerung) zeigt, dass sehr hohe Lastspitzen entstehen. Diese können durch einen Wartezeitraum von 0 bis 10 sec um 100 kW reduziert bzw. verlegt werden. Experimente mit einer weiteren Erhöhung des Wartezeitraums zeigen keine weitere Reduktion der Lastspitzen. In der Realität ist durch den Einflussfaktor Mensch die komplette Gleichzeitigkeit nie gegeben. Jedoch kann diese nie ausgeschlossen werden. Daher wird empfohlen, dies durch die Bewegungssteuerung des RBGs zu berücksichtigen. Einen Einfluss auf die Prozesse im Logistikzentrum soll durch die

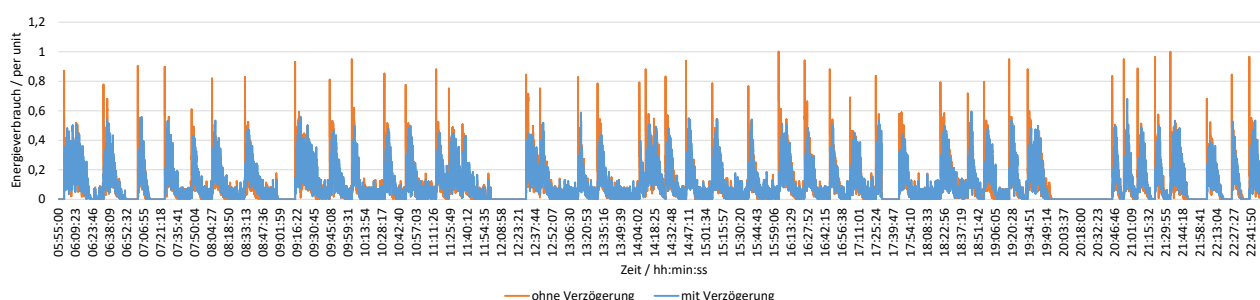


Abbildung 2. Tageslastkurve eines Hochregallagers der Simulationsexperimente (eigene Darstellung)

geringe Zeitverschiebung im Sekundenbereich im Vorhinein vermieden werden.

Als ein weiterer flurgebundener Unstetigförderer zählt das Flurförderfahrzeug (z. B. ein Gabelstapler). Meist wird es mit folgenden Antriebsarten bewegt:

- Batterieelektrischer Antrieb
- Verbrennungsmotorischer Antrieb

Elektromotoren haben Vorteile wie Abgasfreiheit, geringe Lärmentwicklung und geringe Vibrationen, welche besonders in Gebäuden von Interesse sind [VDI2695]. Verbrenner dienen eher zum Heben schwerer Lasten. Durch effizientere elektrische Fahrzeuge bzw. Motoren können diese Vorteile verstärkt und der Energieverbrauch verbessert werden. Ebenso wirkt sich eine verbesserte Routenplanung positiv aus. Ein weiteres wichtiges Bauteil eines elektrischen Flurförderfahrzeugs ist die Batterie. Durch sie und besonders durch Wechselbatterien kann eine Energieflexibilität gegeben werden. Die Batterien können zu Zeitpunkten geladen werden, bei denen der Gesamtenergieverbrauch gering ist (je nach Schichtkonzept z.B. nachts) oder die Eigenerzeugung durch PV-Anlagen hoch (z. B. mittags). Dadurch wird außerdem ein gleichzeitiges Laden der Fahrzeuge nach Schichtende vermieden. Durch das versetzte Laden können Lastspitzen reduziert und Lastsenken aufgefüllt werden. Dies sorgt für eine Glättung des Lastgangs. Um diese Lade-Organisation dem Mitarbeitenden abzunehmen, könnte ein Unternehmen die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge über ein Lademanagement regeln. Dies könnte zudem die Ladeverwaltung von festverbauten Batterien vereinfachen. Die freien Wechselbatterien dadurch auch zur Glättung weiterer Lastspitzen verwendet werden, wenn die Möglichkeit besteht, diese nicht nur aufzuladen, sondern auch bedarfsweise zu entladen.

### Stetigförderer:

Bei Stetigförderern (z. B. ein Kettenförderer) strömt das Fördergut kontinuierlich oder diskret kontinuierlich [Hom18]. Aufgrund der Kontinuität ist die Erzeugung einer Energieflexibilität eher schwierig. Ebenso 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 ELEKTRISCHE LKW ALS NEUE VERBRAUCHER

Die Integration von Elektromobilität bringt neue Herausforderungen. Die Betreiber eines Logistikzentrums bekommen durch Testfahrzeuge erste Erfahrungen mit dem Thema. Jedoch ist eine vermehrte Nutzung von E-LKW und deren Auswirkungen noch unbekannt. Diese sollen im Folgenden simuliert und analysiert werden. Um Unklarheiten zu vermeiden, werden zu Beginn zunächst die Fachbegriffe Ladezeit und Standzeit definiert:

- Standzeit: Mit der „Standzeit“ wird der Zeitraum beschrieben, in der die Be- oder Entladung von Gütern stattfindet [BAG11].
- 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 „Aufhaltsdauer“ [BAG11].

### 3.1 INTEGRATIONSKONZEPTE

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein E-LKW zukünftig an einem Logistikzentrum ohne Laden der Batterie Halt macht, ist gering. Die Aufenthaltsdauer soll für das Laden der Batterie genutzt werden. Die Zentren müssen sich für diesen Fall rüsten. In welchem Ausmaß ist noch unbekannt. Hierfür wurden im Projekt verschiedenste Konzepte analysiert, wie die Ladeinfrastruktur am Logistikzentrum integriert werden kann. Zwangsläufig ist diese von der Ausstattung des E-LKW abhängig.

#### Steckverbindung:

Die Steckverbindung ist bei den E-PKW und E-LKW die meist verbreitete und eine standardisierte Technik. In Europa und den USA etabliert sich das CCS-System (Combined Charging System) als einheitliche AC/DC-Schnittstelle [Kar18]. Die Prototypen bzw. erste Serien-

fahrzeuge sind mit dieser Technik ausgestattet, welche keinen zusätzlichen Platzbedarf im Fahrzeug hat. Im Logistikzentrum ist allerdings an jeder Rampe eine Ladesäule mit dem entsprechenden Ladekabel und Stecker vorzusehen. Daraus resultiert ein zusätzlicher Platzbedarf. Jedoch wäre dies baulich einfach realisierbar. Der Ein- und Aussteckvorgang benötigt ebenfalls Zeit und Personal. Des Weiteren resultiert durch dieses Konzept eine hohe Ladeleistung sowie ein hoher Wirkungsgrad. Andererseits können Verluste bei hohen Ladeströmen entstehen und es ist eine Kühlung des Kabels und Steckers notwendig. Defekte an der Ladeinfrastruktur sind einfach zu beheben. Das Konzept ist kostengünstig und kann möglicherweise durch einen Roboter übernommen werden.

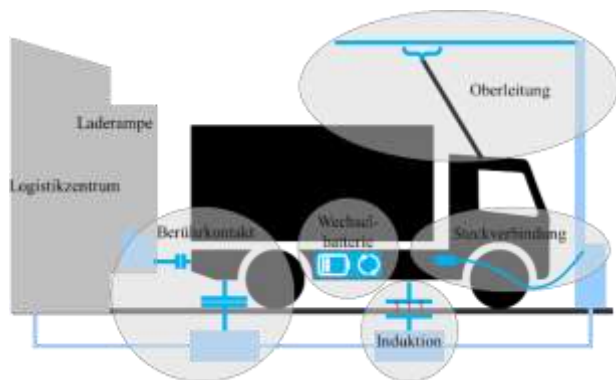


Abbildung 3. Konzepte zur Integration der Ladeinfrastruktur (eigene Darstellung)

#### Berührungskontakt:

Das Konzept Berührungskontakt beruht auf einer Verbindung zwischen zwei Konnektoren, welche flexibel am Fahrzeug angebracht werden können. Diese können beispielsweise am hinteren Teil des E-LKW und direkt an der Rampe oder unter dem E-LKW und auf dem Boden befestigt sein (siehe Abbildung 3). Bei der letzteren Befestigung besteht eine Möglichkeit während des Fahrens zu laden, falls die Straßen mit einer Stromschiene ausgelegt sind (Beispielprojekt in Schweden der Firma „eRoadArlanda“). Eine menschliche Bedienung ist nicht notwendig und es können ähnliche Ladeleistungen, wie bei dem Konzept Steckverbindung, realisiert werden. Nachteilig sind die fehlende Standardisierung aufgrund der wenigen Anbieter, der zusätzliche Aufbau am E-LKW und das genaue Einparken an der Rampe. Stromabnehmer/Pantograph:

Der Stromabnehmer ist ein sehr altes bewährtes System, welches 1881 bereits vorgestellt wurde [Kus88]. Heutzutage wird es sehr häufig bei Zügen und Straßenbahnen verwendet. Im Rahmen eines Feldversuchs wurde im Jahr 2019 auf der A5 die erste von drei geplanten Teststrecken eines sogenannten eHighways eröffnet. Dabei laden die E-LKW über Oberleitungen ähnlich zum Bahnverkehr. Zwischen der Autobahn und dem Logistikzentrum bewegt sich der E-LKW mithilfe seiner Batterie. An der Rampe mit einer Oberleitung kann der E-LKW ebenfalls seinen Stromabnehmer ausfahren und während des Be- und Entladens der Waren die Batterie laden. Durch diese Kombination

von Ladezyklen ist eine kleinere Batteriekapazität sowie ein geringerer Ladebedarf am Logistikzentrum ausreichend. Ebenfalls ist keine menschliche Bedienung notwendig. Allerdings fehlt eine Standardisierung und es entsteht durch den Stromabnehmer ein zusätzlicher Platz- und Gewichtsbedarf am E-LKW sowie größere bauliche Änderungen an der Rampe. Folglich ist das Konzept durch die eHighways eine kostenintensive Gesamtlösung.

#### Induktion:

Induktives Laden von E-PKW wird bereits seit Jahren in mehreren Forschungsprojekten getestet. Dies kann ebenso auf den E-LKW übertragen werden. Der E-LKW kann somit bei einer baulichen Änderung und ohne menschliche Bedienung an der Rampe induktiv geladen werden. Hierzu ist allerdings ein genaues Einparken sowie ein zusätzlicher Einbau einer Induktionsspule an Rampe und E-LKW notwendig. Nachteilig sind die geringe Ladeleistung, wodurch eine lange Ladezeit benötigt wird, und die fehlende Standardisierung. Darüber hinaus gibt es Unternehmen, welche an Induktionsschleifen, eingelassen in Straßen mit hoher Verkehrsdichte, forschen (z. B. magnetischer Beton der Firma MAGMENT). Folglich kann möglicherweise ein Ladevorgang beim Fahren stattfinden, wodurch Induktionsstraßen, ähnlich wie die eHighways, entstehen können.

#### Wechselbatterie:

Bei diesem Konzept sind abnehmbare Batterien am E-LKW vorgesehen, welche bei Bedarf am Logistikzentrum gewechselt werden können. Der Ladevorgang findet unabhängig statt und kann somit langsamer und batterieschonender ablaufen. Demzufolge kann die Batterielebensdauer verlängert werden. Zudem ist es möglich, die Batteriekapazität je nach zu fahrender Strecke auszuwählen. Eingeladene Batterien dienen als Energiespeicher bzw. Netzbooster (zur Netzstabilisierung) für Unternehmen. Am Wechselort entsteht dadurch ein höherer Platzbedarf für die Ladeinfrastruktur, weshalb dieser Wechsel nicht unbedingt an der Rampe durchgeführt werden kann. Zudem wird mit hoher Wahrscheinlichkeit für den Austausch eine persönliche Schutzausrüstung und eine Fortbildung benötigt. Dieses Konzept hat besonders durch die Unabhängigkeit von Ladevorgängen ein großes Potential. Jedoch wird eine unternehmensübergreifende Lösung sehr unwahrscheinlich, da es keine standardisierten Batterien für unterschiedliche E-Nutzfahrzeuge geben wird. Sie wird eher als eine interne Lösung einer Spedition verwendbar sein.

Aufgrund der Standardisierung und der Einfachheit wird sich das Konzept „Steckverbindung“ mit hoher Wahrscheinlichkeit durchsetzen. Es ist bereits heutzutage an allen Prototypen bzw. Serienfahrzeuge verbaut. Daher befasst sich der Beitrag im Folgenden nur mit diesem Konzept. Die anderen Integrationsmöglichkeiten befinden sich noch im Entwicklungsstatus und werden daher nicht weiter betrachtet.

### 3.2 ERMITTLUNG VON LADEZEITEN DURCH MOBILITÄTSDATEN

Zur Untersuchung des Einflusses des Ladens elektrischer LKW auf die Auswirkungen eines exemplarischen Logistikzentrums in diesem Beitrag werden Daten von LKW-Ladevorgängen benötigt. Wegen der bisher geringen Ausbreitung von E-LKW sind reale Daten jedoch kaum verfügbar. Zudem können sich die Ladevorgänge aufgrund längerer Fahrtstrecken, höherer Ladeleistungen und anderer Ladeorte deutlich von denen elektrischer PKW unterscheiden. Daher werden in diesem Beitrag synthetische Ladeprofile erzeugt aus den Mobilitätsdaten realer konventioneller LKW nach [Wal20] genutzt.

Das Logistikzentrum besitzt einen Wareneingang (WE) und einen Warenausgang (WA) mit einer festgelegten Anzahl an Toren. Für den Zeitraum einer Woche werden täglich ankommende LKW mit Ankunftszeit, Beladung an Paletten, Standzeit und LKW-Größenklasse aus realen historischen Daten des Logistikzentrums ermittelt. Die Ankunftszeit der LKW ist durch die Öffnungszeiten des Logistikzentrums und die freien Torkapazitäten limitiert. Dadurch kann garantiert werden, ein realistisches Bild der tatsächlichen Abläufe zu betrachten. Um dabei verschieden ausgelastete Logistikzentren zu berücksichtigen, wird die tatsächliche Belegung der Tore in drei Szenarien variiert. In Tabelle 1 werden diese mit der Anzahl der LKW spezifiziert. Szenario 1 stellt den Ausgangszustand des Beispiel-Logistikzentrums dar.

Tabelle 1. Auslastungen der Szenarien

Szenario	1	2	3
Auslastung	17 %	50 %	90 %
WE   Anzahl LKW	186	602	1057
WA   Anzahl LKW	289	756	1455

Um eine Elektrifizierung der LKW-Antriebe nachzubilden, wird das in [Wal20] beschriebene Verfahren genutzt: Jedem am Logistikzentrum ankommenden LKW wird dabei ein real angekündigtes oder bereits auf dem Markt befindliches batterieelektrisches LKW-Modell mit dessen Fahrzeugparametern (Batteriekapazität, Reichweite, Gewichtsklasse) zugewiesen. Mithilfe von Daten der Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (KiD) [DLR12], wird eine gefahrene Strecke hinterlegt. Daraus kann dann der aktuelle Ladezustand (SOC) der Fahrzeugbatterie, und daraus der notwendige Energiebedarf zum Nachladen des Fahrzeugs auf 80% SOC bestimmt werden [Wal20].

Das Ladeprofil eines LKW und die daraus resultierende Ladezeit kann nun unter Betrachtung verschiedener Ladeleistungen (50 kW, 150 kW, 350 kW) aus dem ermittelten Energiebedarf bestimmt werden. Dabei werden zwei verschiedene Fälle betrachtet.

1. Der LKW lädt seine Batterie nur während der tatsächlichen (ursprünglichen) Standzeit. Ladezeit und Standzeit sind gleich lang.

2. Der LKW lädt seine Batterie bis 80% SOC. Dadurch kann die Aufenthaltsdauer verlängert werden, wenn die Ladezeit die Standzeit überschreitet.

Die Nutzung dieser Methodik wurde bereits in [Wal20] zur Ermittlung des veränderten Energiebedarfs und Lastgangs eines Logistikzentrums unter dem Hochlauf der Elektromobilität im LKW-Sektor vorgestellt. Die Ergebnisse unterscheiden sich hinsichtlich der beiden Fälle je nach Ladeleistung deutlich. Jedoch wirkt sich das Laden nach Fall 2 auch besonders auf den Betrieb eines Logistikzentrums aus. Die Untersuchung dieses Aspektes steht im Vordergrund dieses Beitrags.

### 3.3 AUSWIRKUNGEN DER VERLÄNGERTEN AUFENTHALTSZEITEN DURCH DIE LADEZEITEN

Die ermittelten Daten der Ladeprofilsimulation werden zur Untersuchung der Auswirkungen der dadurch verlängerten Aufenthaltszeiten verwendet. Zur näheren Betrachtung wird ein zufälliger Betrachtungszeitraum von einer Woche gewählt. In Tabelle 2 wird der Ausgangszustand ohne Elektromobilität dargestellt. Die Dysbalance der Rampenanzahl zwischen WA und WE entsteht durch die Nichtberücksichtigung der Wechselbrücken. 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.

Tabelle 2. Ausgangszustand des Wareneingangs (WE) und -ausgangs (WA)

	WE	WA
Rampen (gesamt)	14	9
IST-Auslastung	17 %	17 %
Rampen (genutzt)	4	6
Mittlere Standzeit	20 min	14 min
Anzahl LKW	186	289

Auf Basis dieses Ausgangszustands und der Ladeprofilsimulation wird in einer weiteren Simulation über die Stand- bzw. Ladezeit dem LKW eine Rampe zugewiesen. Hierfür wird zuerst geprüft, ob die Standzeit größer gleich der Ladezeit ist. Sobald die Standzeit länger wie die Ladezeit ist, wird die Standzeit für die Simulation verwendet. Im anderen Fall wird die Ladezeit genutzt. Im nächsten Schritt wird über die ausgewählte Zeit  $t$  dem LKW ein Tor zugeordnet. Bei voll belegtem Wareneingang oder -ausgang wird der LKW abgewiesen und kann nicht am Logistikzentrum bedient werden. Der Ablauf wird in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

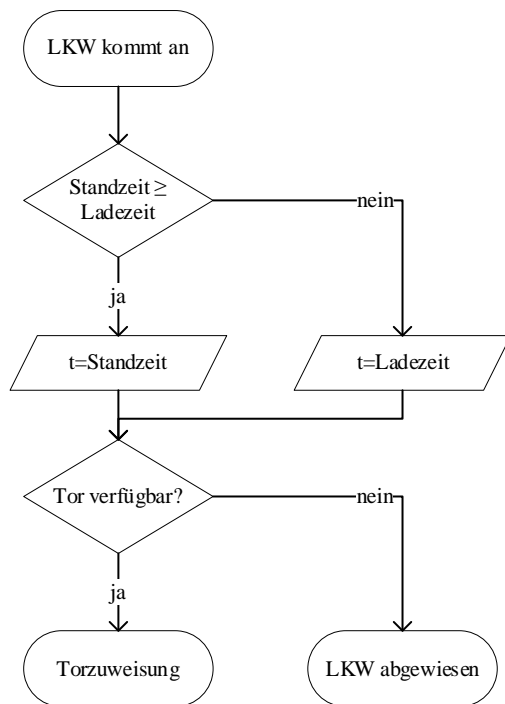


Abbildung 4. Ablauf der Simulation unter Berücksichtigung von Stand-/Ladezeiten (eigene Darstellung)

Die Auswertungen der Simulationsergebnisse sind in Tabelle 3 für den WE und Tabelle 4 für den WA zusammengefasst. Dabei wird bei verschiedenen Auslastungen der vorhandenen Rampen, die Auswirkung des Ladens der LKW-Batterien mit verschiedenen Ladeleistungen betrachtet. Es ist dargestellt, wie viele LKWs im Szenario am Logistikzentrum ihre Batterie laden müssen, bei wie vielen sich die Standzeit dadurch verlängert, wie viele Fahrzeuge infolgedessen abgewiesen werden müssen und wie viele Rampen tatsächlich benötigt werden. Unabhängig von der

Auslastung müssen 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. Die Überschreitung der Standzeit führt zu einer verlängerten Belegung der 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.

Das exemplarische Logistikzentrum kann in der IST-Auslastung bis auf drei LKW bei einer Ladeleistung von 50 kW trotz Elektrifizierung alle abfertigen. Im WA werden diese abgewiesen. Es ist aber davon auszugehen, dass in der Realität die LKW mit kurzen Wartezeiten zusätzlich abgefertigt werden können. Die zur Verfügung stehenden Rampen reichen somit aus. Dies liegt auch daran, dass das Logistikzentrum im WA und WE mehr Rampen zur Verfügung hat als bei IST-Auslastung eigentlich benötigt werden. Mit steigender Auslastung nehmen die Abweisungen zu. Bei 90 %-Auslastung und 50 kW Ladeleistung entsteht eine Abweisungsquote von 55 %. Um alle LKW bedienen zu können, würden im WE 49 und im WA 35 Rampen benötigt. Zudem entsteht beim 50 kW Laden eine durchschnittliche Ladezeit von über 2 Stunden, vereinzelt sogar bis zu 16 Stunden. Diese Ladezeiten sowie Flächen können Spediteure sowie Betreiber von Logistikzentrum im Realbetrieb nicht tolerieren. Abhilfe würden zum Beispiel zusätzliche Parkplätze mit Ladeinfrastruktur in der Nähe des Logistikzentrums schaffen. Zudem könnte ein Zeitfenstermanagement zur Angabe der Ladezeit hilfreich sein. Mit

Tabelle 3. Zusammenfassung der Ergebnisse des Wareneingangs

	IST-Auslastung 17 %			Auslastung 50 %			Auslastung 90 %		
	50 kW	150 kW	350 kW	50 kW	150 kW	350 kW	50 kW	150 kW	350 kW
Ladende LKW	94	94	94	280	280	280	488	488	488
LKW (Ladezeit länger wie Standzeit)	79	67	48	246	204	158	434	362	279
Abgewiesene LKW	0	0	0	177	30	2	564	243	82
Anzahl Rampen	14	8	8	14	14	14	14	14	14

Tabelle 4. Zusammenfassung der Ergebnisse des Warenausgangs

	IST-Auslastung 17 %			Auslastung 50 %			Auslastung 90 %		
	50 kW	150 kW	350 kW	50 kW	150 kW	350 kW	50 kW	150 kW	350 kW
Ladende LKW	144	144	144	363	363	363	669	669	669
LKW (Ladezeit länger wie Standzeit)	128	106	77	334	289	236	609	522	420
Abgewiesene LKW	3	0	0	193	19	1	809	314	101
Anzahl Rampen	9	7	7	9	9	9	9	9	9

150 und 350 kW Laden (einzeln oder in Kombination) kann der Betreiber mehrere LKWs abfertigen. Dadurch können dann jedoch höhere Lastspitzen entstehen, die in [Wal20] betrachtet werden

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Beitrag beschreibt das Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums hinsichtlich aktueller Verbraucher und einer zukünftigen Verbreitung elektrischer LKW. Dabei werden die Auswirkungen auf Lastspitzen (konventionelle Verbraucher) sowie die Belegung der Rampen (E-Lkw) untersucht.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Erreichung von Energieeffizienz sowie Energieflexibilität. Besonders mit der Effizienz haben sich bereits verschiedene Forscher auseinandergesetzt. Im Forschungsvorhaben „FELSeN“ wurde Energieflexibilität im Bereich des Hochregallagers und bei batterieelektrischen Flurförderfahrzeugen ermittelt. Beim Hochregallager wurde dies in einer Simulation gezeigt. Lastspitzen lassen sich glätten bzw. können deutlich durch bestimmte Maßnahmen reduziert werden.

Neben der Integration von Elektronutzfahrzeugen in ein Logistikzentrum wird dargestellt, welche Auswirkungen die Elektrifizierung auf ein Logistikzentrum hat. Hierzu wurde anhand verschiedener Auslastungsszenarien (17 %, 50 %, 90 %) und Ladeleistungen (50 kW, 150 kW, 350 kW) eine neue Auslastung am WE und WA durch eine Simulation ermittelt. Durch die Elektrifizierung laden circa die Hälfte der ankommenden LKW ihre Batterie und es entstehen sehr hohe Ladezeiten, weswegen eine freie Rampe nicht mehr garantiert werden kann.

Im nächsten Schritt die Simulation vervollständigt werden. Folgenden Punkte soll eine ergänzende Simulation umfassen:

- Kombinationen verschiedener Ladeleistungen
- Kombinationen/Senkungen verschiedener Elektrifizierungsgrade
- Kostenbetrachtung

#### FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungsvorhaben wird im Rahmen des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



## LITERATUR

- [Abe11] Abele, Eberhard; Reinhart, Gunther: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen, München: Hanser, 2011.
- [BAG11] Bundesamt für Güterverkehr (BAG): Marktbeobachtung Güterverkehr – Sonderbericht zur Situation an der Laderampe vom Januar 2011, Köln, 2011.
- [BMU16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Klimaschutzplan 2050, 2016. [Online]. Available: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf) [Zugriff am 12. Juli 2020].
- [Bun20] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: CO2-Emissionen 2019 deutlich gesunken, 2020. [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/bilanz-umweltbundesamt-1730880>. [Zugriff am 12. Juli 2020].
- [DLR12] Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Clearingstelle für Verkehr: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2012.
- [Gra14] Graßl, Markus: Methode zur Bewertung der Energieflexibilität. In: Werkstatttechnik online 104 (H. 5), 2014, S. 313–319.
- [Hom18] ten Hompel, Michael et al.: Materialflusssysteme: Förder und Lagertechnik. 4. Auflage, Springer, 2018.
- [Irr16] Irrgang, Reinhard: Stromspitzen aus dem Speicher. In: Hebezeuge Fördermittel 5, 2016, S. 14-17.
- [Kar18] Karle, Anton: Elektromobilität – Grundlagen und Praxis, München: Hanser, 2018.
- [Kra19] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen,“ 2019. [Online]. Available: [https://www.kba.de/SharedDocs/Publika-tionen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13\\_2019\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.kba.de/SharedDocs/Publika-tionen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13_2019_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=10). [Zugriff am 12. Juli 2020].
- [Kus88] Kuschinski, Norbert: Ausstellungs-Straßenbahnen. In: *Verkehrsgeschichtliche Blätter*, Bd. 3, 1988, S. 60–68.
- [Rei12] Reinhart, Gunther et al.: Energieflexible Produktionssysteme, Einführung zur Bewertung der Energieeffizienz von Produktionssystemen. In: *Werkstatttechnik online* 102 (9), 2012, S. 622–628.
- [Som15] Sommer, Tobias: Entwicklung und Bewertung von Lagerstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz in automatischen Hochregallagern unter Beachtung des Umschlags. Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.
- [VDI2681] Verein Deutscher Ingenieure: Steuerungen für Regalbediengeräte, Beuth, Berlin, 1993.
- [VDI2695] Verein Deutscher Ingenieure: Ermittlung der Betriebskosten für Diesel- und Elektro-Gabelstapler, Beuth, Berlin, 2010.
- [Vos19] Voss, Michael: Methode zur Flexibilisierung des Energieverbrauchs von automatischen Hochregallagern. Dissertation, Universität Stuttgart, 2019.
- [Voß94] Voß, Alfred: Die Zukunft gestalten: Gedanken zu Energiefrage. In: Gartmann, Peter (Hrsg.): *Zehnmal zehn AtelJahre: Gedanken zur Energiefrage*. Olten: Aare-Tessin AG für Elektrizität, 1994, S. 29–39.
- [Wal20] Walz, Kathrin et al.: Synthetic Charging Profiles Development of Battery-Electric Trucks for Probabilistic Grid Planning, CIRED 2020 Berlin Workshop, 2020. Zugefügt zur Veröffentlichung.

---

**David Pfleger, M.Sc.**, wissenschaftlicher Mitarbeiter und  
Abteilungsleiter am Institut für Fördertechnik und Logis-  
tik (IFT) der Universität Stuttgart.

Tel.: +49 (0)711 685 83935

E-Mail: david.pfleger@ift.uni-stuttgart.de

**Kathrin Walz, M.Sc.**, wissenschaftliche Mitarbeiterin am  
Institut für Hochspannungstechnik und Energieübertra-  
gung (IEH) der Universität Stuttgart.

Tel.: +49 (0)711 685 69196

E-Mail: kathrin.walz@ieh.uni-stuttgart.de

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz**, Institutsleiter des  
Instituts für Fördertechnik und Logistik der Universität  
Stuttgart.

Tel.: +49 (0)711 685 83770

E-Mail: robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Krzysztof Rudion**, Leiter Fachge-  
biet Netzintegration Erneuerbarer Energien des Instituts  
für Hochspannungstechnik und Energieübertragung der  
Universität Stuttgart.

Tel.: +49 (0)711 685 67872

E-Mail: rudion@ieh.uni-stuttgart.de

**Joachim Maurer**, Leiter der Instandhaltung der Firma  
Häfele und Co GmbH.

**Dipl.-Ing. Cristina-Maria Moraw, M.Sc.**, Mitarbeiterin  
im Bereich Stromnetzplanung der Firma Netze BW  
GmbH.

Adressen:

**Institut für Fördertechnik und Logistik**

Universität Stuttgart  
Holzgartenstraße 15 B  
D-70174 Stuttgart

**Institut für Hochspannungstechnik und Energieüber-  
tragung**

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 47,  
D-70569 Stuttgart