

23. Jan. 2024 | NEFI Technology Talk: DC Industry
Dr. Timm Kuhlmann

Industrielle DC-Netze

- Technischer Überblick -

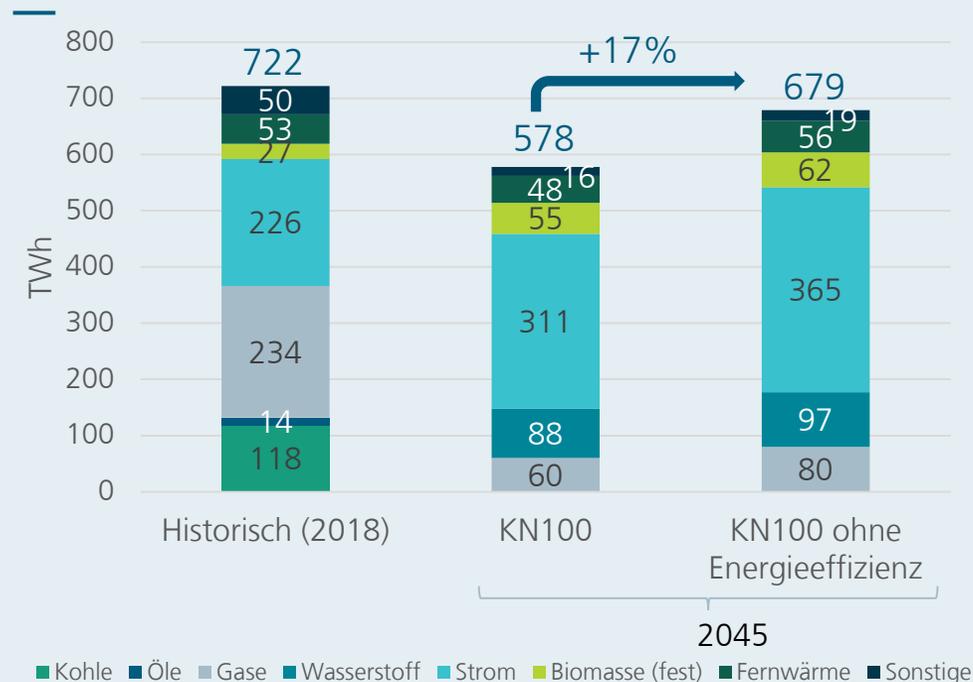


CO₂-neutrale, regenerative, aber volatile Energieerzeugung

Energieeffizienz wird zum Gebot, Energieflexibilität ist die Opportunität

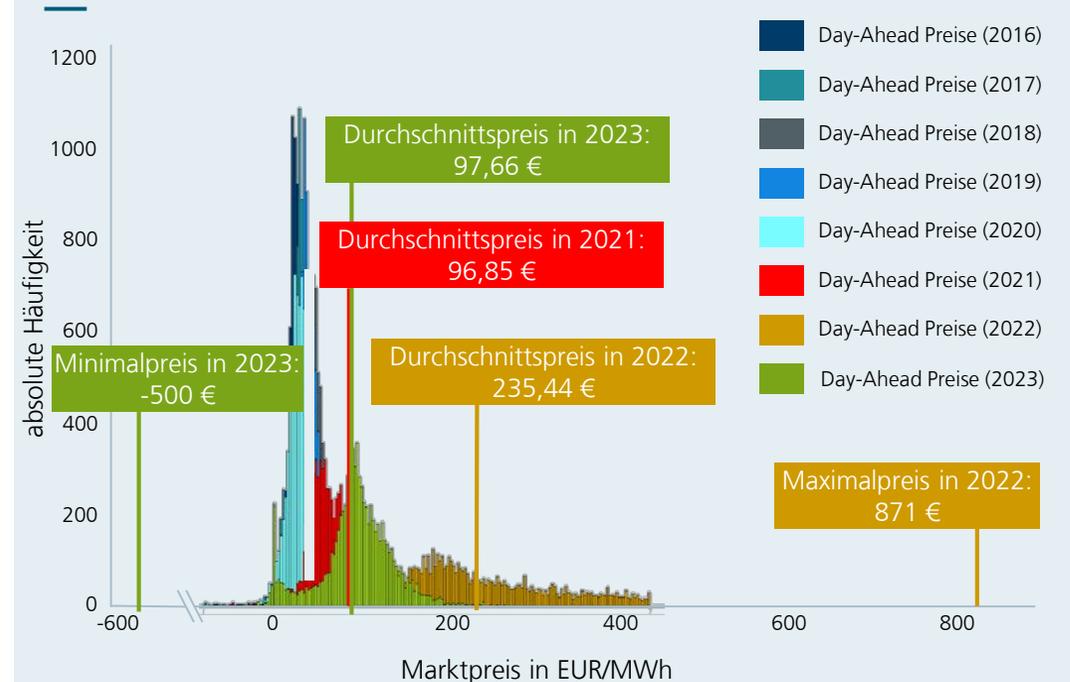
Massiver Energieträgerwechsel zu Strom, Wasserstoff und Biomasse

Entwicklung der industriellen Energieversorgung¹



Strompreise steigen und die Schwankungsbreite nimmt deutlich zu

Strompreisverteilung zwischen 2016 und 2023²

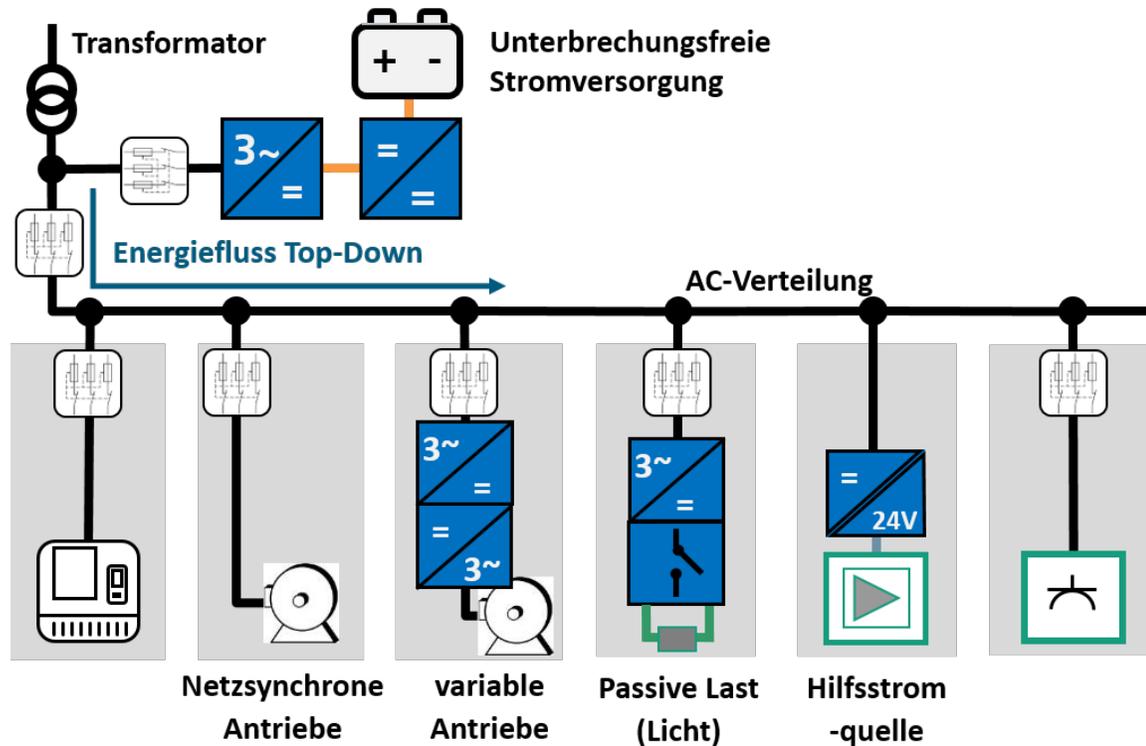


Quelle: ¹dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, dena (2021); ² Kopernikus-Projekt Synergie (FIM/FIT)

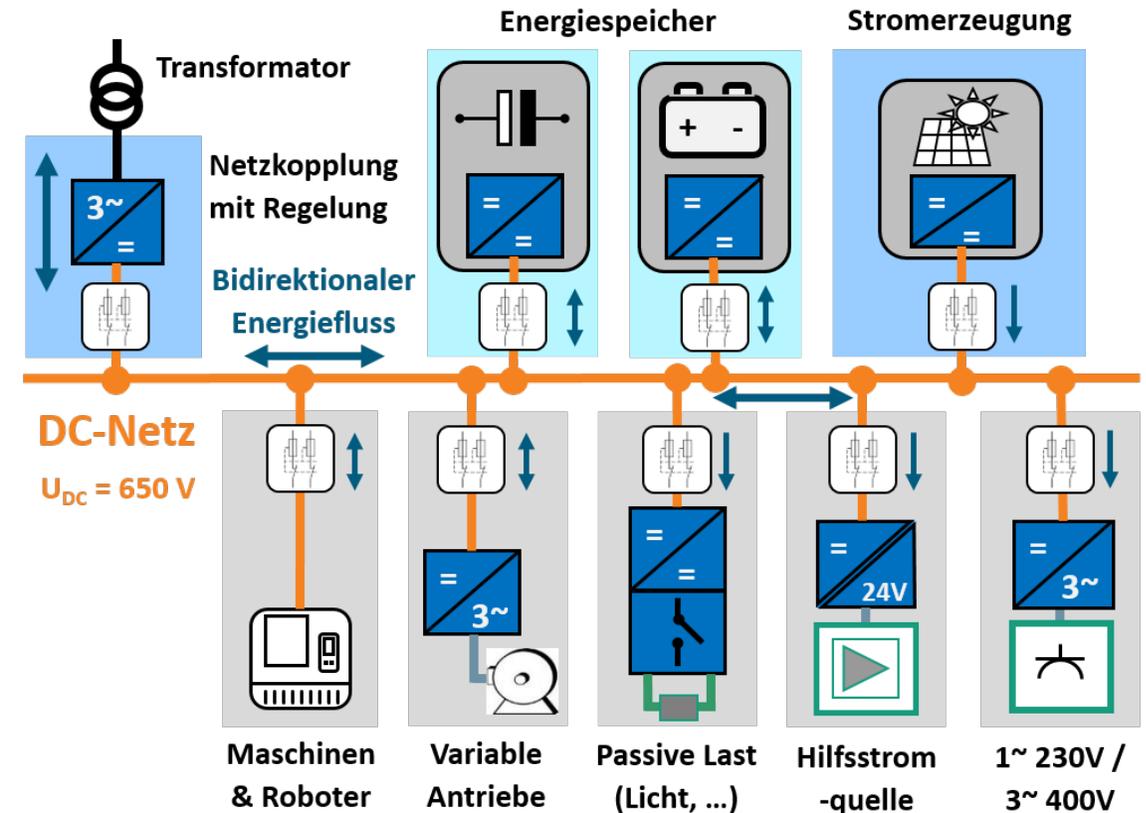
Industrielle Stromnetze

Konventionelles AC-Netz und DC-Mikronetz im Vergleich

Konventionelles AC-Netz



Industrielles DC-Mikronetz



Gleichstrom in der Industrie

Industrielles Stromnetz mit Gleichstrom (DC)

Systemgedanke für Energieversorgung von Produktionsbereichen

- Reduzierung von Übertragungsverlusten
- Reduzierung von Komponentenkosten (Filter, Summe einzelner dezentraler Geräte, dünnere Leitungen mit weniger Leitern)
- Konzentrierte, reduzierte und effiziente DC-Einspeisung
- Filterung von Netz-Störungen

Versorgung von Anlagen direkt aus dem DC-Netz

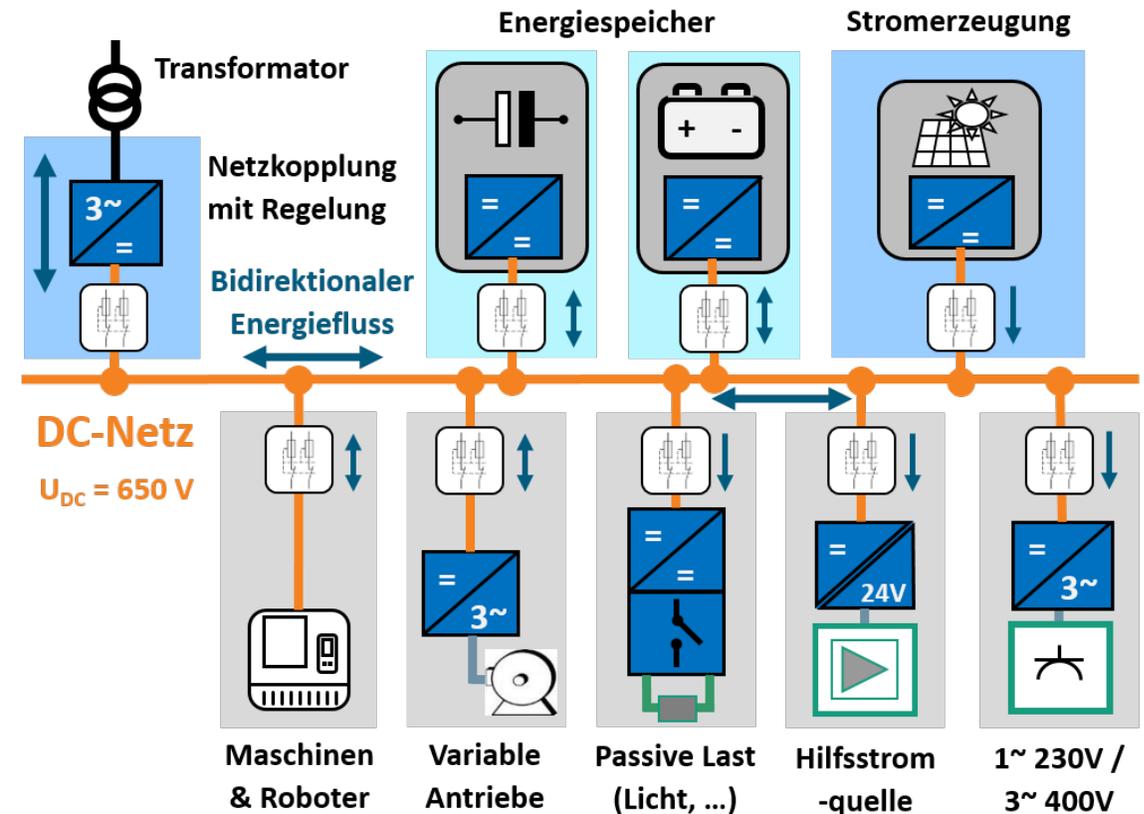
- Nutzung rekuperierter Energie

Einspeisung erzeugter Energie (z. B. aus PV) in das DC-Netz

- Reduzierung Wandlungsverluste
- Direkte Nutzung CO₂-freien Stroms

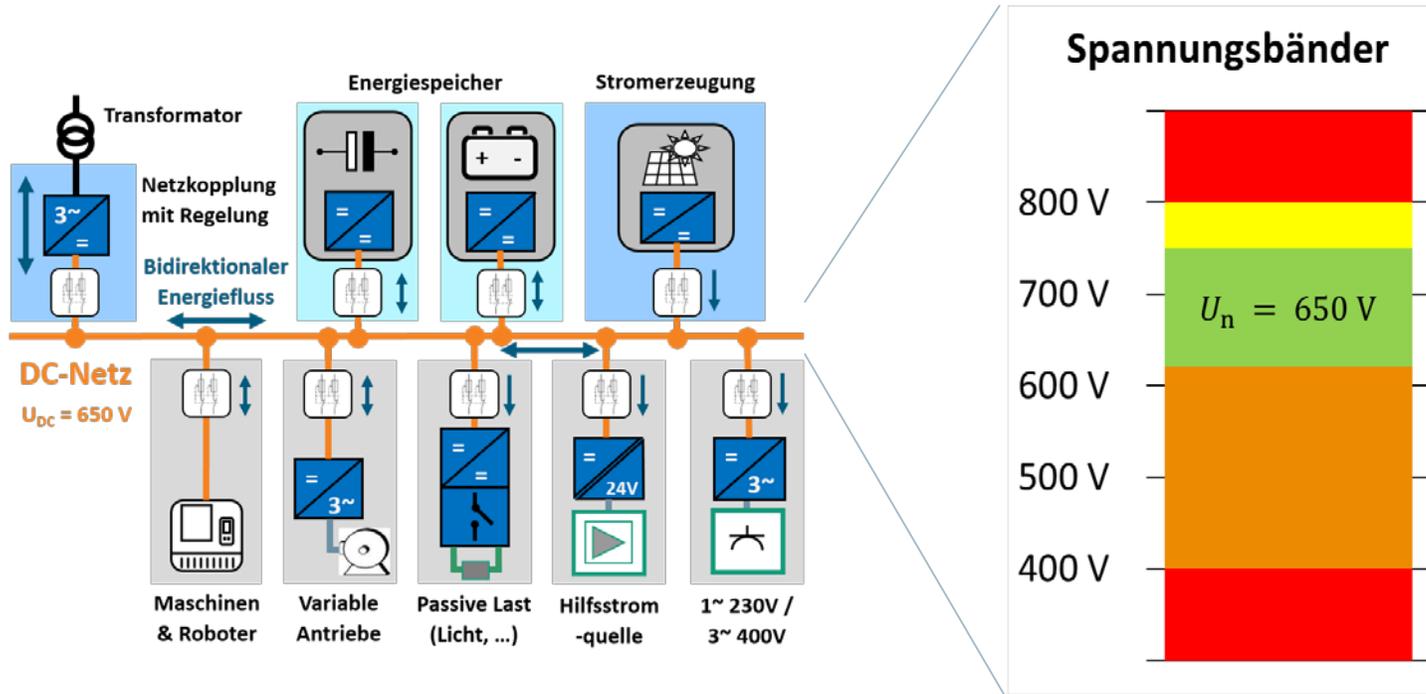
Intelligente, energieflexible Steuerung des DC-Netzes

- Vereinfachte, dezentrale Steuerung aktiver Teilnehmer (Energiespeichern, flexible Lasten, eMobility Laden, Versorgungspunkt zum AC-Netz)
 - Lastspitzenreduzierung, Energieflexibilität
 - Absicherung der Produktion vor Störungen
- Robuste Steuerung ohne zusätzliche Kommunikationsinfrastruktur



Gleichstrom in der Industrie

Keine feste Betriebsspannung, sondern einen Arbeitsbereich für höhere Flexibilität



Relevante Größen: Strom und Spannung

→ Keine Frequenz, keine Blindleistung

Die Spannung spiegelt die Leistungsbilanz

- **hohe DC-Spannung: Leistungsüberschuss**
→ Versorger speist zurück ins AC-Netz, Speicher laden, aktive Verbraucher erhöhen Leistung
- **niedrige DC-Spannung: Leistungsbedarf**
→ Versorger erhöht Einspeiseleistung ins DC-Netz, Speicher entladen, aktive Verbraucher reduzieren Leistung

Die Regelung gewährleistet die Stabilität und den sicheren Betrieb im grünen Bereich (620 ... 750V)



Gleichstrom in der Industrie

Regelungssystem im DC-Netz

Die Regelkennlinie ist entscheidend für die Stabilität des Netzes und sichert die Leistungsbilanz.

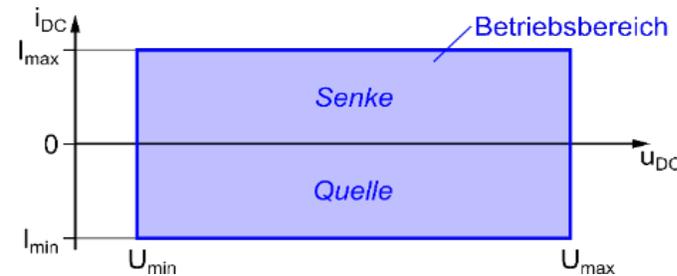
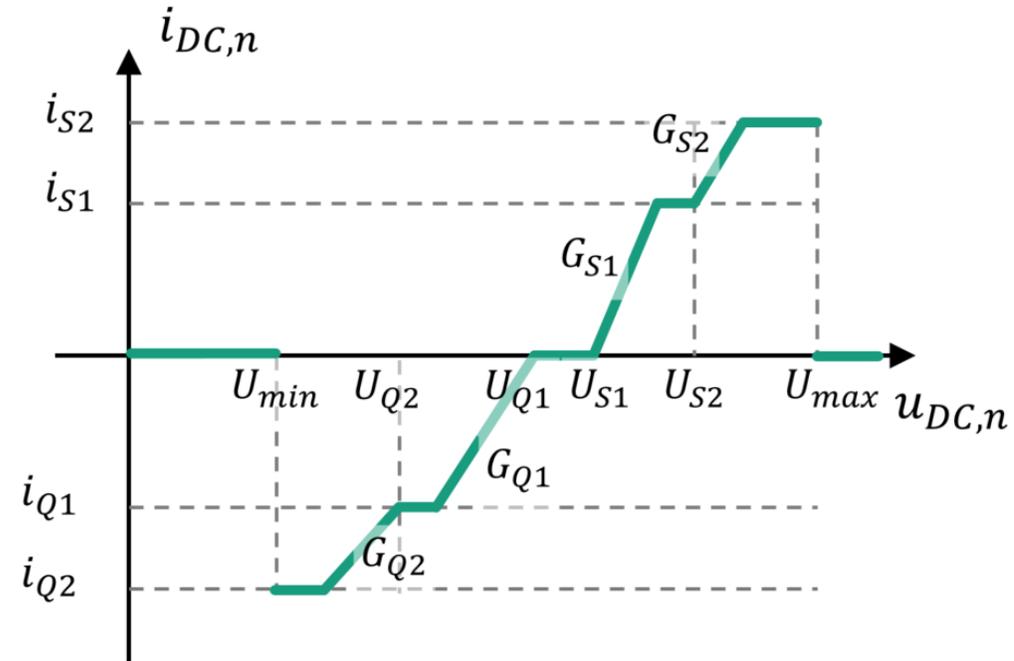
Die Kennlinienregelung ist eine Regelungsstrategie die nicht auf zentrale oder protokollbasierte Kommunikation angewiesen ist.

Lastaufteilung und Priorisierung der Quellen basiert auf der Regelkennlinienauslegung.

Regelkennlinie implementiert nur bei allen aktiven Teilnehmern

Mögliche aktive Geräte:

- Netzkoppelstelle
- Speichersysteme
- PV-Anlage
- Aktive (energieflexible) Verbraucher



Parameter

U_{min}

U_{Q2}

U_{Q1}

U_{S1}

U_{S2}

U_{max}

G_{Q2}

G_{Q1}

G_{S1}

G_{S2}

i_{Q2}

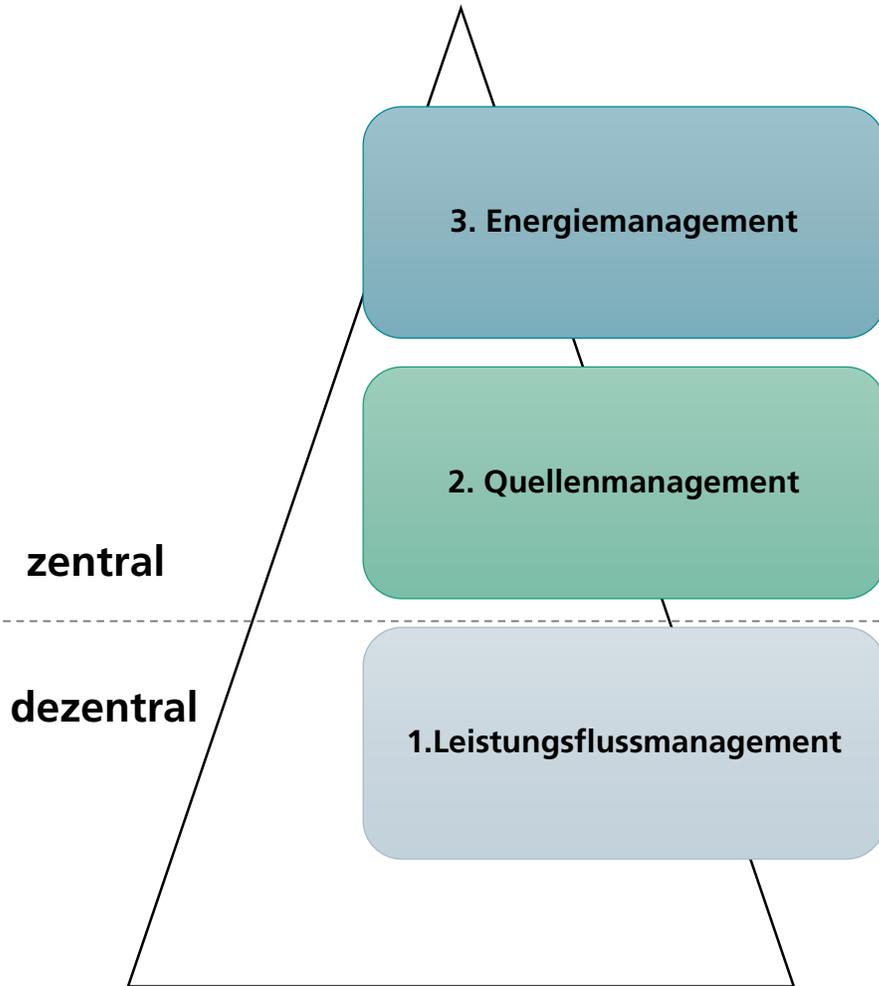
i_{Q1}

i_{S1}

i_{S2}

Gleichstrom in der Industrie

Hierarchisches Netzmanagement und Funktionen



Energiemanagement

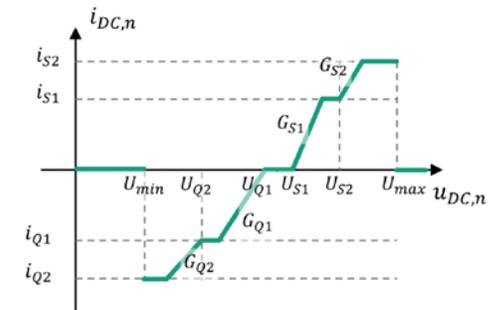
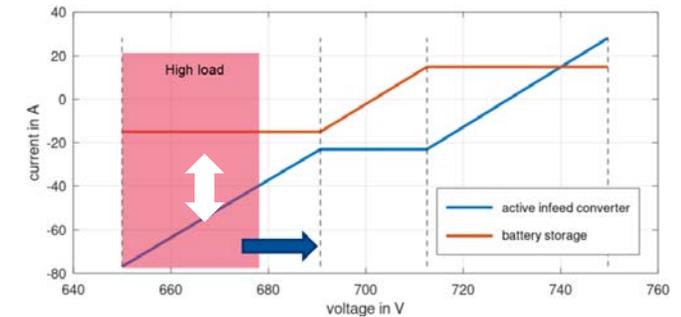
Sowohl technische als auch wirtschaftliche Ziele
Bilanzbereich gesamtes DC-Netz

Quellenmanagement

gezielte Beeinflussung von aktiven Geräten
Manipulieren von Regelkennlinien und
Betrieboptimierung

Leistungsflussmanagement

primäre Regelungskaskade über Regelkennlinien
Einhaltung des Spannungsbandes und Versorgung
der Netzgeräte



Quelle: Bianchini et al. 2021, DOI: 10.1109/ICDCM50975.2021.9504619, Bianchini et a. 2023, DOI: <https://doi.org/10.15488/13423>

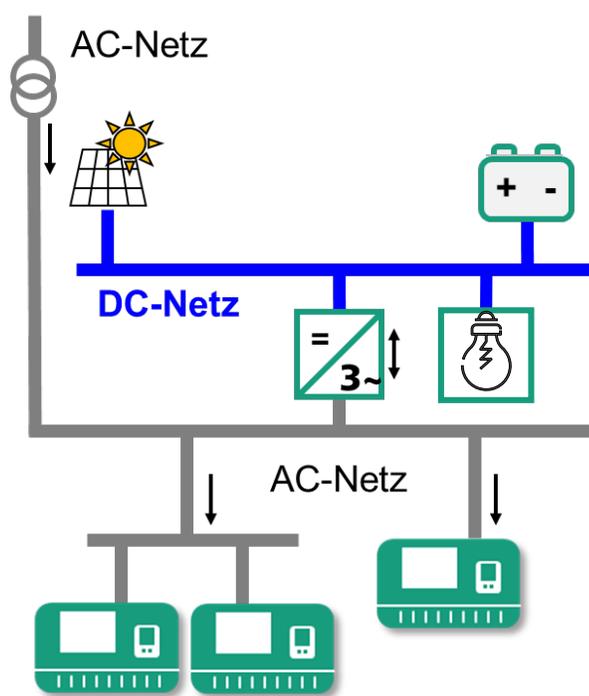
Unterwegs zur Gleichstromfabrik

Schrittweise Transformation der Energieversorgung

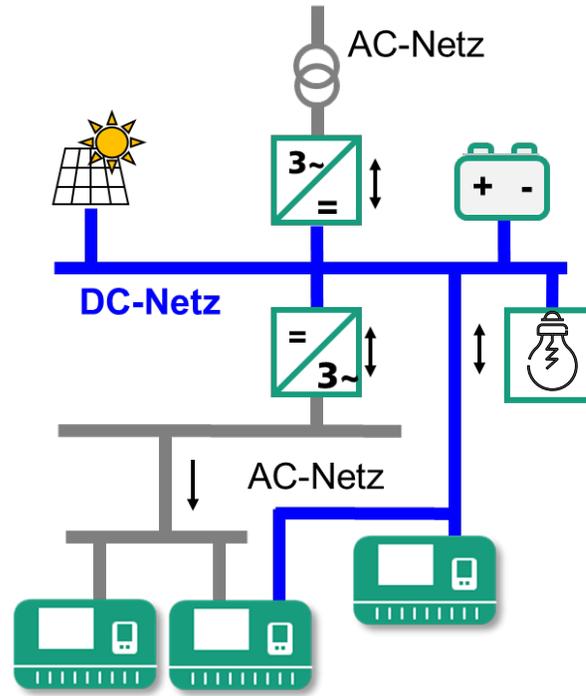


Unterwegs zur Gleichstromfabrik: Top-down

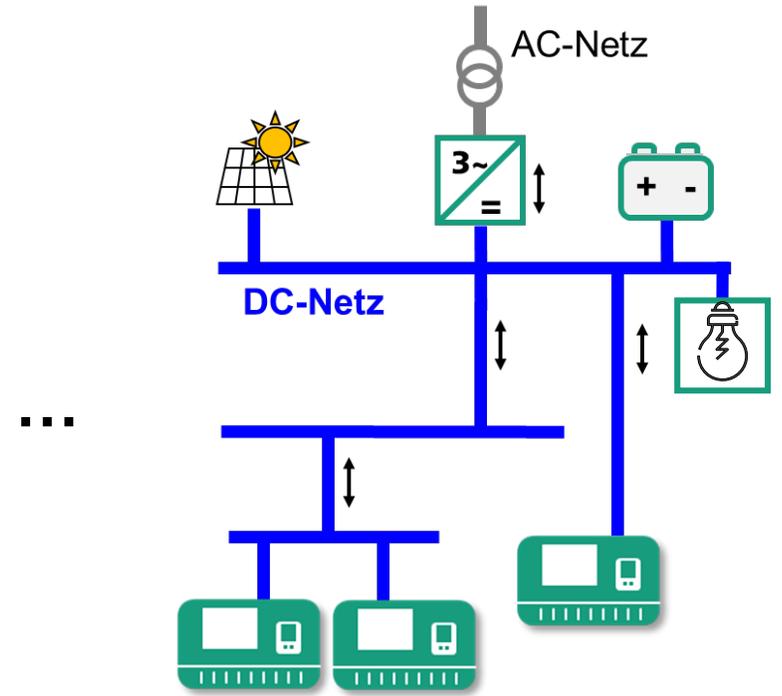
Transformation beginnt bei der Erzeugung und Speicherung



Phase 1: DC-Netz mit Erzeugern und Speichern



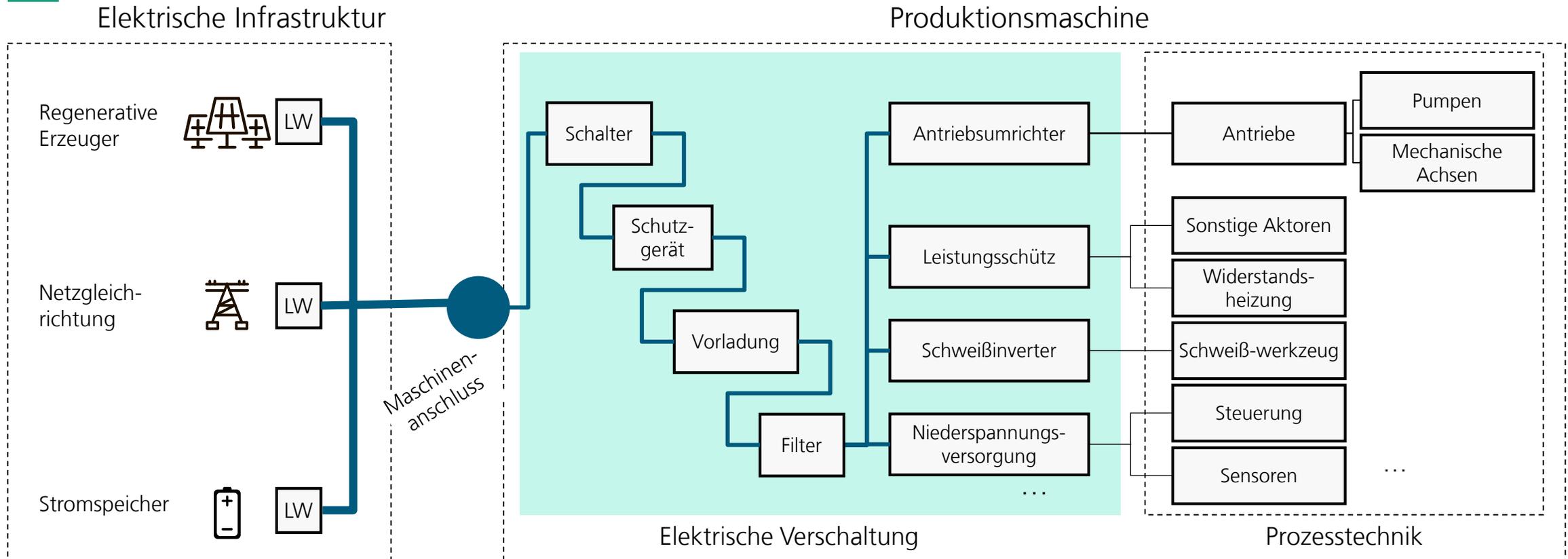
Phase 2: DC-Netz mit ersten Verbrauchern (nur DC oder hybrid)



Ziel: Gleichstromfabrik mit allen Teilnehmern am DC-Netz

Unterwegs zur Gleichstromfabrik: Umrüstung von Maschinen

Welche Anpassungen sind bei Maschinen- und Anlagen notwendig für den Betrieb mit Gleichstrom?



Die Prozesstechnik ist unabhängig von der Umrüstung auf Gleichstrombetrieb.

Die elektrische Verschaltung muss den Anforderungen einer Gleichstromversorgung entsprechen.



Leistungswandler, z. B. Gleichrichter oder Gleichspannungswandler

— Gleichstromnetz

DC-Transferzentrum Stuttgart

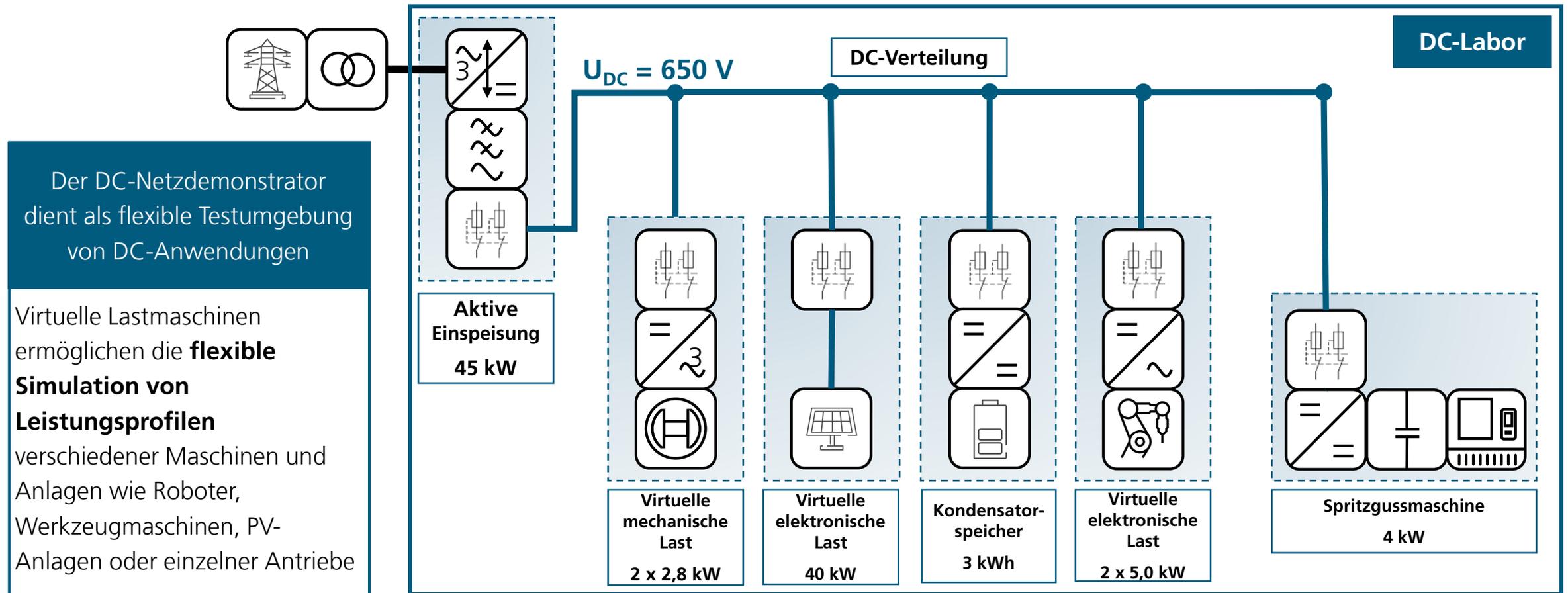
DC-Labor mit industriellem Gleichstrommikronetz als Testumgebung





DC-Transferzentrum Stuttgart

Schematischer Aufbau des DC-Labornetzes



Der DC-Netzdemonstrator dient als flexible Testumgebung von DC-Anwendungen

Virtuelle Lastmaschinen ermöglichen die **flexible Simulation von Leistungsprofilen** verschiedener Maschinen und Anlagen wie Roboter, Werkzeugmaschinen, PV-Anlagen oder einzelner Antriebe

DC-Labor @ Fraunhofer IPA

Testmöglichkeiten für Geräte und Interoperabilität in DC-Netzen

Hardware



- ✓ Einspeisung in DC-Netz über AIC mit 40 kW
- ✓ Netzemulation durch mehrere elektronische und mechanische Lastemulatoren
- ✓ Mess- und Überwachungseinheiten
- ✓ Stromschienensystem für flexible Erweiterungen

Software



- ✓ Intelligentes Energiemanagementsystem für die Netzregelung
- ✓ Industrielle Visualisierungsoberfläche für das Monitoring und die direkte Steuerung von DC-Netzgeräten

Transformation



- ✓ Umbau von AC-Maschinen in DC-Maschinen anhand von erprobtem Verfahren
- ✓ Umgerüstete DC-Spritzgussmaschine (Retrofit) mit 5 kW

The background image shows a row of industrial control cabinets in a factory setting. The cabinets are white with glass doors. On the top right of the first cabinet, there is a yellow triangular warning sign with a black lightning bolt symbol. Inside the cabinets, various electrical components like circuit breakers and wiring are visible. A large image of a welding process is mounted on the top left of the first cabinet. In the foreground, there is a metal mesh enclosure. The overall scene is brightly lit, typical of an industrial environment.

Anwendung von Gleichstromnetzen

Beispiele aus der Praxis

Stromsparen mit Gleichspannung

Umdenken bei der Energieversorgung auf Gleichspannung (DC) birgt neuen Effizienzschub

DC-Netz in der Anwendung



Gleichspannung – Game Changer in der elektrischen Versorgung

Anwendungsszenarien

- Integration von PV-Anlage, dem Logistikbereich, der Hallenlüftung, der Beleuchtung und dem Laden von Elektrofahrzeugen
- Automatisierte Roboterfertigungszellen
- Werkzeugmaschinen und Maschinencluster
- Spritzgußmaschinen

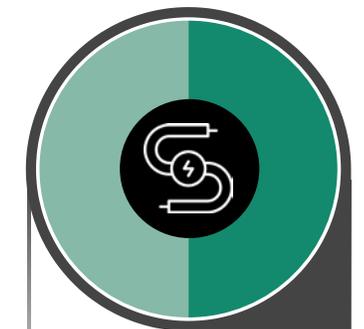
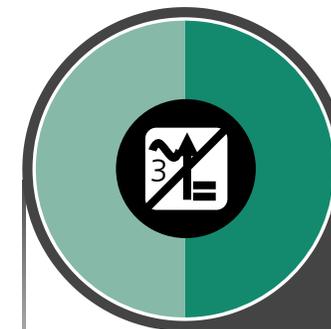
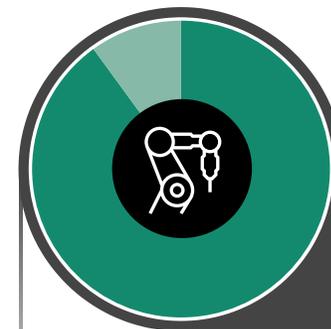
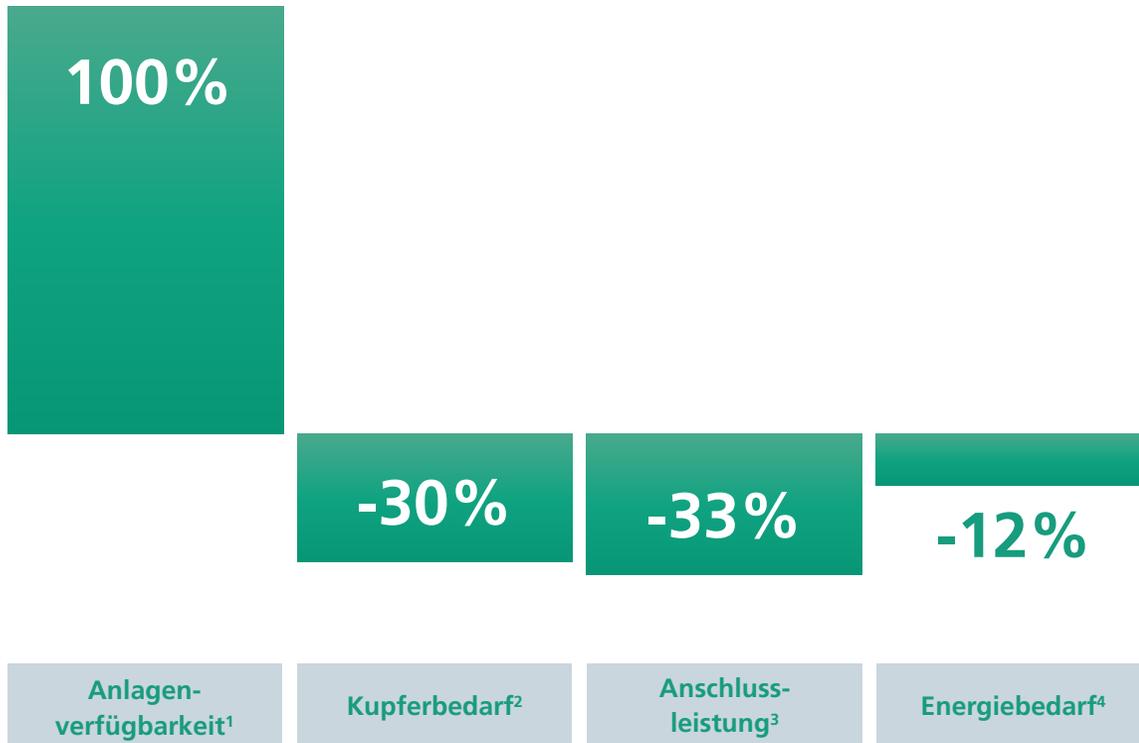
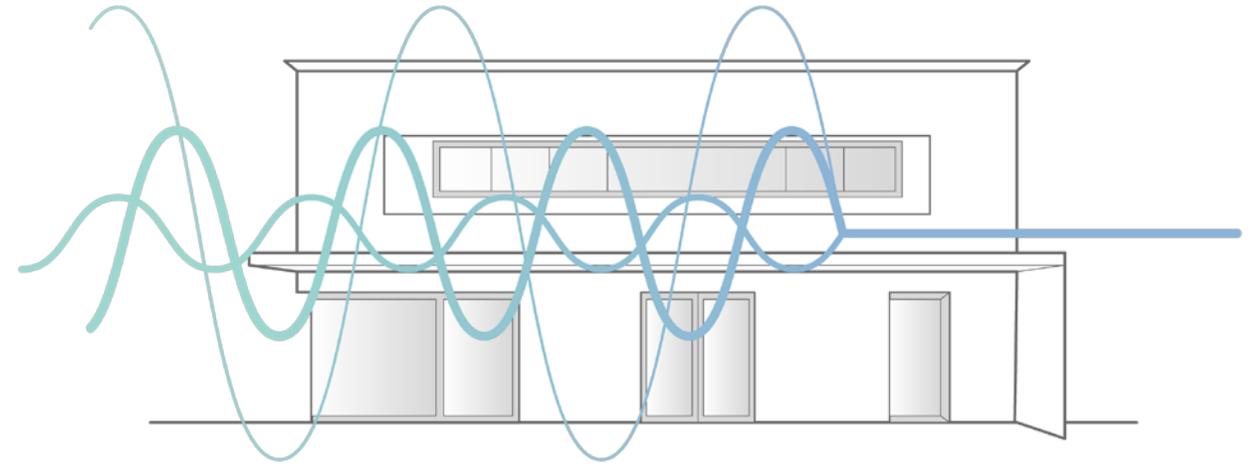
Potenzial

- Reduzierung der Verluste im Energieversorgungssystem um 60 %
- Energieeinsparung von bis zu 15 % bei Robotern
- 8-12 % Einsparung im Gesamtsystem möglich
- Einsparungen von ca. 30 % Kupfer in den Leitungen

Industrielle Gleichspannungsnetze

DC-Energieversorgung birgt neuen Effizienzschub

Erschließbare Potenziale



Quellen: ¹DC-Potentialstudie. (2015); ²T. Kuhlmann et al.: Potentials of an Industrial DC Supply. (2021); ³R.Laribi: Nutzenpotenziale von DC-Smart-Grids in der Industrie. (2019); ⁴T. Kuhlmann: Industrielle DC Netze. (2023)

Ausgewählte Projekterfahrungen mit Gleichstromnetzen

Fraunhofer IPA transformiert das Forschungswissen in die industrielle Anwendung

Konzeptplanung, Netzauslegung und Detailanalysen

- Konzeption des DC-Netzes für die *Câbleries Lapp Sarl* im französischen Forbach
- Dimensionierung von PV-Anlagen mit DC-Netzanbindung und Wirtschaftlichkeitsanalyse
- Transformationspfad für den Auf- und Ausbau der DC-Infrastruktur



Potenzial- und Kostenanalyse im Automobilbau

- Analyse bei Vorort Begehungen und Absicherung mit Messungen im AC-System
- Grobkonzepte für DC und hybride AC-DC Versorgung von Produktionssystemen
- Potenzial und Wirtschaftlichkeitsbewertung

» Die DC-Technologie hat das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Energieeinsparung in der Produktion zu leisten und Kosten zu senken.

Die Arbeiten des Fraunhofer IPA zeigen die Potenziale transparent auf und geben Empfehlungen für nächste Schritte.



Michael Schreck
Anlagen-, Steuerungstechnik, Strukturplanung BMW AG

Digitaler Zwilling des DC-Versorgungssystem

- Charakterisierung und Modellierung der Geräte und Teilnehmer im DC-Netz
- Simulation von unterschiedlichen Lastzuständen, Betriebszuständen und Fehlerfällen
- Analyse der Stabilität des System
- Optimierung der DC-Netzregelung und Absicherung der Stabilität

Planungs- und Gestaltungsprozess DC-Netz

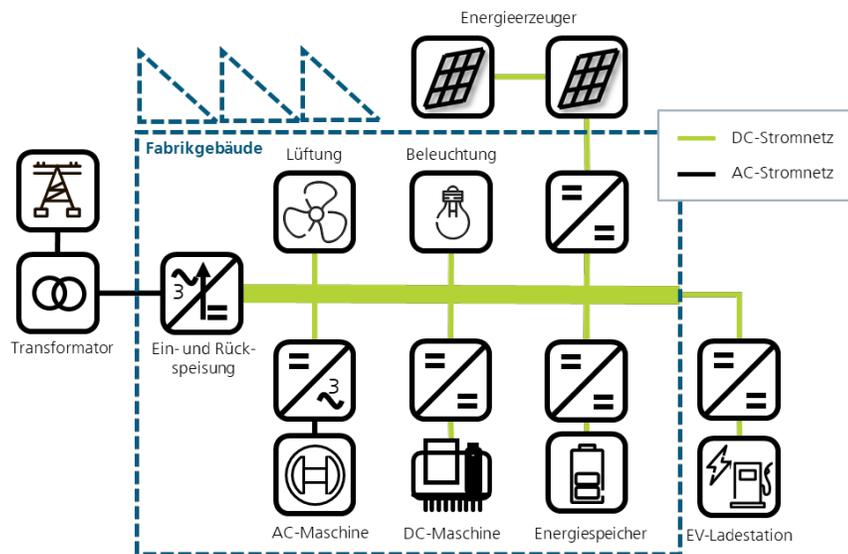
- Exemplarisches Durchlaufen zweier Planungen (Netz & Maschine) mit Planungsfachexperten
- Identifizieren der Veränderungen gegenüber herkömmlichen AC-Netze
- Beschreiben der notwendigen Planungsaufgaben für ein Planungswerkzeug



Energie- und Ressourceneffizienz in der Lackiererei - S-TEC Exploring Project

S-TEC Zentrum für klimaneutrale Produktion und ganzheitliche Bilanzierung

DC-Potenzialanalyse in der Lackiertechnik mit F. STOZ



Gefördert von:



Ausgangssituation

In Lackieranlagen werden viele Prozesse durch Wechselstrom versorgt (Lüftung, Heizung, Trocknung usw.).

Gleichstromversorgung reduziert Energiekosten und ist ressourceneffizient. Installation oder Erweiterung von PV-Anlagen und Integration von Energiespeichern als Chance für den Einsatz von Gleichstrom.

Lösung

Berechnungsmodell zur quantitativen Bewertung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit der Versorgung durch Gleichstrom wird entwickelt.

Am Beispiel der Lüftungsanlagen wird ein Versorgungskonzept mit Gleichstrom erstellt, und das techno-ökonomische und ökologische Potenzial wird ermittelt.

Nutzen

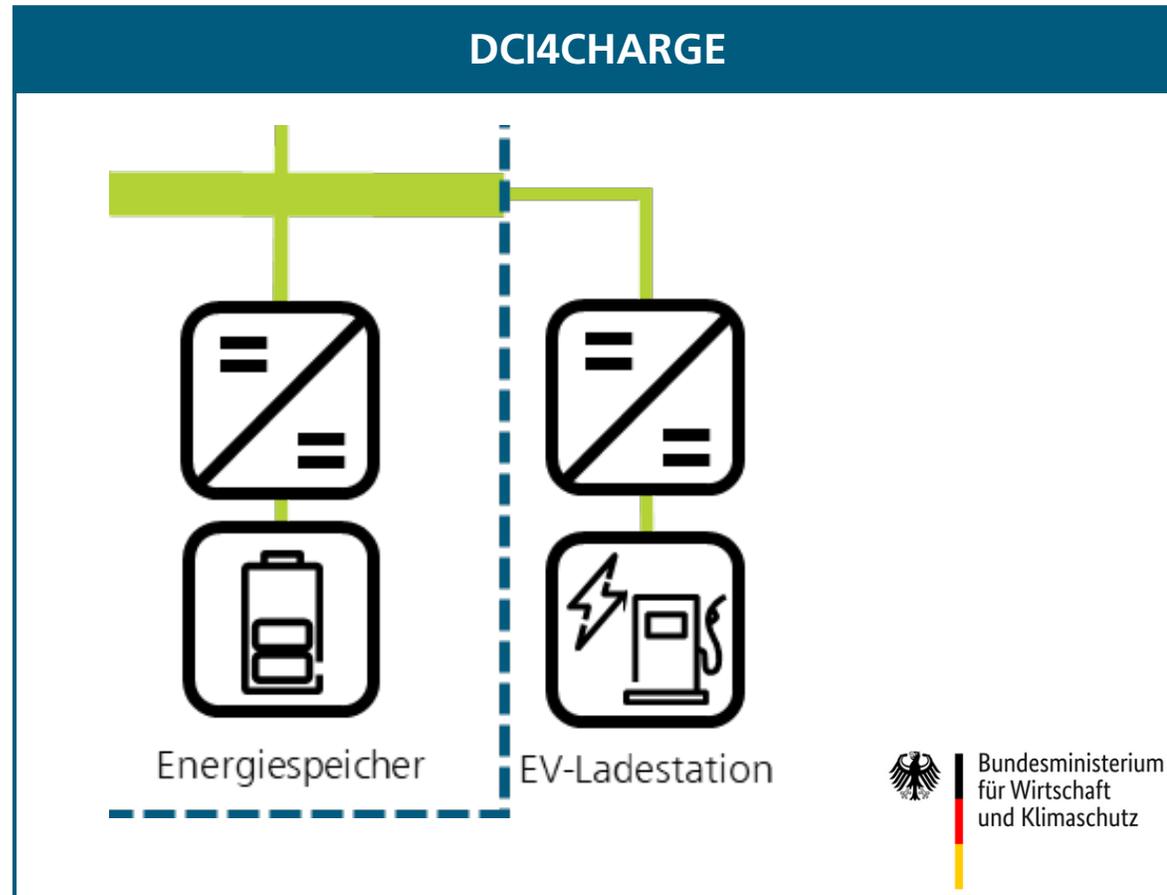
Potenzial für den spezifischen Anwendungsfall wird ermittelt.

Vorteile der Versorgung durch Gleichstrom für weitere Lasten in Lackieranlagen werden bewertet.

Kickoff am 07.12.2023

Integration von Ladesäulen in das DC-Netz – DCI4CHARGE

Forschungsprojekt mit Ambibox, Eaton, Weidmüller, TH OWL und weitere Partner.



Ausgangssituation

Im Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE ist ein Konzept für industrielle DC-Netze entstanden. Die Grundkonzepte sind im Systemkonzept offen zugänglich, jedoch fehlen noch einzelne Aspekte wie die Integration von Elektroladestationen.

Lösung

Design von Umrichtern zur direkten Anbindung an ein DC-Netz. Die Elektrofahrzeuge können anschließend als virtuelle Batterie genutzt werden. Dazu wird die Primär- bis Tertiärregelung ausgelegt.

Nutzen

Die Potenziale von DC-Netzen werden erweitert indem Elektrofahrzeuge effizienter geladen werden können. So spart die Industrie beim Laden jedes Fahrzeugs. Weiterhin werden die Elektrofahrzeuge als virtuelle Batterie fungieren, was eine flexible Nutzung der gespeicherten Energie ermöglicht.

Am 01.08.2023 gestartet.

Industrielle Mikronetze und Energiespeicher

Fachliche Begleitung unserer Kunden von der Idee bis zur Umsetzung

Potenzialanalyse

- Identifizieren rentabler Investitionen für eine effizientere Stromversorgung
- Einführungsworkshops
- Messtechnische Quantifizierung

Betriebsoptimierung

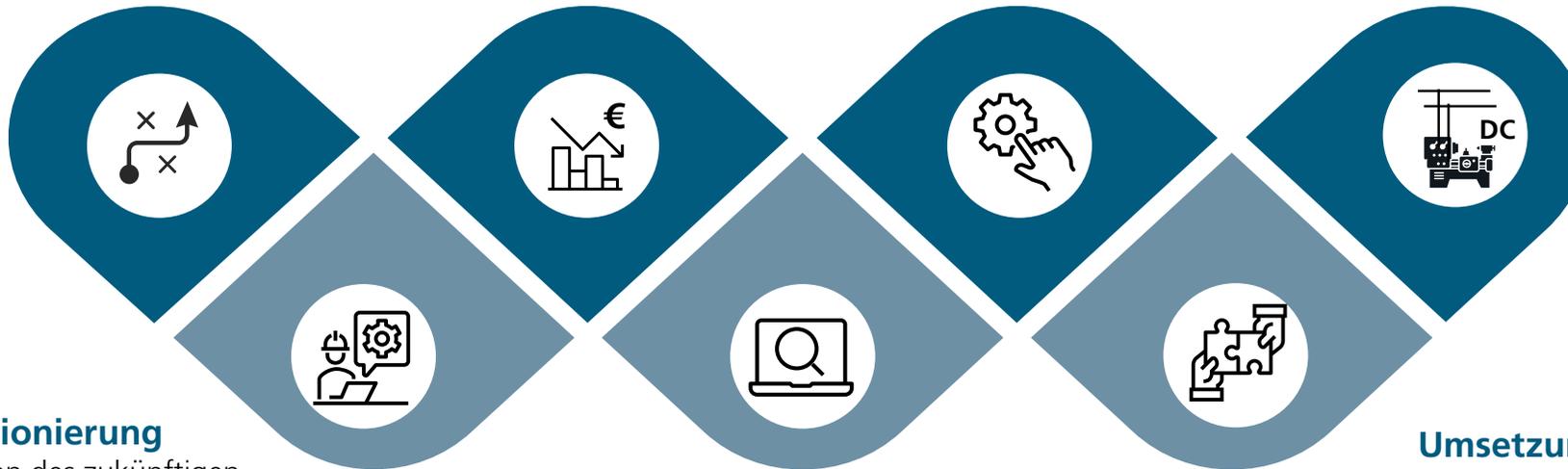
- Steuerungs- und Regelungsauslegung
- Energiespeichern und regenerativen Energien (Energieflexibilität)
- Energetische Simulationen

Tests im DC-Labor

- Abbildung Versorgungssystem in Laborumgebung
- Reale Erprobung von Regelstrategien
- Prüfung des Geräteverhaltens

DC-Umrüstung Maschinen

- Anforderungsanalyse
- Umrüstungskonzept
- Marktrecherche
- Begleitung bis zur Energieeffizienzmessungen



Konzeptionierung

- Definition des zukünftigen Versorgungssystem
- Marktrecherche
- Transformationsstrategien

Modellierung und Simulation

- Elektrische Modelle für Komponenten
- Untersuchung spezifischen Betriebszuständen (Stabilität, Selektivität, Inselbetrieb)

Umsetzung und Betrieb

- Elektrische Simulationen (digitaler Zwilling)
- Inbetriebnahme der Regelung
- Messtechnische Unterstützung
- Energieeffizienzmessungen

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit

Kontakt



**Dr.-Ing.
Timm Kuhlmann**

Abteilungsleiter
Industrielle Energiesysteme
Tel. +49 711 970-1903
tim.kuhlmann@ipa.fraunhofer.de

Fraunhofer IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA