

Session 2

Gleichstrom ist die Zukunft – Erschließung von Energieeffizienzpotenzialen in der Produktion und neue Geschäftsmodelle durch innovative Gleichstromnetze

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der FAU Erlangen-Nürnberg



FAPS

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr. rer. nat. Jens Fürst
Prof. Dr.-Ing. Florian Risch

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Gleichstrom ist die Zukunft!

Energieeffizienzpotenzialen in der Produktion und neue
Geschäftsmodelle durch innovative Gleichstromnetze

Benedikt Wolessak (M.Sc.)
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Agenda

- 1 Vorteile von Gleichstromnetzen**
- 2 Technische Grundlagen**
- 3 Forschung am FAPS**
- 4 Kooperationsmöglichkeiten**

Agenda

- 1 Vorteile von Gleichstromnetzen**
- 2 Technische Grundlagen**
- 3 Forschung am FAPS**
- 4 Kooperationsmöglichkeiten**

Der Stromkrieg zwischen Westinghouse, Tesla und Edison in den 1890er-Jahren führte zur Entstehung des heutigen Wechselstromnetzes.



„Stromkrieg“

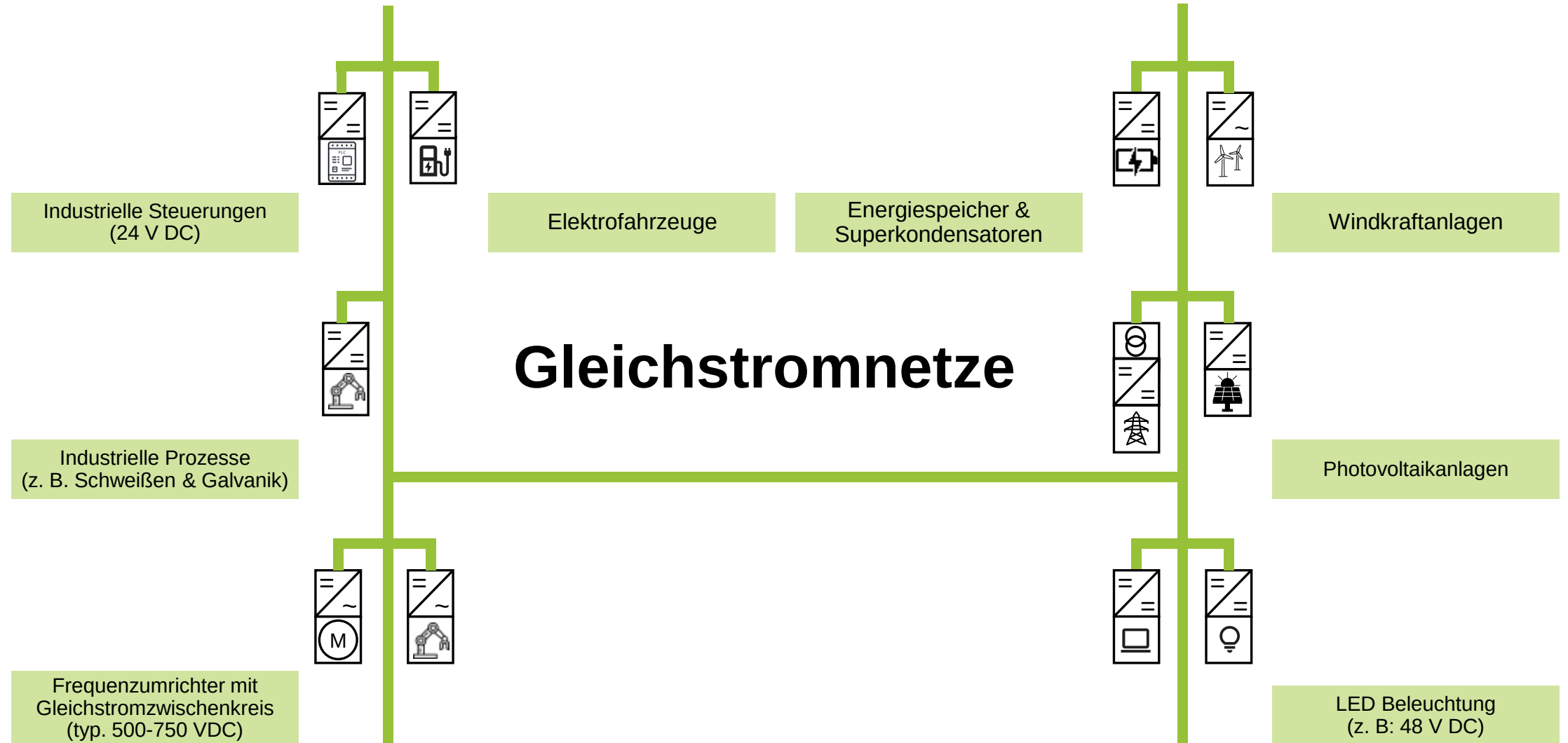
Heute: neue Herausforderungen für das Stromnetz



Das heutige Stromnetz verteilt Wechselstrom, obwohl nahe zu alle Netzteilnehmer intern mit Gleichstrom arbeiten.



Das heutige Stromnetz verteilt Wechselstrom, obwohl nahe zu alle Netzteilnehmer intern mit Gleichstrom arbeiten.



Die Vorteile eines DC-Netzes im Vergleich zu einem konventionellen AC- Netz sind vielfältig und können für Unternehmen weitreichenden Nutzen bringen.

Energieeffizienz

- Effizientere DC-DC-Wandler (bis zu 99% Wirkungsgrad)
- Energieersparnis von 10-15 %



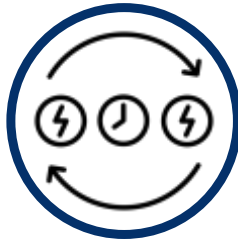
Materialeffizienz

- Kleinere Komponenten
- Kupferersparnis bis 50 %



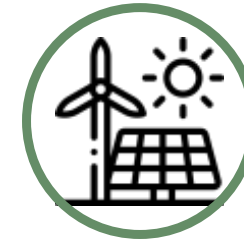
Peak-Shaving

- Reduktion von Stromspitzen um bis zu 80%



Erneuerbare Energien

- Einfache Integration von Erneuerbaren Energien wie PV-Anlagen



Bremsenergie Nutzen

- Rückgewinnung der Bremsenergie von 12-25%



Keine Blindleistung

- Keine Blindleistungs-kompensationsanlagen notwendig



Netzstabilität

- Erhöhung der Autarkie und Abhängigkeit zum öffentlichen Netz



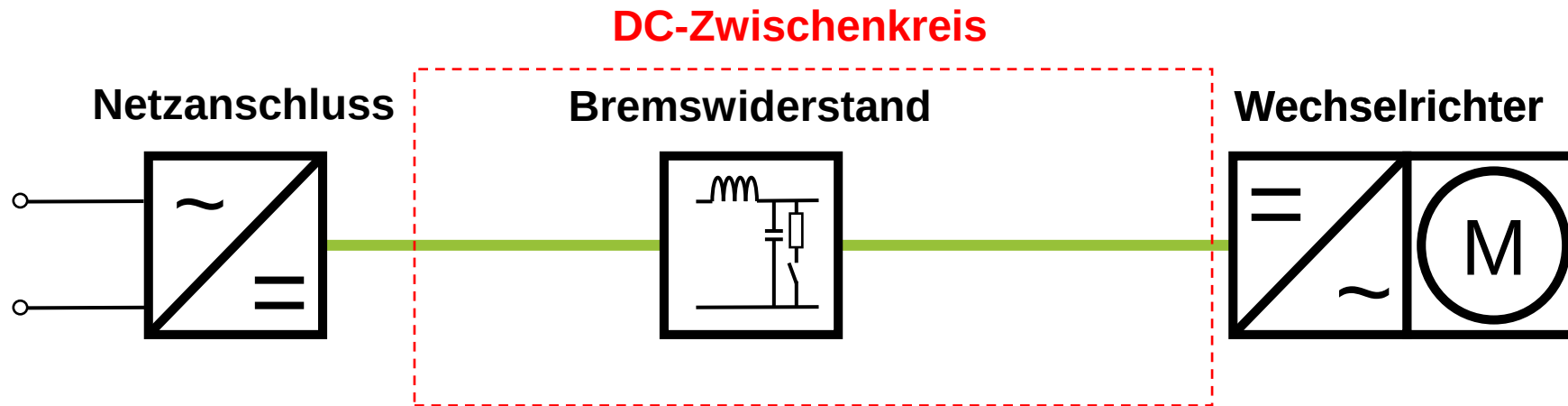
Nachhaltigkeit

- Resultierende CO₂ Ersparnis

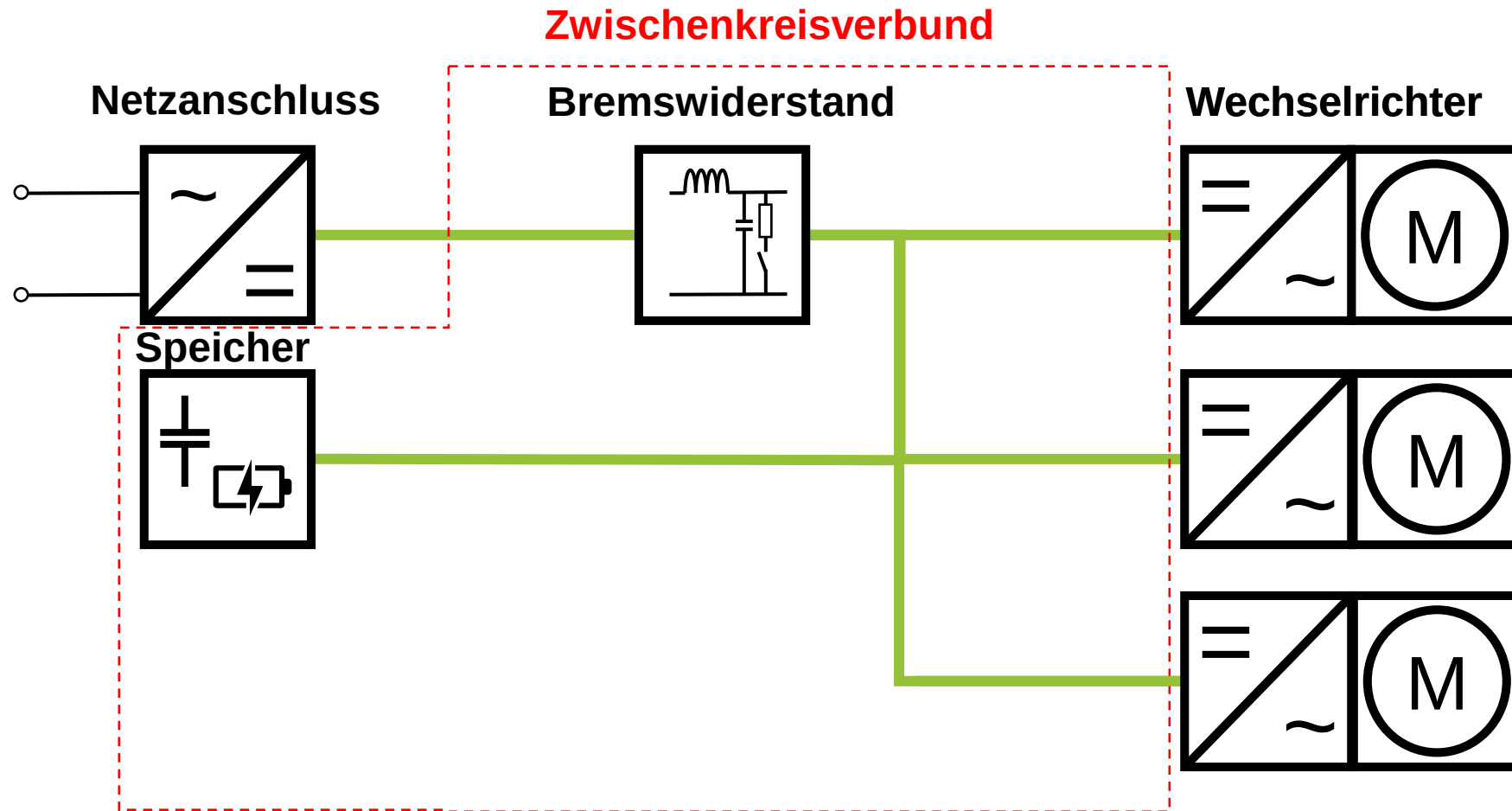
Agenda

- 1 Vorteile von Gleichstromnetzen
- 2 Technische Grundlagen
- 3 Forschung am FAPS
- 4 Kooperationsmöglichkeiten

Industrielle Gleichstromnetze bauen auf der Architektur des DC-Zwischenkreisverbund bestehend aus mehreren Frequenzumrichtern auf.

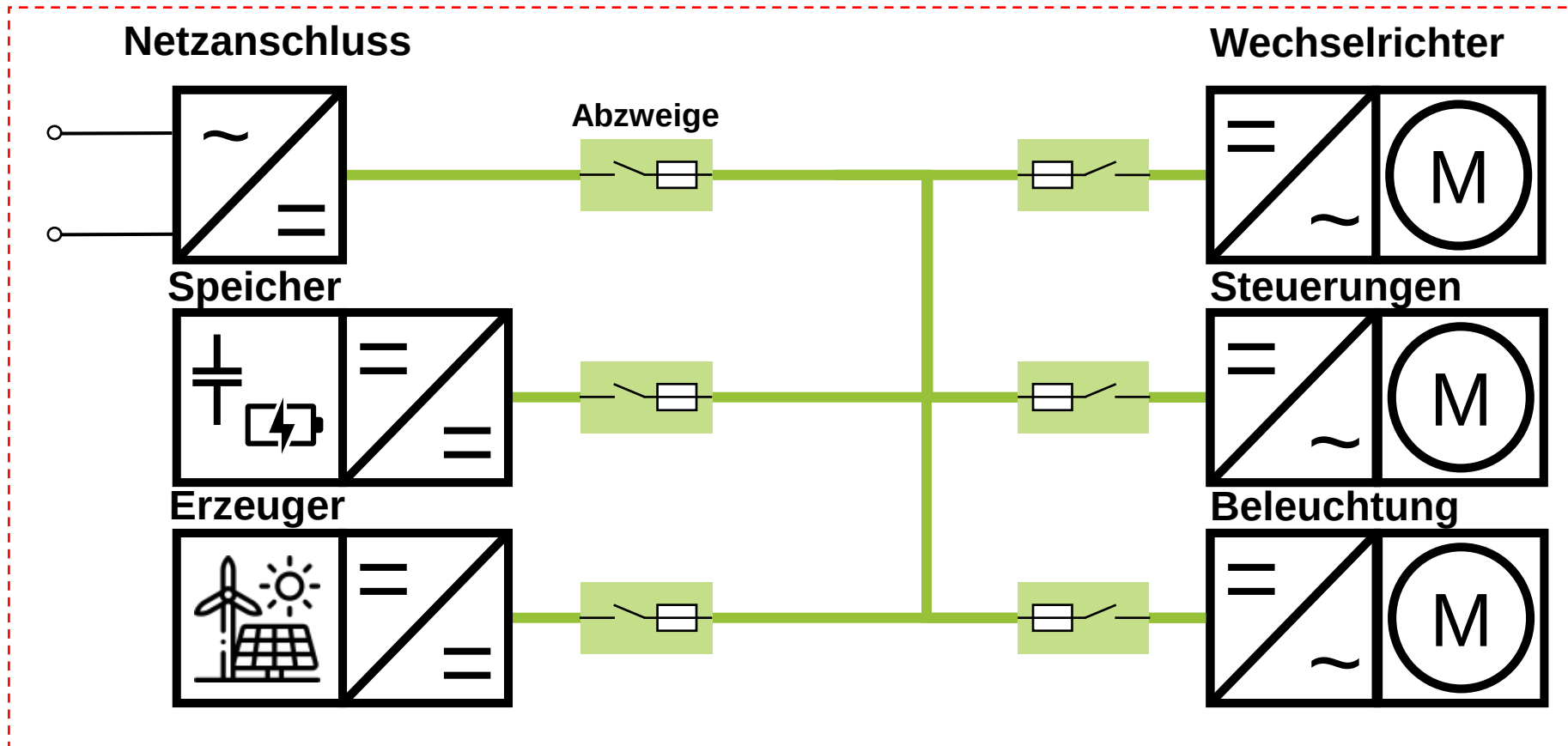


Industrielle Gleichstromnetze bauen auf der Architektur des DC-Zwischenkreisverbund bestehend aus mehreren Frequenzumrichtern auf.

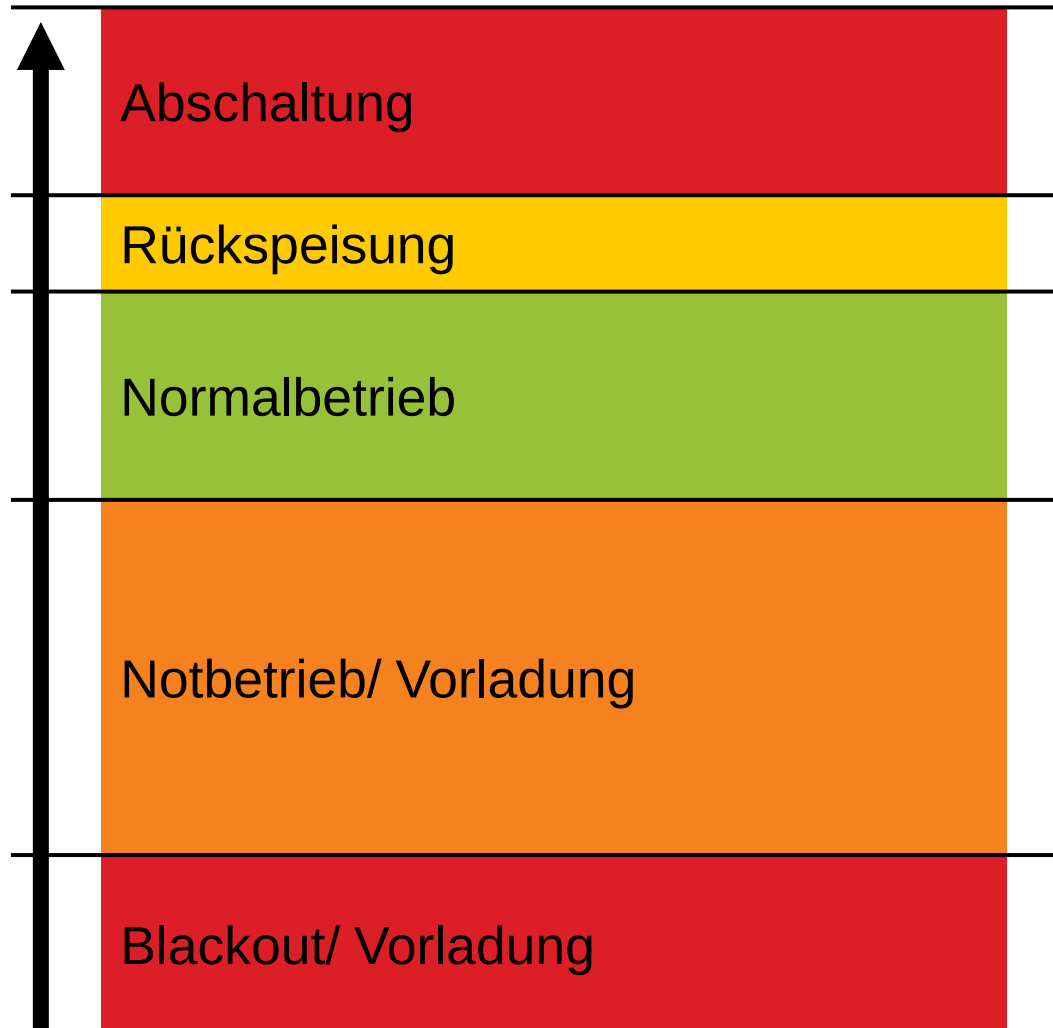


Industrielle Gleichstromnetze bauen auf der Architektur des DC-Zwischenkreisverbund bestehend aus mehreren Frequenzumrichtern auf.

Industrielles DC-Netz



DC-Netze arbeiten zur Sicherstellung der Lastbalance mit Spannungsbändern und Spannungskurven (Droop Curves).

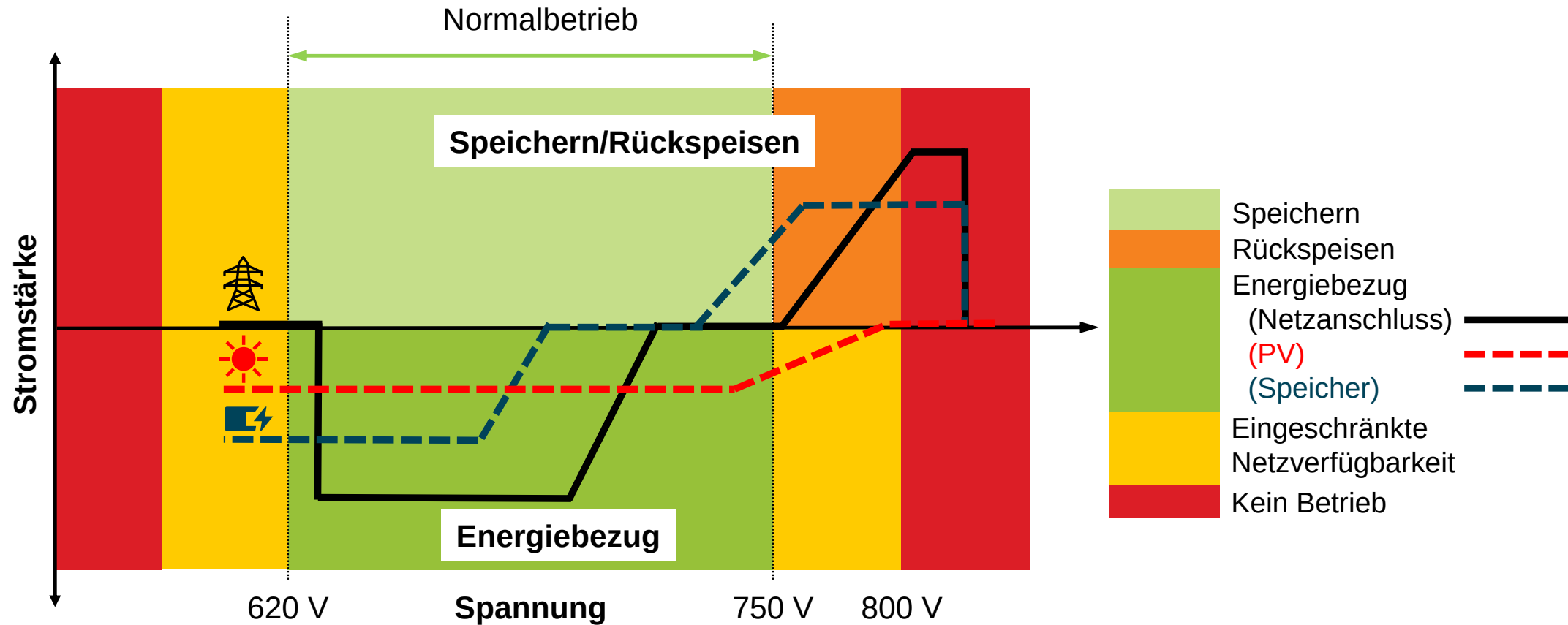


Spannungsbänder im ODCA Systemkonzept

- DC-Netze arbeiten mit Spannungsbändern
- Die Spannung spiegelt die Lastbalance wieder
- Unterschied zu AC mit Regelung über die Frequenz (50 Hz)
- 620 - 750 V für 3-Phasen 400 V AC
- Erzeugung < Last → Spannung fällt
- Erzeugung > Last → Spannung steigt

Quelle: VDE-SPEC-90037

Spannungskurven (Droop Curves) ermöglichen die Netzregelung ohne zusätzlichen Kommunikationsweg.

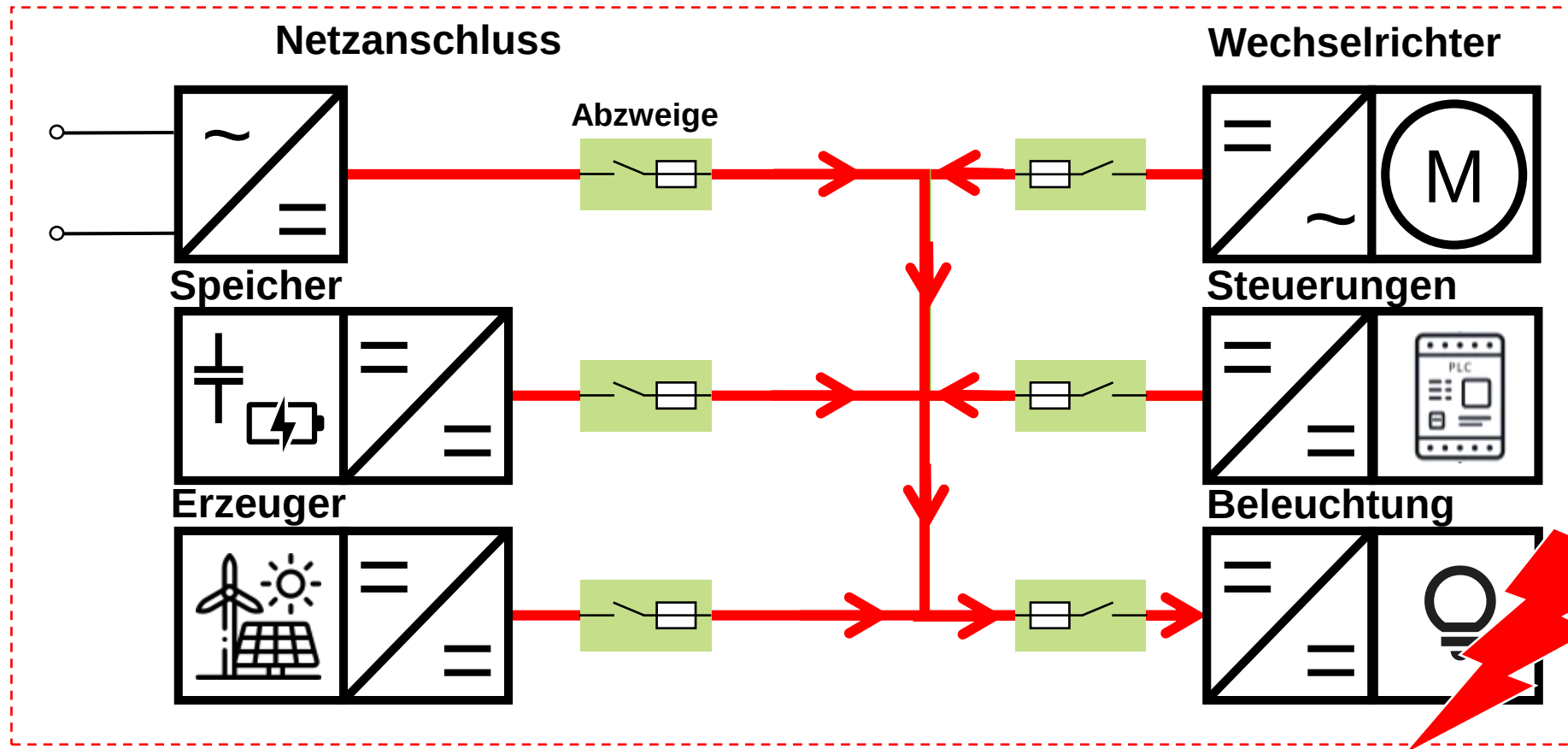


Lastmanagement mit Spannungskurven (Droop Curves): $i = f(u)$

Quelle: VDE-SPEC-90037

Die selektive Abschaltung von Netzsektoren im Fehlerfall ist ein zentrales Ziel in der Entwicklung industrieller Gleichstromnetze.

Industrielles DC-Netz



Für Gleichstromnetze eignen sich Mechanische-, Halbleiter- und Schmelzsicherungen mit spezifischen Vor- und Nachteilen.

	Mechanische Sicherung	Elektronischer Schutzschalter	Schmelzsicherung
Geschwindigkeit	- -	++	0
Selektivität	- -	++	0
Verlustleistung	++	- -	+
Kosten	++	-	++
Wartungsaufwand	0	++	- -

Bildquellen: <https://sieportal.siemens.com/de-at/products-services/detail/5SJ6516-7KS>; <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-praesentiert-wegweisendes-portfolio-fuer-das-zeitalter-der-gleichstrom>; https://www.reichelt.de/de/de/shop/produkt/nh-sicherungseinsatz_nh000_in_63_a_gg_un_ac_500_v_un_dc_-406610

Halbleiterbasierte Schutzorgane ermöglichen neben einer schnellen und selektiven Abschaltung im Fehlerfall die Lichtbogenerkennung und Energiemessung.

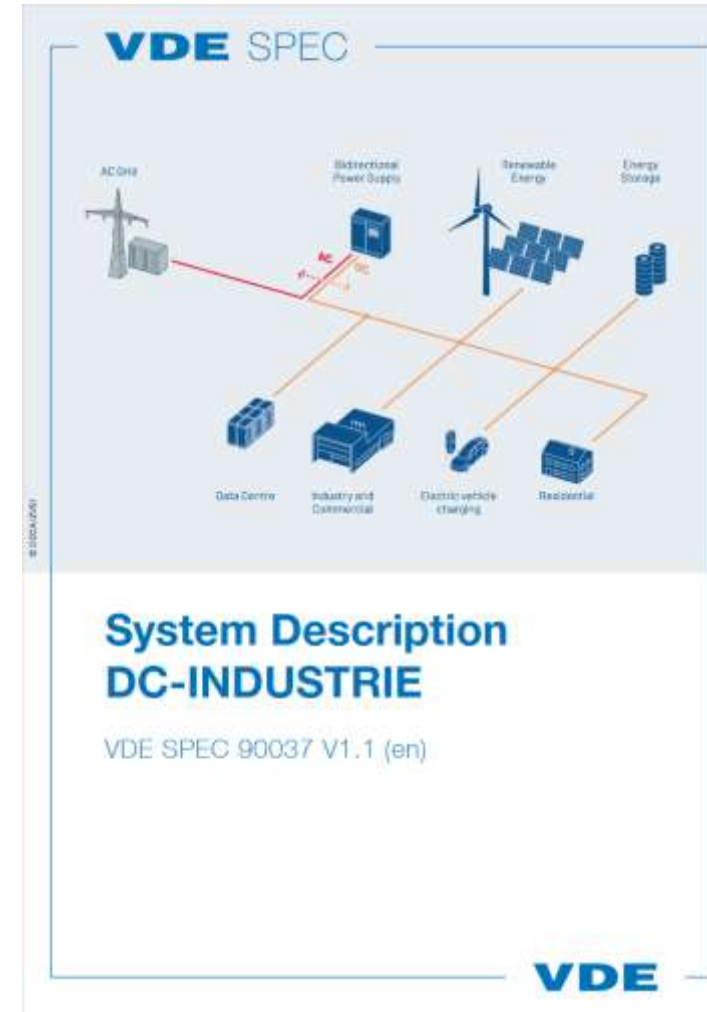
Vorteile Solid State Circuit Breakers (SSCB)

- Sehr schnelle Abschaltung durch Halbleiter $< 100 \mu\text{s}$ ermöglicht den Weiterbetrieb des fehlerfreien Systems
- Auslösekurve kann richtungsabhängig einprogrammiert werden
- Netzvorladung und Energiemessung integriert
- Kurzschlussenergie: $< 1 \%$ einer Mechanischen Sicherung
- Höhere Kosten und Energieverluste im Vergleich zu mechanischen Schutzorganen

Quelle: VDE-SPEC-90037

Die Standardisierung wird von verschiedenen untereinander vernetzten Initiativen vorangetrieben und sichert die Interoperabilität.

ODCA 
direct current by zvei



Bildquellen: <https://odca.zvei.org/>, <https://currentos.org/>

Agenda

- 1 Vorteile von Gleichstromnetzen
- 2 Technische Grundlagen
- 3 Forschung am FAPS
- 4 Kooperationsmöglichkeiten

Am Lehrstuhl FAPS forschen vier wissenschaftliche Mitarbeiter an Gleichstromnetzen.



Benedikt Wolesak M.Sc.

Benedikt.Wolesak@faps.fau.de



Martin Barth M.Eng.

Martin.Barth@faps.fau.de



Benjamin Gutwald M.Sc.

Benjamin.Gutwald@faps.fau.de



Luca Werthmann M.Sc.

Luca.Werthmann@faps.fau.de



Prof. Dr. rer. nat. Jens Fürst

jens.fuerst@faps.fau.de



Alexander Schneider M.Sc.

alexander.schneider@faps.fau.de



Tobias Reichenstein M.Sc.

tobias.reichenstein@faps.fau.de



Jan Krüger M.Sc.

jan.krueger@faps.fau.de

Der DC-Demonstrator am Standort Erlangen dient der prototypischen Erprobung von Gleichstromnetzen.

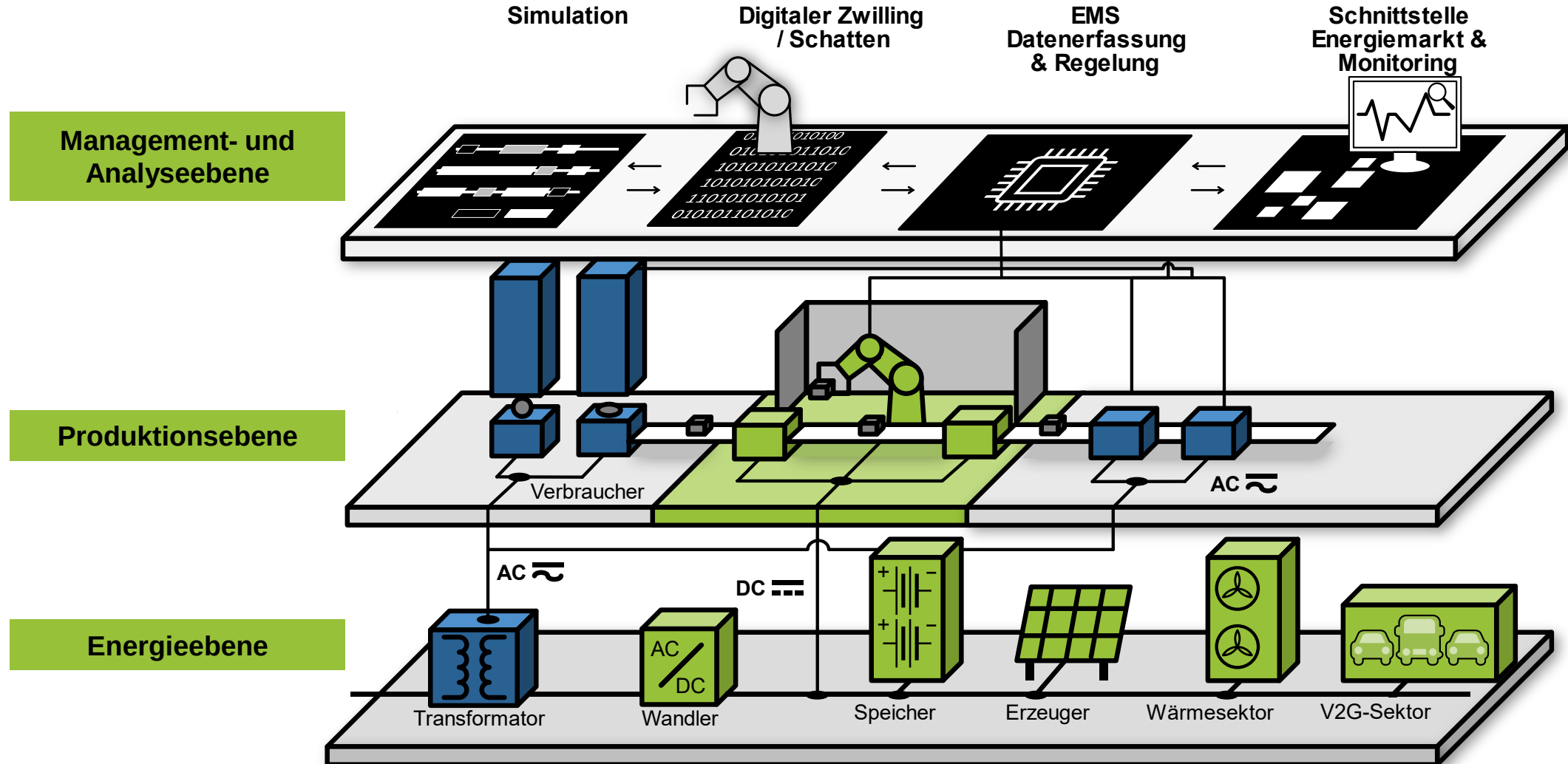
DC- Demonstrator FAPS Erlangen



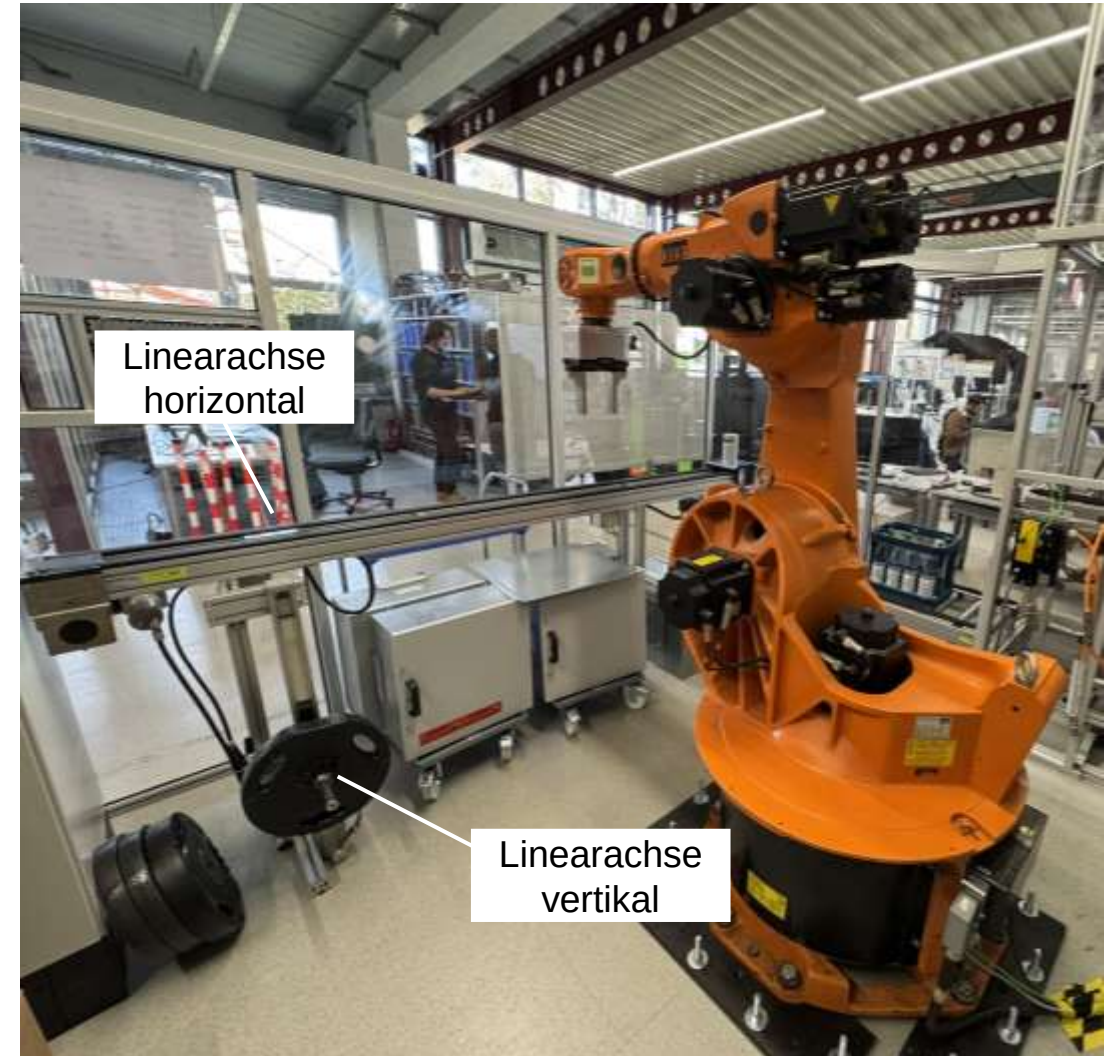
Eckdaten

- Parallelbetrieb eines unipolaren DC-TN und eines hochverfügbaren bipolaren DC-IT-Netz mit Fehlerlokalisierungssystem
- Über 10 Schaltschränke mit DC-Technik und den neusten Prototypen der Industrie
- Modulares DC-Stromschienensystem inkl. Abgangskästen (DC-Smart Grid Boxes)
- Betrieb von industriellen Verbrauchern und der technischen Gebäudeausrüstung sowie Speichern und regenerativen Erzeugern

Die Forschung am DC-Demonstrator ist in die Management- und Analyseebene, die Produktionsebene sowie die Energieebene untergliedert.



Die Produktionsebene umfasst einen durch gleich- und wechselstrombasierte Frequenzumrichter angesteuerten Industrieroboter, Hebeturm sowie Linearachsen.



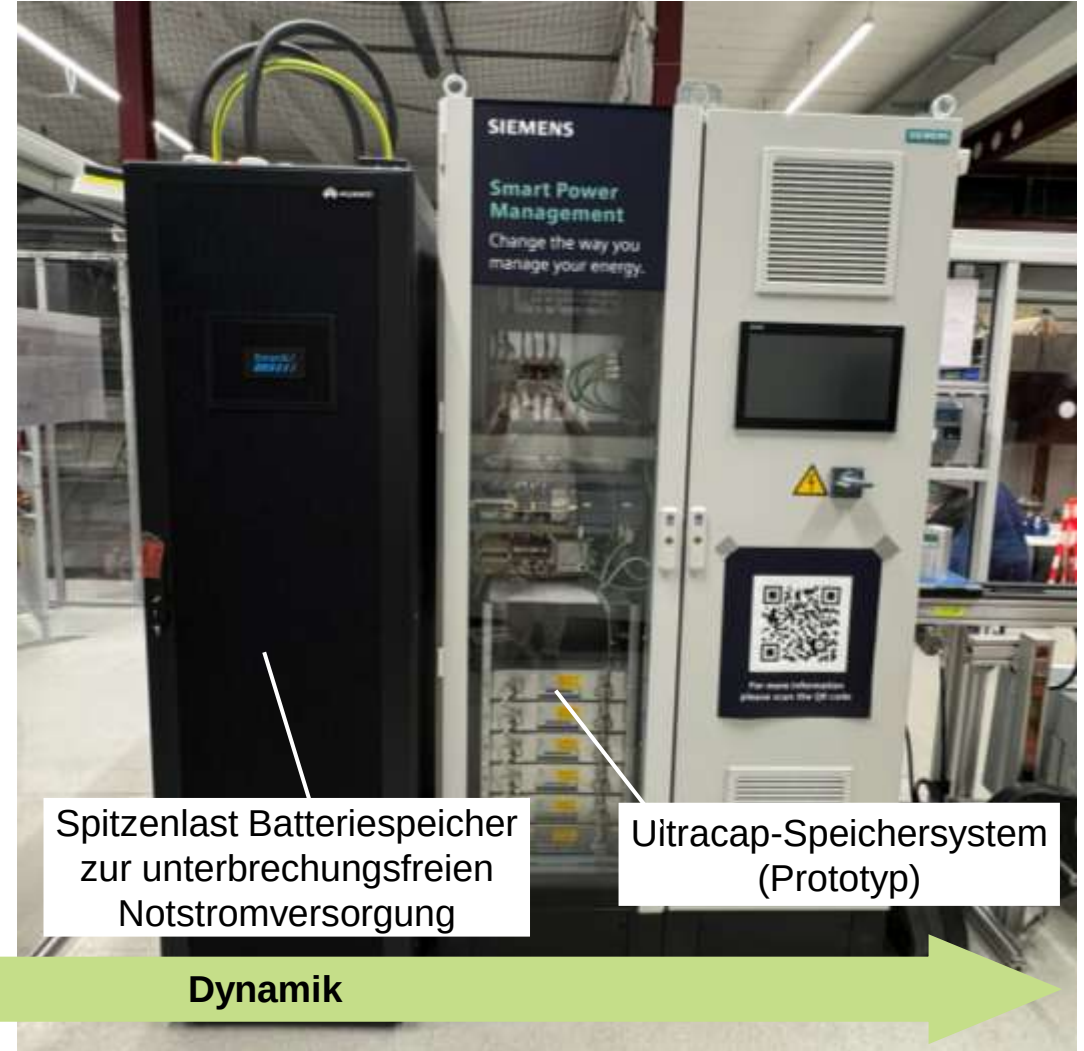
Die Energieebene umfasst eine bidirektionale Netzanbindung, zwei Batteriespeicher sowie ein prototypisches Ultracap-Speichersystem.



Bidirektionale
Netzanbindung



Second Life
Batterieschrank
(Prototyp)



Spitzenlast Batteriespeicher
zur unterbrechungsfreien
Notstromversorgung

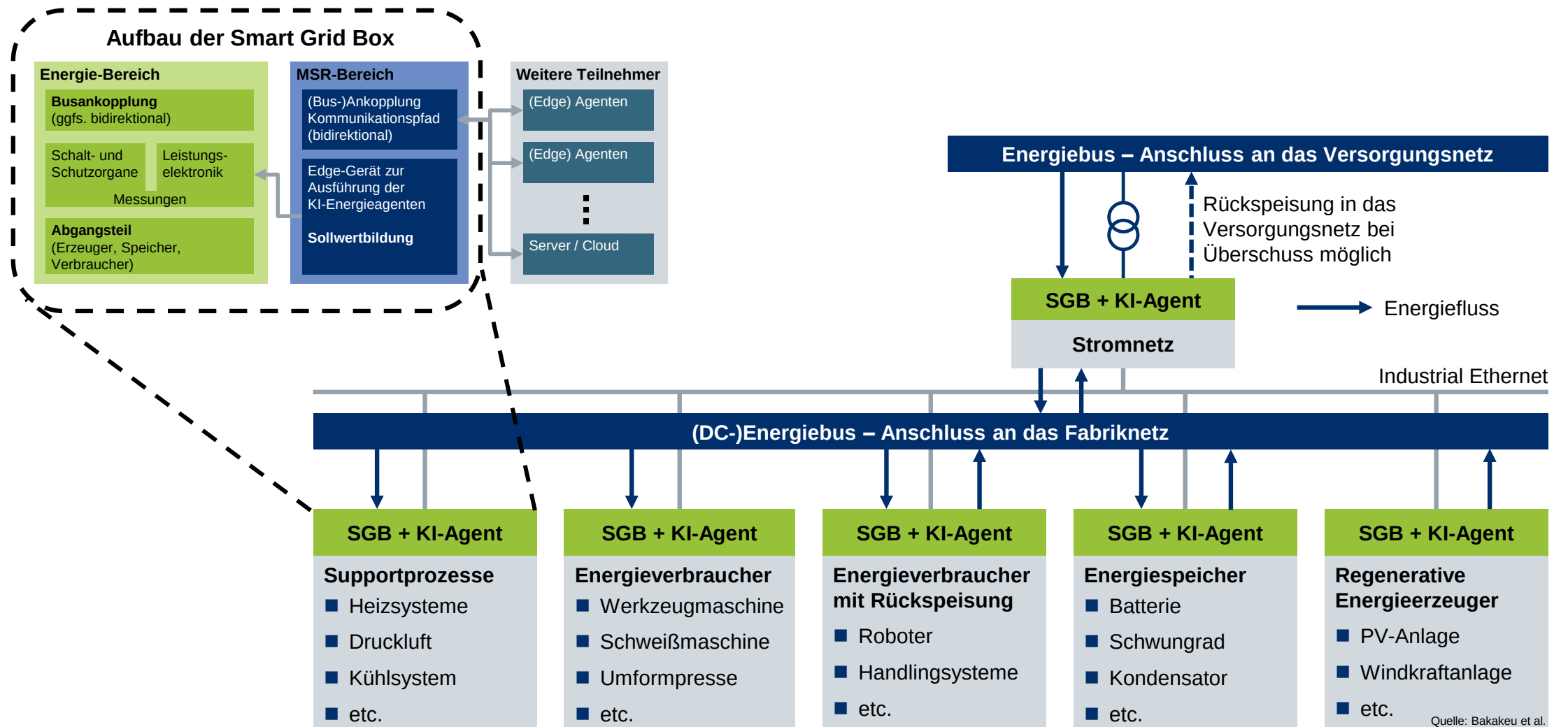
Ultracap-Speichersystem
(Prototyp)

Dynamik

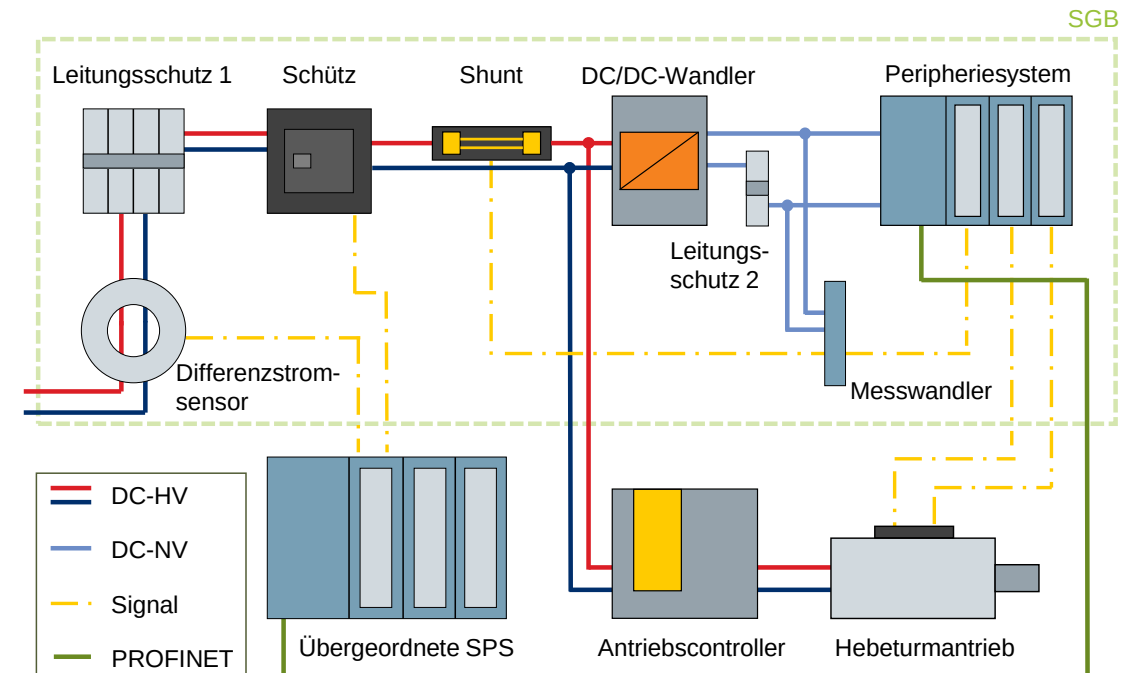
Der DC-Demonstrator ermöglicht die Erprobung hybrider AC/DC-Netzstrukturen in verschiedenen Netzformen und Erdungskonzepten.



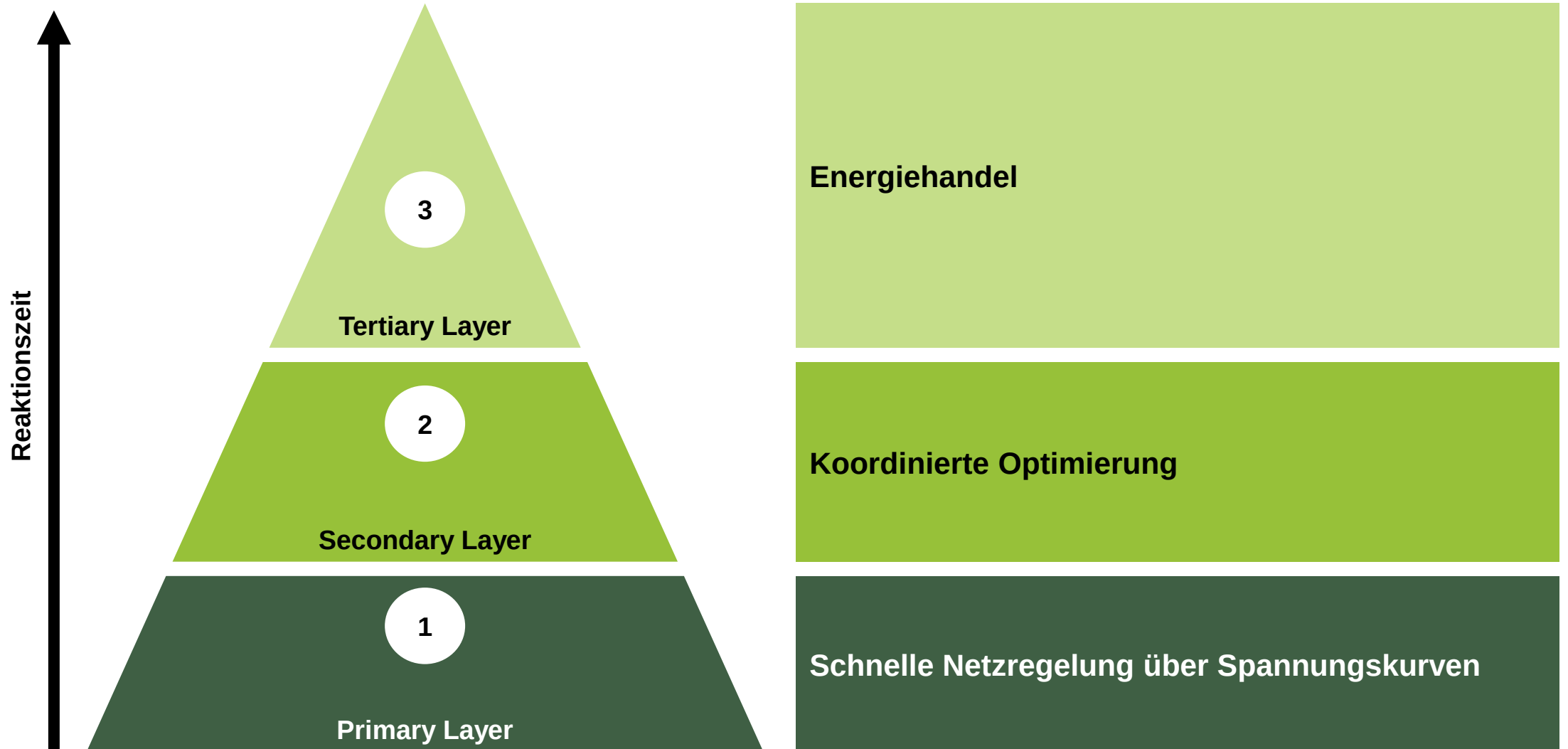
Smart Grid Boxen in den Netzabzweigen gewährleistet den selektiven Schutz und die mehrdimensionale Optimierung der Energieflüsse im Gesamtsystem.



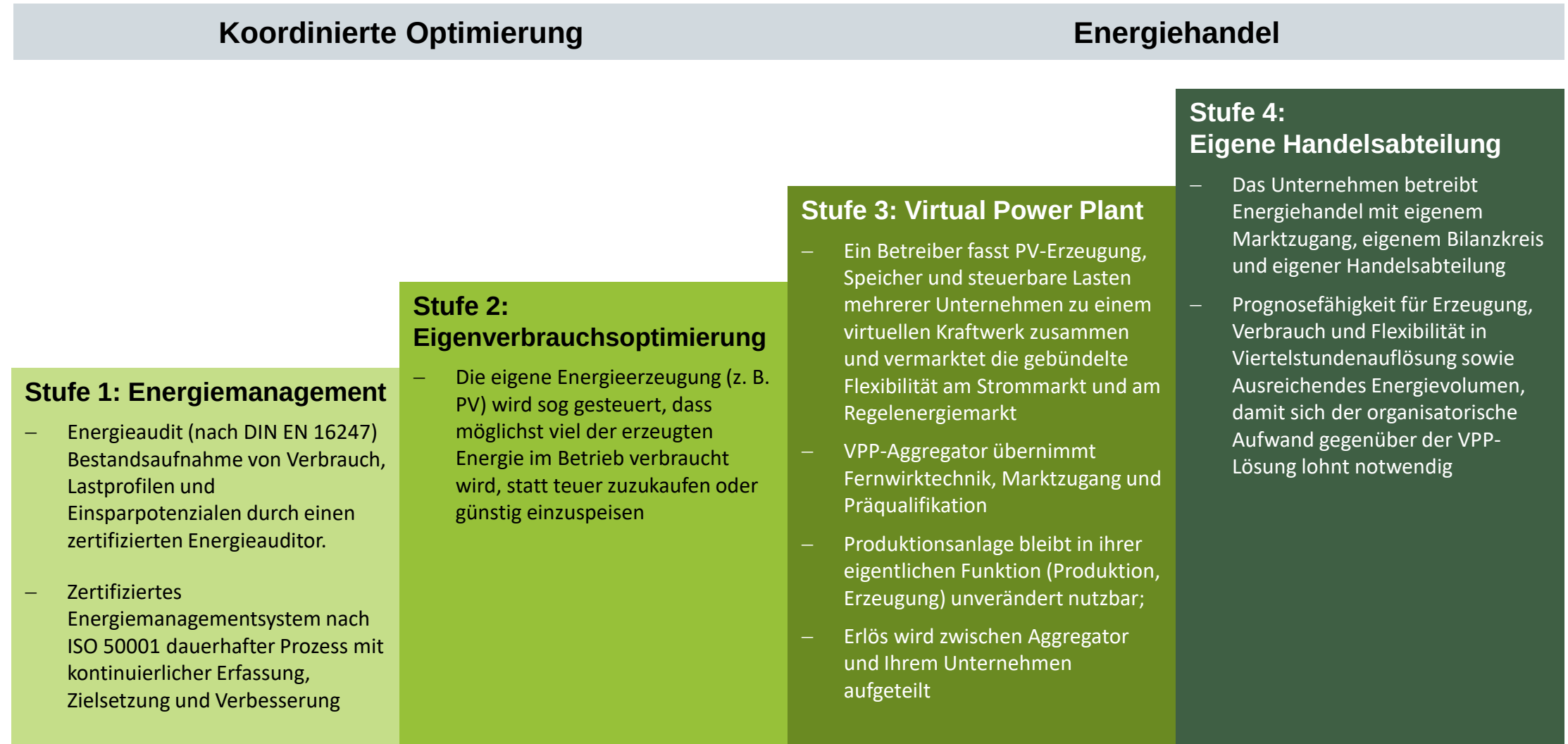
Die Smart Grid Box umfassen verschiedene Komponenten zur Energiemessung, Isolationsfehlersuche, zum Schutz vor Überströmen und zur Abschaltung.



Ein Steuerungskonzept mit drei Ebenen ermöglicht die kurzfristige Reaktion auf Laständerungen sowie den Energiehandel mit langem Planungshorizont.



Die Möglichkeiten zur Erschließung von Wettbewerbsvorteilen durch Energiehandel lassen sich in vier Stufen untergliedern.



Am Beispiel des FAPS DC Demonstrator werden eine Vielzahl an Simulationstechnologien erprobt und vermittelt.



DCign
ENERGY GRID PLANNING

DCign – Netzkonfigurator

Web-Konfigurator für die normkonforme Auslegung hybrider AC/DC-Netze.



Plant Simulation

PowerDCign-Modul überlagert dynamische Lastprofile im Materialflussmodell.



Multiphysik (VIBN)

3D-Modelle der virtuellen Inbetriebnahme liefern energetische Verläufe.



Power-HIL-Simulation

Netzteil prägt simulierte Lastverläufe als Quelle und Senke auf das reale DC-Netz auf.

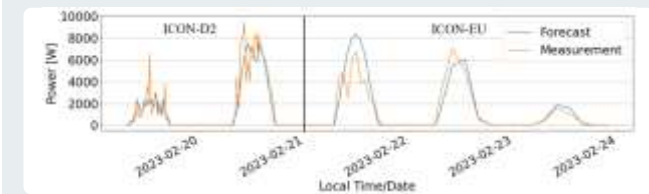
DC-Demonstrator FAPS



- Reallabor für Mess- und Validierungsversuche
- Unipolares DC-TN und bipolares DC-IT-Netz im Parallelbetrieb
- Über 10 Schaltschränke mit DC-Technik, modulares DC-Stromschienensystem
- Musterproduktionsprozess mit Batteriespeichern, Verbrauchern und PV-Anlage



Solarience – PV-Forecast



Wetterdaten und PV-Modell liefern per REST-API und MCP-Server Prognosen für die energetische Optimierung.

VR-Demonstrator für Technologietransfer



Das virtuelle Modell macht den Demonstrator für Interessierte erlebbar.

Die Zielsetzung von DCign ist die intuitive, effiziente und normkonforme simulationsbasierte Planung von gleichstrombasierten Produktionssystemen.

Zielsetzung

- Verbesserung des Planungsprozesses für DC-Netzingenieure – ohne tiefgehende Simulationsexpertise
- Sicherstellung einer wirtschaftlichen, ökologischen und normkonformen Planung hybrider AC/DC-Energiesysteme
- Entwicklung eines simulationsgestützten Planungstools für die Auslegung hybrider AC/DC-Netze in Produktionsumgebungen sowie Integration in bestehende Simulationsplattformen wie Siemens Plant Simulation: DCign

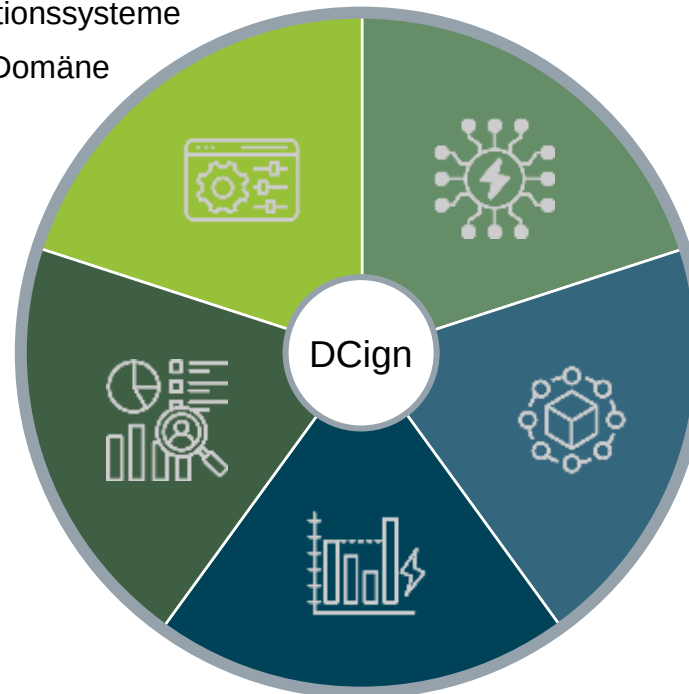


Konfigurator:

- Webbasiertes Auslegungstool für DC-Produktionssysteme
- Elektrische Netz und produktionstechnische Domäne
- Unterstützung bei:
 - Anforderungsspezifikation
 - Modellierung und Konfiguration
 - Versuchsplanung und Simulation
 - Datenauswertung
 - Regelkonforme Validierung

Analysefähigkeit:

- Wirtschaftlichkeitsanalyse
- Fehler- und Selektivitätsanalyse
- Energiemanagementanalyse
- Stabilitätsanalyse



Elektrische Netzsimulation

- Integrierte MATLAB/Simscape-Umgebung
- Modulare Modellbibliothek

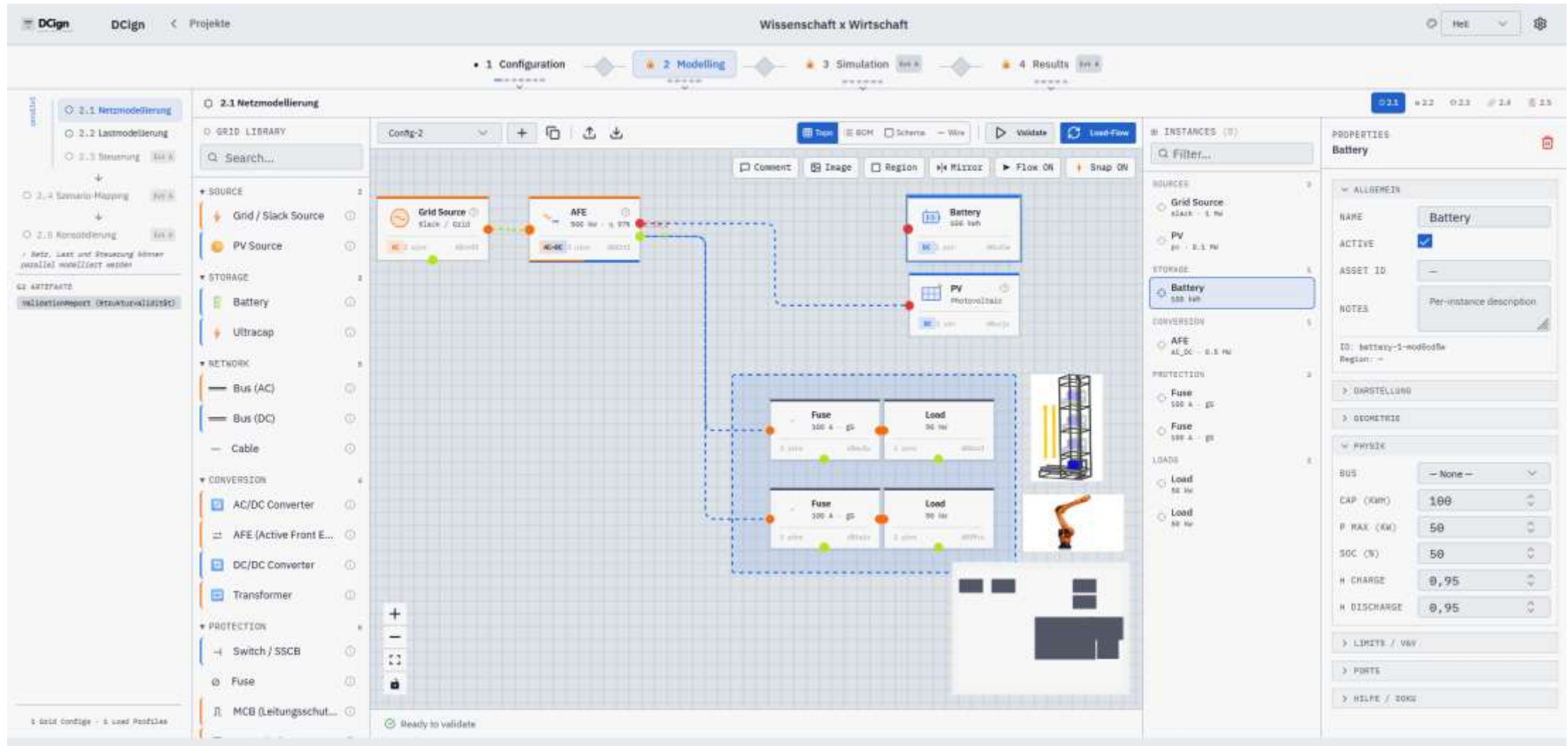
Komponentenbibliothek

- Automatisierte Parametrierung von Simulationsmodellen
- Basierend auf standardisierten Komponentendaten (EClass)

Lastsimulation

- Kosteneffiziente und realitätsnahe Komponentenauslegung
- Intelligente Testszenarien zur Validierung
- Schnittstellen zu bestehender Simulationssoftware (z. B. Plant Simulation)

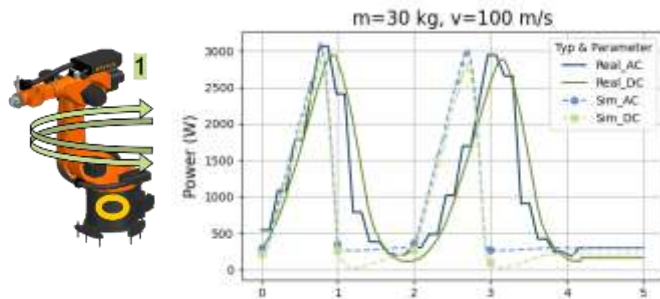
Die Zielsetzung von DCign ist die intuitive, effiziente und normkonforme Planung von gleichstrombasierten Produktionssystemen.



Die simulationsbasierte Planung von hybriden Gleichstromnetzen soll das Wissen für Netzplaner in die Praxis überführen.

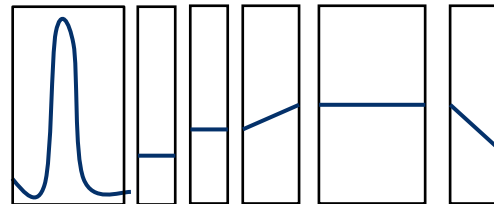
Wie lässt sich das Lastverhalten für DC-basierte Produktionssysteme modellieren?

Maschinennahe Simulation



- Nutzung bestehender VIBN Modelle zur Bestimmung individueller Lastprofile (z. B. Motorische Verbraucher)
- Minimalparametrisierung durch Wirkungsgradmodelle
- Maßgeblich von Steuerung und physikalischen Modelleigenschaften abhängig

Verhaltensbasierte Modellierung



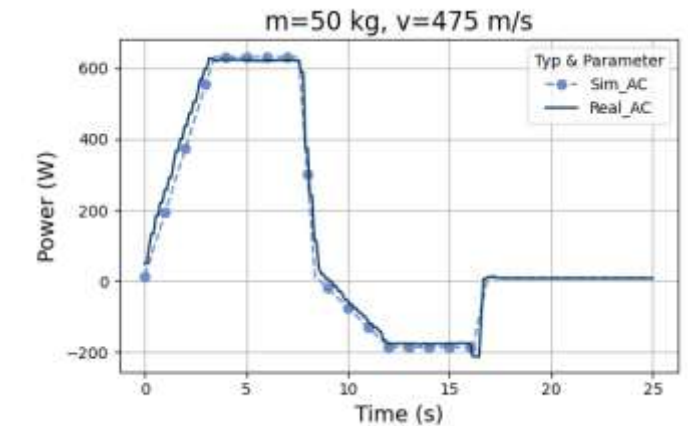
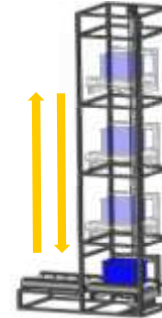
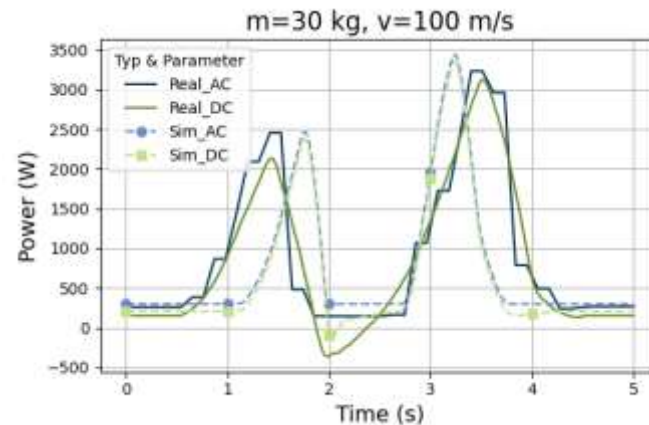
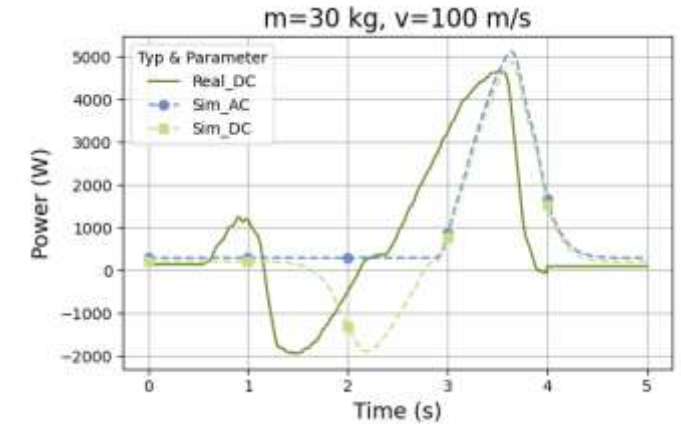
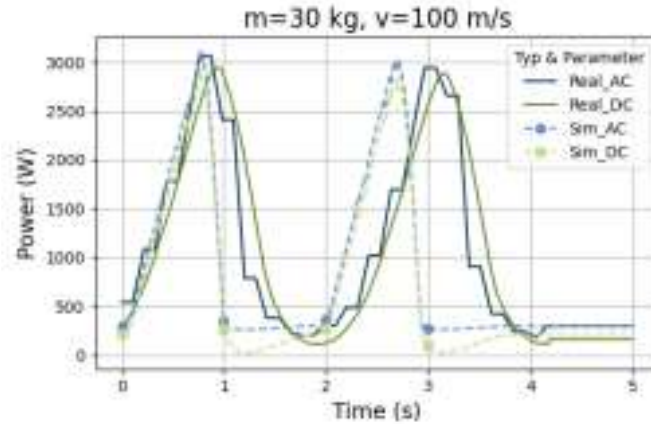
- Lediglich Modellierung relevanter Prozesseigenschaften
- Abstraktion realer Lastprofile

Process Chain Simulation



- Bestimmung des kumulierten Lastverhaltens von Produktionsprozessen
- Zeitreihen- und Zustandsbasiert
- Lastprofile einzelner Prozesse durch Verhaltensbasierter Modellierung, Maschinennaher Simulation oder Messdaten möglich

Die durchgeführten Experimente sprechen für eine realistische und effektive Ermittlung des Lastverhaltens basierend auf Maschinennaher physikalischer Simulationen.



Vorraussetzung hierfür sind physikalisch (ausreichend) korrekt parametrisierte Modelle, sowie eine korrekte Steuerung

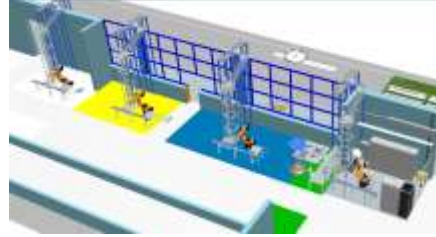
Die Vervielfachung des Systems erhöht die Spitzenlast nur um Faktor 2,6, sodass die Einspeisung eine Baugröße kleiner ausfallen kann.

Messergebnis am DC-Demonstrator

1 Produktionssystem



4 Produktionssysteme



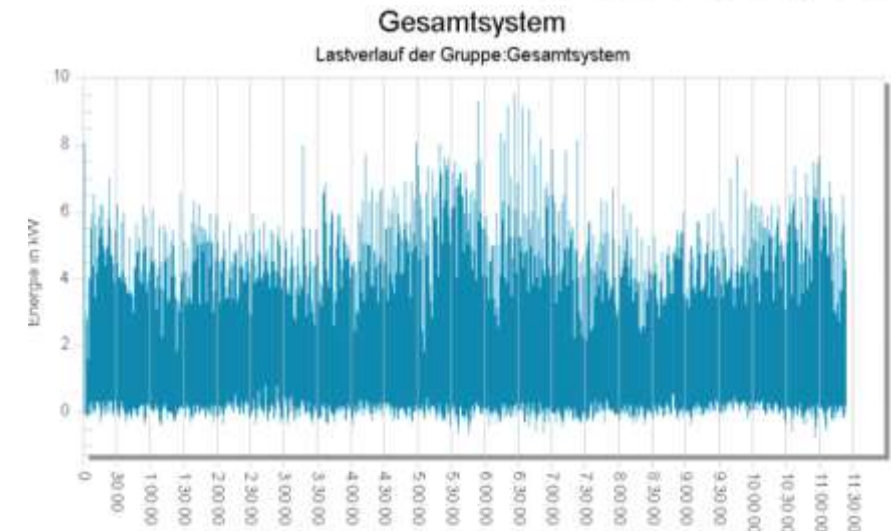
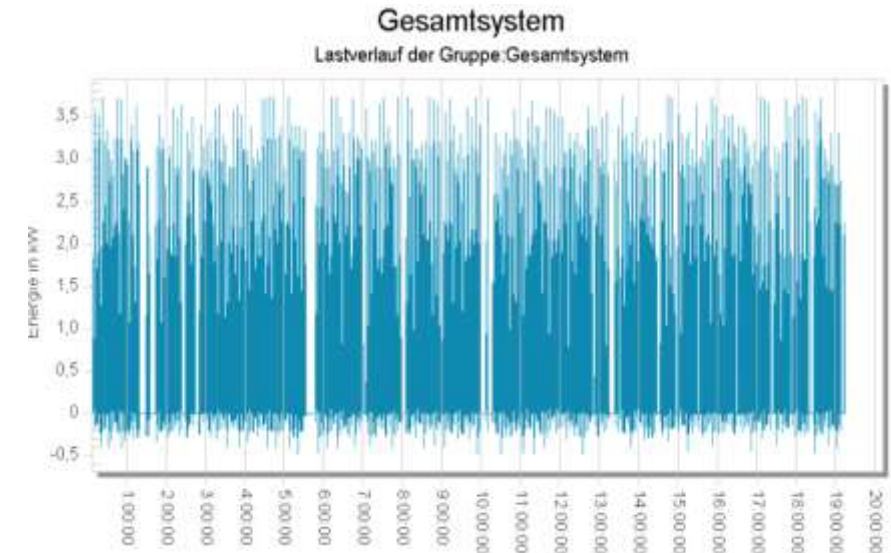
1 System, gemessen  3,8 kW

4 Systeme, naiv 4 x Peak  15,2 kW

4 Systeme, simuliert  9,8 kW

Gleichzeitigkeitsfaktor $g = 9,8 \text{ kW} / (4 \times 3,8 \text{ kW}) = 0,64$

- Roboter, Schweißprozess und Hubturm arbeiten taktversetzt, ihre Spitzen fallen nicht zusammen
- Rekuperation einzelner Achsen deckt gleichzeitige Bedarfe anderer Ressourcen, im 4-fach-System bis -0,8 kW Rückspeisung



Agenda

- 1 Vorteile von Gleichstromnetzen
- 2 Technische Grundlagen
- 3 Forschung am FAPS
- 4 Kooperationsmöglichkeiten

Der Lehrstuhl FAPS bietet vielfältige Kooperationsmöglichkeiten mit der Industrie und weiteren Institutionen.

	Gefördertes Forschungsprojekt	Industrielle Gemeinschaftsforschung	Industriepromotion	Direkte Kooperation	Studentische Kooperation
Spezifische Eigenschaften	- Geförderte Forschungsaktivität - Gemeinsame Antragsstellung	- Forschung durch Institute oder Universitäten - Projektbegleitender Ausschuss liefert Input	Direkte Zusammenarbeit über gemeinsamen Mitarbeiter	Direkter Wissens- und Technologietransfer	Betreuung einzelner Abschlussarbeiten
Besonderer Vorteil	Förderquoten für Industrie in der Regel bei 40%*, für Institute bis 100%*	Hoher Wissensgewinn durch Einflussnahme auf industriennahe Forschung	Langfristige Forschung in direkter Zusammenarbeit	Dienstleistungsverhältnis mit Geheimhaltungsvereinbarung	Idealer Kick-off für künftige Forschungs-k Kooperation
Besonderheiten	- Abhängigkeit vom Fördermittelgeber - Beliebig kleine Projekte realisierbar - Mit oder ohne Fokus auf die Region - Spezielle Programme für KMU, Verbandsmitglieder oder Großunternehmen	- Koordination und Beratung durch Forschungsvereinigung - Bottom-Up-Ansatz für technologische Bedürfnisse und Herausforderungen - Verwertung von Forschungsergebnissen	- Definition über Kooperationsprojekt, des Themas und der Schwerpunkte - Angestellter der Universität mit Arbeitsplätzen im Unternehmen und am Lehrstuhl für idealen Austausch	- Abstrakte und gemeinsame wissenschaftliche Veröffentlichung der Inhalte - Evtl. gemeinsame Patentanmeldung	Arbeiten mit inhaltlichen Fokus der Themengebiete der Forschungsbereiche des Lehrstuhls
Projektbeginn und -laufzeit	- Beantragung ca. 12 Monate* - Laufzeit für 2-3 Jahre*	- Regelmäßig Beantragung möglich - Laufzeit 2 Jahre	- Beginn mit geeigneten Doktoranden - Promotion in 3 Jahren*	- Beginn kapazitätsabhängig - Laufzeit variabel	- Beginn mit geeigneten Studierenden (Apr & Okt) - In der Regel 6 Monate*
Serviceportfolio	- Netzwerkaufbau - Gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsarbeiten - Kapazitäts- und Maschinennutzung				

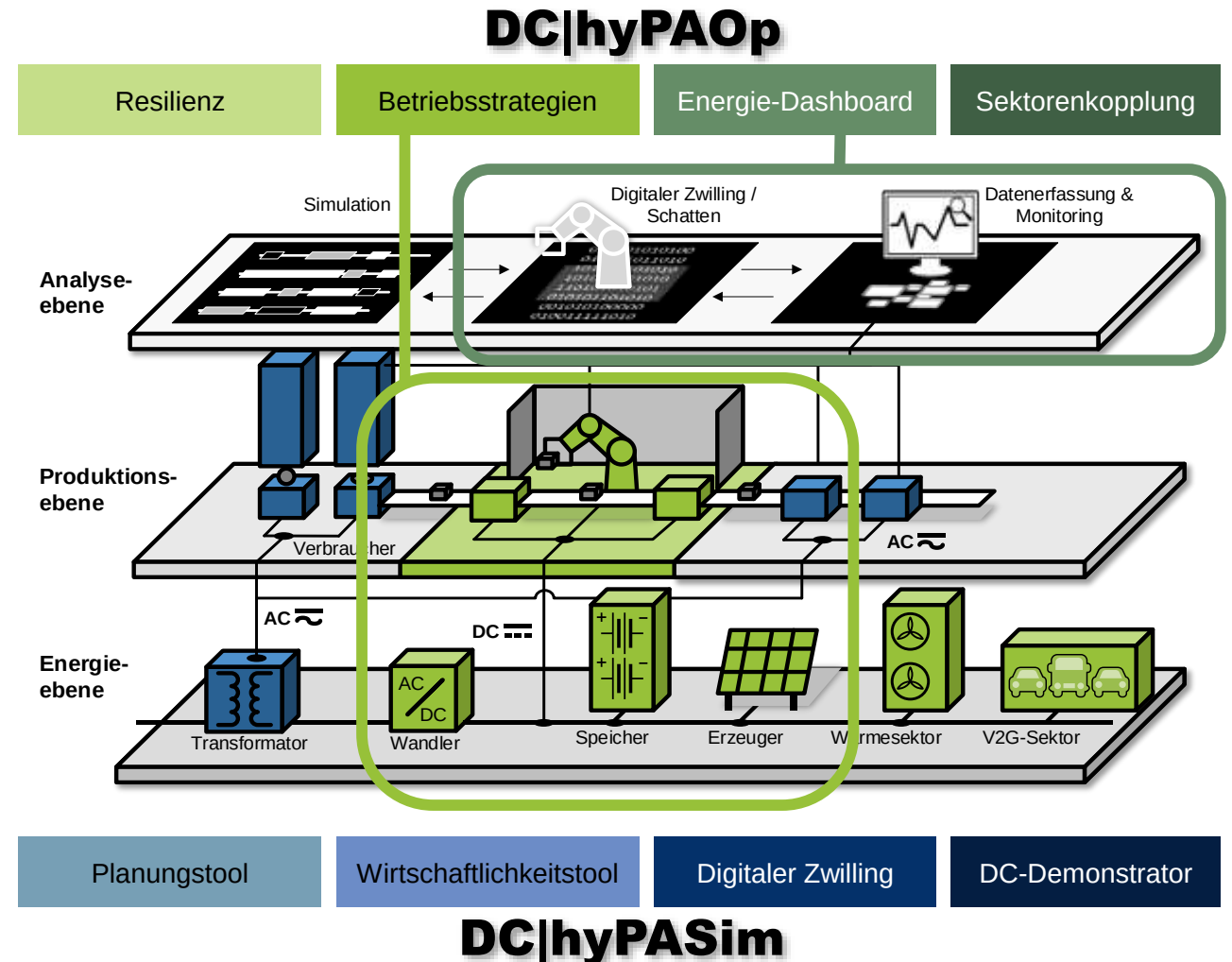
*Zahlen beruhen auf gängigen Durchschnittswerten, ohne Gewähr

Das Ziel des Projekts DC|hyPAOp ist die digitale Optimierung von Betriebsstrategien sektorenübergreifender AC/DC-Energienetze für automatisierte Produktionsanlagen.

Digitale Optimierung von Betriebsstrategien sektorenübergreifender AC/DC-Energienetze in automatisierten Produktionsanlagen (DC|hyPAOp)

Laufzeit	01.09.2026 – 31.08.2028
Budget	1.516.675 € (Gesamt)
Fördermittel	1.516.675 €
FAPS	749.960 € (Personalmittel 621.414 €)

Das Projekt entwickelt eine intelligente Leitstelle (Smart Power Operation Center) zur Betriebsoptimierung sektorenübergreifender AC/DC-Energienetze für automatisierte Produktionsanlagen. Mithilfe einer integrierten IT/OT-Infrastruktur werden unterschiedliche Spannungsebenen und flexible Energiesektoren mit regenerativer Erzeugung und Speicherung gekoppelt. Ziel ist es, durch digitale Betriebsstrategien die Energie- und Kosteneffizienz zu steigern, Lastspitzen gezielt zu reduzieren und die Potenziale eines netzdienlichen Energiehandels praxisnah zu erforschen. Gleichzeitig erfolgt eine Validierung auf Demonstratorbasis.



FAPS

Key-Take-Aways:

- Gleichstromnetze als innovative, energie- und ressourcenschonen Technologie ohne Verzicht auf Performance
- Simulation als Werkzeug zur Auslegung der Energieinfrastruktur und Produktionsplanung
- Gleichstromkomponenten sind zunehmend kommerziell Verfügbar und sind ein Wachstumsmarkt für Komponentenhersteller

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät



Benedikt Wolessak (M.Sc.)
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

FRAGEN?

So geht es weiter

14:00

Uhr

Kaffeepause

14:45

Uhr

Onoldiasaal

EG

Simon-Marius-Saal

EG

Kaspar-Hauser-Saal

1. OG

Session 4

**Wachstumsfelder erschließen:
Automotive-Kompetenzen in der
medizinischen Robotik**

Medical Valley EMN e.V.

Session 5

**Laser trifft Röntgen –
Schlüsseltechnologien für die
Automobilwirtschaft der Zukunft**

Bayerisches Laserzentrum GmbH und
Fraunhofer-Institut für Integrierte
Schaltungen IIS

Session 6

**Unterstützung bei der Transformation
– Diversifizierungsmöglichkeiten im
Bereich der Leistungselektronik und
Halbleitertechnologie**

Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme
und Bauelementetechnologie IISB