

DC-INDUSTRIE2 | Nov. 2022

DC-INDUSTRIE – der Wegbereiter für ein offenes industrielles Gleichstromnetz in der Fabrikautomation

Verbundvorhaben: DC-INDUSTRIE2 - Gleichstrom für die Fabrik der Zukunft

Ansprechpartner

Dr. Hartwig Stammberger
(Eaton, Bonn, Projektkoordinator)

Prof. Dr.-Ing. Holger Borchering
(TH OWL/iFE, Wissenschaftlicher Leiter)

Gefördert durch:



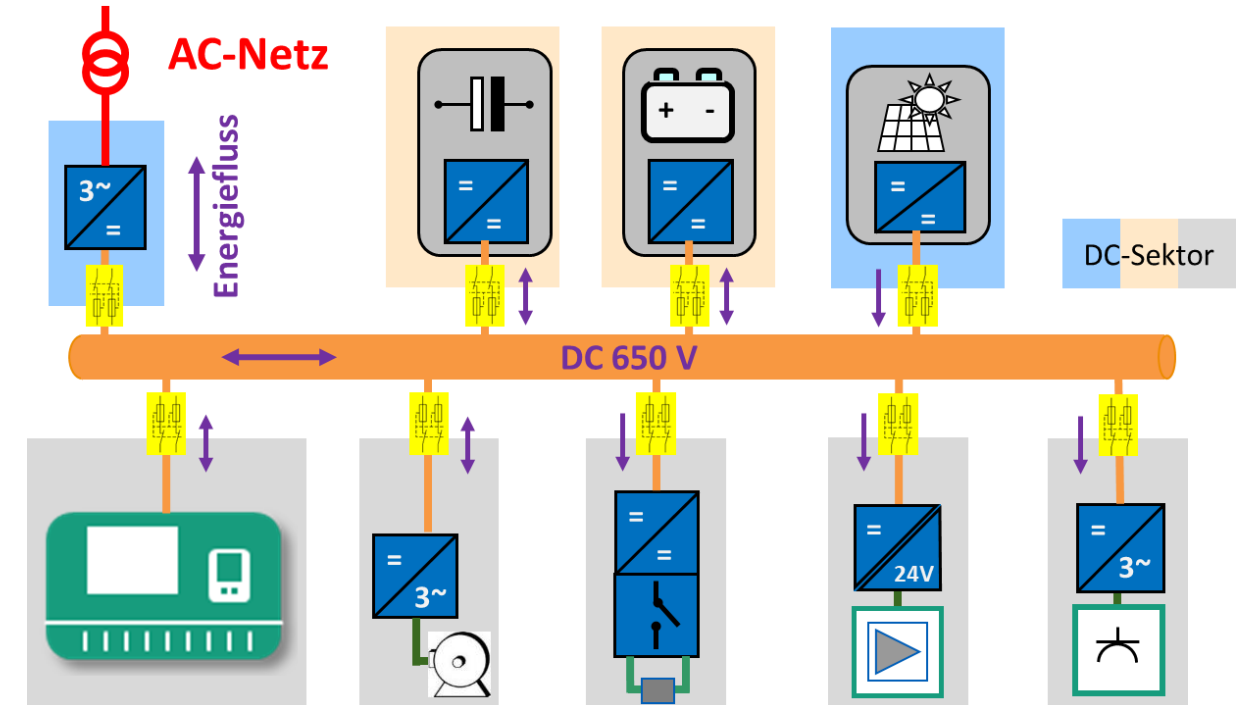
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



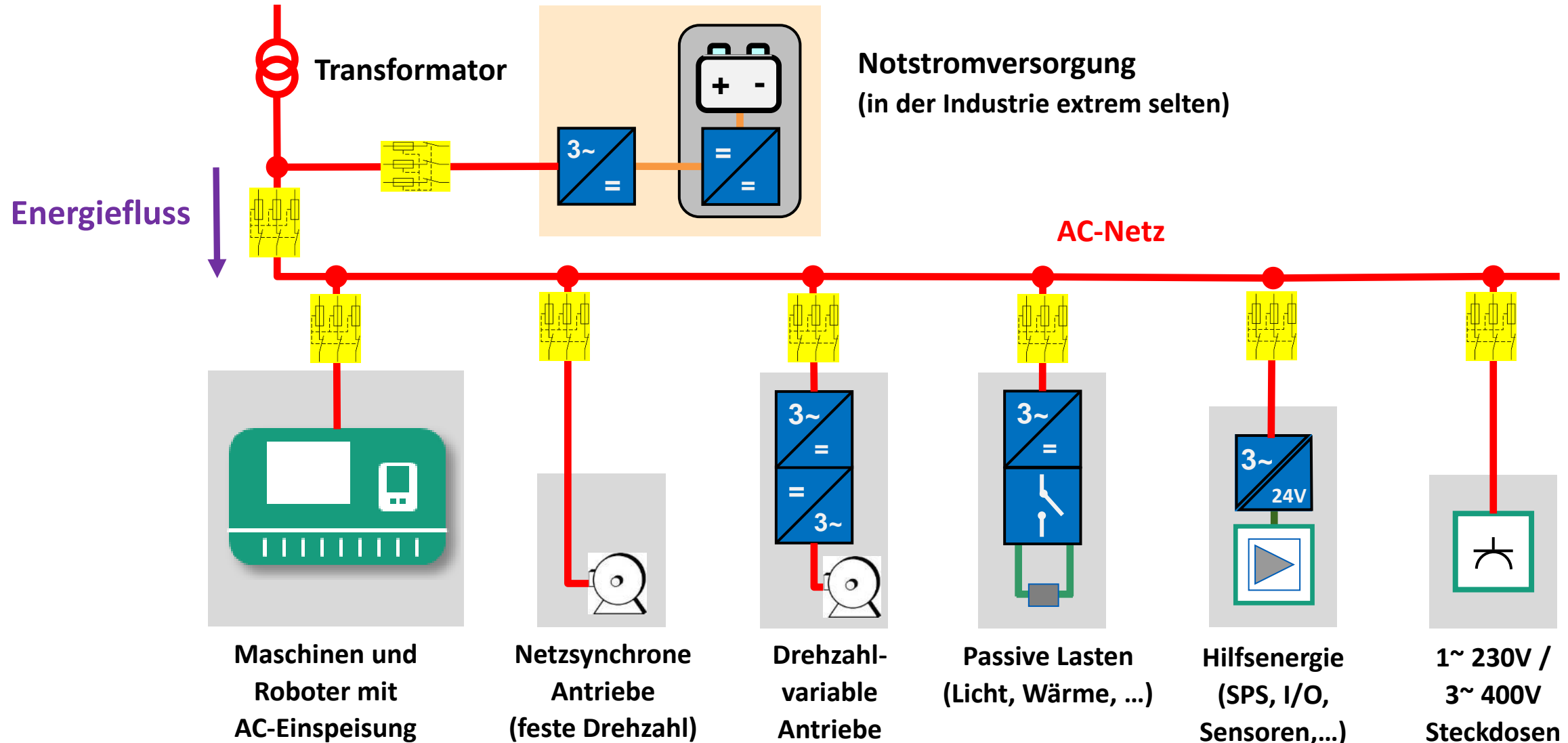
Überblick DC-INDUSTRIE2

- **Gefördert durch deutsche Regierung, BMWK**
 - Förderkennzeichen: 03EI6002A-Q
- **3.5 Jahre bis März 2023**
- **39 Partner aus Industrie und Forschung**
 - **Etwa 140 Ingenieure & Forscher**
- **Ziele**
 - Robuste Energieversorgung für die Produktion
 - Netzdienliche Anbindung an das Versorgungsnetz
 - Maximale Nutzung von dezentraler regenerativer Energie
 - Einfache Projektplanung
- **Validierung**
 - 10 Modellanwendungen und Transferzentren

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

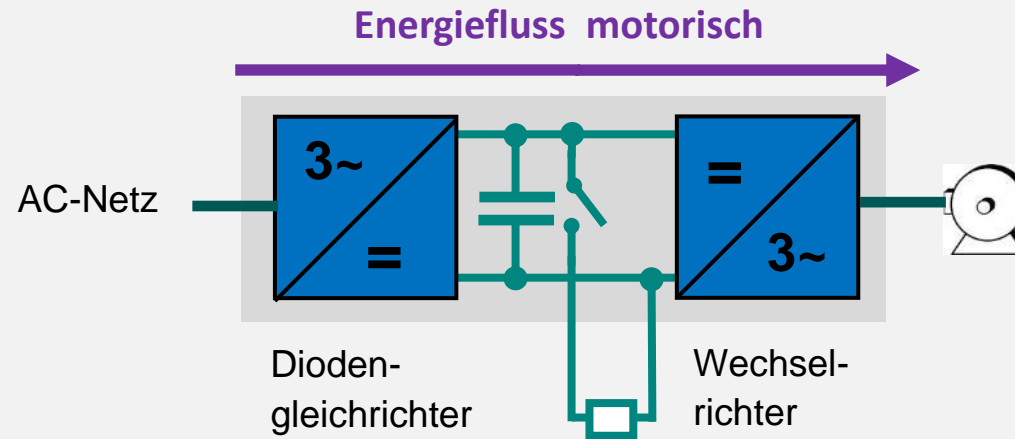


Status quo: Topologie im industriellen AC-Netz



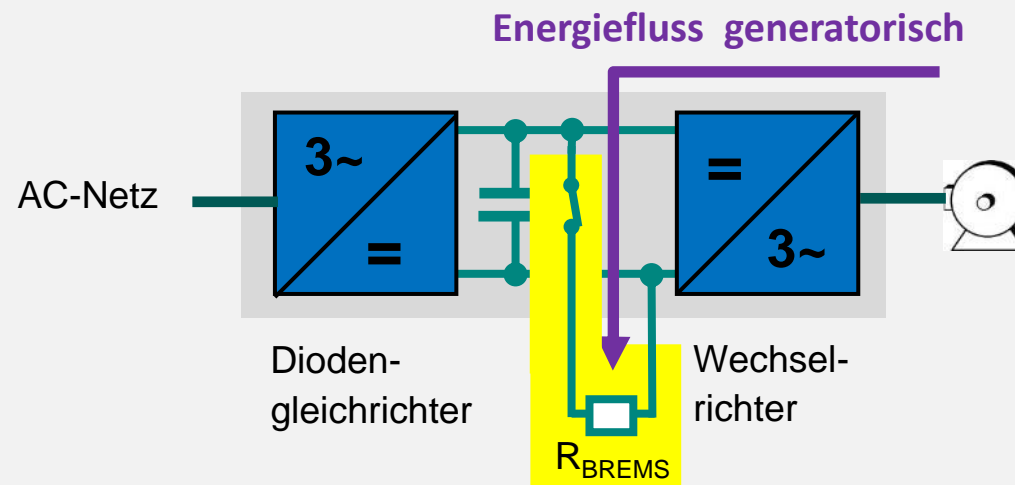
Energieaustausch: Aktueller Stand bei AC/AC Umrichtern

Die Grundschialtung des Frequenzumrichters ist für den motorischen Betrieb optimiert



Beim Abbremsen/Absenken muss der Umrichter die Bremsenergie loswerden, damit er nicht abschalten muss!

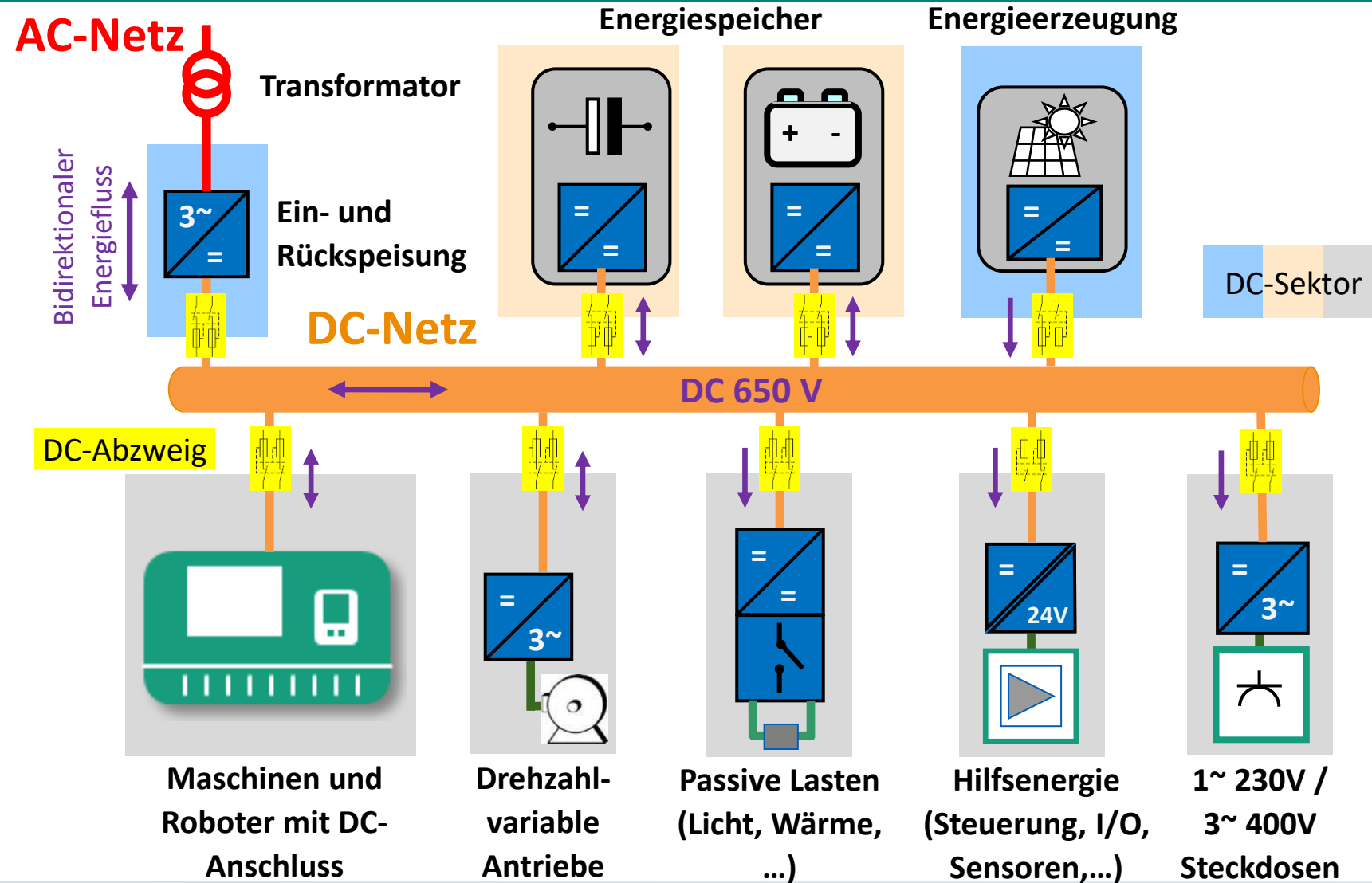
Die häufigste Methode ist das Verheizen hochwertiger elektrischer Energie im **Bremswiderstand**.



Wie sieht ein industrielles DC-Fabriknetz aus?

Viele AC Anwendungen nutzen bereits intern DC

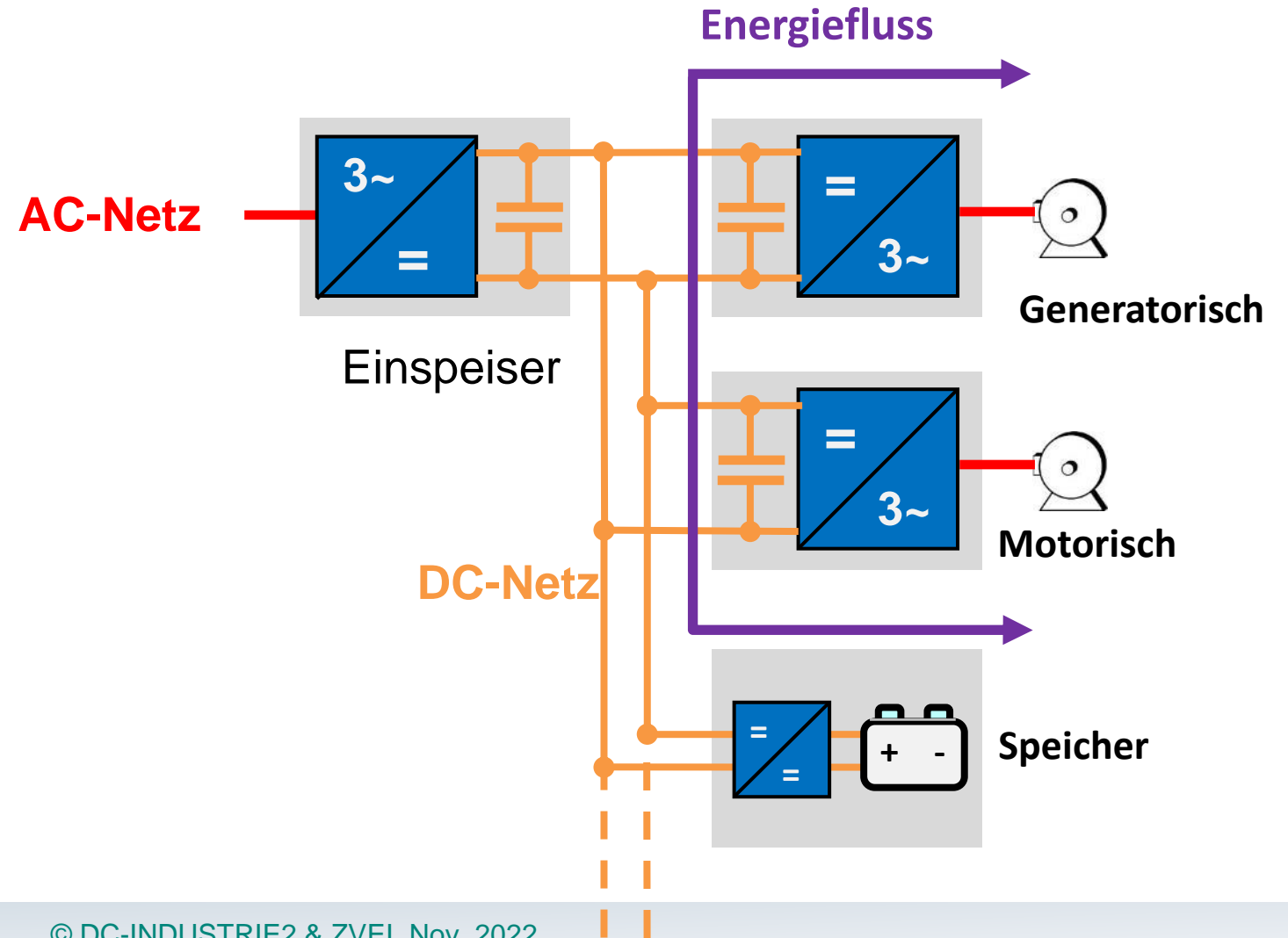
- Zum Beispiel Frequenzumrichter
- Die Verbindung der DC-Zwischenkreise miteinander macht viele AC-DC Umwandlungen überflüssig



Elektrischer Energieaustausch: Keine Begrenzung im DC-Netz

DC-Netz

- Vermindert den Aufwand.
- Ermöglicht direkten Energieaustausch – ohne zusätzliche Komponenten!



Vorteile einer DC Versorgung für Industrie-Anlagen

• Energie-Effizienz

- Geringere Verluste (typisch 2-4% *)
- Nutzung der gesamten Bremsenergie *
- Direkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen *
- Spitzenlast-Reduktion durch geeignete Speicher (bis zu 80% *)

• Ressourcen-Effizienz

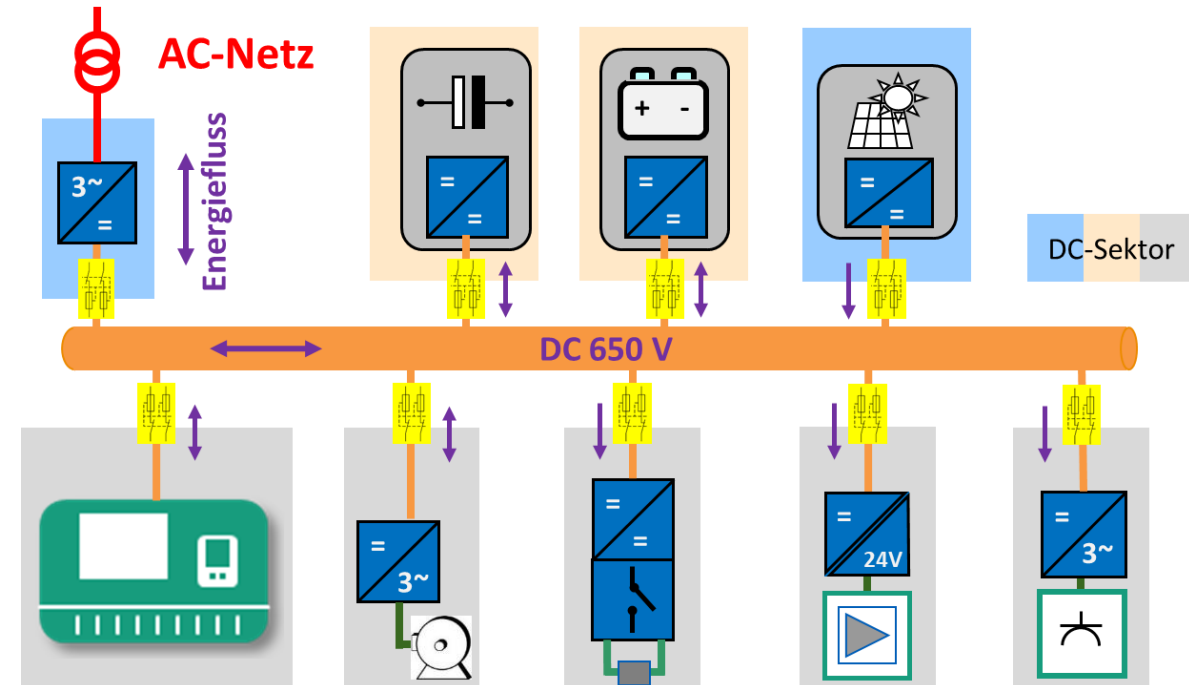
- Weniger Kupfer und geringere Leitungsverluste
- Geringere Gerätekosten und Platzeinsparung im Feld

• Netz-Stabilität

- Zusatzinvestitionen zur Netzfilterung und Kompensation können entfallen und die Bestandsnetze werden gestützt
- Produktionsausfälle durch Netzstörungen werden verhindert / reduziert

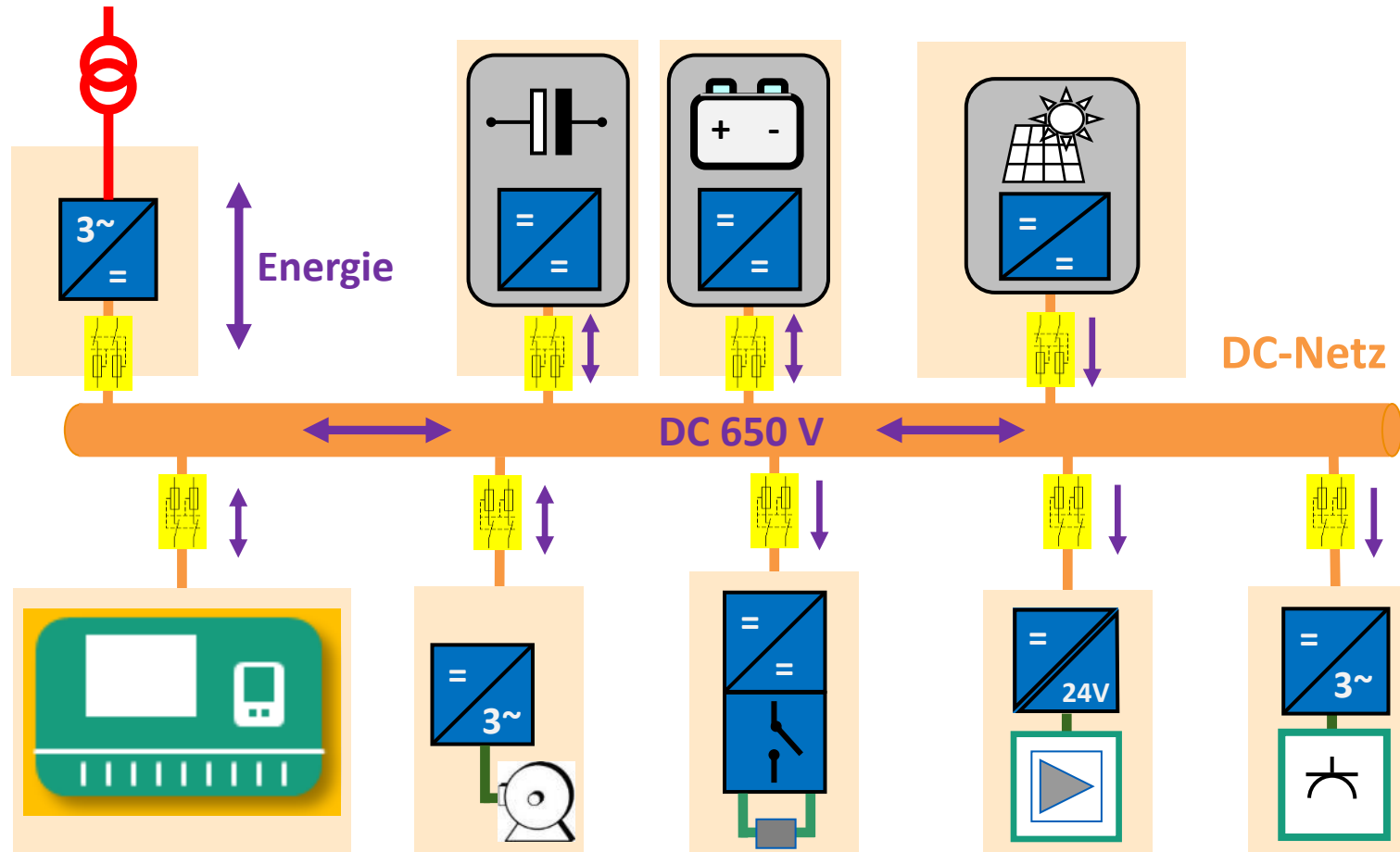
• Industrielles smartes DC-Netz / Flexibilität

- Infrastruktur für die intelligente Steuerung der Energieflüsse ermöglicht Vorteile im Energieeinkauf
- Unterstützt modulare Maschinenkonzepte



* im Projekt an den Modellanlagen ermittelt

DC-Sektoren organisieren das Netz



DC-Sektoren

- ... bilden eine logische Einheit
- ... beinhalten Komponenten, die funktional zusammen gehören
- ... beinhalten ausreichend Zwischenkreiskapazität, um schaltfrequente Ausgleichsvorgänge zwischen ihren Geräten vom DC-Netz fern zu halten
- ... werden mit einem DC-Abzweig an das DC-Netz angeschlossen

Vereinfachte Leistungsberechnung bei Gleichstrom

• Leistungen bei Wechselstrom

- Wirkleistung
 - $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$
- Blindleistung
 - $Q = \sum_{n=1}^{\infty} [U_n \cdot I_n \cdot \sin(\varphi_{U_n} - \varphi_{I_n})]$
- Verzerrungsleistung
 - $D = U \cdot \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots} = U \cdot \sum_{m=2}^{\infty} [I_m^2]$
- und bei Drehstrom alles dreimal...

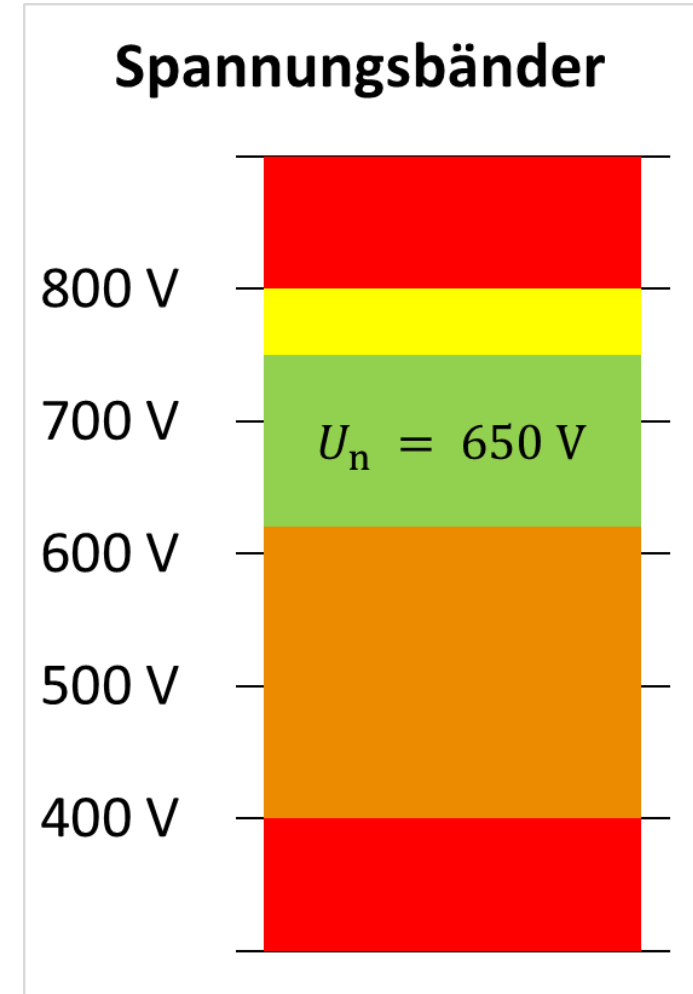
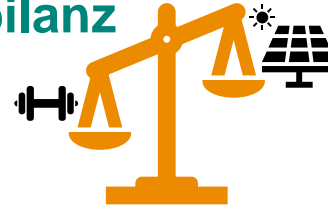
• Leistungen bei Gleichstrom

- Wirkleistung $P = U \cdot I$
- Es ist wirklich so einfach...

- **Blind- und Verzerrungsleistung müssen bei AC bis zum Endverbraucher über die Leitungen übertragen werden**
- **Diese Belastung entfällt bei DC**

Spannungsbänder – hier für aktiv geregelte Einspeiser (AIC)

- **Bei DC spiegelt die Spannung die Leistungsbilanz**
 - Last > Versorgung → Spannung sinkt ↘
 - Versorgung > Last → Spannung steigt ↗
- **Nominales Spannungsband 620 V – 750 V**
 - Volle Funktionalität
- **Überspannungsband 750 V – 800 V**
 - Mehr Versorgungsleistung als benötigt → soll nicht länger als 60 s dauern
 - Aktive Komponenten wirken gegen die Spannungsänderung
 - Speicher werden geladen, Gelegenheitslasten eingeschaltet
- **Notfallband (Unterspannung) 400 V – 620 V**
 - Überlast → Lastabwurf wo möglich; Speicher versorgen Lasten
 - Geräte dürfen Leistung mindern, müssen aber nach Spannungswiderkehr wieder den Betrieb aufnehmen
 - Kürzer als 60 s
- **Abschaltgrenzen: 400 V, 800 V**
 - Kein Betrieb, Schalter unterbrechen



Betriebsstatus – Funktion von Spannung und Dauer

Spannung B_x und Dauer S_x bestimmen Betriebsstatus A_x

- **A7 Verboten**
 - Beschädigung wahrscheinlich
- **A6 Überspannungsschutz aktiv**
- **A5 Überspannungsschutz nicht aktiv**
 - Geräte dürfen abschalten
- **A4 Abnormaler Status**
 - Geräte müssen dynamisch funktionieren
- **A3 Normalbetrieb**
 - Volle Funktionalität
- **A2 Akute Unterspannung**
 - Geräte dürfen Leistung mindern
- **A1 Blackout Status**
 - Abschalten
 - Vorladen beim Einschalten

Obere Spannungsgrenze U_x der Komponenten für Nennspannung 540 V / 650 V		Spannungsband	S1: $t < 50 \mu\text{s}$	S2: $50 \mu\text{s} \leq t \leq 1 \text{ ms}$	S3a: $1 \text{ ms} \leq t \leq 5 \text{ s}$	S3b: $5 \text{ s} \leq t \leq 60 \text{ s}$	S4: $t > 60 \text{ s}$
Spannung ↑	U6: 2000 V	B7	A7	A7	A7	A7	A7
	U5: 880 V	B6	A6	A7	A7	A7	A7
	U4: 800 V	B5	A4	A5	A5	A7	A7
	U3: 750 V	B4	A3	A3	A3	A4	A5
	U2: 485 / 620 V	B3	A3	A3	A3	A3	A3
	U1: 400 V	B2	A4	A4	A2	A2	A2
		B1	A4	A2	A1	A1	A1
			Zeit →				

Angelehnt an IEC Technical Report TR63282

Spannungshaltung und Regelkennlinien



Spannung spiegelt die Leistungsbilanz

a) Ungeregelter Betrieb:

- Keine aktive Regelung der DC-Spannung (Betrieb mit Diodengleichrichter)

b) Dezentrale Kennlinien-basierte Regelung:

- Aktive Einspeise-Geräte regeln ihren DC-Strom abhängig von der aktuellen Spannung
- Ein einfache Kennlinie gibt den Sollwert vor (siehe Diagramm)
- Stabil ohne Kommunikation

c) Kennlinienänderung bei Kommunikation:

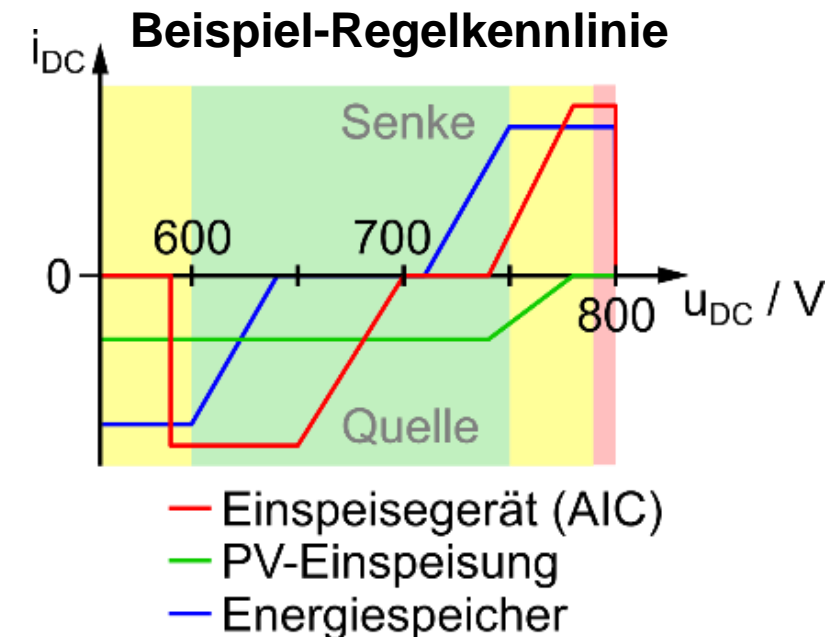
- Kennlinie wird von einer zentralen Steuerungseinheit im Betrieb verändert (keine Echtzeit)

d) Zentrale Spannungsregelung:

- Zentrale Steuerungseinheit gibt den Einspeisegeräten die Leistungssollwerte (in Echtzeit)

Durch die Wahl des Regelverfahrens lassen sich sowohl

sehr einfache, als auch komplexe DC-Netze mit mehreren Erzeugern aufbauen



Gleiche Isolierung!

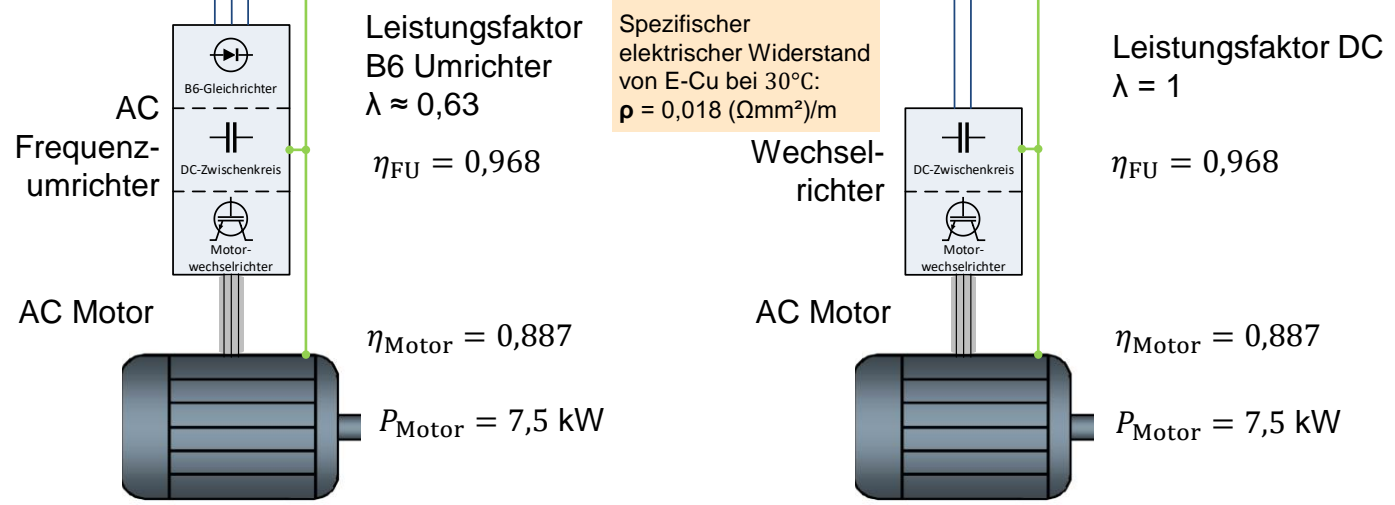
Leitungen: Ressourcen- und Energieeffizienz

Beispiel:

Versorgung eines drehzahlgeregelten Antriebs mit $P_N = 7,5 \text{ kW}$



$P_{AC} = P_{Motor} / (\eta_{Motor} \cdot \eta_{FU} \cdot \lambda) = 13,9 \text{ kVA}$ $I_{AC} = P_{AC} / (\sqrt{3} \cdot U) = 13,9 \text{ kVA} / (\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}) = 20 \text{ A}$ $P_{V,AC} / l = 3 \cdot \rho / A_{AC} \cdot i^2 = 8,6 \text{ W/m}$	$P_{DC} = P_{Motor} / (\eta_{Motor} \cdot \eta_{FU} \cdot \lambda) = 8,7 \text{ kW}$ $I_{DC} = P_{DC} / U_{DC,min} = 8,7 \text{ kW} / 620 \text{ V} = 14,1 \text{ A}$ $P_{V,DC} / l = 2 \cdot \rho / A_{DC} \cdot i^2 = 4,8 \text{ W/m}$
---	--



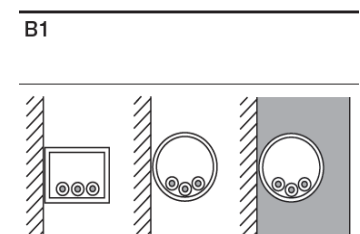
AC: 20 A

- Querschnitt → **2,5 mm²**
- Kupferbedarf: $4 \times 2,5 \text{ mm}^2 = 10 \text{ mm}^2$

DC: 14.1 A

- Querschnitt → **1,5 mm²**
- Kupferbedarf: $3 \times 1,5 \text{ mm}^2 = 4,5 \text{ mm}^2$
- **55% weniger Kupfer für gleiche Leistung**
- **45% weniger Kabelverluste ($R \times i^2$)**

Verlegeart	B1	
Anzahl gleichzeitig belasteten Adern	2	3
Nennquerschnitt in mm ²	1,5	17,5
Leiterstrom in A	2,5	24
	4	32
	6	41



Zulässiger Strom in A bei 30°C nach DIN VDE 0298-4

Schneller, zuverlässiger Schutz mit Halbleiterschaltern

• Anforderungen

- Schnell, Spannungseinbruch vermeiden
- Bi-direktional

• Leistungselektronik

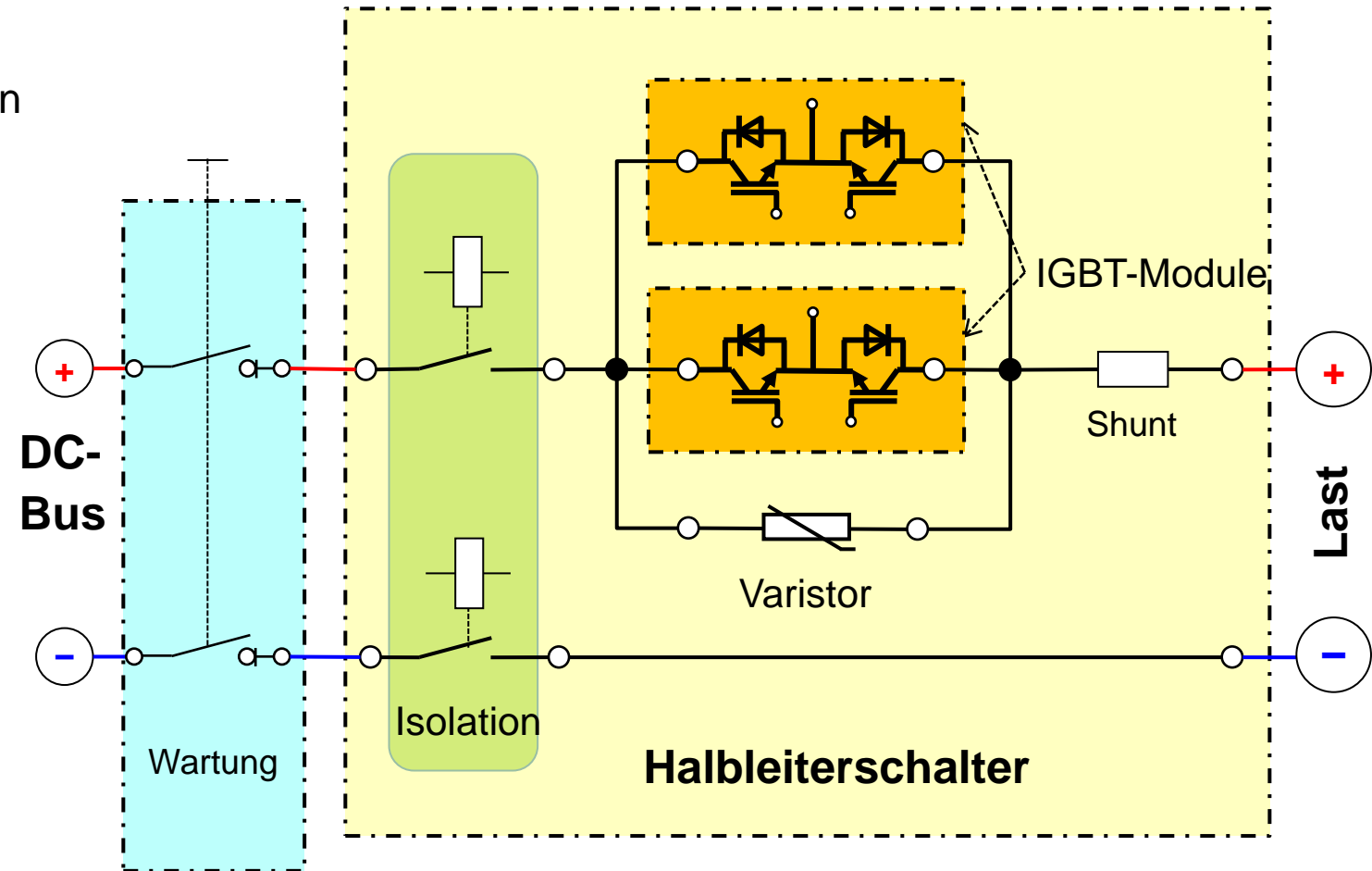
- IGBT + Diode
- (Mechanische Schalter zu langsam)

• Funktionen

- Schalten
- Überstromschutz
- Isolation
- Spannungsüberwachung
- Vorladung, wo gefordert
- Kommunikation

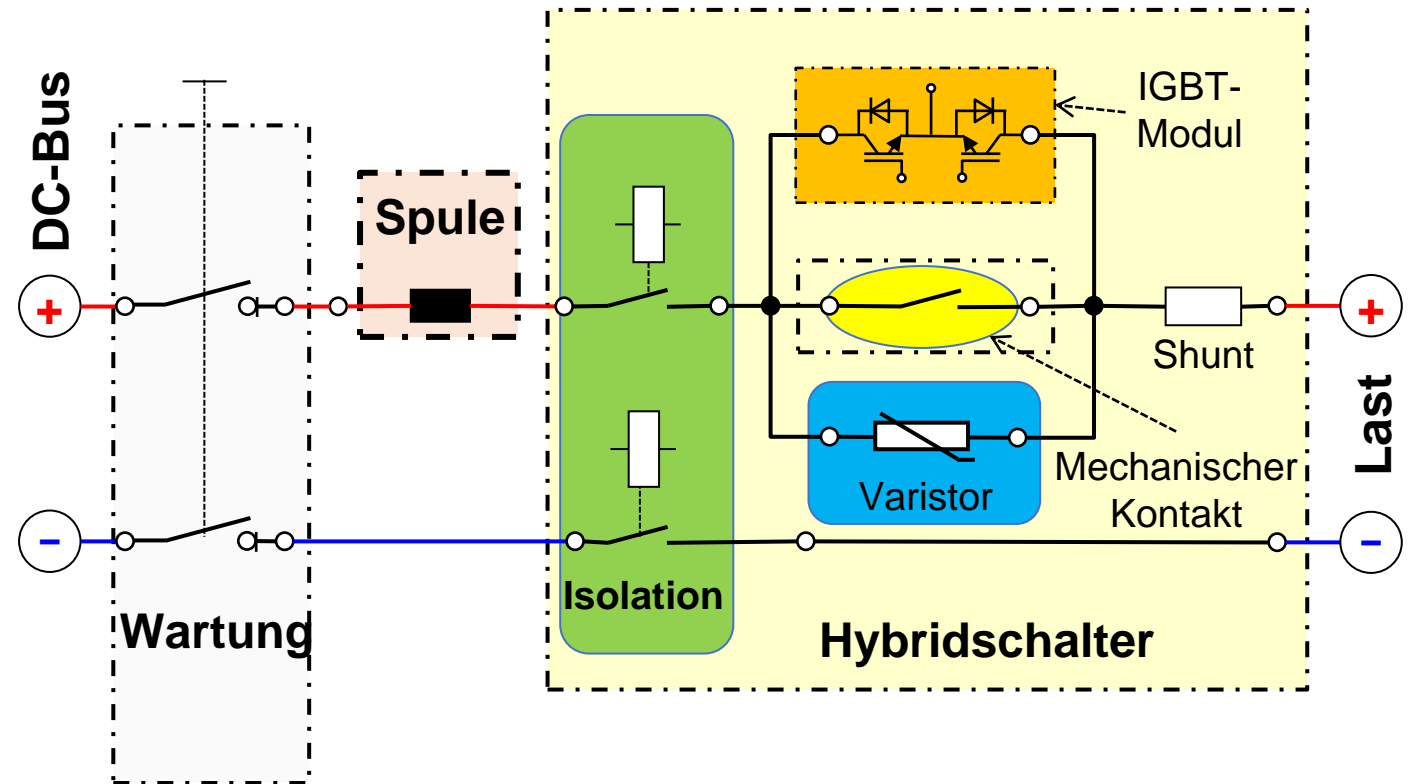
• Eigenschaften

- < 100 μ s Ausschaltzeit
- Geringe Fehlerenergie (<< 1% vs. mechanischem Schalter)



Hybridschalter reduziert Verluste beim Strom führen

- **Mechanischer Kontakt führt Strom**
 - Geringe Verluste
- **Leistungshalbleiter schalten**
 - Schaltet schnell
- **AUS-Schalt-Vorgang**
 - **Aktor öffnet mechanischen Kontakt → kurzer Lichtbogen**
 - **IGBT übernimmt Strom (Durchlassspannung < Lichtbogenspannung) und wird abgeschaltet →**
 - **Varistor führt Strom zu Null**
 - **Isolationskontakt öffnet stromlos und isoliert**
 - **Spule limitiert Stromsteilheit beim Kurzschluss**



Isolierstoffe für DC-Kabel und DC-Gehäusewerkstoffe

• Grundlagen elektrisches E-Feld

- AC: E-Feld lediglich abhängig von Spannung und Geometrie
- DC: E-Feld ist gleichgerichtet und unterliegt ausgeprägtem Temperatureinfluss

• Auswirkungen

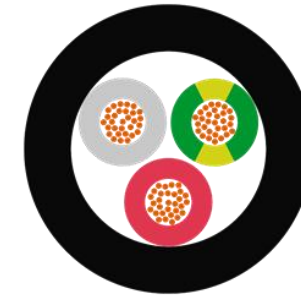
- Unterschiedliche Mechanismen zwischen AC und DC
- Höhere Beanspruchung des Isolierstoffs bei DC möglich:
 - Leitfähigkeit verändert sich mit Temperatur und Feuchtegehalt
 - Polarisationsprozesse, Feldüberhöhungen, Feldmigrationen
 - Materialverhalten nichtlinear abhängig von Feldverteilung

• DC-INDUSTRIE2

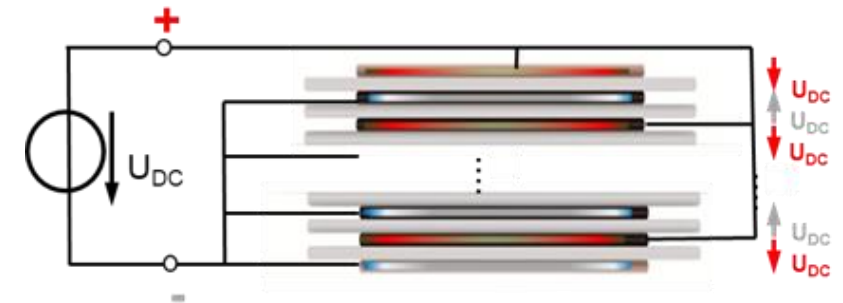
- Beschleunigte Alterung ausgewählter typischer AC-Isolierstoffe
 - unter DC-Beanspruchung unter Laborbedingungen
- Isolierstoffe: Einfluss von Weichmachern, Füllstoffen und der Art des Innenleiters (blankes Kupfer oder verzinkt) auf die DC-Beständigkeit
- Gehäusewerkstoffe: Untersuchungen zum Alterungsverhalten bei erhöhter Temperatur

• Ergebnisse

- Geeignete DC-Isolierstoffe sind verfügbar



Quelle: Lapp



Modellanlagen von DC-INDUSTRIE (2016 – 2019)

• Mercedes-Benz

- Fertigungszelle mit 4 Robotern
- Hochenergie-Anwendung Alu-Schweißen
- Aus EU Projekt AREUS



• Mercedes-Benz

- Elektrohängebahn
- 5 Einzelantriebe mit Schleifringen
- Kopplung von zwei Anwendungen



• Homag

- Holzbearbeitungsmaschine
- Viele Lasten
- Sensorik & Aktorik
- Anbindung Energiespeicher



• KHS

- Getränkeboxen palletieren und depalletieren
- Offenes Konzept
- Mehr als 30 Antriebe



Modellanlagen von DC-INDUSTRIE (2016 – 2019)

• Mercedes-Benz

- Fertigungszelle mit 4 Robotern
- Hochenergie-Anwendung Alu-Schweißen
- Aus EU Projekt AREUS



• Mercedes-Benz

- Elektrohängebahn
- 5 Förderrhythmen mit Schleifringen
- Kettentrang von zwei Antrieben



• Geräte aller Partner arbeiten zusammen

• DC-Systemkonzept wurde bestätigt

• Etwa 60 Kurzschlüsse wurden fehlerfrei abgeschaltet

• 80%-Reduktion der Einspeiseleistung in einer Anlage

- Getränkeboxen entleeren und füllen
- Offenes Konzept
- Mehr als 30 Antriebe



Modellanlagen von DC-INDUSTRIE2 1 / 4

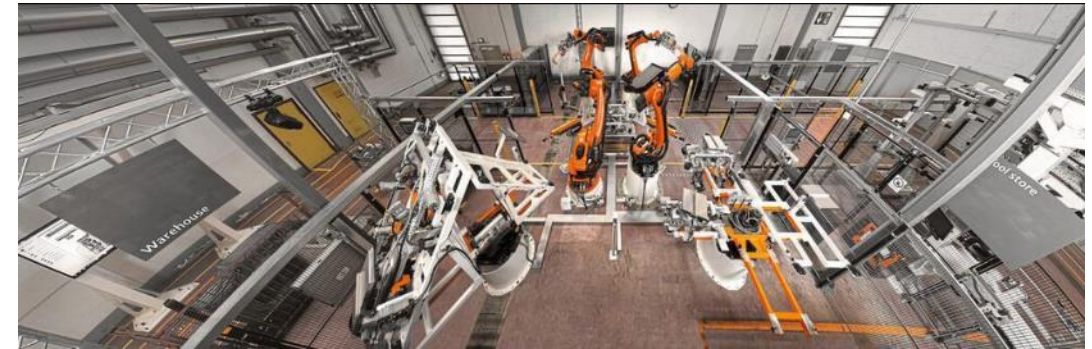
• BMW

- Fertigung Autokarosserie
- Fokus
 - Energieverteilung & -speicherung
 - Energierückspeisung ins Netz
 - Schalten und Schütze



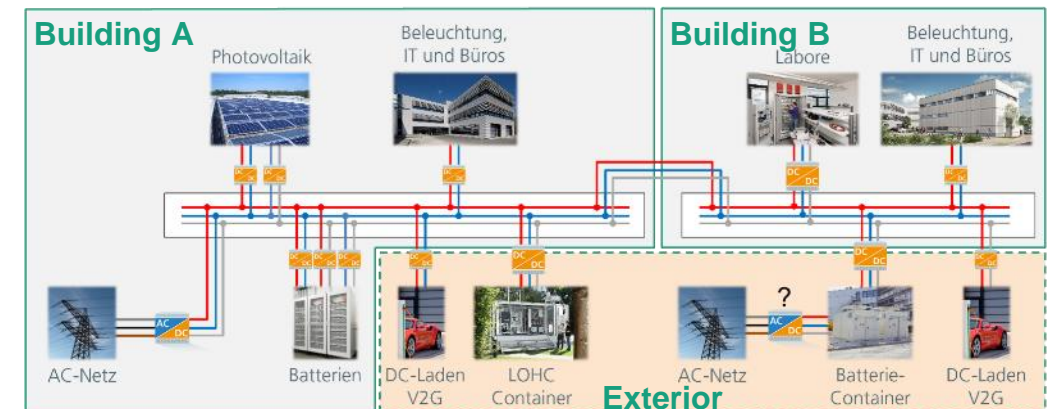
• KUKA

- Testzelle mit 4 Robotern • Fokus: Steuerung



• Fraunhofer IISB

- DC Infrastruktur in Büroumgebung, E-Auto-Laden



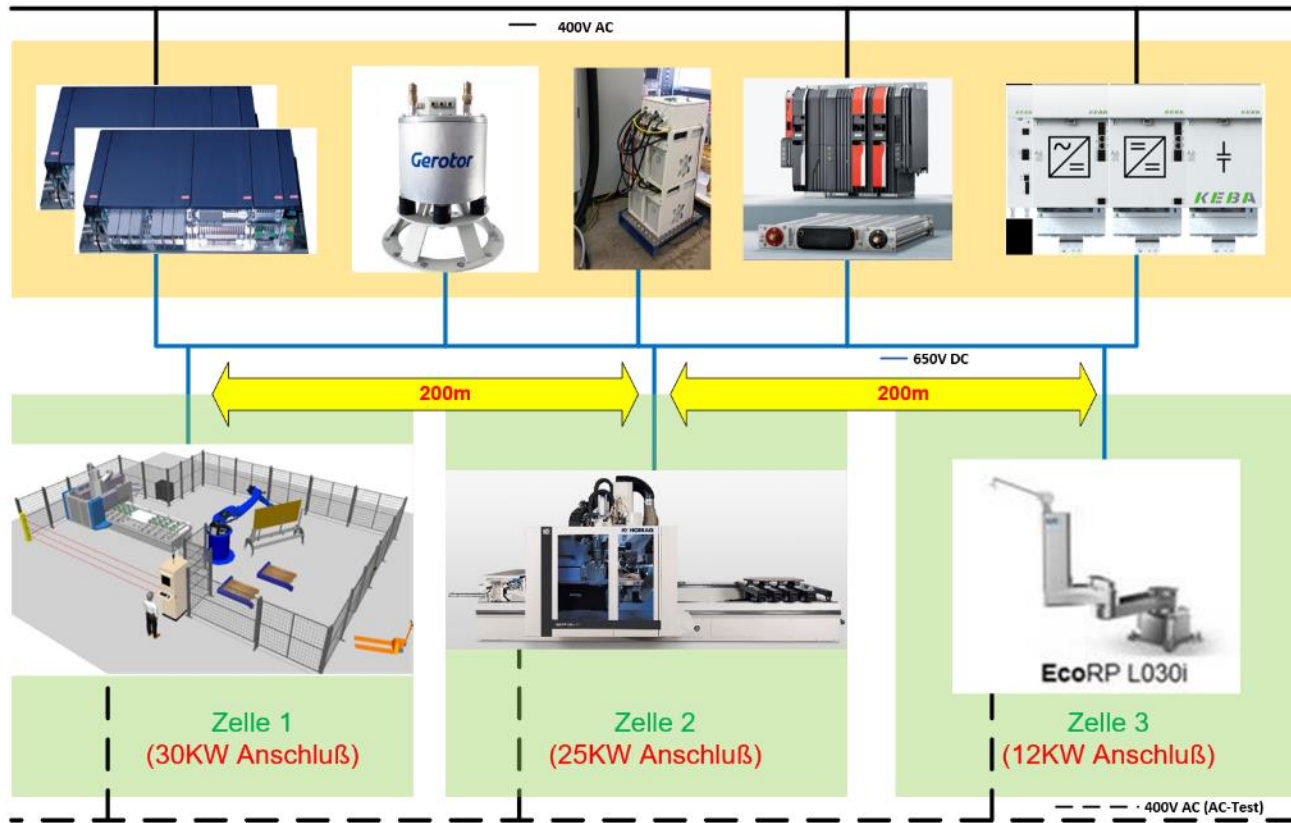
Modellanlagen von DC-INDUSTRIE2 2 / 4



Mercedes-Benz Factory 56

- Anlage dient im Projekt für Untersuchung großer Ausdehnungen und Leistungen
- Produktionsfläche der Montage 222.000 m²
- 2 MW-Gleichstromnetz für die Halleninfrastruktur
- direkte Einbindung Photovoltaik 5.7 MWp
- Ziel ist CO₂-neutrale Produktion

Modellanlagen von DC-INDUSTRIE2 3 / 4



• Homag

- Holzbearbeitungsmaschinen
- Drei Anwendungen verteilt in einer Produktionshalle
- Setup
 - Mehrfacheinspeisung aus dem AC-Netz
 - Verschiedene Speicheroptionen
 - Schwungmassenspeicher
 - Kondensatoren
 - Batterien
- Fokus
 - Einfluss langer Leitungen auf Spannungseinbrüche während Netzausfällen und -fehlern
 - Koordination der Mehrfacheinspeisung mit Active Infeed Convertern (AICs)

		Projekt: DC-INDUSTRIE2 HOMAG Demonstrator	Datum: 31.03.2021	
			Zust.	Änderung

Modellanlagen von DC-INDUSTRIE2 4 / 4

• TH OWL

- Nachbildung elektromechanischer Lasten
- Energiespeicher • Mehrere Einspeiser
- Fokus
 - Lastnachbildung in Echtzeit
 - Test virtueller Maschinen im DC-Netz
 - Nachbildung von Fehlerfällen

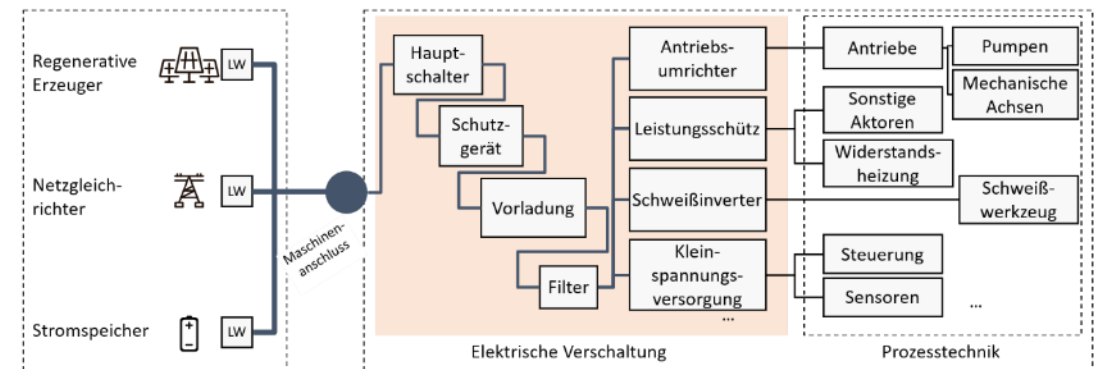


• Fraunhofer IPA

- Industrielle Energieverteilung
- AC-DC Transformation
- Schutzkonzept
- Parallelbetrieb von AICs



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



Weiterführende Informationen und Veröffentlichungen (Beispiele)

- **DC-INDUSTRIE Website**
www.dc-industrie.de
- **Publikationen (Auswahl)**
 - Positionspapier
 - Deutsch und Englisch
 - Diverse Fachaufsätze und Berichte
 - Fachbuch *Die Gleichstromfabrik* im Hanser Verlag,
<https://www.hanser-fachbuch.de/buch/Die+Gleichstromfabrik/9783446465817>
 - Deutsche und englische Version lieferbar



- **Computer & Automation**
 - [4 Artikel zur Technik von DC-INDUSTRIE](#)

- **Hannover Messe 2022**



Hannover Messe 2022 Präsentationen

<https://experience.dc-industrie.zvei.org>



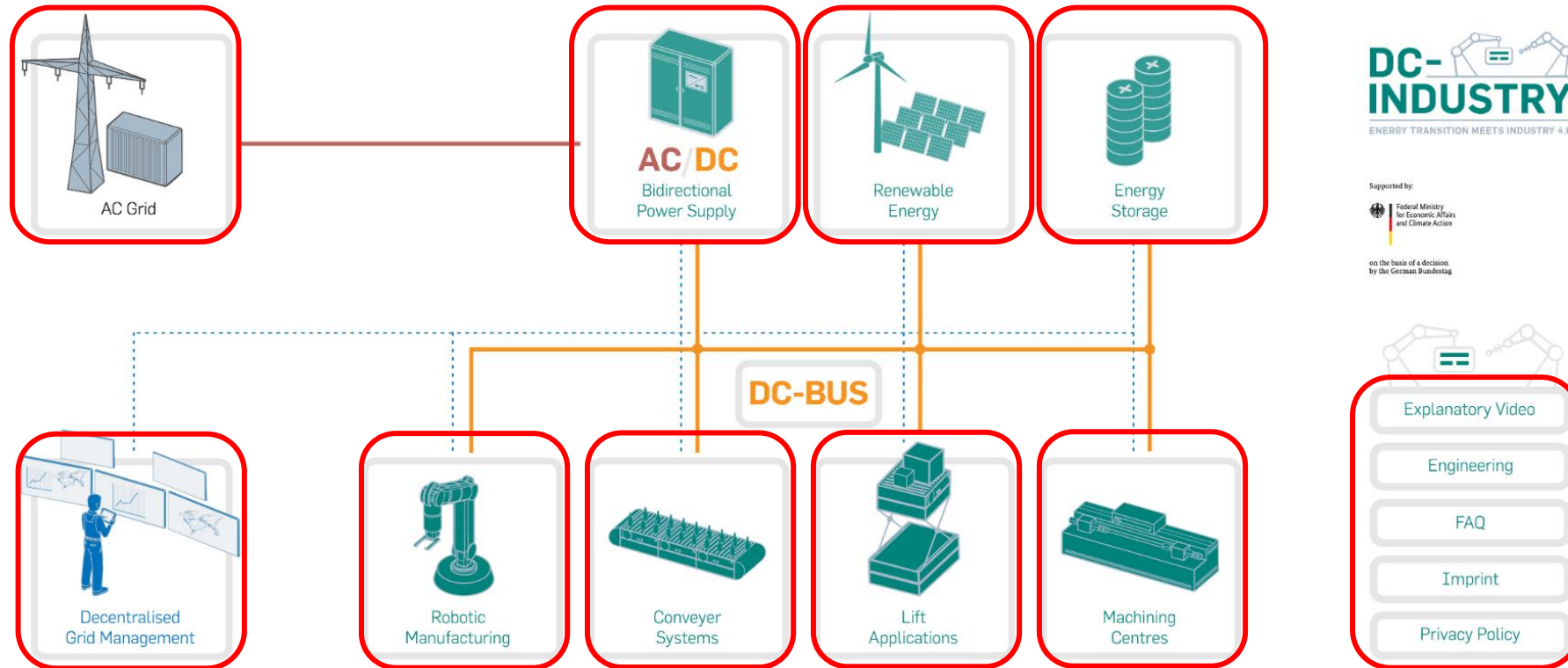
RIE 4.0



Start Topics ▾

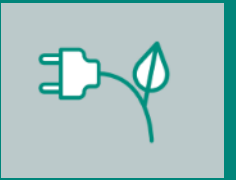
DC-INDUSTRIE: Open DC Grid for Sustainable Factories

Click for more info



Vorteile von DC & DC-INDUSTRIE

1. Offenes System
2. Einfache Integration grüner Energie
3. Ressourcenschonung
4. Niedrigerer Energieverbrauch
5. Geringere Einspeiseleistung
6. Erhöhte Verfügbarkeit

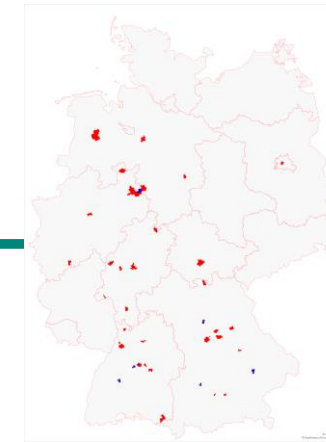


DC-INDUSTRIE2 Team: Begeistert von der Gleichstromfabrik



Lemgo, Sep. 2019

Projektpartner – www.dc-industrie.de



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Rolls-Royce
Motor Cars Limited



Mercedes-Benz



Assoziierte Partner: ABB Stotz-Kontakt; AMK Arnold Müller; Audi; Bauer Gear Motor; Bender; Danfoss; DEHN; ESR Pollmeier; Gerotor; Harting; JEAN MÜLLER; KUKA; LEONI; Maschinenfabrik Reinhausen; Paul Vahle; Puls; Rittal; SEW-PowerSystems; Siemens; TU Ilmenau; Wöhner