

Vorlesung Praxis Leistungselektronischer Systeme

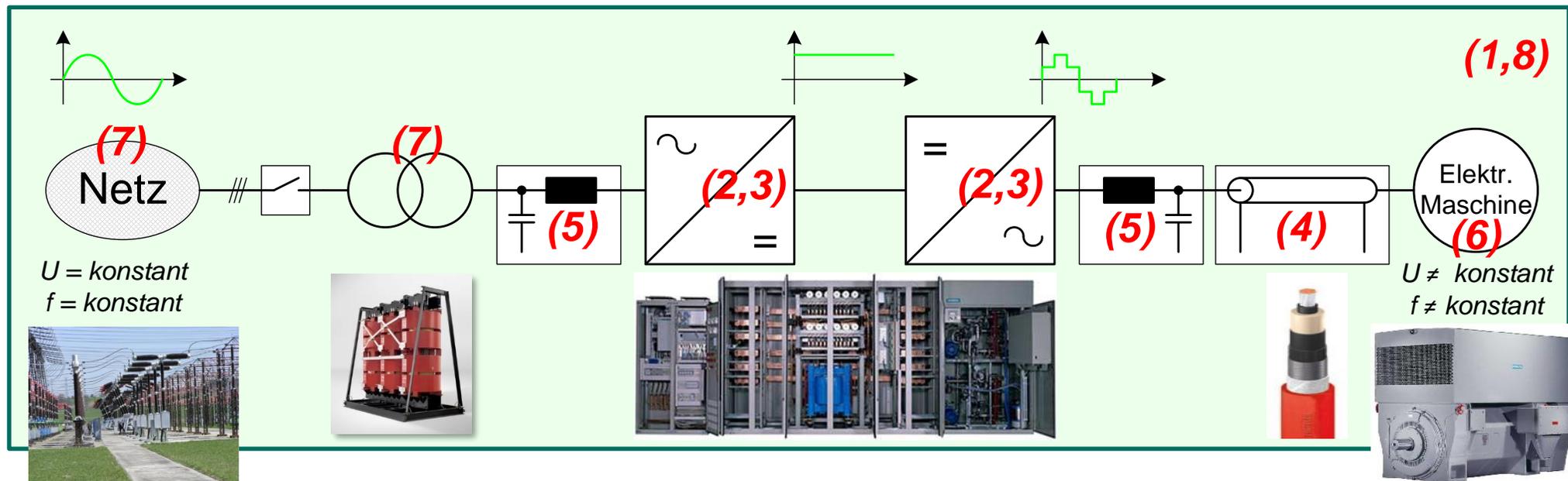
WS2021/22

Elektrotechnisches Institut (ETI) – Leistungselektronische Systeme

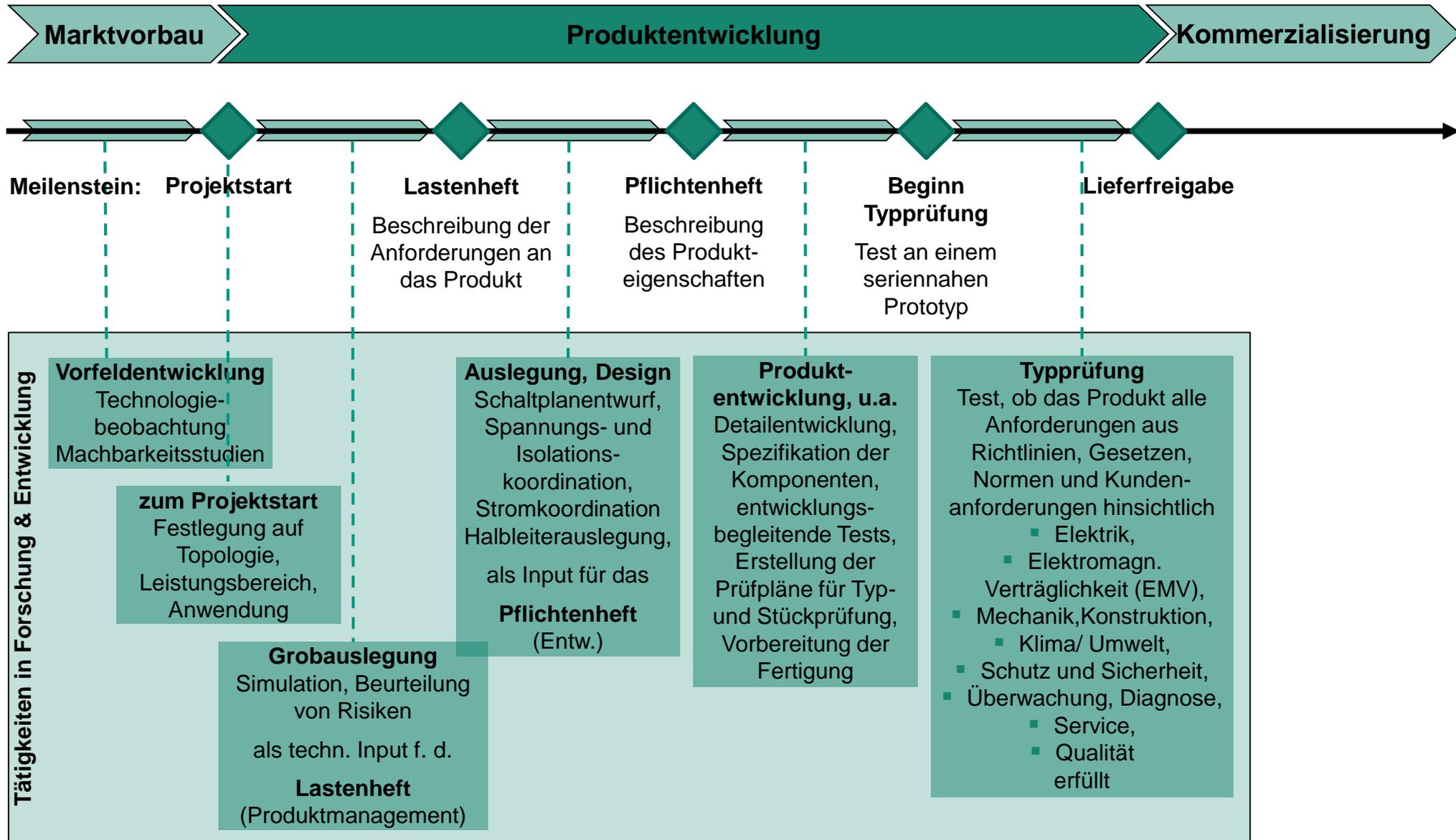


Vorlesungsinhalte

- Kapitel 0: Einleitung
- Kapitel 1: Systemübersicht**
- Kapitel 2: Stromrichterauslegung
- Kapitel 3: Halbleiterauslegung
- Kapitel 4: Kabel
- Kapitel 5: Filter
- Kapitel 6: Wechselwirkung Umrichter/Maschine
- Kapitel 7: Netz
- Kapitel 8: Systembetrachtungen



Übersicht über den Produktentwicklungsprozess



Gliederung

Systemübersicht

1. Spannungs- und Leistungsbereiche
2. Energieeffizienz
3. Anwendungen
 - 3.1 Antriebe
 - 3.2 Netzanwendungen
4. Leistungshalbleiter
5. Stromrichtertopologien
6. Zusammenfassung

1. Spannungs- und Leistungsbereiche

Anderswohin: ab 60V DC Hochvolt systeme

Kategorie		Kleinspannung Extra Low Voltage (ELV)	Niederspannung Low Voltage (LV)	Mittelspannung* Medium Voltage (MV)
Motorspannung		< ~50 V	< 1000V typisch: 400V, <u>690V</u>	bis <u>ca. 13,2kV</u> typ.: 2,3/3,3/4,16/6/6,6/10/13,2kV
Leistung		< 500 W	< 10 MW	< 100 MW
Markt- anteil	Stück	97,3%	2,7%	< 0,005%
	Leistung	41%	44%	15%
				
				

* übliche Bezeichnung für Umrichter (Bez. „Hochspannung“ bei Maschinen üblich)

Quelle: Faulhaber, SEW Eurodrive, Siemens

1. Spannungs- und Leistungsbereiche

Kategorie		Kleinspannung Extra Low Voltage (ELV)	Niederspannung Low Voltage (LV)	Mittelspannung* Medium Voltage (MV)
Motorspannung		< ~50 V	< 1000V typisch: 400V, 690V	bis ca. 13,2kV typ.: 2,3/3,3/4,16/6/6,6/10/13,2kV
Leistung		< 500 W	< 10 MW	< 100 MW
Markt- anteil	Stück	97,3%	2,7%	< 0,005%
	Leistung	41%	44%	15%
		 	 	 

Systementscheidung LV/MV abhängig von:

- Netzverhältnissen
- Kabellänge
- Verfügbarer Platz
- Verfügbarkeit von geschultem Personal
- Systemkonzept
- Kosten

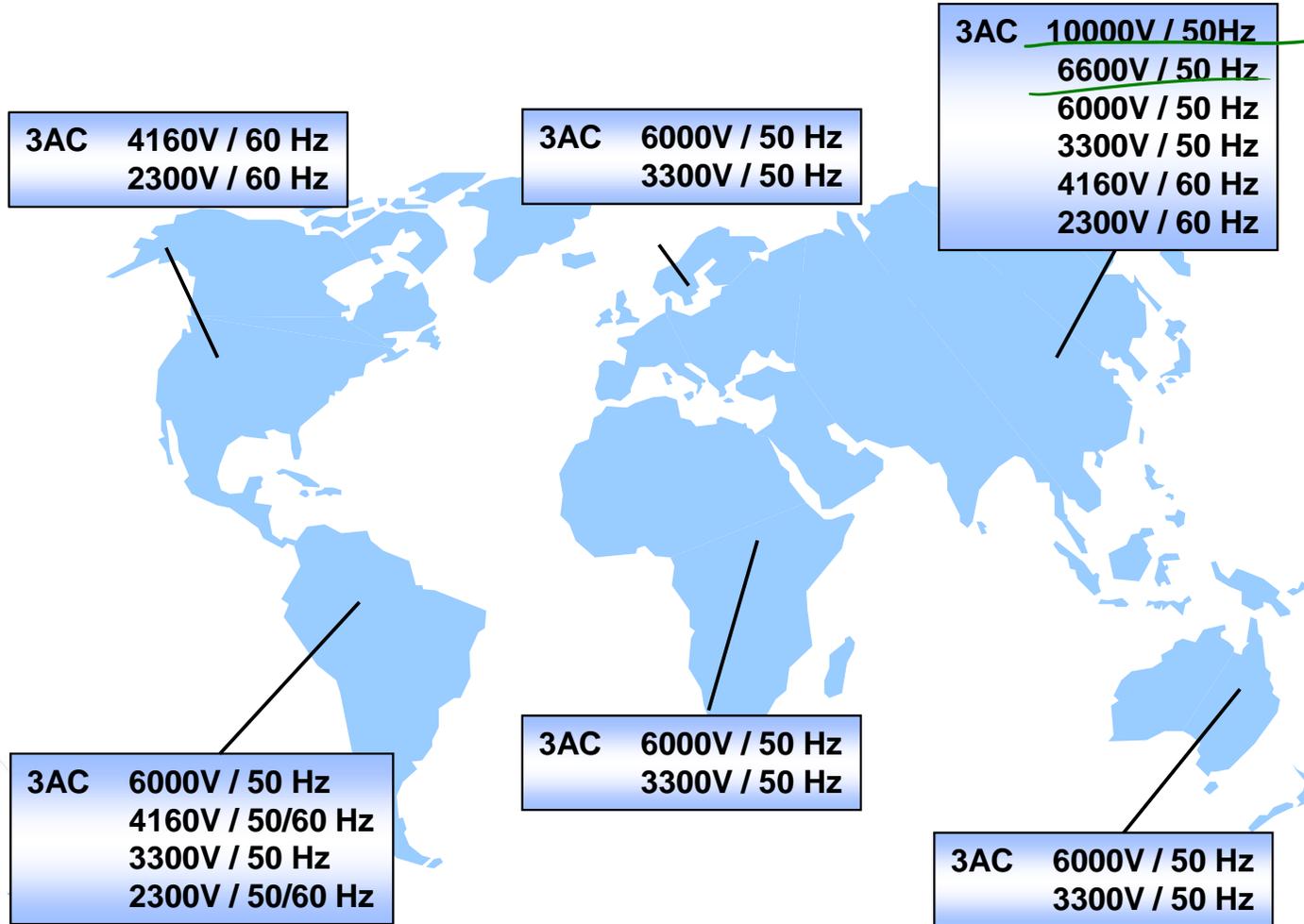
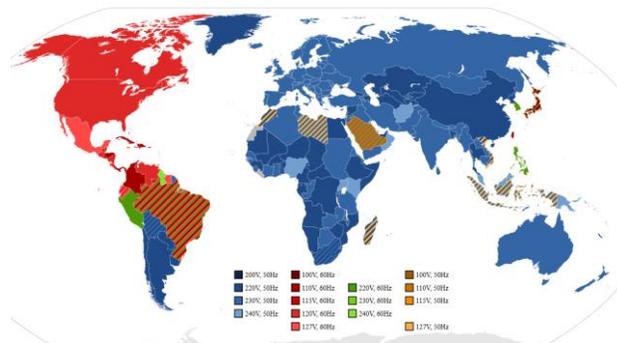
* übliche Bezeichnung für Umrichter (Bez. „Hochspannung“ bei Maschinen üblich)

Quelle: Faulhaber, SEW Eurodrive, Siemens

1. Spannungs- und Leistungsbereiche – MV-Netzspannungen

Markt für
Mittelspannungsantriebe:

- Großer Marktbedarf für Mittelspannungsantrieb von 0,25 bis ca. 4 MVA bei Spannungen von 3,3 kV bis 10 kV.
- ca. 70% der Anwendungen sind Pumpen- oder Lüfterantriebe (Energiespar-Potenzial).
- Der überwiegende Teil der weltweiten Mittelspannungsantriebe sind Festdrehzahl-Antriebe



1. Spannungs- und Leistungsbereiche – MV-Netzspannungen

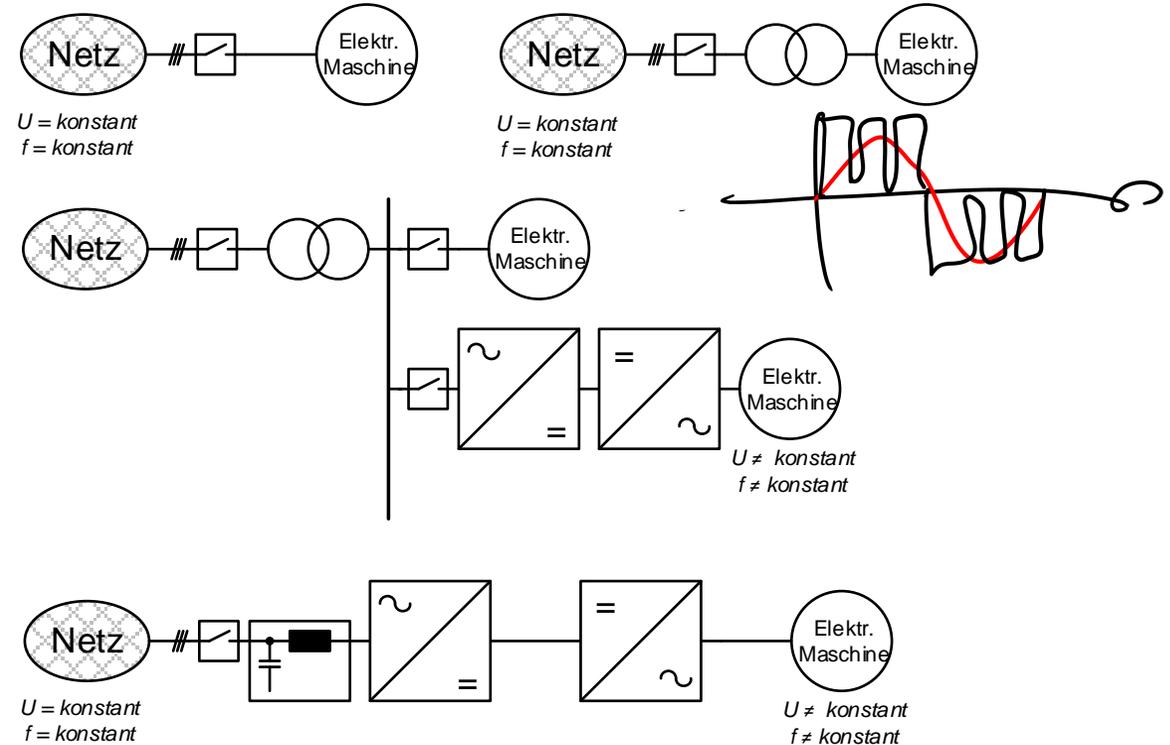
- Die Spannungsebene eines Antriebs wird u.a. von folgenden Faktoren bestimmt:

- Historisch etablierten MV-Spannungsebenen

- Bereits vorhandenen Betriebsmittel (Motoren, Schaltanlagen, Transformatoren)

- Ist der Betrieb ohne Netztransformator gewünscht (Vorteile bzgl. Wirkungsgrad, Kosten, Platzbedarf; Nachteile bzgl. Potenzialtrennung) ?

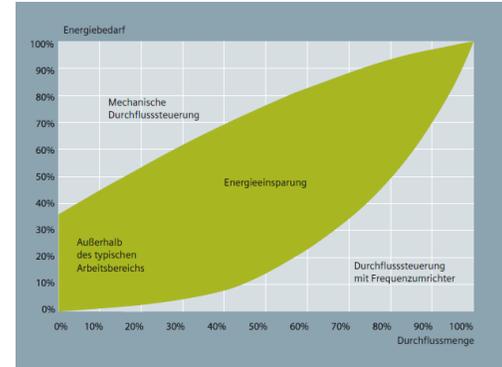
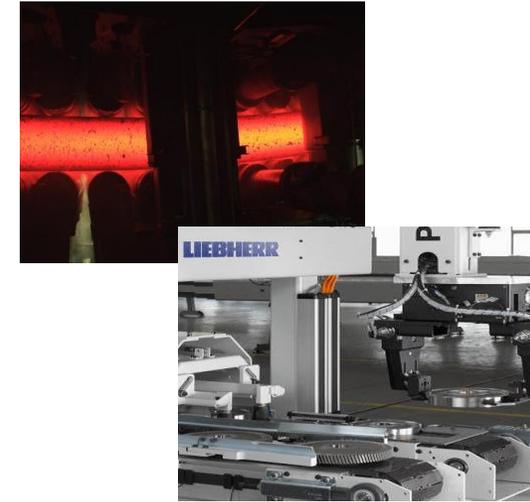
- Kosten: Für die reinen Stromrichterkosten gilt in vielen Anwendungen bis in den Bereich 5-15 MVA (je nach Leistungshalbleiter, Beispiel Windenergieanlagen):
„Fange nie mit Spannung an, was man auch mit Ampere kann“ ☺



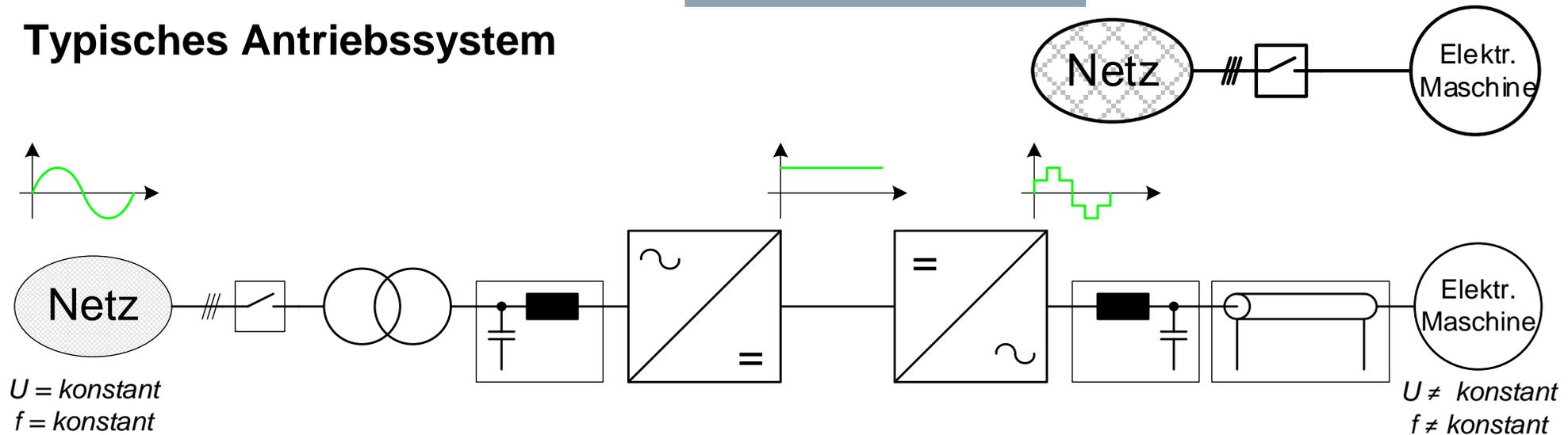
2. Energieeffizienz

Warum stromrichter-gespeiste Antriebe?

- Wachsende Zahl an herausfordernden Antriebsaufgaben
- Steigerung der Energieeffizienz



Typisches Antriebssystem

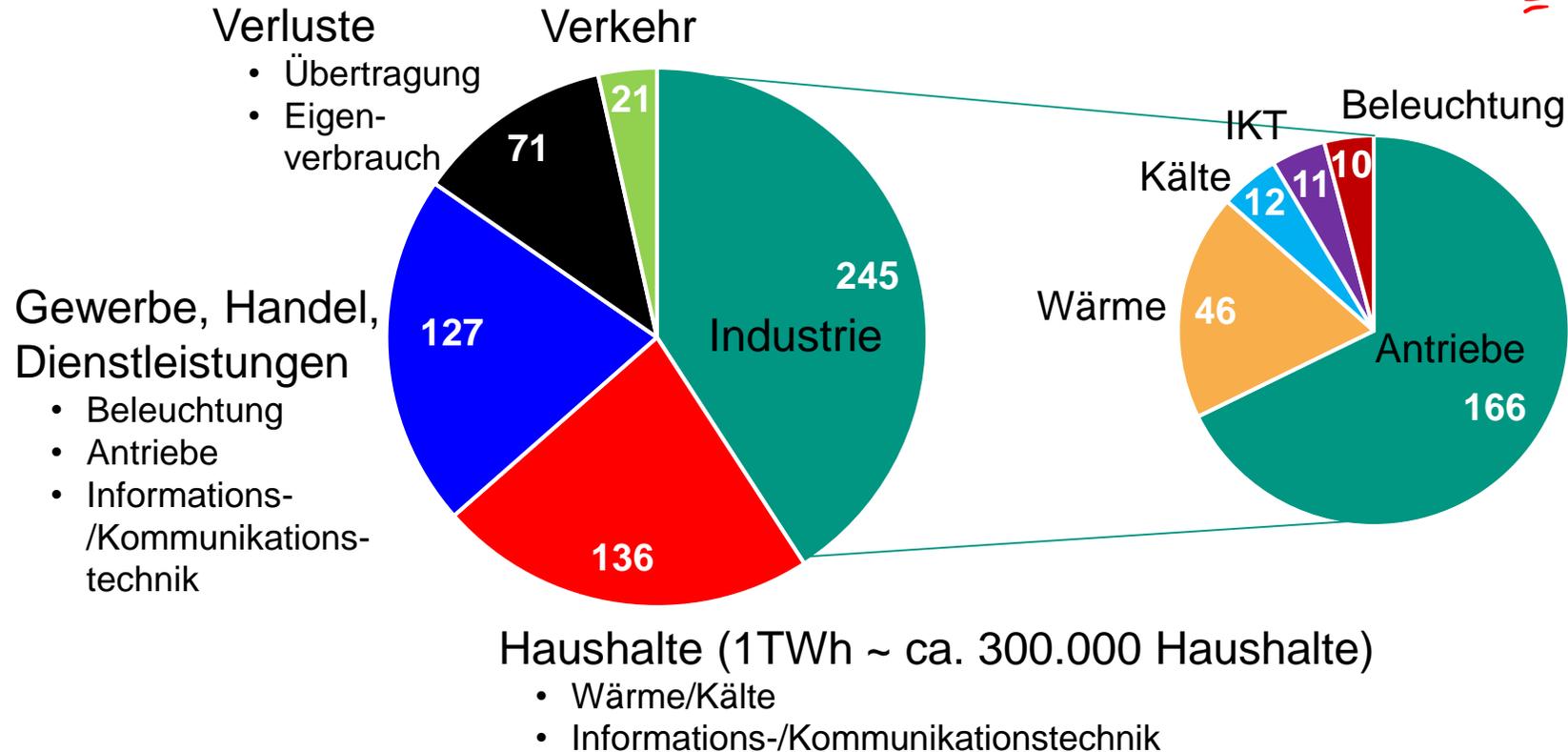


2. Energieeffizienz

■ Stromverbrauch 2013 in Dtl.: 600 TWh

ca. 20% Anteil am gesamten Endenergieverbrauch (Endenergie: 37% Kraftstoffe, 27% Gas, 20% Strom, 5% Kohle)

$$45 \cdot 10^6 \cdot 150 \cdot \cancel{100 \text{ km}} \cdot 20 \frac{\text{kWh}}{\cancel{100 \text{ km}}} = 135 \text{ TWh}$$

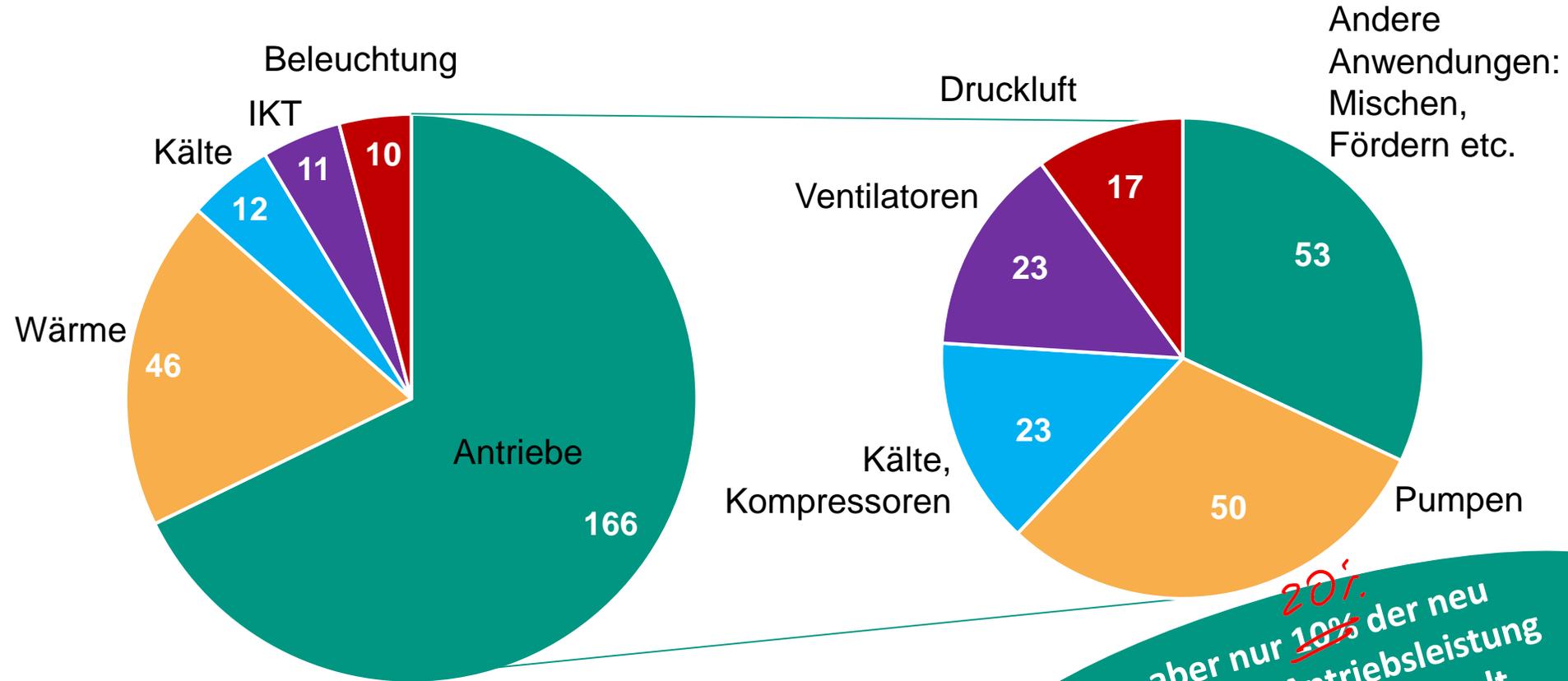


alle Angaben in TWh

Quelle: Energiedaten Gesamtausgabe BMWi, AG Energiebilanzen e.V.

2. Energieeffizienz

■ Haupt-Energieverbraucher in der Industrie in Deutschland (in TWh, 2013)



20%
... aber nur ~~10%~~ der neu installierten Antriebsleistung wird elektrisch geregelt

alle Angaben in TWh

Quelle: Rationelle Energiegewinnung in der Industrie, Fraunhofer Institut System und Innovationsforschung Karlsruhe; Siemens

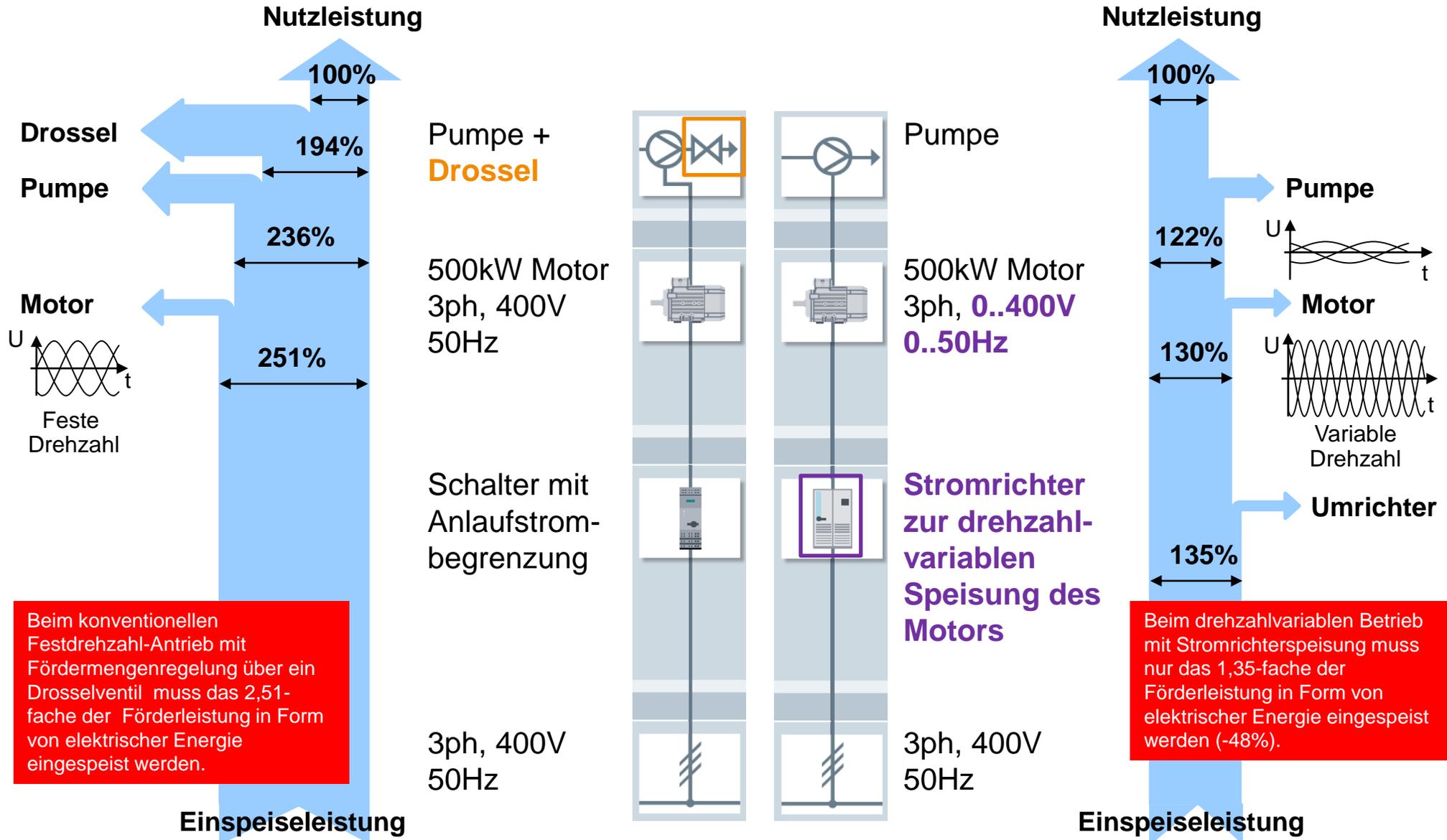
2. Energieeffizienz - Beispiel

Beispiel: Wasserpumpe	
Leistung	500 kW
Förderstrom	1300 m ³ /h
Wirkungsgrad der Pumpe in Abh. der Fördermenge	20% @ 130 m ³ /h 47% @ 390 m ³ /h 69% @ 650 m ³ /h 82% @ 910 m ³ /h 87% @ 1170 m ³ /h 89% @ 1300 m ³ /h
Betrieb	365 Tage / Jahr 24 h / Tag variable Leistung



Quelle: Siemens

2. Energieeffizienz - Beispiel



2. Energieeffizienz - Beispiel

Pumpe +
Drossel

500kW Motor
3ph, 400V
50Hz

Schalter mit
Anlaufstrom-
begrenzung

3ph, 400V
50Hz

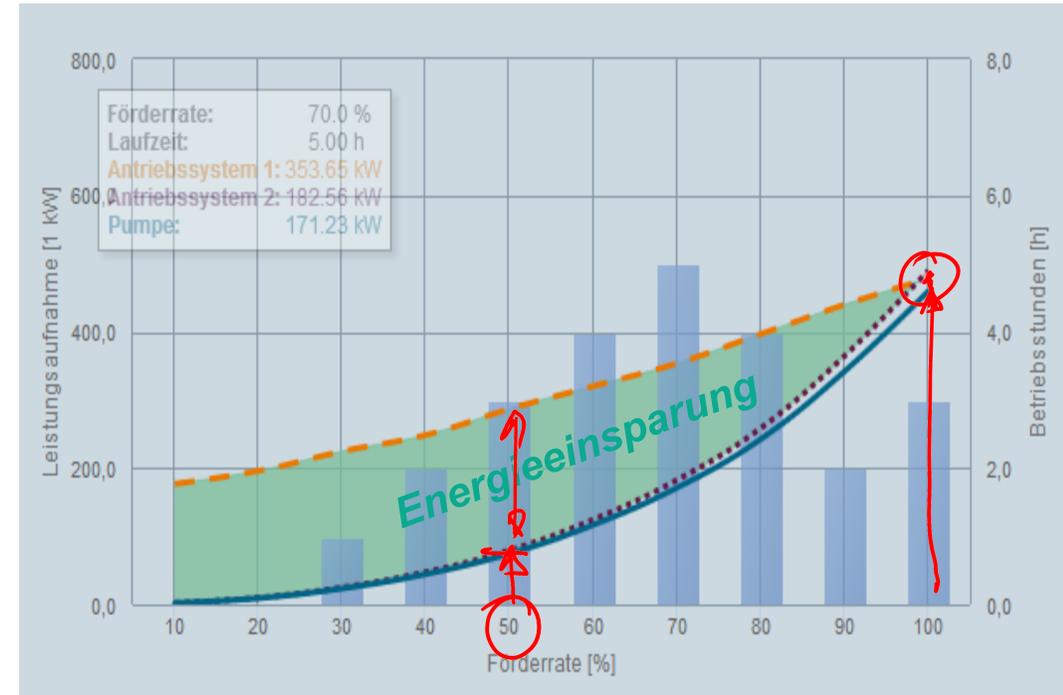


Pumpe

500kW Motor
3ph, **0..400V**
0..50Hz

Stromrichter
zur drehzahl-
variablen
Speisung des
Motors

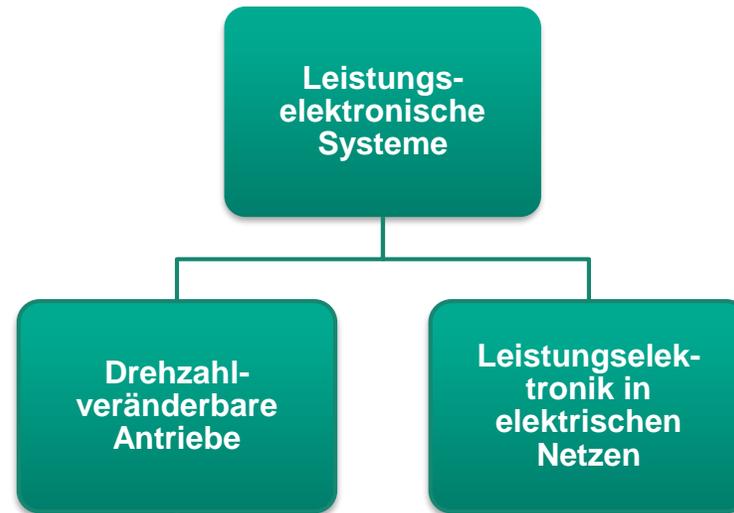
3ph, 400V
50Hz



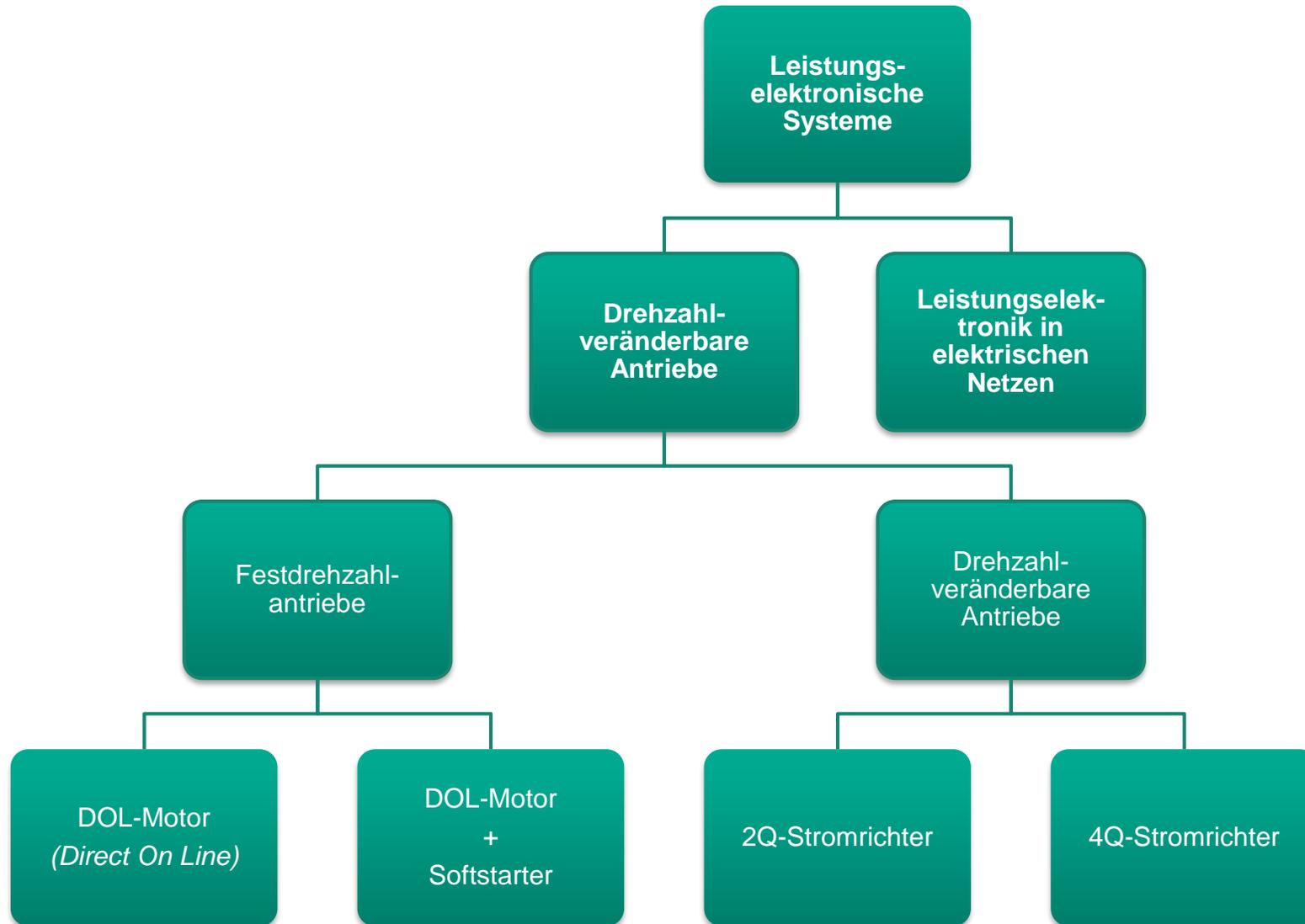
- **Drossel:** 3,1 Mio kWh / Jahr
- **Stromrichter:** 1,8 Mio kWh / Jahr
- **Einsparung:** **1,3 Mio. kWh / Jahr**
814 t CO₂ / Jahr
- **Amortisationszeit: ca. 2 Monate**
- Die Energiebilanz einer mit konstanter Drehzahl betriebenen Pumpe wird immer ungünstiger, je kleiner die benötigte Fördermenge ist.

Quelle: Siemens

3. Anwendungen

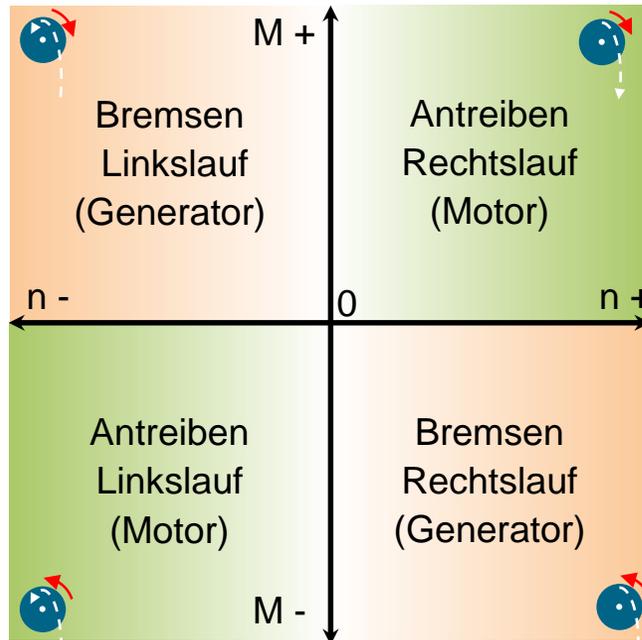


3. Anwendungen



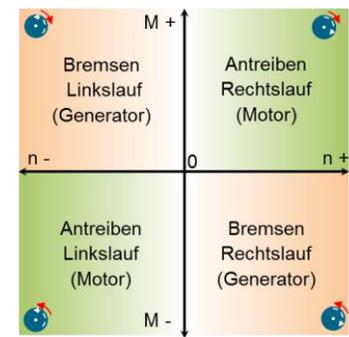
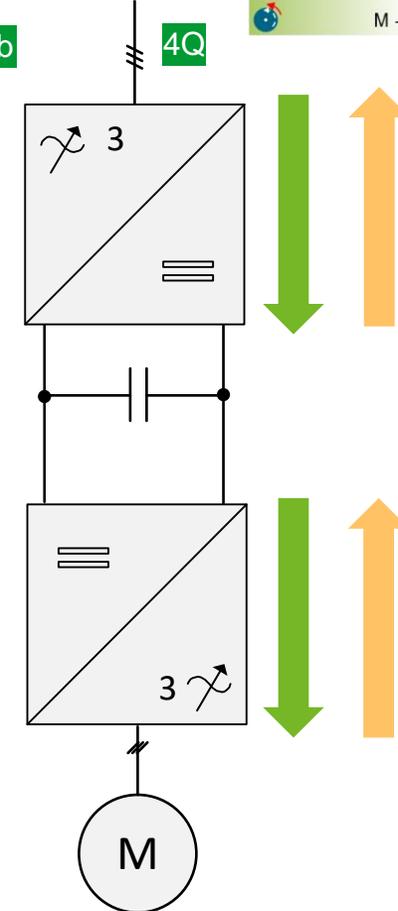
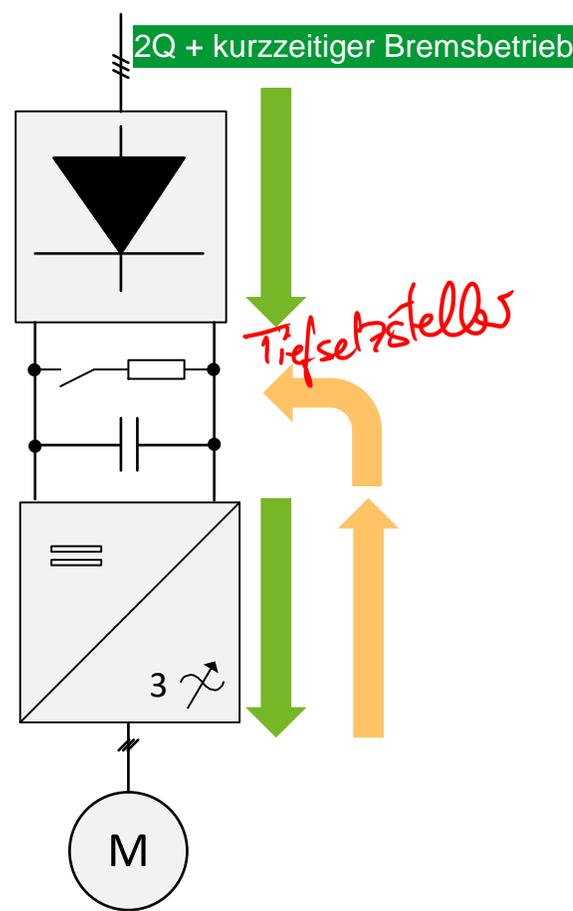
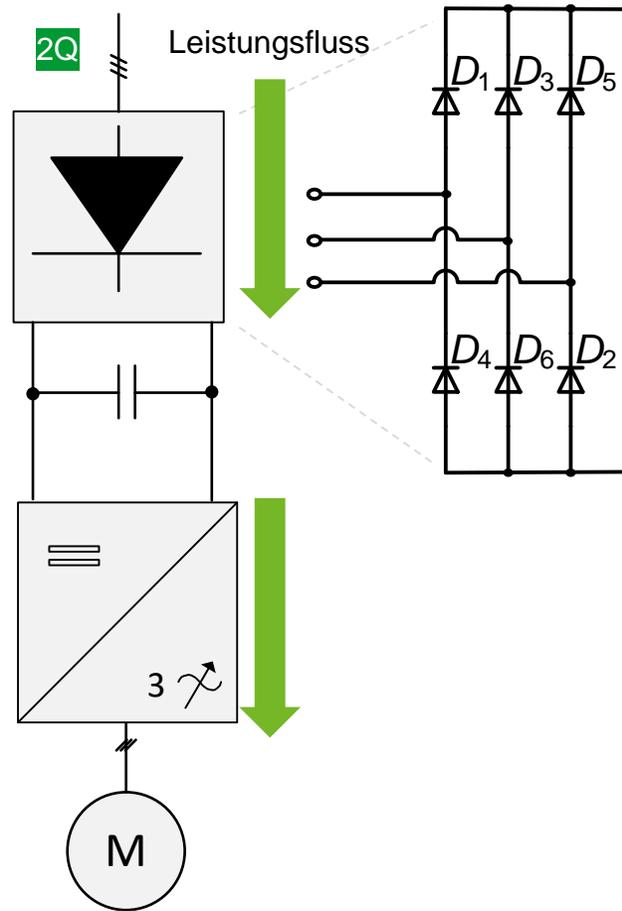
Stromrichter-gespeiste Antriebe - Anwendungen

■ Definition der Quadranten

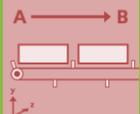
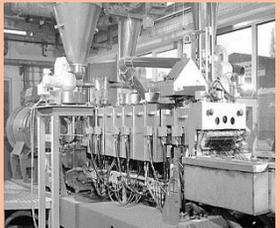


Stromrichter-gespeiste Antriebe

■ Stromrichter-gespeiste Antriebe – Leistungsfluss

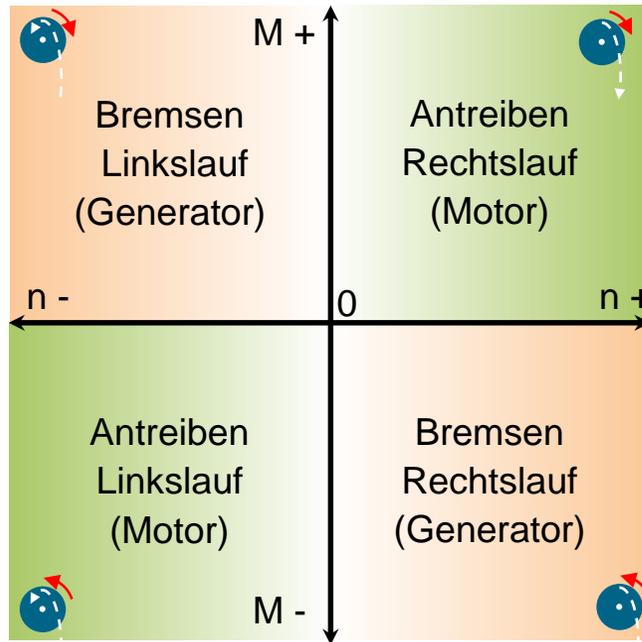


3. Anwendungen – Stromrichtergespeiste Antriebe

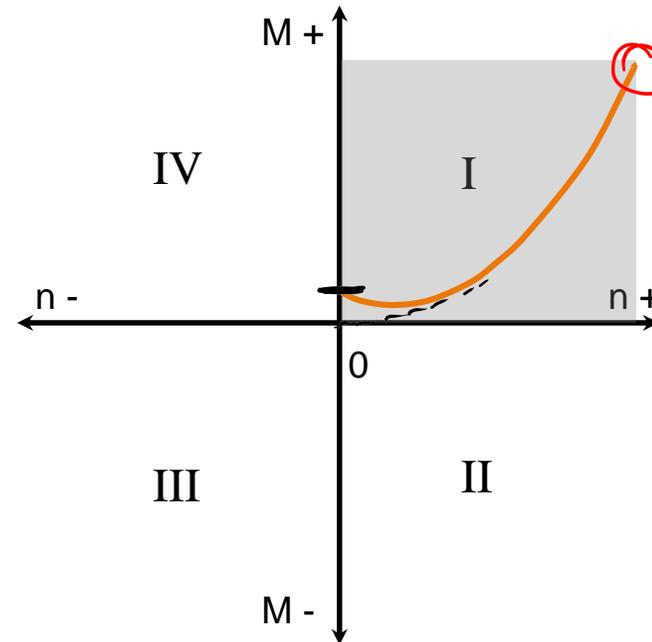
 Verdichten Pumpen Lüften	 Bewegen	 Verarbeiten	 Bearbeiten
<p data-bbox="529 385 690 421">Verdichter</p>  <p data-bbox="555 671 665 706">Pumpe</p>  <p data-bbox="555 935 657 971">Lüfter</p> 	<p data-bbox="937 378 1151 414">Förderbänder</p>  <p data-bbox="937 671 1166 706">Querschneider</p>  <p data-bbox="937 935 1166 971">Containerkräne</p> 	<p data-bbox="1414 378 1554 414">Extruder</p>  <p data-bbox="1414 671 1549 706">Mühlen</p>  <p data-bbox="1388 935 1567 971">Walzwerke</p> 	<p data-bbox="1770 385 2063 421">Werkzeugmaschine</p>  <p data-bbox="1860 671 1974 706">Fräsen</p>  <p data-bbox="1847 942 1987 978">Robotics</p> 

Quelle: Siemens

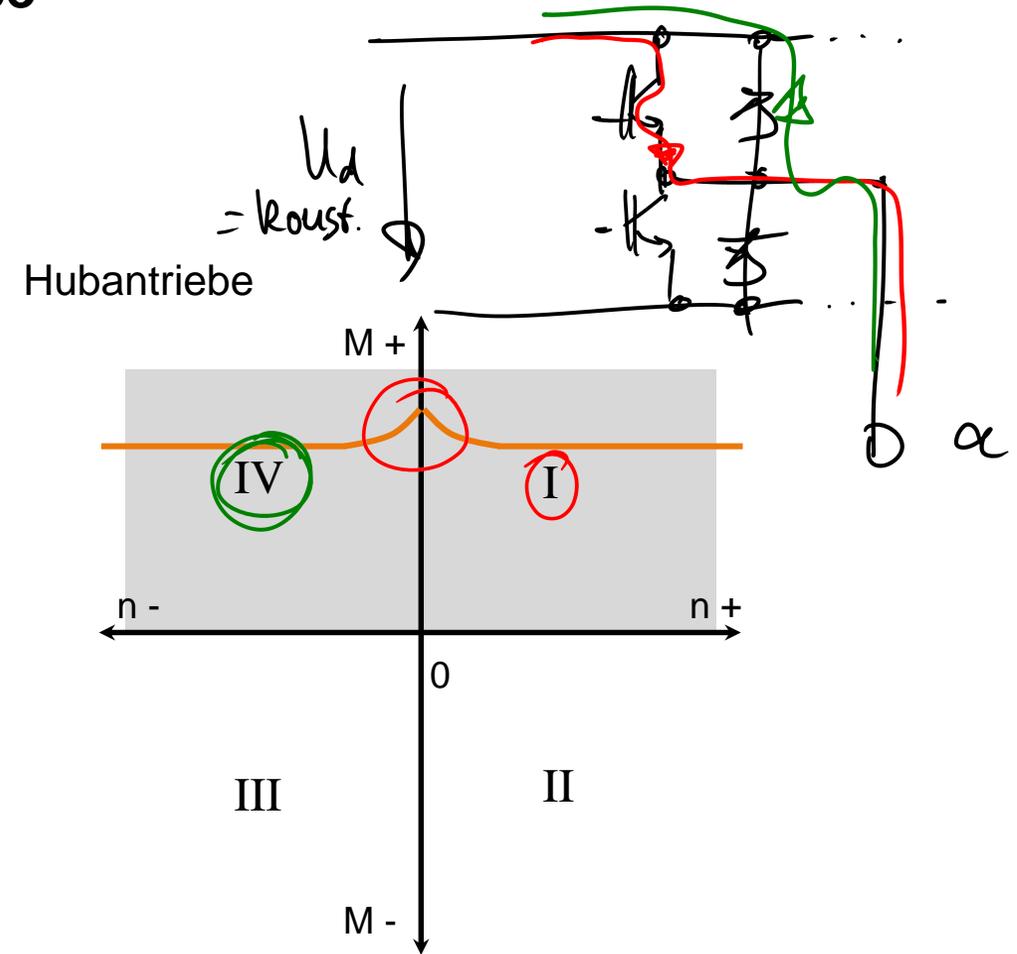
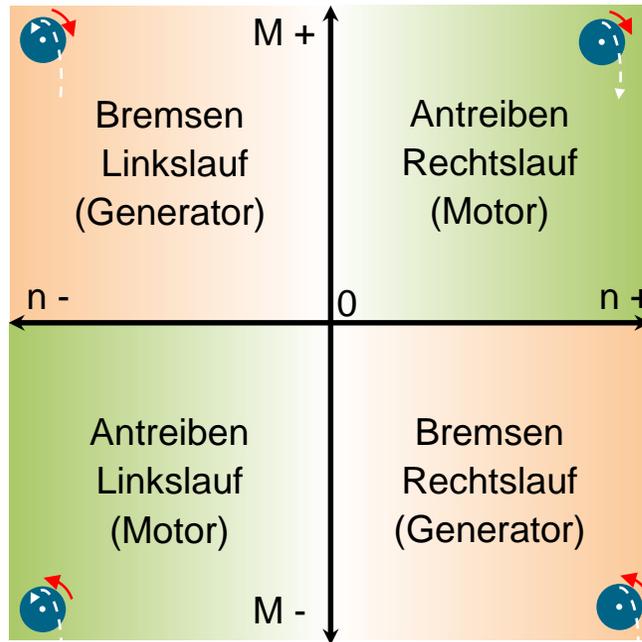
3. Anwendungen – Stromrichter-gespeiste Antriebe



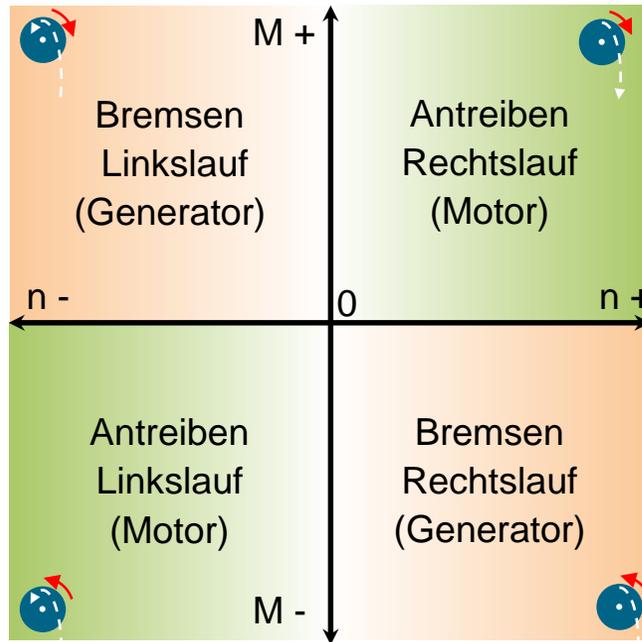
Pumpe, Lüfter, Verdichter



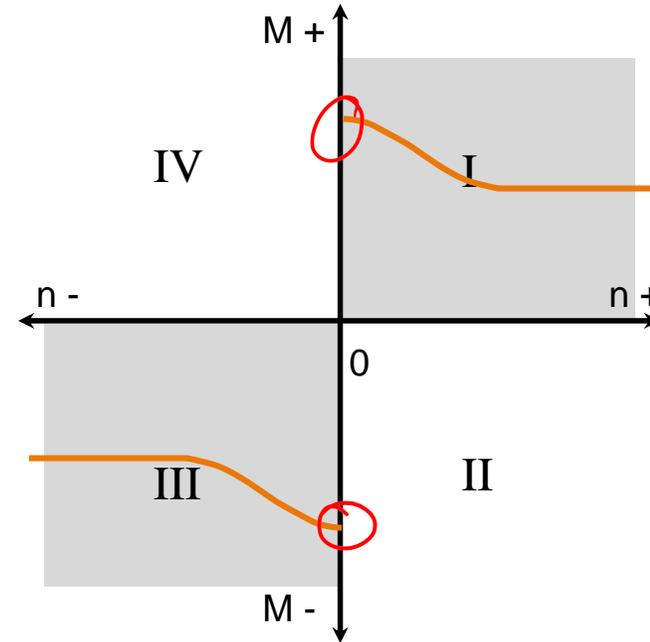
3. Anwendungen – Stromrichter gespeiste Antriebe



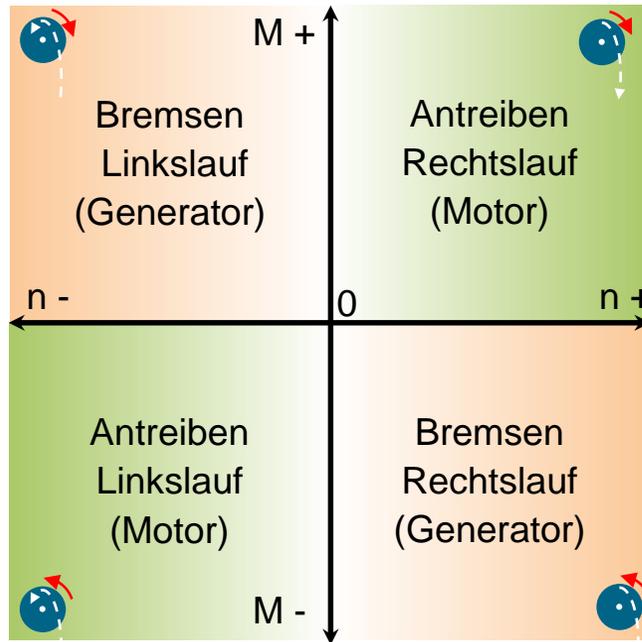
3. Anwendungen – Stromrichter gespeiste Antriebe



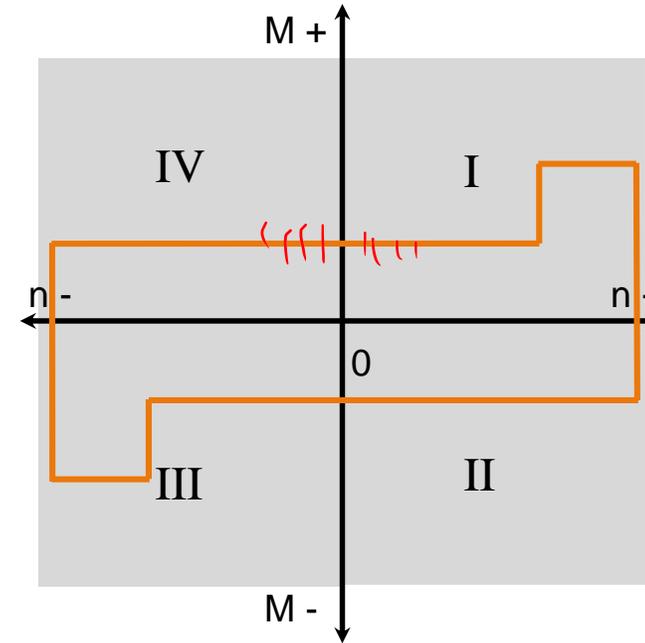
Vorschubantrieb



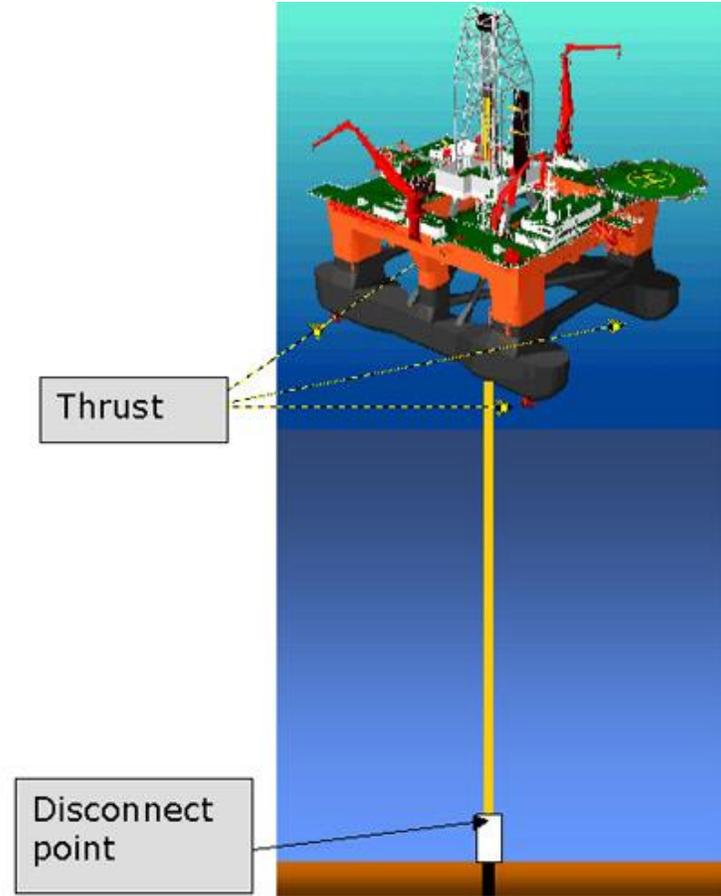
3. Anwendungen – Stromrichter gespeiste Antriebe



Walzstraße

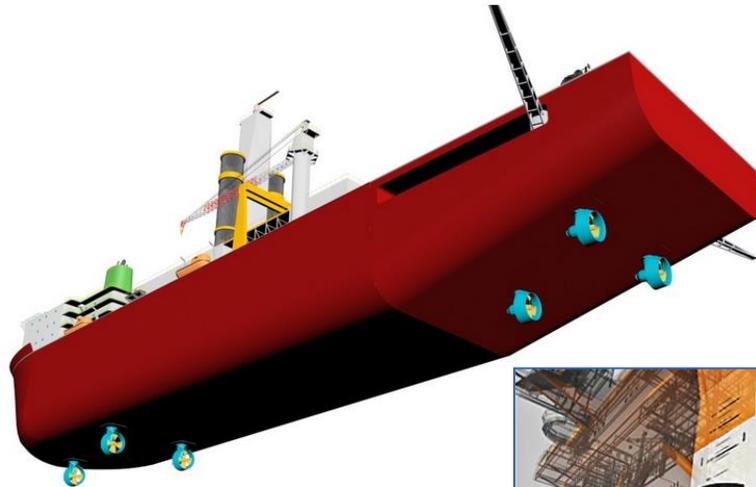


3. Anwendungen – Thrusterantriebe auf Bohrinself/schiffen



3. Anwendungen – Thrusterantriebe auf Bohrinself/schiffen

- GPS-gestütztes „Dynamic Positioning“ mit 6-8 Thrustern von selbstfahrenden Bohrinself und Bohrschiffen
- Kriterien:
 - Dynamik
 - Gewicht- und Platzbedarf
 - Wirkungsgrad (bei geringer Leistung)
 - weltweit in allen Klimazonen einsetzbar



- 6-8 wassergekühlte drehzahlveränderliche Antriebe
 - Motornennspannung: $U=4160\text{ V}$
 - Motornennstrom: $I=1000\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=6,3\text{MW}$; $f=0-70\text{ Hz}$
- Topologie
 - Netzseite: Ungesteuerter Dioden-Gleichrichter (12- bis 24-pulsig)
 - Motorseite: 3-Level Neutral Point Clamped Inverter (3L-NPC) mit 3,3kV-IGBTs

3. Anwendungen – Antriebe von Kreuzfahrtschiffen

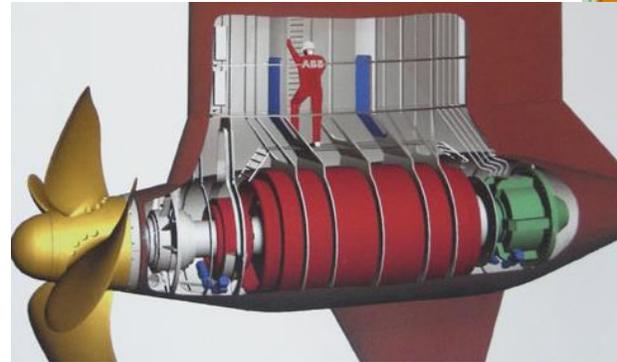


3. Anwendungen – Antriebe von Kreuzfahrtschiffen

- **Dieselelektrischer Antrieb von Kreuzfahrtschiffen**

- Kriterien:

- Zuverlässigkeit, hohe Verfügbarkeit, d.h. mit Redundanz (bei Ausfall eines Antriebs verbleiben noch 75% der Antriebsleistung)
- Leise und vibrationsarm
- Effizienz
- Gewicht- und Platzbedarf



- 4 wassergekühlte drehzahlveränderliche Antriebe
 - Motornennspannung: $U=2600\text{ V}$
 - Motornennstrom: $I=2800\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=12.3\text{ MW}$; $f=0-20\text{ Hz}$ elektrisch, $0-150\text{ rpm}$ mechanisch
- Topologie
 - Netz/Motorseite: Stromrichter motor (Load Commutated Inverter, LCI) mit 5,2kV- bis 8kV-Thyristoren

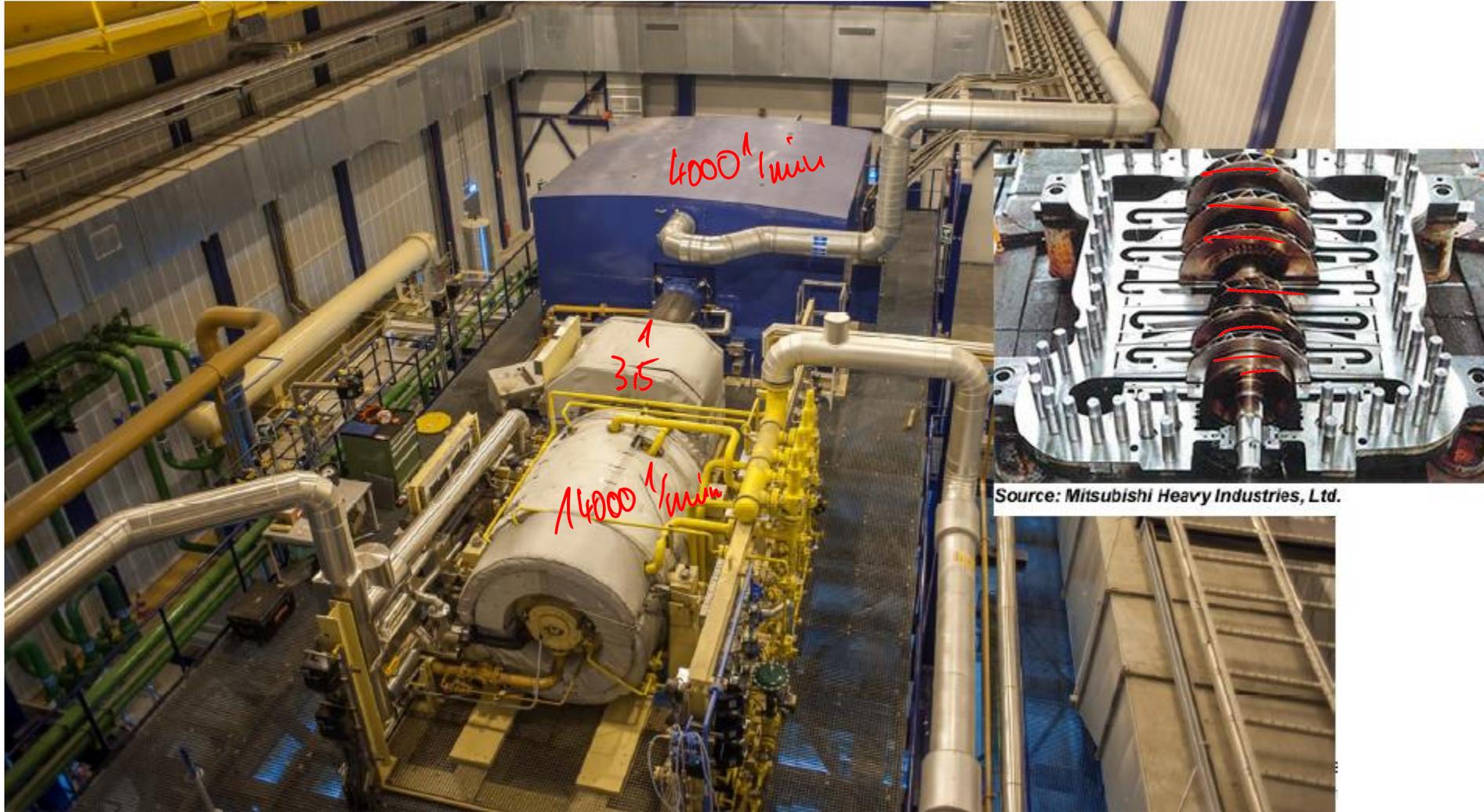
3. Anwendungen – Gasverflüssigung (Liquified Natural Gas – LNG)



Gasverflüssigungsanlage Hammerfest (Norwegen)

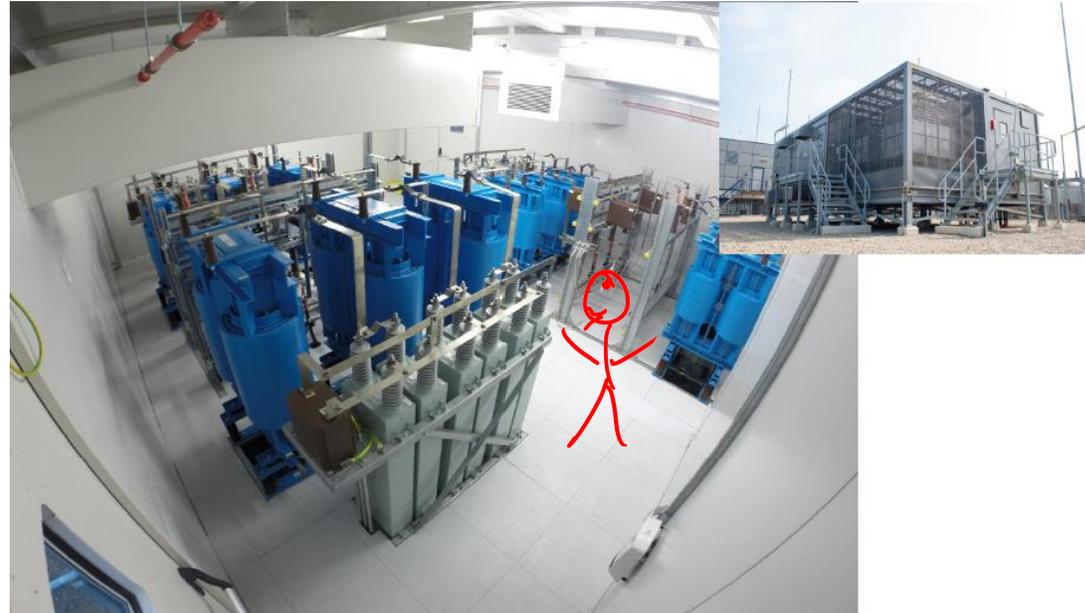
2x63MW, 4x32MW, 2x16MW

3. Anwendungen – Gasspeicherung



3. Anwendungen – Gasspeicherung

- Antrieb von Gaskompressoren zur unterirdischen Speicherung von Erdgas
- Kriterien:
 - Zuverlässigkeit, hohe Verfügbarkeit
 - Wartungsarm
 - Effizienz
 - Service
 - Erprobte Technologie

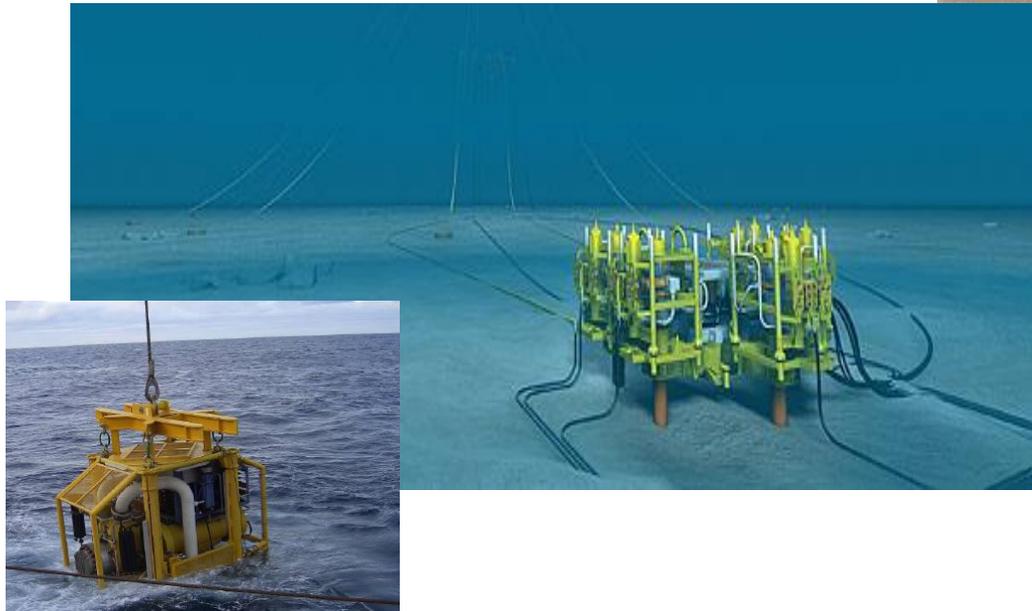
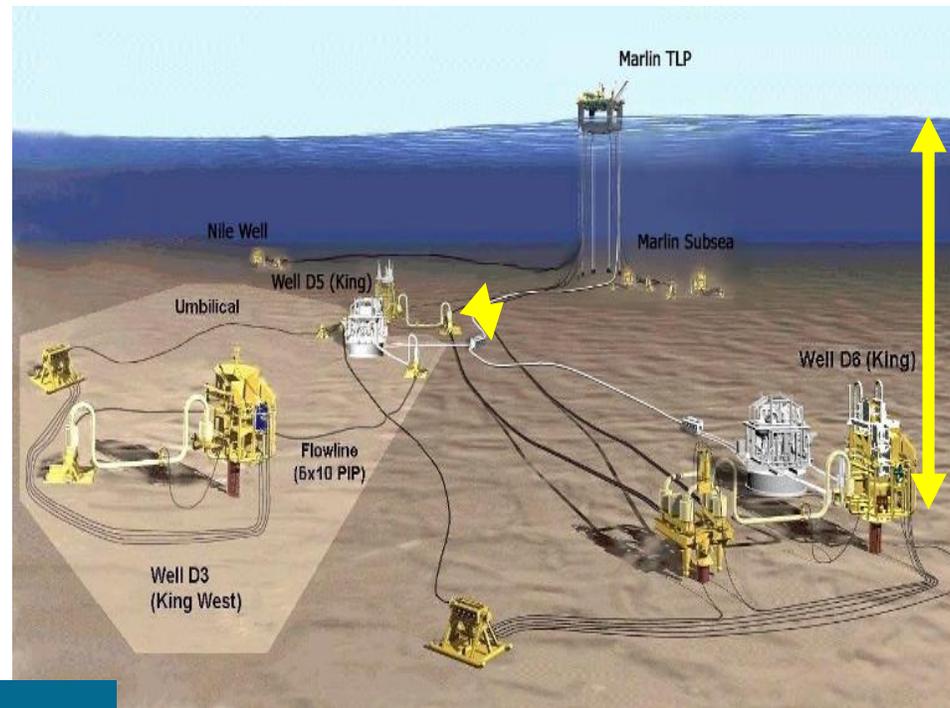


- 3 wassergekühlte drehzahlveränderliche Antriebe
 - Motornennspannung: $U=7200\text{ V}$
 - Motornennstrom: $I=3300\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=23\text{-}40\text{ MW}$; $f=0\text{-}105\text{ Hz}$ elektrisch, $0\text{-}5200\text{ rpm}$ mechanisch
 - Magnetlager
- Topologie
 - Netz/Motorseite: Stromrichter motor (Load Commutated Inverter, LCI) mit 8 kV -Thyristoren

Quelle: Siemens

3. Anwendungen – Subsea-Pumpen

- Antrieb von Pumpen auf dem Meeresboden
- Kriterien:
 - Hohe Ausgangsspannung um die Spannungsabfälle auf den Leitungen zu kompensieren (kein Transformator)
 - Platzbedarf
 - Hohe Verfügbarkeit
 - Netzurückwirkungen

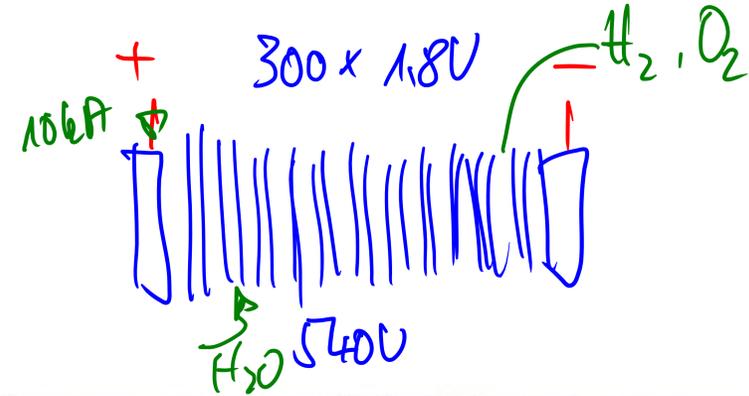
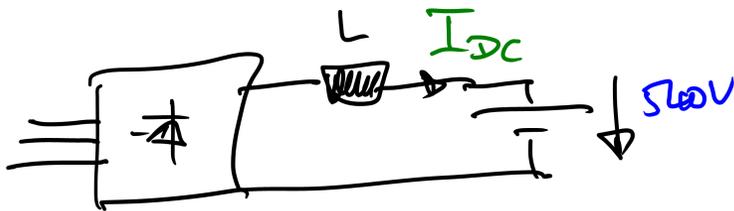


- 24 luftgekühlte drehzahlveränderliche Antriebe
 - Motornennspannung: $U=6600\text{ V}$
 - Motornennstrom: $I=90\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=800\text{ kW}$; $f=0\text{-}60\text{ Hz}$ elektrisch, $0\text{-}3600\text{ rpm}$ mechanisch
 - Bis zu 29 km Kabelstrecke
- Topologie
 - Netz/Motorseite: 11-Level Series Cell Inverter mit $1,7\text{ kV}$ -IGBTs

Quelle: Siemens

3. Anwendungen – Netzanbindung von Elektrolyseuren

- Herstellung von „grünem“ Wasserstoff durch alkalische Elektrolyse, z.B. für die Stahlherstellung
- Kriterien:
 - Hoher Wirkungsgrad
 - Sehr hohe Ströme (>10 kA) bei kleinen Spannungen (ca. 500 V)
 - Hohe Verfügbarkeit
 - Geringe Netzurückwirkungen
- Bisher:
 - Netzgeführte Thyristor-Gleichrichter (12-pulsig)
 - Blindleistungskompensation
- In Zukunft?:
 - Selbstgeführte IGBT-Gleichrichter

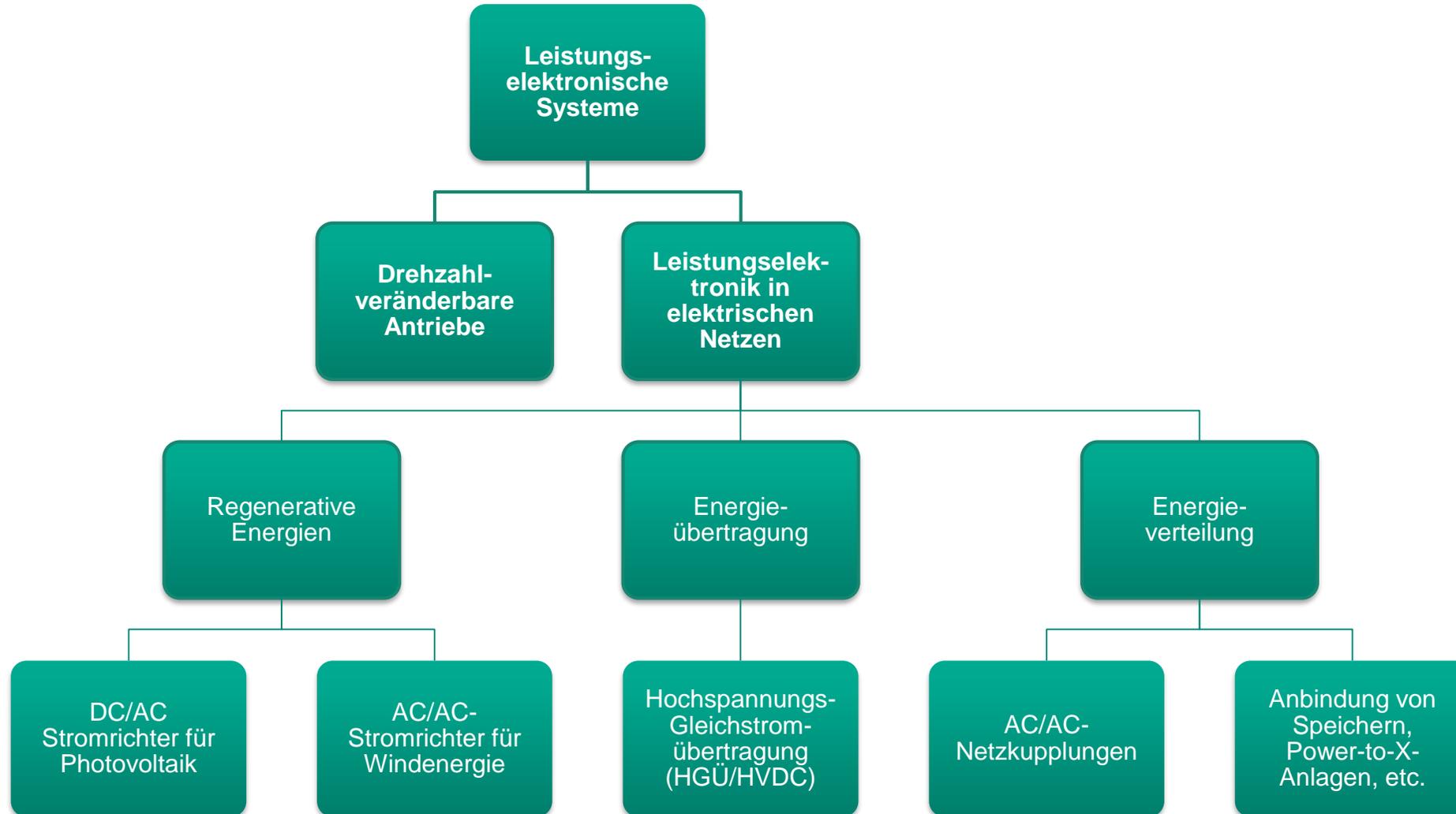


Gas Separator O₂ / H₂

Electrolyser Cell Stacks

DC Bus Bars from Power Supply

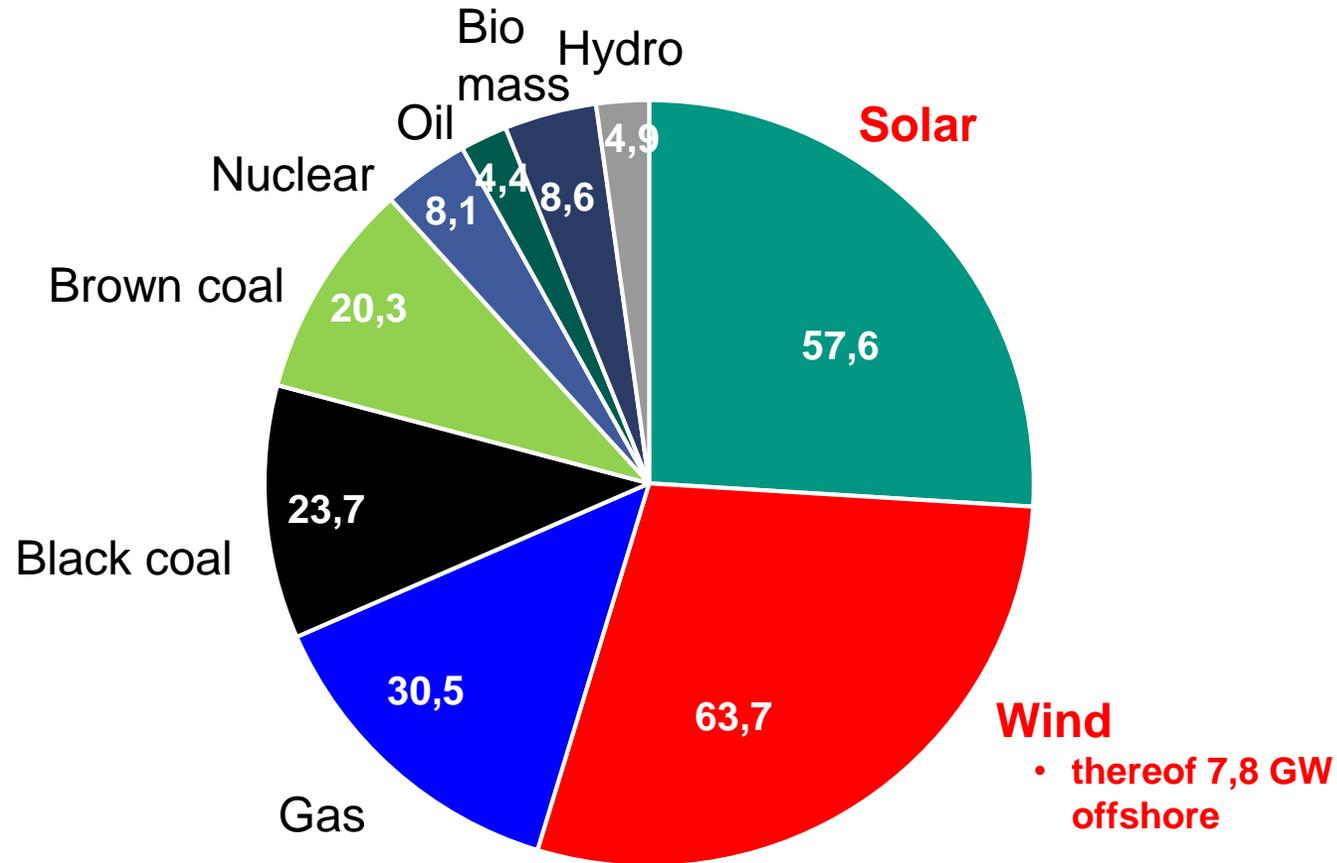
3. Anwendungen – Netzstromrichter



3. Anwendungen – Netzstromrichter

Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland (in GW)

- Gesamt: 221,7 GW
- Stand: 30.09.2021

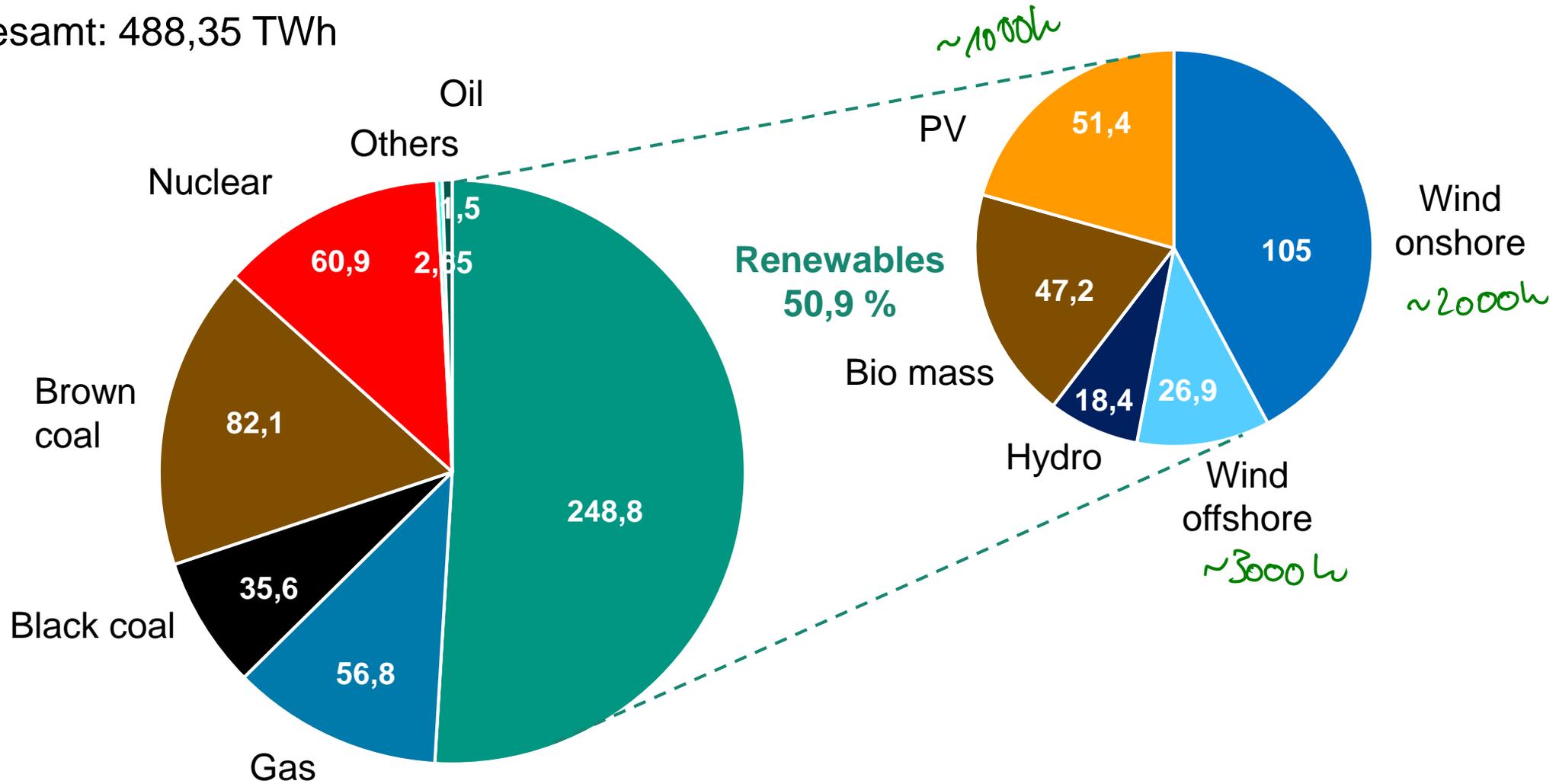


Source: https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm

3. Anwendungen – Netzstromrichter

Nettostromerzeugung in Deutschland 2020 (in TWh)

■ Gesamt: 488,35 TWh



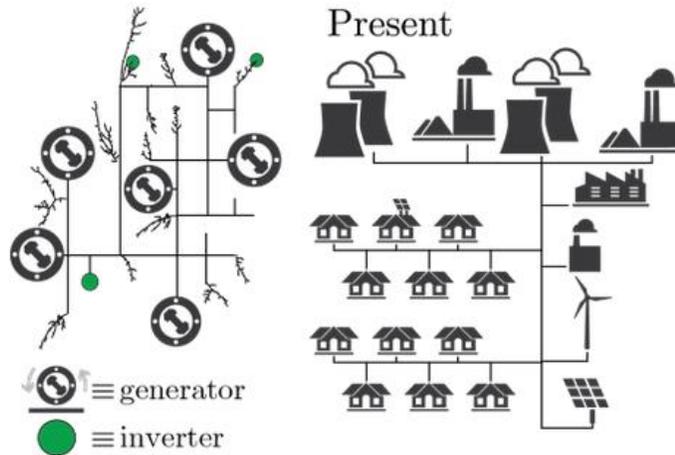
Source: <https://energy-charts.info>

3. Anwendungen – Netzstromrichter

Trends

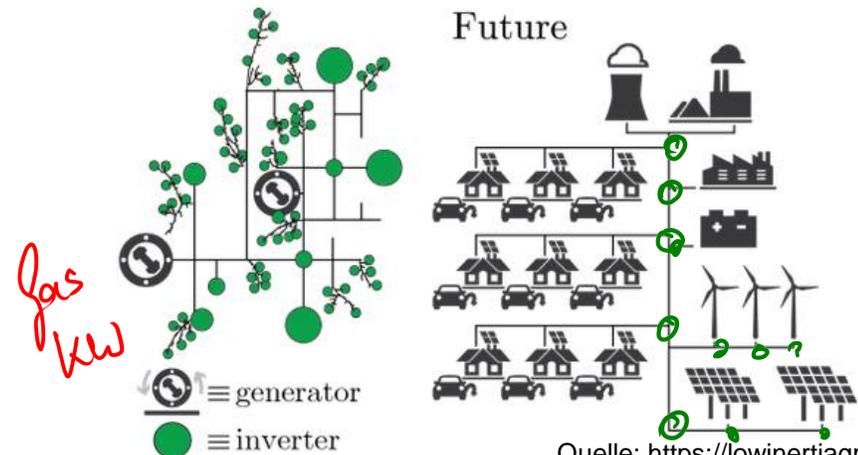
State-of-the-art Netzstruktur

- **Zentrale** Erzeugung elektrischer Energie
- **Unidirektionaler** Lastfluss
- Erzeugung folgt dem Energieverbrauch
- Zentrales Netzmanagement
- Zentralisierte “Top down” Struktur



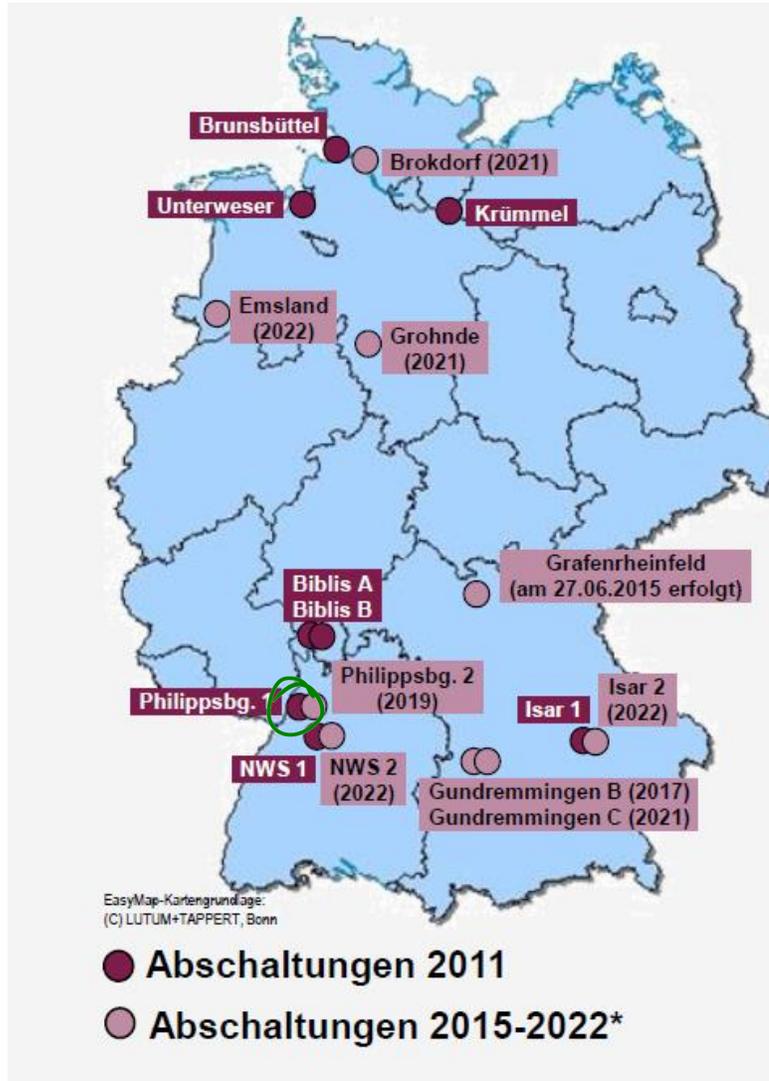
Zukünftige Netzstruktur

- **Dezentrale** Erzeugung, größere Distanz zu den Verbrauchern
- **Bidirektionaler** Lastfluss und -ausgleich
- Erzeugung folgt dem Energieangebot unabh. vom Verbrauch
- Dezentrales Netzmanagement
- Dezentrale “Bottom up” Struktur (öffentlich/privat) mit Netzbau und -upgrade

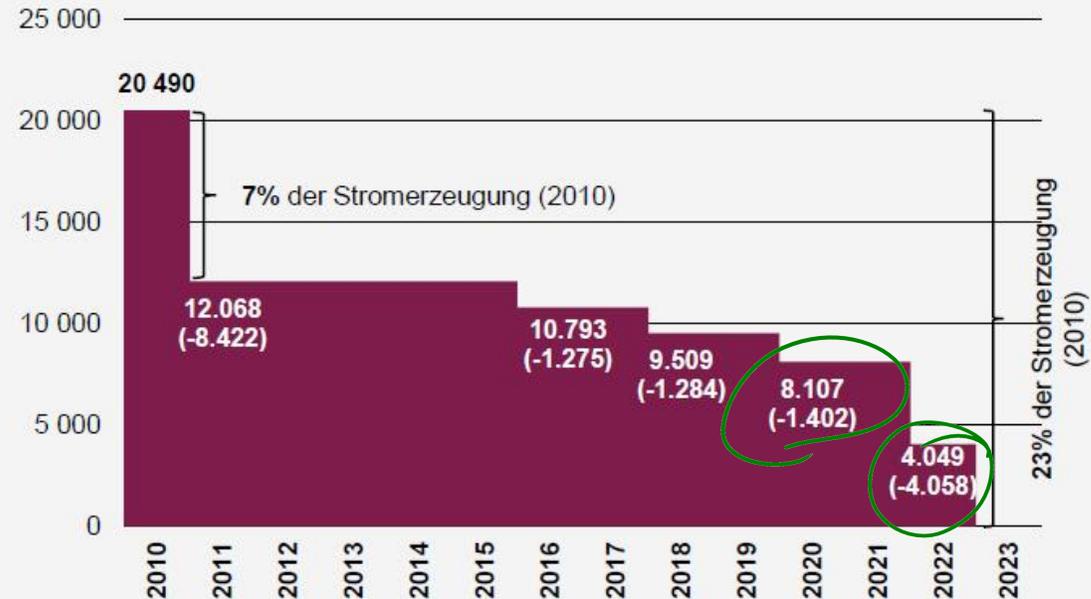


Quelle: <https://lowinertiagrids.ece.uw.edu/>

3. Anwendungen – Netzstromrichter Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022



Zukünftige Entwicklung der installierten Leistung der Kernenergie in Deutschland (in MW)

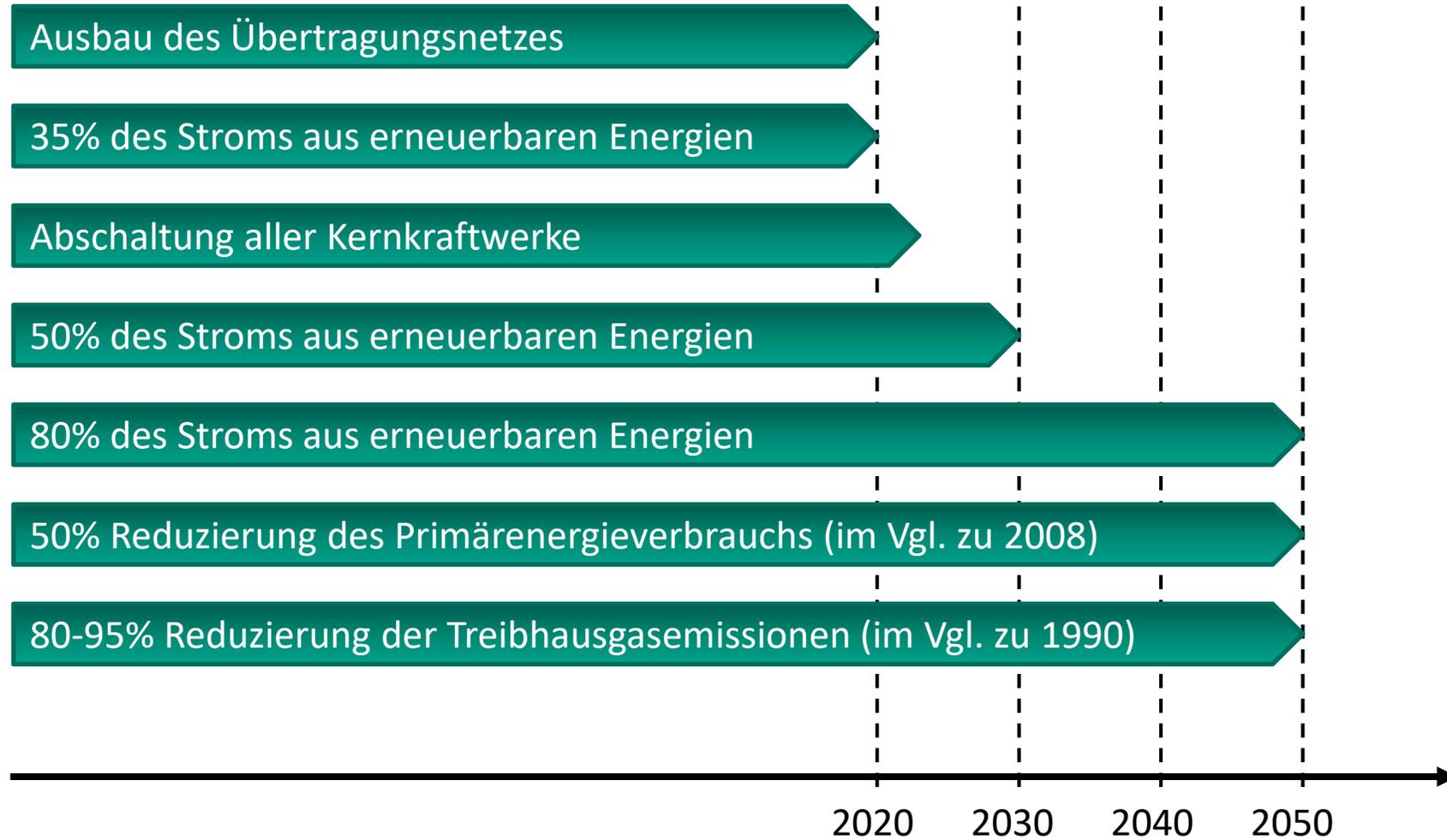


* bei Erreichen der in Anlage 3 AtG festgelegten Reststrommengen, spätestens jedoch mit Ablauf des 31.12. des jeweiligen Jahres

Quelle: Atomgesetz (AtG) §7

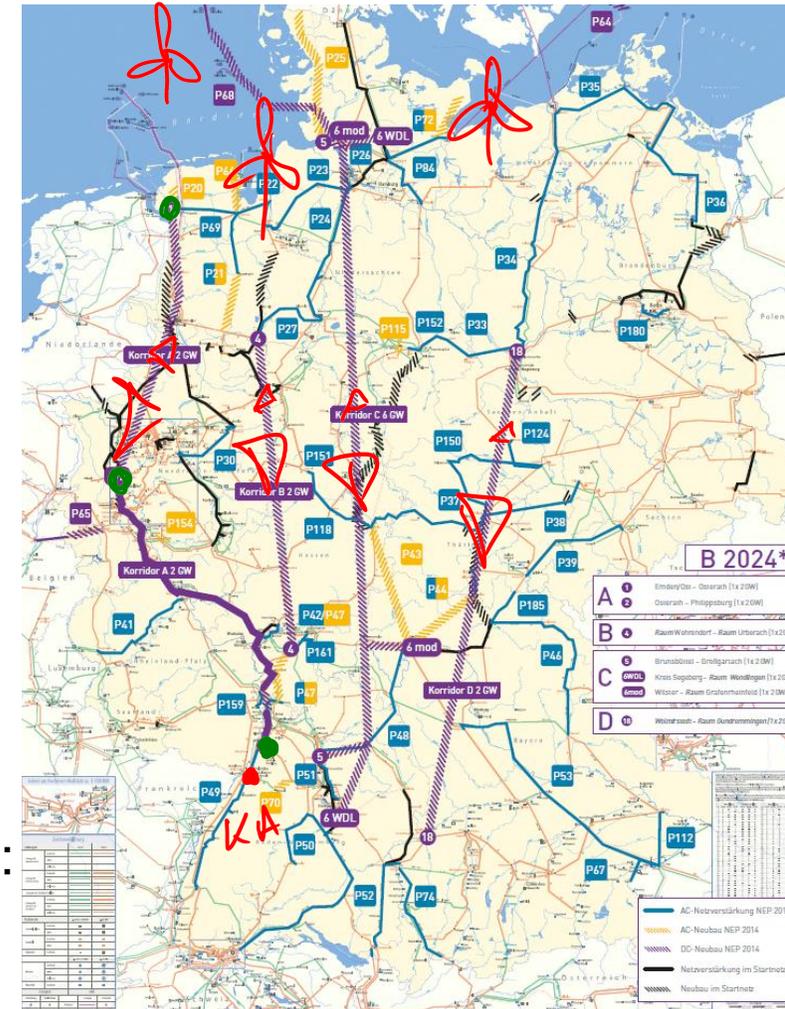
Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de/28-0-Zusatzinformationen.html>

3. Anwendungen – Ziele der Energiewende



3. Anwendungen – Hochspannungs-Gleichstromübertragung

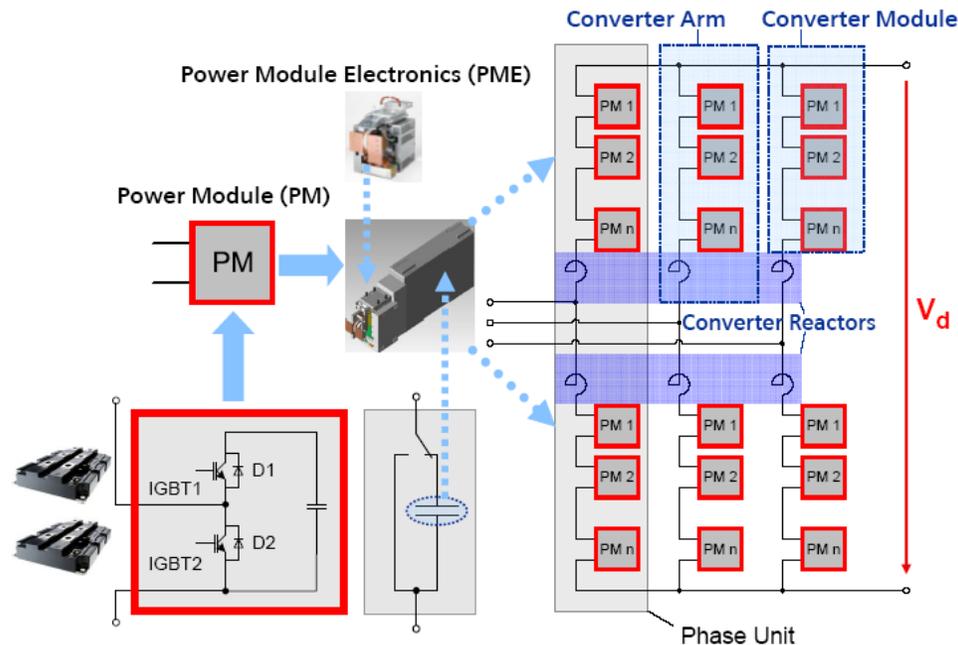
- Notwendiger Aus- und Umbau des Übertragungsnetzes
 - Nachhaltige Sicherstellung der Versorgungssicherheit (15min / Jahr)
 - Integration Erneuerbarer Energien
 - Weiterentwicklung des europäischen Energiemarkts
- Bis zu 4 Korridore für **Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)**
Trassenlänge: 2.100km
Übertragungsleistung:12 GW
- AC-Leitungsneubau in Bestandstrassen: 3.400 km



Quelle: Netzentwicklungsplan

3. Anwendungen – Hochspannungs-Gleichstromübertragung

- Punkt-zu-Punkt-Übertragung von elektrischer Energie über große Distanzen
- Kriterien:
 - Skalierbare Spannung, d.h. Leistung
 - Wirkungsgrad
 - Hohe Verfügbarkeit
 - Netzurückwirkungen



- Selbstgeführte Hochspannungs-Gleichstromübertragung (Beispiel: Sylwin1):

- DC-Nennspannung: $U=640\text{ kV}$

- DC-Nennstrom: $I=1350\text{ A}$

- $P_{\text{nenn}}=865\text{ MW}$

- Topologie

- Modular Multilevel Converter (MMC) mit ca. 2000 Zellen pro Stromrichter (mit 4,5kV-IGBT-Modulen)

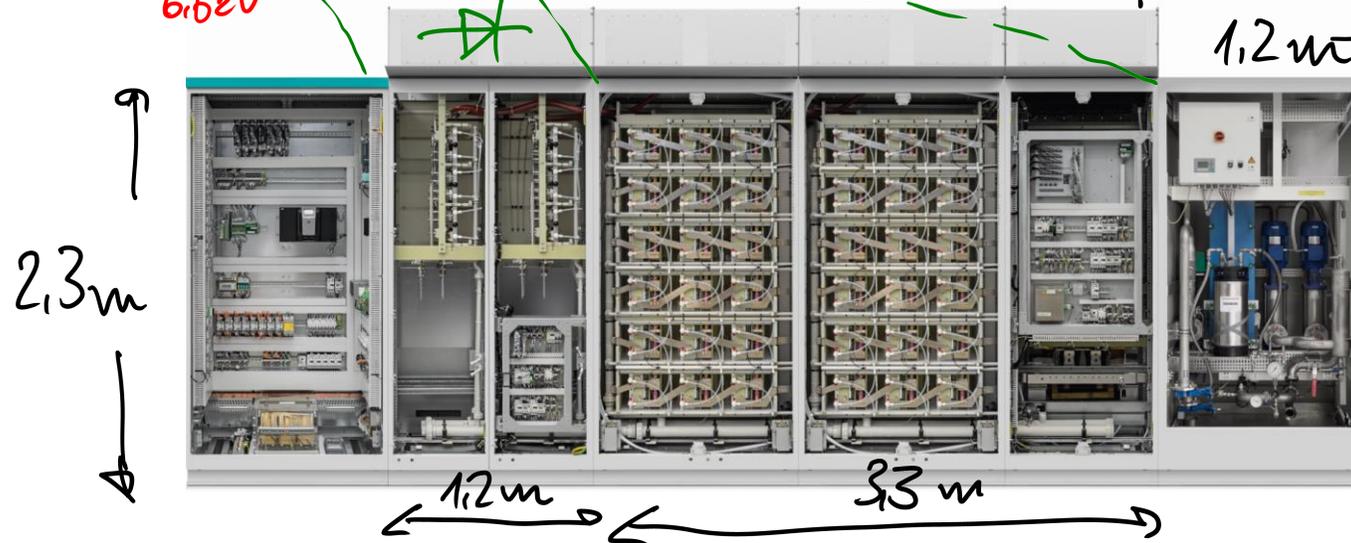
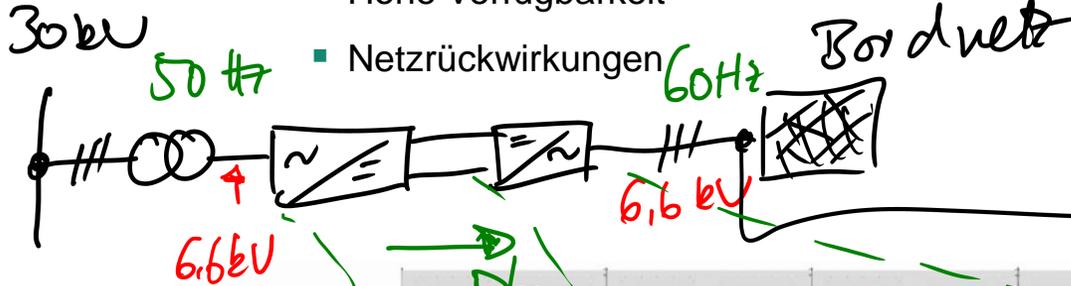
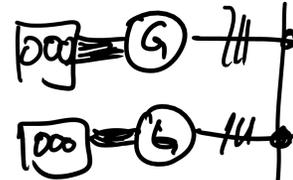
Quelle: Siemens

3. Anwendungen – Netzkupplung Hafenstromversorgung

- Netzkupplung zwischen Hamburger Stadtnetz und Bordnetz

- Kriterien:

- Skalierbare Spannung
- Hohe Regeldynamik
- Hohe Verfügbarkeit
- Netzurückwirkungen

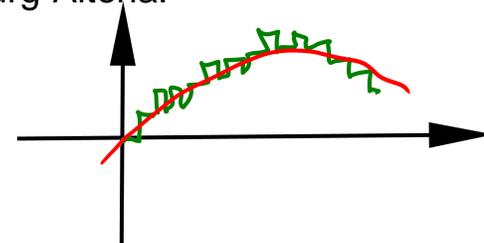


- Hafenstromversorgung in Hamburg-Altona:

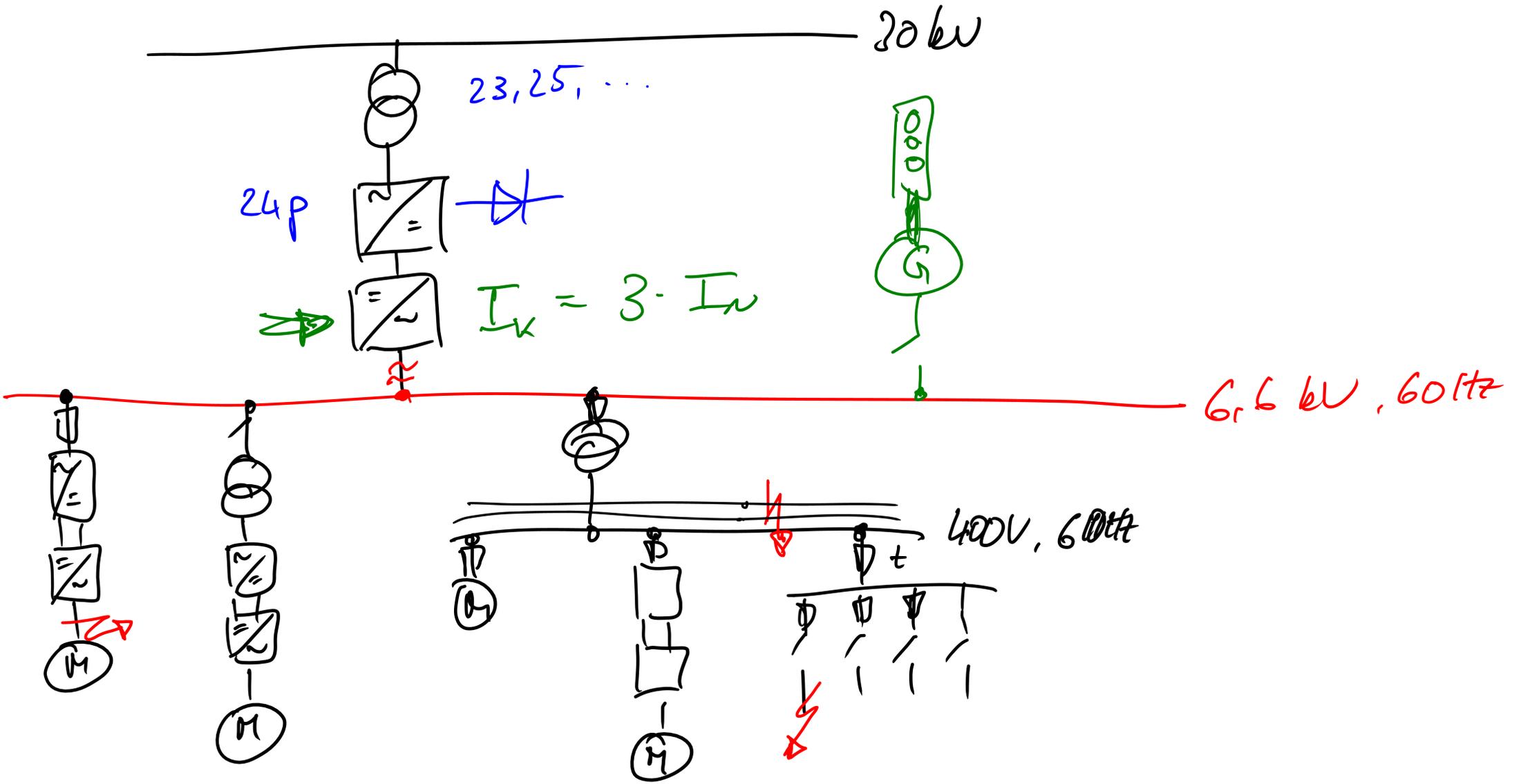
- AC-Nennspannung: $U=6,6\text{ kV}$
- AC-Nennstrom: $I=1050\text{ A}$
- $P_{\text{nenn}}=12\text{ MVA}$

- Topologie

- Stadtnetz: Diodengleichrichter
- Bordnetz: Modular Multilevel Converter (MMC) mit 72 Zellen pro Stromrichter (mit 1,7kV-IGBTs)



Quelle: Siemens

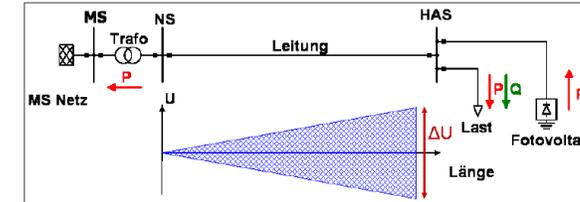
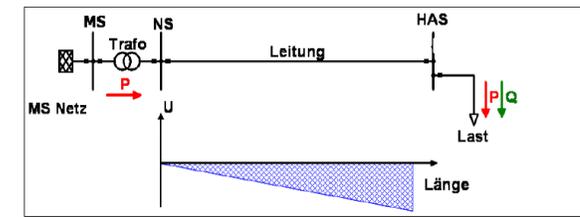


3. Anwendungen – Weitere Netzdienstleistungen

Heute bereitgestellte Systemdienstleistungen (SDL):

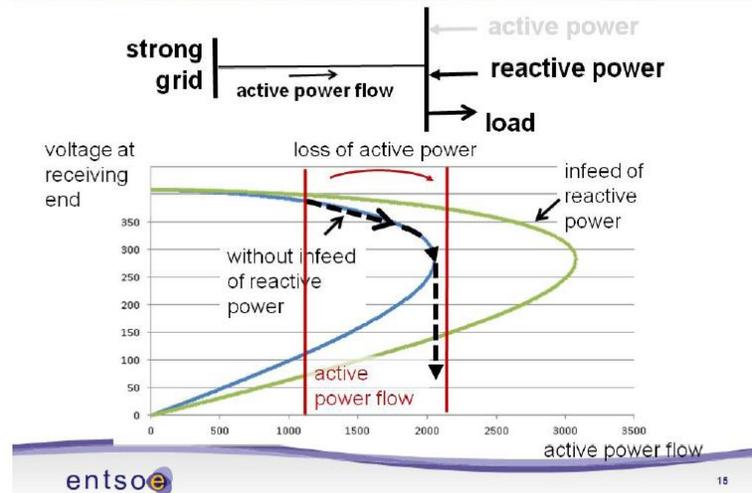
- Frequenzregelung $P(f)$:
 - z.B. Wirkleistungsabregelung ab 50,2 Hz
- Spannungshaltung:
 - Blindleistungsbereitstellung: $Q(U)$
 - Dyn. Netzstützung: LVRT-Fähigkeit (Low Voltage Ride Through)

→ nur für kritische Netzsituationen



Quelle: TU München, Prof. Witzmann

The Nose Curve of Transmission Corridor



Quelle: Dr. Grebe, Amprion bei ENTSO-E Workshop Emergency Defence Plan 19.3.2012

Zukünftig: Leistungselektronik muss netzbildende Eigenschaften bekommen

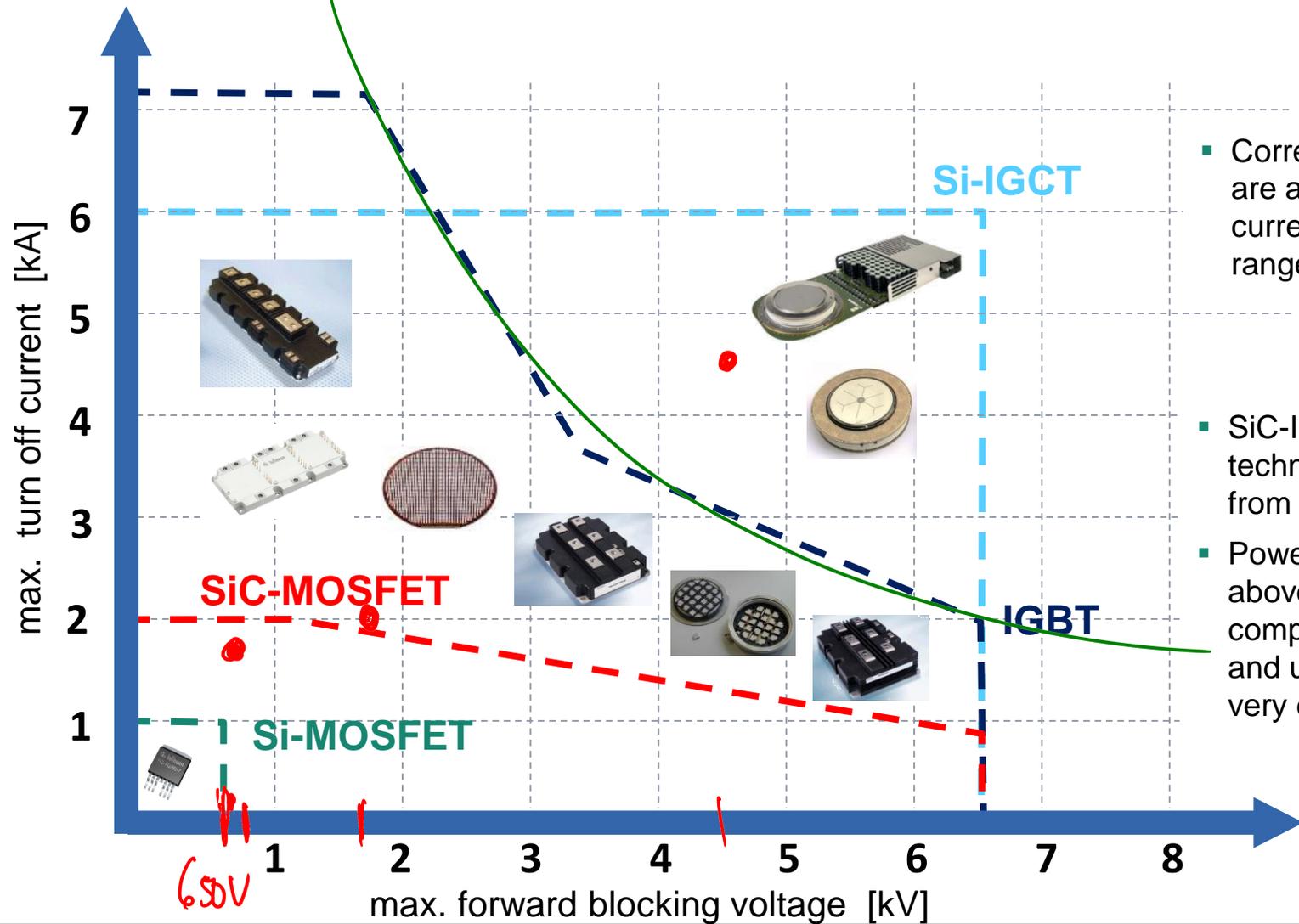
- Einspeisung: heute **zentral**, zukünftig **dezentral**
- Lastfluss: heute **undirektional**, zukünftig **bidirektional**
- Frequenzregelung / -bildung:
 - Ersatz von Momentanreserve, Primär- und Sekundärregelung
- Spannungshaltung / -bildung:
 - Spannungsquellenregelung, Regelung der Spannungsqualität
- Blindleistungskompensation
- Oberschwingungskompensation
- Phasensymmetrierung
- Automatische Anpassung in Echtzeit

4. Leistungshalbleiter – Übersicht (Si)

Power Semiconductor		Voltage	Turn off current (per single switch)	Package	Switching power
IGCT		4.5 kV	5.5 kA (I_{TGQM})	Press Pack	24.8 MVA
		6.5 kV	4.2 kA (I_{TGQM})	Press Pack	27.3 MVA
IGBT / FWD		1.7 kV	7.2 kA ($2 \cdot I_C$)	Module	12.2 MVA
		3.3 kV	3.6 kA ($2 \cdot I_C$)	Module	11.9 MVA
		4.5 kV	2.4 kA ($2 \cdot I_C$)	Module	10.8 MVA
		6.5 kV	1.5 kA ($2 \cdot I_C$) 2.0 kA ($2 \cdot I_C, RC$)	Module	9.8 MVA 13 MVA
		4.5 kV	4.8 kA ($2 \cdot I_C$)	Press Pack	21.6 MVA
Thyristor		≤ 8 kV	3.9 kA (I_{TAVM})	Press Pack	--
Diode		≤ 9 kV	3 kA (I_{TAVM})	Press Pack	--

4. Leistungshalbleiter - Übersicht

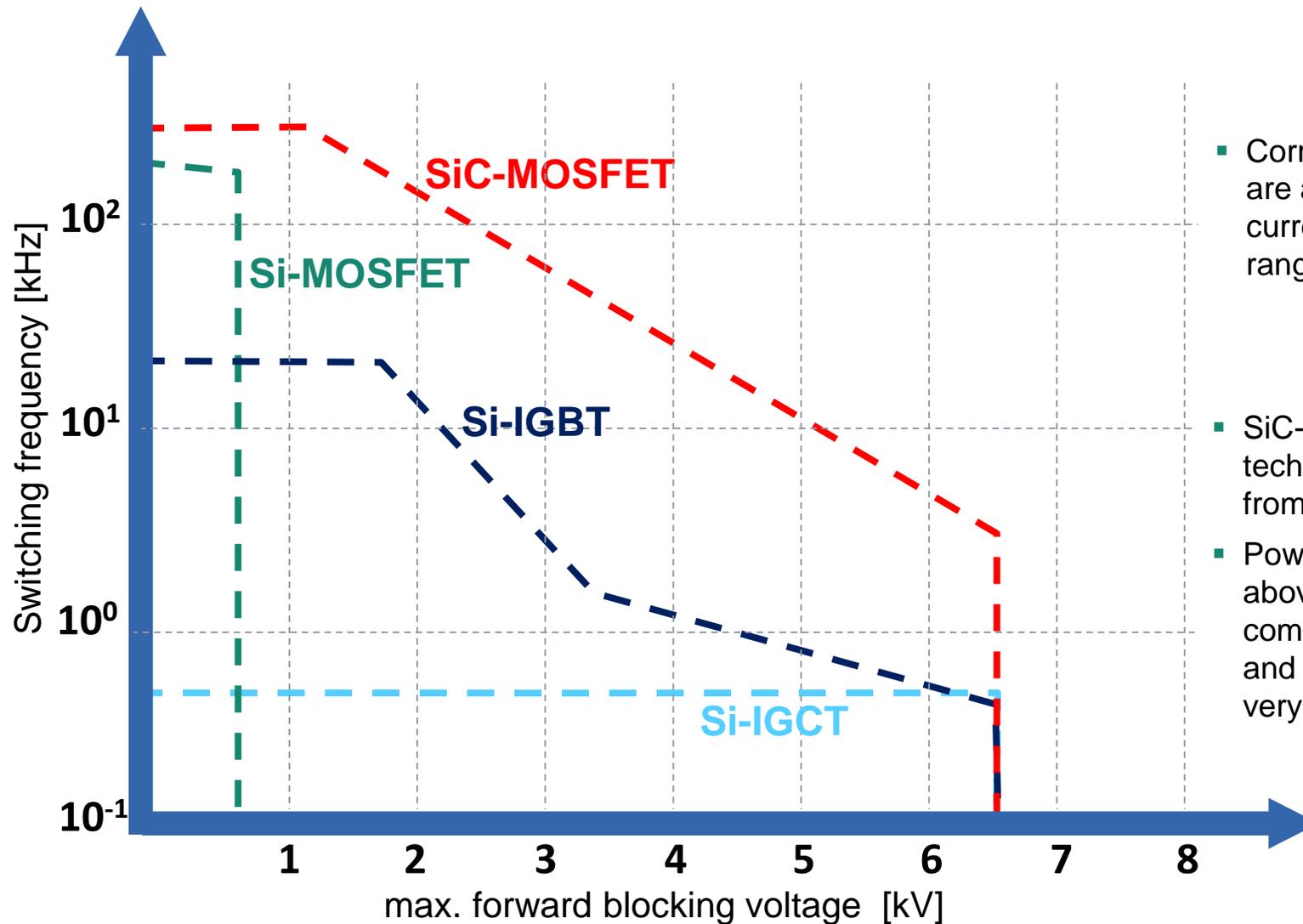
Si/SiC-based power semiconductors (with turn on/off capability)



- Corresponding diodes are available for all current and voltage ranges.
- SiC-IGBTs are technically only useful from at least 15 kV.
- Power semiconductors above 6.5kV are very complex to manufacture and use, and therefore very expensive.

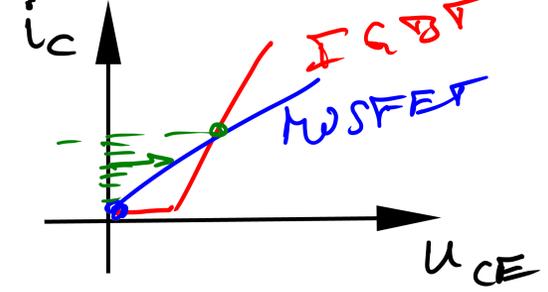
4. Leistungshalbleiter - Übersicht

Si/SiC-based power semiconductors (with turn on/off capability)

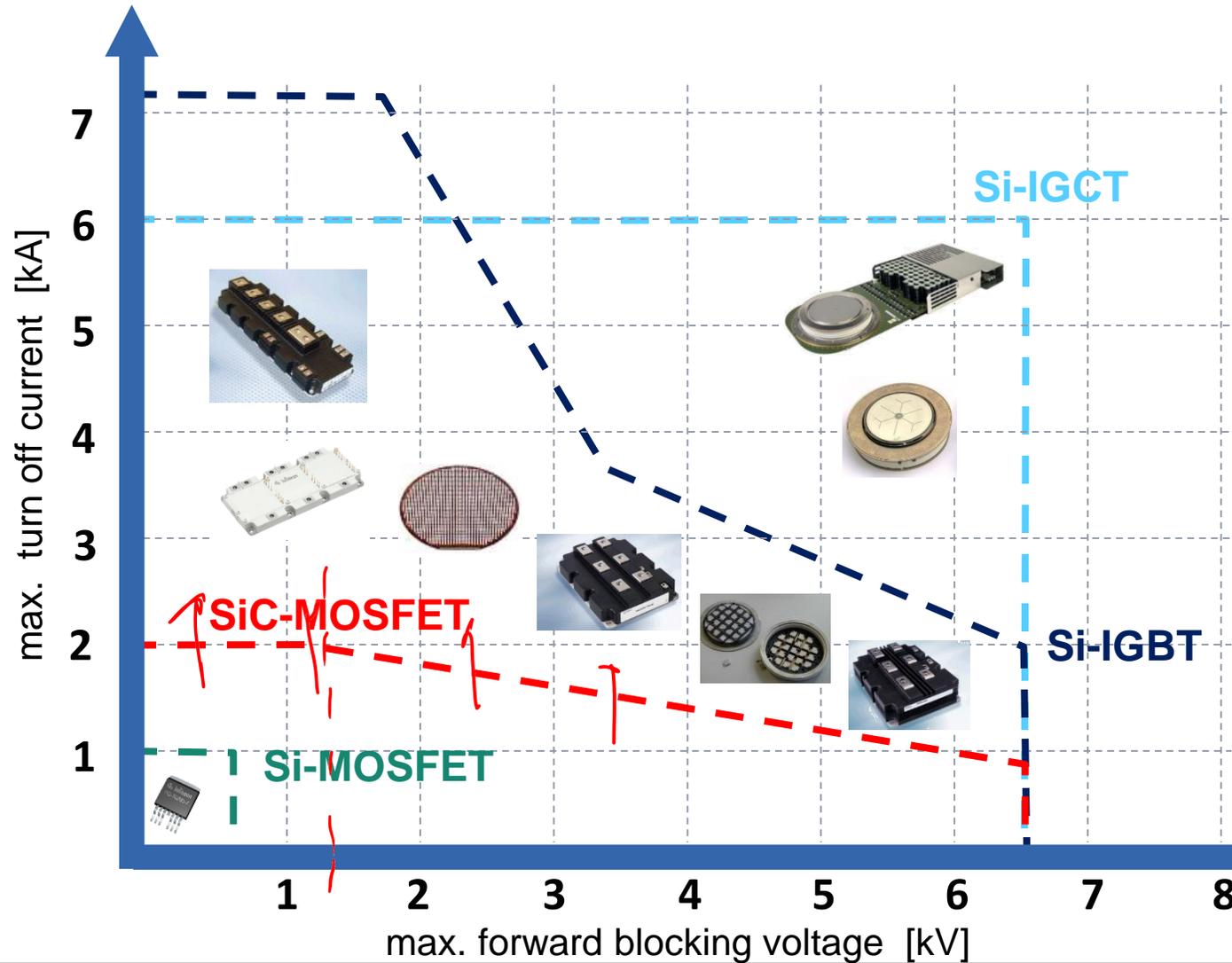


- Corresponding diodes are available for all current and voltage ranges.
- SiC-IGBTs are technically only useful from at least 15 kV.
- Power semiconductors above 6.5kV are very complex to manufacture and use, and therefore very expensive.

4. Leistungshalbleiter - Übersicht



Si/SiC-based power semiconductors (with turn on/off capability)



SiC MOSFET

- Lower R_{DSon} , lower switching losses
- Higher operating temperature
- Increased switching frequency

→ Higher power density, higher efficiency

→ The range of electrical vehicles will increase by e.g. 6% [1]

→ Higher EMI, Higher dv/dt leading to higher stress for the motor windings

Main applications for SiC

- 1200V: Solar, EV, Charging
- 1700V: Wind
- 3300V and more: Traction

[1] K. Hamada, Great Potential of SiC Devices for Environmentally Friendly Vehicles, APE Automotive Power Electronics Conference 2015 Paris, France

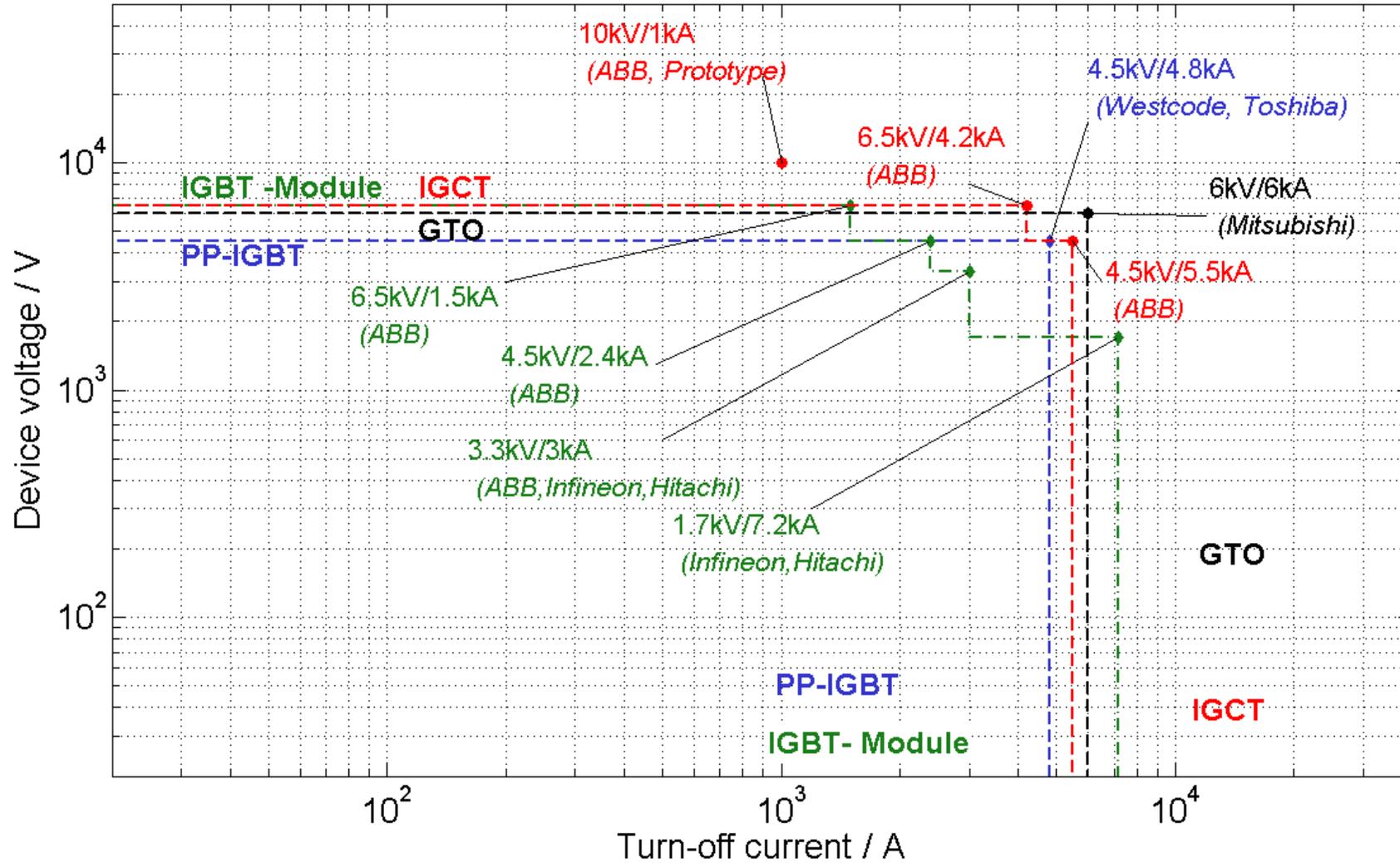
4. Leistungshalbleiter - Übersicht

Main market for SiC MOSFETs

Application	Automotive	Low voltage	Medium voltage
Volume	<ul style="list-style-type: none"> High volume applications 	<ul style="list-style-type: none"> Medium volume applications 	<ul style="list-style-type: none"> Low volume applications
Voltage	<ul style="list-style-type: none"> <1.2kV 	<ul style="list-style-type: none"> 1.2 kV 1.7 kV 	<ul style="list-style-type: none"> 3.3 kV 4.5 kV 6.5 kV
Market share * (only IGBT modules)	<ul style="list-style-type: none"> 36 % 	<ul style="list-style-type: none"> 41 % 12 % 	<ul style="list-style-type: none"> 6 % 2 % 3 %
Housing	<ul style="list-style-type: none"> Customized, Module 	<ul style="list-style-type: none"> Module 	<ul style="list-style-type: none"> Module and press-pack
Available products	<ul style="list-style-type: none"> Customized configurations with DCBs directly connected to heat sink and integrated drivers 	<ul style="list-style-type: none"> Single switch, Half-bridge, Six Pack, Chopper module, 3-Level module at different voltage/current ratings with/without integrated drivers 	<ul style="list-style-type: none"> Single switch, Half-bridge, Diode-module at different voltage/current ratings
Integration	<ul style="list-style-type: none"> Low integration costs for DC link 	<ul style="list-style-type: none"> Moderate integration costs for busbars, DC link, heat sinks, (drivers) 	<ul style="list-style-type: none"> High integration costs for isolation, busbars, DC link, heat sinks, drivers
Major development trends	<ul style="list-style-type: none"> Improved packaging (e.g. Enhanced load cycling capability, lower L_S, increased T_{Jmax}) Enhanced Si devices SiC, GaN devices for improved efficiency, higher f_S, less passives, improved power density etc. 		<ul style="list-style-type: none"> Enhanced Si devices, e.g. Reverse Conducting IGBT SiC for special applications (e.g. traction)

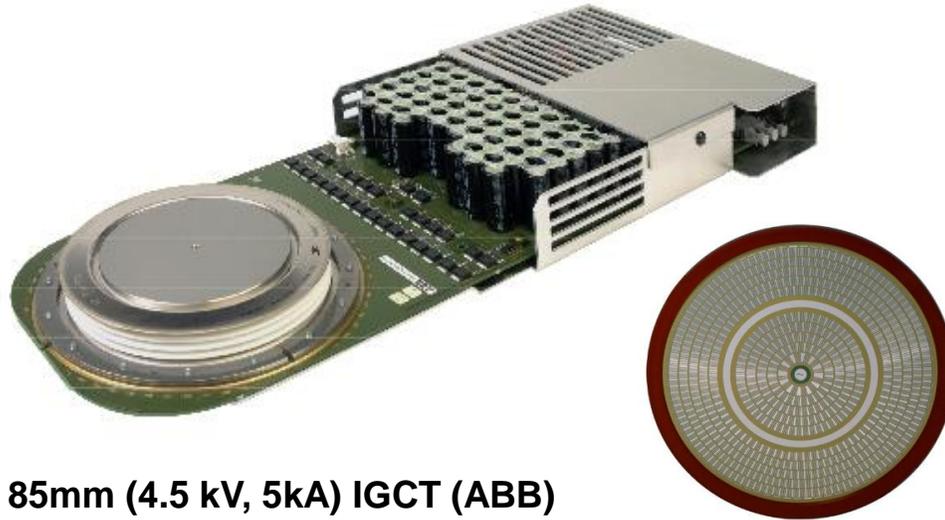
* Source: IHS Power Semiconductor Studies, 2006-2015

4. Leistungshalbleiter - Übersicht



Stand: 2015; IGCT / GTO Abschaltstrom: I_{TGQM} ; IGBT Abschaltstrom: $2 I_C$

4. Leistungshalbleiter - IGCT



85mm (4.5 kV, 5kA) IGCT (ABB)

RC-IGCT (ABB)

Asymmetrische IGCTs

- U_{DRM} : 4.5 kV, 5,5 kV, 6.5 kV / S_S : 3 – 27 MVA
- 68mm 10 kV Muster / S_S : 7 MVA

Symmetrische IGCTs: 6.5 kV / S_S : 2.5 – 10 MVA

Hauptanwendungen

- MV-Stromrichter mittlerer/großer Leistung (5-40MW) (z.B. 3L-(A)NPC, CSI)
- MV-Industrieantriebe, Bahnnetzkupplungen

Eigenschaften

1. Benötigt Clamp- und di/dt-Einschaltentlastung
 2. Hohe Ausnutzung der Si-Fläche bei kleinen Schaltfrequenzen f_s
 3. Hohe Leistung der Ansteuerung (max. 100W)
 4. Zuverlässigkeit durch Ansteuerung begrenzt
 5. Serien- und Parallelschaltung aufwändig
 6. Press Pack:
 - Kurzschluss bei Fehler
- Hohe Belastung für Motor, Welle und Getriebe
- Keine Explosion des Gehäuses
 - Aufwändiger Spannverband für Kontaktierung und Kühlung
 - Hohe Lastwechselfestigkeit
7. Nur ein Hersteller weltweit: ABB

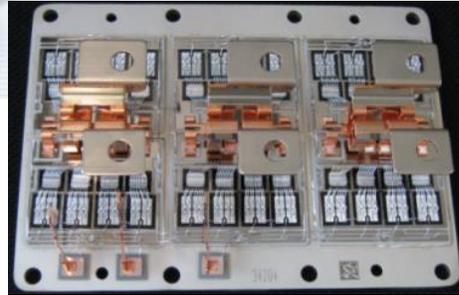
Perspektive

- Eingeführte Technologie, begrenztes Potenzial
- Trends: Erhöhung der Sperrschichttemperatur auf 150°C, Verbesserung der Rückwärtsleitenden RC-IGCTs

4. Leistungshalbleiter – IGBT-Module



(6.5 kV, 400 A)
IGBT Module
(Infinion)



(3.3 kV, 1500 A) IGBT
Module (Infinion)

- U_{CE} : 1.2kV, 1.7kV, 3.3 kV, 4.5 kV, 6.5 kV
- S_S : 1.5 MVA – 11 MVA

Hauptanwendungen

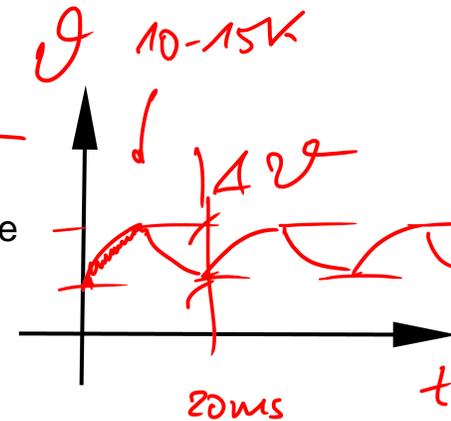
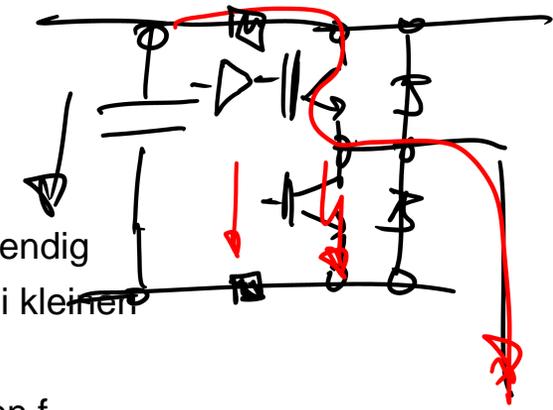
- Stromrichter in allen Leistungsbereichen (z.B. 2L-VSC, 3L-NPC-VSC, ML-VSC)
- Industrie, Traktion, Netzanwendungen (z.B. HGÜ)

Eigenschaften

1. Produkte von vielen Herstellern verfügbar
2. In Einzelschaltung ist keine Beschaltung notwendig
3. Stetig steigende Ausnutzung der Si-Fläche bei kleineren Schaltfrequenzen f_s /
Hohe Ausnutzung bei großen Schaltfrequenzen f_s
3. Kleine Leistung der Ansteuerung (max. 5W)
4. Zuverlässigkeit durch den mechanischen Aufbau beschränkt
5. Einfache Serien- und Parallelschaltung
6. Modulbauform:
 - Explosion des Gehäuses in (seltenen) Fehlerfällen
 - Einfacher Aufbau auf Kühlplatte
 - Beschränkte Lastwechselfestigkeit (angepasst an die Applikation)

Perspektiven

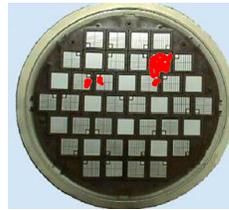
- Stetige Weiterentwicklung der Chips (Verlustreduzierung, Erhöhung der Stromdichte), sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik (höhere Sperrschichttemperaturen, verbesserte Lastwechselfestigkeit)
- Großer Marktanteil → “Market pull”



4. Leistungshalbleiter – IGBT-Press Pack



85mm (4.5 kV,
1.2 kA) PP
IGBT
(Westcode)



- U_{CE} : 2.5 kV, 4.5 kV
- S_S : 0.5 MVA – 21.5 MVA

Hauptanwendungen

- MV-Stromrichter mittlerer/großer Leistung (5-40MW)
(z.B. 2L-VSC, 3L-NPC)
- MV-Industrieantriebe, Bahnnetzkupplungen und HGÜ-Anwendungen

Characteristics

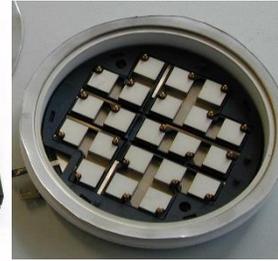
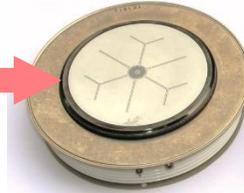
1. Produkte nur von wenigen Herstellern verfügbar (Toshiba, ABB)
2. In Einzelschaltung ist keine Beschaltung notwendig
3. Stetig steigende Ausnutzung der Si-Fläche bei kleinen Schaltfrequenzen f_s /
Hohe Ausnutzung bei großen Schaltfrequenzen f_s
3. Kleine Leistung der Ansteuerung (max. 5W)
4. Zuverlässigkeit durch den mechanischen Aufbau beschränkt
5. Einfache Serien- und Parallelschaltung im Vergleich zu IGCTs
6. Press pack:
 - Kurzschluss bei Fehler (gut für Reihenschaltung)
 - Meist keine Explosion des Gehäuses
 - Aufwändiger Spannverband für Kontaktierung und Kühlung
 - Hohe Lastwechselfestigkeit

Perspektiven

- Stetige Weiterentwicklung der Chips (Verlustreduzierung, Erhöhung der Stromdichte)
- Verbesserung des Gehäuses möglich, aber teuer
- Spezialanwendungen → Begrenzter “Market pull”

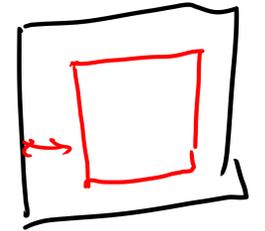
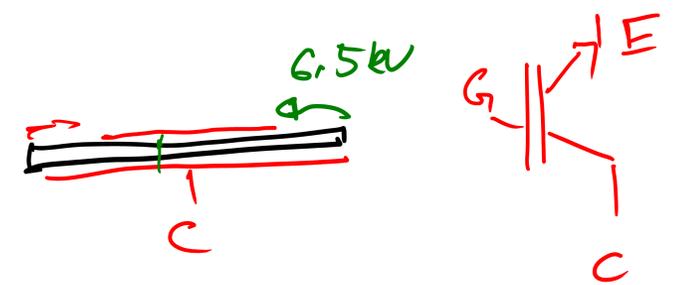
4. Leistungshalbleiter – Thyristoren

Thyristor Scheibenzelle
1 Pellet



IGBT Modul
24 IGBT-Chips
12 Dioden-Chips

PPI (125mm)
48 IGBT-Chips



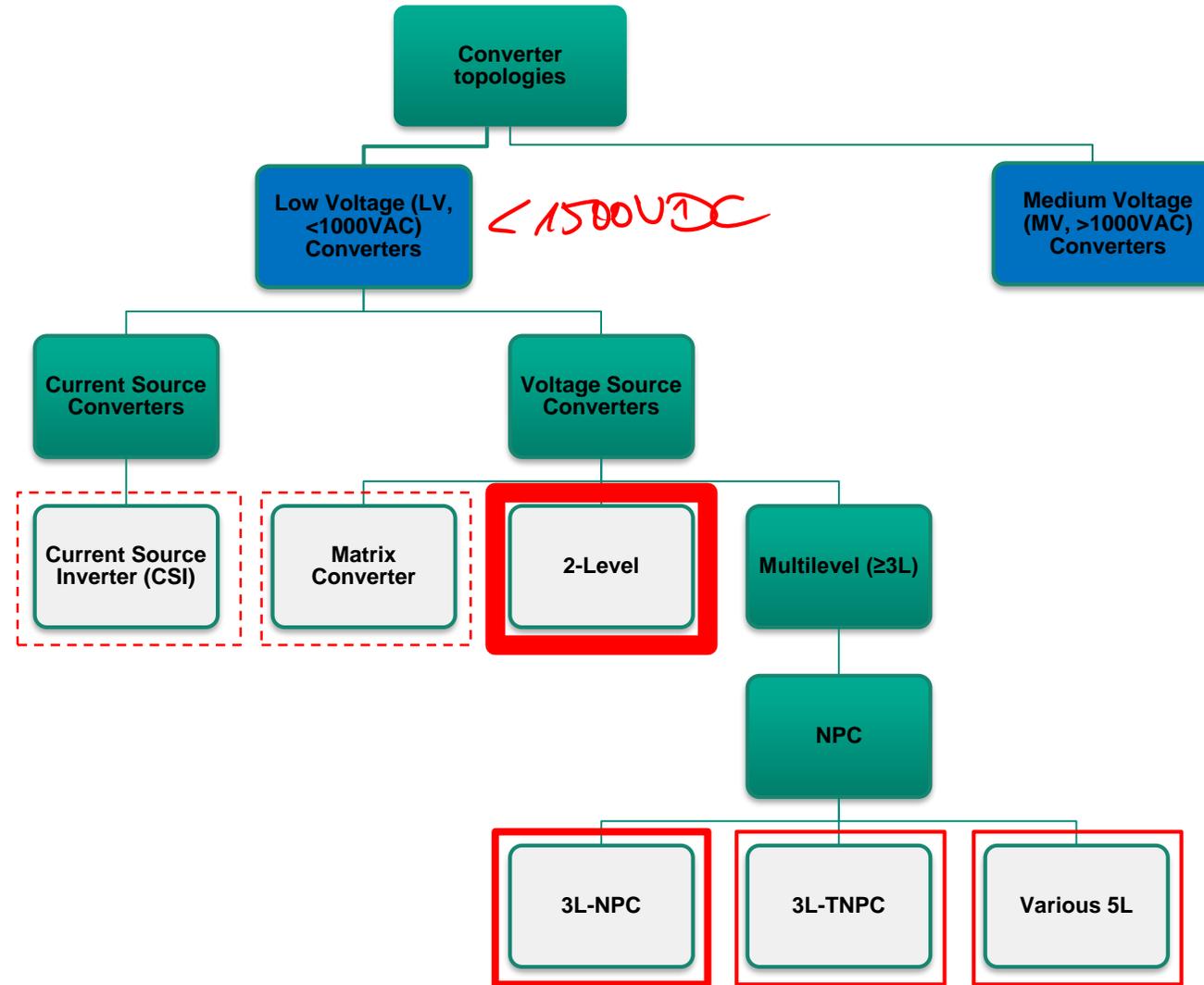
Bipolare Thyristoren - Pellets

Jahr	Si Ø [Zoll]	Strom [A]	Spannung [V]
1965	0,5"	40	1350
1970	2"	400	3600
1980	3"	1400	4200
1990	4"	2600	5200
2000	5"	3000	8000
2009	6"	3900	8000

IGBT- Chips

Chip [mm*mm]	Strom [A]	Spannung [V]
13,6*13,6	150	1700
13,6*13,6	63	3300
13,6*13,6	31	6500

5. Topologien – Stromrichter für Antriebe und Netze

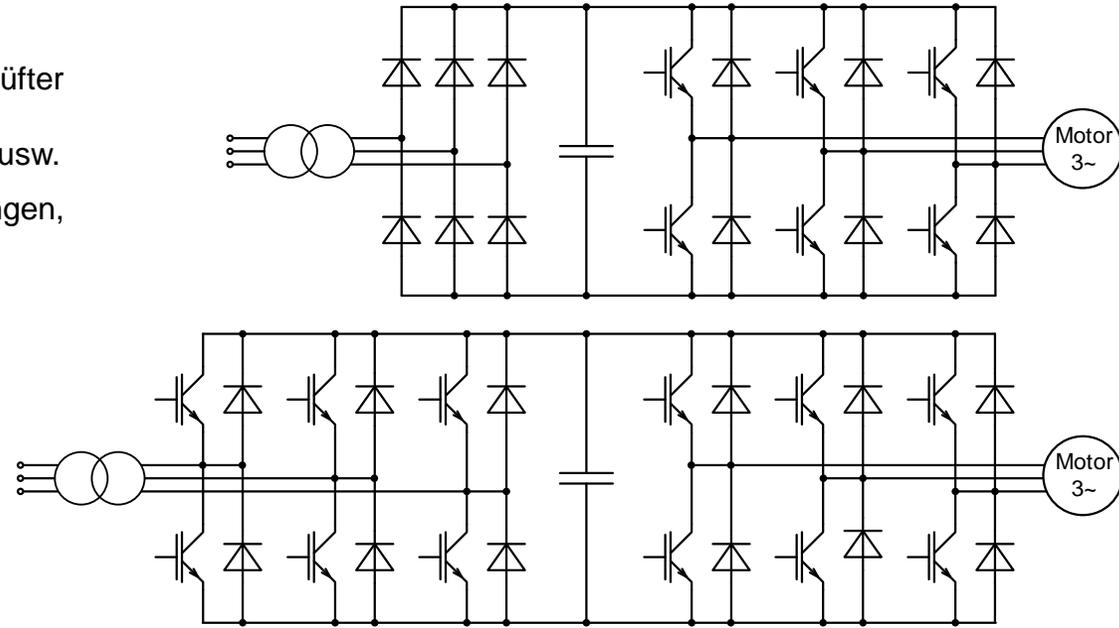


< 1500V DC

1 kV ... 13 kV ... 60 kV

5. Topologien – Niederspannung (LV) - 2-Punkt-Wechselrichter (2L)

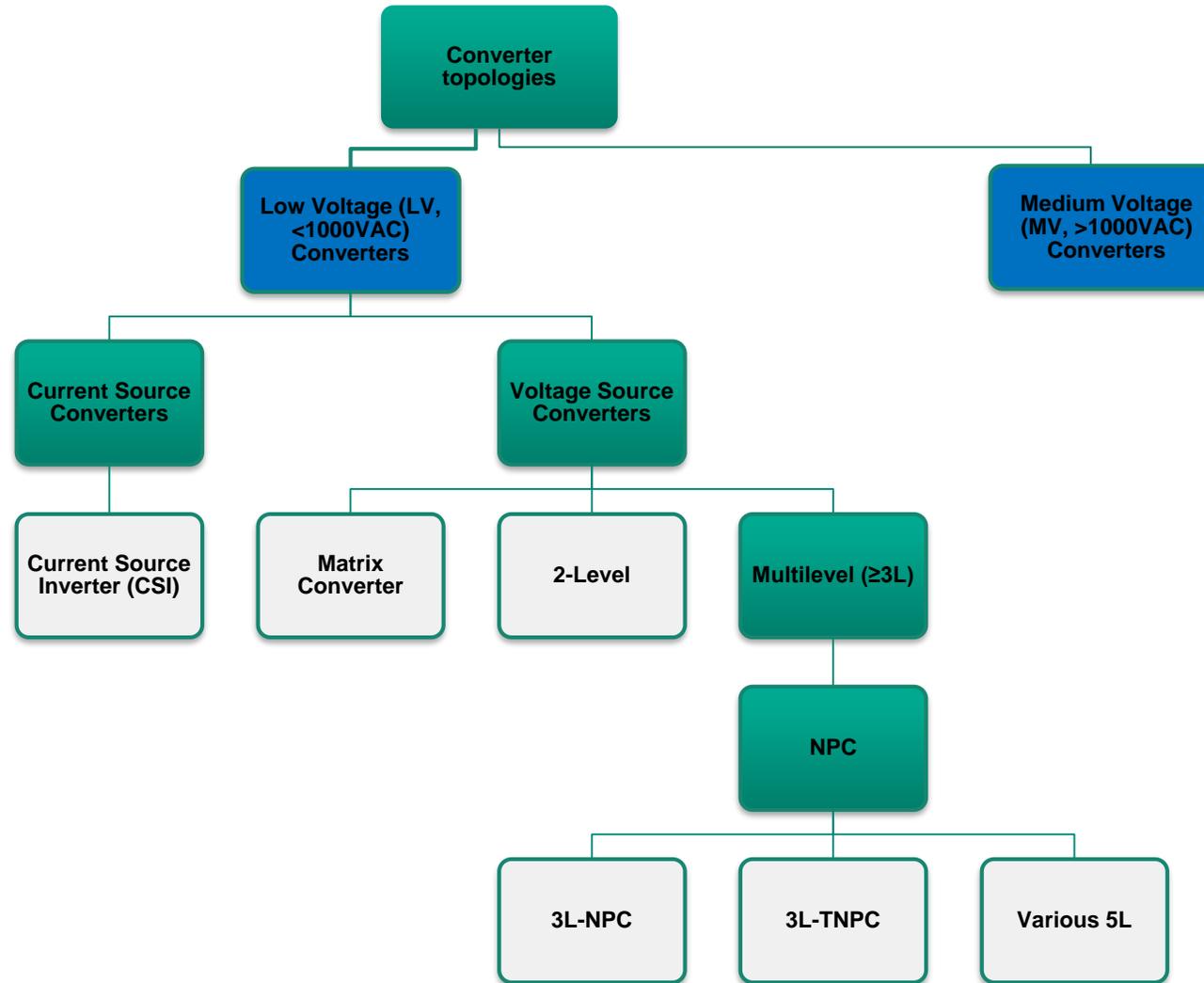
- Anwendung vom einfachsten Antrieb für Pumpen oder Lüfter bis hin zu höchst anspruchsvollen Anwendungen in Werkzeugmaschinen, Extrudern, Walzwerken, Pressen usw.
- Umrichter für Windkraft- und Solaranlagen, Netzkupplungen, FACTS
- Oft die preisgünstigste Alternative im Vergleich zu komplexeren Topologien



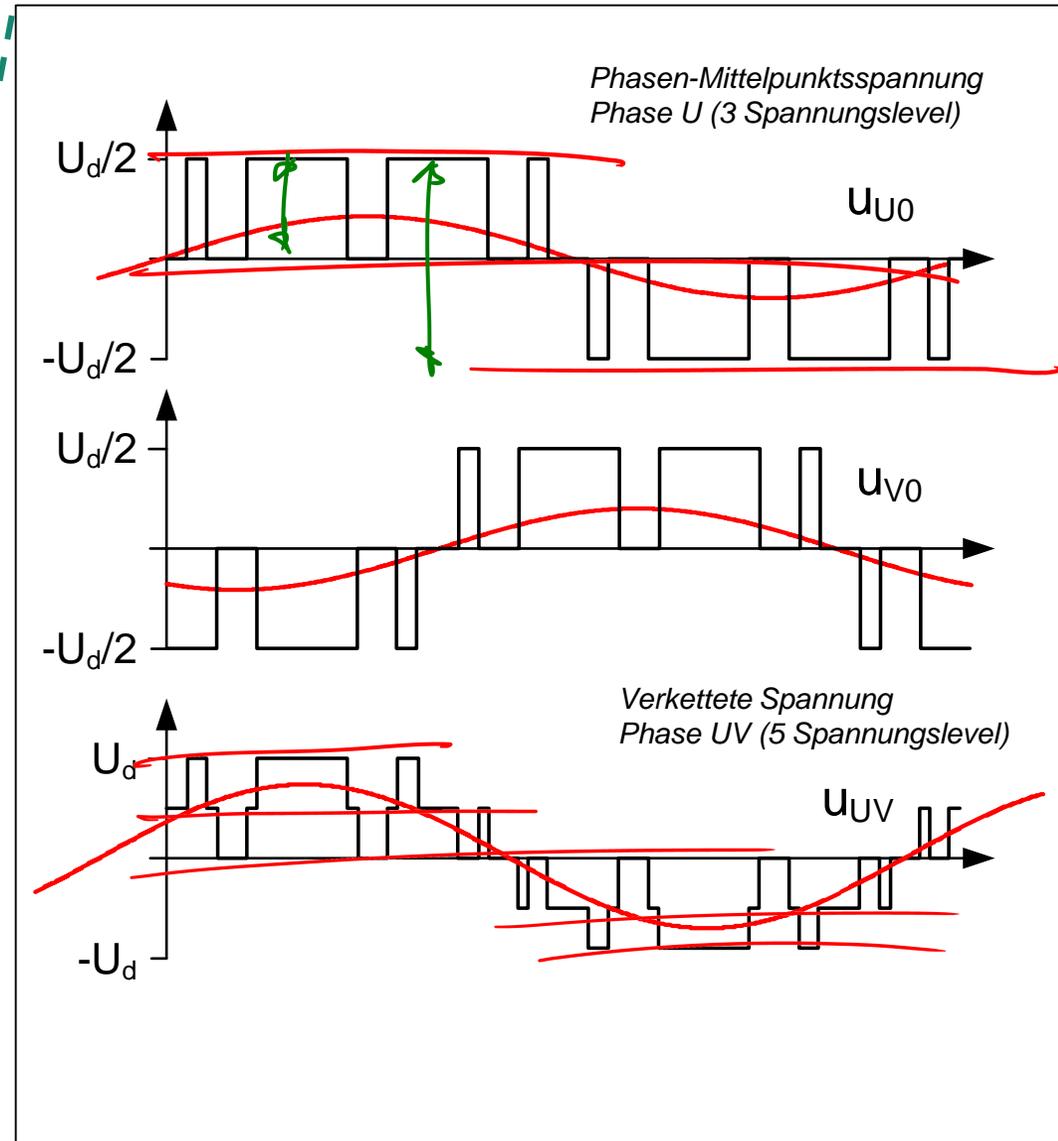
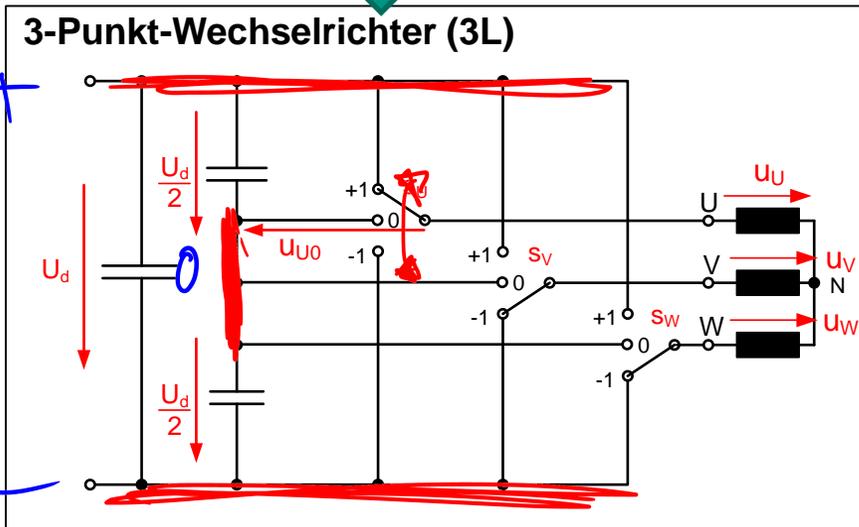
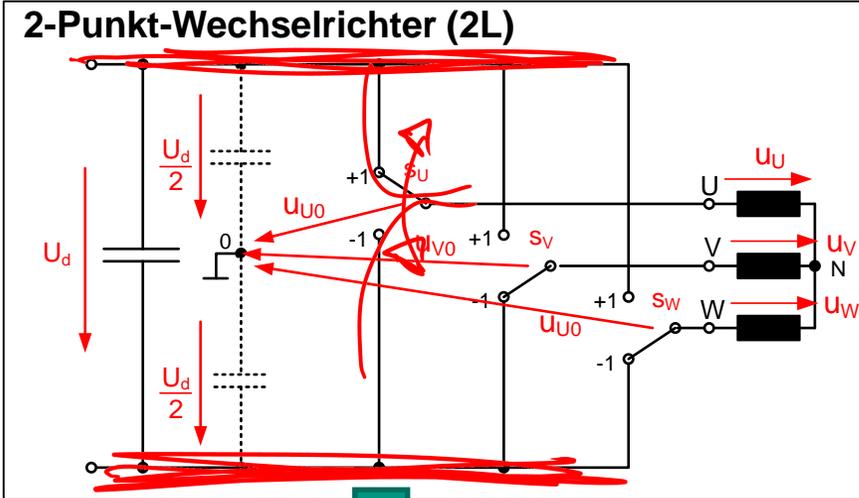
- Dioden-/Thyristoreinspeisung (Diode Front End = DFE) oder Aktive Einspeisung (Active Front End = AFE)
- Halbleiter: Si-IGBT- und SiC-MOSFET-Module mit $U_{CES}=0,65-1,7kV$ (große Auswahl in verschiedenen Bauformen verfügbar)
- Zwischenkreiskondensatoren: Elektrolytkondensatoren in Reihenschaltung, Folienkondensatoren (geringere Verluste, größeres Volumen, höhere Kosten)
- Schaltfrequenz: 1..30..100.. kHz (abh. von Leistung und Halbleiter)
- Regelung: u/f-Steuerung, Vektorregelung, Direct Torque Control
- Modulation: PWM, Raumzeiger, Flat-Top, Optimierte Pulsmuster, Hysterese-Regelung
- auf Netzseite oft mit Netzfilter

Quelle: Siemens, ABB

5. Topologien – Stromrichter für Antriebe und Netze



5. Topologien – Niederspannung (LV) - 3-Punkt-Wechselrichter (3L-NPC)



5. Topologien – Niederspannung (LV) - 3-Punkt-Wechselrichter (3L-NPC)

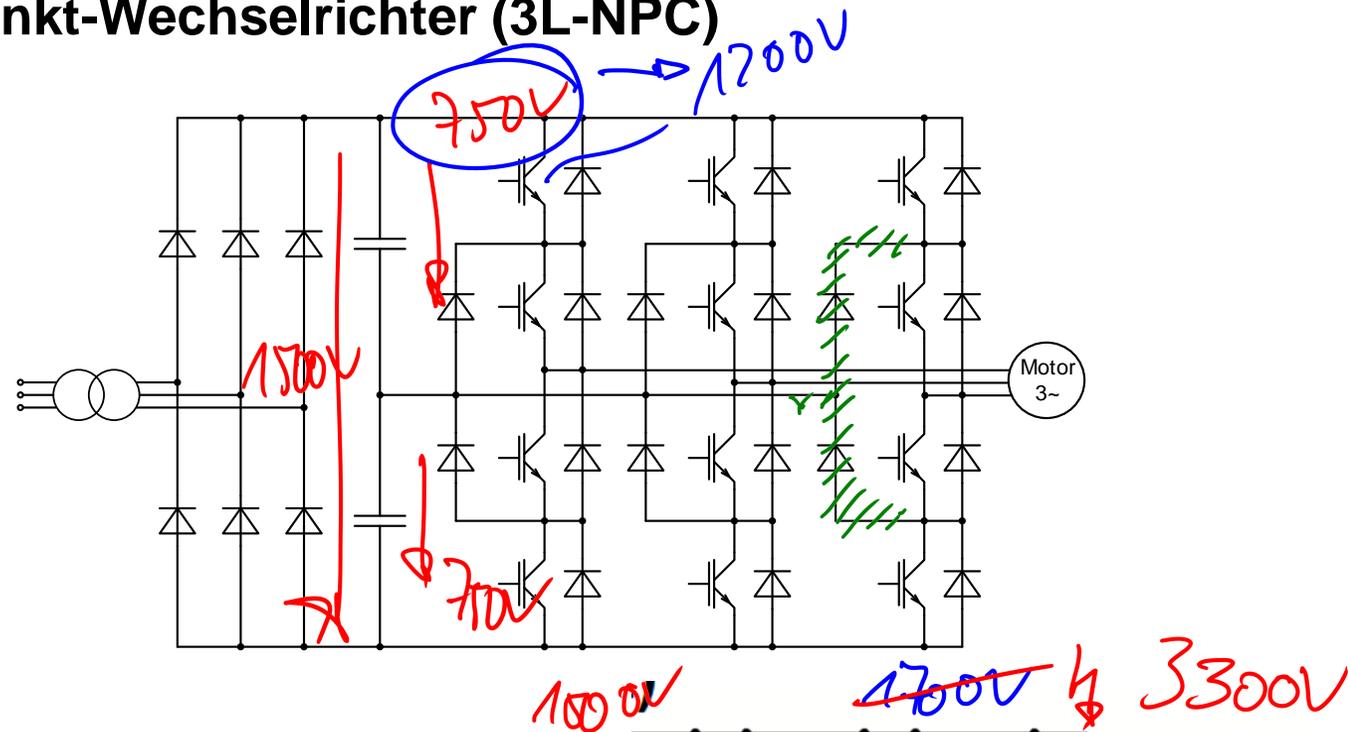
- Einführung der 3L-NPC-Umrichter getrieben durch:
 - Höhere Anforderungen an Harmonische in Ausgangsspannung/-strom
 - Höhere Spannungen: z.B. 1500VDC bei Photovoltaikanlagen, 900VAC bei Windenergieanlagen
- Noch keine weite Verbreitung in Antriebsapplikationen (höhere Kosten, höhere Komplexität)



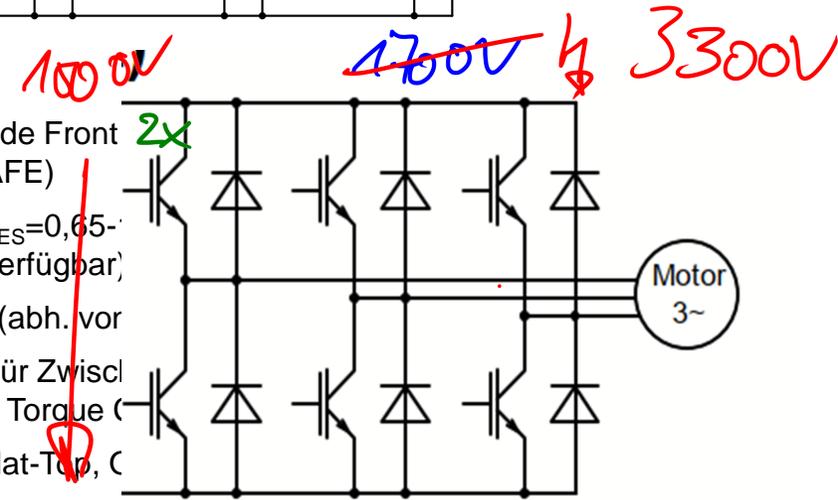
3L-NPC: MR GRIDCON® ACF (600kvar, 690VAC)



3L-NPC: GE ProSolar Central Inverter PSC-1,000MV-L-QC (1000kW, 1500VDC)



- Dioden-/Thyristoreinspeisung (Diode Front Einspeisung (Active Front End = AFE))
- Halbleiter: Si-IGBT-Module mit $U_{CES}=0,65$ -zunehmend auch in 3L-Modulen verfügbar)
- Schaltfrequenz: 1 kHz bis 15 kHz (abh. vor
- Regelung: Symmetrier-Regelung für Zwischl Steuerung, Vektorregelung, Direct Torque (
- Modulation: PWM, Raumzeiger, Flat-Top, C Hysterese-Regelung
- auf Netzseite oft mit (verkleinertem) Netzfilter



Quelle: Woodward

5. Topologien – Niederspannung (LV) - Solar-Wechselrichter (u.a. 3L-NPC)

Market share 2018 of converters for photovoltaics:

- 3ph (251kW<P): 31%
(Trend towards increasing plant sizes, i.e. higher power ratings / voltages)
- 3ph (36kW<P<250kW): 8%
- 3ph (P<35kW): 29%
- 1ph (P<3,7kW): 32%



3L-TNPC: TMEIC Solar Ware® Samurai (2700kW, 1500VDC)



5L-TNPC: Sungrow SG1500HV (1500kW, 1300VDC)



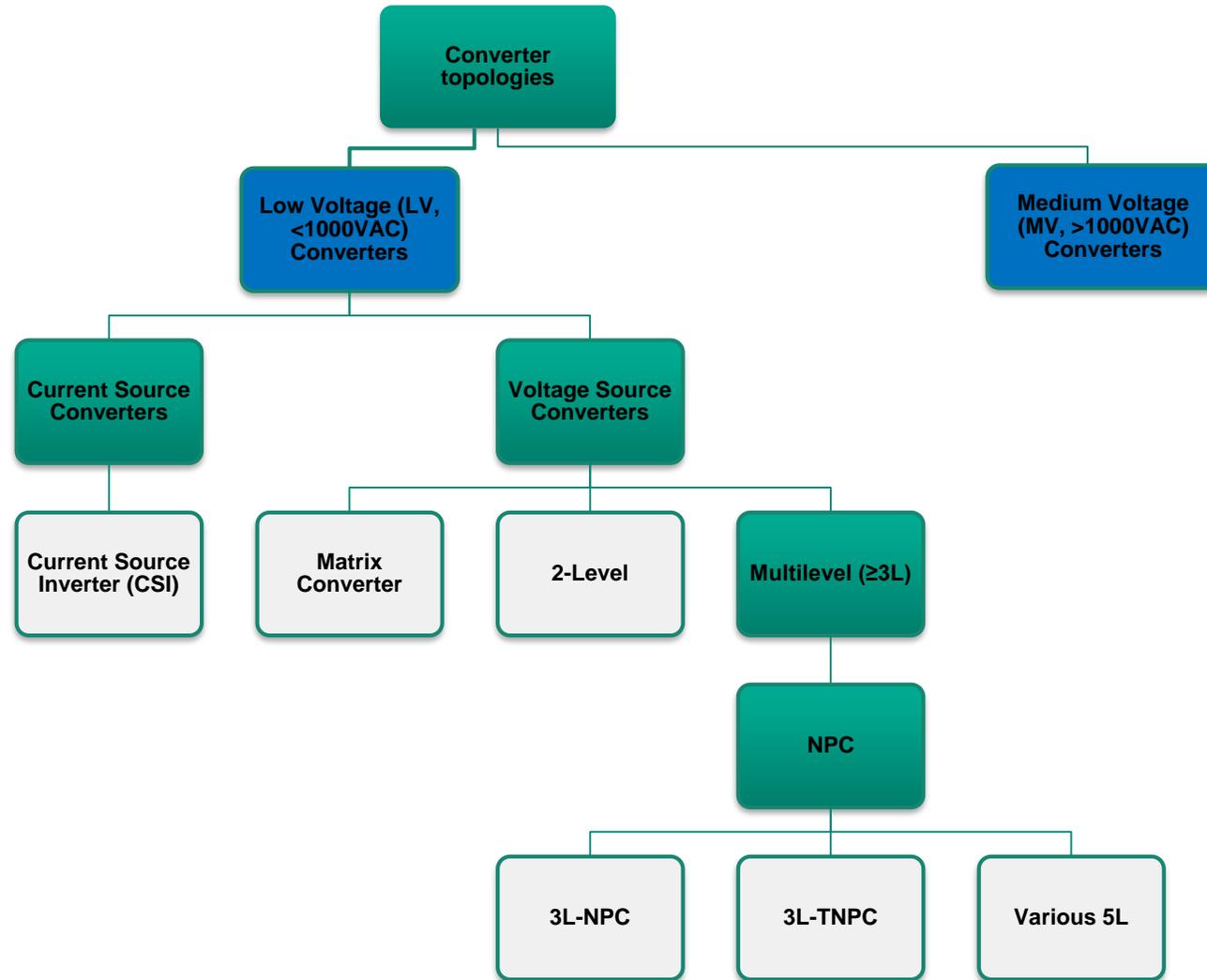
3L-NPC: GE ProSolar Central Inverter PSC-1,000MV-L-QC (1000kW, 1500VDC)



2L: SMA Sunny Central (2400kW, 1500VDC)

source: TMEIC, Sungrow, SMA, GE

5. Topologien – Stromrichter für Antriebe und Netze

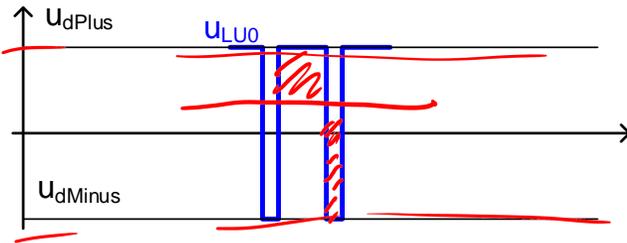
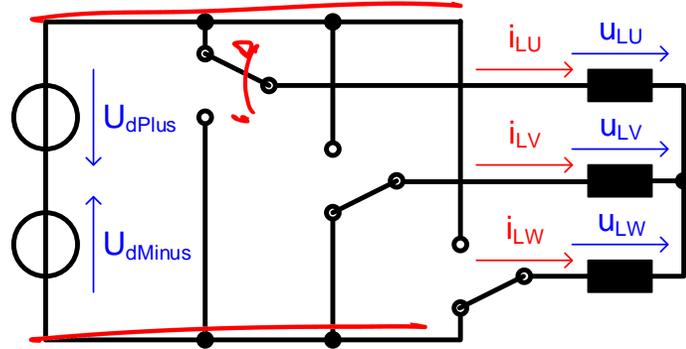


5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

Matrixumrichter - Prinzip

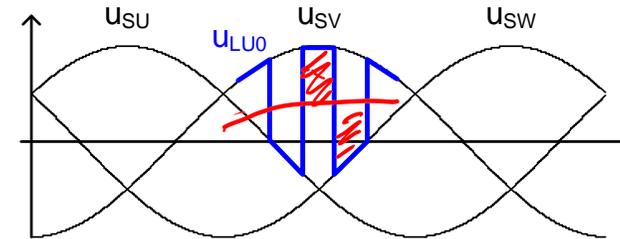
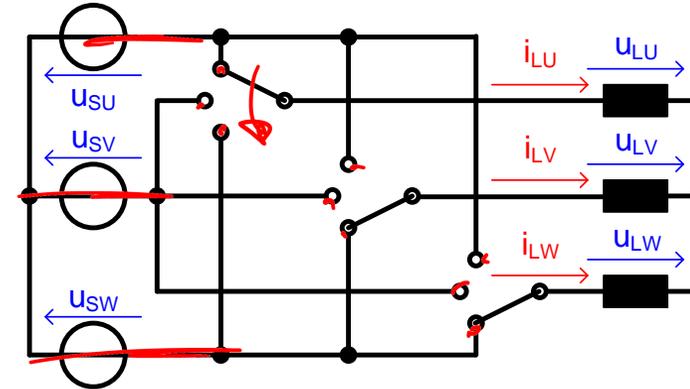
AC → AC

Spannungszwischenkreis-Umrichter



- **Zwischenkreis:** Spannungsquelle, realisiert als Kondensator
- **Last:** induktiv, z.B. Motor
- Die Ausgangsspannungen werden durch periodisches Umschalten zwischen den zwei Eingangs-(Gleich-) Spannungen erzeugt.

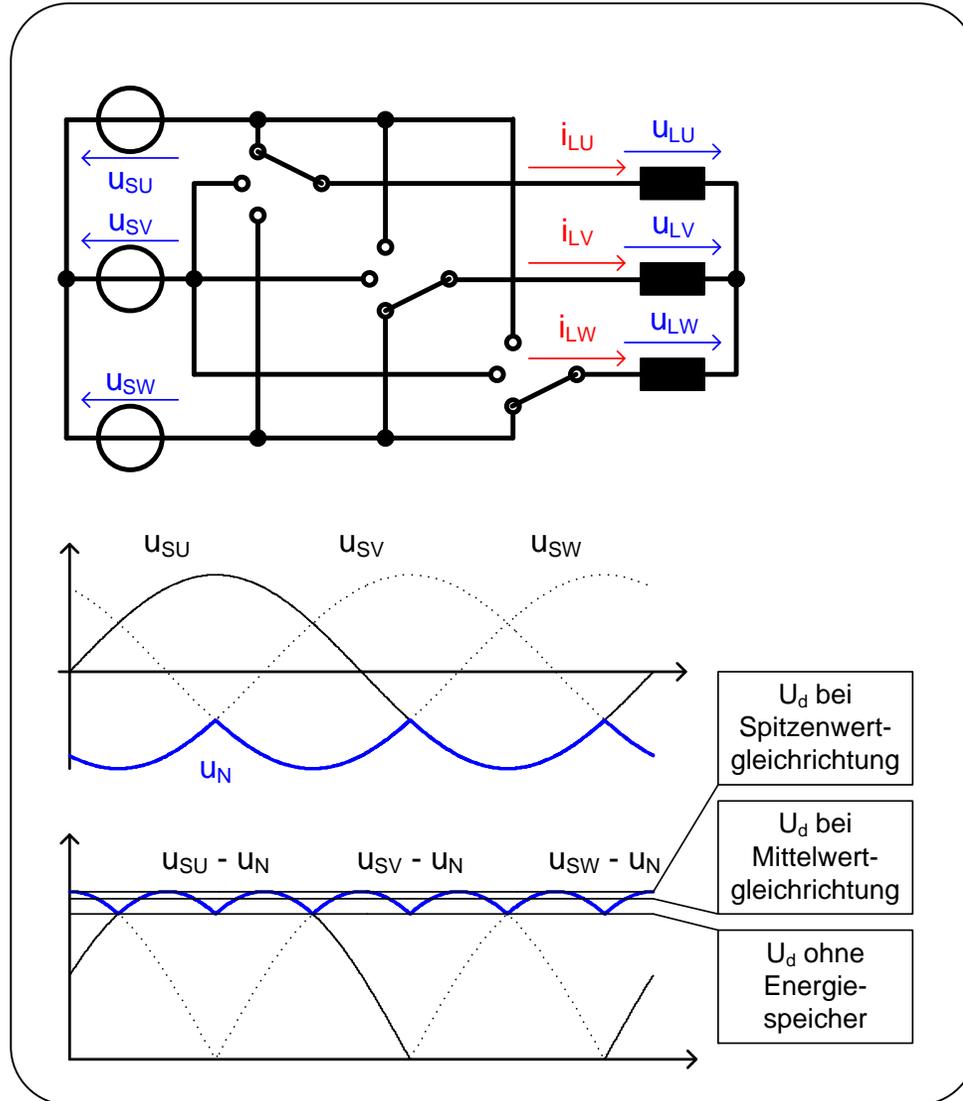
Matrixumrichter



- **Zwischenkreis:** AC-Kondensatoren am Eingang
- **Last:** induktiv, z.B. Motor
- Die Ausgangsspannungen werden durch periodisches Umschalten zwischen den drei Eingangs-(Wechsel-) Spannungen erzeugt.

5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

Matrixumrichter - Ausgangsspannung



dreiphasiger Diodengleichrichter,
ideale Spitzenwertgleichrichtung

$$U_d = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_S$$

$$U_{U,1} = \frac{U_d}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} = U_S$$

dreiphasiger Diodengleichrichter,
ideale Stromglättung

$$U_d = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_S$$

$$U_{U,1} = \frac{3}{\pi} \cdot U_S = 0,955 \cdot U_S$$

Matrix-Umrichter, fiktive Zwischenkreisspg.

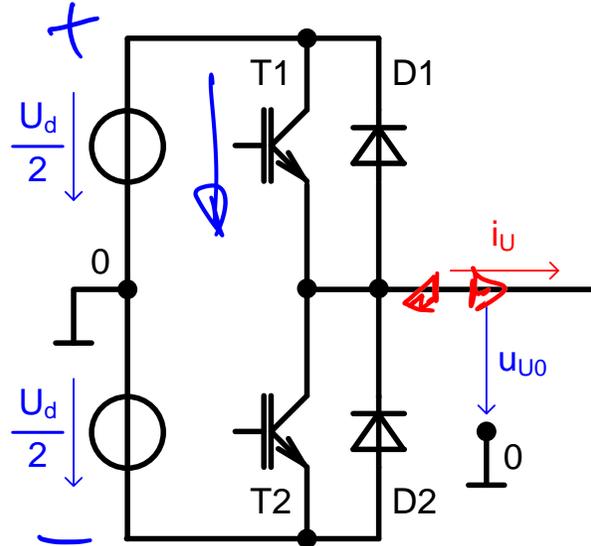
$$U_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_S$$

$$U_{U,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_S = 0,866 \cdot U_S$$

5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

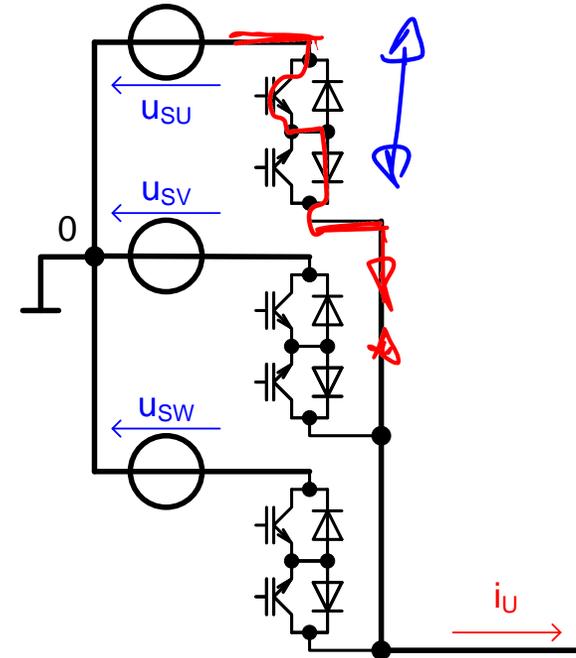
Matrixumrichter - Schalter

Spannungszwischenkreis-Umrichter



- Sperren: unidirektional sperrfähig
- Leiten: bidirektional leitfähig
- sicherstellen, dass I_L immer fließen kann
→ Freilaufdioden
- sicherstellen, dass U_d immer gesperrt wird
→ Verriegelungszeit zwischen T1 und T2
- pro Phase zwei IGBT und zwei Freilaufdioden
- netzseitiger + motorseitiger Umrichter: 12 x T; 12 x D

Matrixumrichter

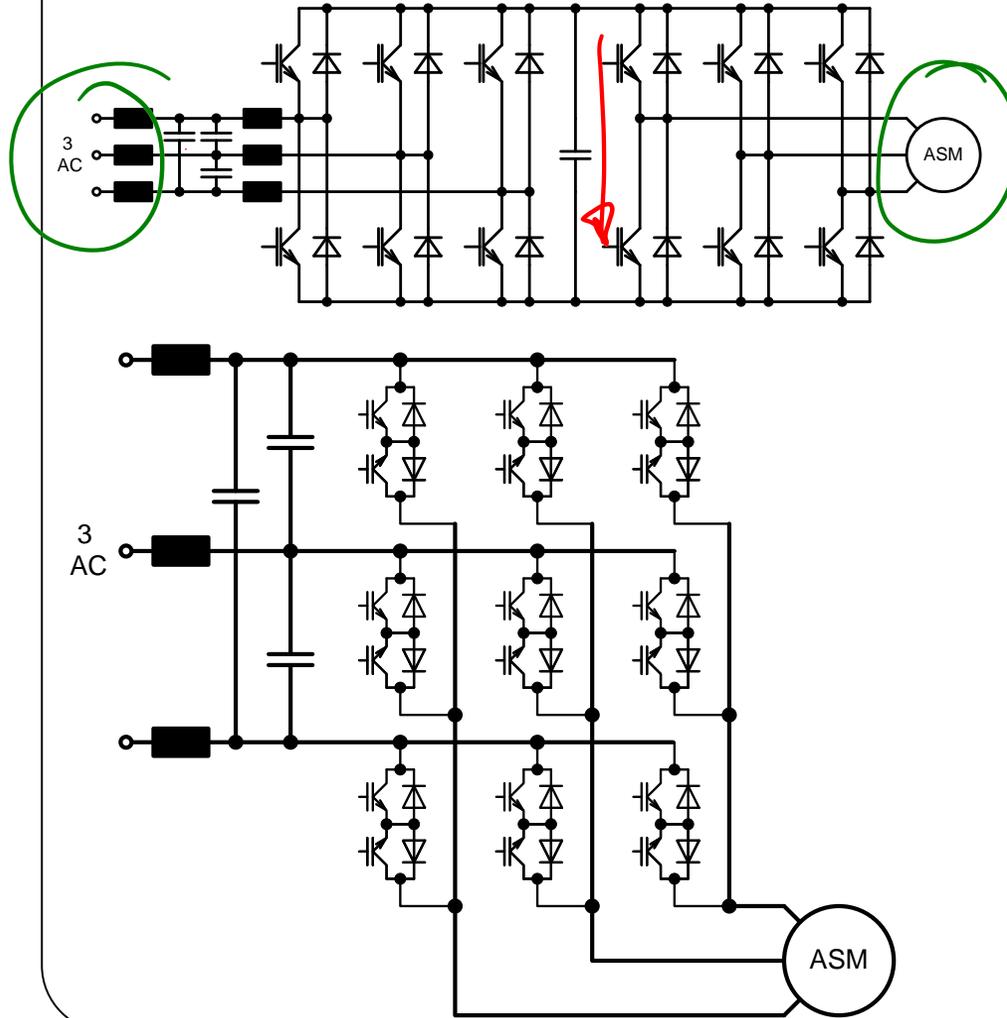


- Sperren: bidirektional sperrfähig
- Leiten: bidirektional leitfähig
- sicherstellen, dass I_L immer fließen kann und dass U_d immer gesperrt wird
→ komplexes Ansteuerschema in Abhängigkeit von der Polarität der Ströme und Spannungen
- pro Phase sechs IGBT und sechs Freilaufdioden
- netzseitiger + motorseitiger Umrichter: 18 x T; 18 x D

5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

Matrixumrichter - Realisierung

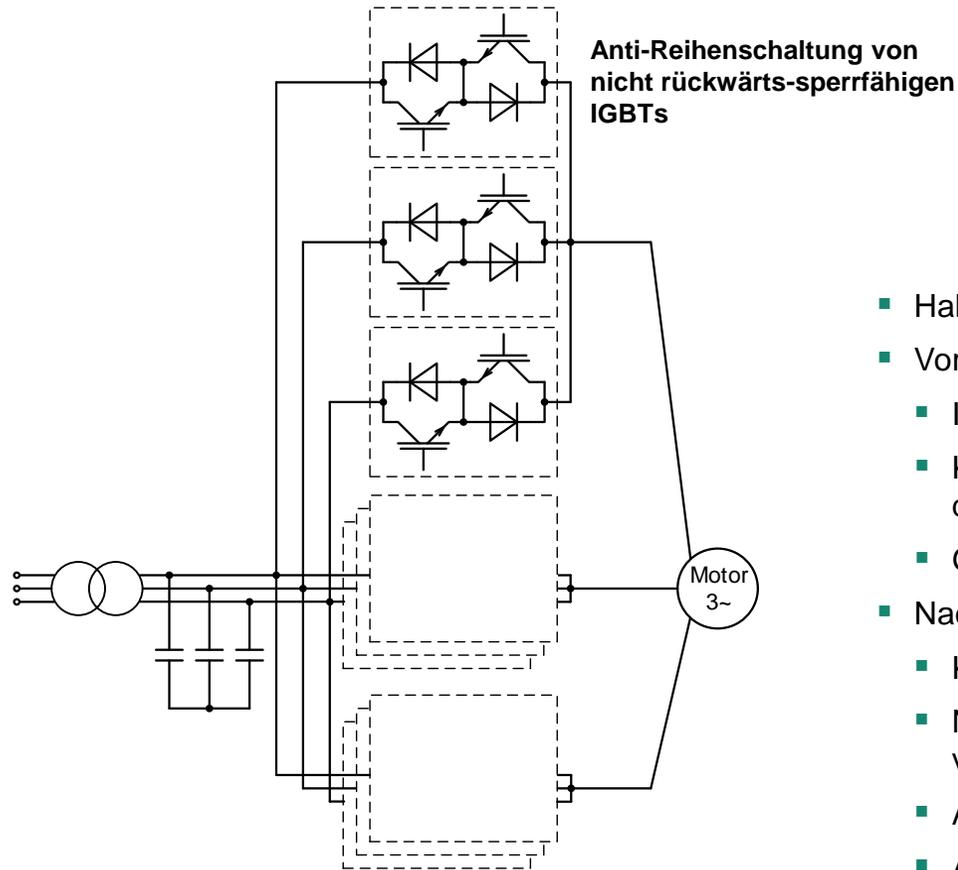
Rückspeisefähiger Spannungszwischenkreis-Umrichter



- kein Energiespeicher im Zwischenkreis
Vorteil: Volumen, Zuverlässigkeit
Nachteil: kein Überbrücken von Netzspannungseinbrüchen
- geringerer Filteraufwand
- prinzipbedingt rückspeisefähig
- geringere Ausgangsspannung
- Verkopplung von Netz- und Motor-Umrichter:
komplexe Steuerung, begrenzte Freiheitsgrade
- komplexe Kommutierungssteuerung
- ausgedehnte Kommutierungskreise
- höhere Anzahl der
Leistungshalbleiter/Ansteuerbaugruppen
- hohe Halbleiterbelastung bei Motorfrequenz
gleich Netzfrequenz

5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

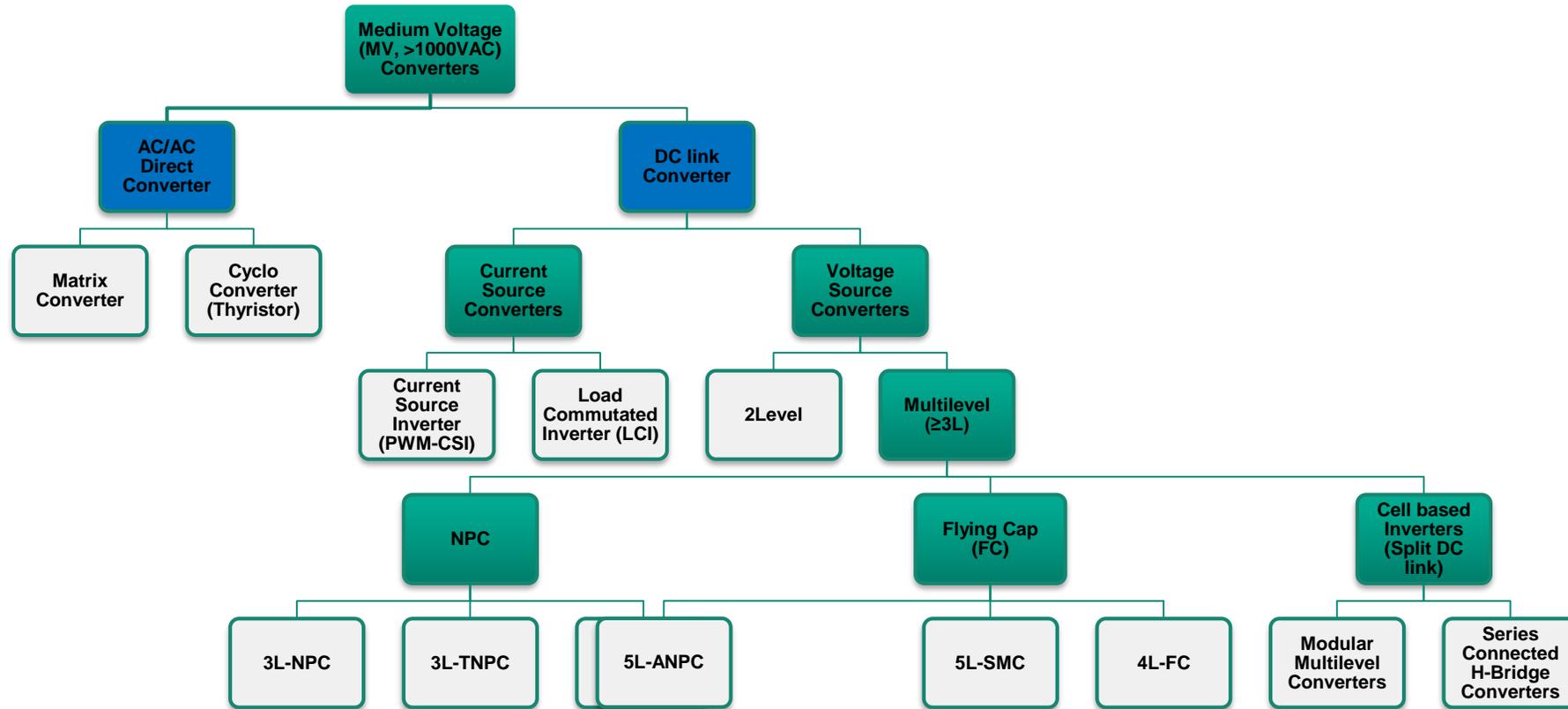
- Verbreitung von Matrixumrichtern gefördert durch:
 - Integration Maschine-Umrichter
 - Verfügbare Halbschalter (z.B. rückwärts sperrfähig)
- Noch keine weite Verbreitung in Antriebs- und Netzapplikationen (siehe Nachteile)



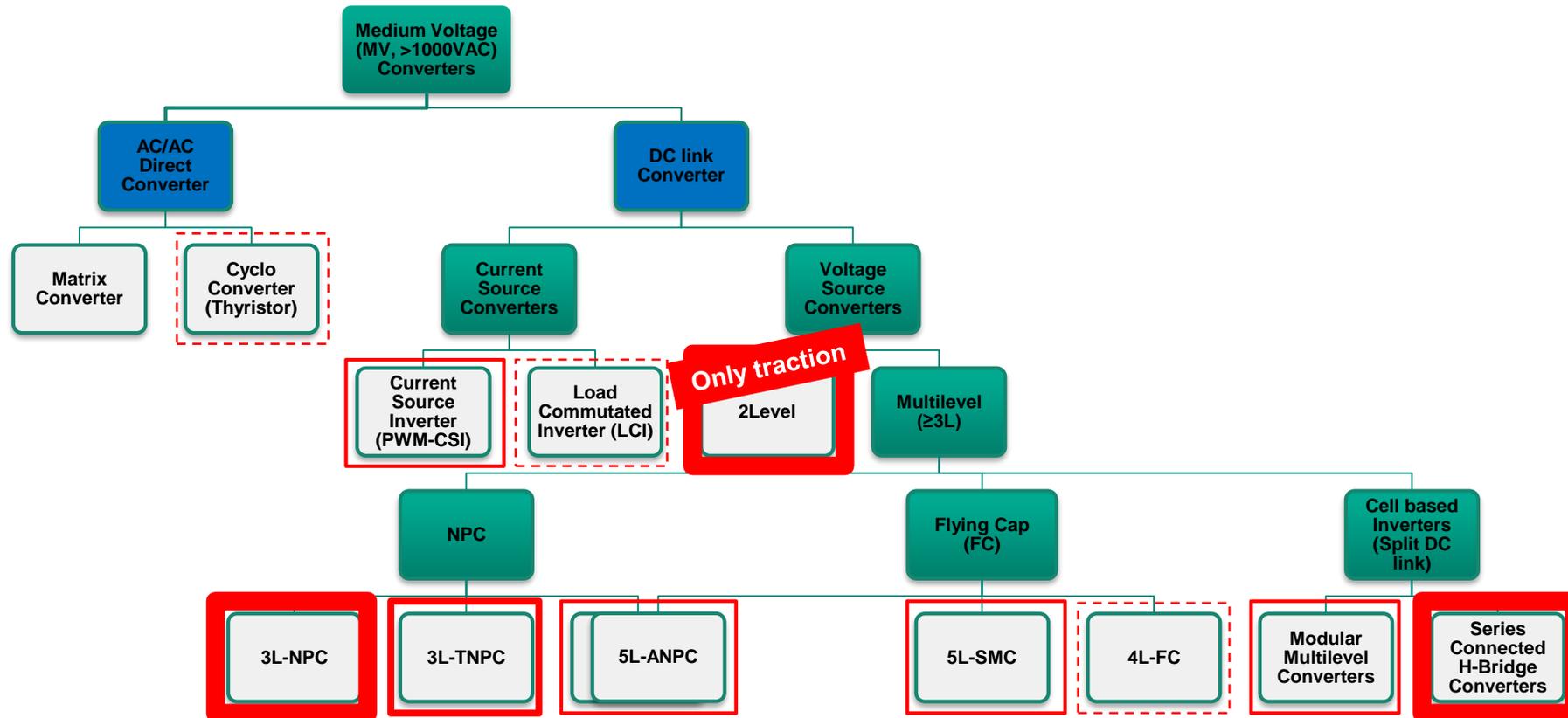
- Halbleiter: Si-IGBT-Module mit $U_{CES}=1,2-1,7kV$
- Vorteile:
 - Immer rückspeisefähig (AFE integriert)
 - Kein Zwischenkreis (d.h. geringes Volumen), nur AC-Kondensatoren für die Kommutierung
 - Geringe Oberschwingungen am Ein- und Ausgang
- Nachteile:
 - Kein Zwischenkreis zum Zwischenspeichern von Energie
 - Nur für Einzelantriebe, da kein gemeinsamer DC-Zwischenkreis vorhanden
 - Anschluss eines Bremsstellers nicht möglich
 - Aufwändige Regelung und Schutz bei Fehlerfällen

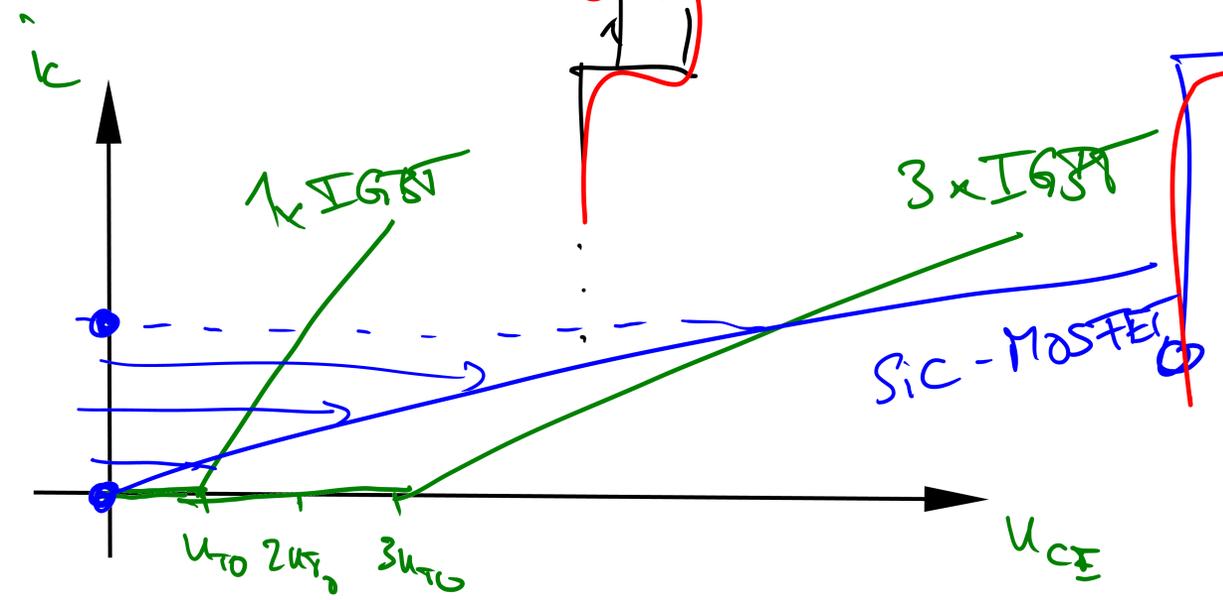
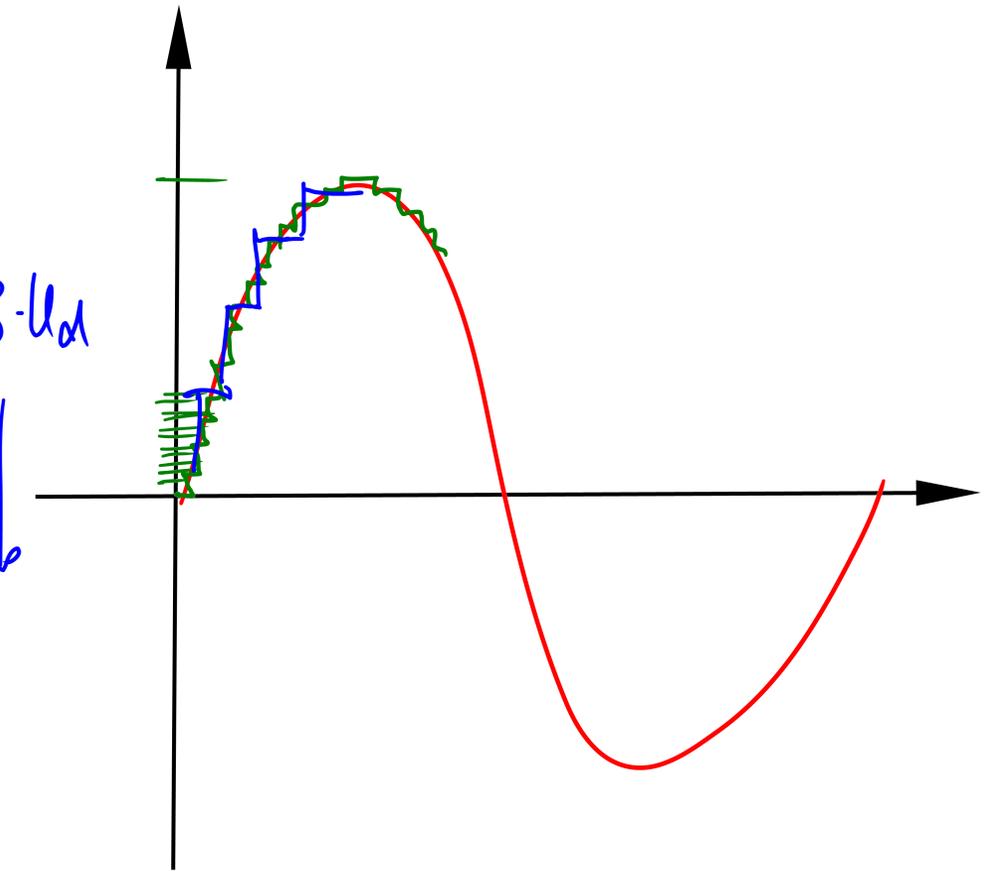
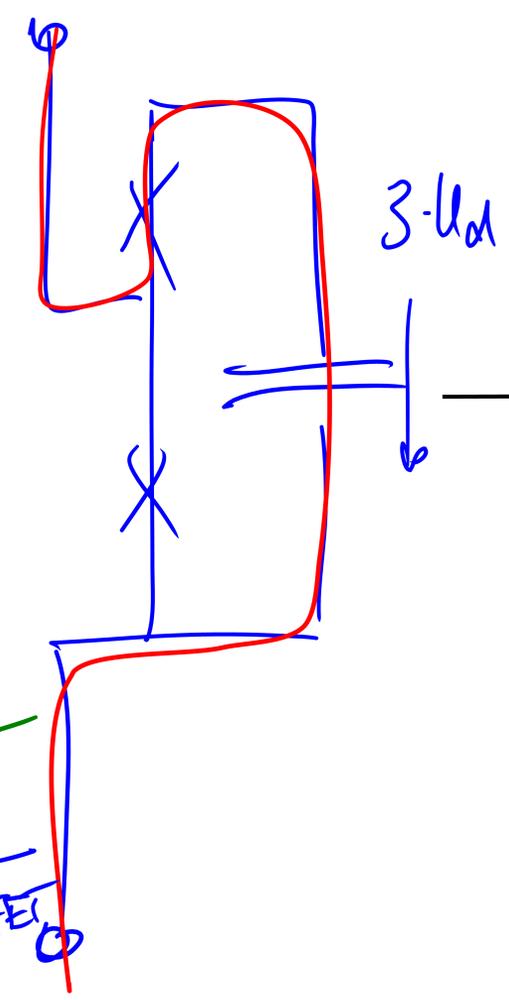
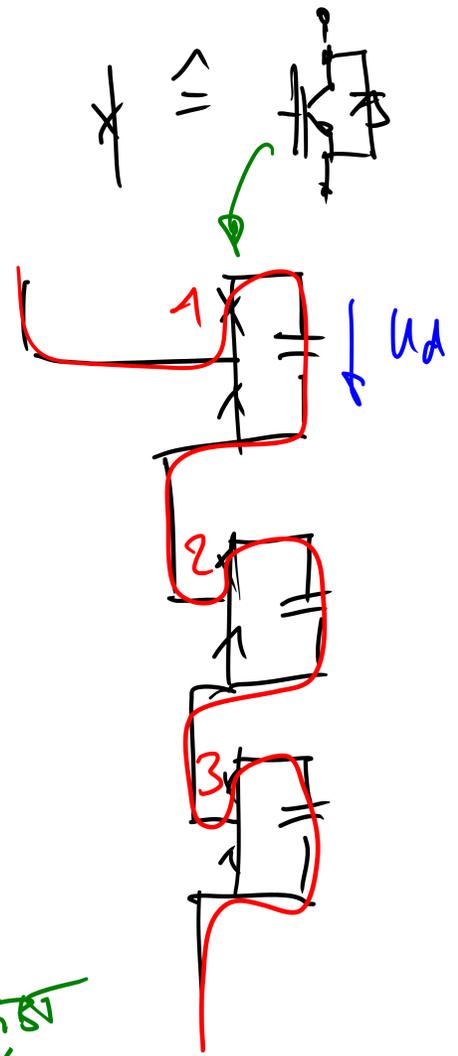
Quelle: Yaskawa

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



5. Topologien – Mittelspannung (MV)



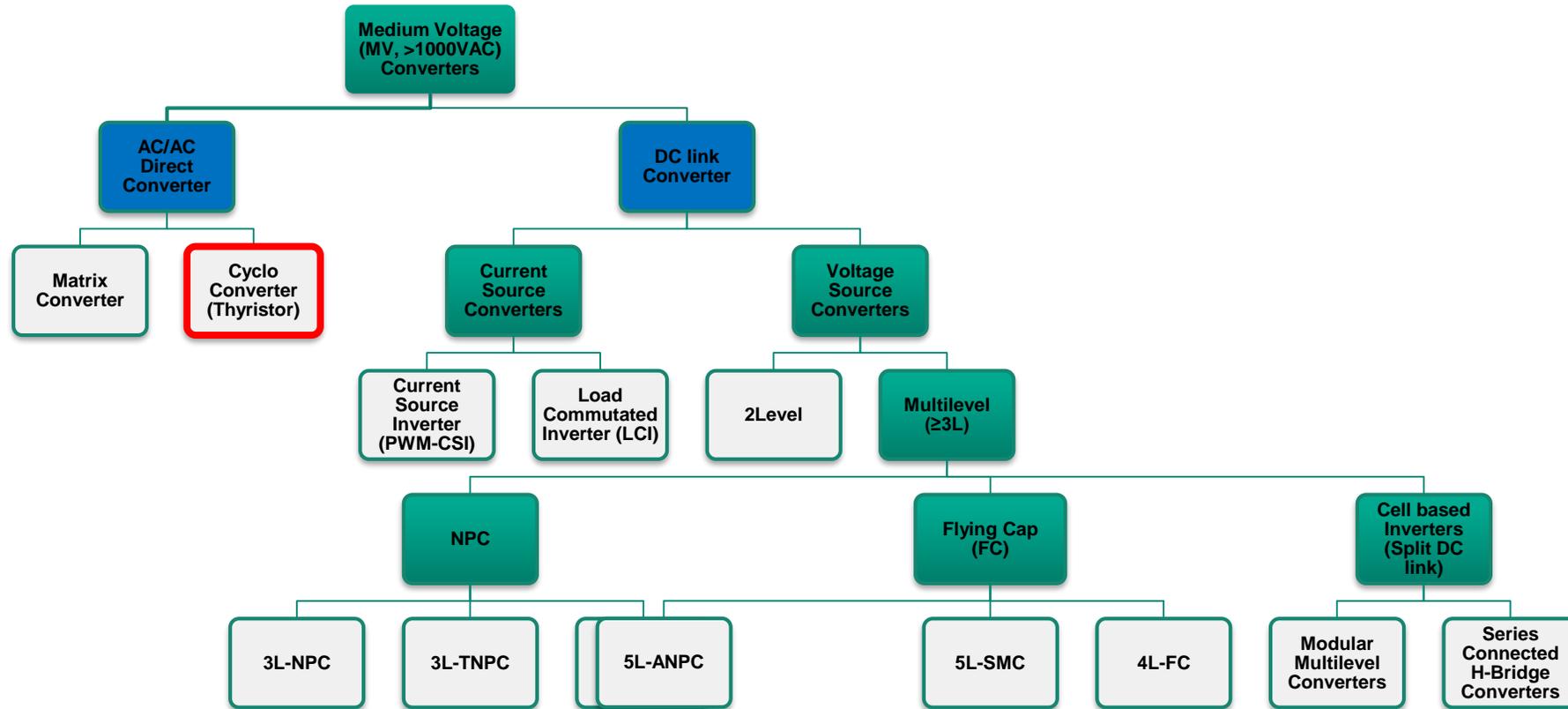


5. Topologien – Mittelspannung (MV)

SiC - MOSTETS ???

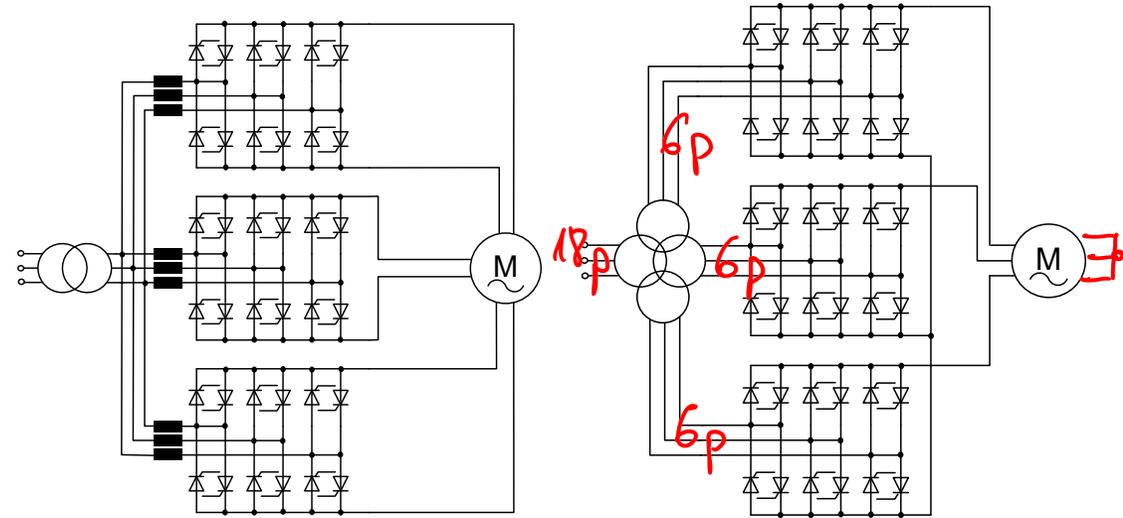
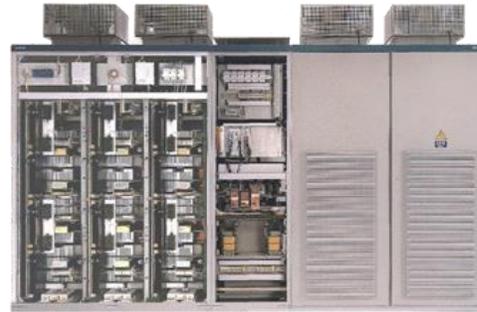
Topologie	Leistungshalbleiter	Leistungshalbleiter	AC-Ausgangsgrößen	AC-Ausgangsgrößen			Anwendungen
				Leistung (pro Einzel-SR)	Spannung	Frequenz	
AC/AC Cyclo Converter	Thyristor Direktumrichter	Thyristor		3-25MVA	1-4kV	0-22Hz (50Hz-Netz)	Rohrmühlen, Zementmühlen, Schiffsantriebe, Walzwerke
Umrichter mit Stromzwischenkreis	Current Source Inverter (CSI)	SGCT (Press Pack) (symmetrisch sperrender IGCT)		<7.5MVA	2.3-6.6kV	0-85Hz	
	Load Commutated Inverter (LCI)	Thyristor		2.5-100MVA	1.8-13.4kV	0-120Hz (begrenzt durch Freierzeit des Thyristors)	Anfahrumrichter, Kompressorantriebe, Schiffsantriebe
NPC Multilevel	3L-NPC	IGBT (Module, Press Pack) IGCT (Press Pack)		IGBT: <17MVA IGCT: <14MVA	IGBT: 2,3-6,9kV IGCT: 2,3-4,16kV	<400Hz (u.a. begrenzt durch resultierende Schaltfrequenzen der Halbleiter)	IGBT: Pumpen, Lüfter, Extruder IGCT, PP-IGBT: Hochleistungsantriebe (Walzwerke), Mehrachs-antriebe (Common-DC-Bus)
	3L-TNPC	IGBT (Press Pack)		<34MVA	6,0-10kV		
	5L-ANPC	IGBT (Module)		<3MVA	3,3-6,9kV		
	5L-TNPC	IGBT (Module, Press Pack)		<40MVA	2,3-6,9kV-13,8kV		
Multilevel mit verteiltem Zwischenkreis	MMC	IGBT (Module)		<23MVA..100MVA	3,3-7,2kV		
	SC	IGBT (Module, Press Pack) IGCT (Press Pack)		IGBT: <20MVA IGCT: <36MVA	IGBT: 3.3-6,9kV IGCT: 6-13,8kV		

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Thyristor Direktumrichter

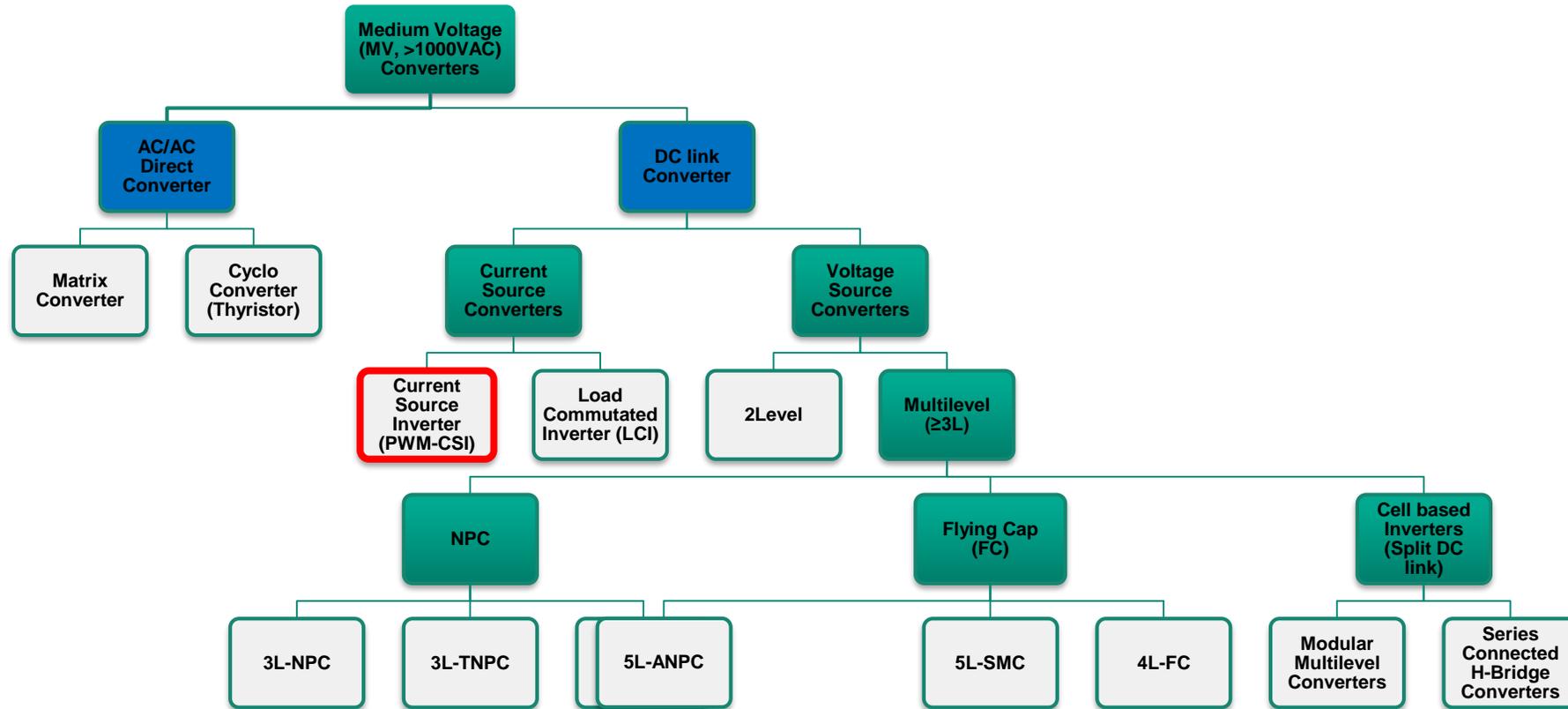
- Hauptanwendungsgebiete:
 - Walzwerke mit hohen Spitzenlasten (z.B. 20 MW für 60 s bei 10-20Hz)
 - Rohrmühlen für das Zerkleinern von Gestein mit max. 10m Durchmesser und Direktantrieb mit Synchronmaschine (6- z.B. 20 MW Dauerleistung bei 6-9Hz)



- Halbleiter: Thyristoren mit max. 8kV Sperrspannung
- Vorteile:
 - Keine Energiespeicher
 - Hohe Regeldynamik
 - Hohe Überlastfähigkeit
 - hohe Zuverlässigkeit
 - hoher Wirkungsgrad
 - Offene Schaltung (links): Verwendung eines Standard-Netztrafos
- Nachteile:
 - Ausgangsfrequenz auf ca. 22Hz (bei 50Hz-Netz) begrenzt
 - Blindleistungsbedarf auf der Netzseite
 - Speziallösung für wenige Anwendungen

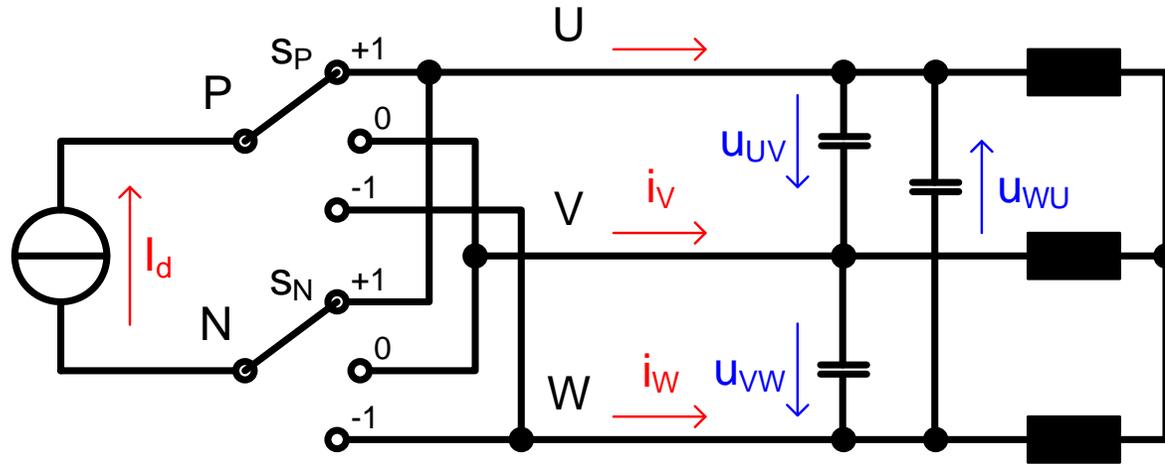
Quelle: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Current Source Inverter (CSI)

Pulswechselrichter mit eingepprägtem Strom - Schaltzustände



Spannungszwischenkreis-Umrichter:

- n Schalter mit je 2 Schaltzuständen
- 2^n (=8) Schaltzustände
- 2 Nullspannungszeiger
- $2^n - 2$ (=6) aktive Spannungszeiger

Stromzwischenkreis-Umrichter:

- 2 Schalter mit je n Schaltzuständen
- n^2 (=9) Schaltzustände
- n (=3) Nullstromzeiger
- $n^2 - n$ (=6) aktive Stromzeiger

Schaltfunktion		Phasenströme		
S_P	S_N	$\frac{i_U}{I_d}$	$\frac{i_V}{I_d}$	$\frac{i_W}{I_d}$
-1	-1	0	0	0
-1	0	0	-1	1
-1	+1	-1	0	1
0	-1	0	1	-1
0	0	0	0	0
0	+1	-1	1	0
+1	-1	1	0	-1
+1	0	1	-1	0
+1	+1	0	0	0

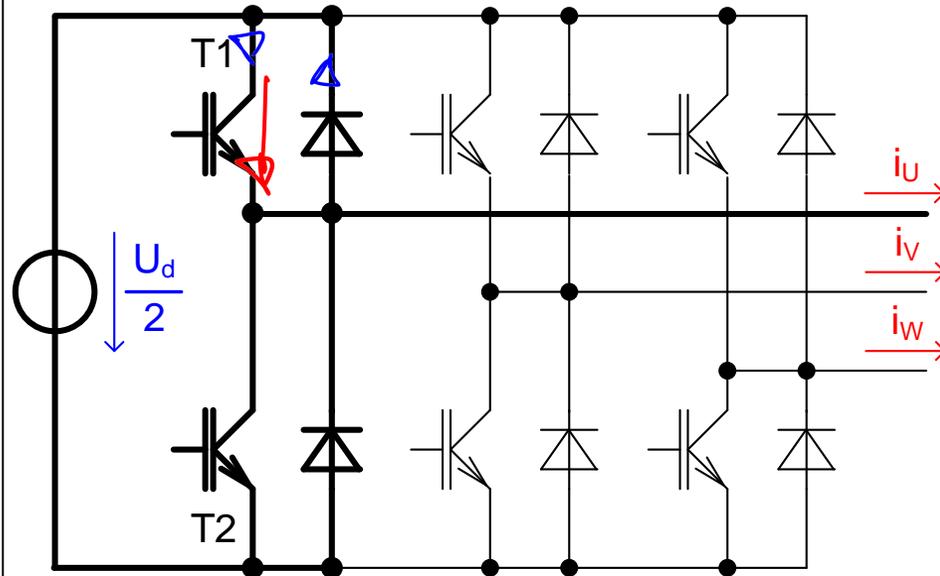
→
→
→
→
→
→
→

↺
↺
↺
↺

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Current Source Inverter (CSI)

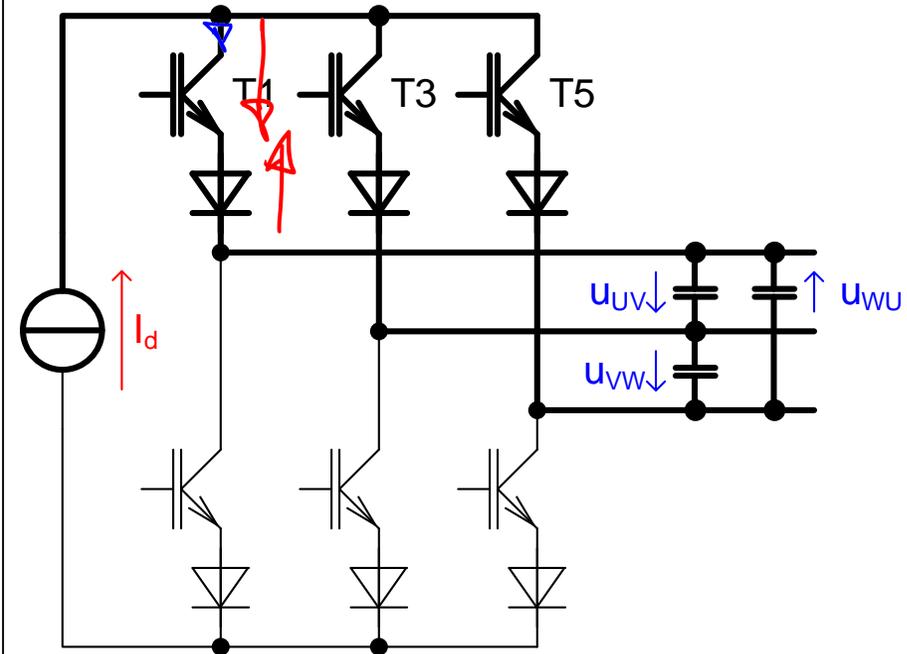
Pulswechselrichter mit eingepprägtem Strom - Schalter

Spannungszwischenkreis-Umrichter



- Sperren: unidirektional sperrfähig
- Leiten: bidirektional leitfähig
- sicherstellen, dass $i_{U,V,W}$ immer fließen kann
→ antiparallele Freilaufdioden
- sicherstellen, dass U_d immer gesperrt werden kann
→ Verriegelungszeit zwischen T1 und T2

Stromzwischenkreis-Umrichter

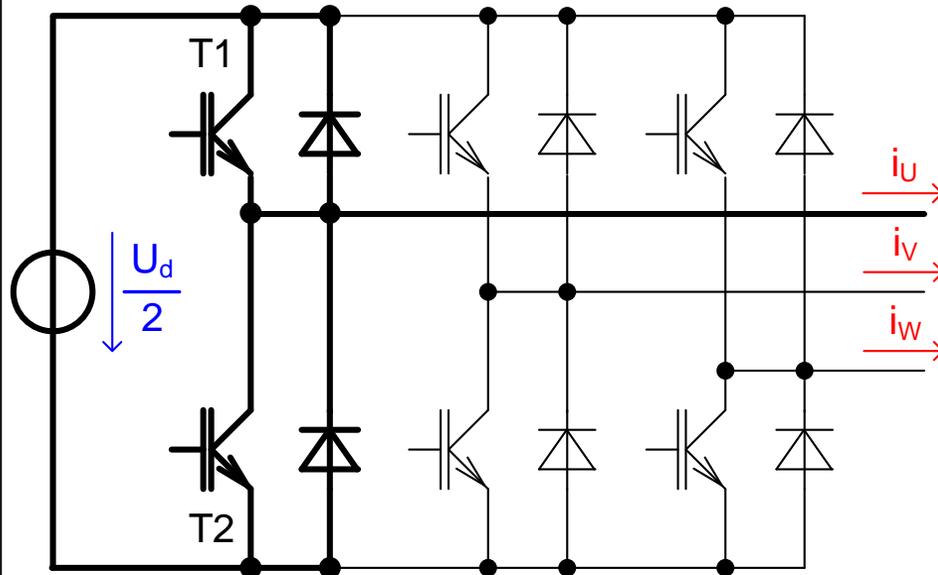


- Sperren: bidirektional sperrfähig
- Leiten: unidirektional leitfähig
- sicherstellen, dass u_{UV}, u_{VW}, u_{WU} immer gesperrt wird
→ Reihendioden
- sicherstellen, dass I_d immer fließen kann
→ Überlappungszeit zwischen T1, T3 und T5

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Current Source Inverter (CSI)

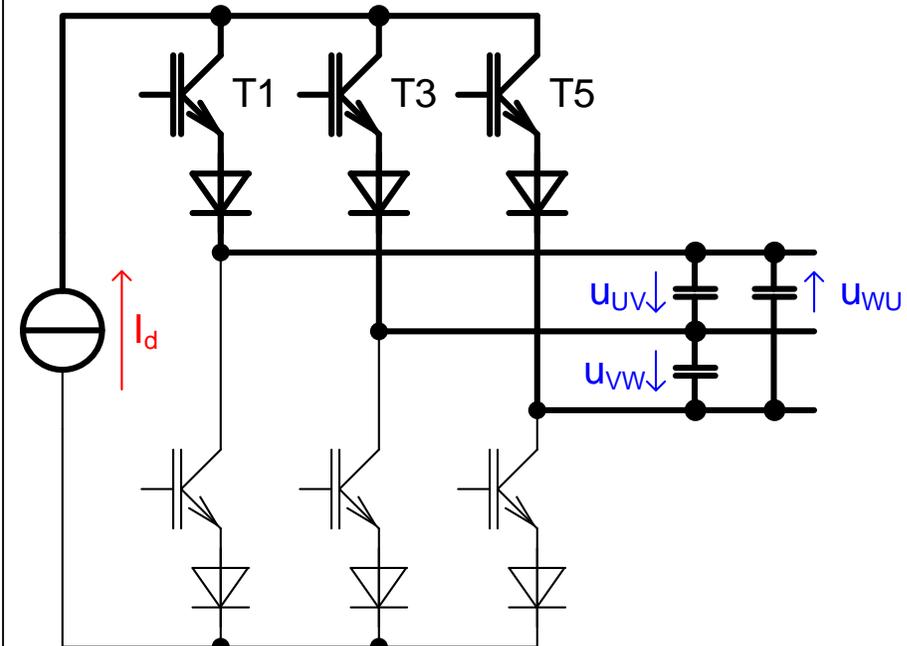
PWR mit eingprägtem Strom – zulässige Schaltzustände

Spannungszwischenkreis-Umrichter



- Schaltzustände mit definierter Ausgangsspannung:
in jeder Phase genau ein Schalter ein
 - aktive Spannungszeiger:
1 oberer / 2 untere oder 2 obere / 1 unterer
 - Nullspannungszeiger:
3 obere oder 3 untere
- Ausgangsspannung vom Laststrom abhängig:
in einer Phase beide Schalter aus
- unzulässige Schaltzustände:
in einer Phase beide Schalter ein (Kurzschluss)

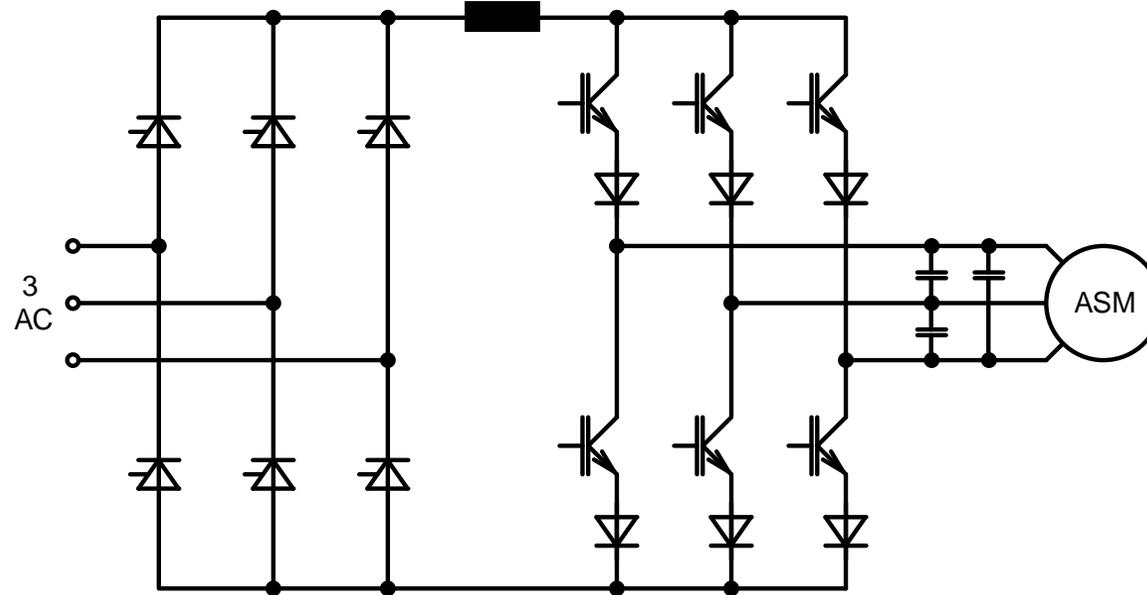
Stromzwischenkreis-Umrichter



- Schaltzustände mit definiertem Ausgangsstrom:
in jeder Hälfte genau ein Schalter ein
 - aktiver Stromzeiger:
beide „Ein“-Schalter in unterschiedlichen Phasen
 - Nullstromzeiger:
beide „Ein“-Schalter in gleicher Phase
- Ausgangsstrom von der Lastspannung abhängig:
in einer Hälfte mehr als ein Schalter ein
- unzulässige Schaltzustände:
in einer Hälfte kein Schalter ein (Leerlauf)

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Current Source Inverter (CSI)

Pulswechselrichter mit eingepprägtem Strom - Realisierung



- **netzseitiger Stromrichter:**
 - Thyristor-Stromrichter: rückspeisefähig, kostengünstig, aber schlechter $\cos\varphi$
 - Pulsumrichter: rückspeisefähig, aufwändiger, $\cos\varphi$ einstellbar
- **Zwischenkreis:**
 - Zwischenkreisstrom durch netzseitigen Stromrichter regelbar
 - Energiedichte der Zwischenkreisdrossel geringer als die eines Zwischenkreiskondensators
- **Modulation**
 - Referenzkurvenverfahren, Raumzeigermodulation etc. sind analog zu U-ZK-WR möglich
- **Vorteile**
 - sinusförmige Motorströme und -spannungen
- **Nachteile**
 - große ZK-Drossel, rückwärts sperrfähige Bauelemente

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Current Source Inverter (CSI)

Prinzipschaltbild Current Source Inverter mit 6-pulsiger Thyristoreinspeisung

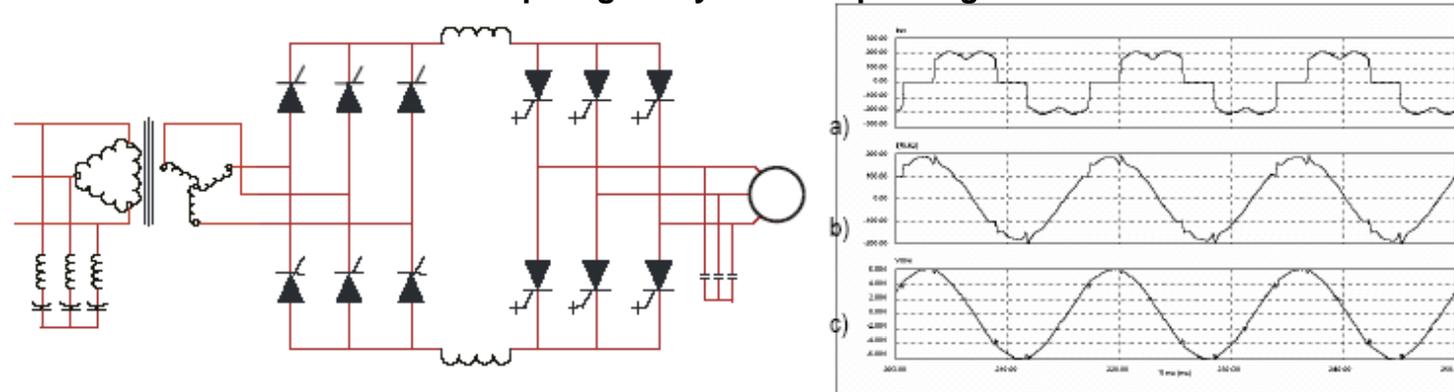


Figure 1.2 – 6-pulse Rectifier with input waveforms

- a) Line current before the filter
- b) Line current after the filter
- c) Line-to-line voltage at point of common coupling (PCC)

Prinzipschaltbild Current Source Inverter mit 6-pulsiger aktiver Einspeisung

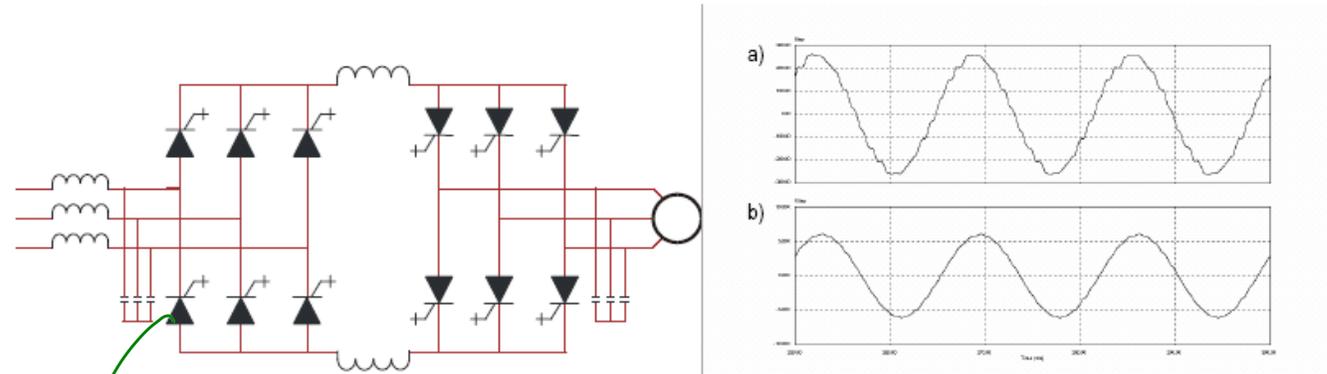


Figure 1.3 – PWM rectifier (active front-end) and its input current/voltage waveforms

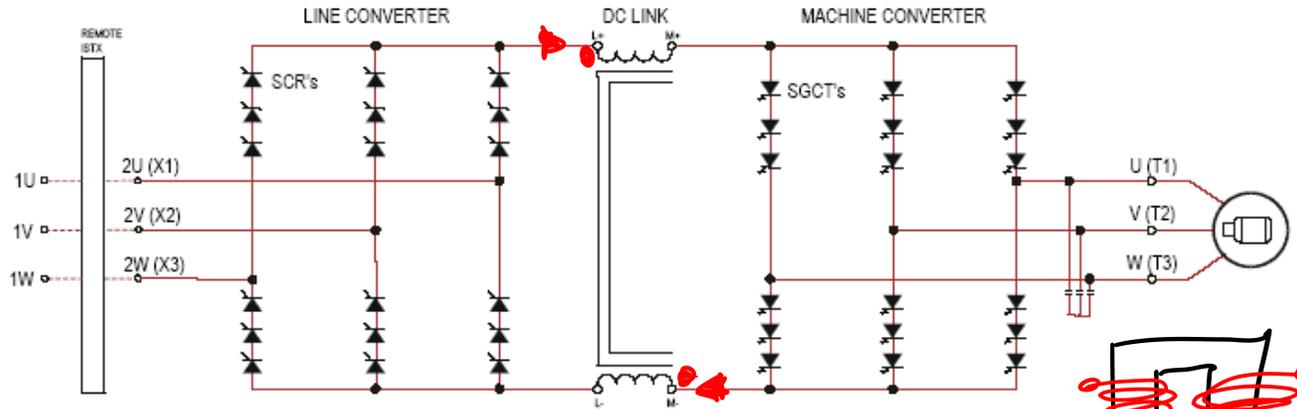
- a) Line current
- b) Line-to-line voltage at PCC

rückwärts sperrfähige IGBTs

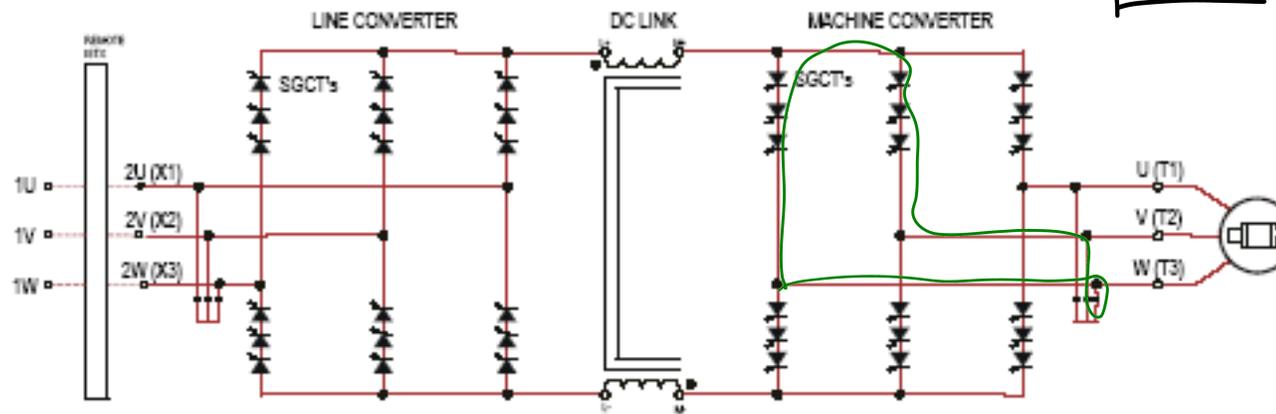
Quelle: Rockwell Automation

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Current Source Inverter (CSI)

Prinzipschaltbild Current Source Inverter mit Reihenschaltung



6500V, 800A SGCT & Gate Drive



6600 Volt - PWM Rectifier, Base Drive with Connection for Remote Isolation Transformer



Quelle: ABB, Rockwell Automation

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Current Source Inverter (CSI)

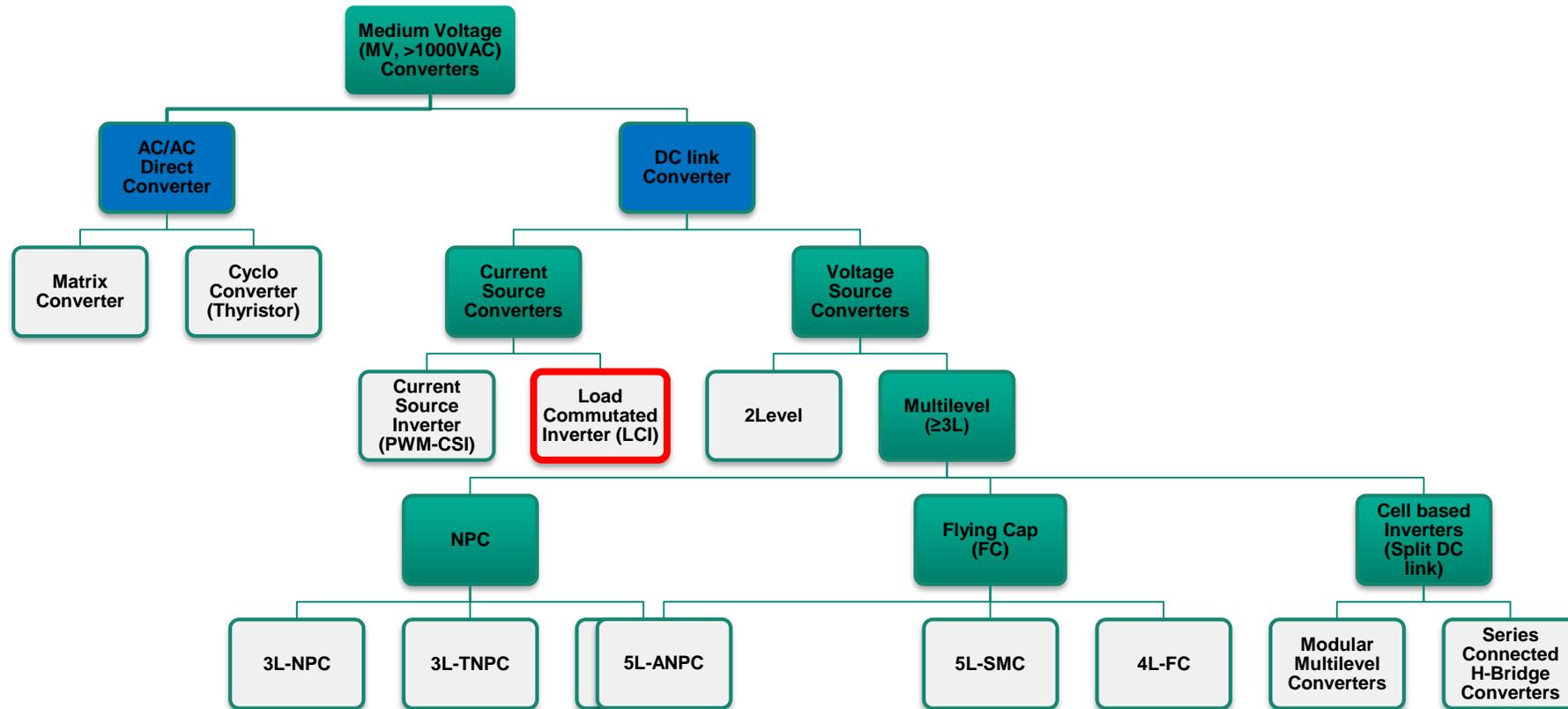
- Hauptanwendungsgebiete:
 - Einfache Pumpen, Lüfter, Kompressoren
 - Wegen der sinusförmigen Ausgangsspannung und der geringen Spannungsteilheiten auf der Motorseite:
 - “Retrofit”-Antriebe mit bestehenden Netzmotoren



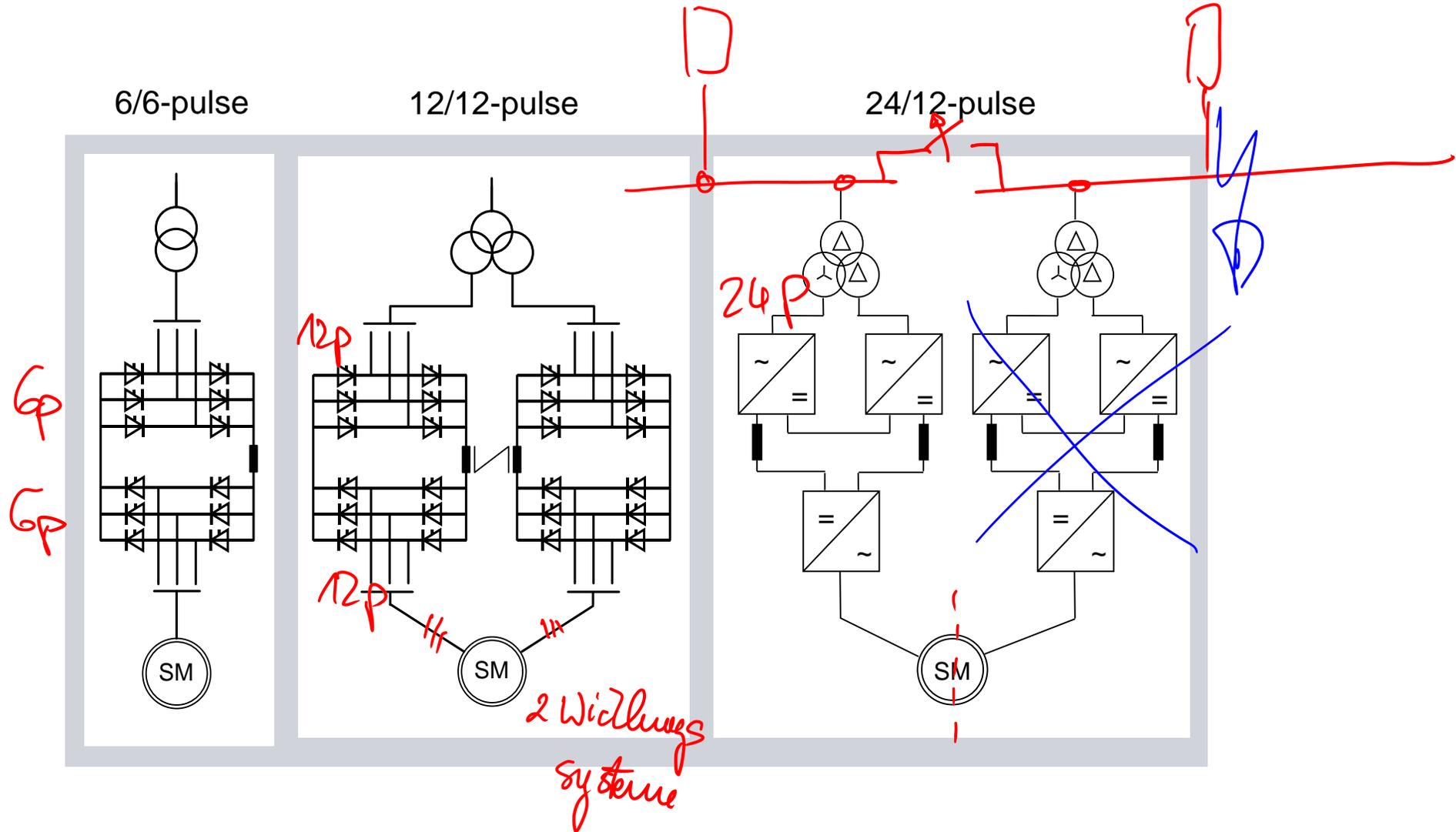
- Halbleiter: Symmetrisch sperrende IGCTs mit max. 6,5kV Sperrspannung
- Modulation: PWM, Raumzeiger, Optimierte Pulsmuster
- Vorteile:
 - Einfache Spannungsskalierbarkeit durch Reihenschaltung von IGCTs
 - Anwendbar für Standard-Motoren durch integrierten Filter
 - Redundanz ist theoretisch möglich
 - Rückspeisefähig
 - Einfaches Schutzkonzept
- Nachteile:
 - Mehrmotorenbetrieb mit gemeinsamen DC-Bus nicht möglich
 - Grundsätzlich aktive Einspeisung (PWR oder Thyristor-Gleichstromsteller) erforderlich
 - Geringe Dynamik
 - AC-Kondensatoren erforderlich (Unterstützung der IGCT-Kommutierung, Filter)

Quelle: Rockwell Automation

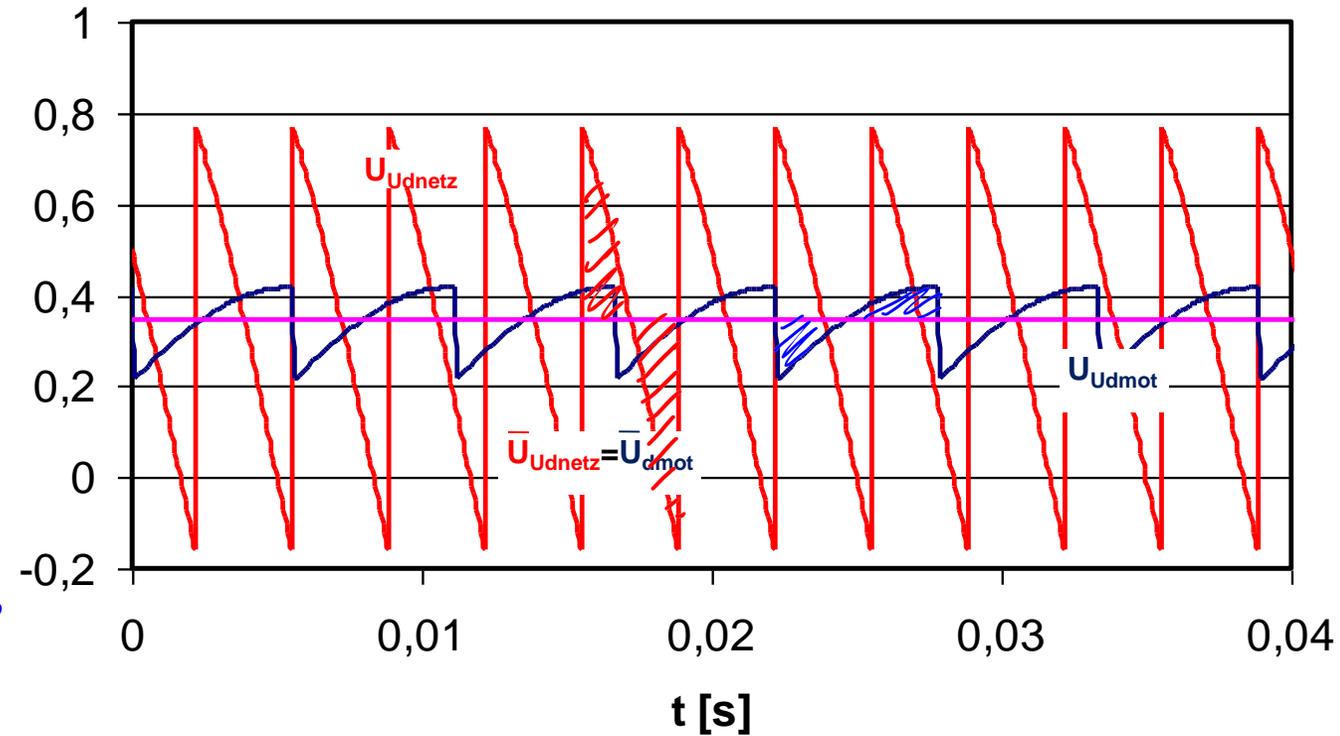
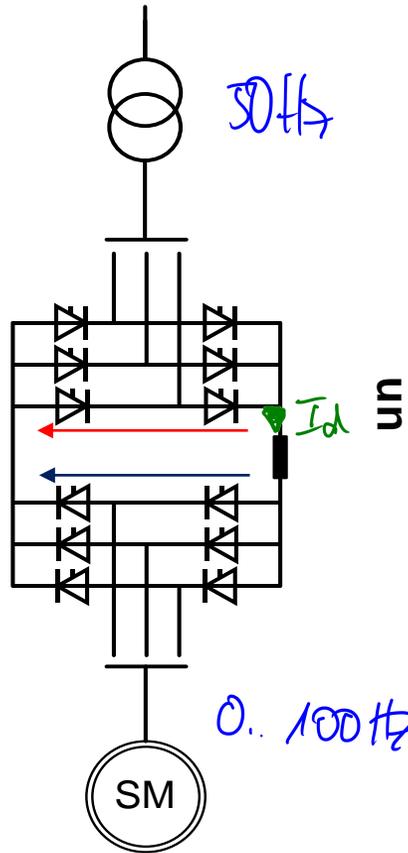
5. Topologien – Mittelspannung (MV)



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)



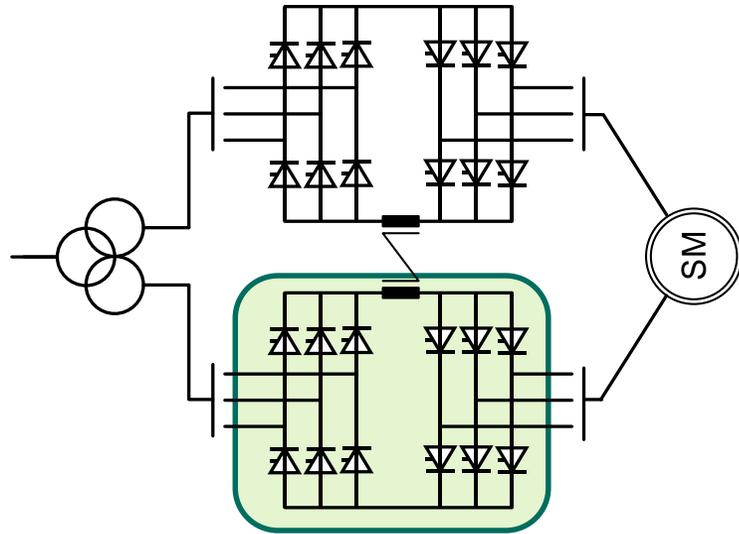
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)



Idealisierte Zwischenkreisspannungen:

- Netzseite: Steuerwinkel $\alpha = 69^\circ$, $f_n = 50\text{Hz}$, $U_d = 0,34$
- Motorseite: Steuerwinkel $\alpha = 150^\circ$, $f_a = 30\text{Hz}$

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)

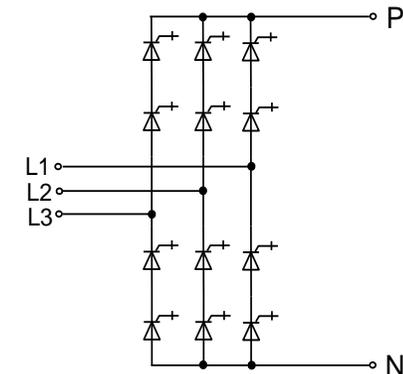
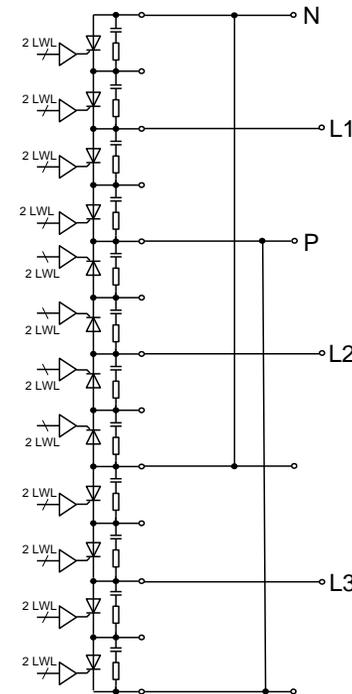


Beispiel:

Mögliche Verschaltungen von 12 Thyristoren inkl. RC-Beschaltung

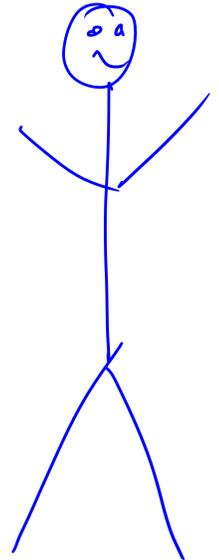
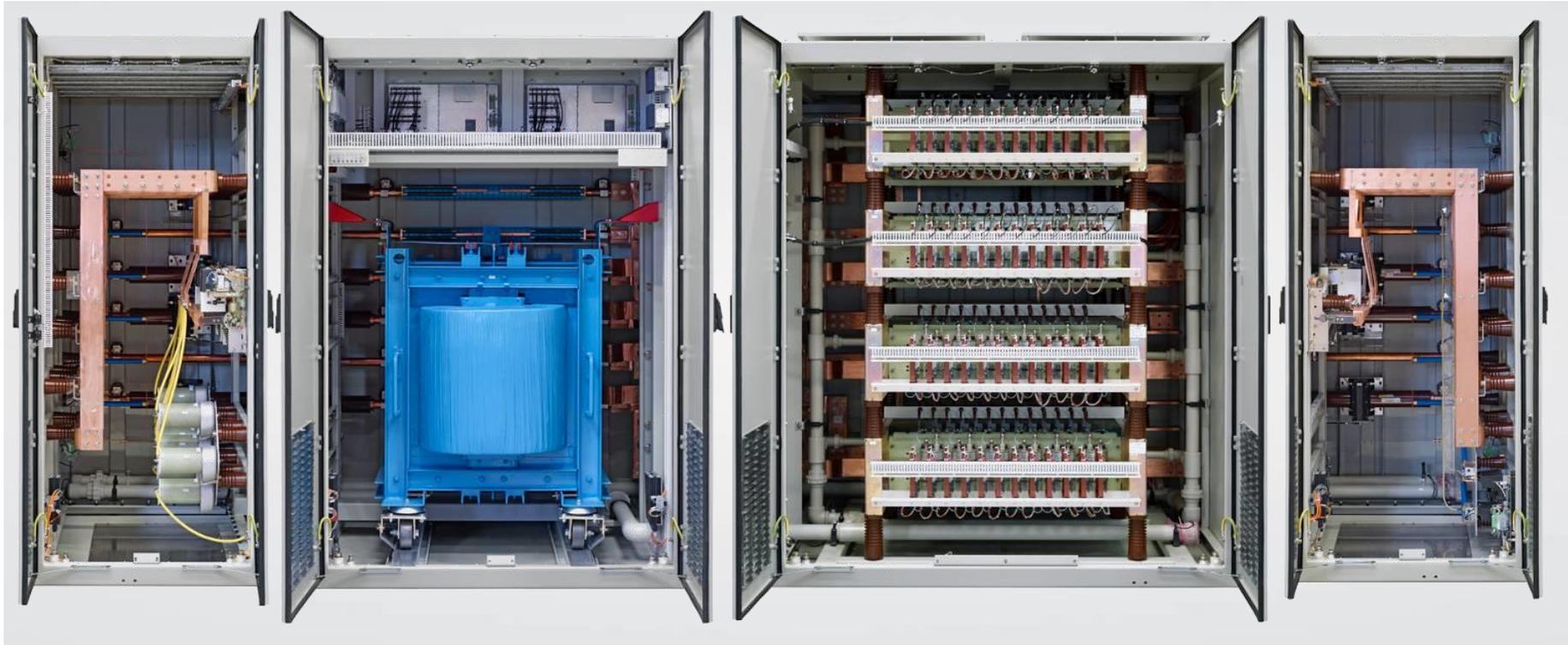
Ausführungsbeispiel:

- Zwei Baustein Ausführungen mit je 12 bzw. 18 Thyristoren ermöglichen alle erforderlichen Konfigurationen
- Kommunikation zur Steuerung über LWL (Ansteuersignal + Rückmeldung)
- Versorgung der Ansteuerung aus der RC-Beschaltung
- Elektrische Reihenschaltung bis 6 Thyristoren ermöglichen 12kV Motorspannung
- Einsatz von 3,5", 4" und 5" Thyristoren für die Stromanpassung



Quelle: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)



Netzanschluss-schrank

- Überspannungsableiter
- Erdungsschalter
- Trennschalter

Drosselschrank

- ZK-Drossel
- Regelung

Ventilschrank

- Thyristorsäulen

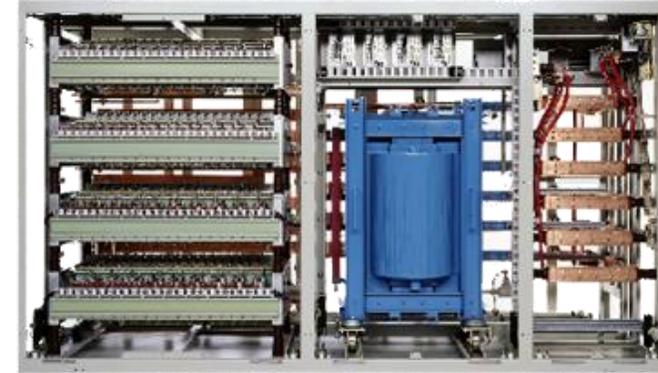
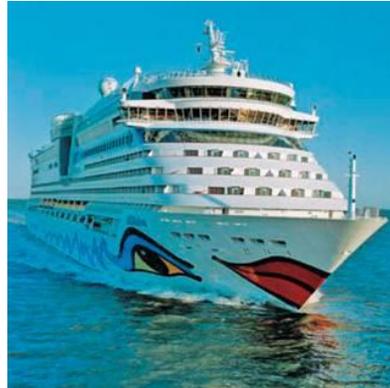
Netzanschluss-schrank

- Erdungsschalter
- Trennschalter

Quelle: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)

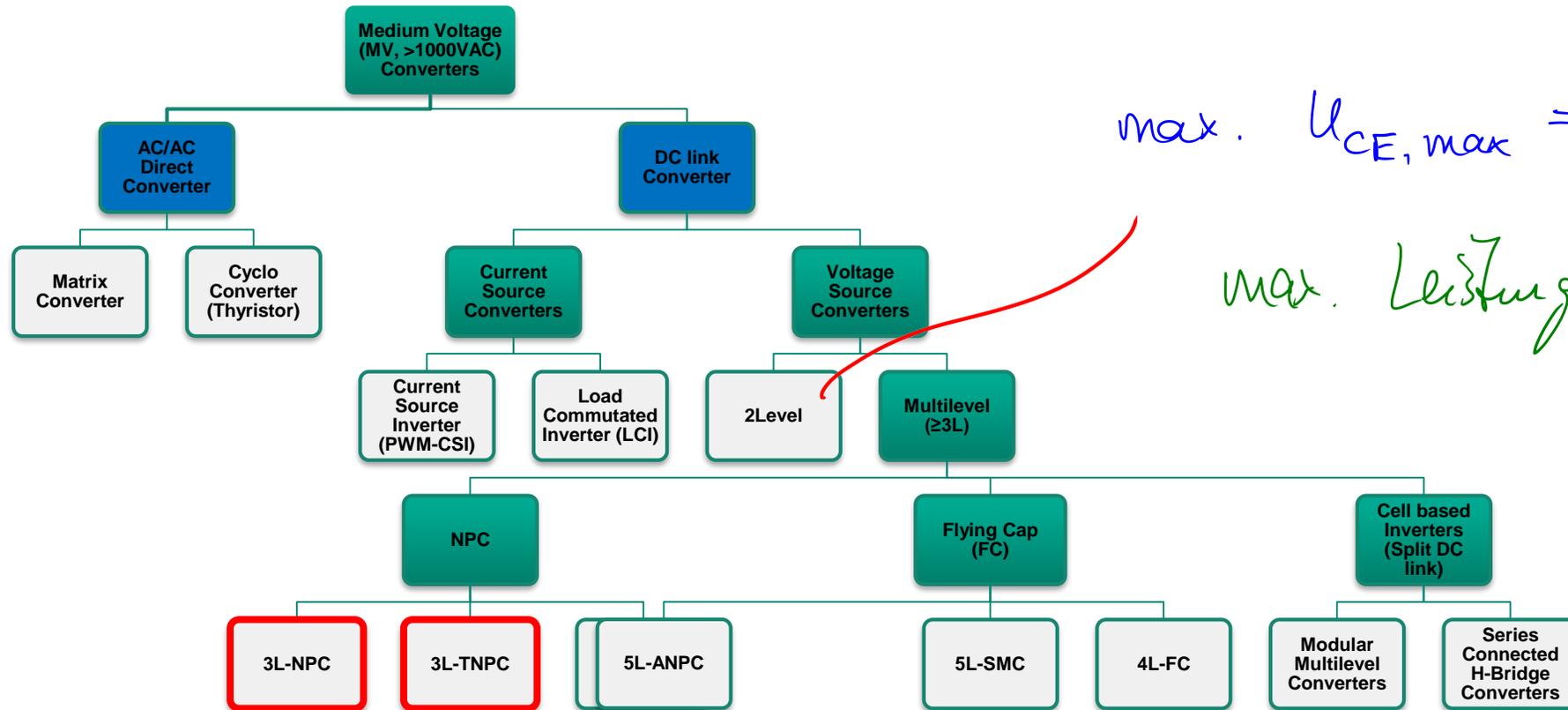
- Hauptanwendungsgebiete:
 - Gaskompressoren
 - Schiffsantriebe (Haupt- und Boosterantriebe)
 - Anfahrumsrichter (luftgekühlt)



- Halbleiter: Thyristoren mit max. 8kV Sperrspannung
- Vorteile:
 - Einfache Leistungs- und Spannungsskalierbarkeit durch unterschiedliche Reihenschaltzahl von Thyristoren
 - Rückspeisefähigkeit
 - Redundanz ist optional möglich
 - Sehr kostengünstig (<50% U-Umrichter) bei großen Leistungen
 - Sehr hohe Zuverlässigkeit durch wenige Bauelemente (24 Thyristoren für 16MVA)
- Nachteile:
 - Nur Betrieb mit Synchronmaschine möglich
 - Ausgangsfrequenz auf ca. 120Hz beschränkt
 - Netzzrückwirkungen insbesondere im Teillastbereich
 - Begrenzte Regeldynamik

Quelle: Siemens

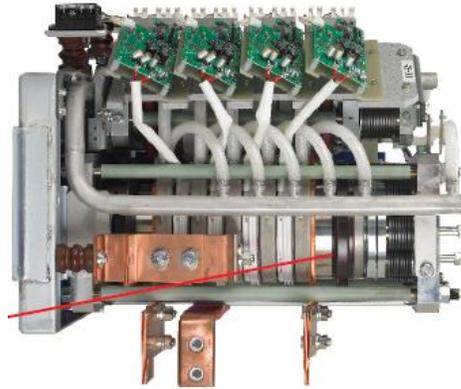
5. Topologien – Mittelspannung (MV)



max. $U_{CE,max} = 6,5 \text{ kV}$

max. Leistung pro WR
415 kV
2 MW

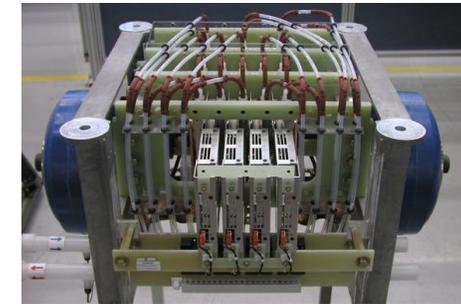
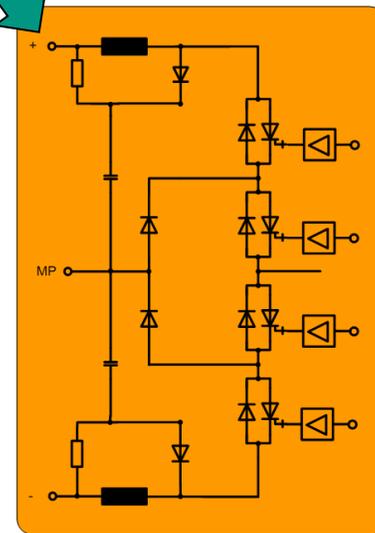
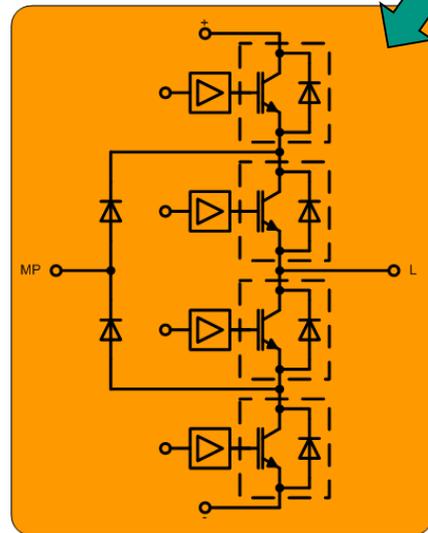
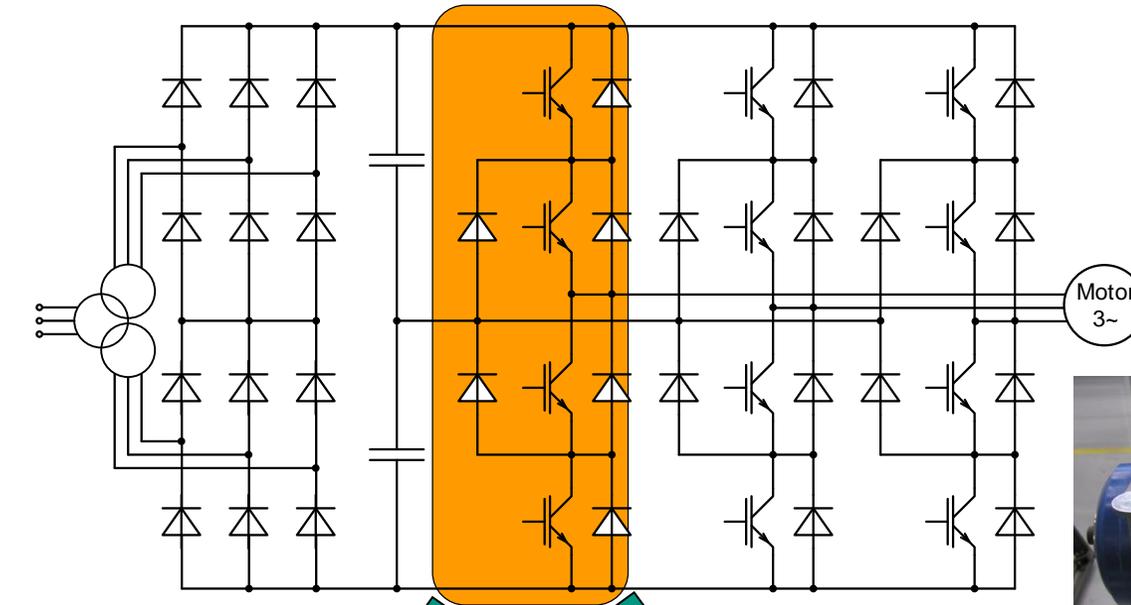
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC



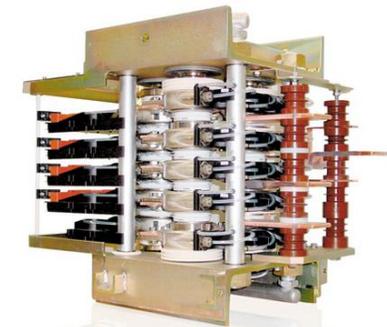
PP-IGBT-Phasenbaustein (TMEIC)



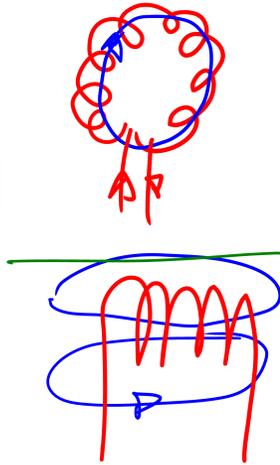
IGBT-Baustein (Siemens)



IGCT-Phasenbaustein (Siemens)

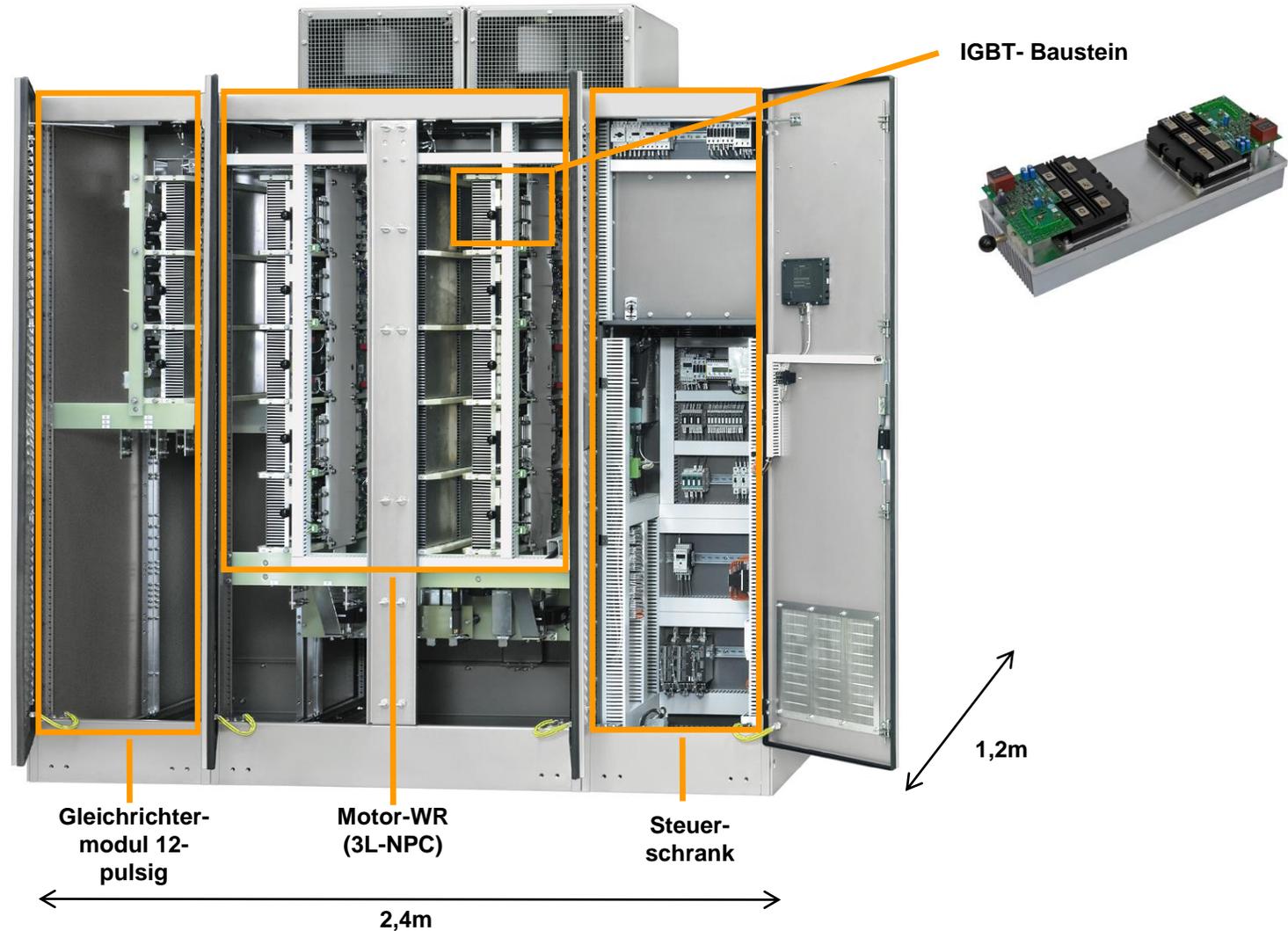
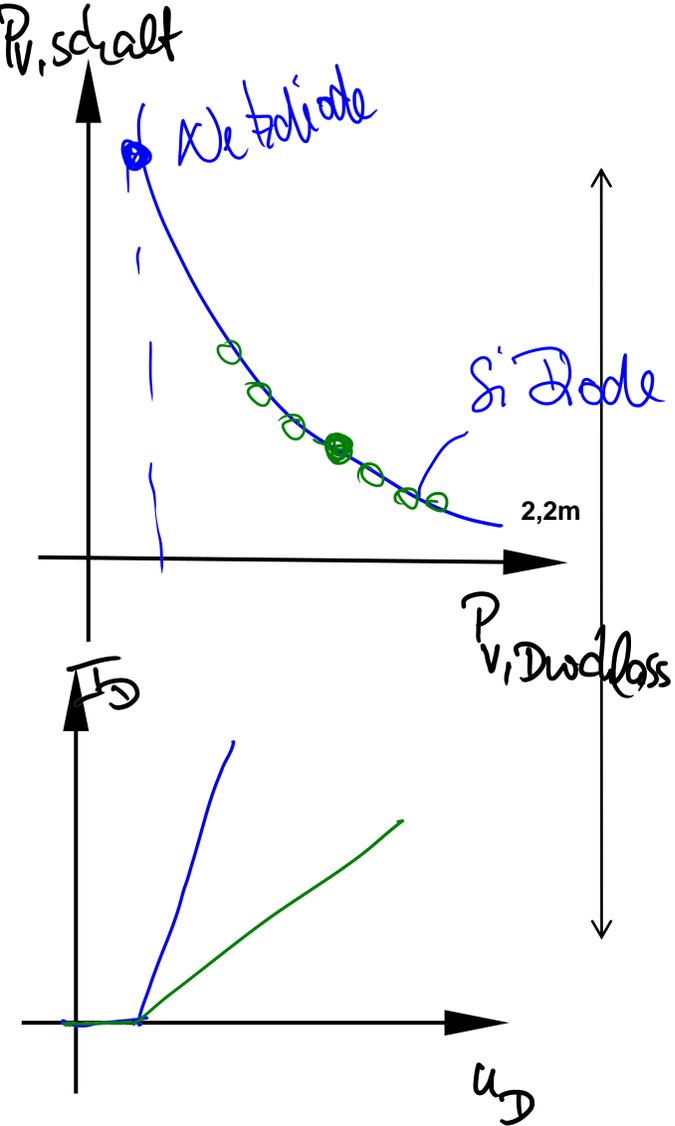


IGCT-Phasenbaustein (ABB)



Quelle: ABB, Siemens, TMEIC

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC

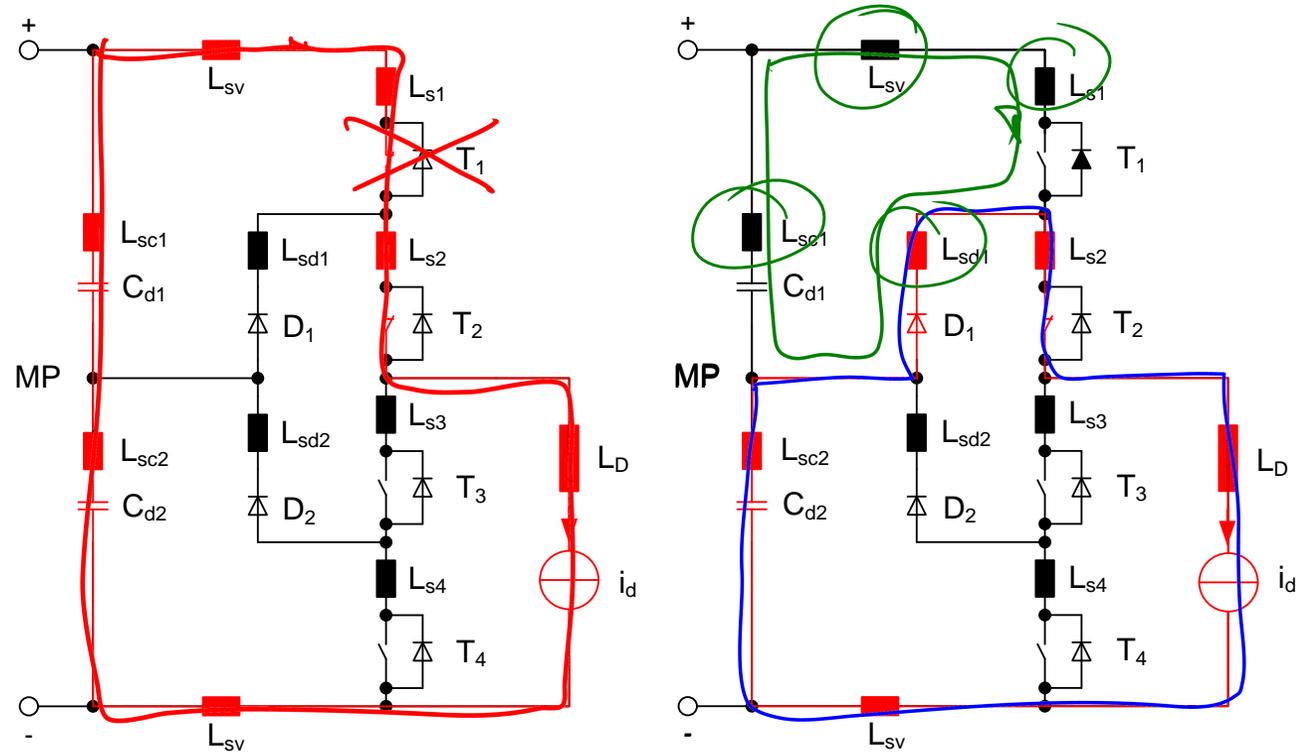


3L-NPC Umrichter: 4,16kV, 600A, 4,3MVA, luftgekühlt (Siemens SINAMICS GM150)

Quelle: Siemens

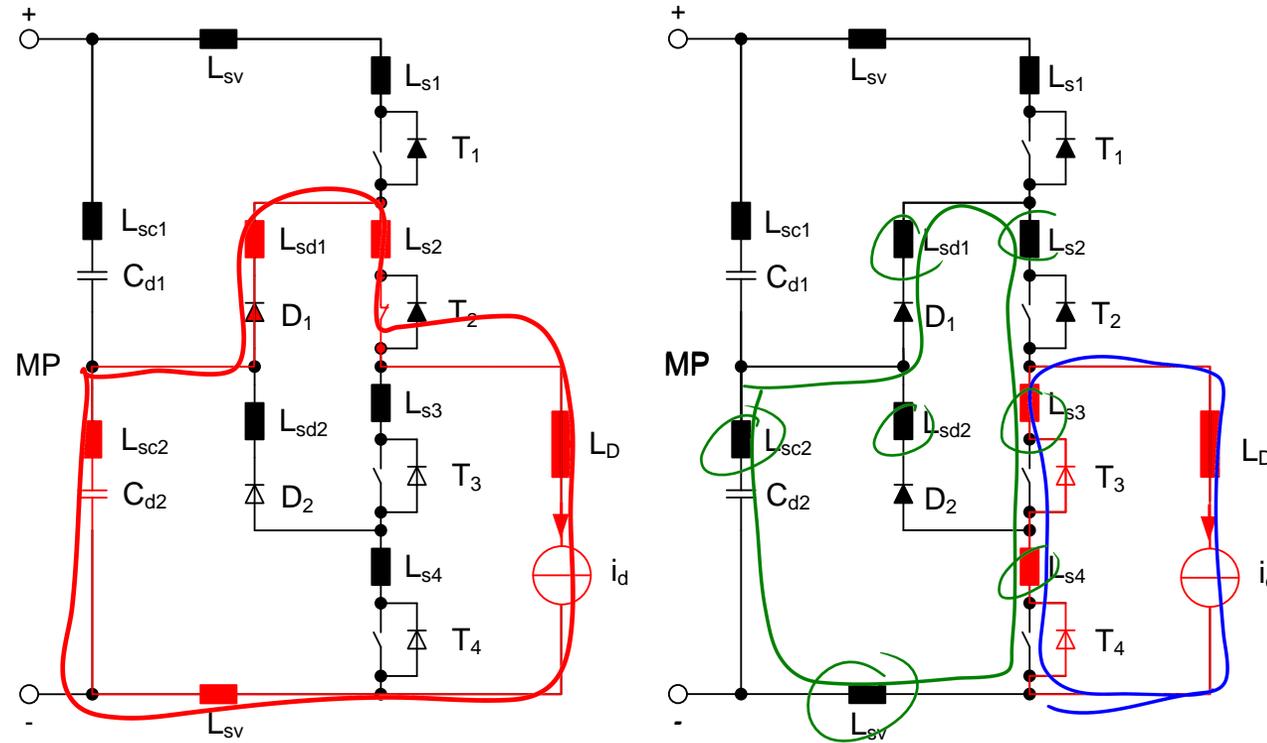
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC

Kommutierung im äußeren Kommutierungspfad: $T_1 \rightarrow D_1$

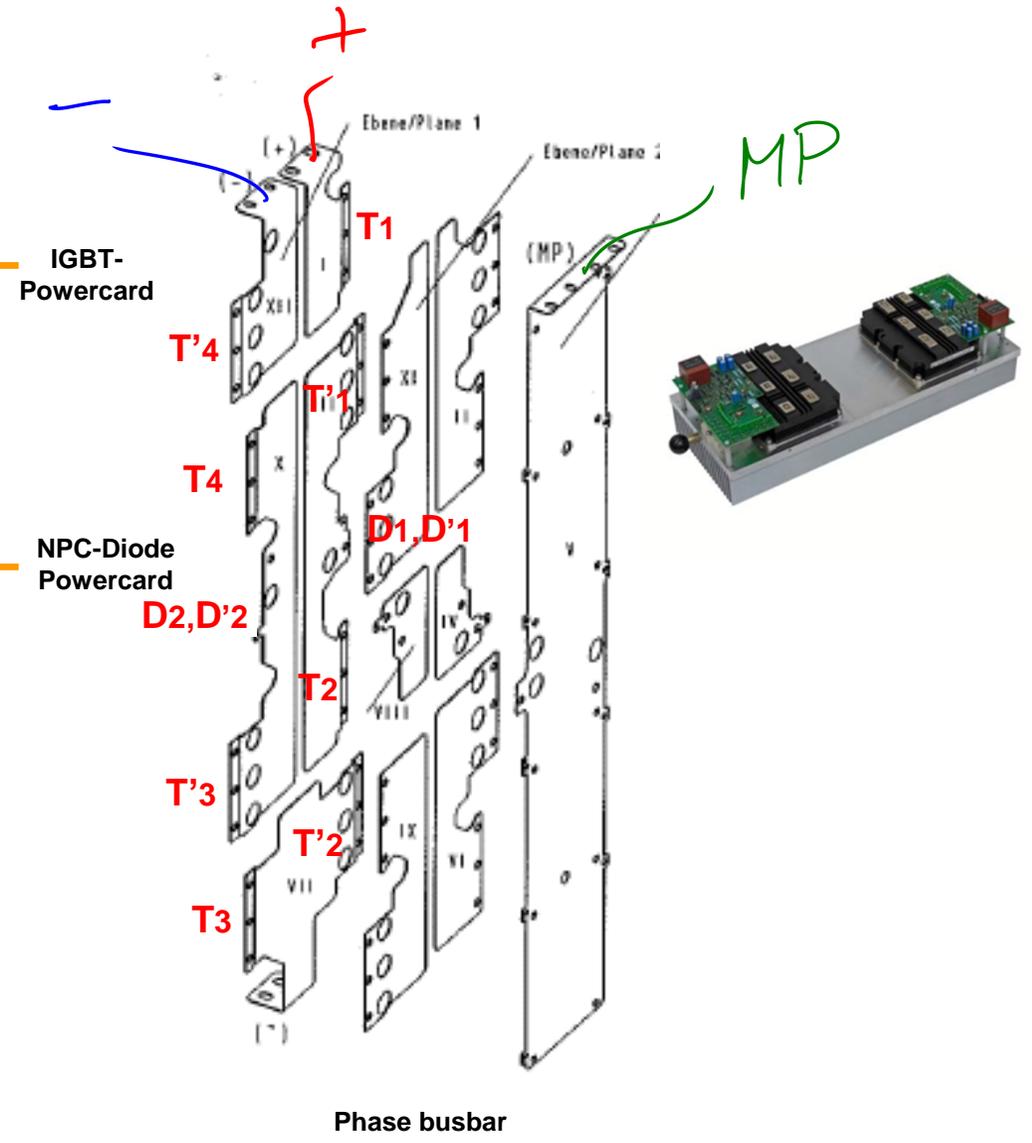
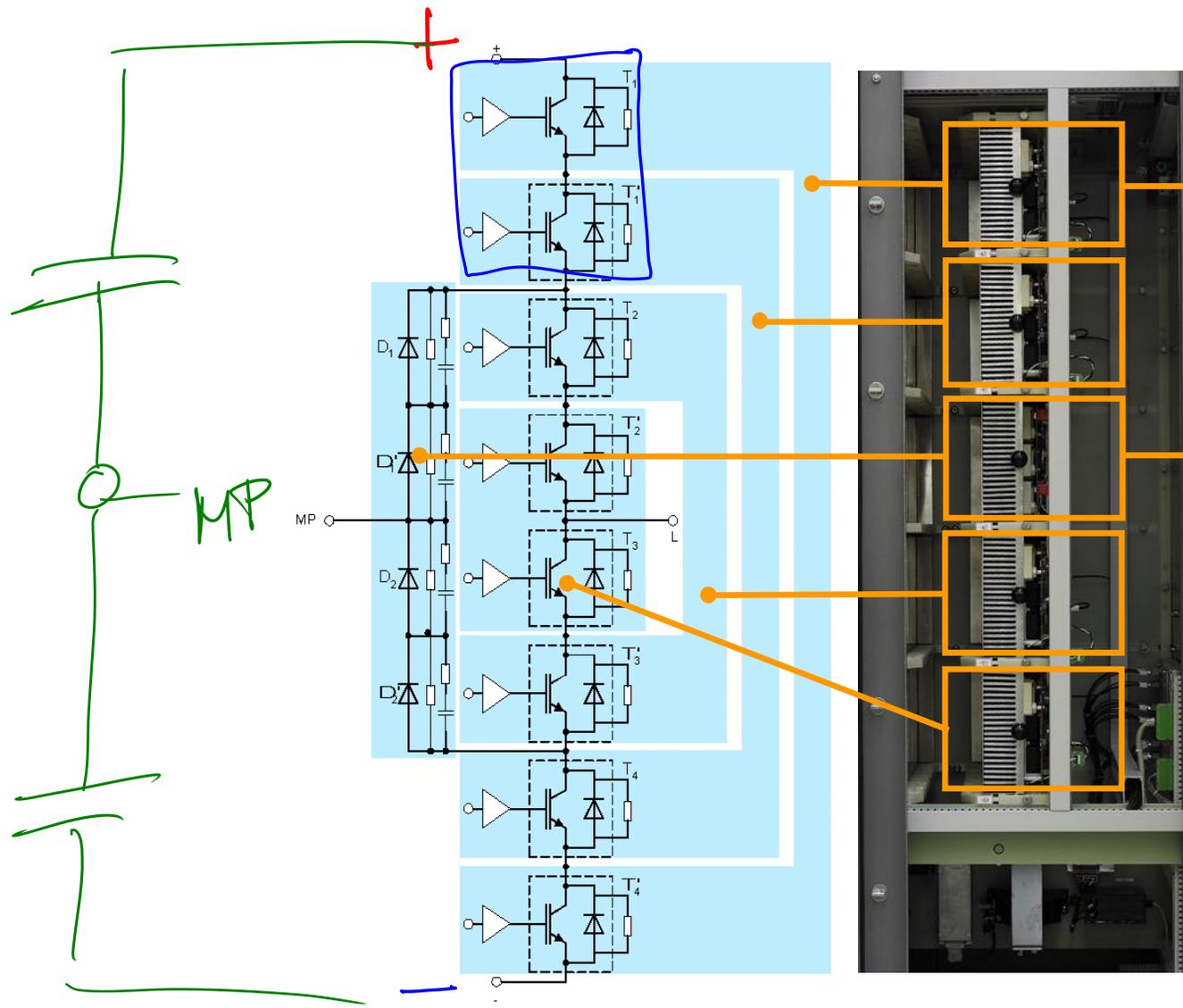


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC

Kommutierung im inneren Kommutierungspfad: T2,D1 → T3,T4

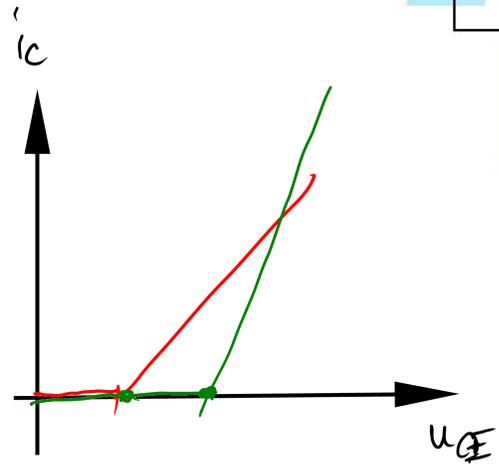
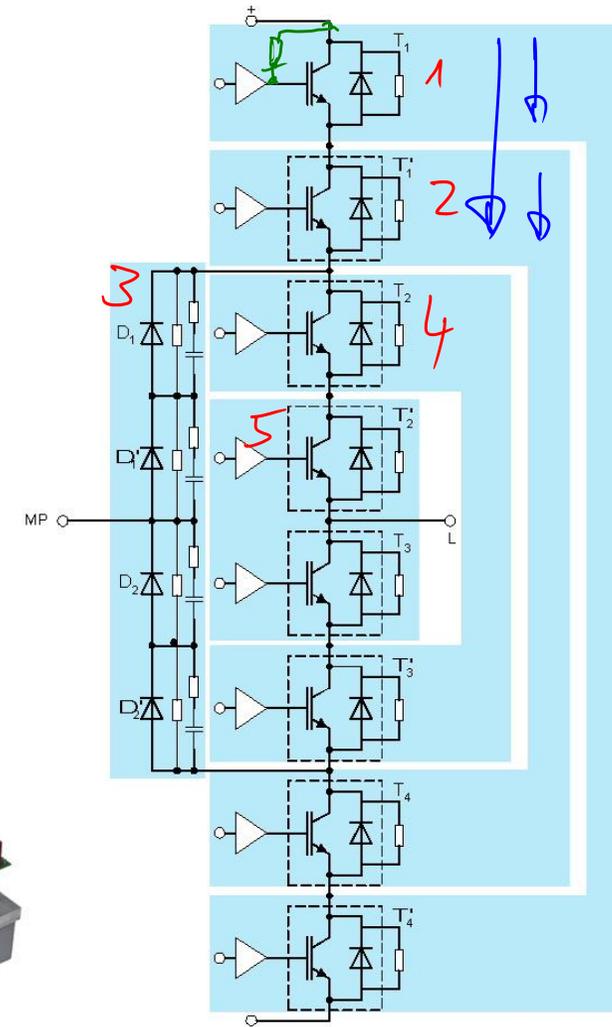
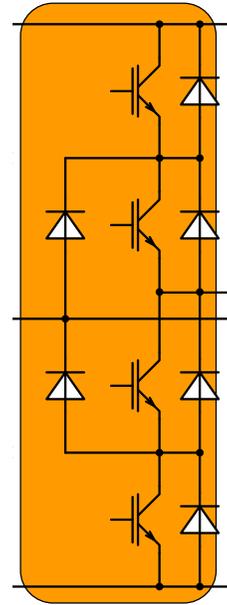
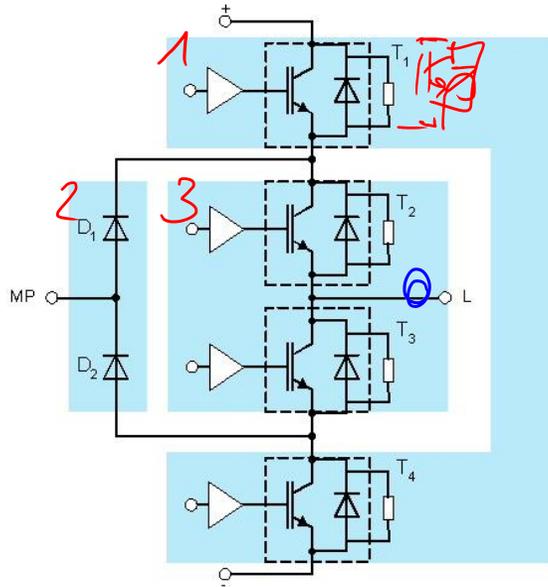


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC



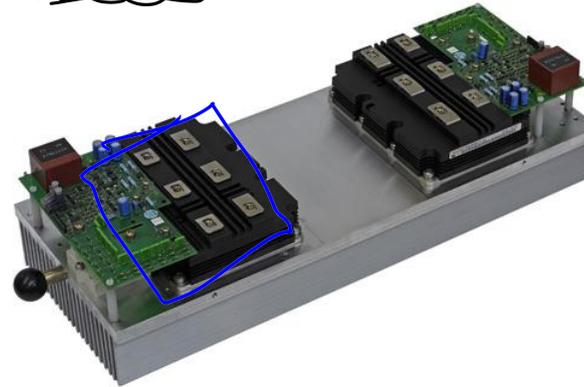
Source: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC



Power Electronic Building Blocks

PEBBS



IGBT-Baustein (Siemens)

IGBT-Einfachschtung

- U_{mot} = 2,3kV; 3,3kV; 4,16kV
- U_d = 3,2kV; 4,6kV; 5,9kV
- U_{CES} = 3.3 kV; 4,5kV; 6,5kV
- I_{Cnom} = 1500A; 1200A; 750A

IGBT-Reihenschaltung (n=2)

- U_{mot} = 4,16kV; 6,6kV; 7,2kV
- U_d = 5,9kV; 9,2kV; 10kV
- U_{CES} = 2x3.3 kV; 2x4,5kV; 2x6,5kV
- I_{Cnom} = 1500A; 1200A; 750A

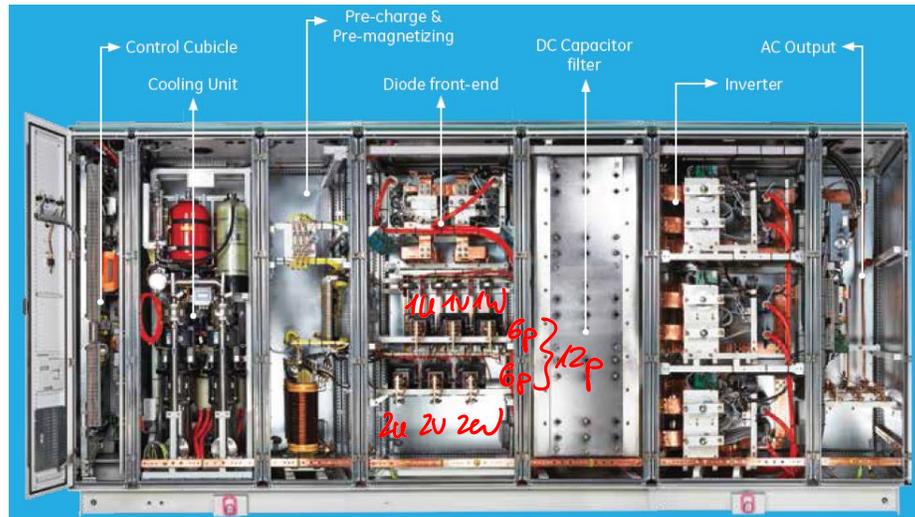
Quelle: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC

- Hauptanwendungsgebiete:
 - IGBT Module: Pumpen, Lüfter, Extruder, Schiffsantriebe, Mühlen
 - IGCT, PP-IGBT: Walzwerksantriebe, Schiffsantriebe, Mehrmotorenantriebe, Transrapid



3L-NPC Umrichter: 3,3kV, 1600A, 9MVA, wassergekühlt (ABB ACS6000)



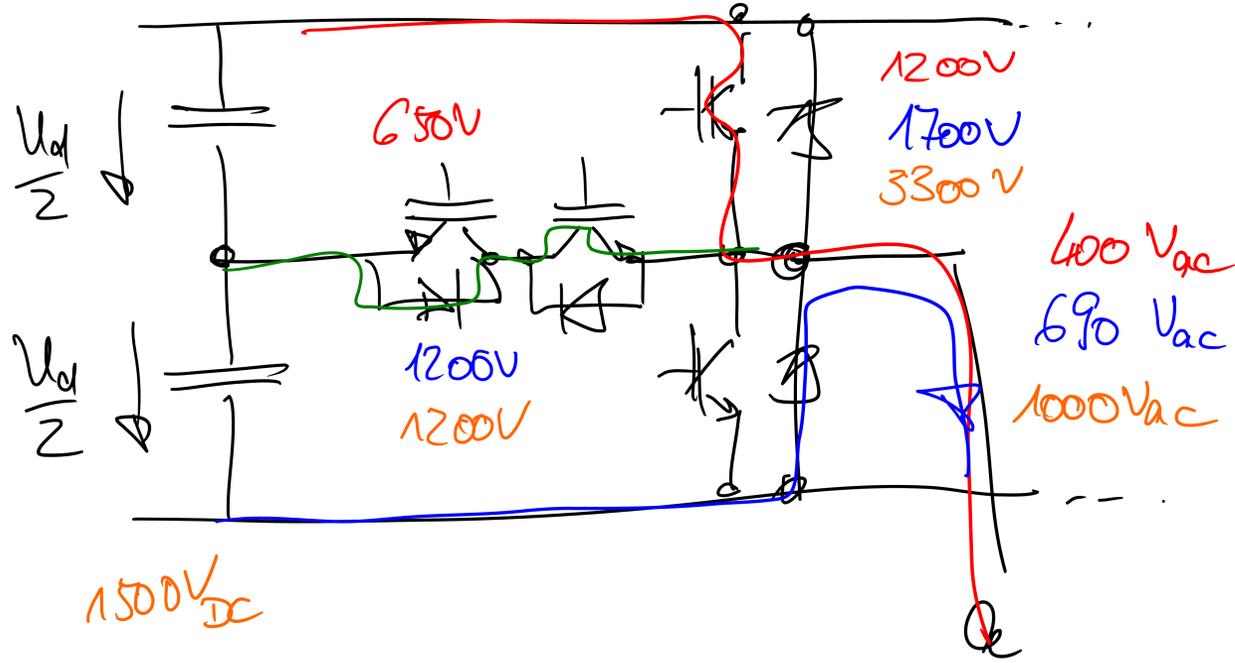
3L-NPC Umrichter: 3,3kV, 2100A, 12MVA, wassergekühlt (GE MV7000)

- Halbleiter:
 - IGBT-Module mit $U_{CES}=3,3-6,5kV$ (auch in Reihenschaltung)
 - Press Pack-IGBT mit $U_{CES}=4,5kV$ (auch in Reihenschaltung)
 - Press Pack-IGCT mit $U_{DRM}=4,5-5,5kV$
- Vorteile:
 - Flexible Wahl der Einspeisung möglich (Dioden-, Aktive Einspeisung)
 - Einfach an Kundenanforderungen anzupassen (Bremssteller, 12-pulsige oder 24-pulsige Einspeisung, Ausgangsfilter)
 - Gemeinsamer DC-Bus für Mehrmotorenantriebe möglich
 - Einfacher Aufbau durch modularisierte Komponenten (z.B. Phasenbausteine)
 - Hohe Regeldynamik
- Nachteile:
 - Durch begrenzte Schaltfrequenz nur bedingt für schnell laufende Antriebe ($f > 200Hz$) geeignet
 - Keine Redundanz im Leistungsteil (bei IGBT-Modulen und IGCTs)
 - Komplexe Filter für die Einhaltung von Grid-Codes oder Einsatz von Standardmotoren erforderlich

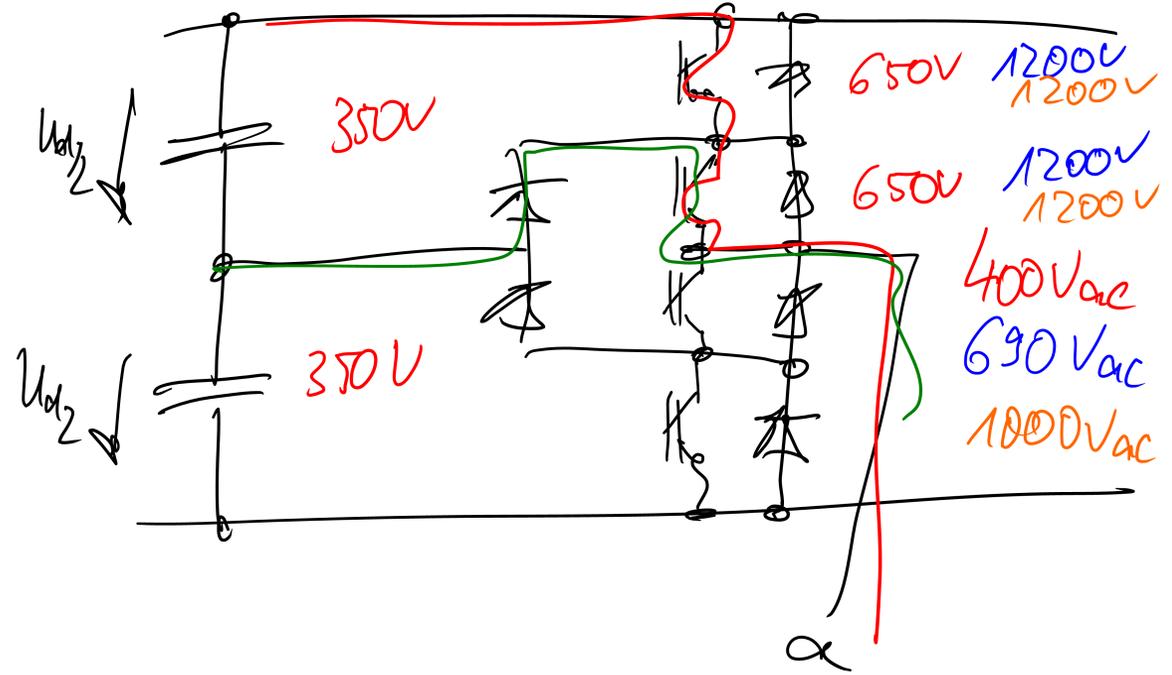
Quelle: ABB, Siemens

$U_d = 700V$
1100V

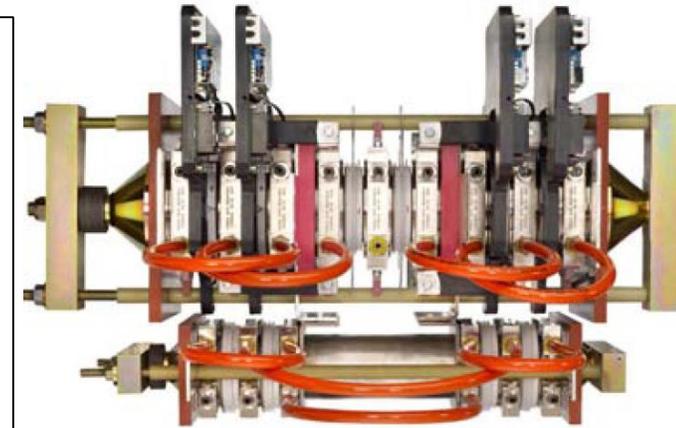
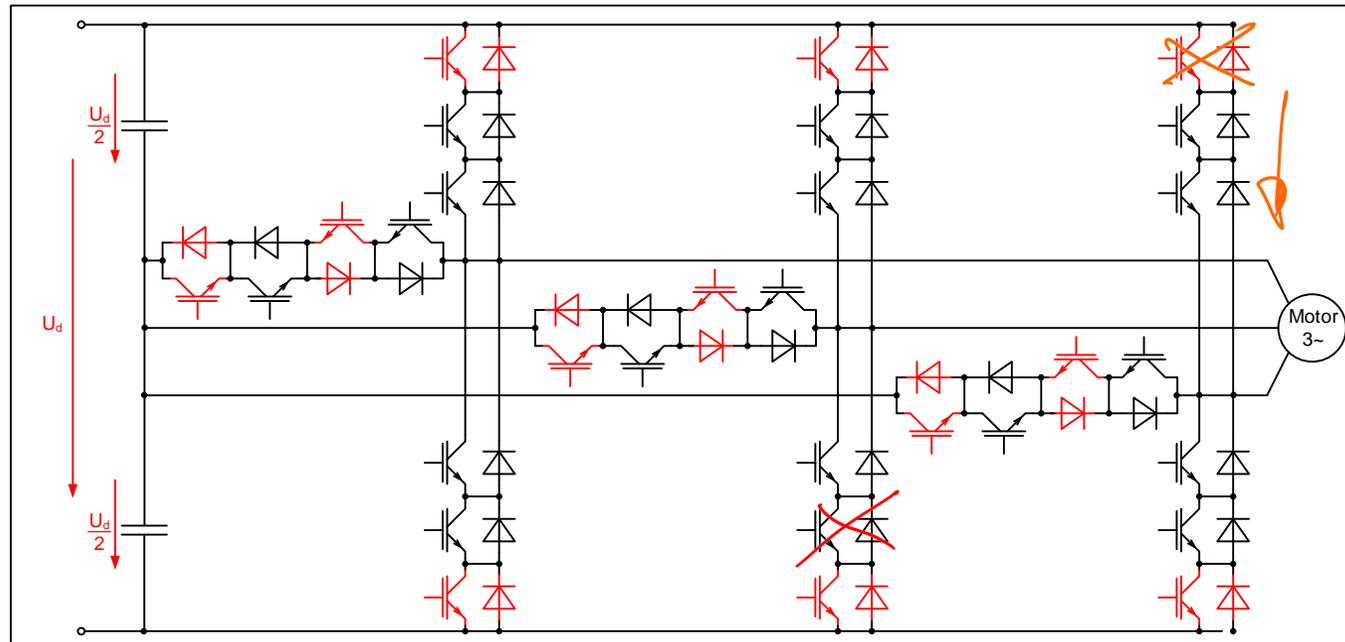
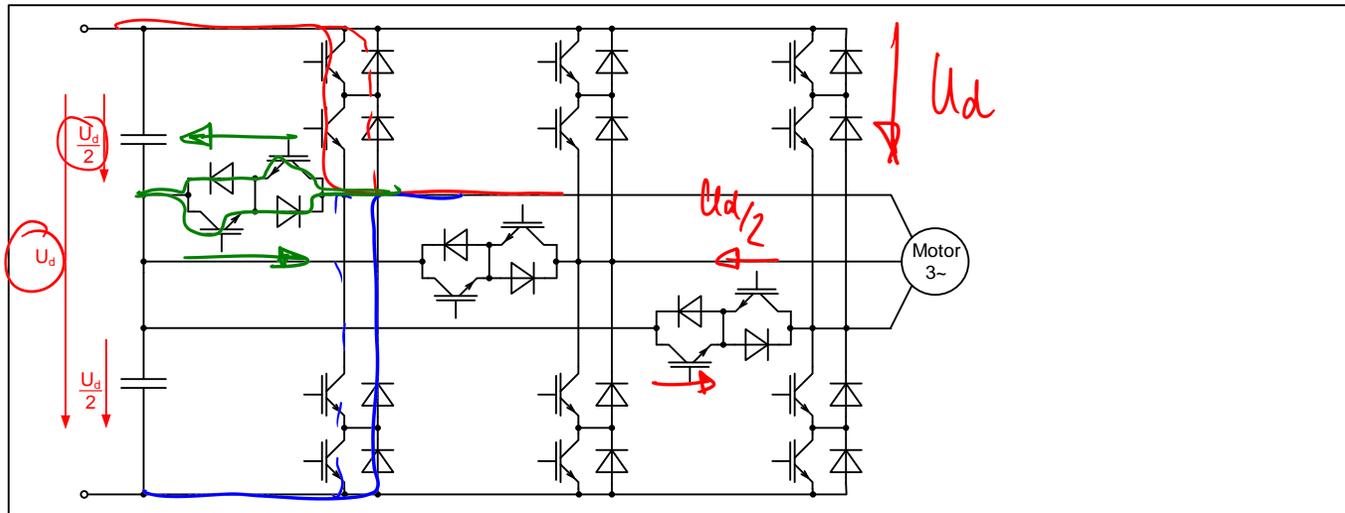
3L TNPC



3L NPC



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-TNPCC

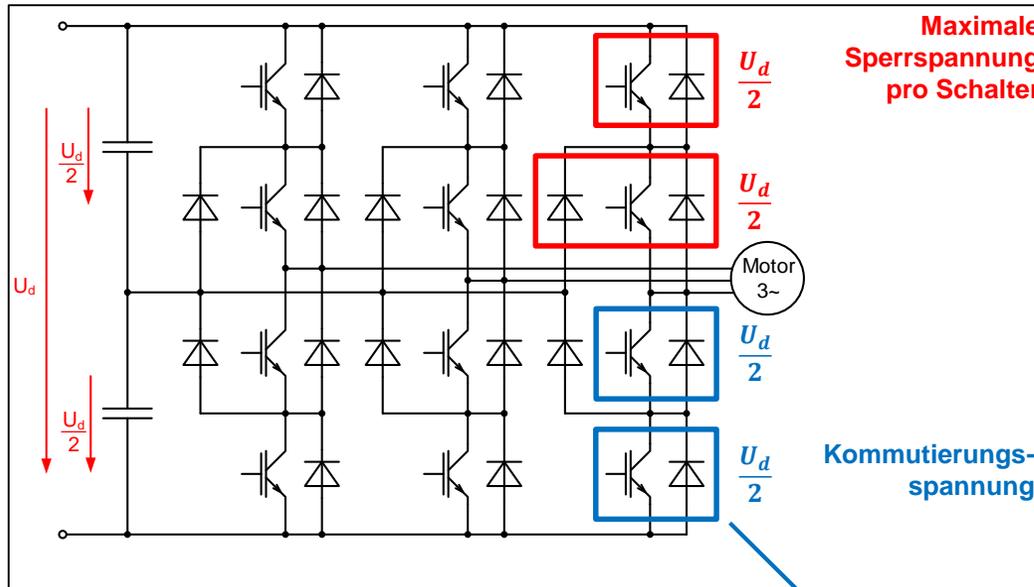


PP-IGBT-Phasenbaustein (GE)

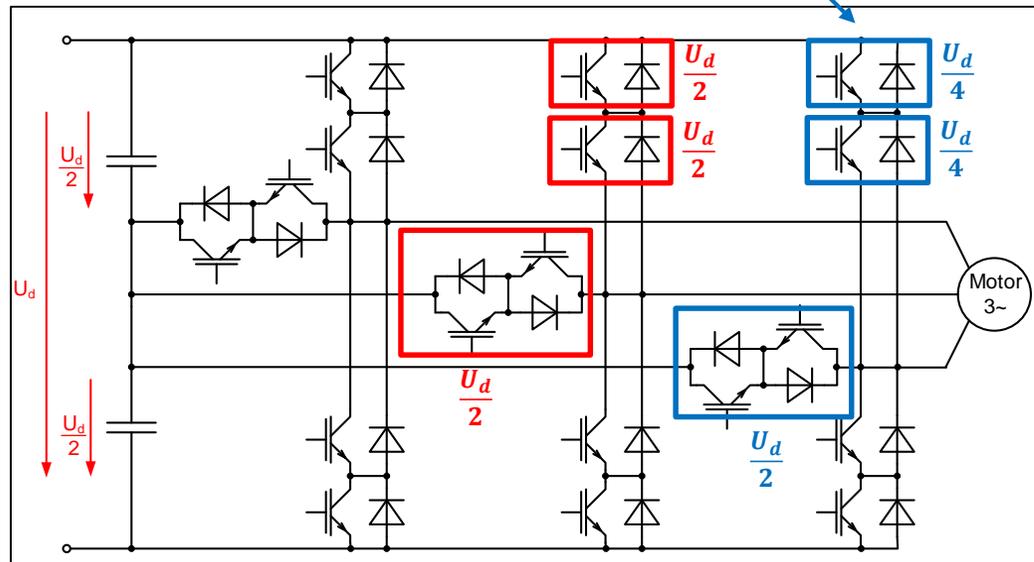
- 3L-TNPCC mit Press Pack IGBTs:
 - Einbau redundanter IGBTs möglich, da diese im Fehlerfall durchlegieren und den Betriebsstrom führen können
 - Deutliche Reduzierung der Ausfallraten des Gesamtumrichters, daher Erhöhung der Verfügbarkeit
 - Mit IGBT-Modulen wegen der komplexen Verschienung und der daher hochinduktiven Kommutierungskreise nicht praktikabel

Quelle: GE

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-TNPC



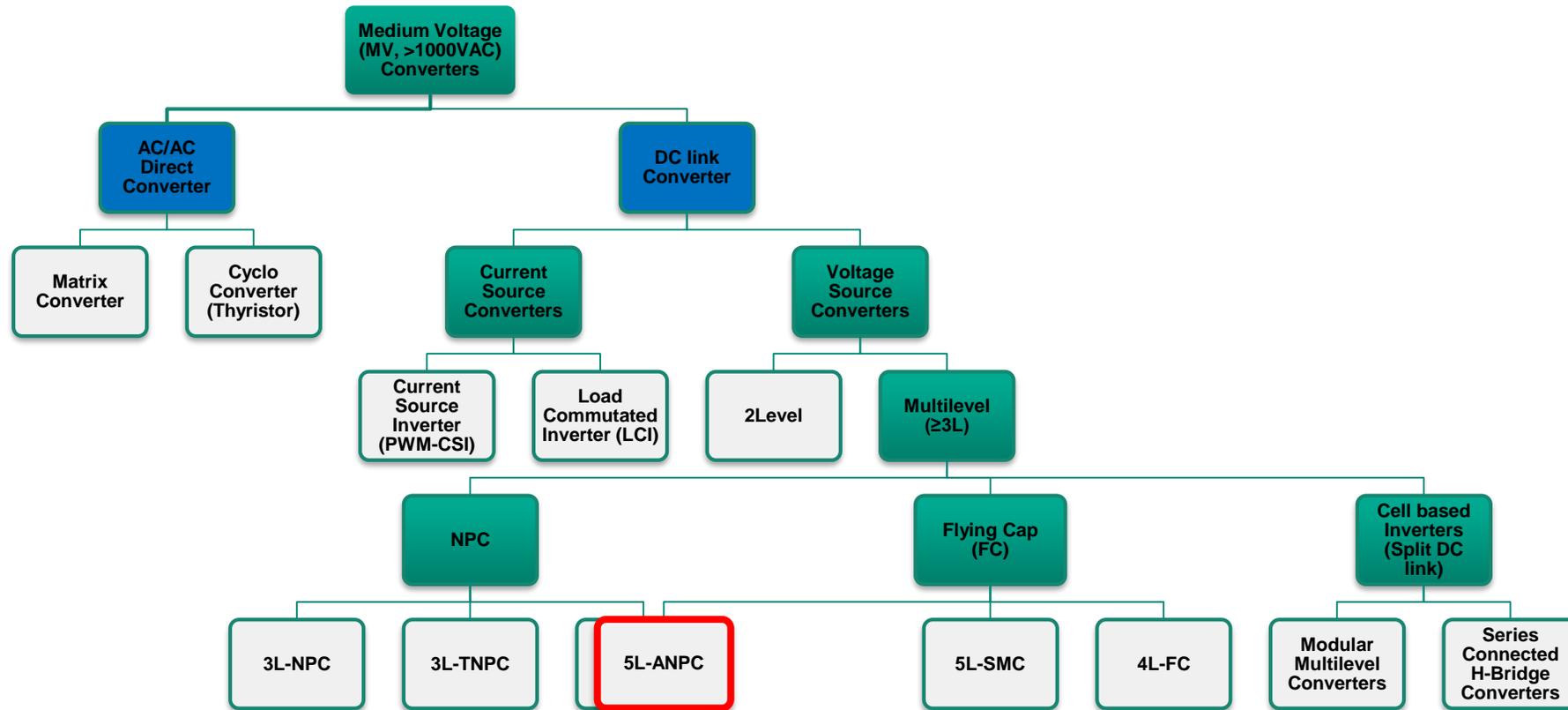
3L-NPC: 3Level-Neutral-Point-Clamped (Mittelpunkt über Dioden angebunden)



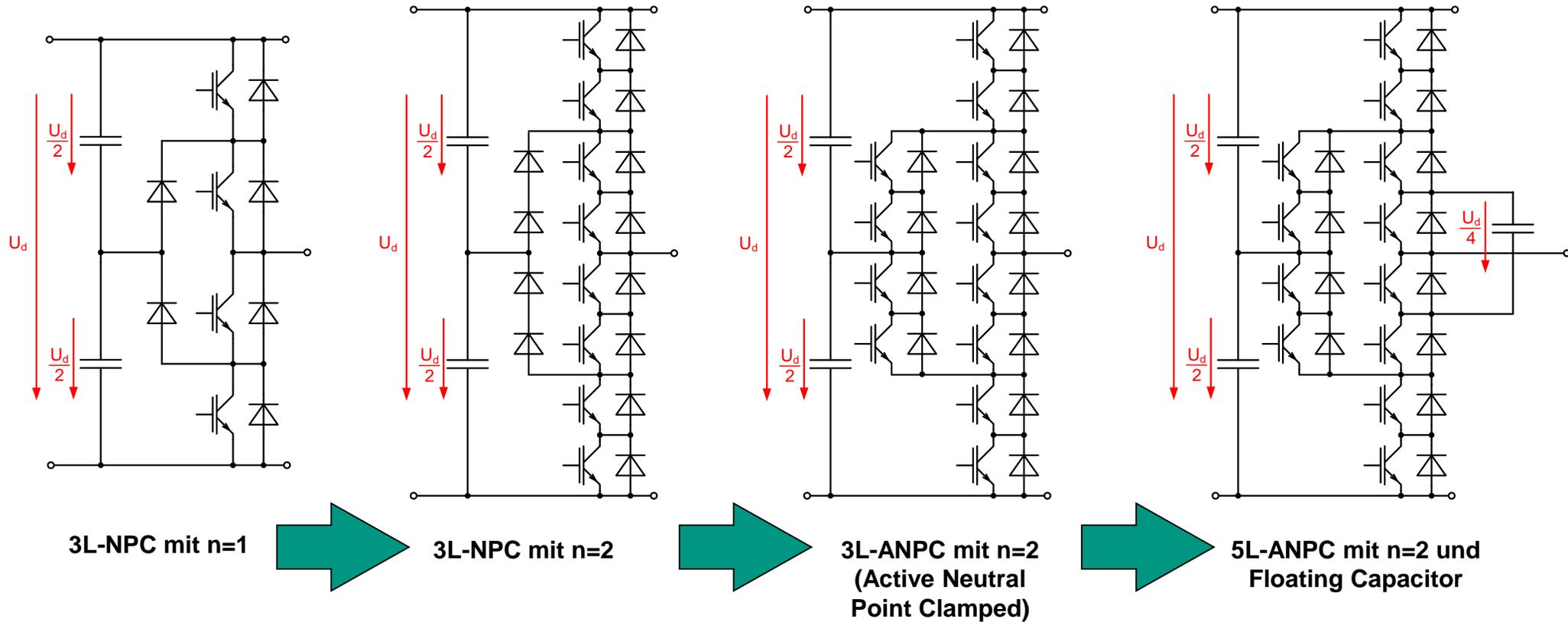
3L-TNPC: 3Level-Neutral-Point-Piloted (mit gesteuerter Mittelpunktsanbindung)

- Vorteile:
 - Reduzierte Kommütierungsspannung der äußeren Schalter → reduzierte Schaltverluste, d.h. höhere Ausgangsleistung bei gleichem Schalter wie im 3L-NPC
- Nachteile:
 - Höhere Anzahl an aktiven Schaltern
 - Komplexere Kommütierungskreise
 - Entweder Reihenschaltung ($2 \times \frac{U_d}{2}$) für äußere Schalter oder Einfachschaltung ($1 \times U_d$) mit unterschiedlicher Sperrspannung für äußere und innere Schalter

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-ANPC

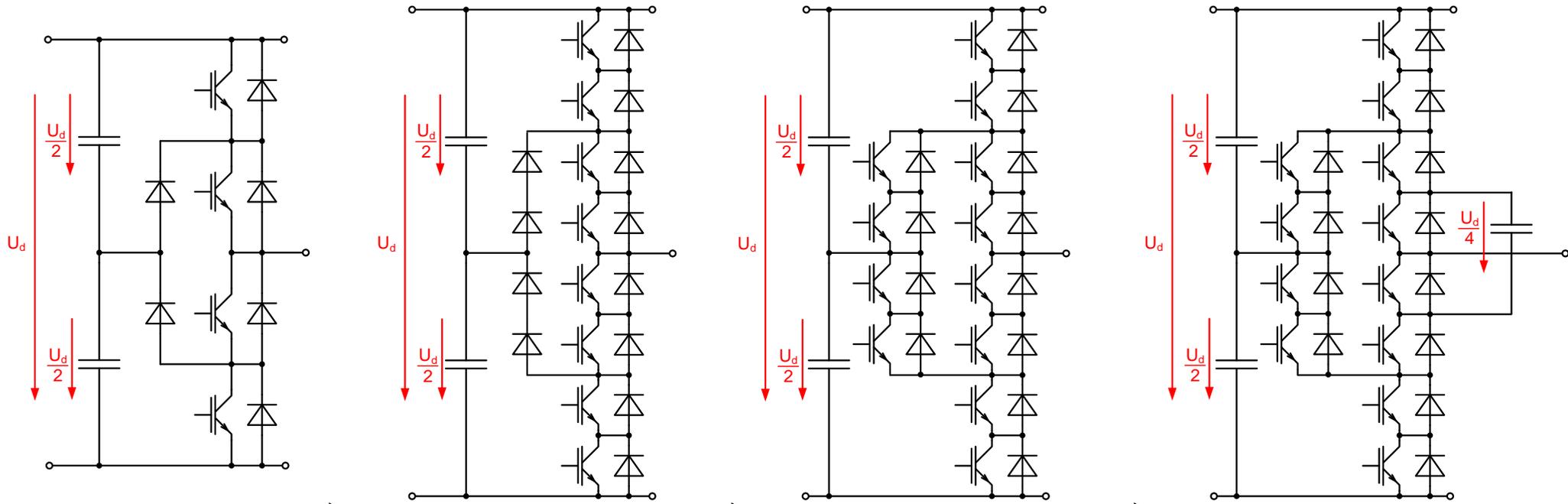


- Erhöhung der Spannung
- Ersatz von hochsperrenden Leistungshalbleitern durch eine Reihenschaltung von Halbleitern mit niedrigerer Sperrspannung mit möglicherweise
 - Geringeren Verluste
 - Reduzierten Kosten

- Gleichmäßigere Verteilung der Schaltverluste möglich
 - Erhöhte Ausgangsleistung, da z.B. nicht mehr die äußeren IGBTs leistungsbegrenzend wirken

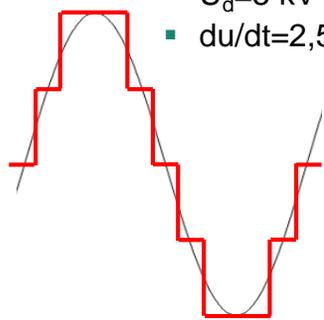
- Einführung eines zusätzlichen Spannungslevels
 - Reduzierte Harmonische am Ausgang
 - Erhöhter Regelungsaufwand

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-ANPC



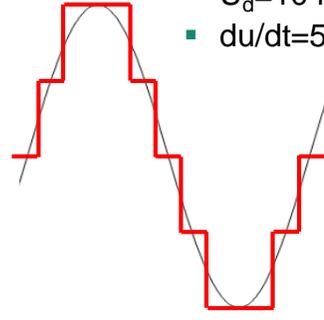
3L-NPC mit n=1

- Bsp.:
- $U_d=5\text{ kV}$
 - $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



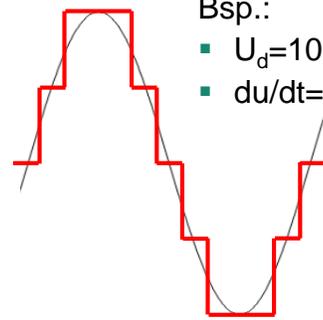
3L-NPC mit n=2

- Bsp.:
- $U_d=10\text{ kV}$
 - $du/dt=5\text{ kV}/\mu\text{s}$



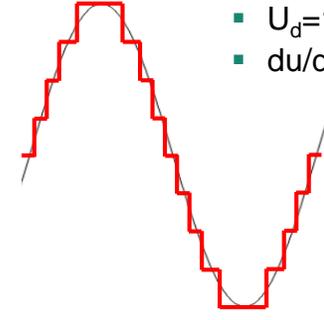
3L-ANPC mit n=2
(Active Neutral Point Clamped)

- Bsp.:
- $U_d=10\text{ kV}$
 - $du/dt=5\text{ kV}/\mu\text{s}$



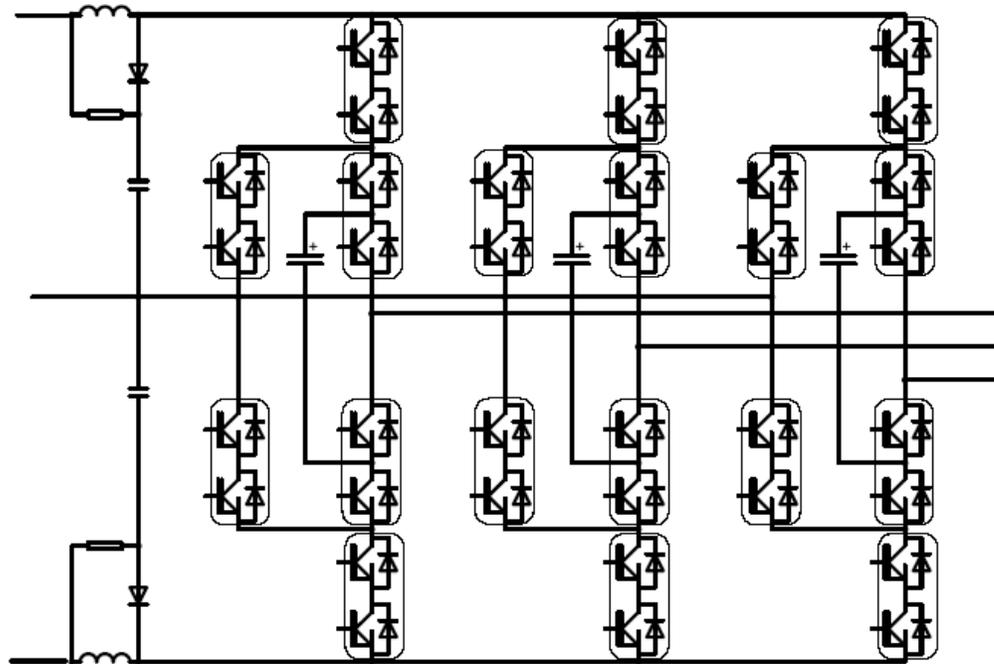
5L-ANPC mit n=2 und
Floating Capacitor

- Bsp.:
- $U_d=10\text{ kV}$
 - $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-ANPC

- Hauptanwendungsgebiete:
 - Pumpen, Lüfter, Kompressoren



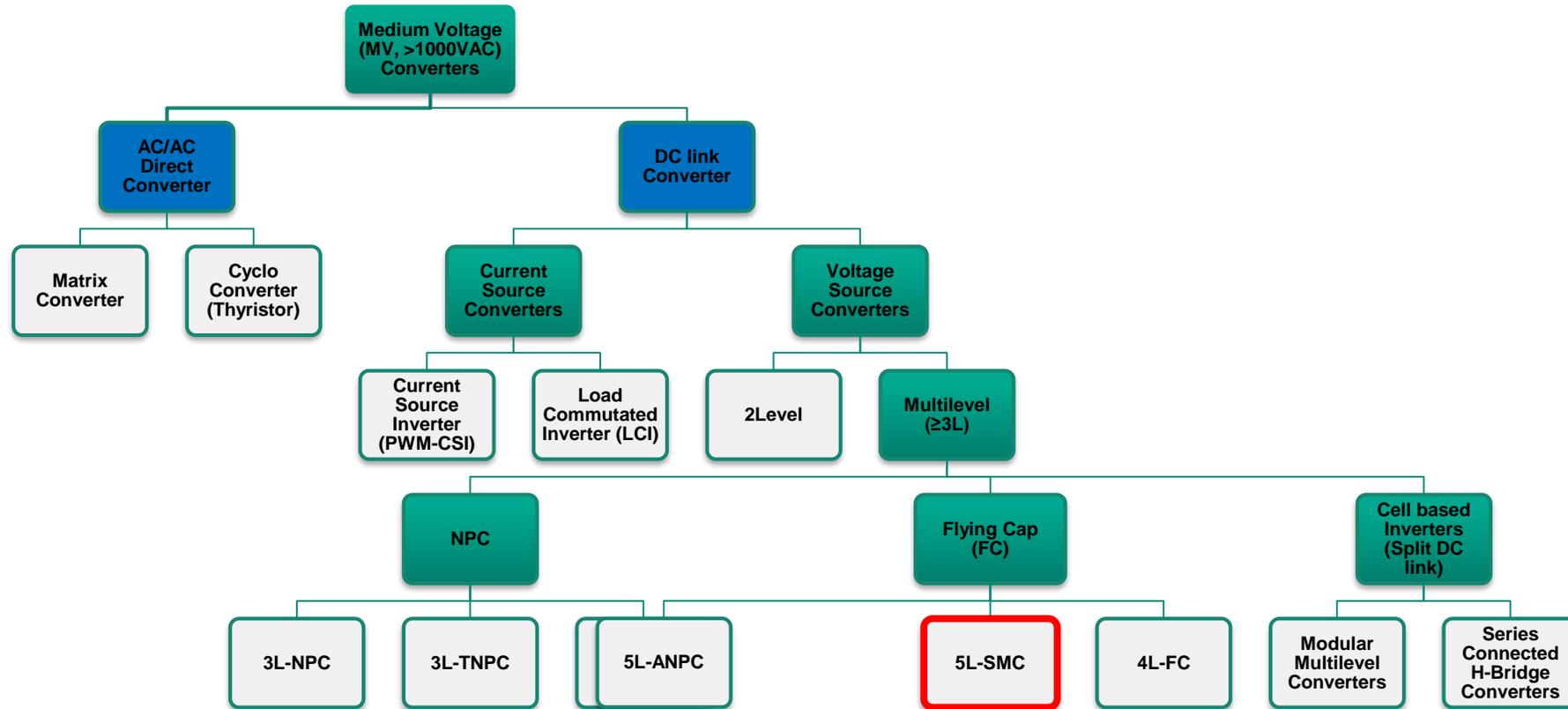
ACS 2000, 800kW, 6.6kV,
for operation with an external
transformer



- Halbleiter:
 - IGBT-Module mit $U_{CES}=4,5kV$ (in Reihenschaltung $n=2$)
- Vorteile gegenüber 3L-NPC:
 - Höhere Stufenzahl, geringere Netzrückwirkungen Harmonische auf der Netzseite
 - Ggf. ohne zusätzliche Maßnahmen für den Einsatz von Standardmotoren geeignet
- Nachteile gegenüber 3L-NPC:
 - Höhere Komplexität, Kosten

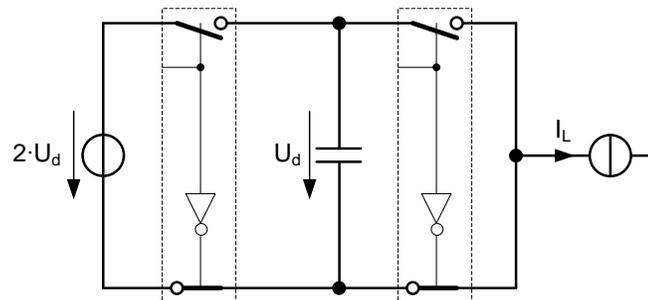
Quelle: ABB

5. Topologien – Mittelspannung (MV)

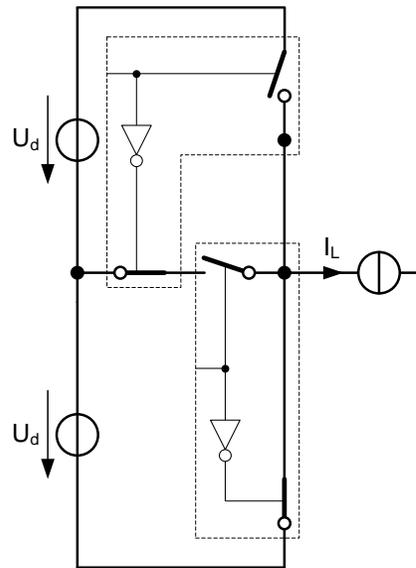


Multilevel Converters - Structure

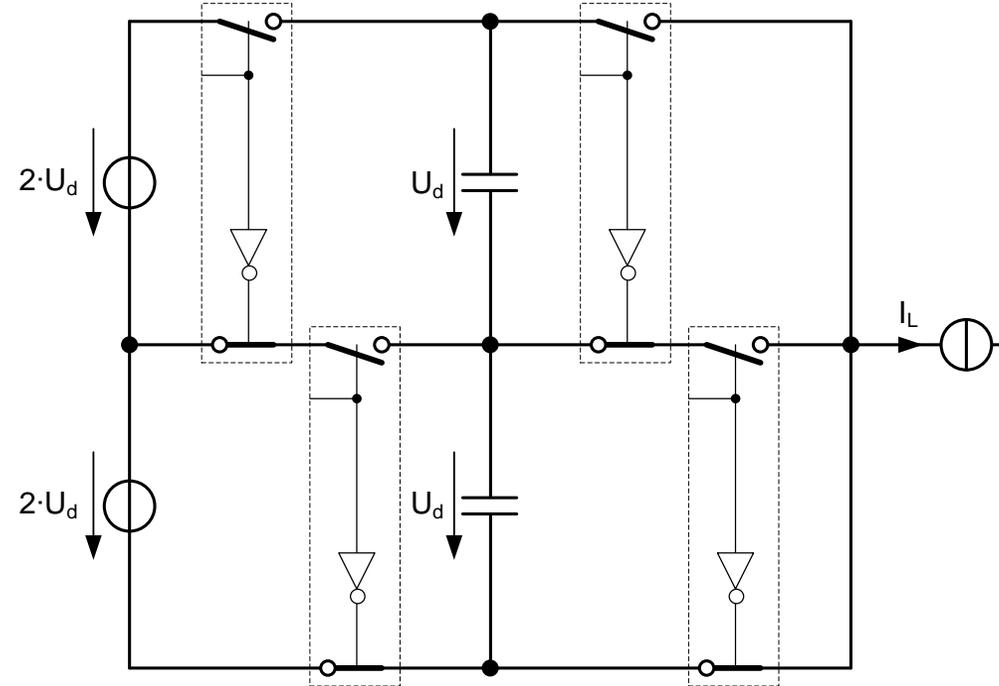
Combination of Commutation Cells → 5-Level



3-Level Flying Cap (3L-FC)



3-Level-TNPC



5-Level Stacked Multicell (5L-SMC)

i.e combination of

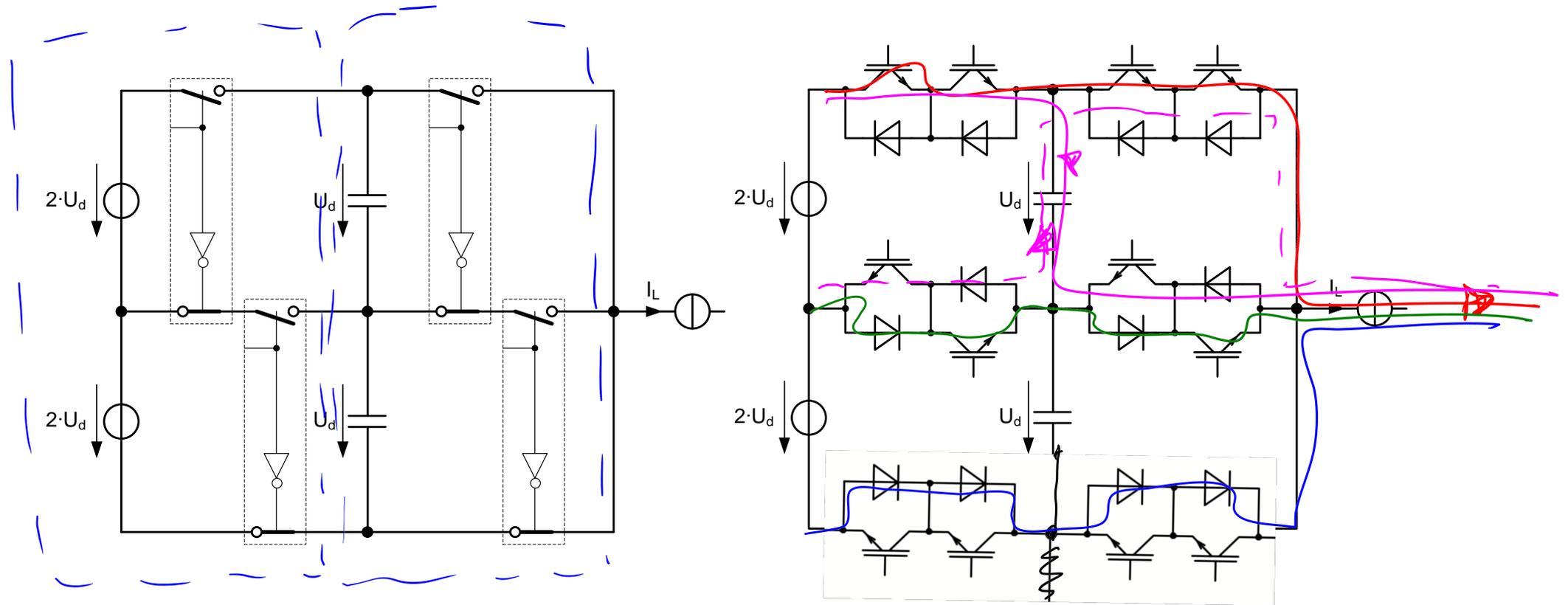
- 3L-Flying Cap

and

- 3L-TNPC

Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 5-Level SMC



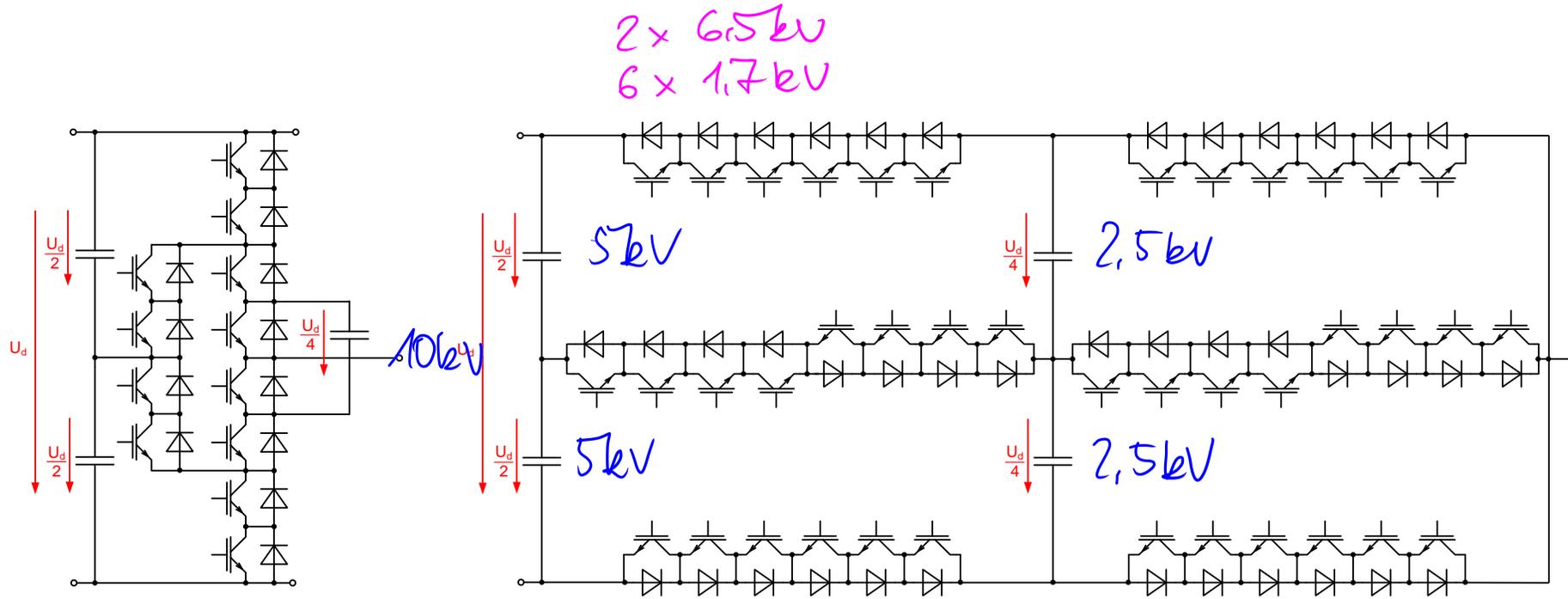
5-Level Stacked Multicell (5L-SMC)

2x PEBS

7L-SMC 3x PEBS

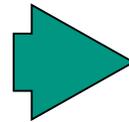
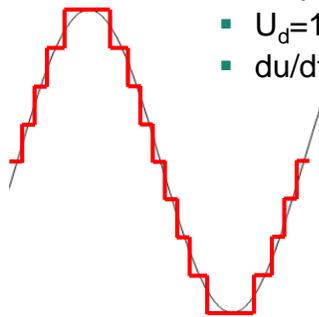
⋮

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-SMC



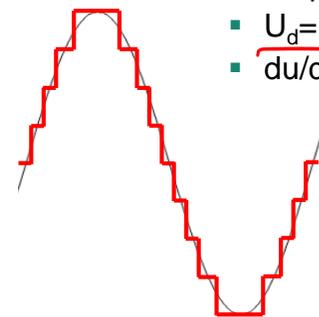
5L-ANPC with n=2 and Floating Capacitor

- Example:
- $U_d = 10 \text{ kV}$
 - $du/dt = 2,5 \text{ kV}/\mu\text{s}$



5L-NPP with n=4..6 (2 stacked 3L-TNPC)

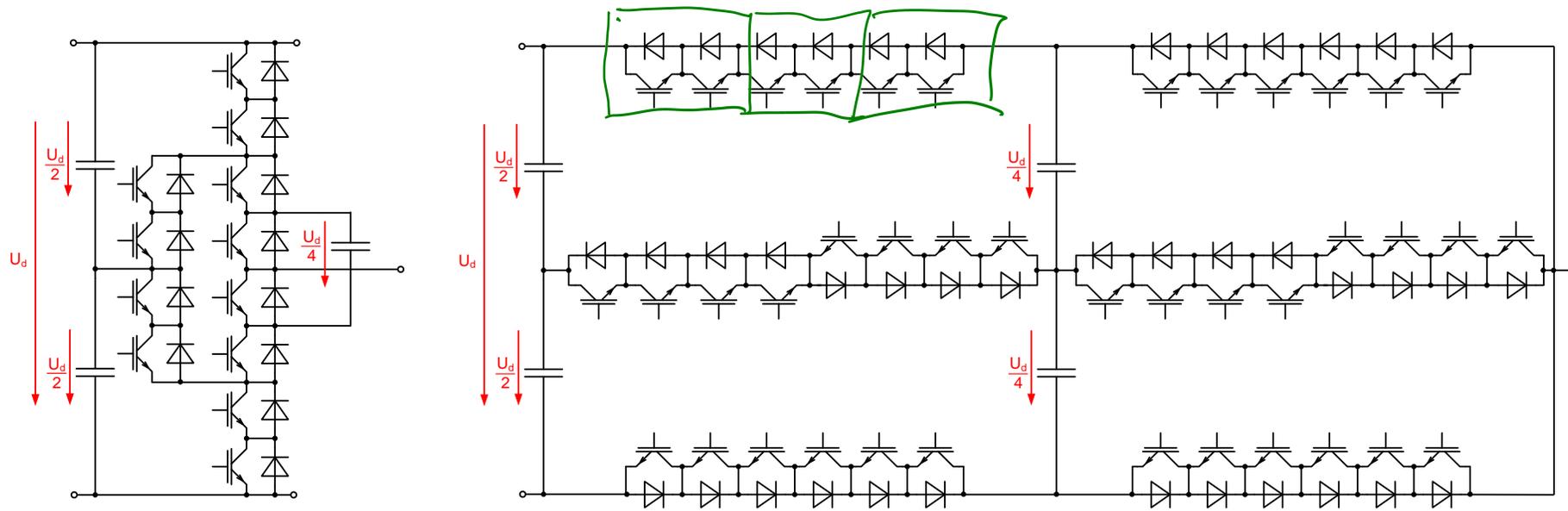
- Example:
- $U_d = 10 \text{ kV}$
 - $du/dt = 2,5 \text{ kV}/\mu\text{s}$



Source: GE

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-SMC

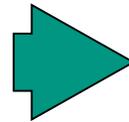
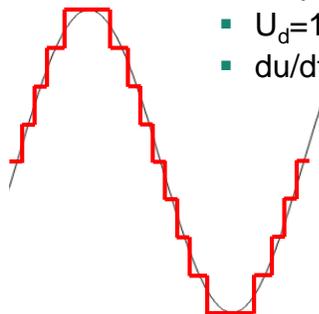
3x 1,7 kV-Halbrücken



5L-ANPC with n=2 and Floating Capacitor

Example:

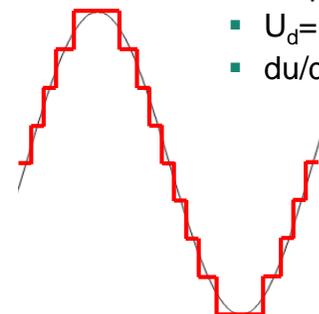
- $U_d=10\text{ kV}$
- $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



5L-NPP with n=4..6 (2 stacked 3L-TNPC)

Example:

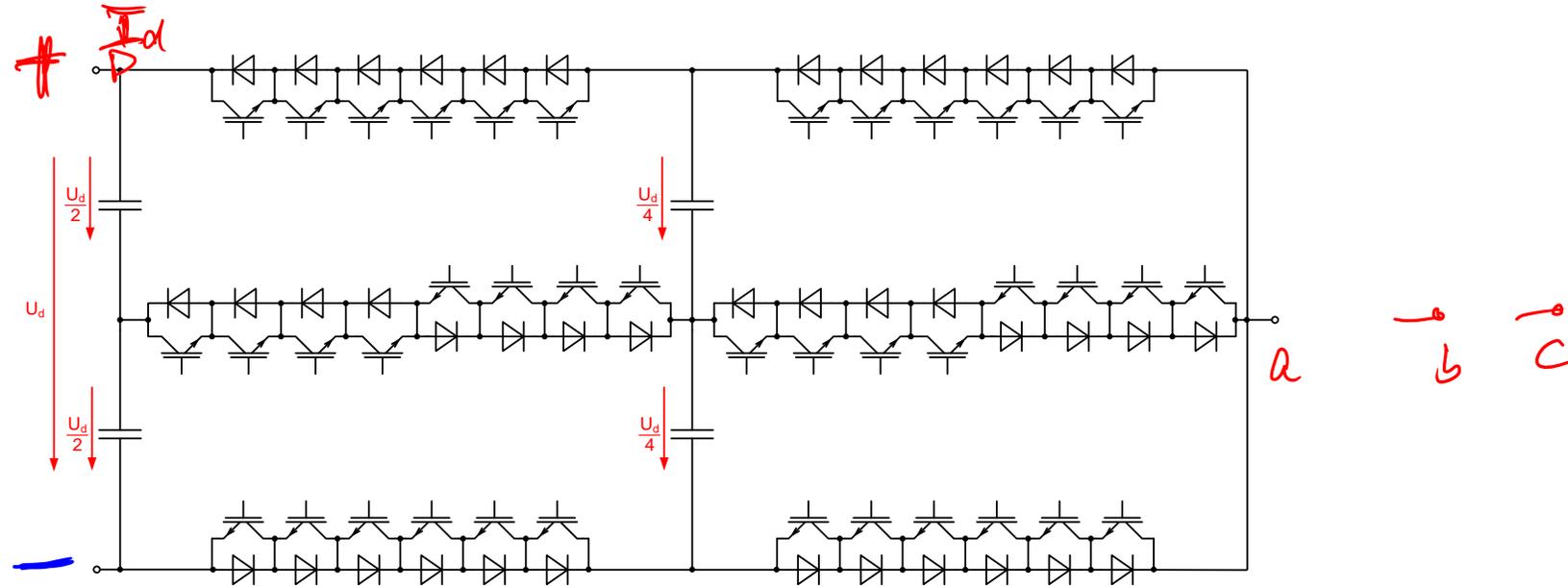
- $U_d=10\text{ kV}$
- $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



Source: GE

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-SMC

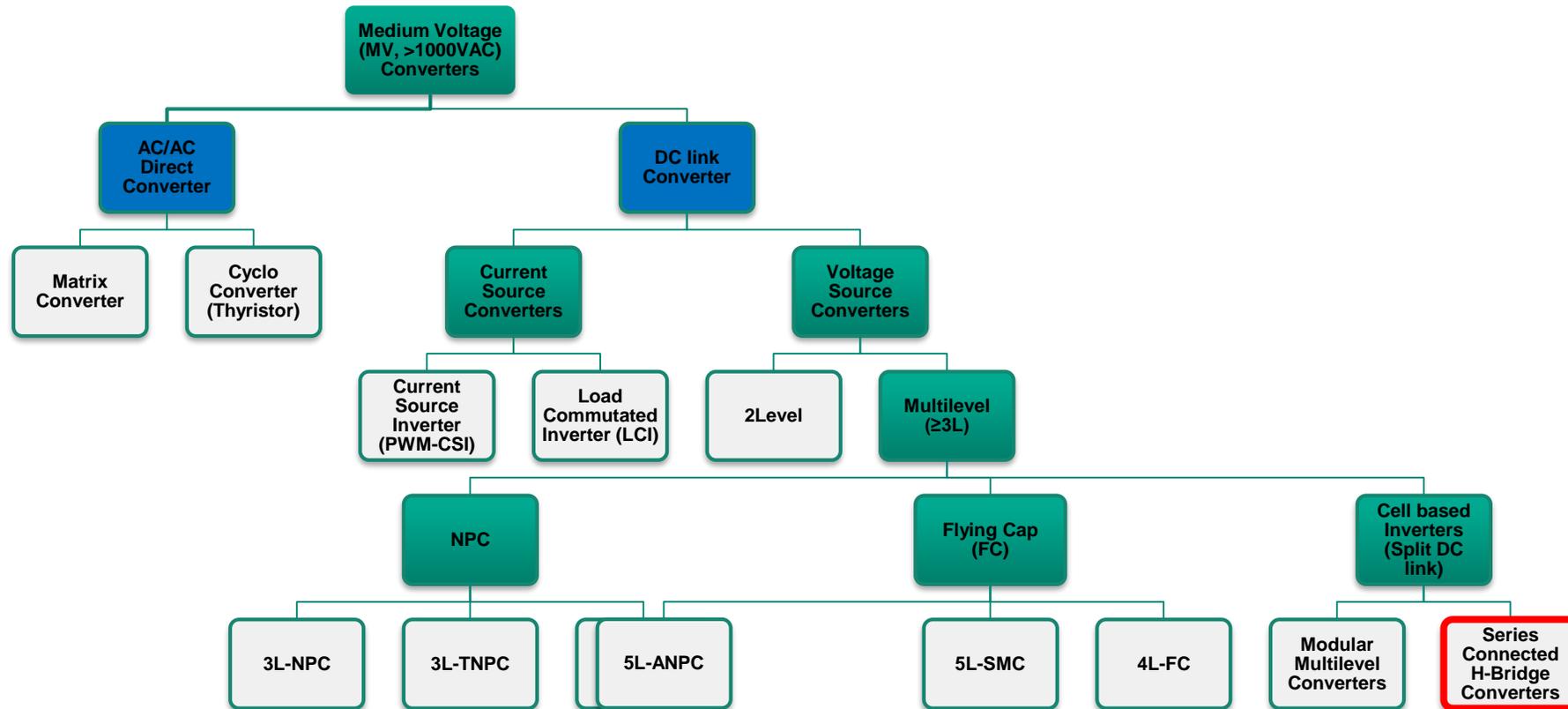
- Main applications:**
 - General purpose applications like pumps, blowers, compressors



- Power semiconductors:**
 - IGBT-Module mit $U_{CES}=1,7\text{kV}$ (in Reihenschaltung $n \leq 6$)
- Advantages vs. 3L-NPC:**
 - Höhere Stufenzahl, geringere Netzrückwirkungen Harmonische auf der Netzseite
 - Verwendung von Standard LV-IGBTs
 - Ggf. ohne zusätzliche Maßnahmen für den Einsatz von Standardmotoren geeignet
- Mögliche Nachteile gegenüber 3L-NPC:**
 - Höhere Komplexität (IGBT-Reihenschaltung),
 - Höhere Kosten bei größeren Leistungen

Source: GE

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



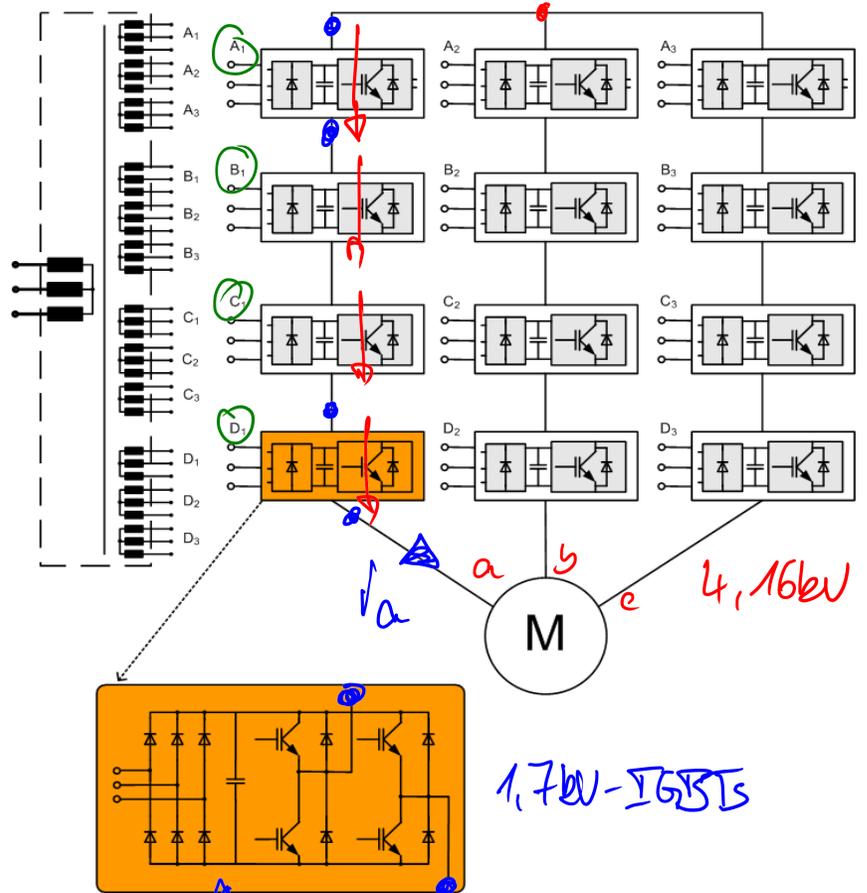
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Series Cell Umrichter (SC)

10-15 €/kVA

$$U_N = 4,16 \text{ kV}$$

20kV

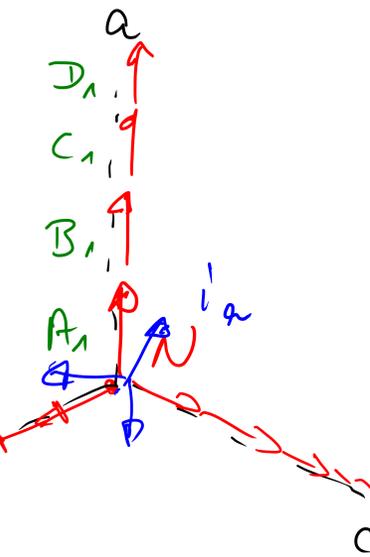
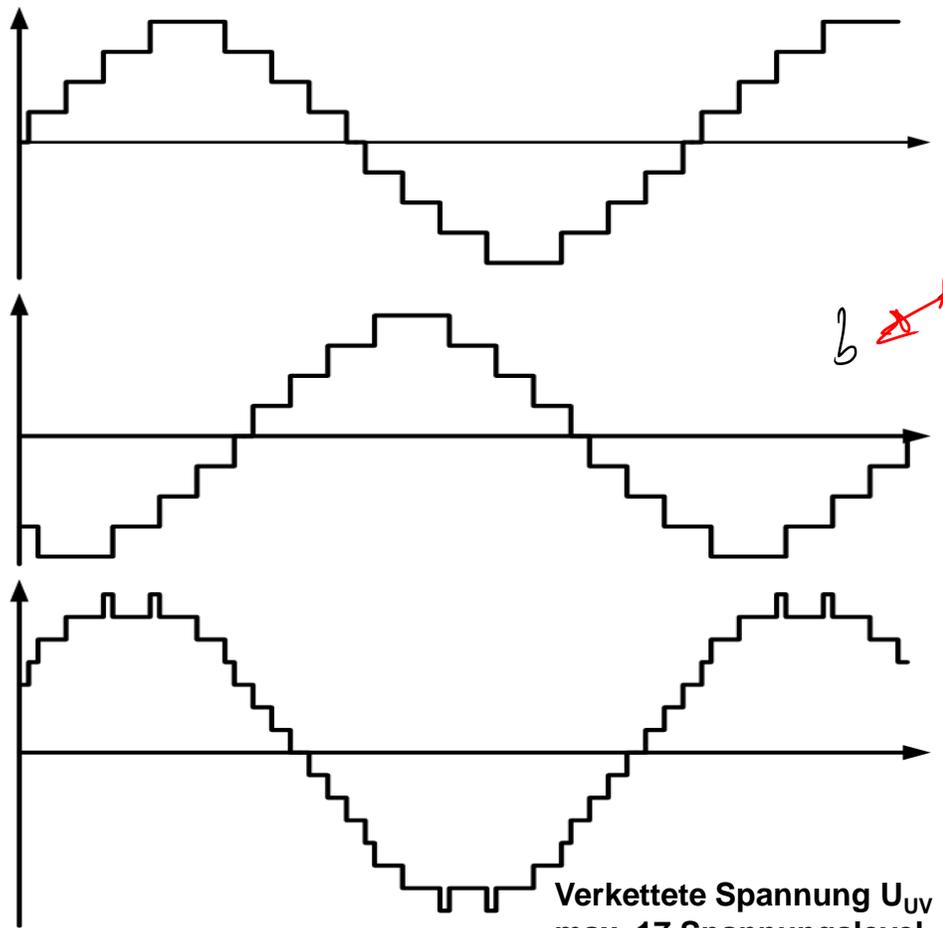
9-Level H-Brückenschaltung



4,16kV

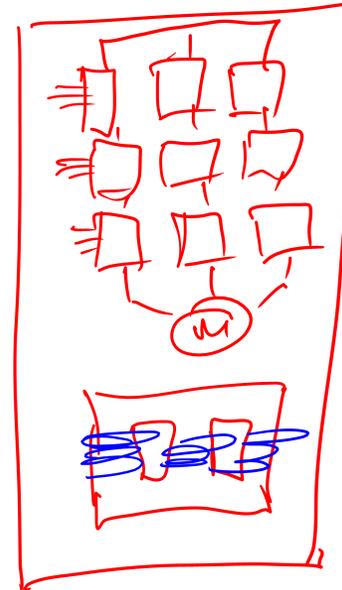
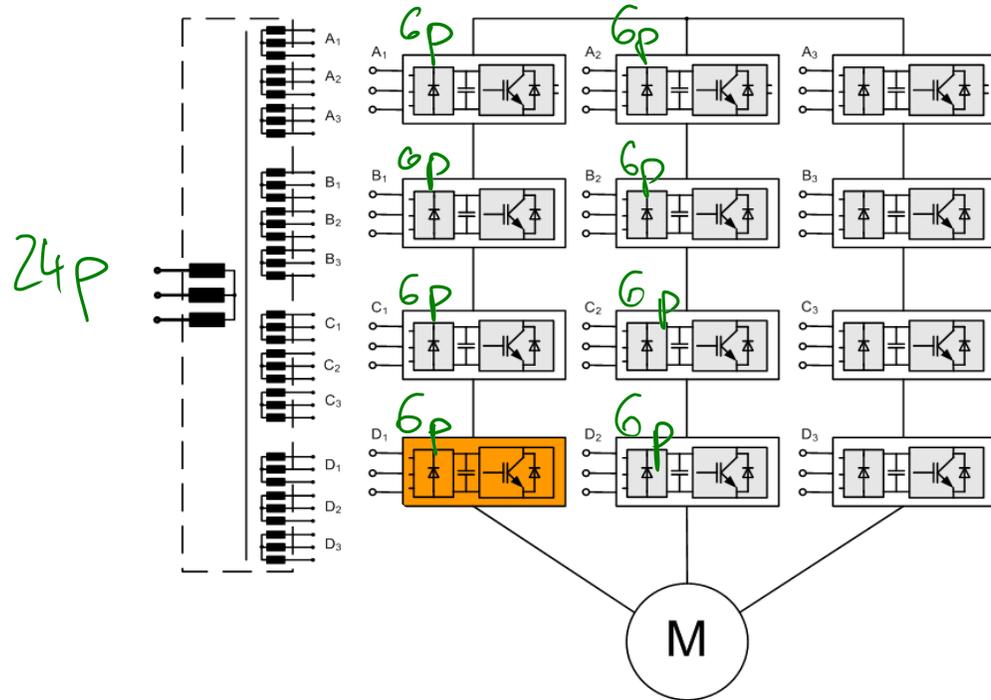
1,7kV-IGBTs

$$U_d = 12 \text{ kV}$$



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Series Cell Umrichter (SC)

- Hauptanwendungsgebiete:
 - Pumpen, Lüfter, Kompressoren
 - Anwendungen mit langen Kabeln
 - Schiffsantriebe, Mühlen

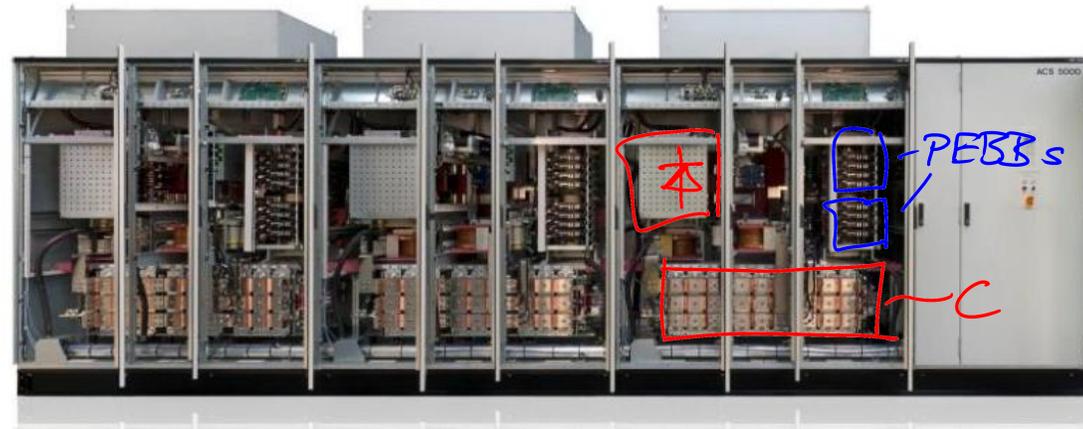


- Halbleiter: IGBT-Module mit $U_{CES}=1,7kV$
- Vorteile:
 - Einfache Spannungsskalierbarkeit durch Reihenschaltung von H-Brückenzellen
 - Anwendbar für Standard-Motoren ohne Ausgangsfilter
 - Redundanz ist optional möglich
 - Durch hohe Pulsigkeit der Ausgangsspannungen für schnell laufende Antriebe geeignet.
 - Hohe Regeldynamik
- Nachteile:
 - (Komplexer Trafo erforderlich)
 - Mehrmotorenbetrieb mit gemeinsamen DC-Bus nicht möglich
 - Rückspeisefähigkeit und Bremssteller nur mit sehr großem Aufwand möglich

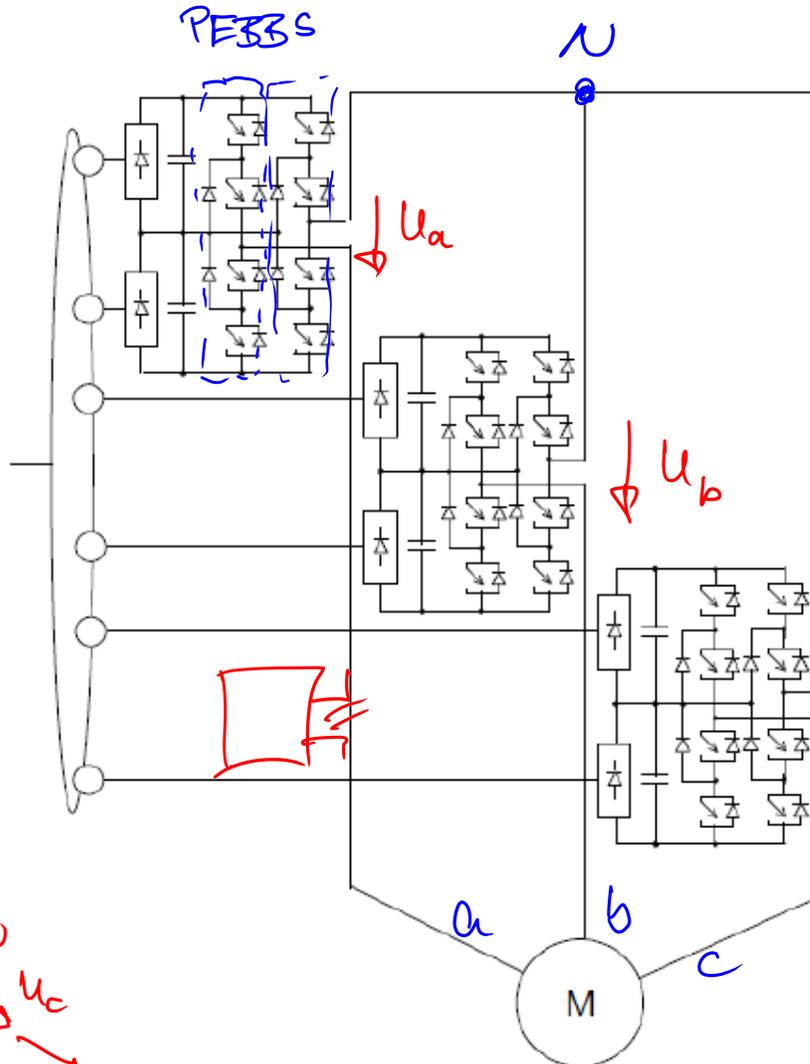
Quelle: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Series Cell Umrichter (SC)

- Hauptanwendungsgebiete:
 - Pumpen, Lüfter, Kompressoren großer Leistung



SC Umrichter: 6,6kV, 1500A, 17MVA, wassergekühlt (ABB ACS5000)



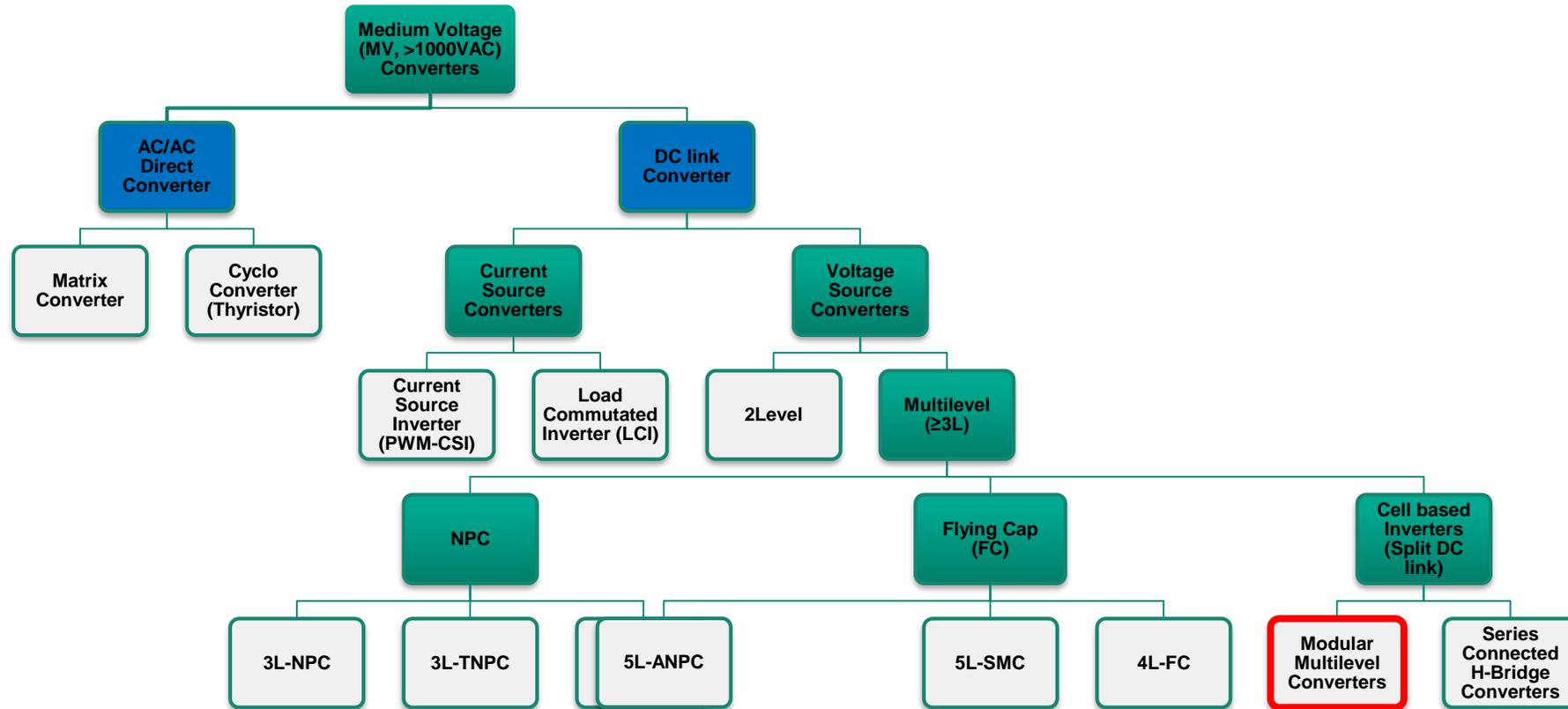
- Halbleiter:
 - Press Pack-IGBT mit $U_{CES}=4,5kV$
 - Press Pack-IGCT mit $U_{DRM}=4,5kV$
- Vorteile:
 - Einfache Spannungsskalierbarkeit durch Reihenschaltung von H-Brückenzellen
 - Anwendbar für Standard-Motoren ohne Ausgangsfilter
 - Durch hohe Pulsigkeit der Ausgangsspannungen für schnell laufende Antriebe geeignet.
 - Hohe Regeldynamik

- Nachteile:
 - Komplexer Trafo erforderlich
 - Rückspeisefähigkeit und Bremssteller nur mit sehr großem Aufwand möglich

große ZK-Kondensatoren

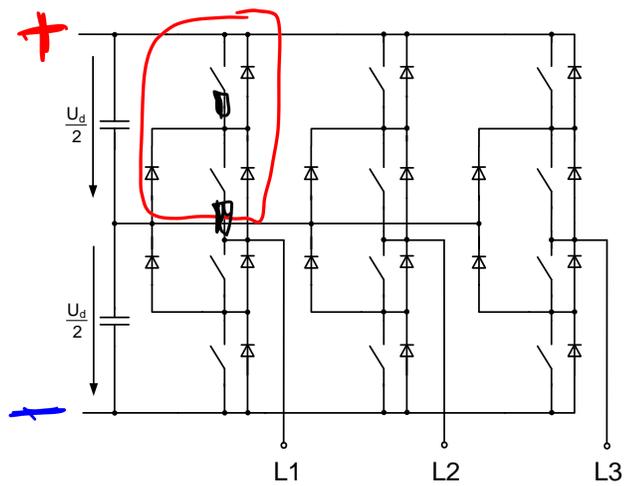
Quelle: ABB

5. Topologien – Mittelspannung (MV)

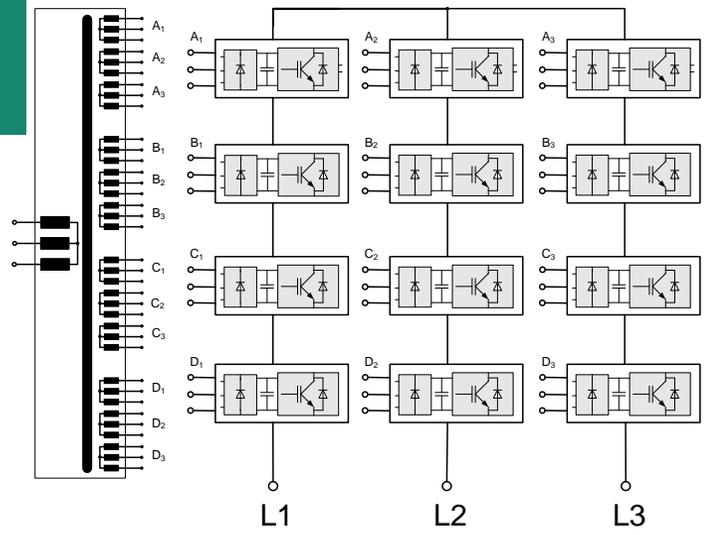


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)

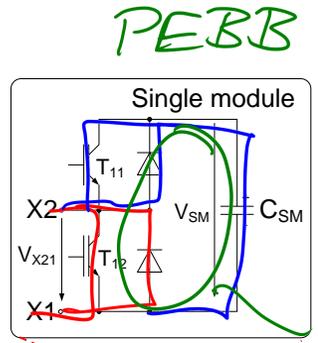
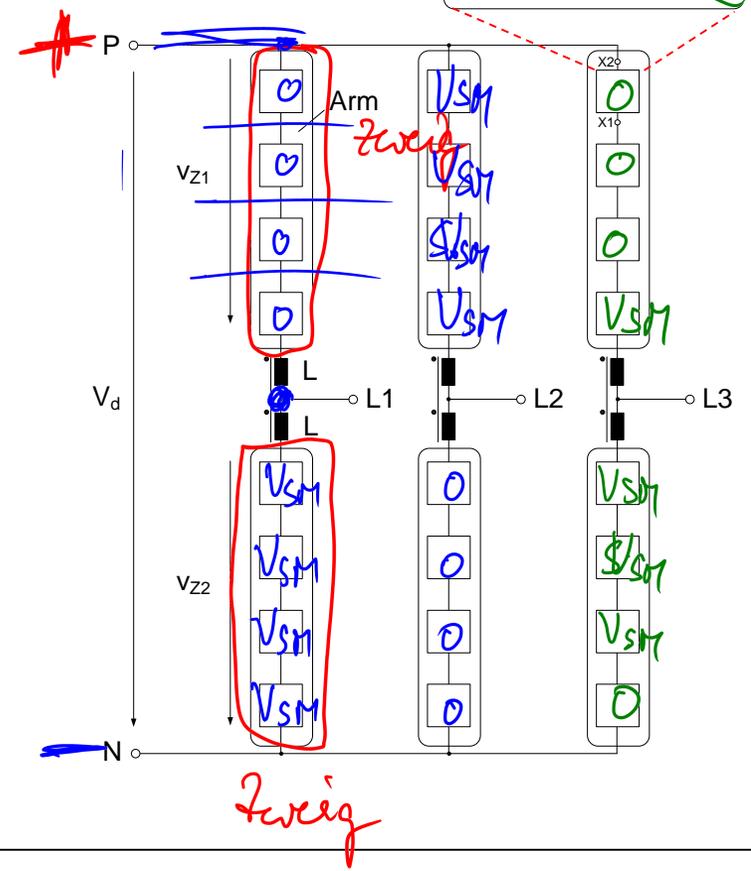
3L-NPC



Series Cell Umrichter (SC)



Modularer Multilevel Umrichter (MMC)



PEBB

$$V_{x21} = \begin{cases} V_{SM} \\ 0V \end{cases}$$

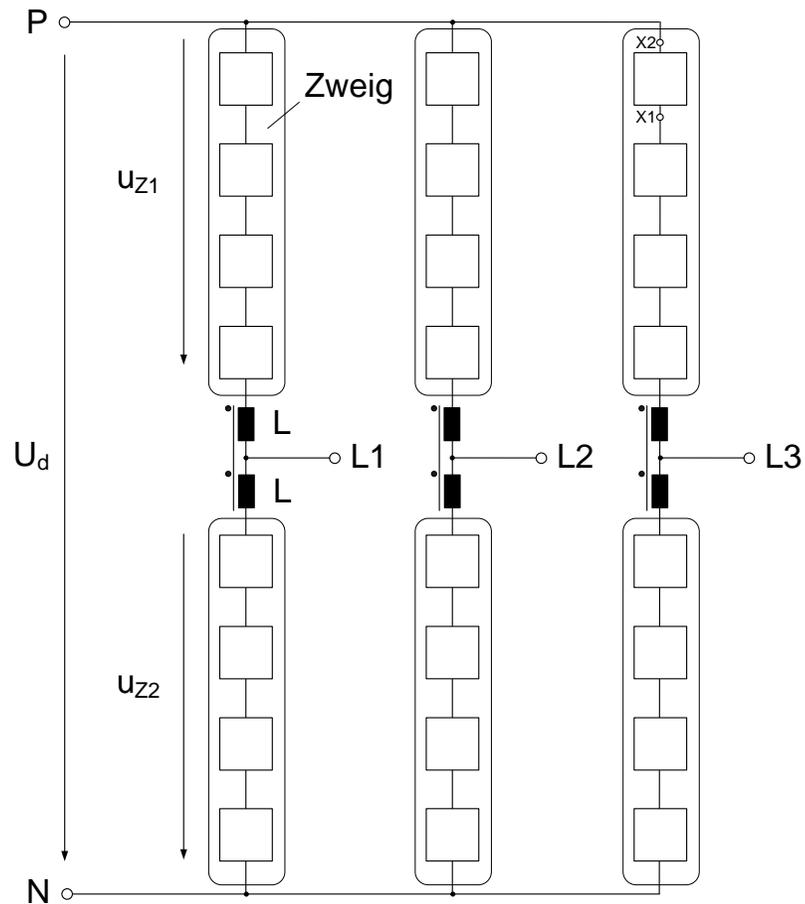
Kommutationskreis
(niederinduktiv)

$$V_{SM} = \frac{V_{dL}}{4}$$

$$V_{dL} = 500kV$$

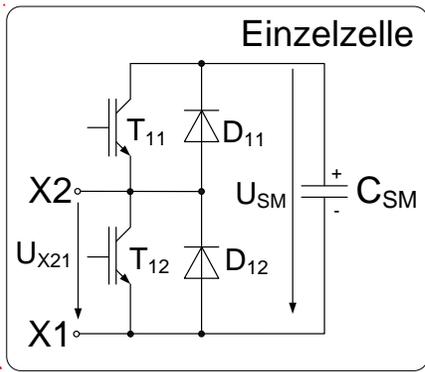
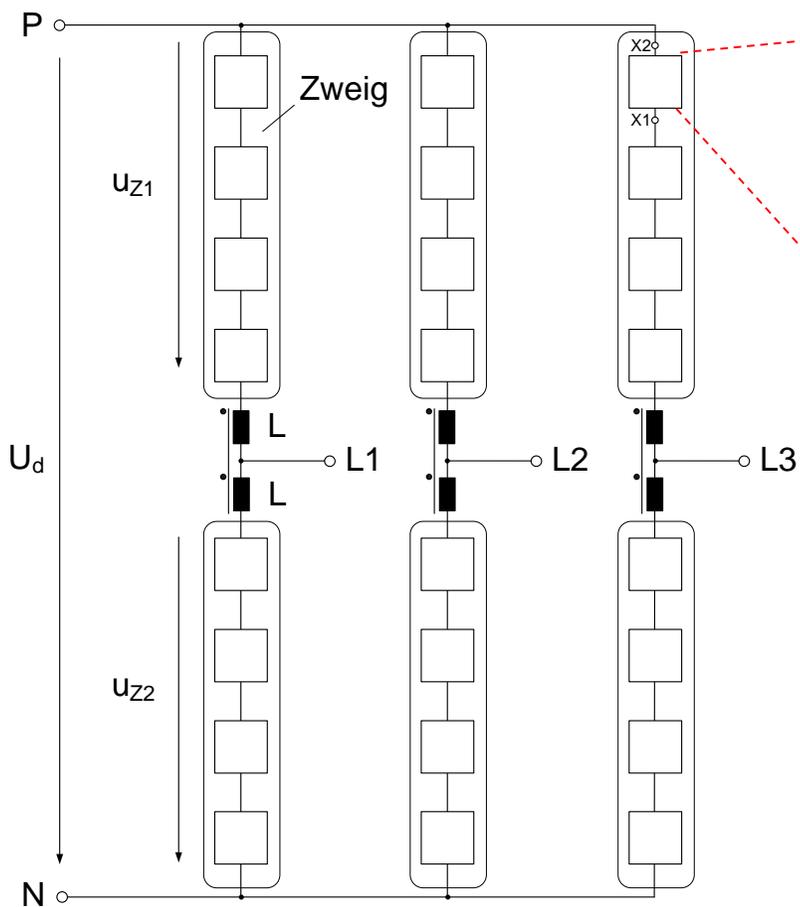
$$n = 250$$

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)



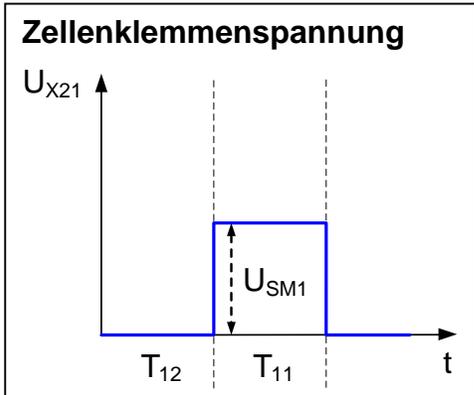
- DC-Zwischenkreis ohne Energiespeicher
- ▶ Vorteilhaftes Fehlverhalten
- Flexible DC-Bus-Konfigurationen möglich

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)

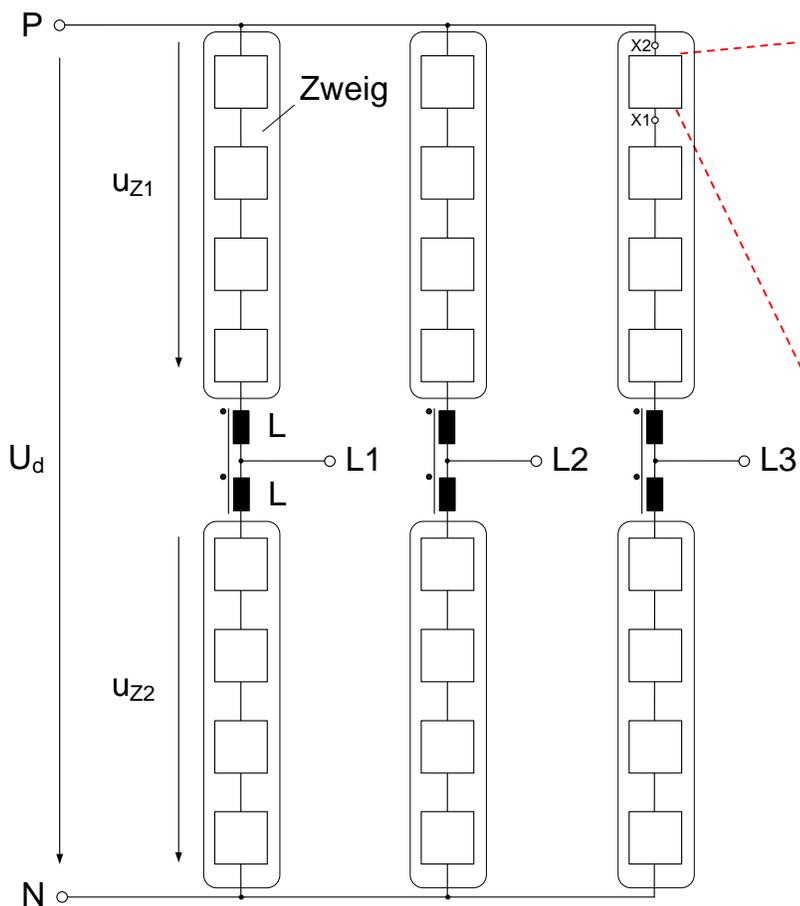


- Zellen sind Zweipole ohne zusätzliche Energieversorgung
- Einsatz identischer Zellen für Netz- und Motorseite
- Einfacher Aufbau ohne Anforderungen an Streuinduktivität ($n=6..300$)
- Einsatz von Niederspannungskomponenten in MV-Anwendungen, z.B.
 - 1,7kV-IGBT-Module
 - 1,2kV-Folienkondensat.

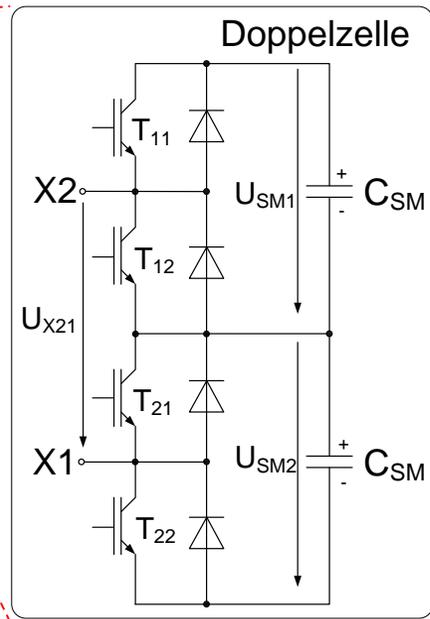
- DC-Zwischenkreis ohne Energiespeicher
- ▶ Vorteilhaftes Fehlverhalten
- Flexible DC-Bus-Konfigurationen möglich



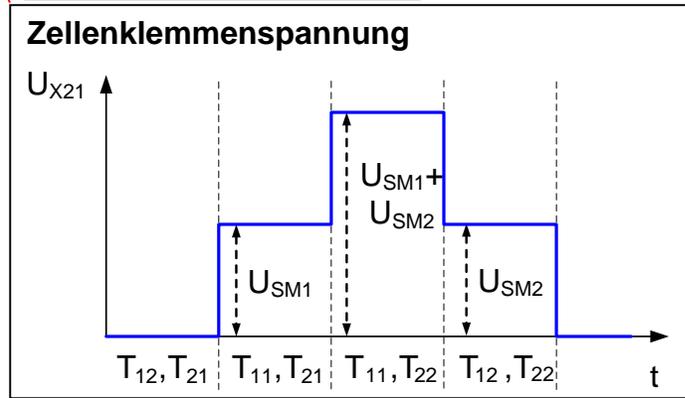
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)



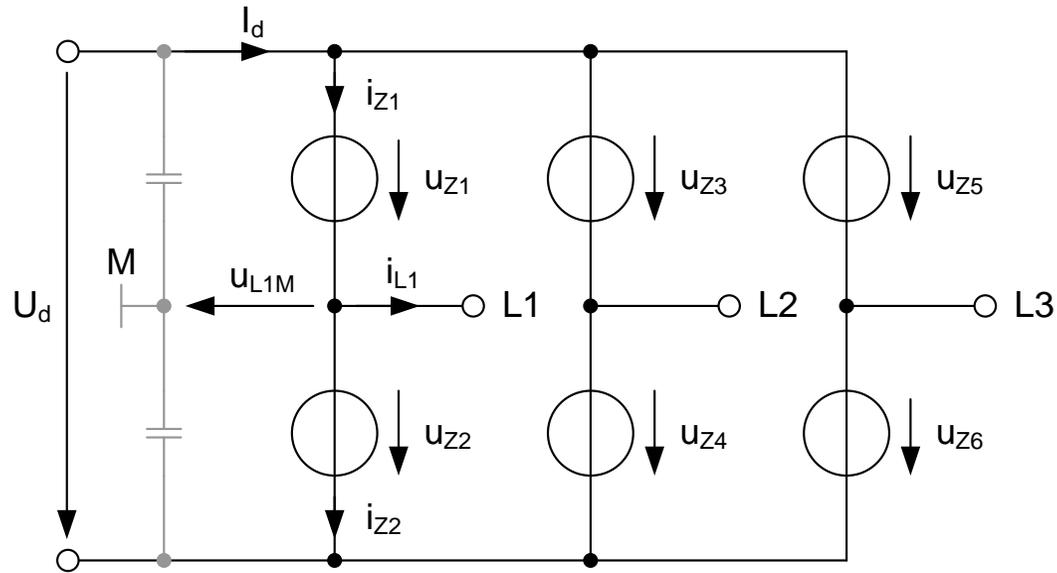
- DC-Zwischenkreis ohne Energiespeicher
- ▶ Vorteilhaftes Fehlverhalten
- Flexible DC-Bus-Konfigurationen möglich



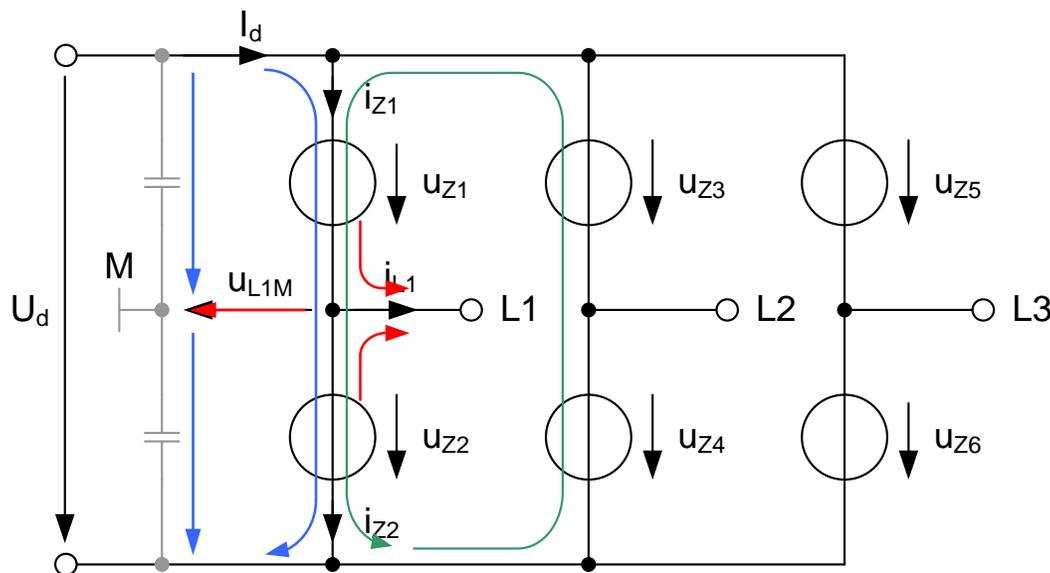
- Zellen sind Zweipole ohne zusätzliche Energieversorgung
- Einsatz identischer Zellen für Netz- und Motorseite
- Einfacher Aufbau ohne Anforderungen an Streuinduktivität ($n=6..300$)
- Einsatz von Niederspannungskomponenten in MV-Anwendungen, z.B.
 - 1,7kV-IGBT-Module
 - 1,2kV-Folienkondensat.



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)



5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)



$$u_{Z1}(t) = U_d/2 - u_{L1M}(t)$$

$$u_{Z2}(t) = U_d/2 + u_{L1M}(t)$$

$$i_{Z1}(t) = I_d/3 + 0.5 \cdot i_{L1}(t) + i_1(t)$$

$$i_{Z2}(t) = I_d/3 - 0.5 \cdot i_{L1}(t) + i_1(t)$$

kontinuierliche
Zweigströme

Die Umrichterzweige stellen 6 unabhängig voneinander steuerbare Spannungsquellen dar:

Gesamt: 6 Freiheitsgrade in der Regelung

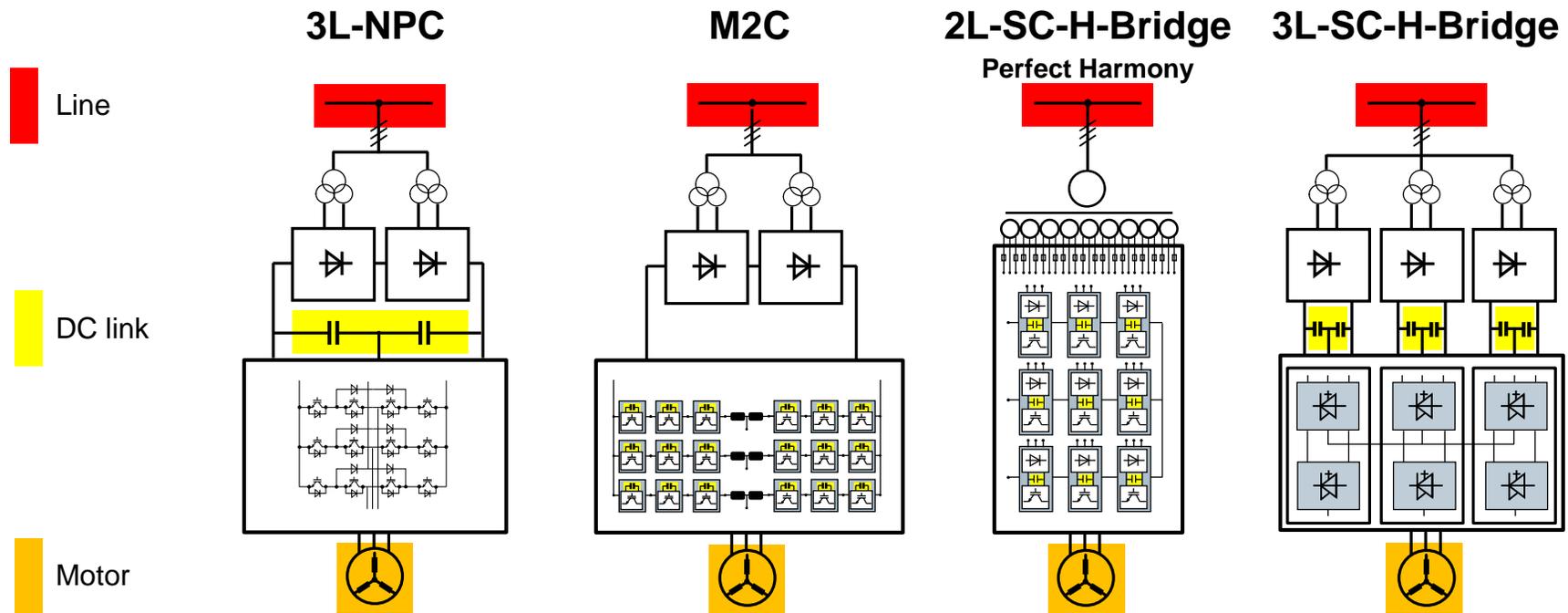
3 Freiheitsgrade in den Ausgangsgrößen

- 2 für die α, β -Komponenten der Ausgangsspannung
- 1 für die 0-Komponente der Ausgangsspannung (Common-Mode Spannung)

3 Freiheitsgrade in den internen Stromrichtergrößen

- 2 für die Regelung umrichterinterner Kreisströme
 - Symmetrierung der Zweigenergien
 - Optimierung der Bauelementebelastung
- 1 für die Regelung der Zwischenkreisspannung
 - Regelung des Gesamtenergieinhaltes des Umrichters über Regelung des Zwischenkreisstroms I_d
 - Beeinflussung des Netzstroms bei Diodeneinspeisung

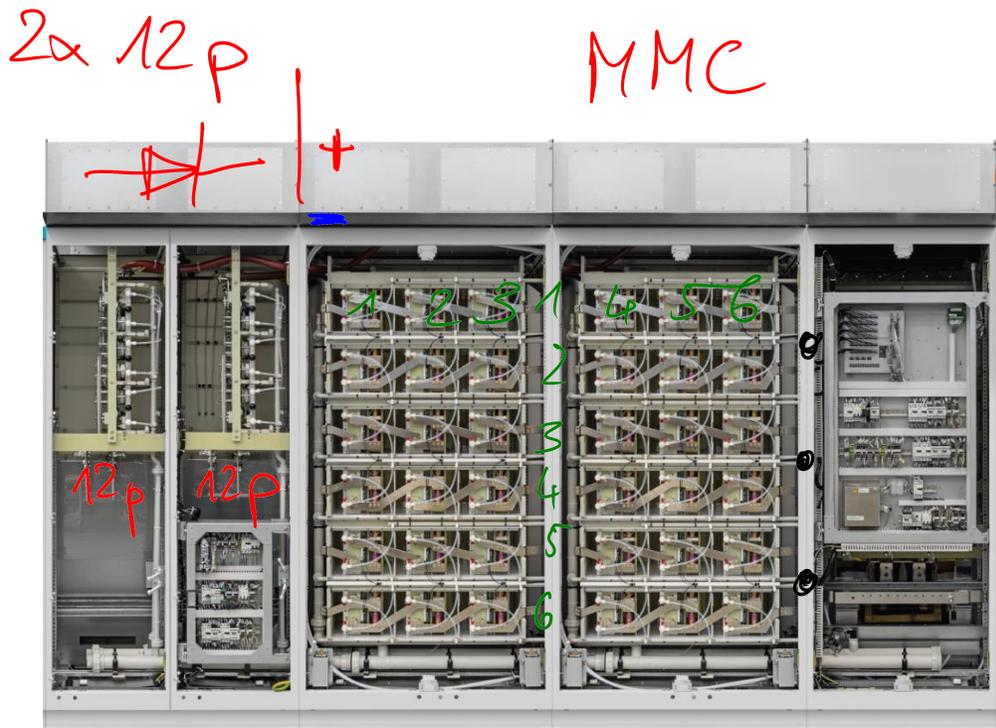
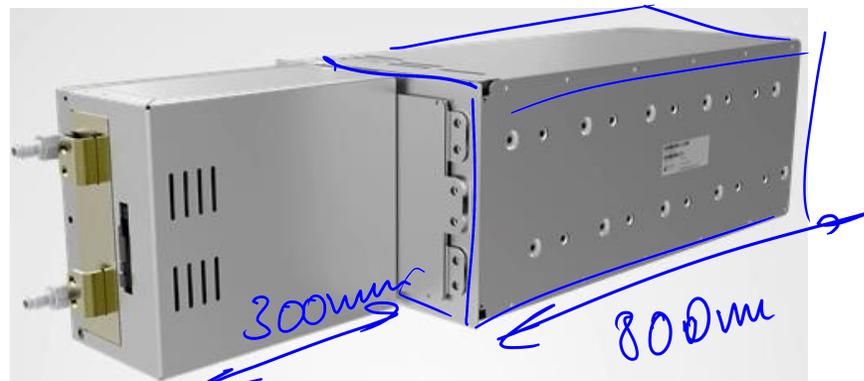
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC) Verhalten im Fehlerfall



Stored DC link energy	Large, centralized	+	Very small, decentralized	+	Small, decentralized	Large, centralized
DC link/Cell or semiconductor failure fed by ...	Large DC caps, Line and/or Motor	+	Very small cell caps	+	Small cell caps, Line (protection by fuses)	Large DC caps, Line and/or Motor

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)

- Hauptanwendungsgebiete:
 - Pumpen, Lüfter, Kompressoren
 - Anwendungen mit langen Kabeln
 - Netzanwendungen



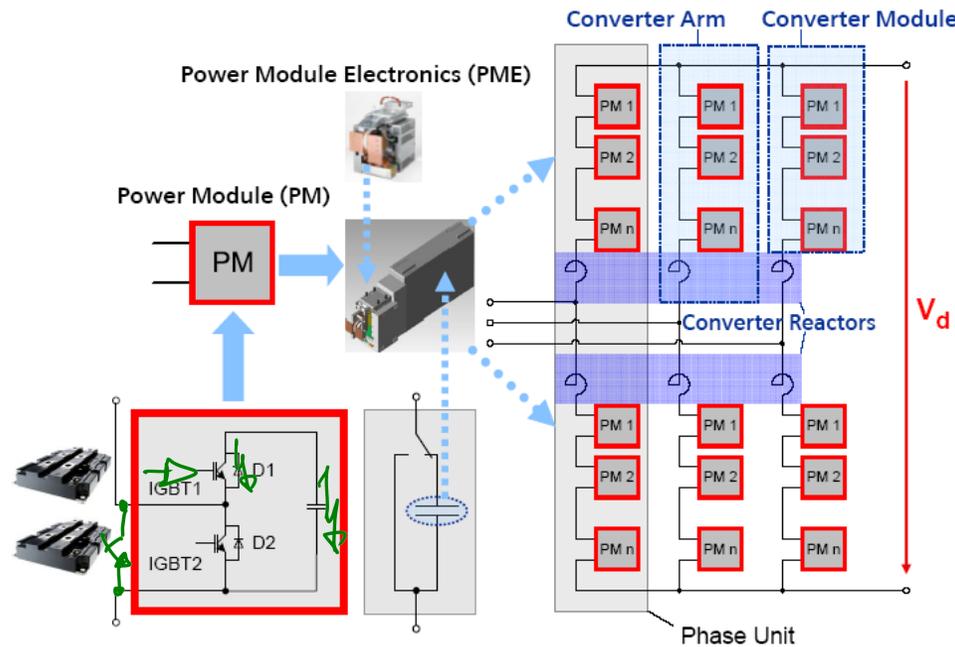
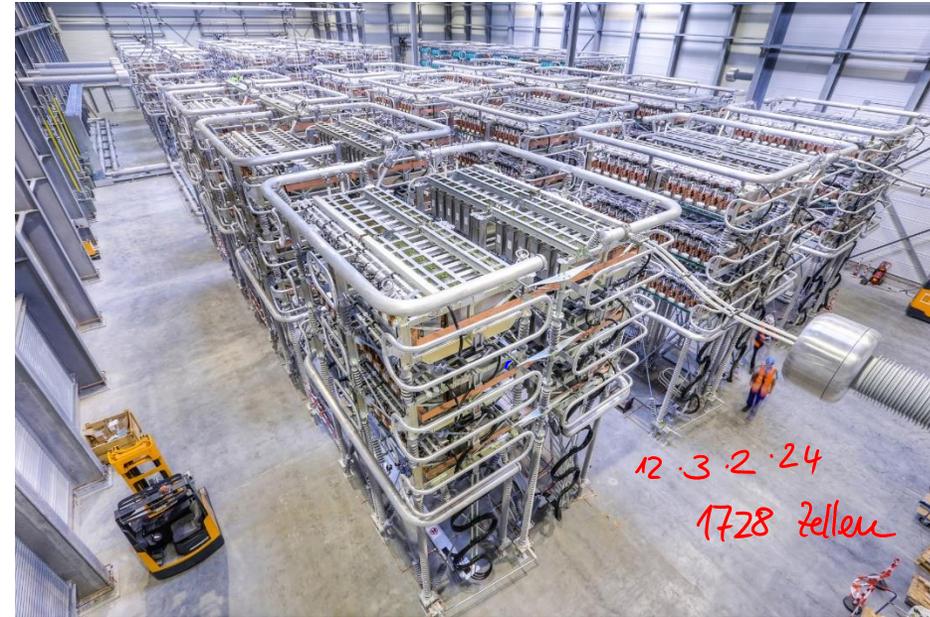
MMC Umrichter: 6,6kV, 1200A, 13,7MVA, wassergekühlt (Siemens SINAMICS GH150)

- Halbleiter: IGBT-Module mit $U_{CES}=1,7kV$
- Vorteile:
 - Einfache Spannungskalierbarkeit durch Reihenschaltung von Zellen
 - Einfache Stromskalierbarkeit durch Dimensionierung der Zellen
 - Anwendbar für Standard-Motoren ohne Ausgangsfilter
 - Erfüllung von Grid Codes (z.B. Low Voltage RideThrough LVRT) möglich durch extrem hohe Dynamik
 - Redundanz ist optional möglich
 - Durch hohe Pulsigkeit der Ausgangsspannungen für schnell laufende Antriebe geeignet.
 - Gemeinsamer DC-Bus für Mehrmotorenantriebe möglich
 - Kein komplexer Trafo erforderlich
- Nachteile:
 - Für kleine Motoreckfrequenzen nur bedingt geeignet

Quelle: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)

- Punkt-zu-Punkt-Übertragung von elektrischer Energie über große Distanzen
- Kriterien:
 - Skalierbare Spannung, d.h. Leistung
 - Wirkungsgrad
 - Hohe Verfügbarkeit
 - Netzurückwirkungen



- Selbstgeführte Hochspannungsgleichstromübertragung (Beispiel: Sylwin1):

- DC-Nennspannung: $U=640\text{ kV}$
- DC-Nennstrom: $I=1350\text{ A}$
- $P_{\text{nenn}}=865\text{ MW}$

$n = 320$
 288

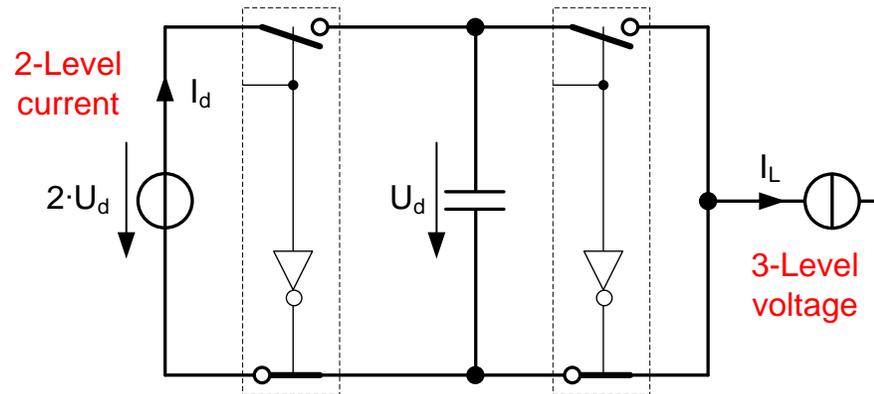
- Topologie

- Modular Multilevel Converter (MMC) mit ca. 2000 Zellen pro Stromrichter (mit 4,5kV-IGBT-Modulen)

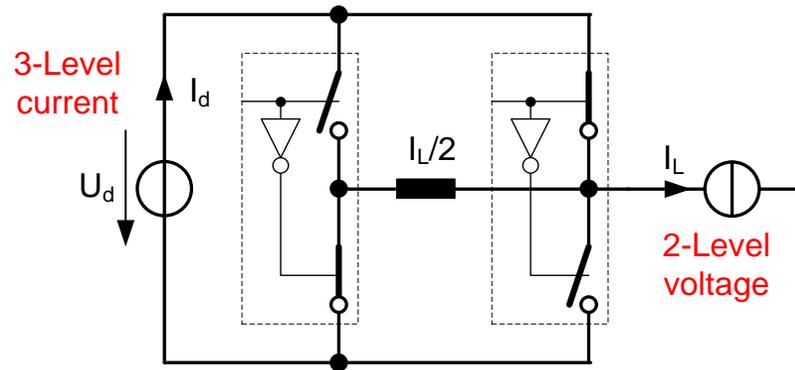
Quelle: Siemens

Multilevel Converters - Structure

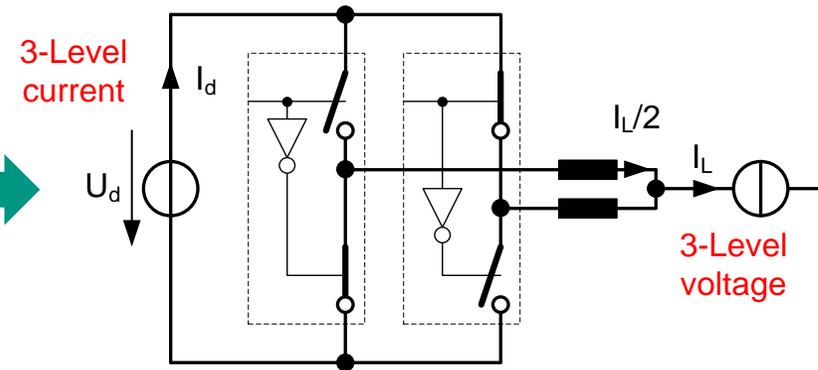
Parallel Connection of Commutation Cells



“Duale”
Schaltung

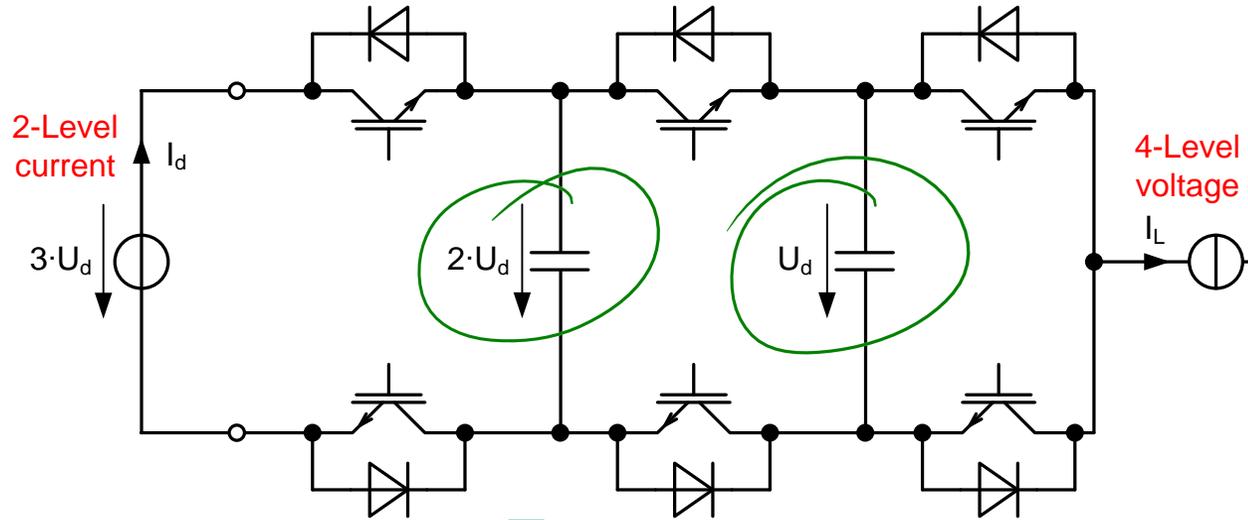


Parallel Multicell configuration

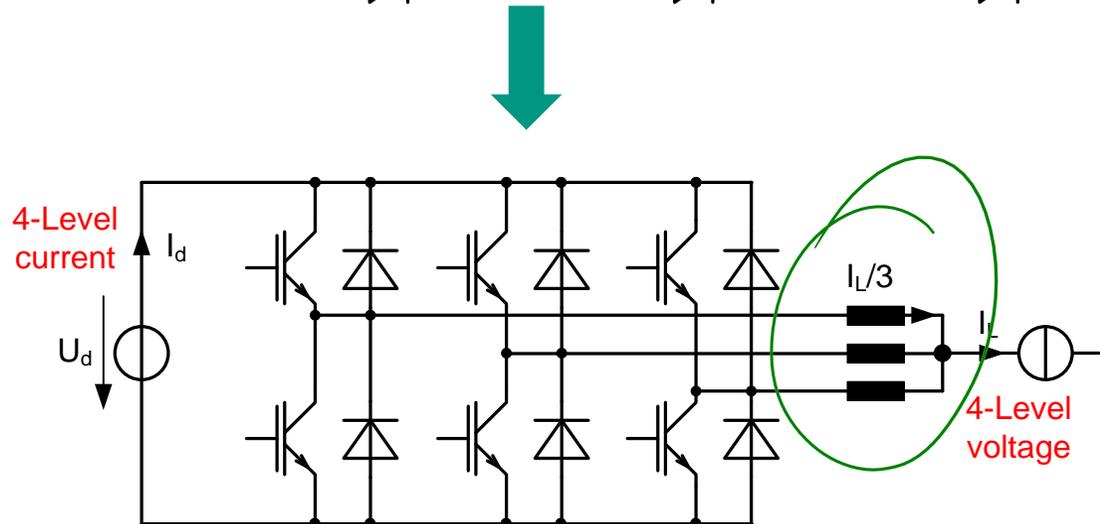


Multilevel Converters - Structure

Parallel Connection of Commutation Cells



4-Level Flying Cap configuration, i.e. 4 voltage levels at the output



4-Level Parallel Multicell configuration with three cells, i.e. 4 voltage levels at the output