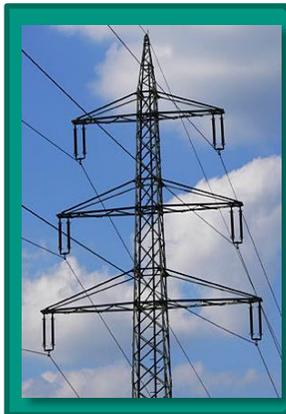


Vorlesung Praxis Leistungselektronischer Systeme

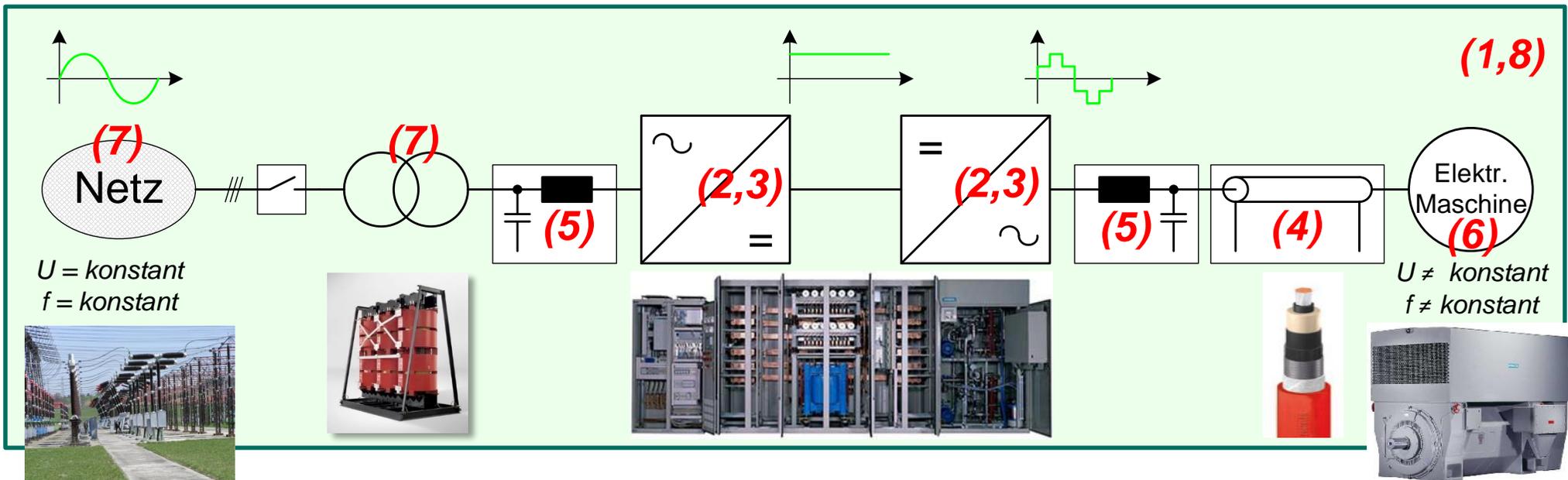
WS2017/18

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

Marktvorbau

Produktentwicklung

Kommerzialisierung

Meilenstein:

Projektstart

Lastenheft

Beschreibung der Anforderungen an das Produkt

Pflichtenheft

Beschreibung des Produkteigenschaften

Beginn Typprüfung

Test an einem seriennahen Prototyp

Lieferfreigabe

Vorfeldentwicklung

Technologiebeobachtung, Machbarkeitsstudien

zum Projektstart

Festlegung auf Topologie, Leistungsbereich, Anwendung

Grobauslegung

Simulation, Beurteilung von Risiken als techn. Input f. d.

Lastenheft

(Produktmanagement)

Auslegung, Design

Schaltplanentwurf, Spannungs- und Isolationskoordination, Stromkoordination Halbleiterauslegung, als Input für das

Pflichtenheft (Entw.)

Produktentwicklung, u.a.

Detailentwicklung, Spezifikation der Komponenten, entwicklungsbegleitende Tests, Erstellung der Prüfpläne für Typ- und Stückprüfung, Vorbereitung der Fertigung

Typprüfung

Test, ob das Produkt alle Anforderungen aus Richtlinien, Gesetzen, Normen und Kundenanforderungen hinsichtlich

- Elektrik,
- Elektromagn. Verträglichkeit (EMV),
- Mechanik, Konstruktion,
- Klima/ Umwelt,
- Schutz und Sicherheit,
- Überwachung, Diagnose,
- Service,
- Qualität erfüllt

Tätigkeiten in Forschung & Entwicklung

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

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%
				
				

* 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%



Systemtrennung LV/MV abhängig von:

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

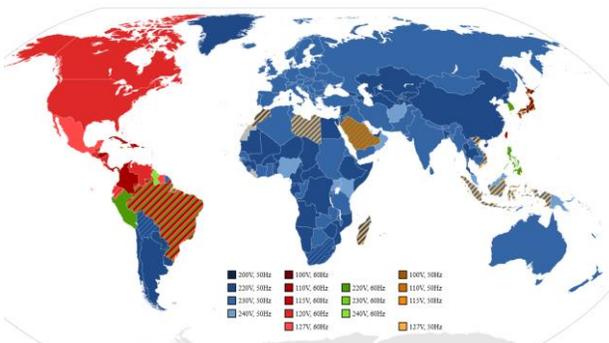
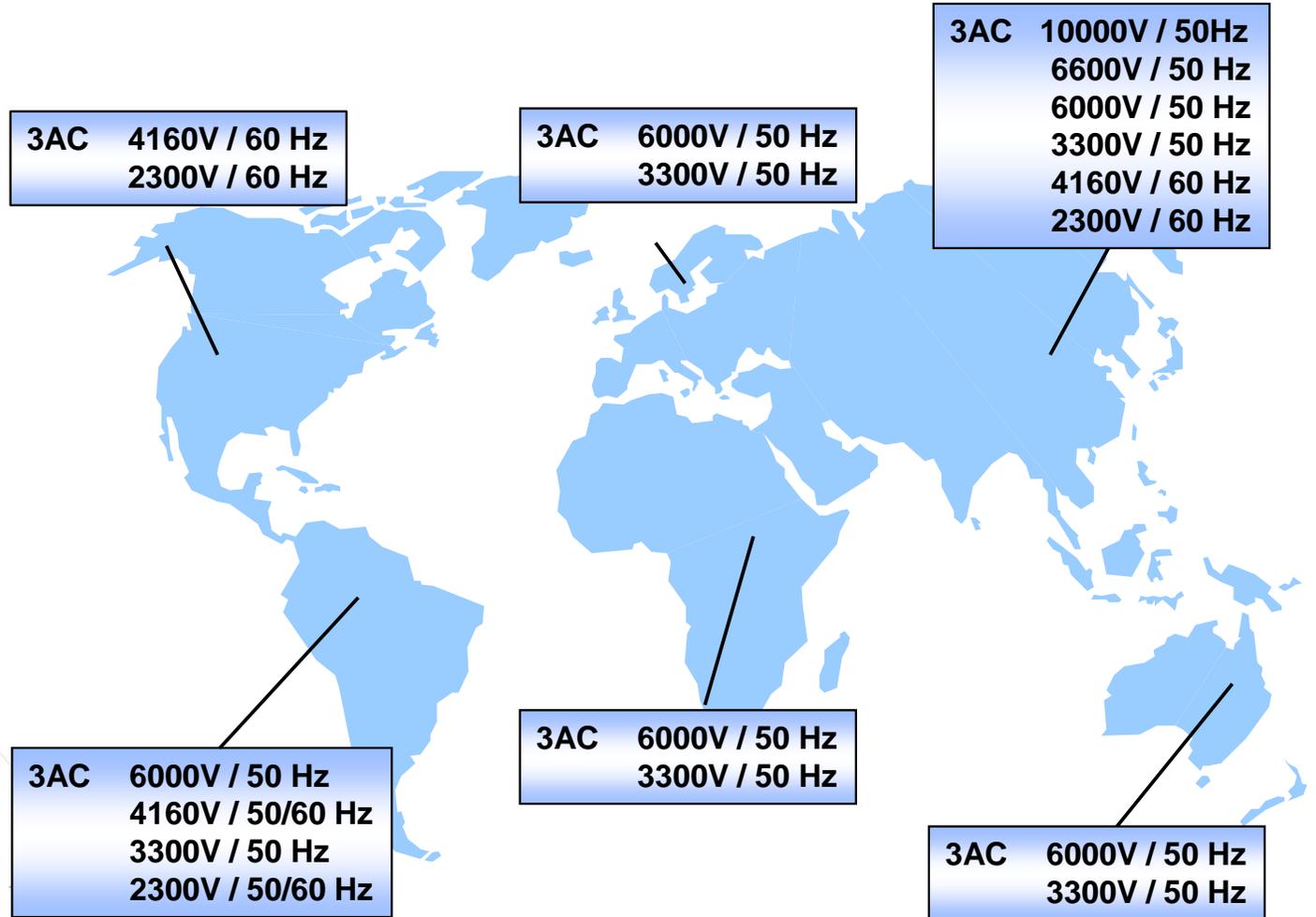
* übliche Bezeichnung für Umrichter (Bez. „Hochspannung“ bei Maschinen üblich)

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

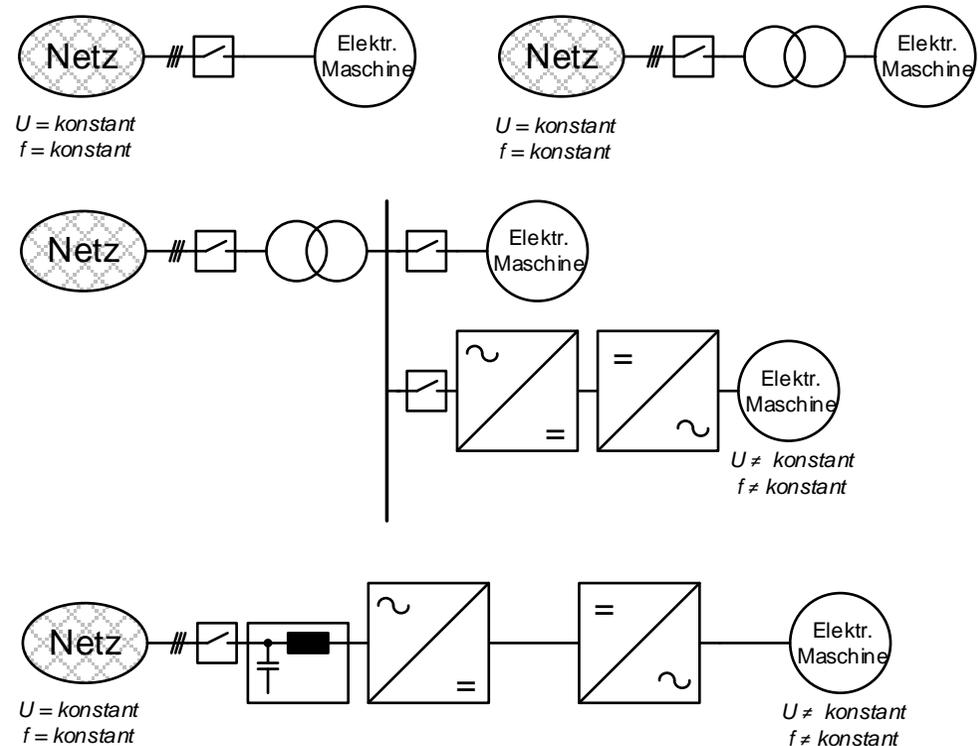
- Die Spannungsebene eines Antriebs wird u.a. von folgenden Faktoren bestimmt:

- Historisch etablierten MV-Spannungsebenen

- Bereits vorhandenen Betriebsmittel (Motoren, Schaltanlagen, Transformatoren)

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

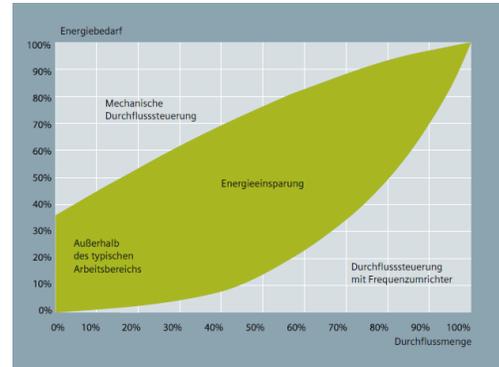
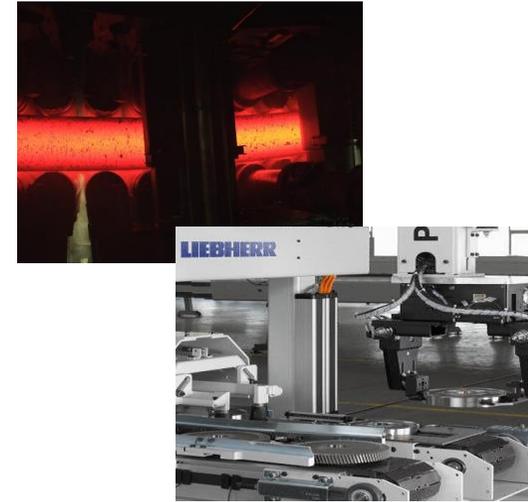
- Kosten: Für die reinen Stromrichterkosten gilt in vielen Anwendungen bis in den Bereich 5-15MVA (je nach Leistungshalbleiter, Beispiel Windenergieanlagen):
„Fange nie mit Spannung an, was man auch mit Ampere kann“ ☺



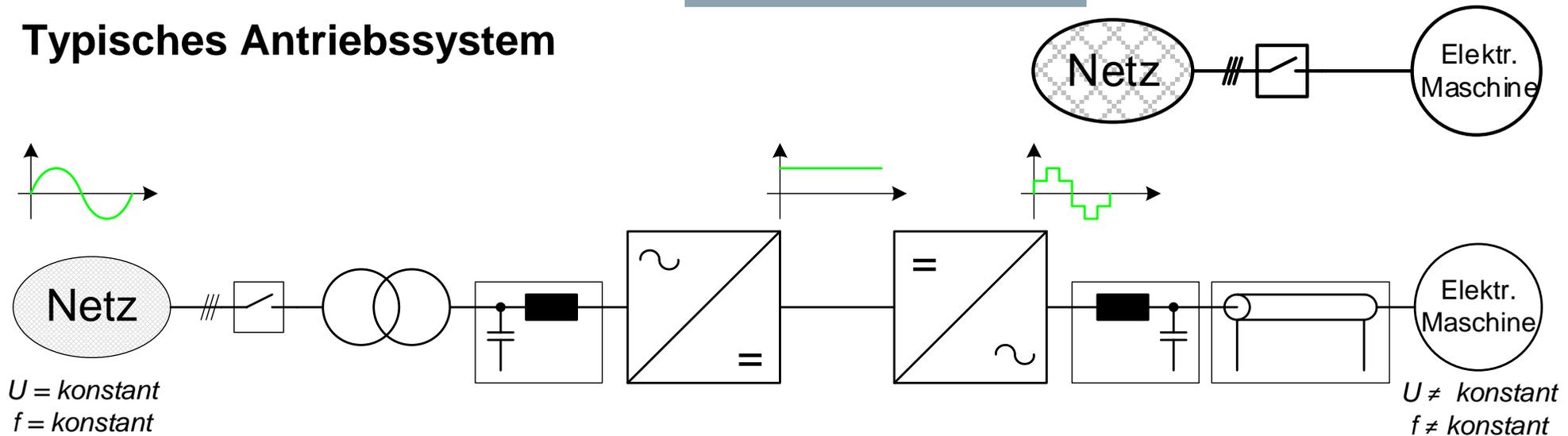
2. Energieeffizienz

Warum stromrichter-gespeiste Antriebe?

- Wachsende Zahl an herausfordernden Antriebsaufgaben
- Steigerung der Energieeffizienz



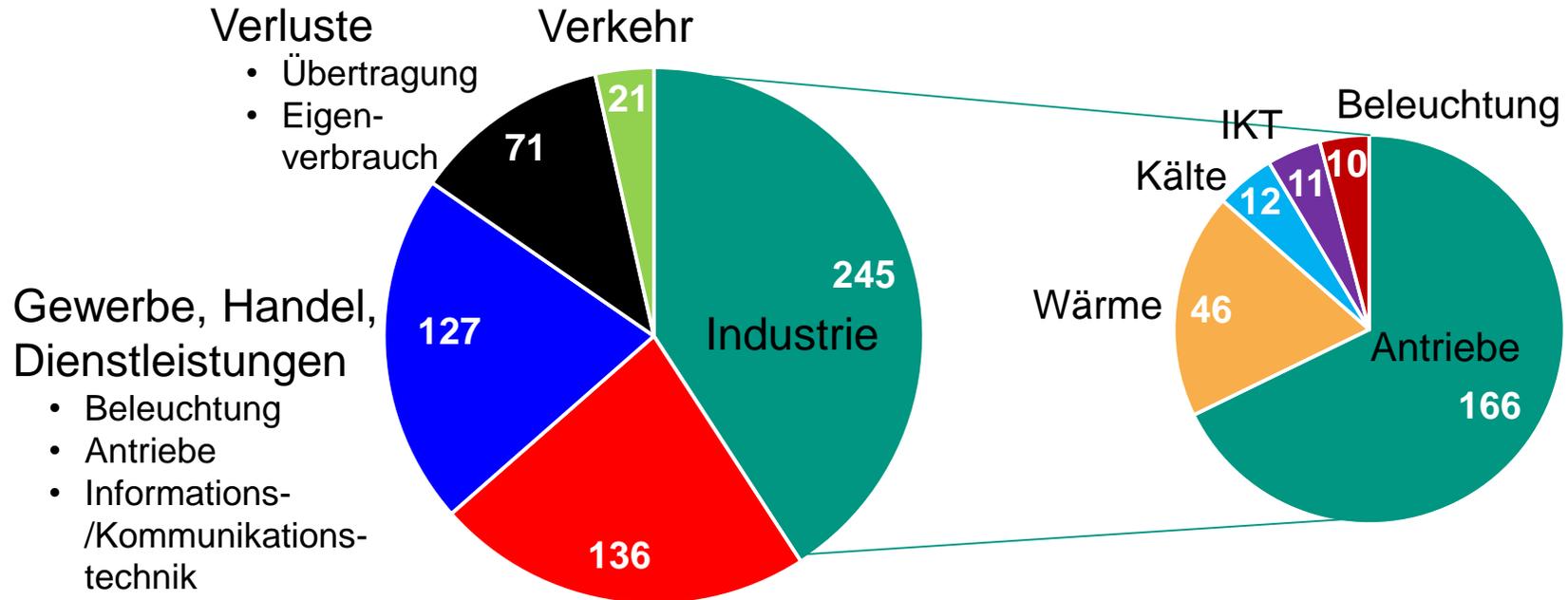
Typisches Antriebssystem



2. Energieeffizienz

■ Stromverbrauch 2013 in Dtl.: 600 TWh

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



Haushalte (1TWh ~ ca. 300.000 Haushalte)

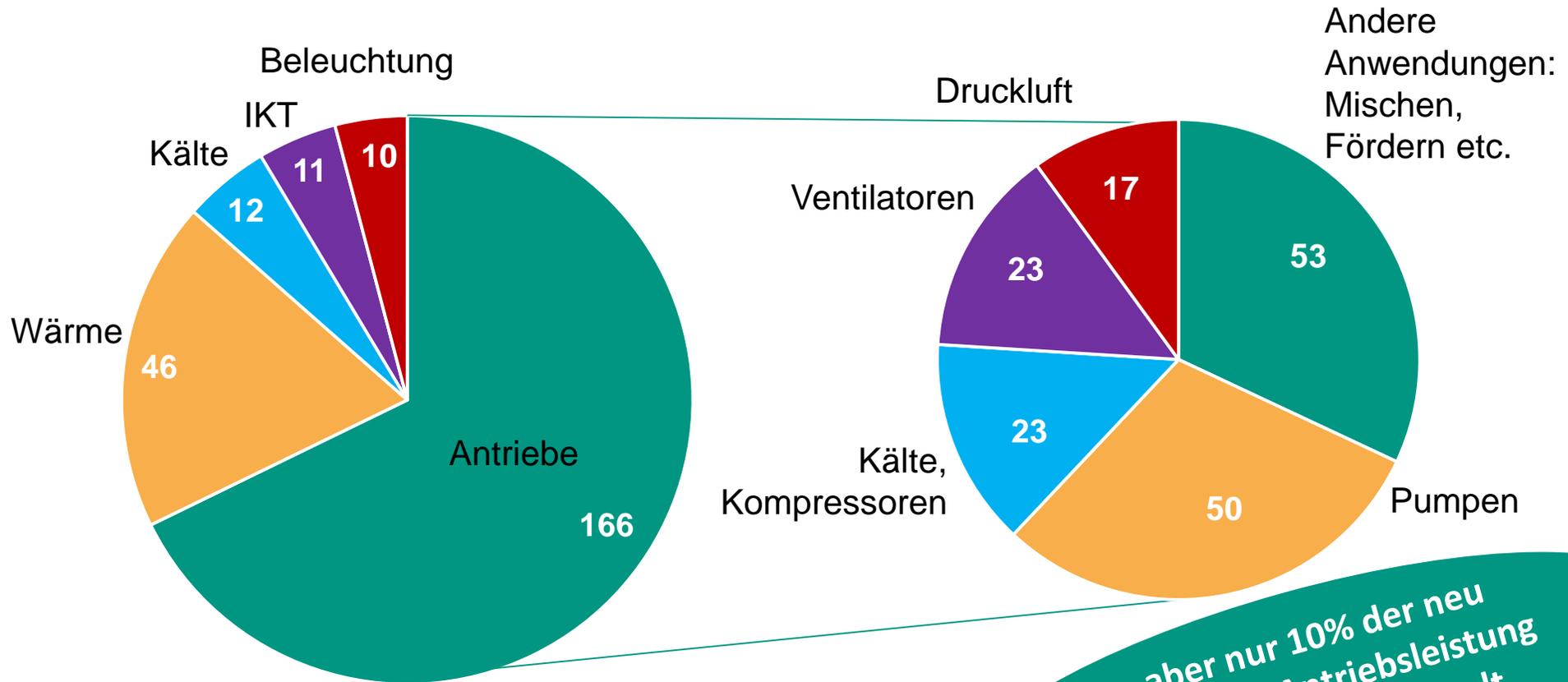
- Wärme/Kälte
- Informations-/Kommunikationstechnik

alle Angaben in TWh

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

2. Energieeffizienz

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



alle Angaben in TWh

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

2. Energieeffizienz - Beispiel

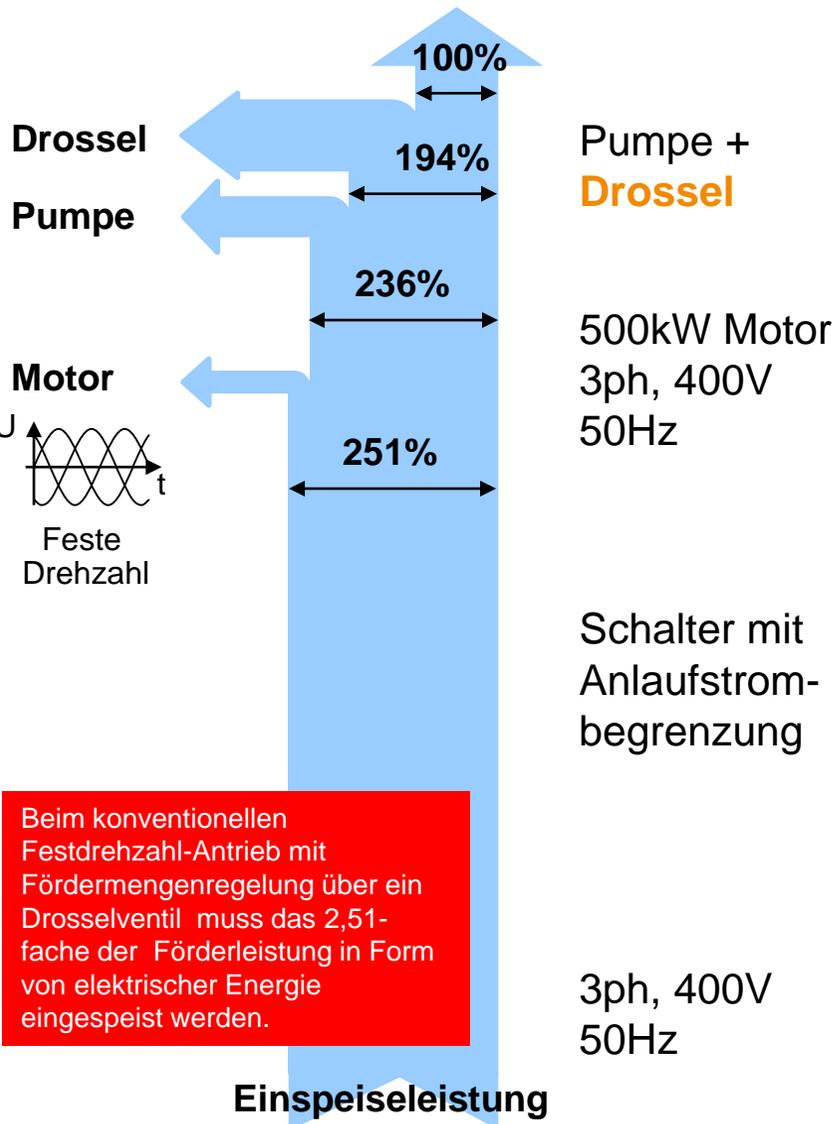
Beispiel: Wasserpumpe	
Leistung	500 kW
Förderstrom	1300 m ³ /h
Wirkungsgrad der Pumpe in Abh. der Fördermenge	20% @ 130 m ³ /h 47% @ 390 m ³ /h 69% @ 650 m ³ /h 82% @ 910 m ³ /h 87% @ 1170 m ³ /h 89% @ 1300 m ³ /h
Betrieb	365 Tage / Jahr 24 h / Tag variable Leistung



Quelle: Siemens

2. Energieeffizienz - Beispiel

Nutzleistung



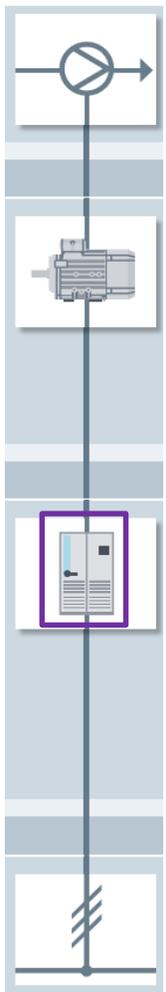
Beim konventionellen Festdrehzahl-Antrieb mit Fördermengenregelung über ein Drosselventil muss das 2,51-fache der Förderleistung in Form von elektrischer Energie eingespeist werden.

Pumpe + Drossel

500kW Motor
3ph, 400V
50Hz

Schalter mit
Anlaufstrom-
begrenzung

3ph, 400V
50Hz



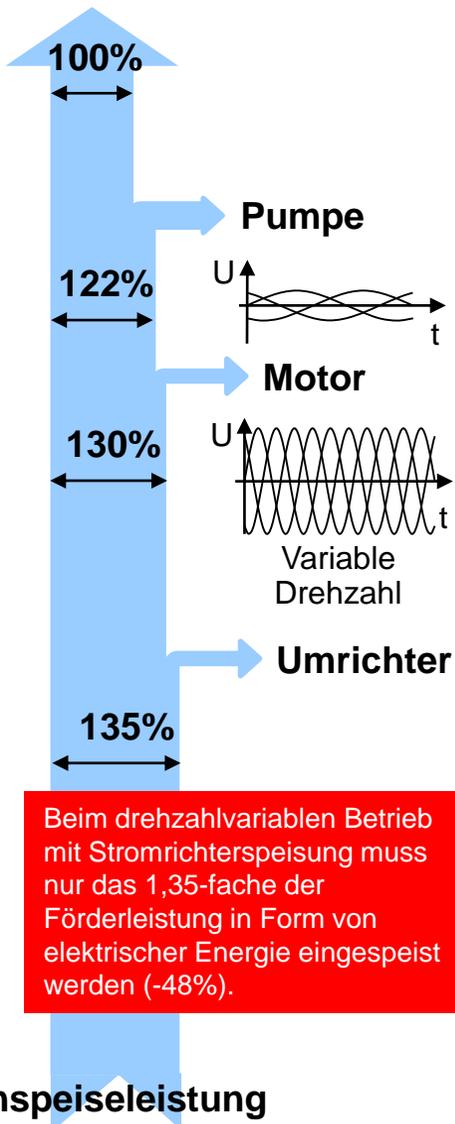
Pumpe

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

Stromrichter
zur drehzahl-
variablen
Speisung des
Motors

3ph, 400V
50Hz

Nutzleistung



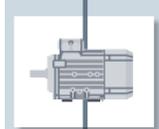
Beim drehzahlvariablen Betrieb mit Stromrichterspeisung muss nur das 1,35-fache der Förderleistung in Form von elektrischer Energie eingespeist werden (-48%).

2. Energieeffizienz - Beispiel

Pumpe +
Drossel



500kW Motor
3ph, 400V
50Hz



Schalter mit
Anlaufstrom-
begrenzung

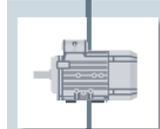


3ph, 400V
50Hz



Pumpe

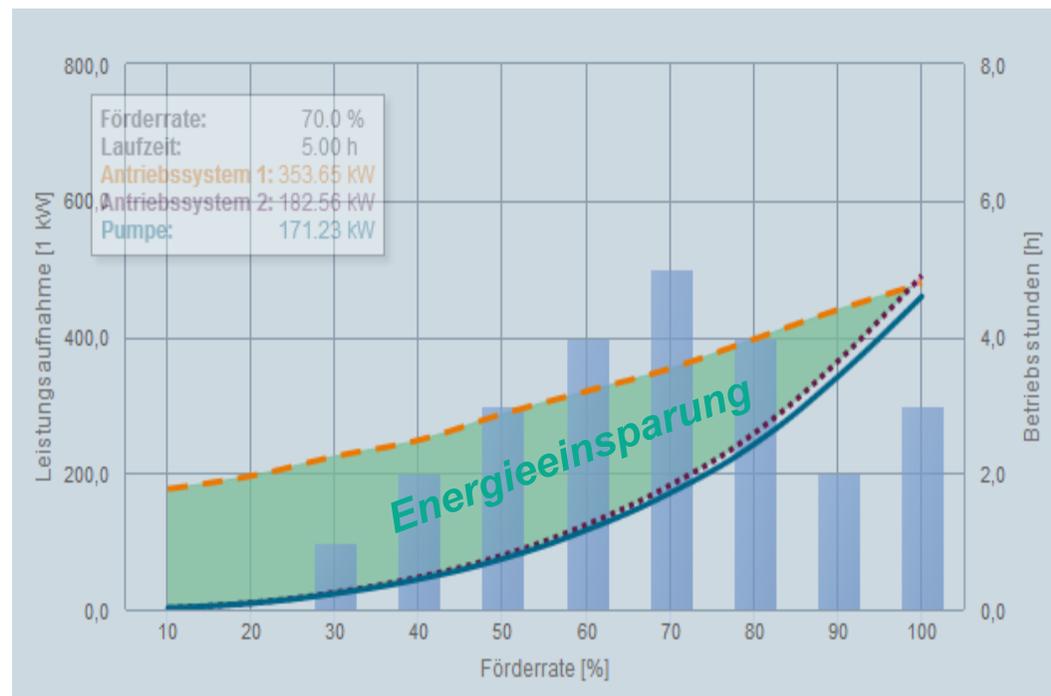
500kW Motor
3ph, **0..400V**
0..50Hz



Stromrichter
zur **drehzahl-**
variablen
Speisung des
Motors



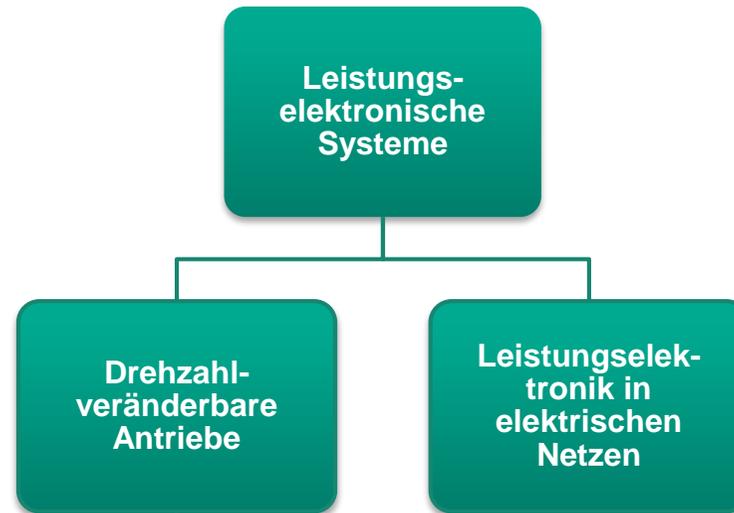
3ph, 400V
50Hz



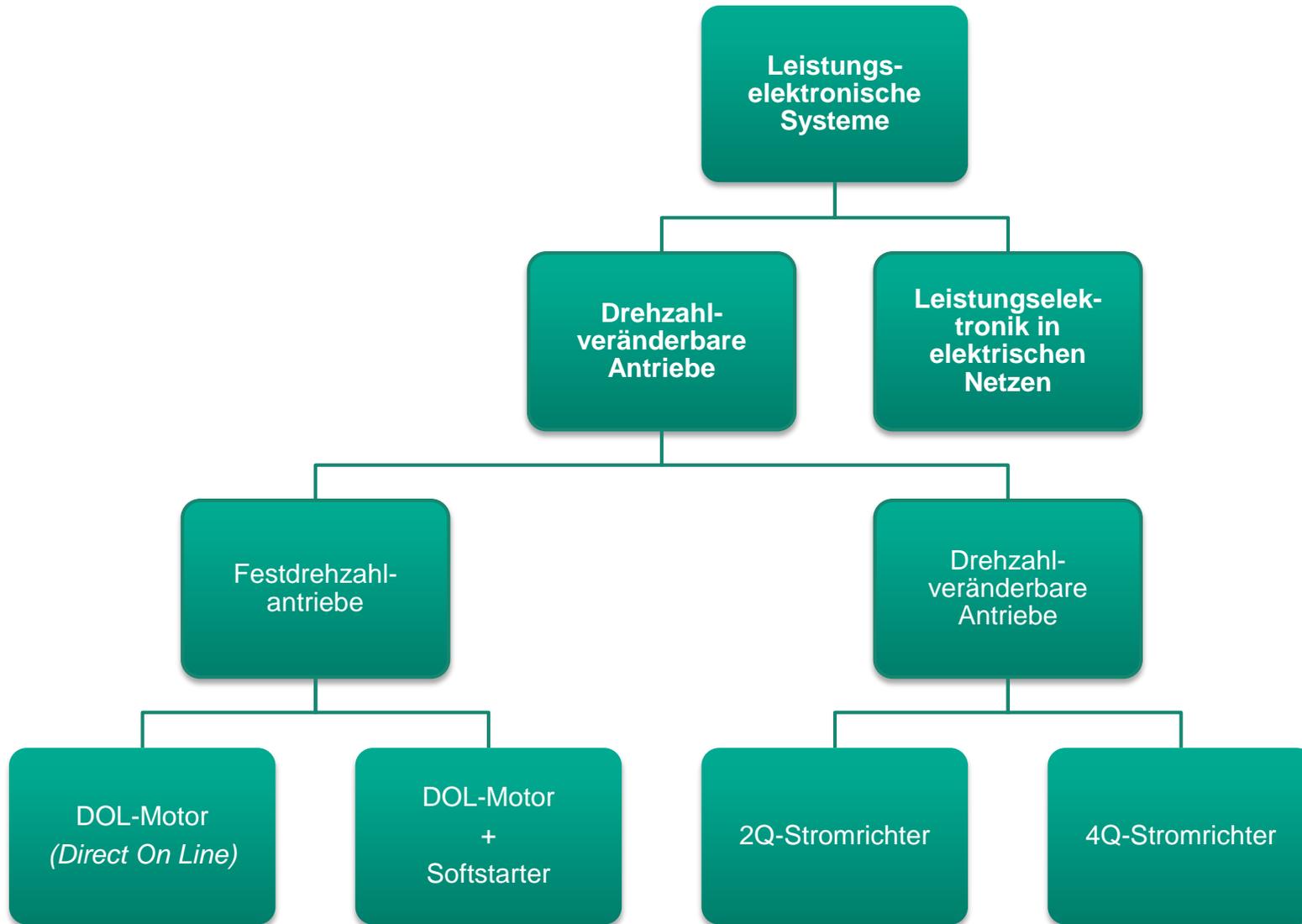
- **Drossel:** 3,1 Mio kWh / Jahr
- **Stromrichter:** 1,8 Mio kWh / Jahr
- **Einsparung:** **1,3 Mio. kWh / Jahr**
814 t CO₂ / Jahr
- **Amortisationszeit: ca. 2 Monate**
- Die Energiebilanz einer mit konstanter Drehzahl betriebenen Pumpe wird immer ungünstiger, je kleiner die benötigte Fördermenge ist.

Quelle: Siemens

3. Anwendungen

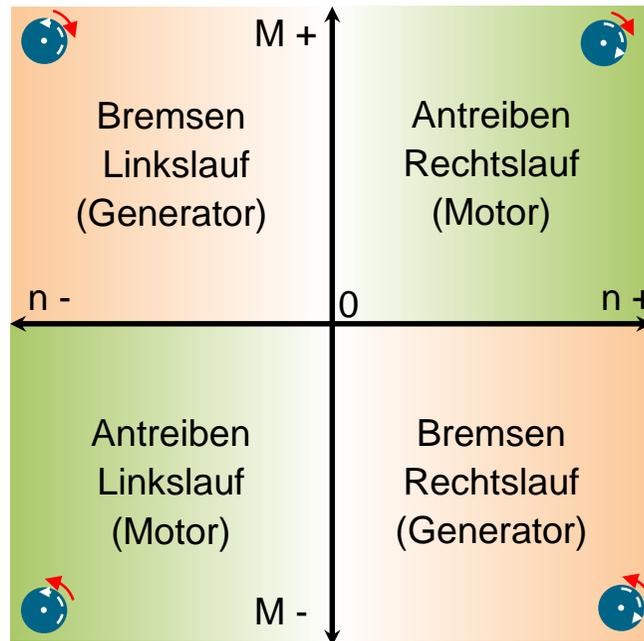


3. Anwendungen



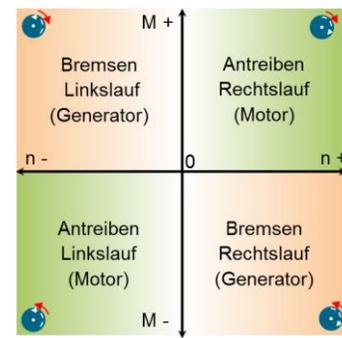
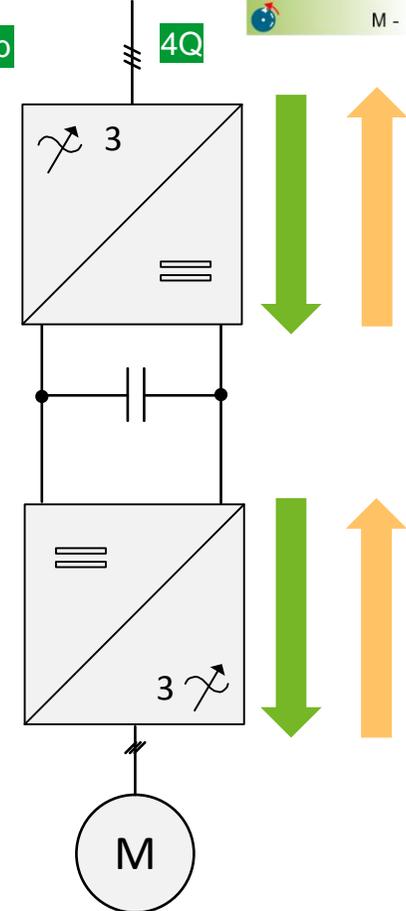
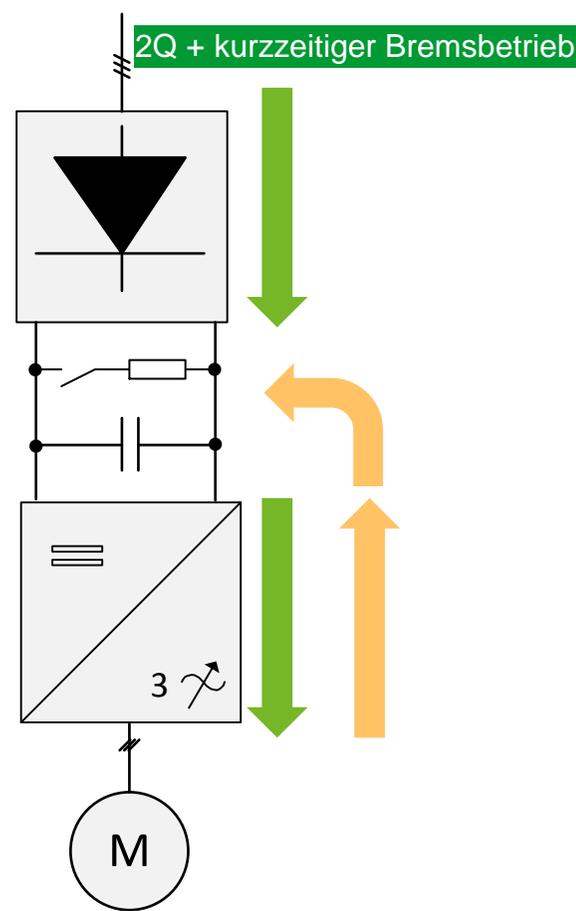
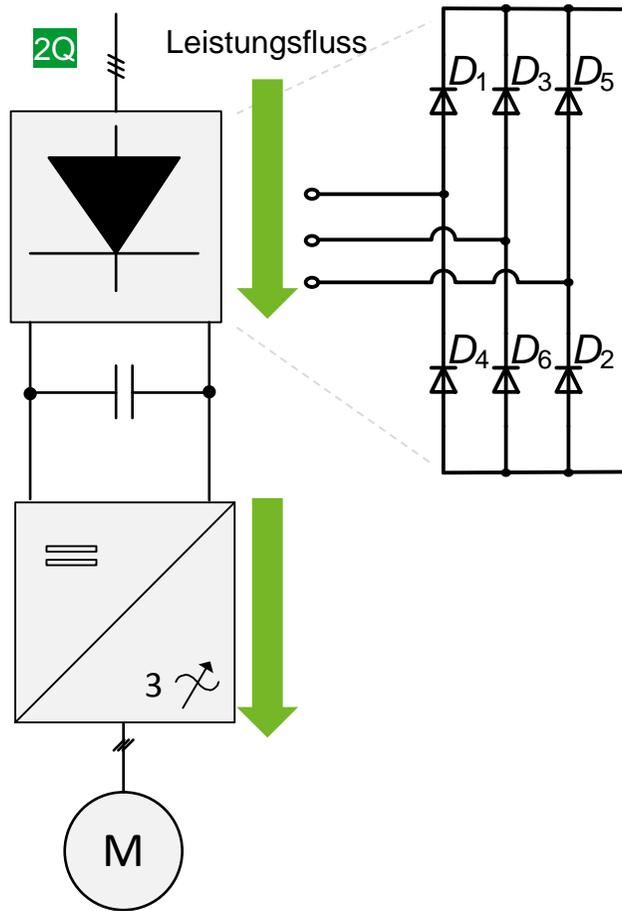
Stromrichter-gespeiste Antriebe - Anwendungen

■ Definition der Quadranten



Stromrichter-gespeiste Antriebe

■ Stromrichter-gespeiste Antriebe – Leistungsfluss



3. Anwendungen – Stromrichter-gespeiste Antriebe



Verdichten
Pumpen
Lüften

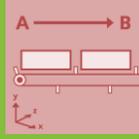
Verdichter



Pumpe



Lüfter



Bewegen

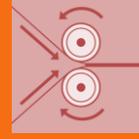
Förderbänder



Querschneider

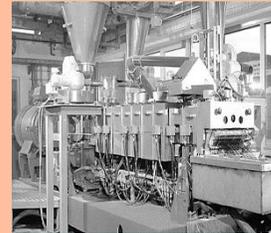


Containerkräne



Verarbeiten

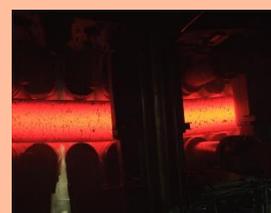
Extruder



Mühlen



Walzwerke



Bearbeiten

Werkzeugmaschine



Fräsen

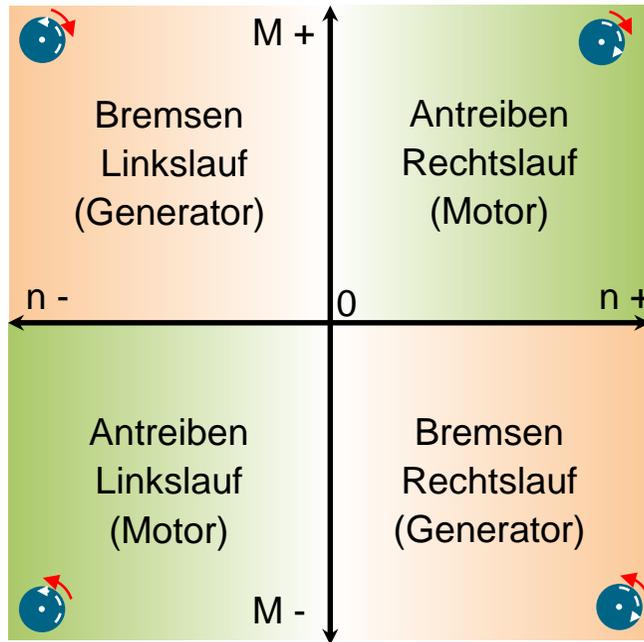


Robotics

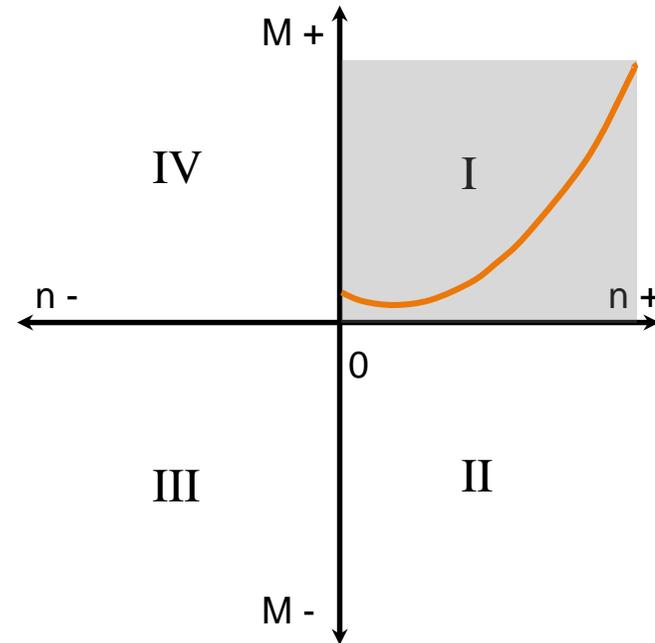


Quelle: Siemens

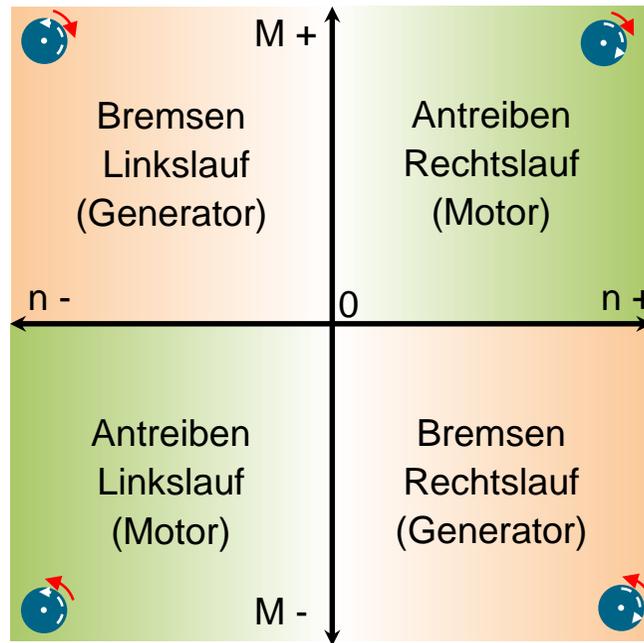
3. Anwendungen – Stromrichter gespeiste Antriebe



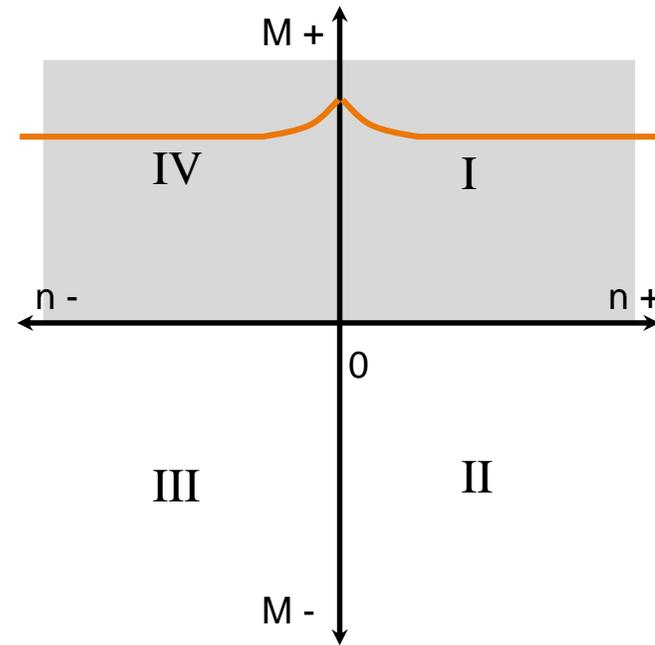
Pumpe, Lüfter, Verdichter



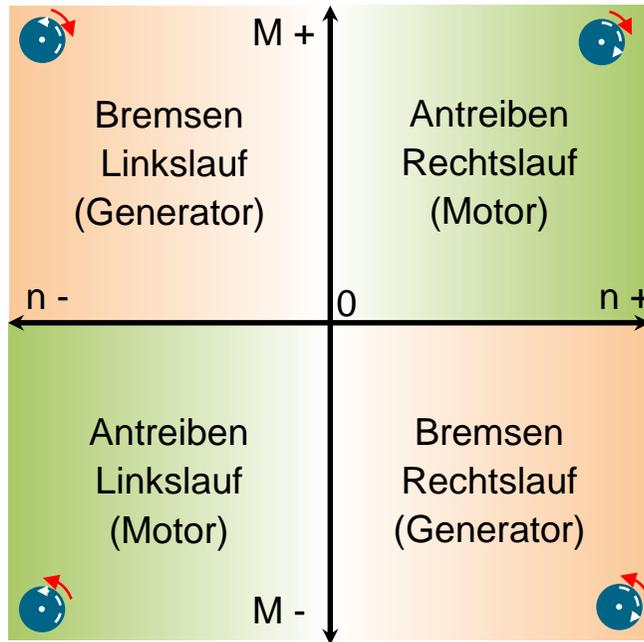
3. Anwendungen – Stromrichter gespeiste Antriebe



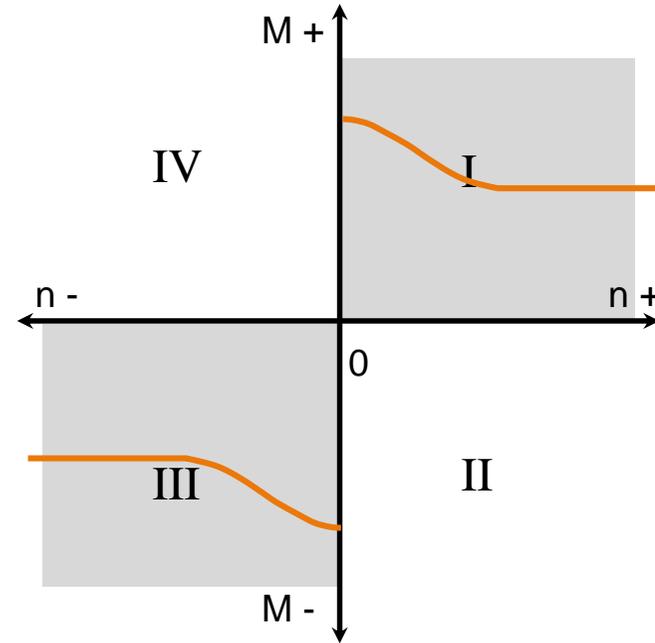
Hubantriebe



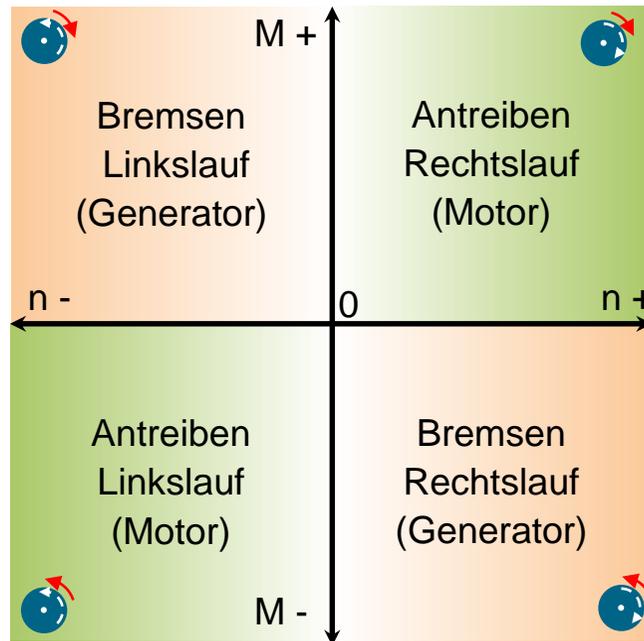
3. Anwendungen – Stromrichter gespeiste Antriebe



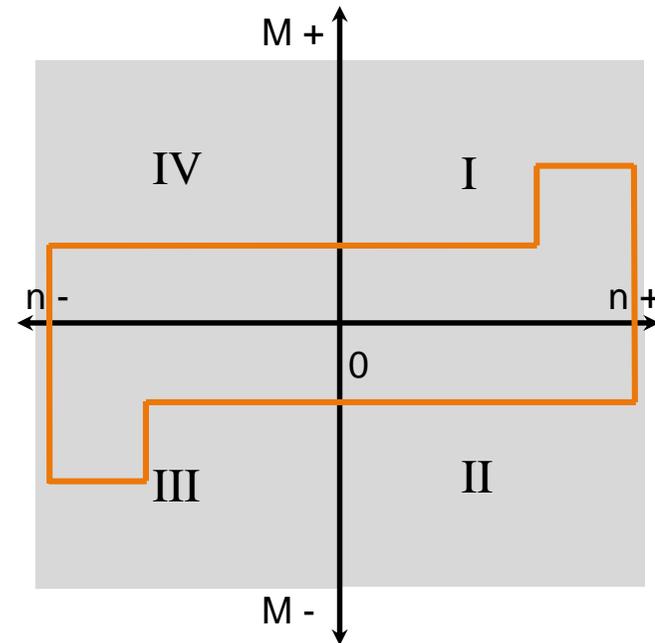
Vorschubantrieb



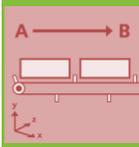
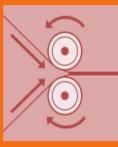
3. Anwendungen – Stromrichter gespeiste Antriebe



Walzstraße

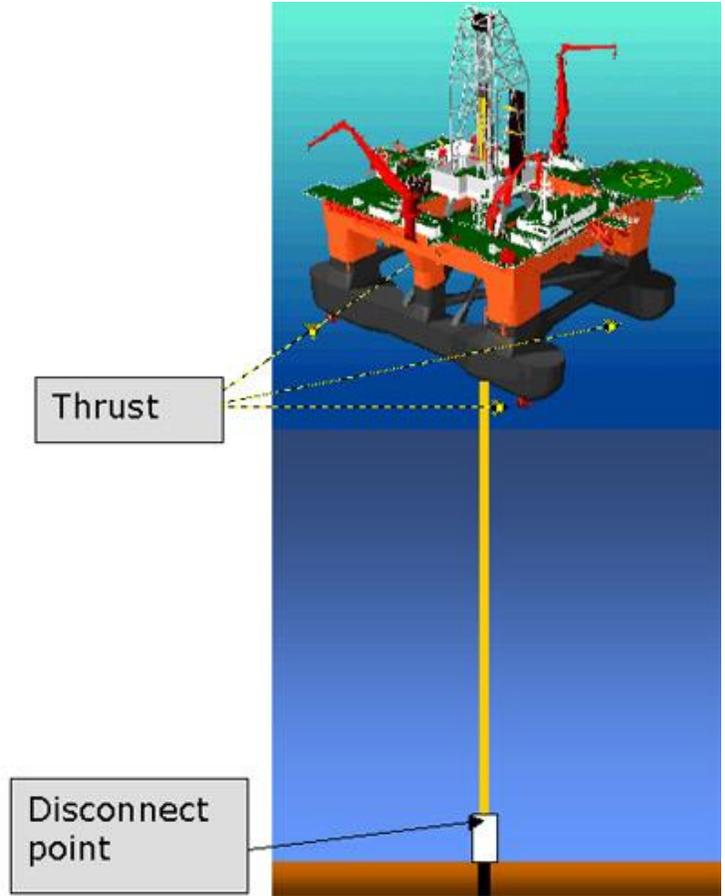


3. Anwendungen – Stromrichterergespeiste Antriebe

Güte*		Verwendung		Verdichten Pumpen Lüften		Bewegen		Verarbeiten		Bearbeiten	
											
Kontinuierliche Bewegung	Einfach	DOL/LV /MV		LV/MV		LV/MV		LV		LV	
	Mittel										
	Hoch										
Nicht kontinuierliche Bewegung	Einfach	LV/MV		LV		LV/MV		LV		LV	
	Mittel										
	Hoch										

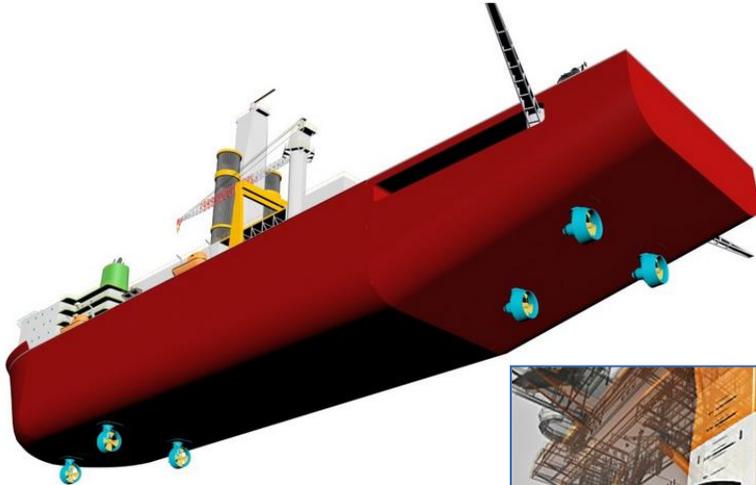
* Anforderungen an Drehmomentgenauigkeit/Drehzahlgenauigkeit/Positioniergenauigkeit/Achskoordination/Funktionalität

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



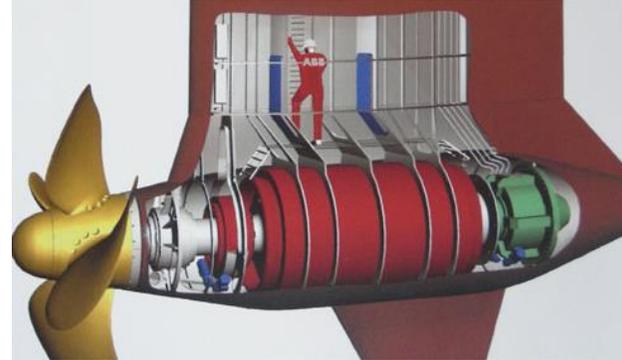
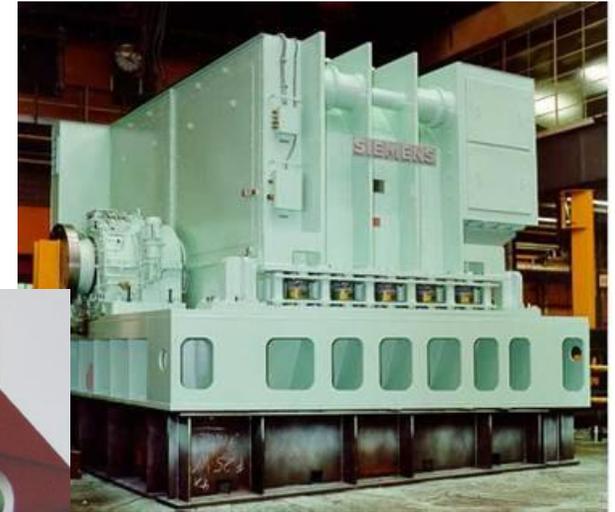
- 6-8 wassergekühlte drehzahlveränderliche Antriebe
 - Motornennspannung: $U=4160\text{ V}$
 - Motornennstrom: $I=1000\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=6,3\text{ MW}$; $f=0-70\text{ Hz}$
- Topologie
 - Netzseite: Ungesteuerter Dioden-Gleichrichter (12- bis 24-pulsig)
 - Motorseite: 3-Level Neutral Point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

3. Anwendungen – Antriebe von Kreuzfahrtschiffen



3. Anwendungen – Antriebe von Kreuzfahrtschiffen

- **Dieselektrischer 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: $I=2800\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=12,3\text{ MW}$; $f=0\text{-}20\text{ Hz}$ elektrisch, $0\text{-}150\text{ rpm}$ mechanisch
- Topologie
 - Netz/Motorseite: Stromrichtermotor (Load Commutated Inverter, LCI) mit $5,2\text{ kV-}$ bis 8 kV- Thyristoren

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



Gasverflüssigungsanlage Hammerfest (Norwegen)

2x63MW, 4x32MW, 2x16MW

3. Anwendungen – Gasspeicherung

Gasinjectie (zomer)

Het aardgas dat wordt geïnjecteerd komt via een ondergrondse pijpleiding in de gasopslag. Het heeft daar een druk van ongeveer 65 bar. Om het aardgas de druk te geven die nodig is voor injectie (tot 330 bar) wordt een compressor gebruikt.

Putmond

Via deze put wordt zomers aardgas geïnjecteerd en in de winter aardgas geproduceerd.

Compressor

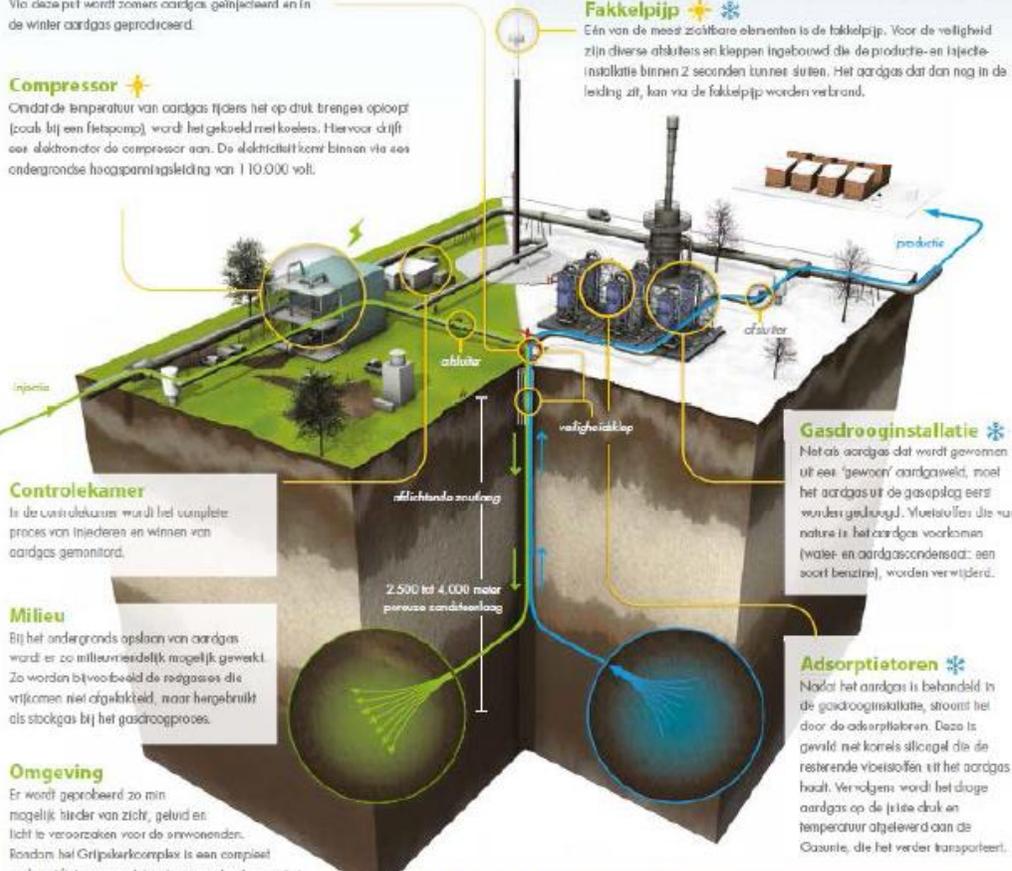
Omdat de temperatuur van aardgas tijdens het op druk brengen omlaag (zoals bij een fietspomp) wordt het gekoeld met koelers. Hiervoor drijft een elektromotor de compressor aan. De elektriciteit komt binnen via een ondergrondse hoogspanningsleiding van 110.000 volt.

Aardgaswinning (winter)

Als de temperatuur tussen de 2,0 en 3,5 graden Celsius ligt, verstoren huishoudens in Nederland 80 miljoen m³ aardgas per dag. Bij lagere temperaturen schiet de gaswinning verder omhoog. Om aan die vraag te voldoen, wordt het aardgas dat in de zomer is geïnjecteerd, opnieuw geproduceerd.

Fakkelpijp

Eén van de meest zichtbare elementen is de fakkelpijp. Voor de veiligheid zijn diverse afsluiters en knoppen ingebouwd die de productie- en injectie-installatie binnen 2 seconden kunnen sluiten. Het aardgas dat dan nog in de leiding zit, kan via de fakkelpijp worden verbrand.



Controlekamer
In de controlekamer wordt het complete proces van injecteren en winnen van aardgas gemonitord.

Milieu
Bij het ondergronds opslaan van aardgas wordt er zo milieuvriendelijk mogelijk gewerkt. Zo worden bijvoorbeeld de restgassen die vrijkomen niet afgeblazen, maar hergebruikt als stookgas bij het gasdroogproces.

Omgeving
Er wordt geprobeerd zo min mogelijk hinder van zicht, geluid en licht te veroorzaken voor de omwonenden. Rondom het Grijpskerkecomplex is een compleet park met fiets- en wandelpaden aangelegd en op het Italiaanse terrein van Langelo een 'wilkpad', zodat dieren zich zonder problemen kunnen verplaatsen.

Gasdrooginstallatie
Net als aardgas dat wordt gewonnen uit een 'gewoon' aardgasveld, moet het aardgas uit de gasopslag eerst worden gedroogd. Voetsulfide uit de natuur is het aardgas voorkomen (water- en aardgascondensaat: een soort benzine), worden verwijderd.

Adsorptietoren
Naar het aardgas is behandeld in de gasdrooginstallatie, stroomt het door de adsorptietoren. Deze is gevuld met korrels silicagel die de resterende voetsulfide uit het aardgas haalt. Vervolgens wordt het droge aardgas op de juiste druk en temperatuur afgeleverd aan de Gasunie, die het verder transporteert.

Cijfers en feiten

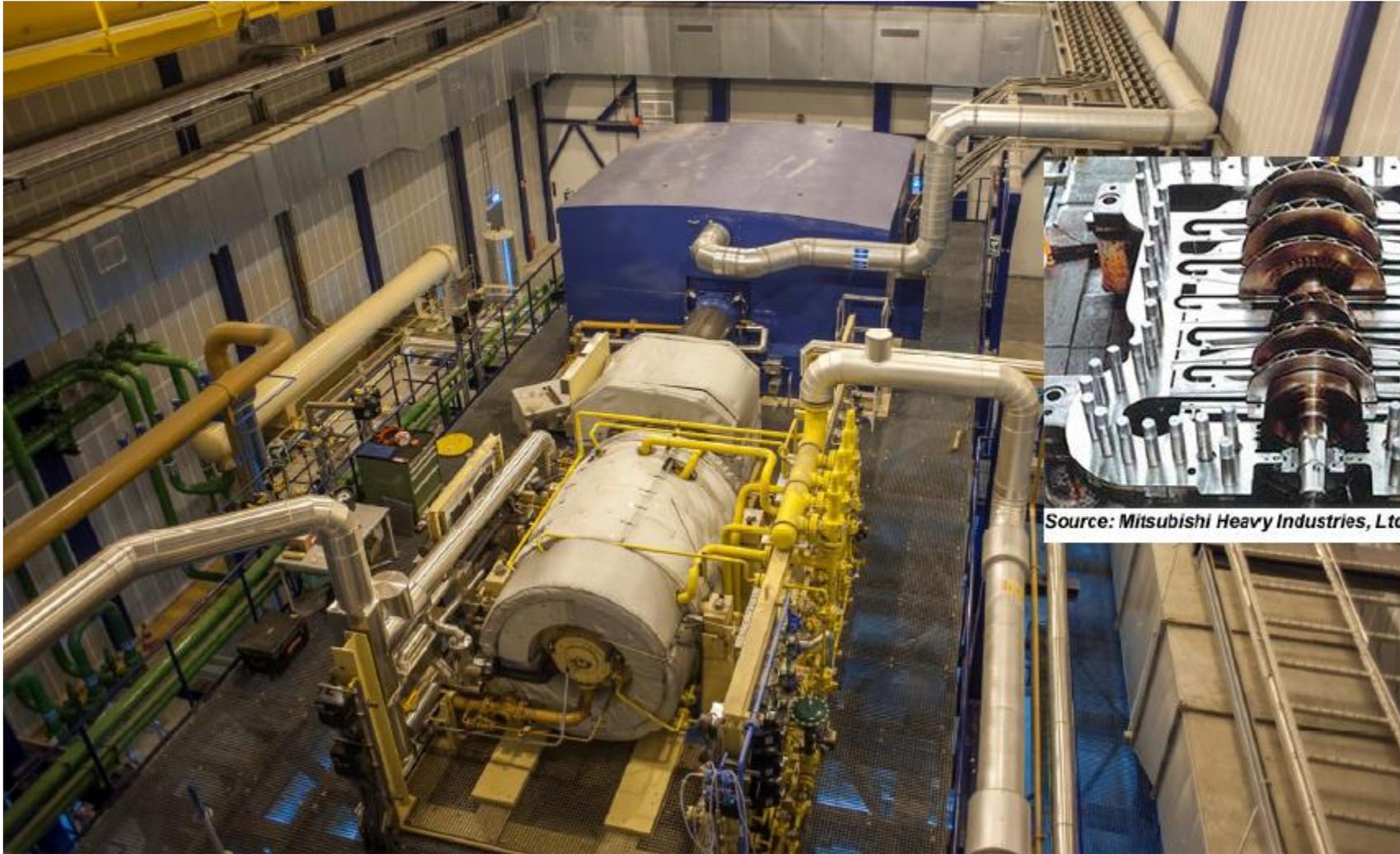
Oorspronkelijke druk gasvelden: 300 bar	Aantal putten Grijpskerke: 10
Soort gas Grijpskerke: hoogcalorisch (naturaal)	Aantal putten Langelo: 6
Soort gas Langelo: laagcalorisch (huishoudens)	Bouwjaar beide locaties: 1997



www.nam.nl
 Versie: mei 2011
 Schematische weergave, illustratie niet op schaal

Gaskompressoren NAM Nederlande:
 z.B. 3x40MW pro Station

3. Anwendungen – Gasspeicherung



Source: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

3. Anwendungen – Gasspeicherung

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

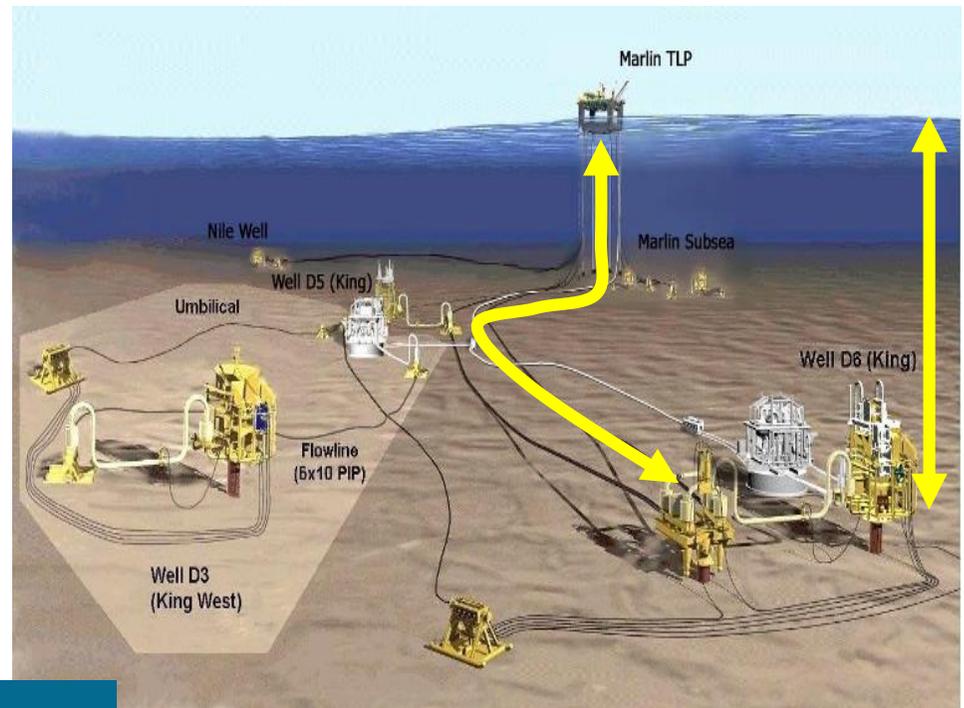


- 3 wassergekühlte drehzahlveränderliche Antriebe
 - Motornennspannung: $U=7200\text{ V}$
 - Motornennstrom: $I=3300\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=23\text{-}40\text{ MW}$; $f=0\text{-}105\text{ Hz}$ elektrisch, $0\text{-}5200\text{ rpm}$ mechanisch
 - Magnetlager
- Topologie
 - Netz/Motorseite: Stromrichtermotor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

Quelle: Siemens

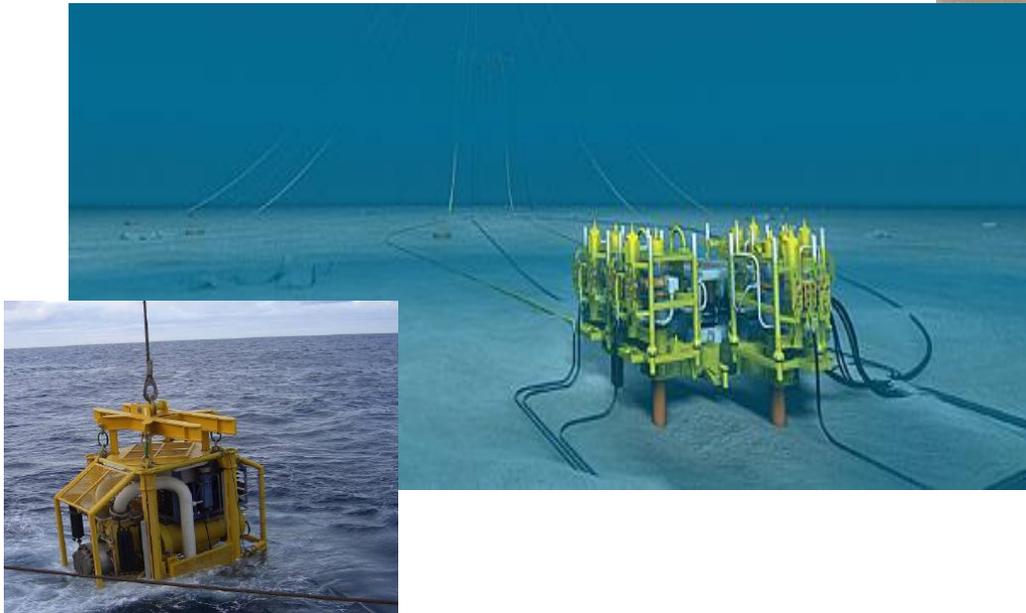
3. Anwendungen – Subsea-Pumpen

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

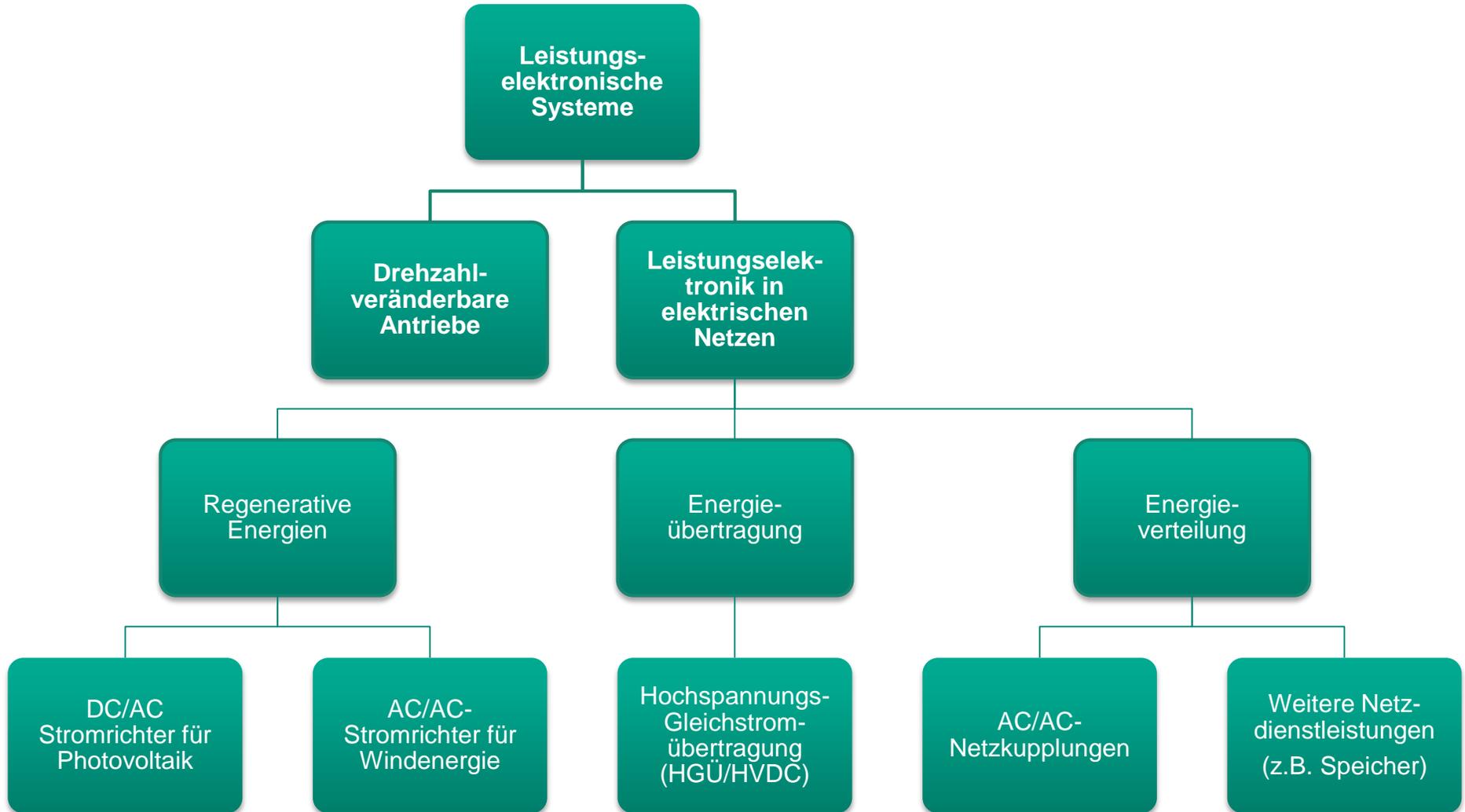


- 24 luftgekühlte drehzahlveränderliche Antriebe
 - Motornennspannung: $U=6600\text{ V}$
 - Motornennstrom: $I=90\text{ A}$
 - $P_{\text{nenn}}=800\text{ kW}$; $f=0\text{-}60\text{ Hz}$ elektrisch, $0\text{-}3600\text{ rpm}$ mechanisch
 - Bis zu 29 km Kabelstrecke
- Topologie
 - Netz/Motorseite: 11-Level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

Quelle: Siemens



3. Anwendungen – Netzstromrichter

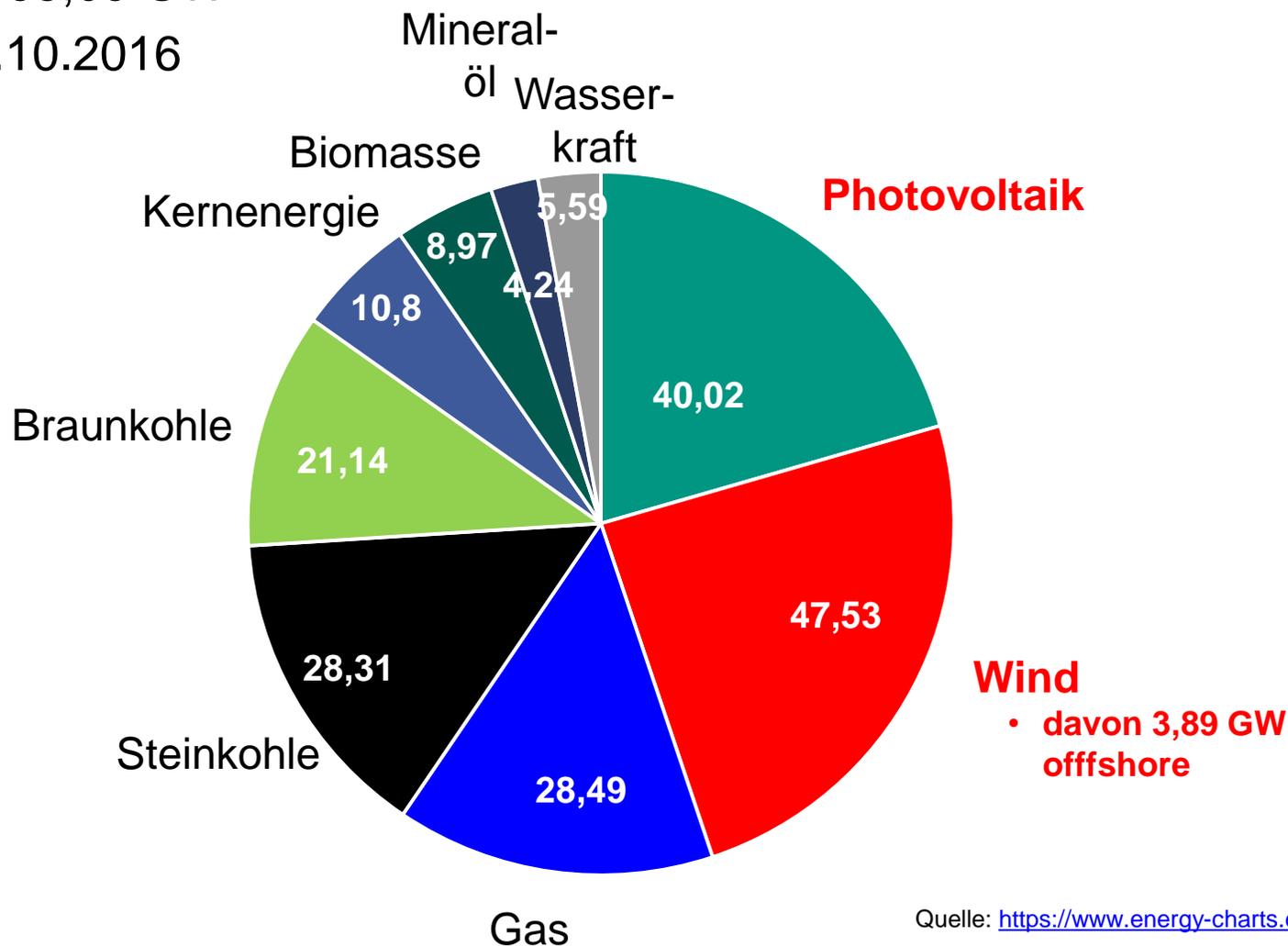


3. Anwendungen – Netzstromrichter

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

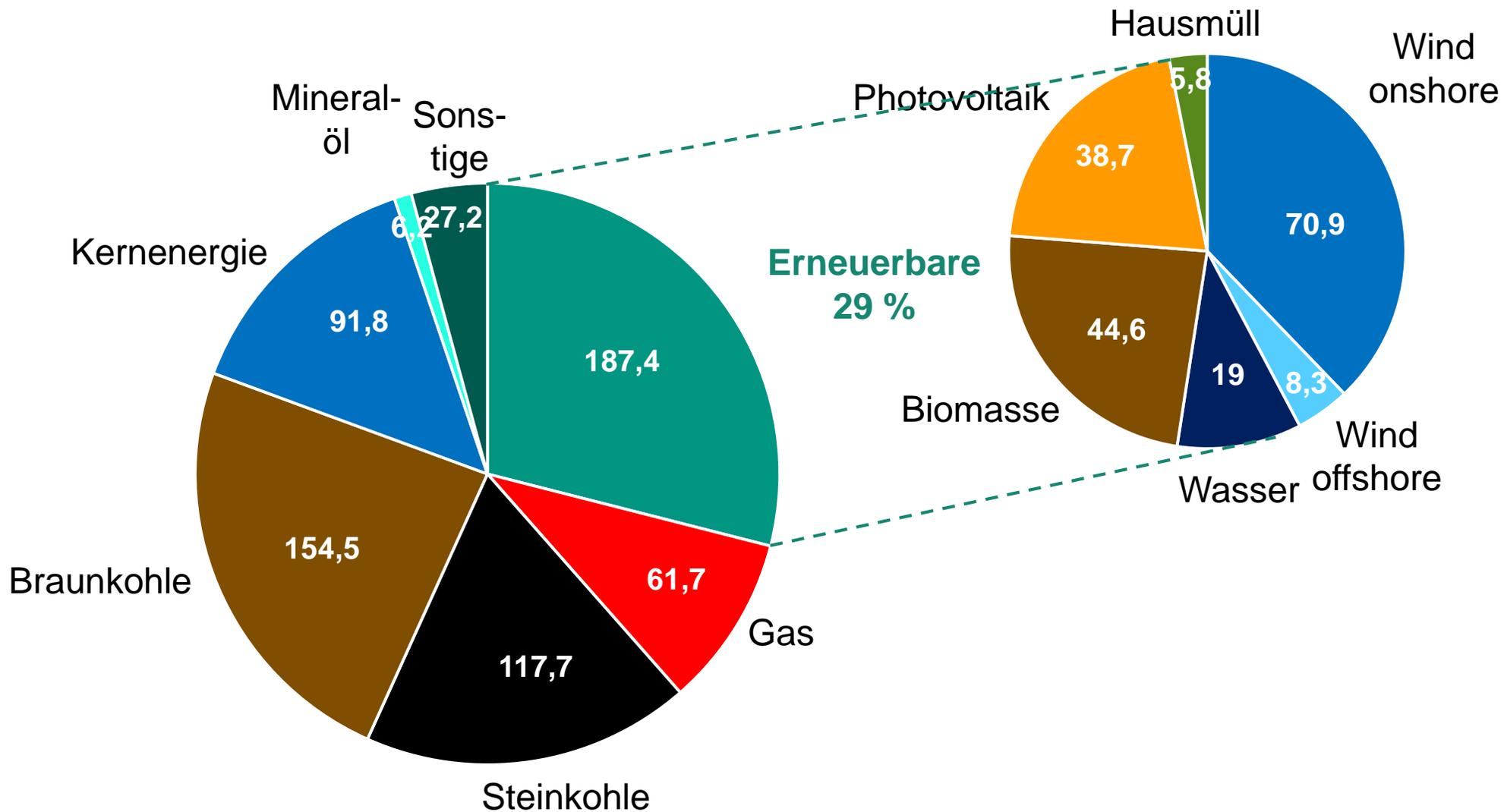
■ Gesamt: 195,09 GW

■ Stand: 04.10.2016



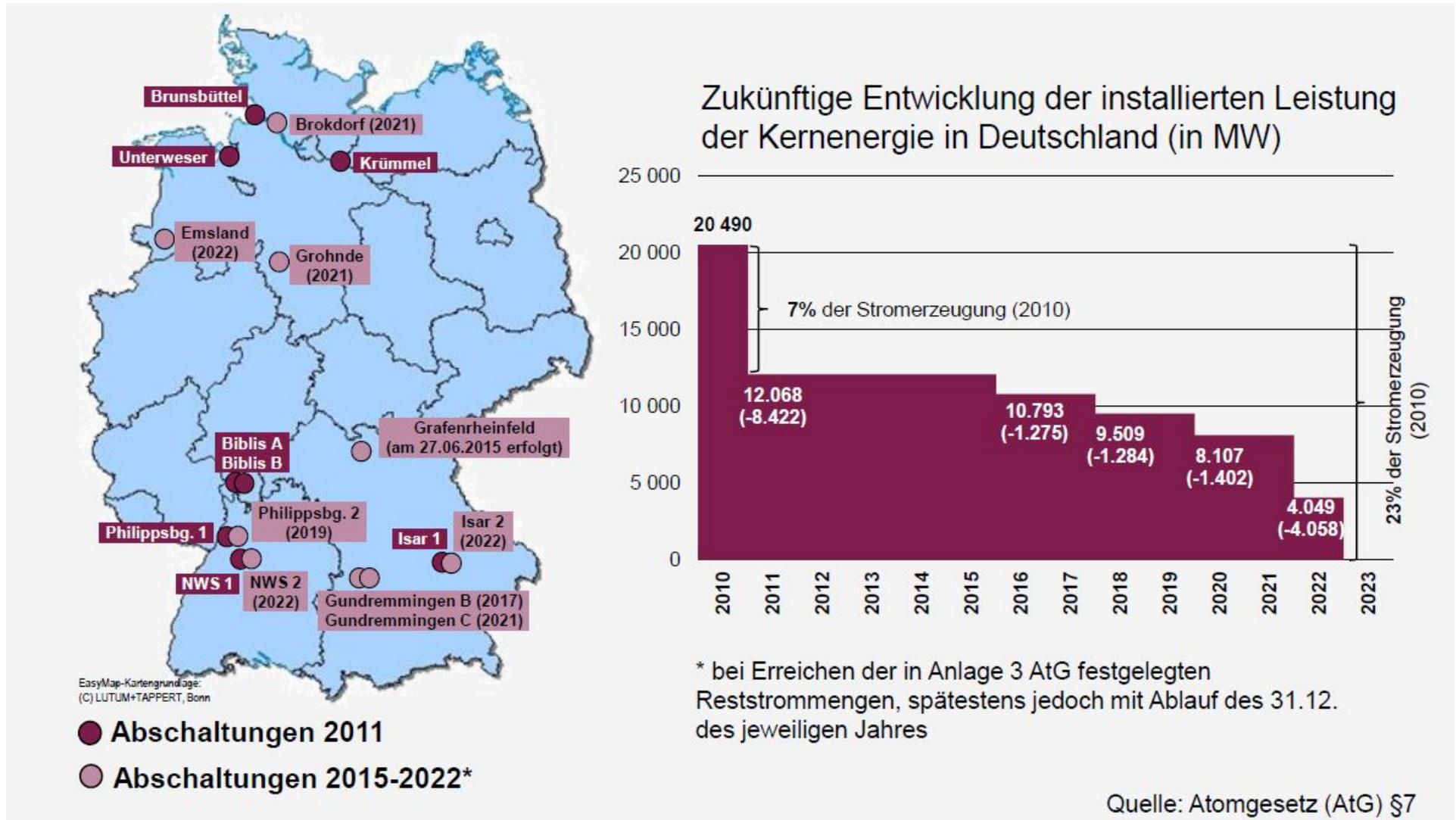
3. Anwendungen – Netzstromrichter

Bruttostromerzeugung in Deutschland 2015 (total: 646,5 TWh)



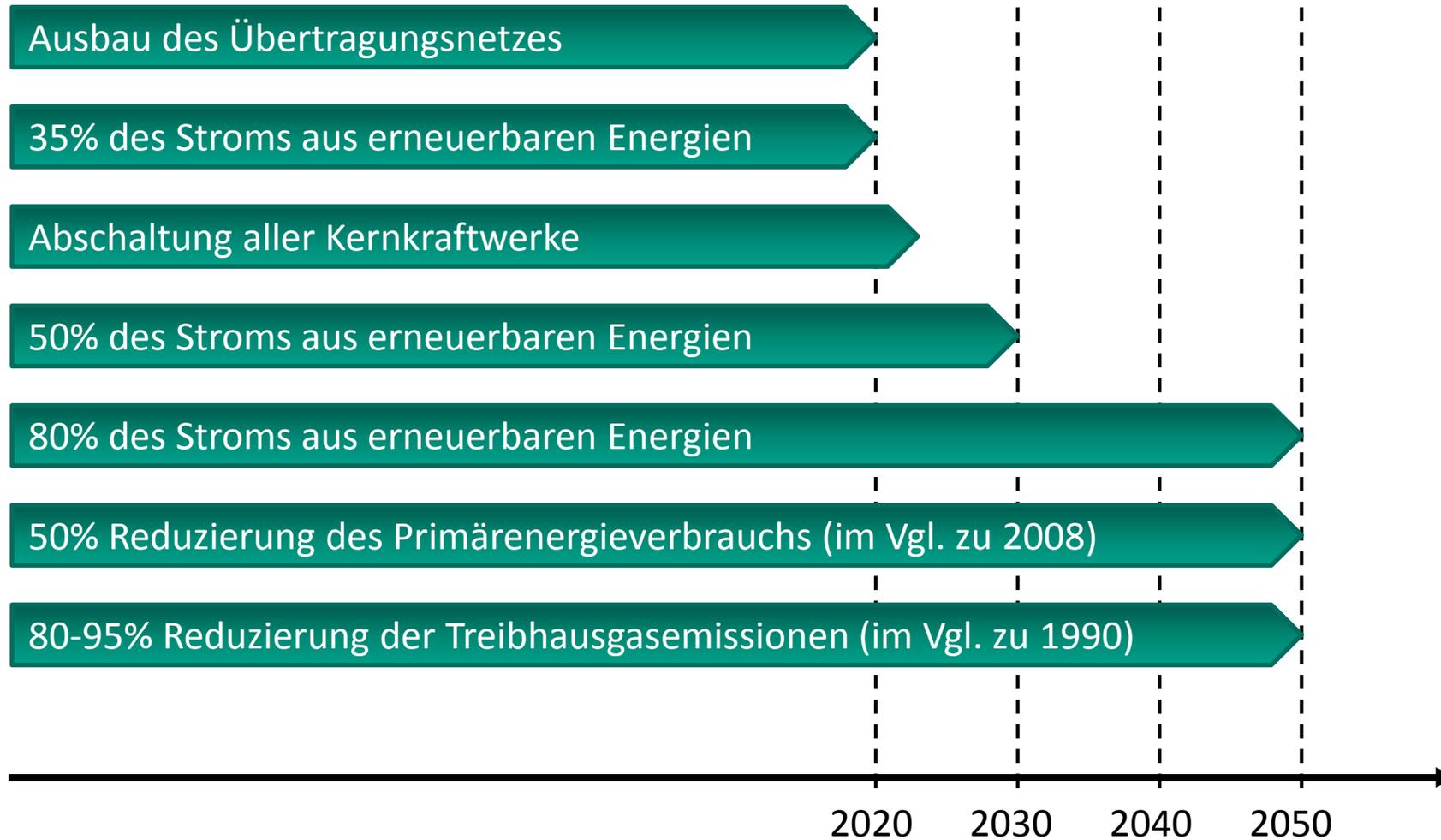
Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de/28-0-Zusatzinformationen.html>

3. Anwendungen – Netzstromrichter Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022



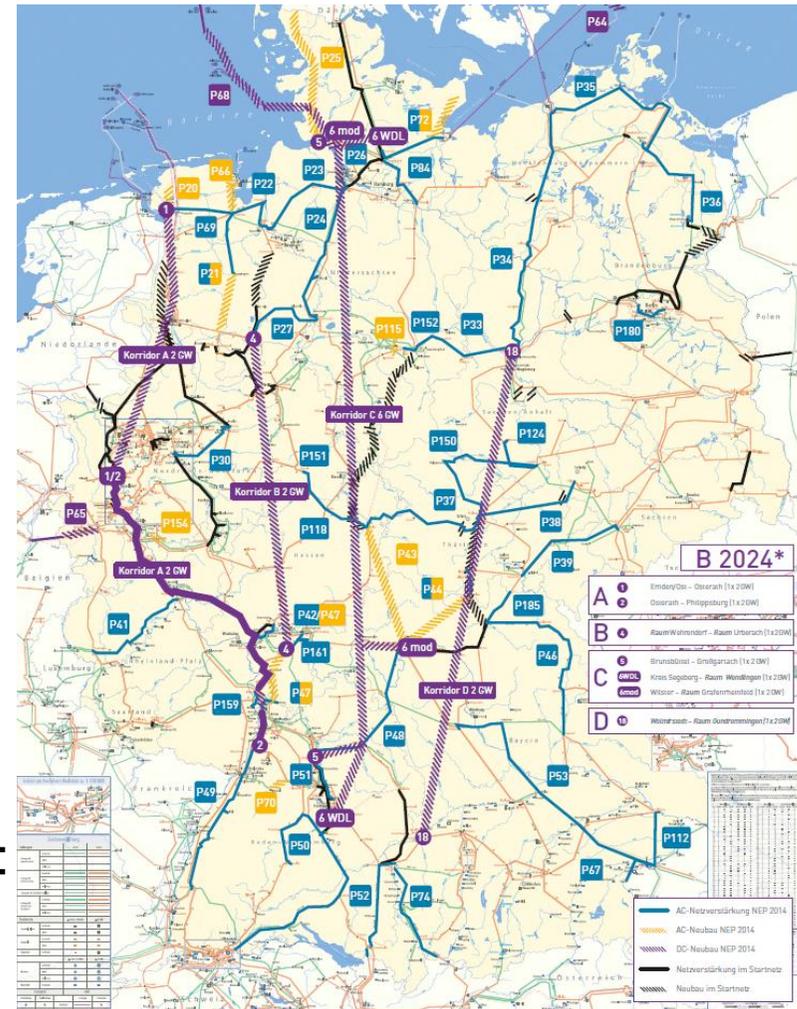
Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de/28-0-Zusatzinformationen.html>

3. Anwendungen – Ziele der Energiewende



3. Anwendungen – Hochspannungs-Gleichstromübertragung

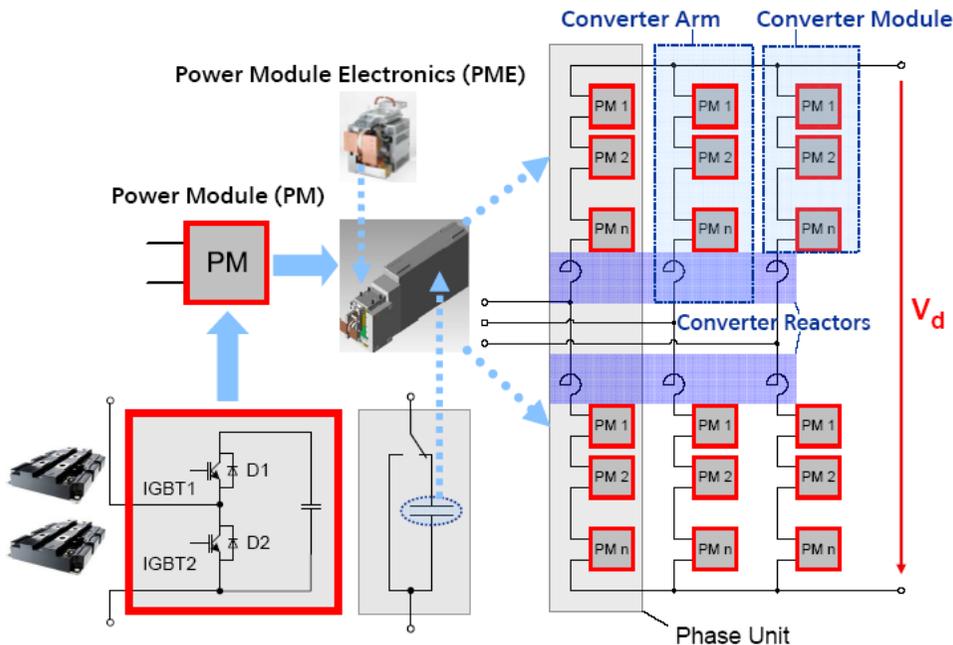
- Notwendiger Aus- und Umbau des Übertragungsnetzes
 - Nachhaltige Sicherstellung der Versorgungssicherheit (15min / Jahr)
 - Integration Erneuerbarer Energien
 - Weiterentwicklung des europäischen Energiemarkts
- Bis zu 4 Korridore für **Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)**
Trassenlänge: 2.100km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



- 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: $U=6,6$ kV
 - AC-Nennstrom: $I=1050$ A
 - $P_{\text{nenn}}=12$ MVA
- Topologie
 - Stadtnetz: Diodengleichrichter
 - Bordnetz: Modular Multilevel Converter (MMC) mit 72 Zellen pro Stromrichter (mit 1,7kV-IGBTs)

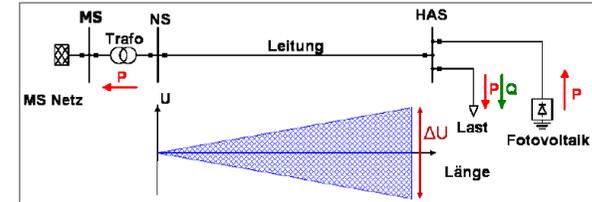
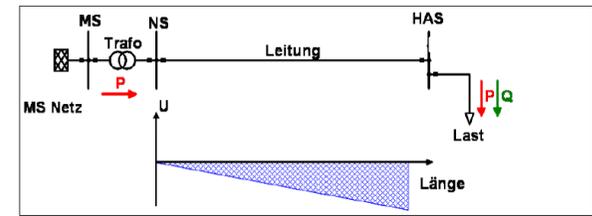
Quelle: Siemens

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

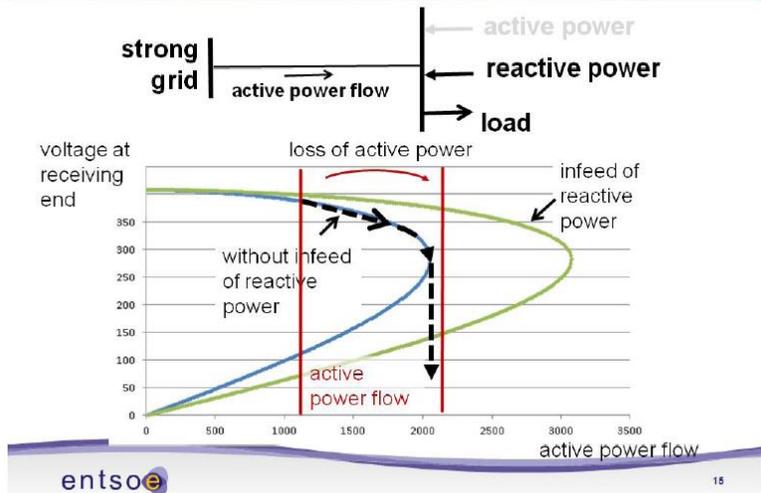


Quelle: TU München, Prof. Witzmann

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

The Nose Curve of Transmission Corridor

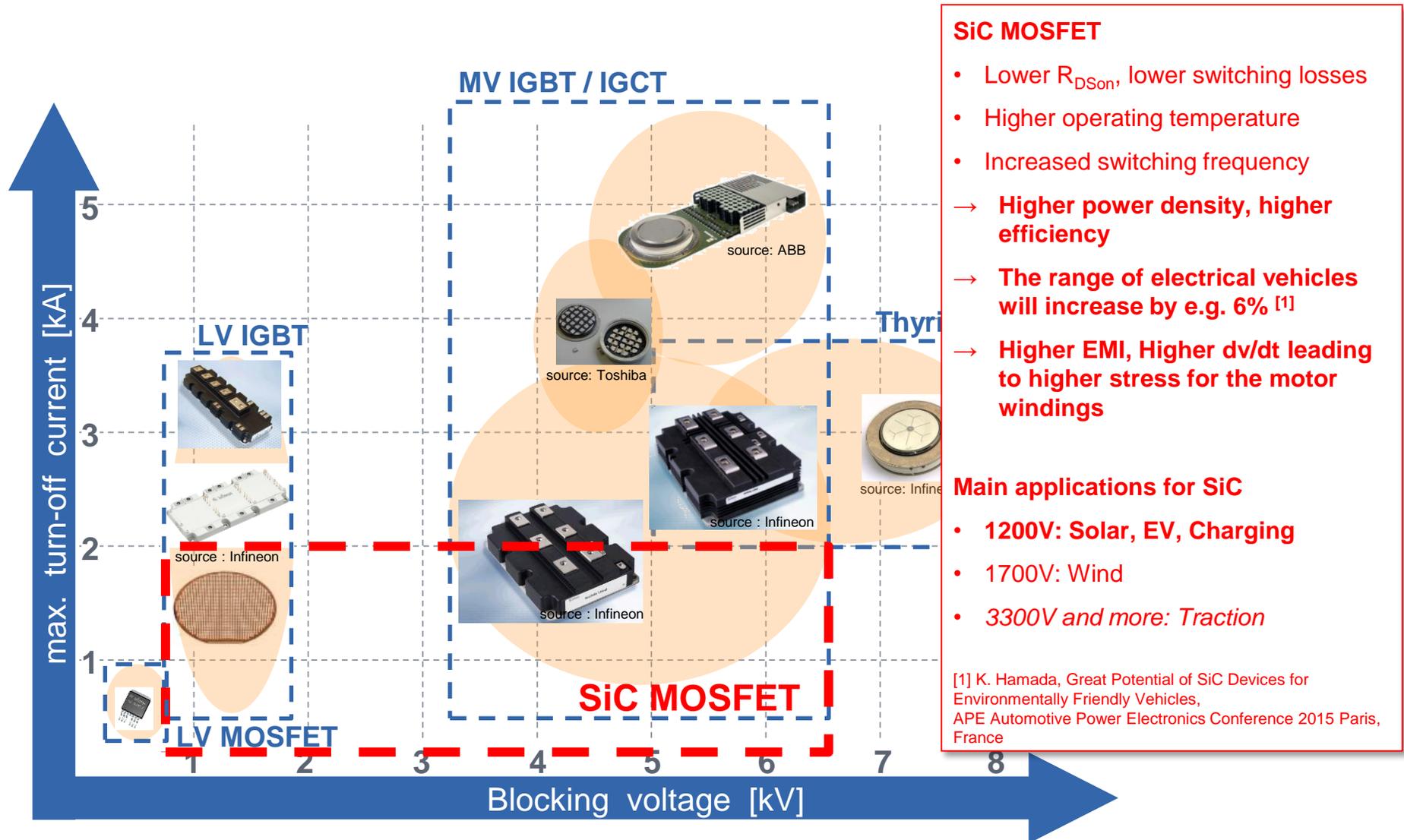


Quelle: Dr. Grebe, Amprion bei ENTSO-E Workshop Emergency Defence Plan 19.3.2012

4. Leistungshalbleiter - Übersicht

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



SiC MOSFET

- Lower $R_{DS(on)}$, 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

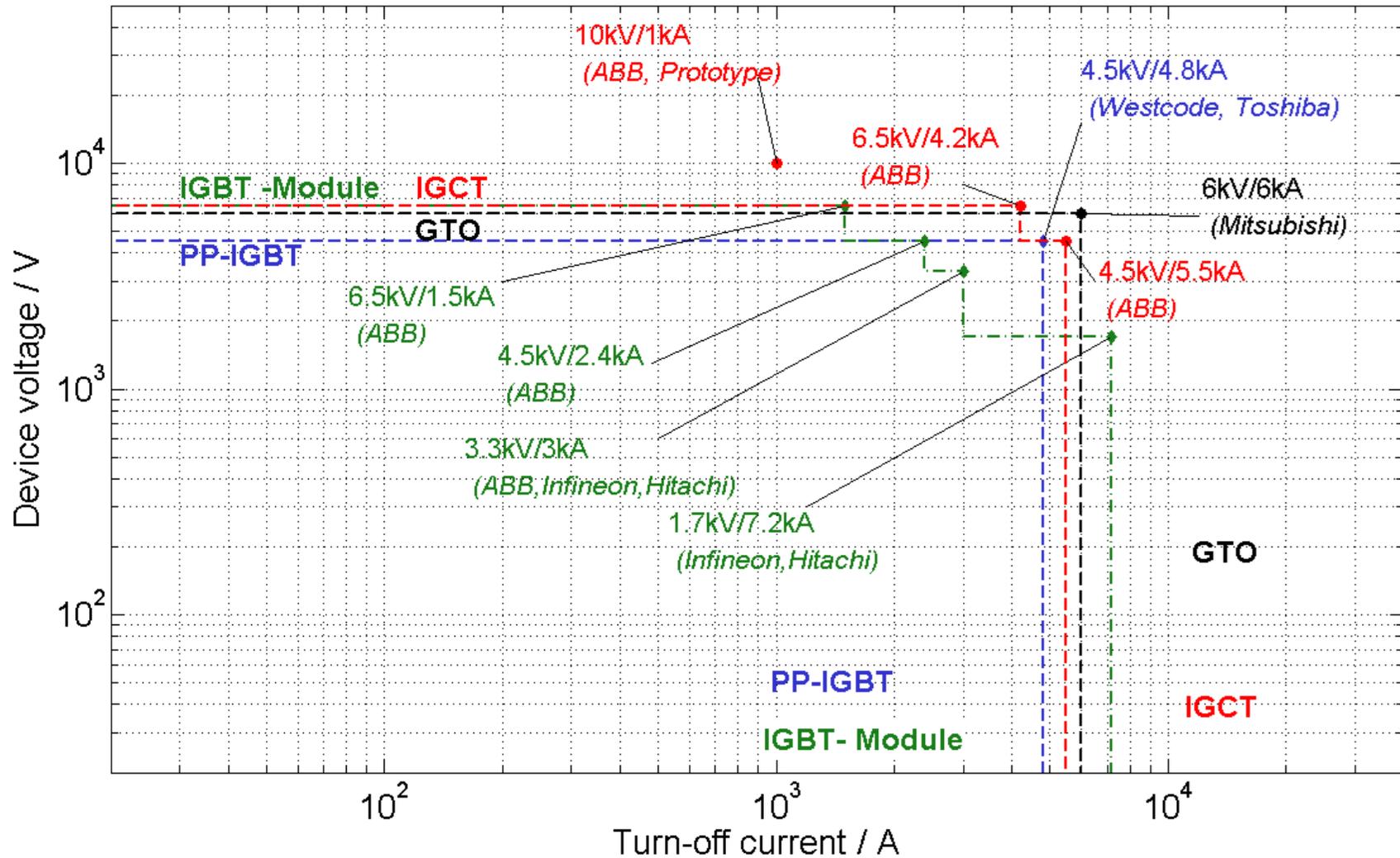
4. Leistungshalbleiter - Übersicht

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)

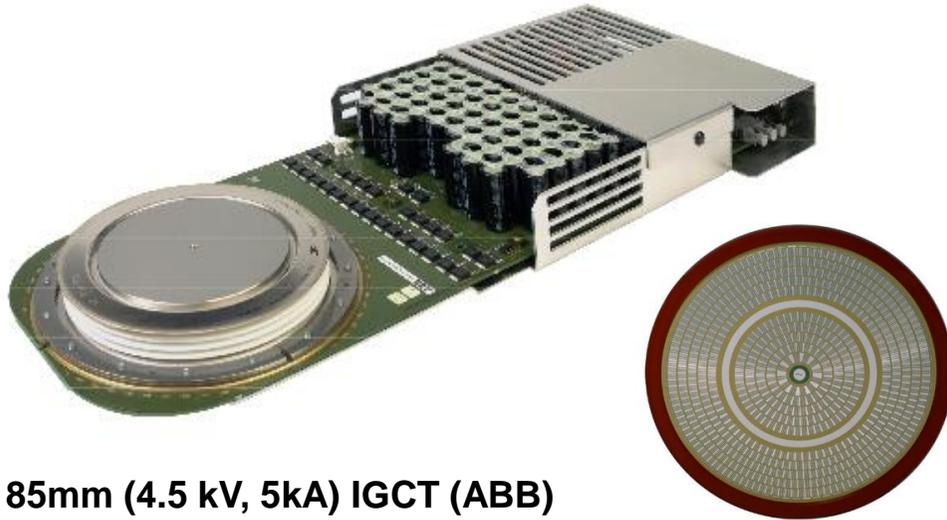
* Source: IHS Power Semiconductor Studies, 2006-2015

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

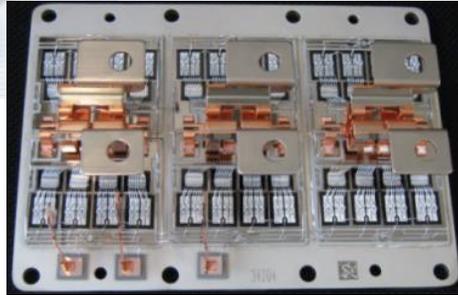
Perspektive

- 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
(Infineon)**



**(3.3 kV, 1500 A) IGBT
Module (Infineon)**

- 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 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
6. Modulbauform:
 - Explosion des Gehäuses in (seltenen) Fehlerfällen
 - Einfacher Aufbau auf Kühlplatte
 - Beschränkte Lastwechselfestigkeit (angepasst an die Applikation)

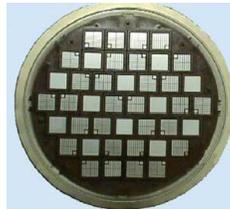
Perspektiven

- 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, Bahnnetz Kupplungen 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

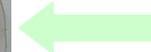
- Stetige Weiterentwicklung der Chips (Verlustreduzierung, Erhöhung der Stromdichte)
- Verbesserung des Gehäuses möglich, aber teuer
- Spezialanwendungen → Begrenzter “Market pull”

4. Leistungshalbleiter – Thyristoren

**Thyristor
Scheibenzelle**
1 Pellet



IGBT Modul
24 IGBT-Chips
12 Dioden-Chips



PPI (125mm)
48 IGBT-Chips

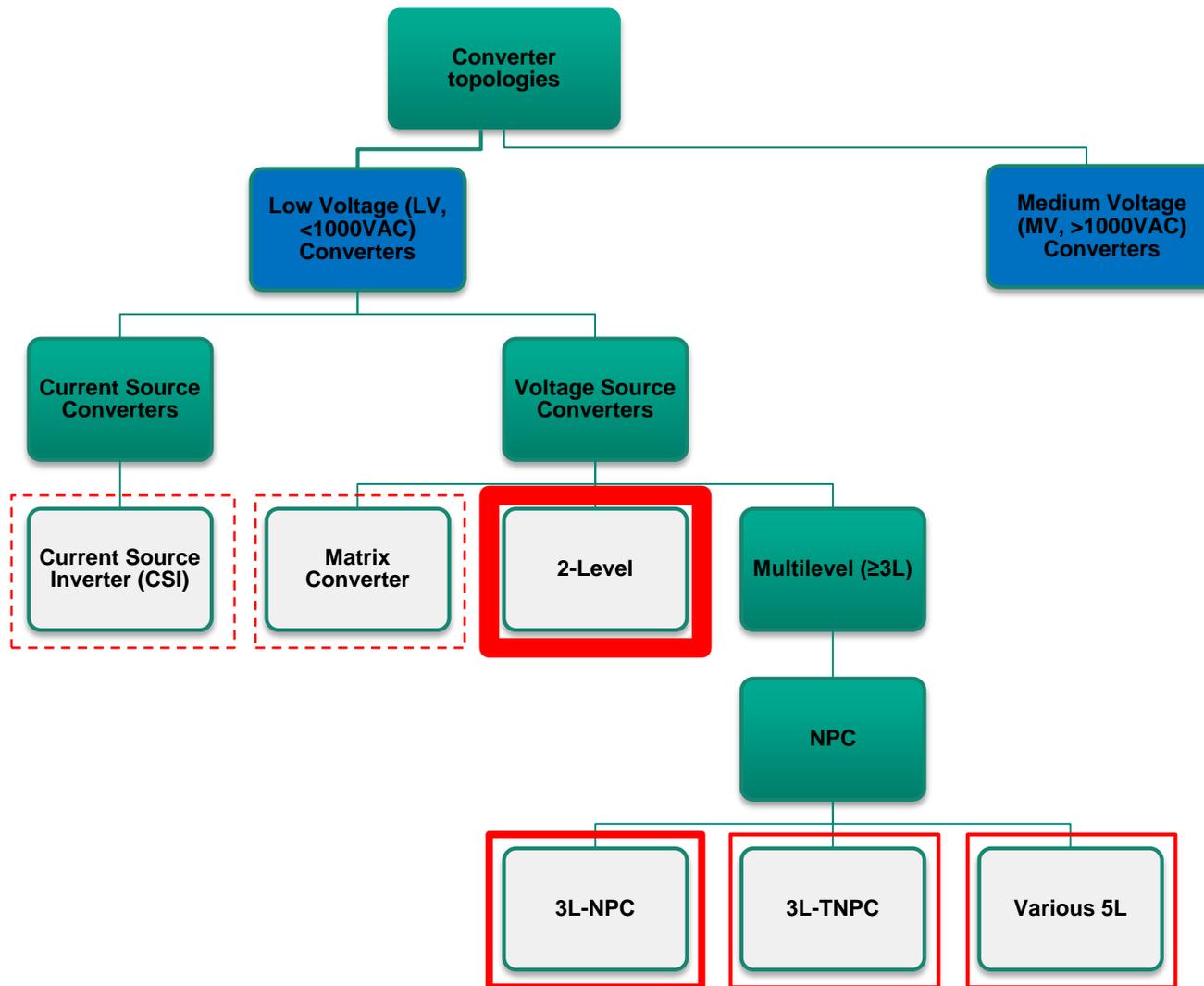
**Bipolare Thyristoren -
Pellets**

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

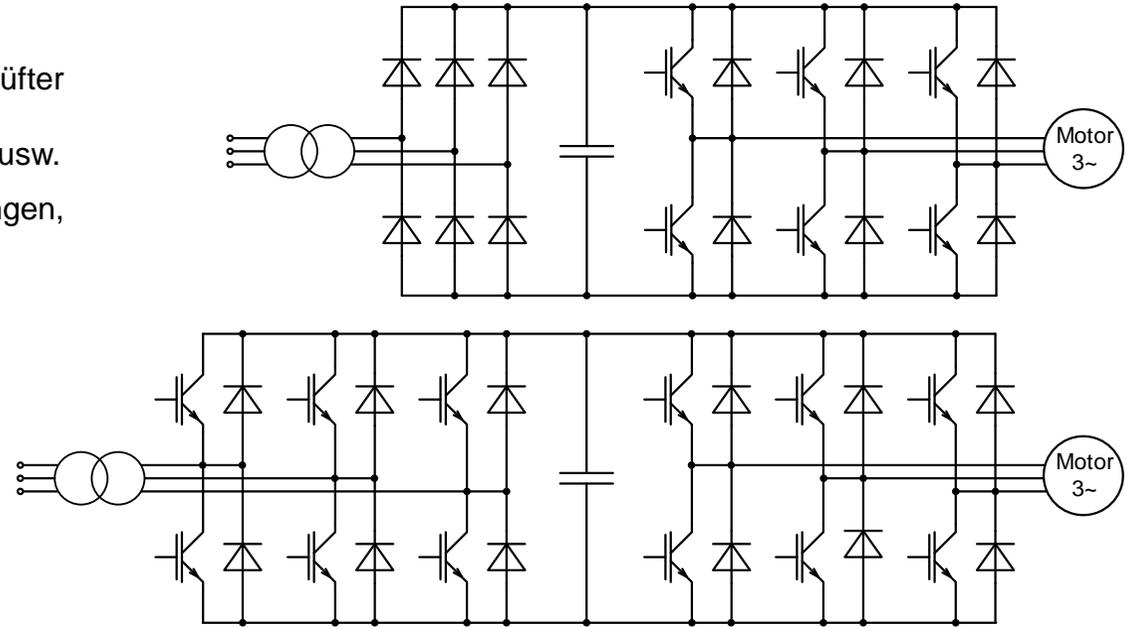
Chip [mm*mm]	Strom [A]	Spannung [V]
13,6*13,6	150	1700
13,6*13,6	63	3300
13,6*13,6	31	6500

5. Topologien – Stromrichter für Antriebe und Netze



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

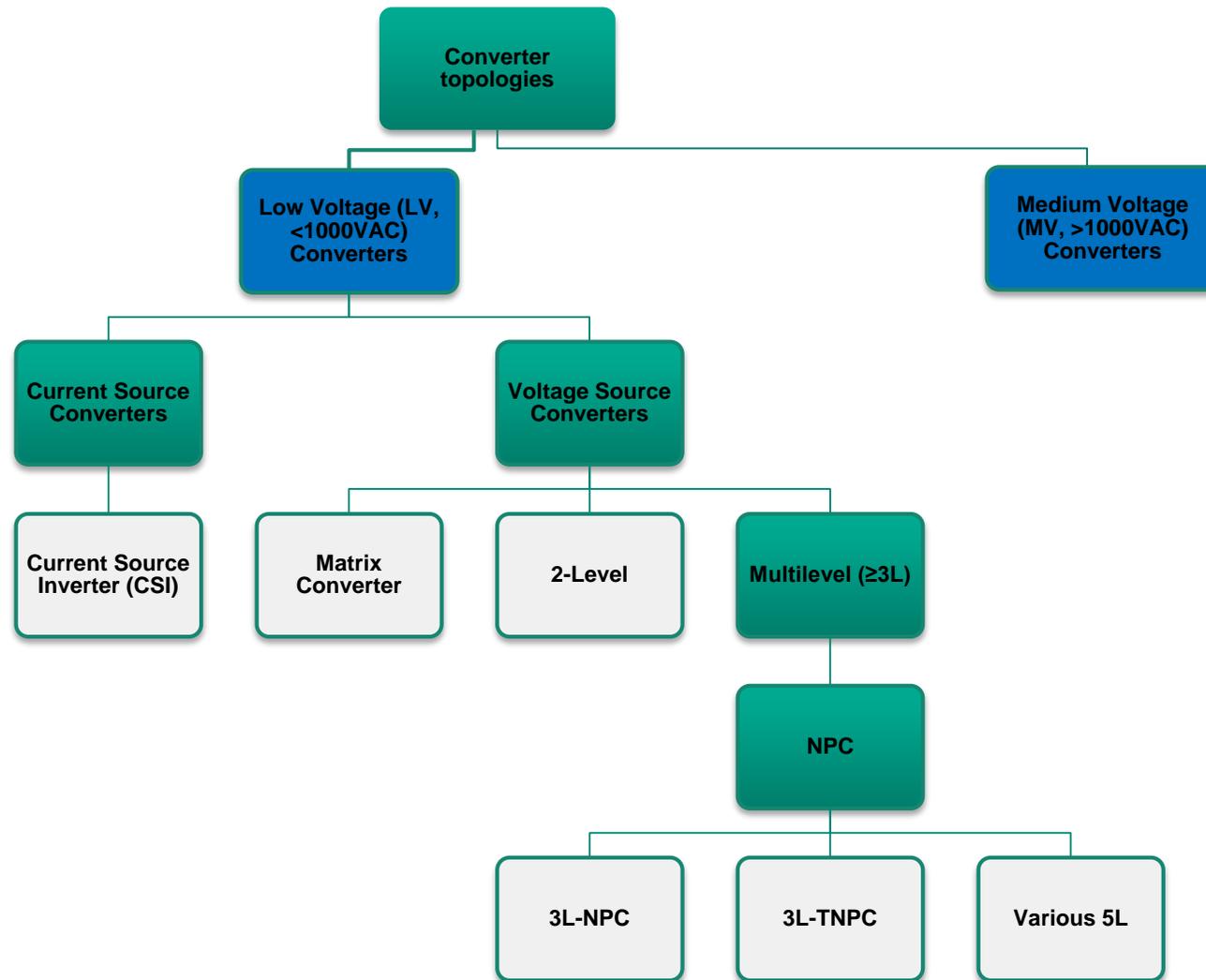
- Anwendung vom einfachsten Antrieb für Pumpen oder Lüfter bis hin zu höchst anspruchsvollen Anwendungen in Werkzeugmaschinen, Extrudern, Walzwerken, Pressen usw.
- Umrichter für Windkraft- und Solaranlagen, Netzkupplungen, FACTS
- Oft die preisgünstigste Alternative im Vergleich zu komplexeren Topologien



- 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

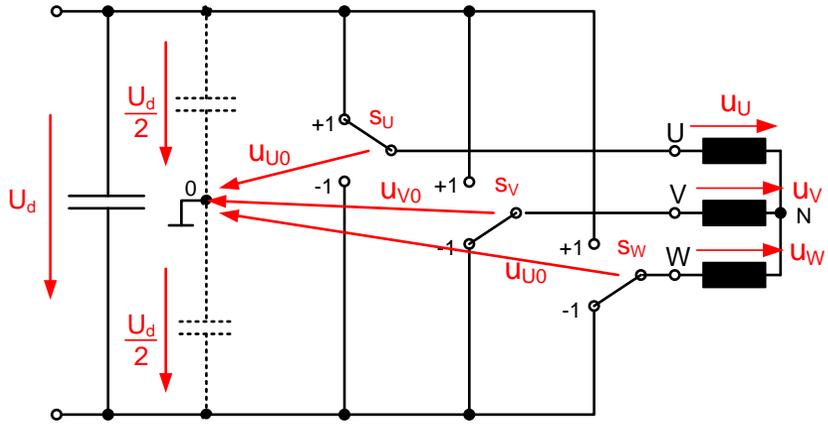
Quelle: Siemens, ABB

5. Topologien – Stromrichter für Antriebe und Netze

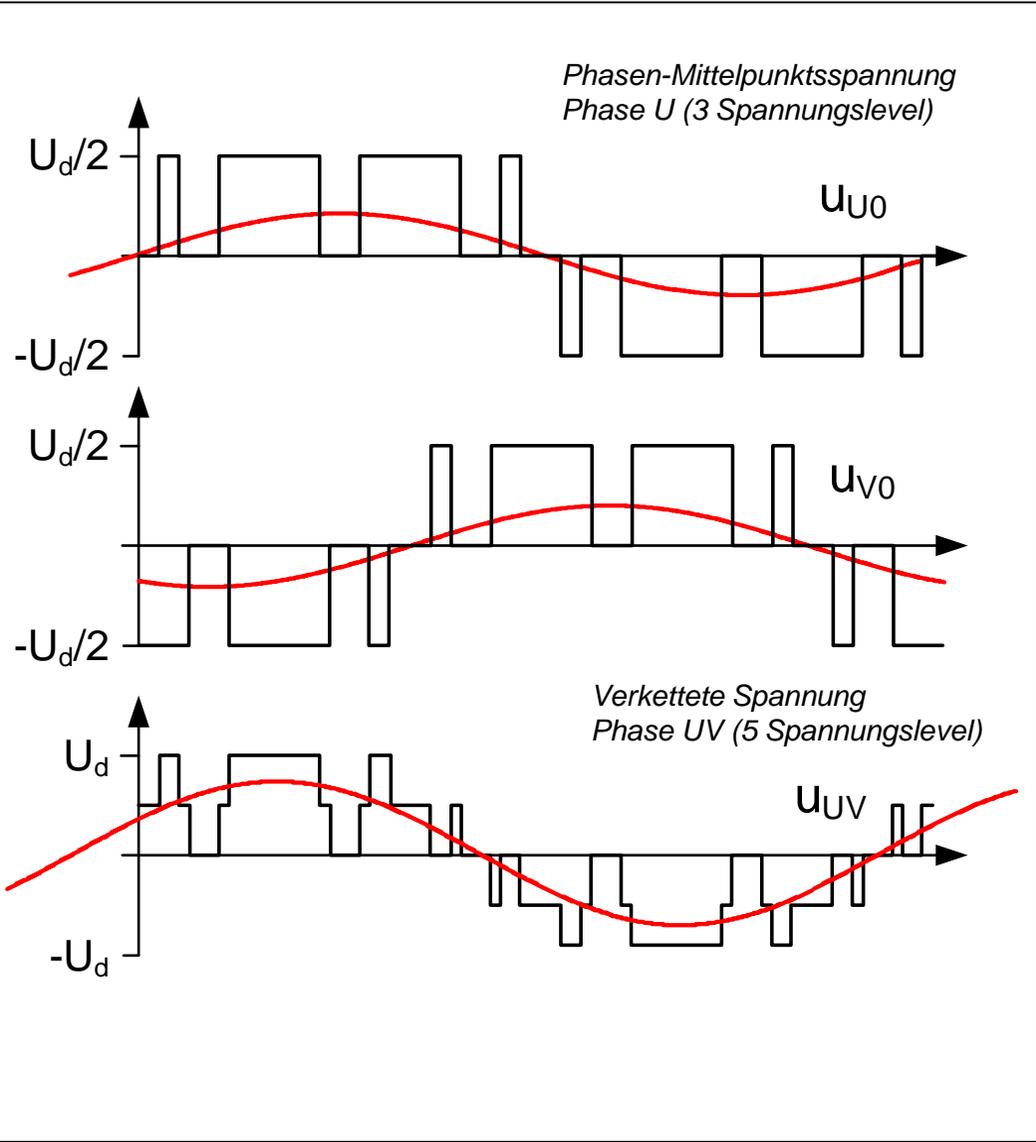
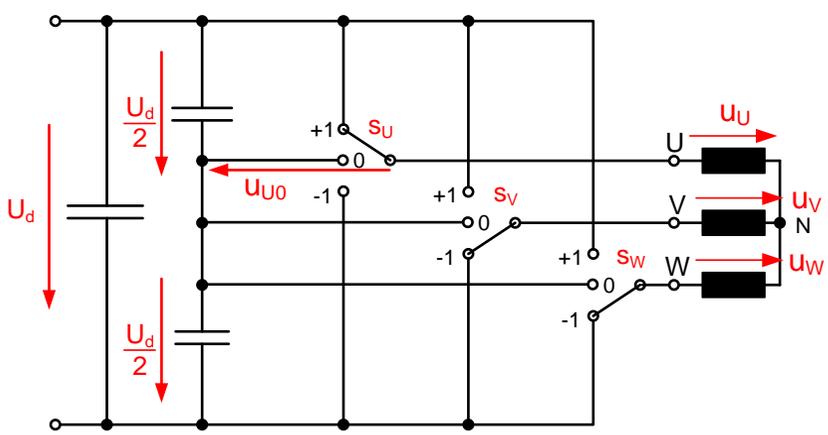


5. Topologien – Niederspannung (LV) - 3-Punkt-Wechselrichter (3L-NPC)

2-Punkt-Wechselrichter (2L)

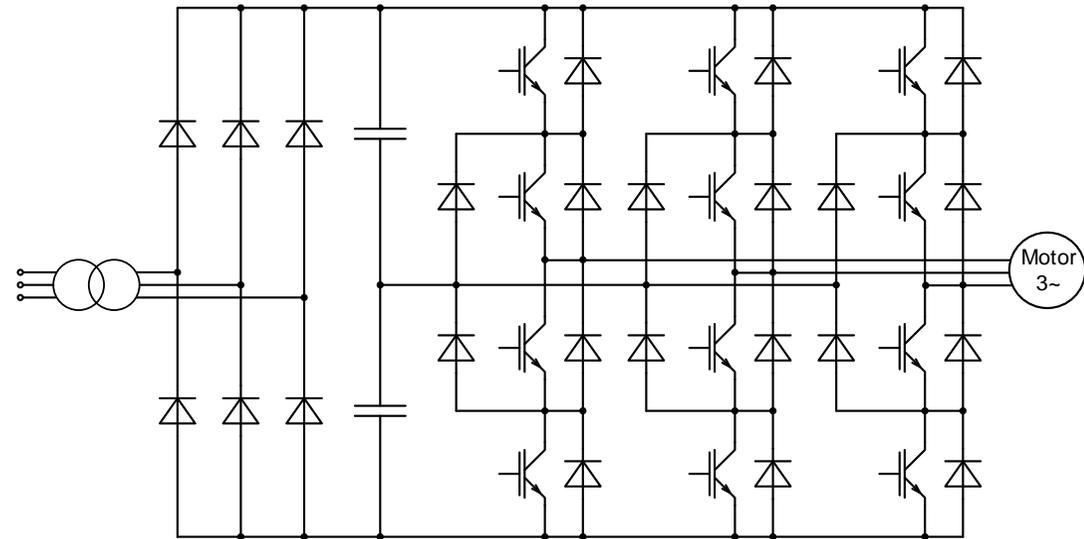


3-Punkt-Wechselrichter (3L)



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

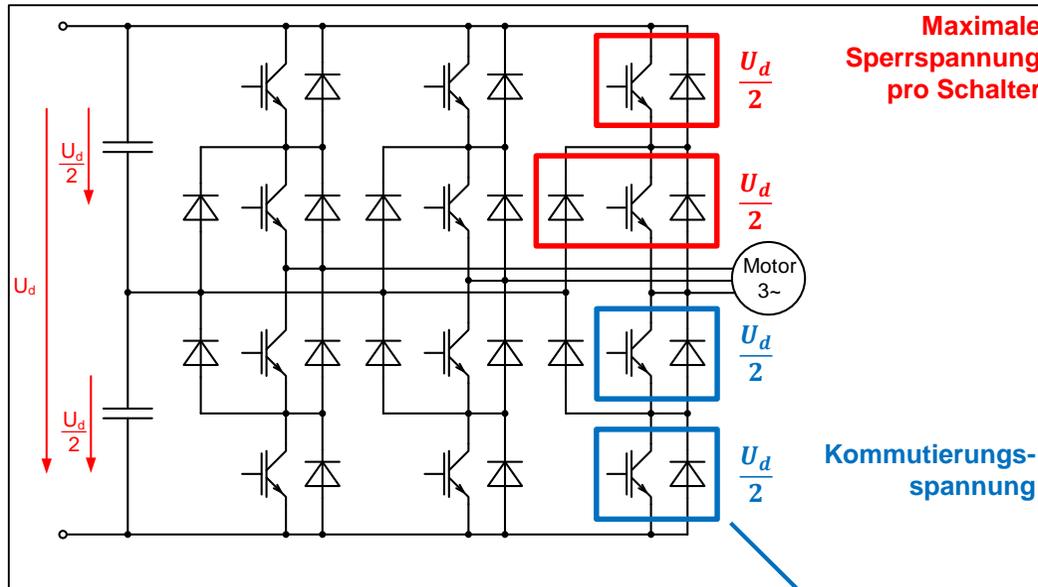
- Einführung der 3L-NPC-Umrichter getrieben durch:
 - Höhere Anforderungen an Harmonische in Ausgangsspannung/-strom
 - Höhere Spannungen: z.B. 1500VDC bei Photovoltaikanlagen, 900VAC bei Windenergieanlagen
- Noch keine weite Verbreitung in Antriebsapplikationen (höhere Kosten, höhere Komplexität)



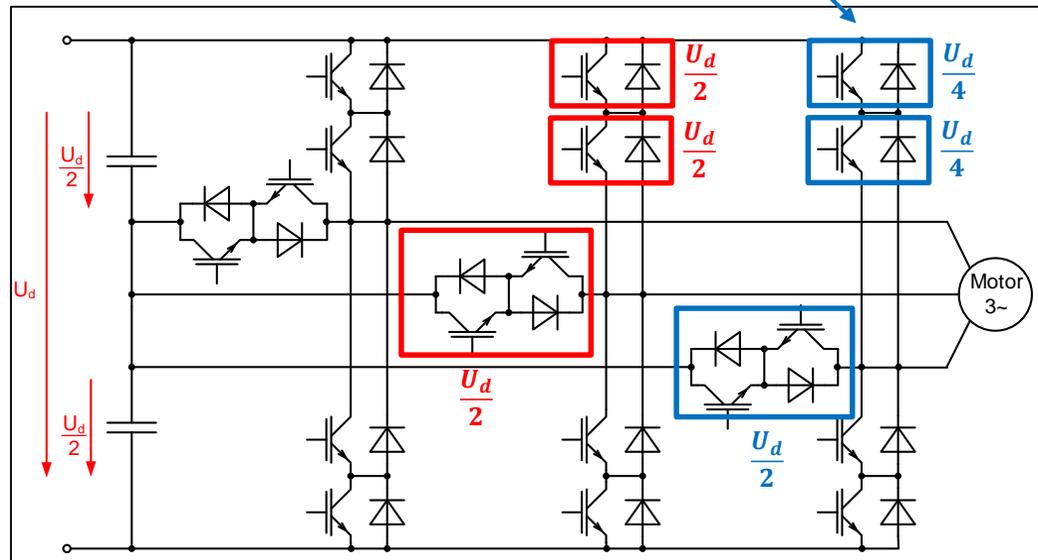
- Dioden-/Thyristoreinspeisung (Diode Front End = DFE) oder Aktive Einspeisung (Active Front End = AFE)
- Halbleiter: Si-IGBT-Module mit $U_{CES}=0,65-1,2kV$ (große Auswahl zunehmend auch in 3L-Modulen verfügbar)
- Schaltfrequenz: 1 kHz bis 15 kHz (abh. von Leistung)
- Regelung: Symmetrier-Regelung für Zwischenkreiskondensator, u/f-Steuerung, Vektorregelung, Direct Torque Control
- Modulation: PWM, Raumzeiger, Flat-Top, Optimierte Pulsmuster, Hysterese-Regelung
- auf Netzseite oft mit (verkleinertem) Netzfilter

Quelle: Woodward

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



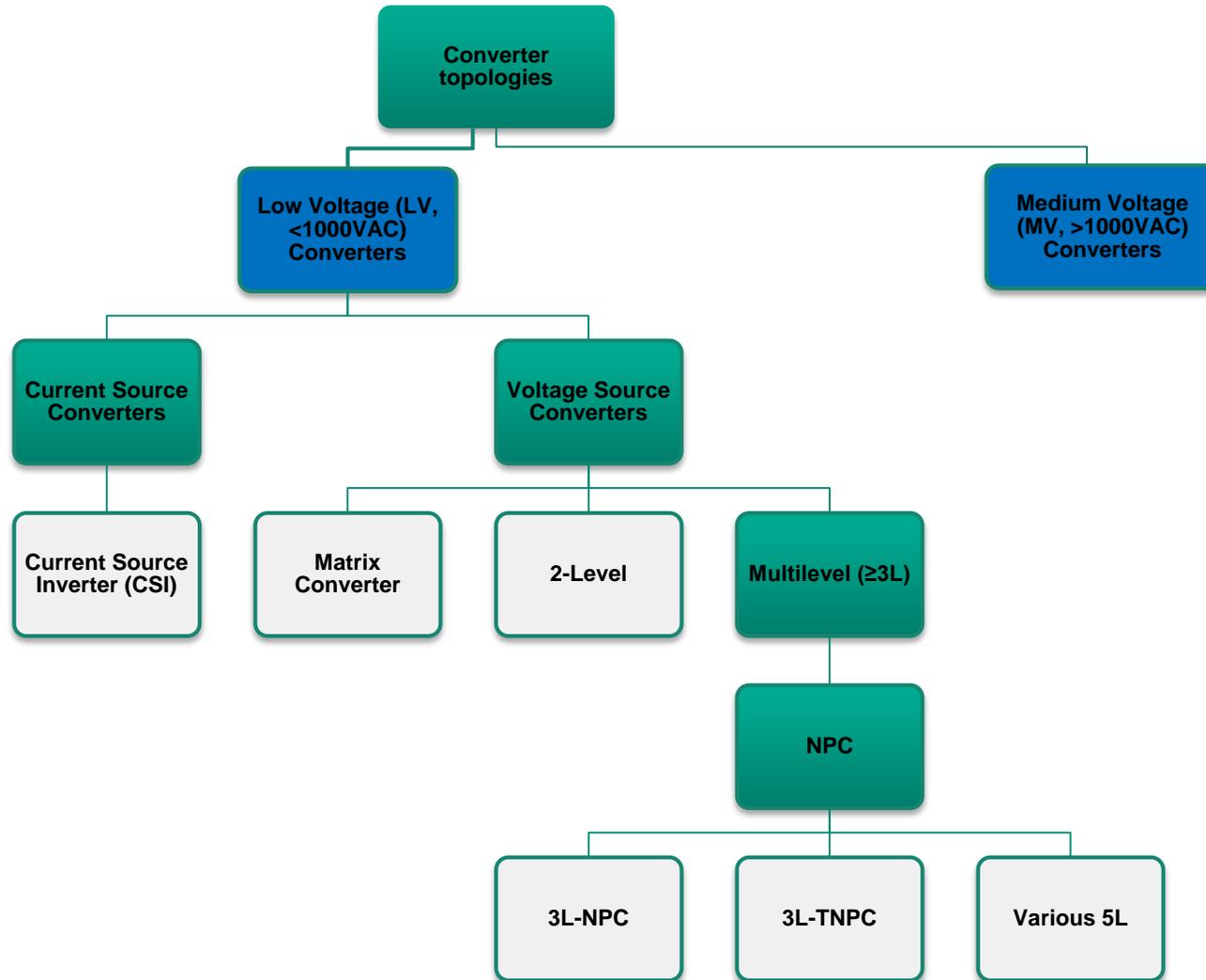
3L-NPC: 3Level-Neutral-Point-Clamped (Mittelpunkt über Dioden angebunden)



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

- Vorteile:
 - Reduzierte Kommutierungsspannung der äußeren Schalter → reduzierte Schaltverluste, d.h. höhere Ausgangsleistung bei gleichem Schalter wie im 3L-NPC
- Nachteile:
 - Höhere Anzahl an aktiven Schaltern
 - Komplexere Kommutierungskreise
 - 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

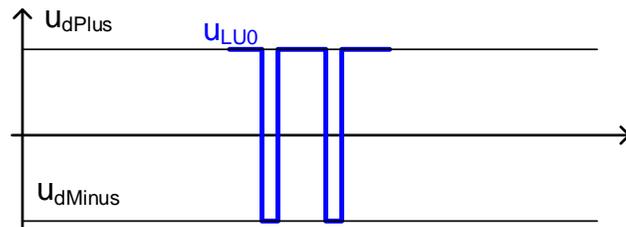
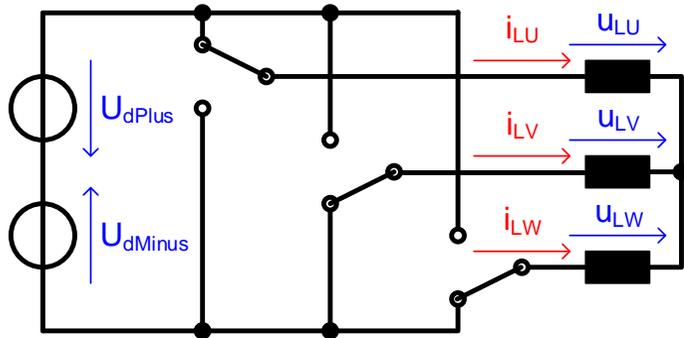
5. Topologien – Stromrichter für Antriebe und Netze



5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

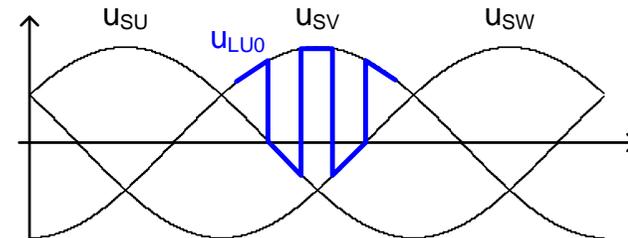
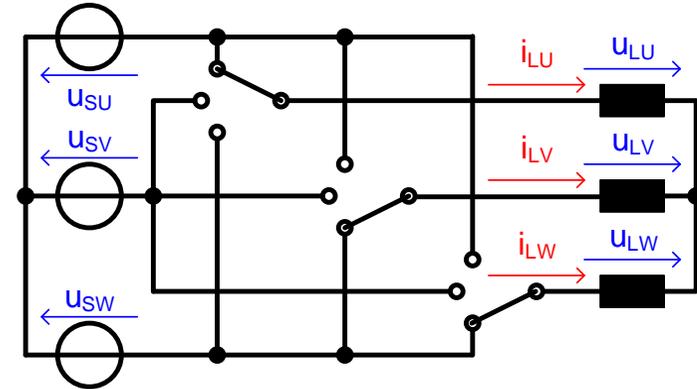
Matrixumrichter - Prinzip

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.

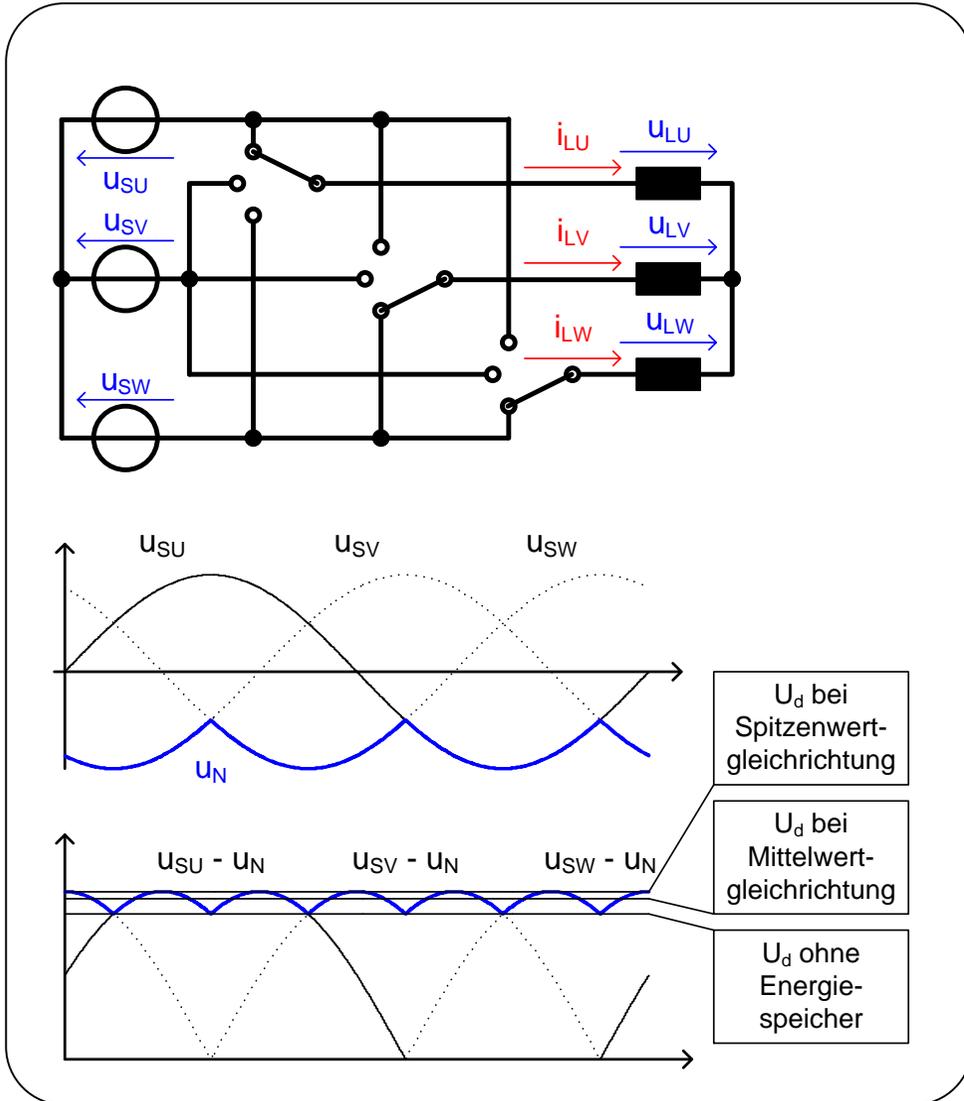
Matrixumrichter



- **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.

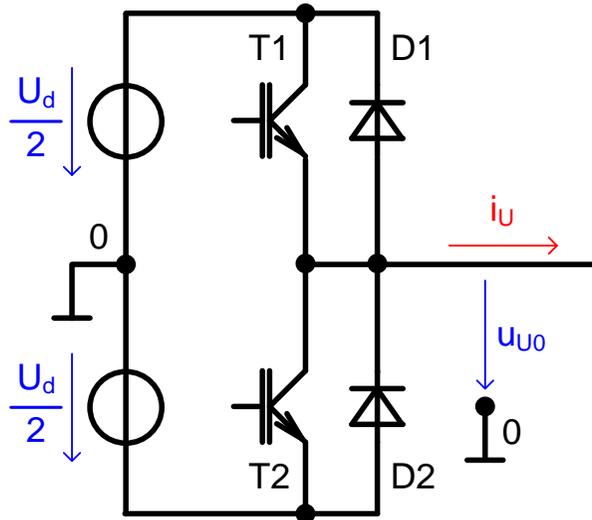
$$U_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_S$$

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

5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

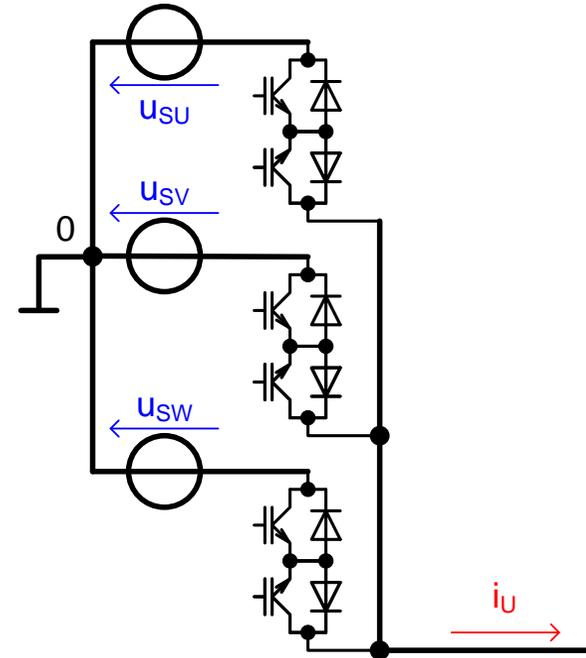
Matrixumrichter - Schalter

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

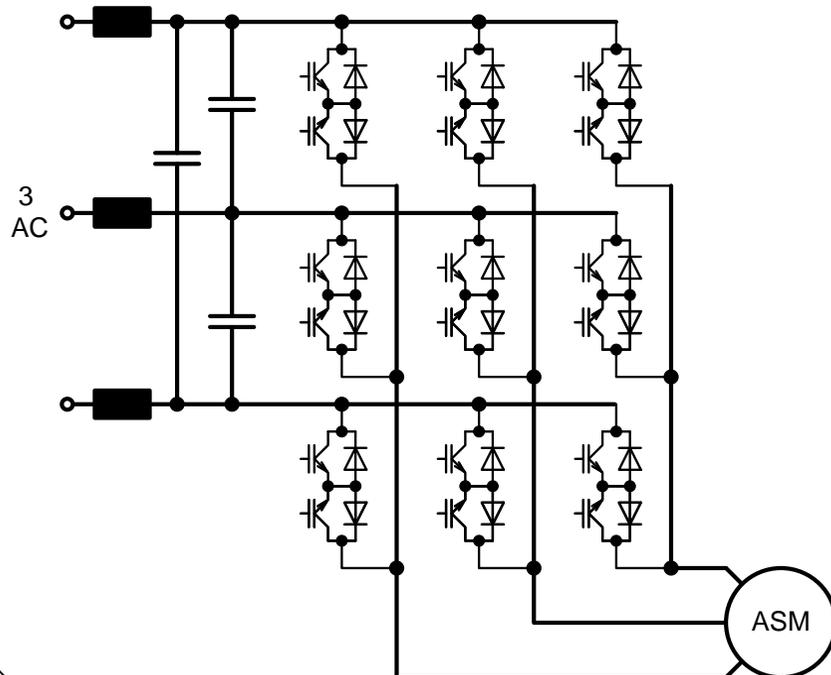
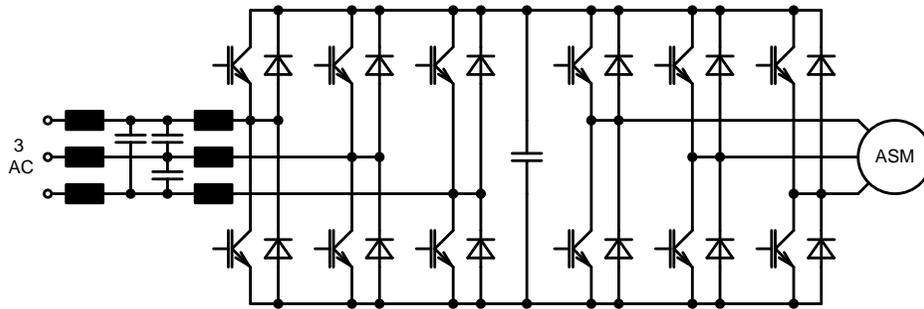


- Sperren: bidirektional sperrfähig
- Leiten: bidirektional leitfähig
- sicherstellen, dass I_L immer fließen kann und dass U_d immer gesperrt wird
→ komplexes Ansteuerschema in Abhängigkeit von der Polarität der Ströme und Spannungen
- pro Phase sechs IGBT und sechs Freilaufdioden
- netzseitiger + motorseitiger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

5. Topologien – Niederspannung (LV) - Matrixumrichter

Matrixumrichter - Realisierung

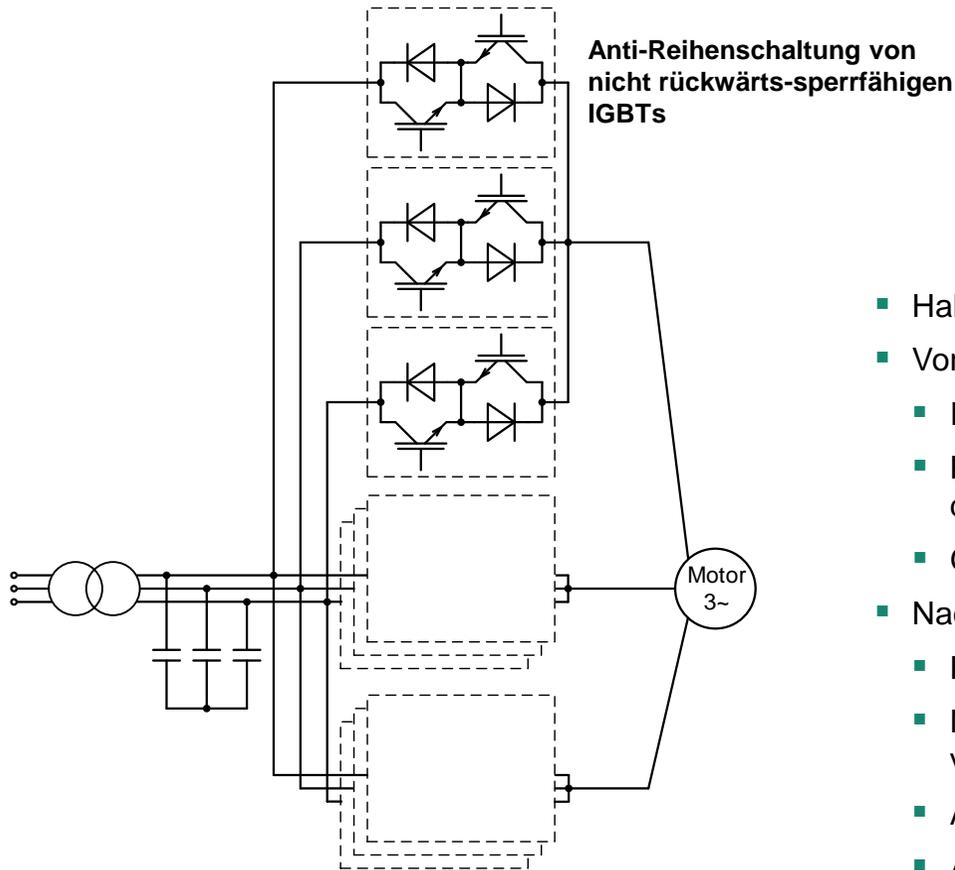
Rückspeisefähiger Spannungsw Zwischenkreis-Umrichter



- 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

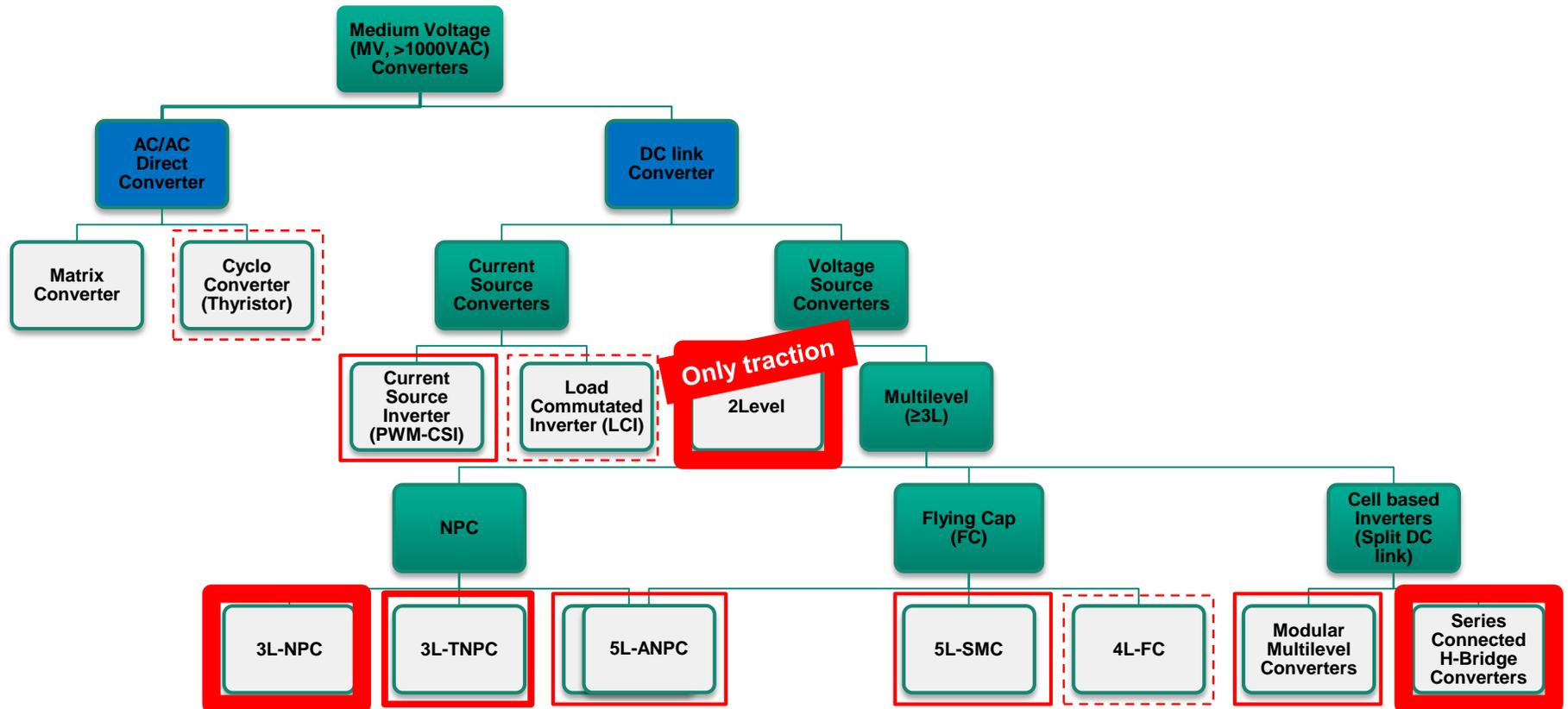
- Verbreitung von Matrixumrichtern gefördert durch:
 - Integration Maschine-Umrichter
 - Verfügbare Halbschalter (z.B. rückwärts sperrfähig)
- Noch keine weite Verbreitung in Antriebs- und Netzapplikationen (siehe Nachteile)



- 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

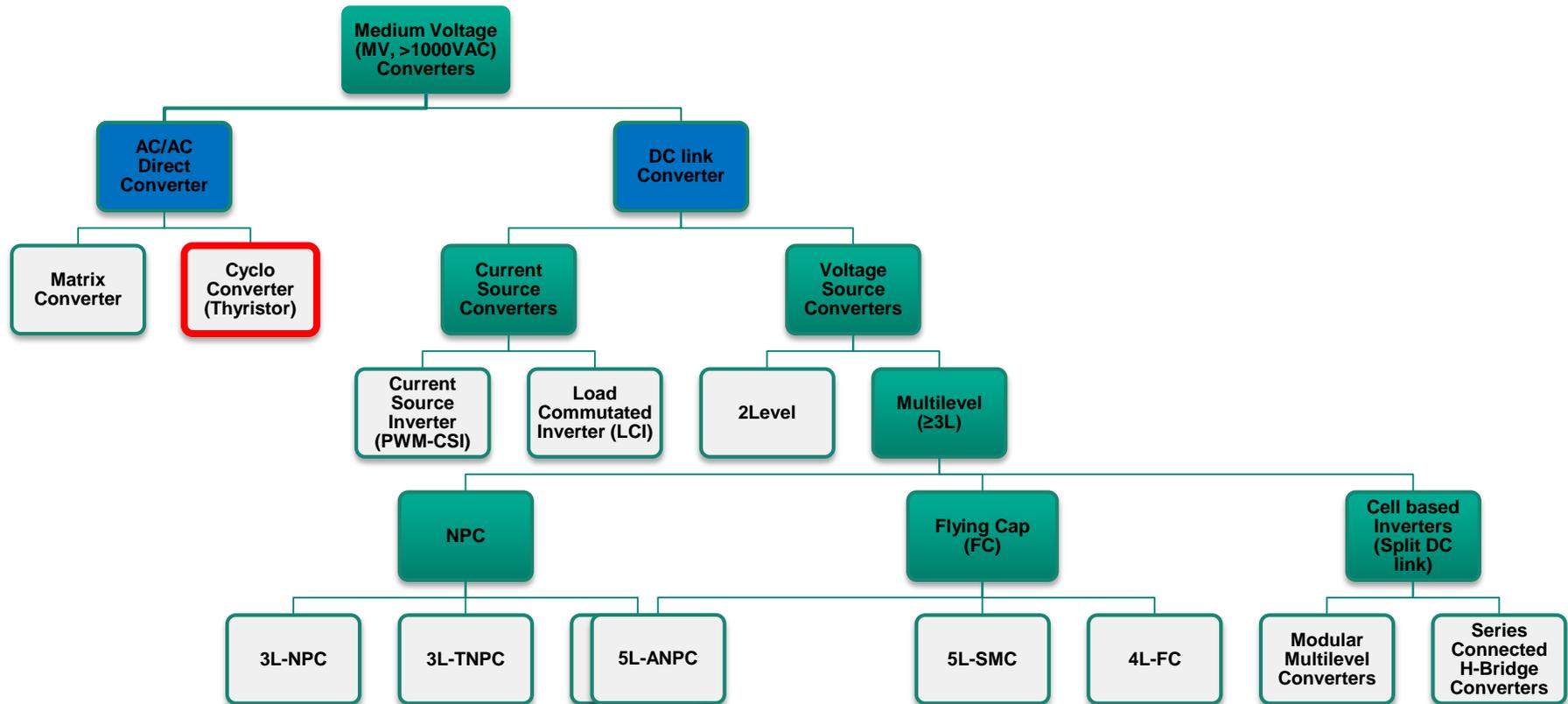
5. Topologien – Mittelspannung (MV)



5. Topologien – Mittelspannung (MV)

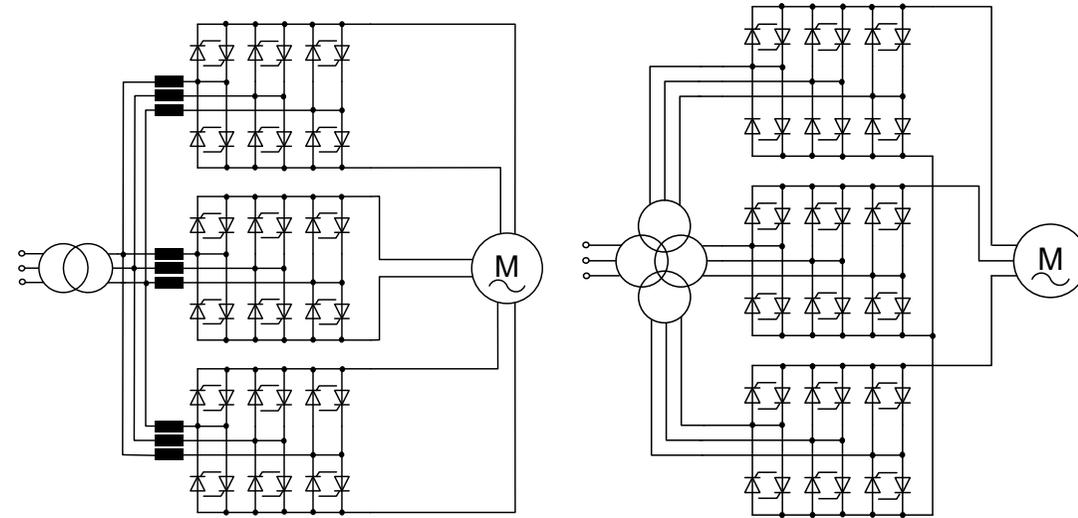
Topologie		Leistungshalbleiter	Image	AC-Ausgangsgrößen			Anwendungen
				Leistung (pro Einzel-SR)	Spannung	Frequenz	
AC/AC Cyclo Converter	Thyristor Direktumrichter	Thyristor		3-25MVA	1-4kV	0-22Hz (50Hz-Netz)	Rohrmühlen, Zementmühlen, Schiffsantriebe, Walzwerke
Umrichter mit Stromzwischenkreis	Current 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-NPP	IGBT (Press Pack)		<34MVA	6,0-10kV		
	5L-ANPC	IGBT (Module)		<3MVA	3,3-6,9kV		
	5L-NPP	IGBT (Module)		<7,2MVA	2,3-6,9kV (10kV?)		
Multilevel mit verteiltem Zwischenkreis	MMC	IGBT (Module)		<15MVA	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)

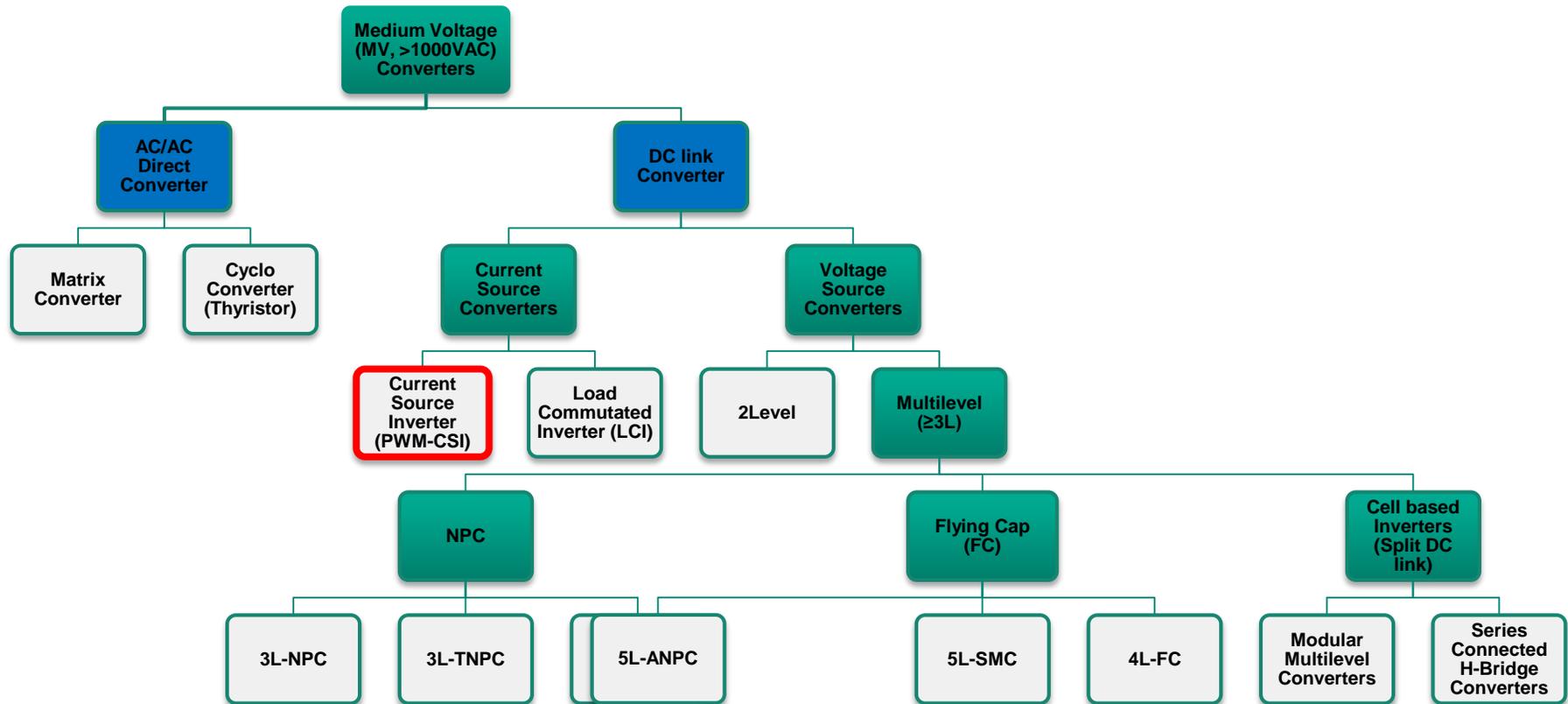


- Halbleiter: Thyristoren mit max. 8kV Sperrspannung
- Vorteile:
 - Keine Energiespeicher
 - Hohe Regeldynamik
 - Hohe Überlastfähigkeit
 - hohe Zuverlässigkeit
 - hoher Wirkungsgrad
 - Offene Schaltung (links): Verwendung eines Standard-Netztrafos
- Nachteile:
 - Ausgangsfrequenz auf ca. 22Hz (bei 50Hz-Netz)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



Quelle: Siemens

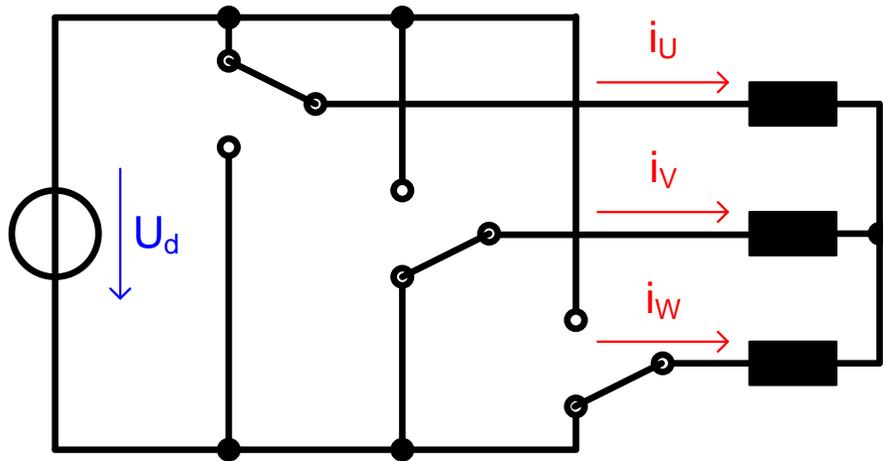
5. Topologien – Mittelspannung (MV)



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

Pulswechselrichter mit eingprägtem Strom - Prinzip

Spannungszwischenkreis-Umrichter



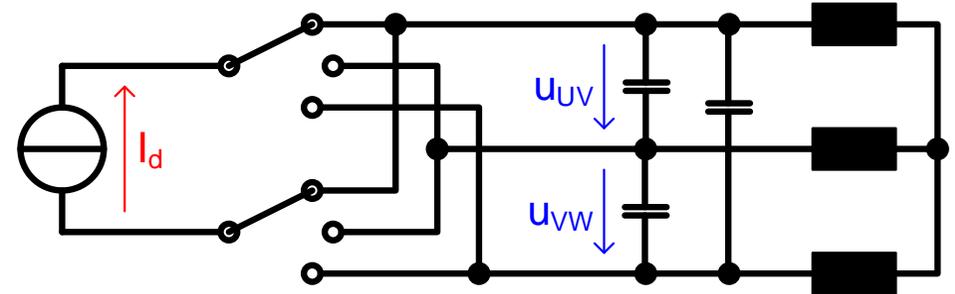
Zwischenkreis:

Spannungsquelle, realisiert als Kondensator

Last:

induktiv, z.B. Motor

Stromzwischenkreis-Umrichter



Zwischenkreis:

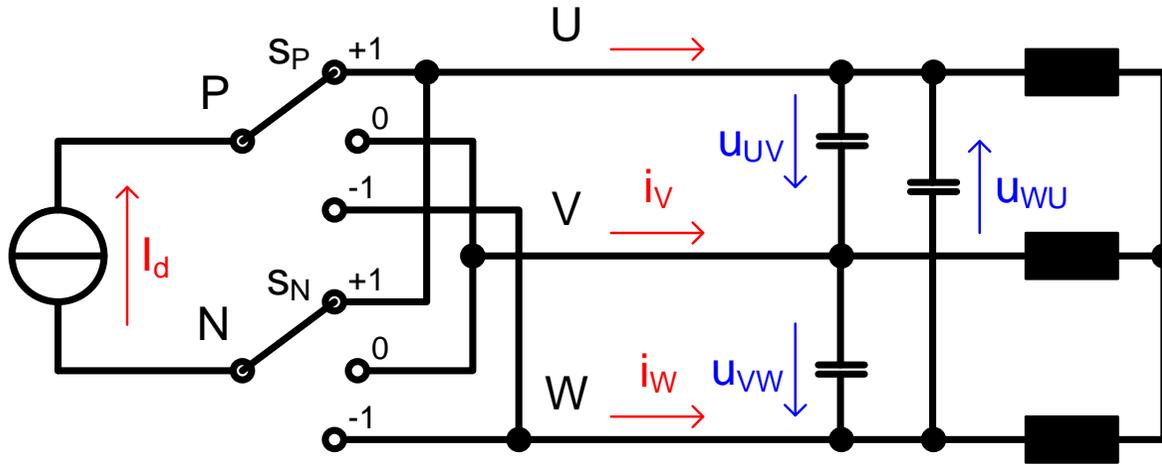
Stromquelle, realisiert als Drossel

Last:

kapazitiv, realisiert als Kondensatorbeschtaltung der induktiven Last

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

Pulswechselrichter mit eingprägtem Strom - Schaltzustände



Spannungswischenkreis-Umrichter:

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

Stromzwischenkreis-Umrichter:

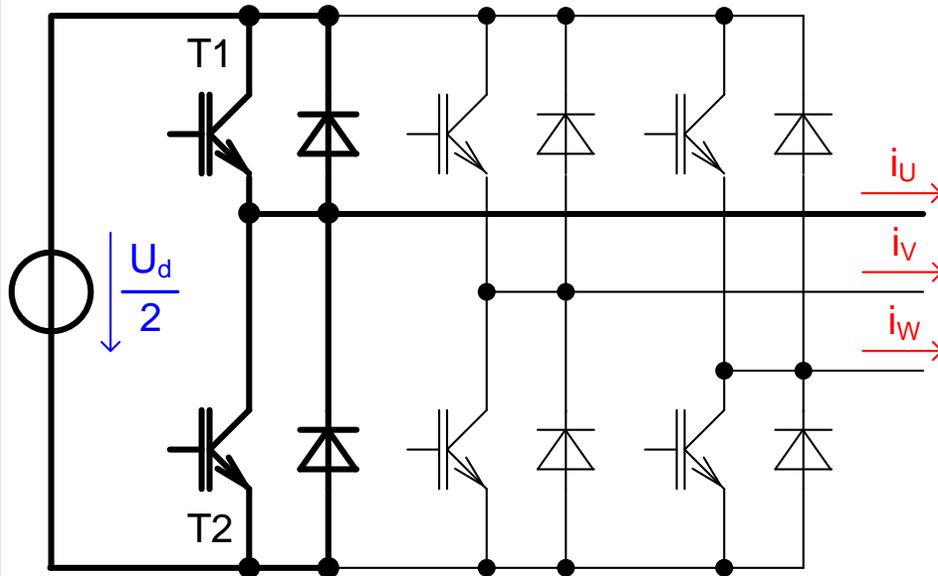
- 2 Schalter mit je n Schaltzuständen
- n^2 (=9) Schaltzustände
- n (=3) Nullstromzeiger
- $n^2 - n$ (=6) aktive Stromzeiger

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)

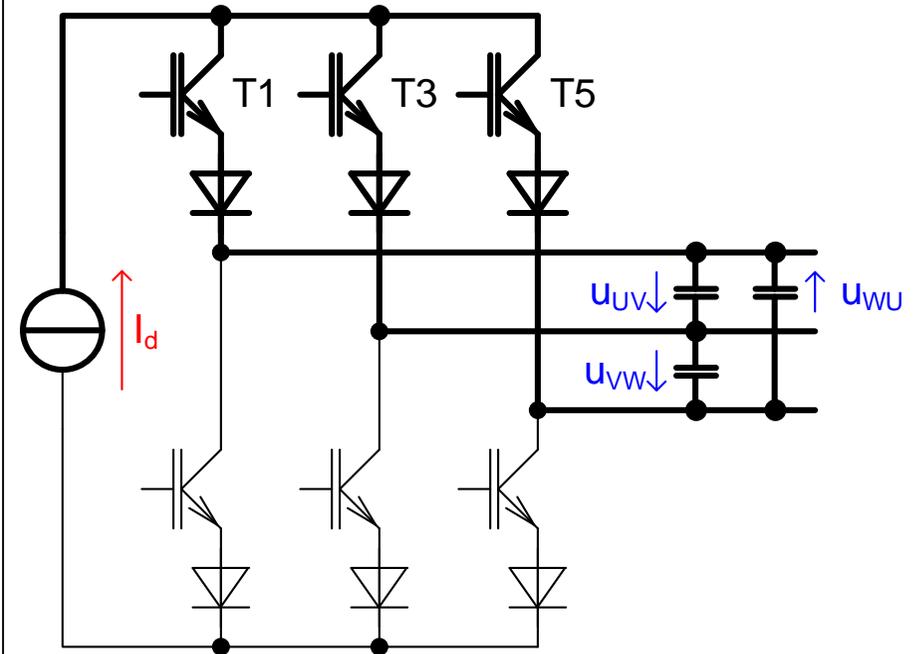
Pulswechselrichter mit eingprägtem Strom - Schalter

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

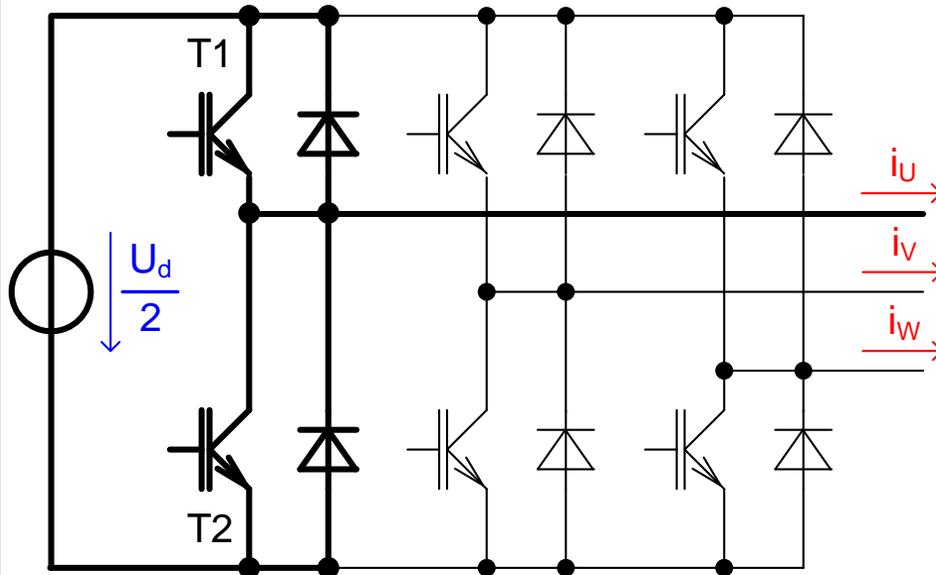


- Sperren: bidirektional sperrfähig
- Leiten: unidirektional leitfähig
- sicherstellen, dass u_{UV} , u_{VW} , u_{WU} immer gesperrt wird
→ Reihendioden
- sicherstellen, dass I_d immer fließen kann
→ Überlappungszeit zwischen T1, T3 und T5

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

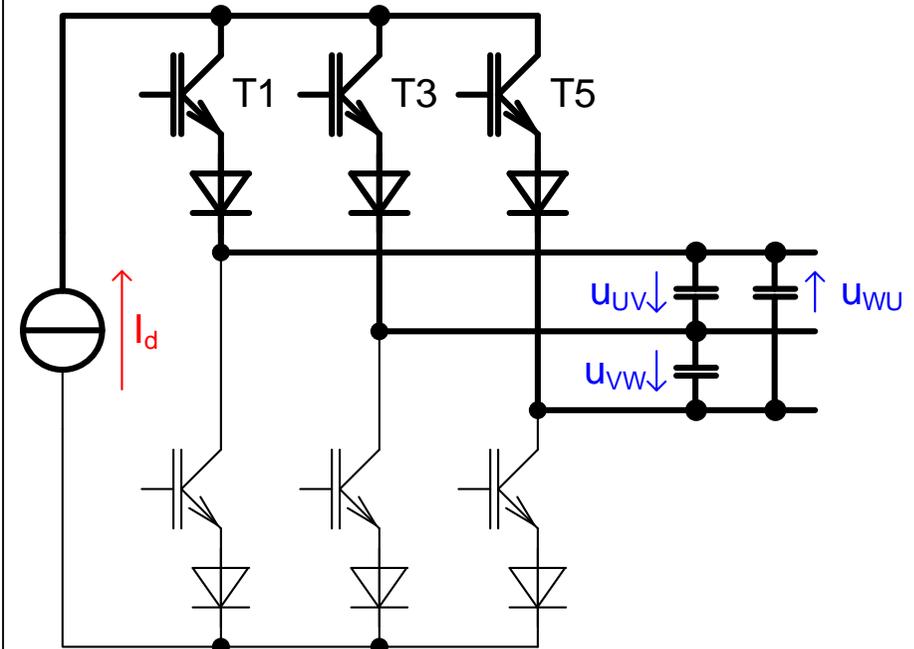
PWR mit eingprägtem Strom – zulässige Schaltzustände

Spannungswellenkreis-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)

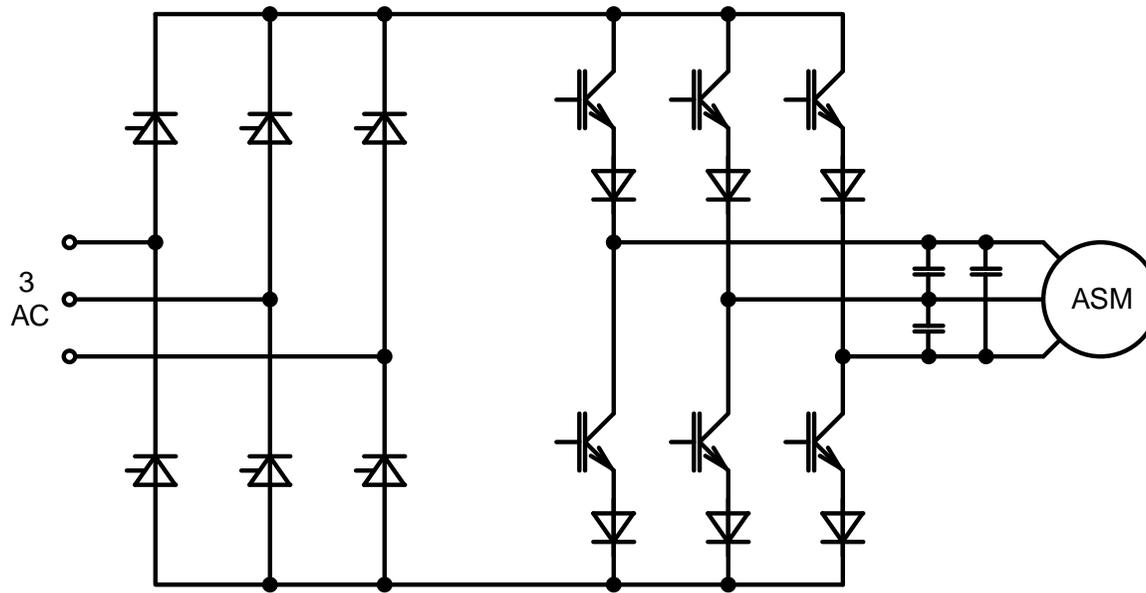
Stromwellkreis-Umrichter



- 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 eingprägtem 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

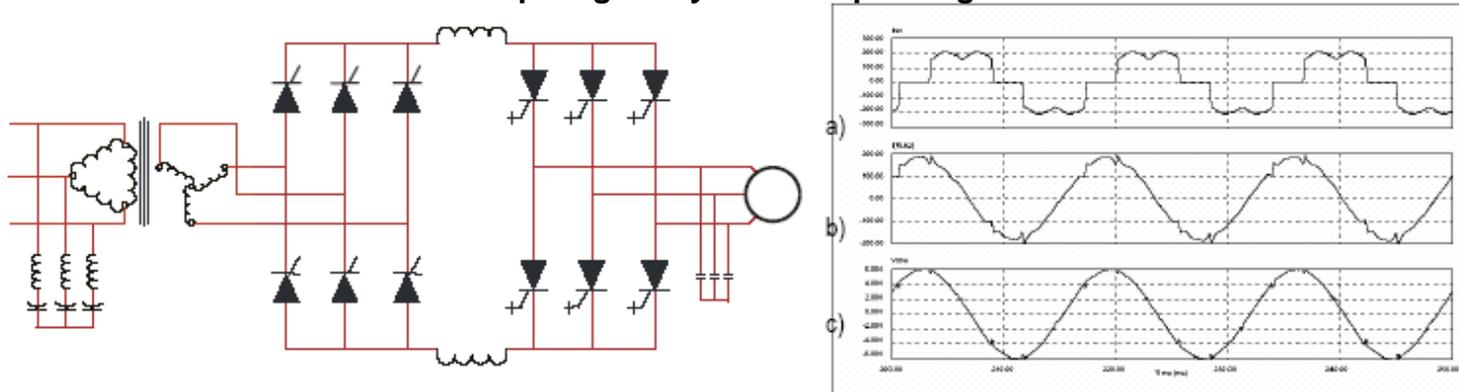


Figure 1.2 – 6-pulse Rectifier with input waveforms

- 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

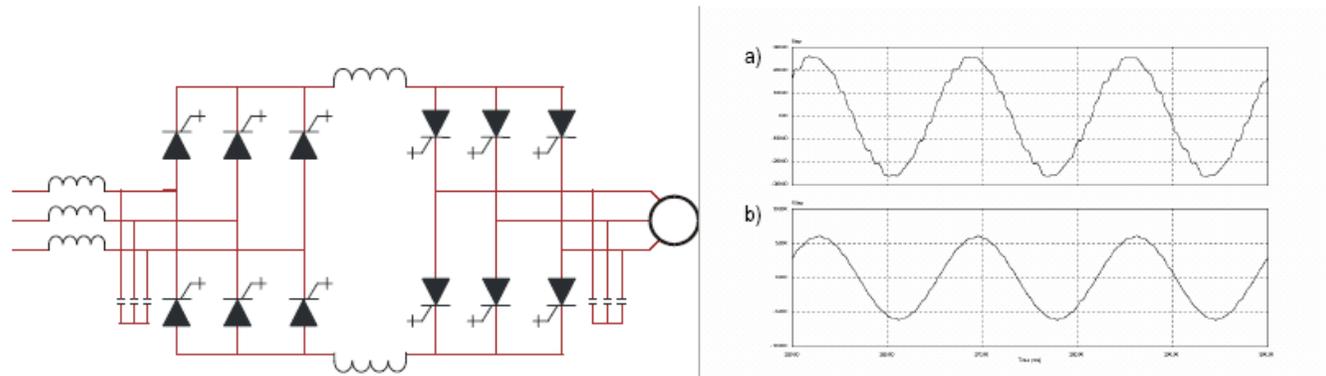


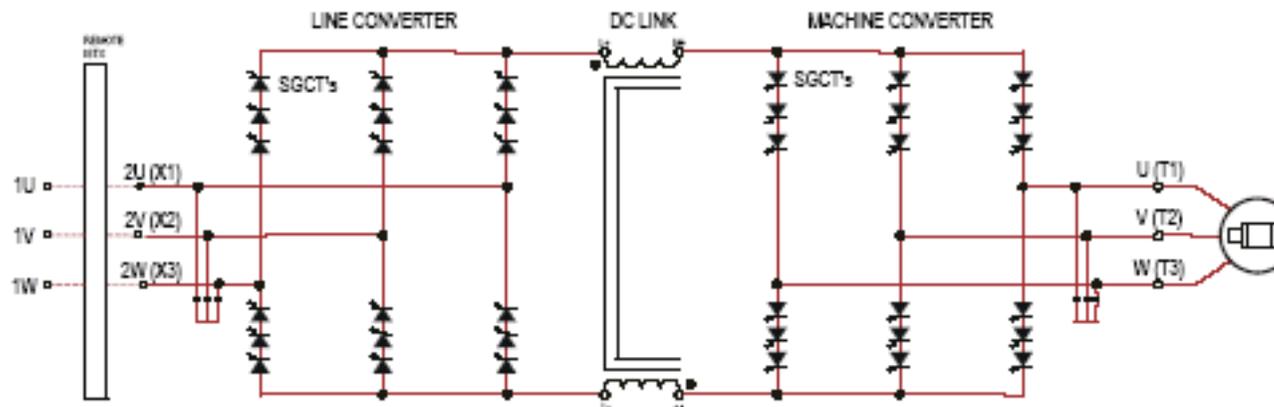
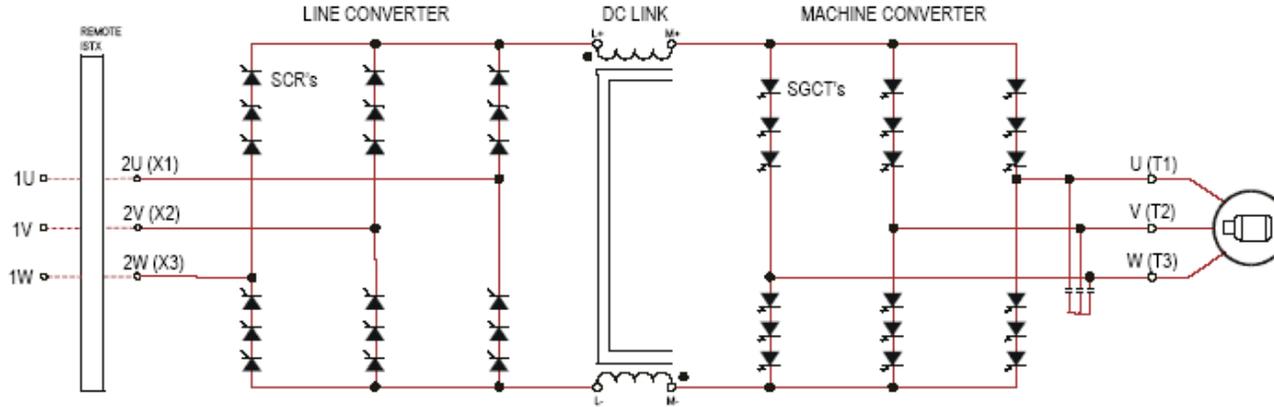
Figure 1.3 – PWM rectifier (active front-end) and its input current/voltage waveforms

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

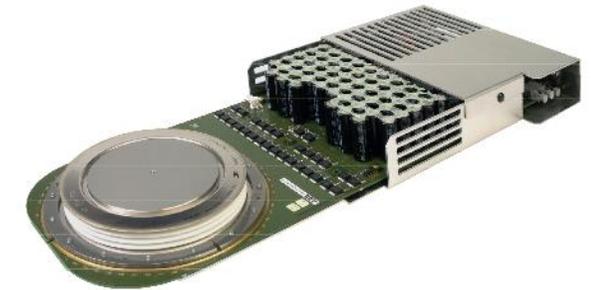
Quelle: Rockwell Automation

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

Prinzipschaltbild Current Source Inverter mit Reihenschaltung



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



Quelle: ABB, Rockwell Automation

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

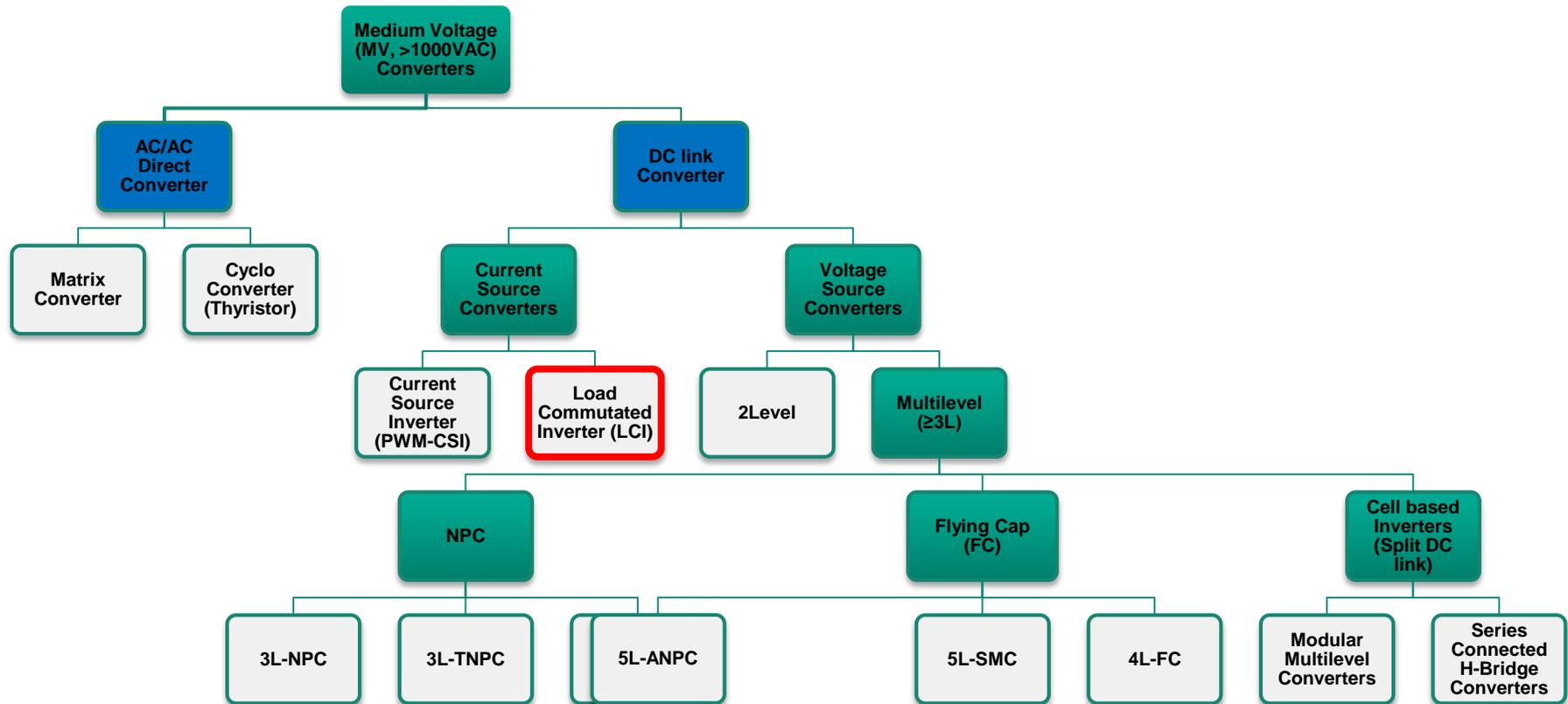
- Hauptanwendungsgebiete:
 - Einfache Pumpen, Lüfter, Kompressoren
 - Wegen der sinusförmigen Ausgangsspannung und der geringen Spannungsteilheiten auf der Motorseite:
 - “Retrofit”-Antriebe mit bestehenden Netzmotoren



- Halbleiter: Symmetrisch sperrende IGCTs mit max. 5,5kV 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)

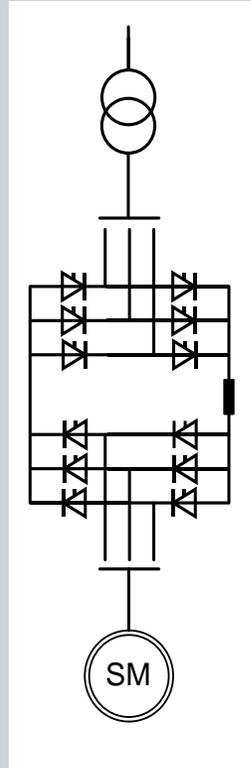
Quelle: Rockwell Automation

5. Topologien – Mittelspannung (MV)

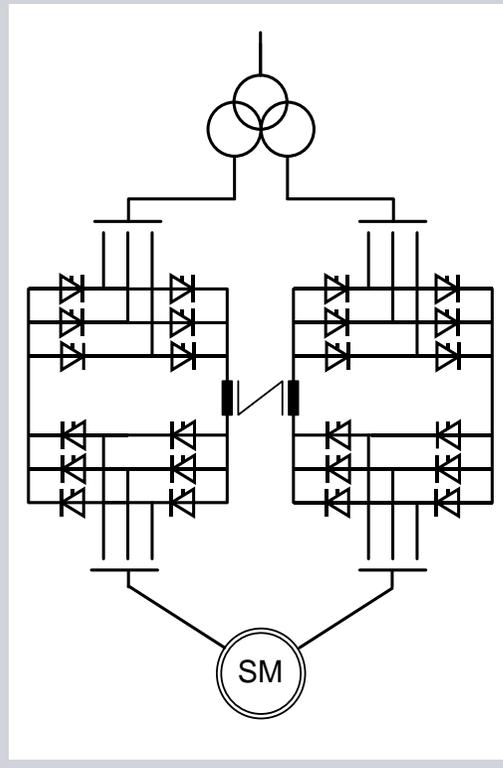


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)

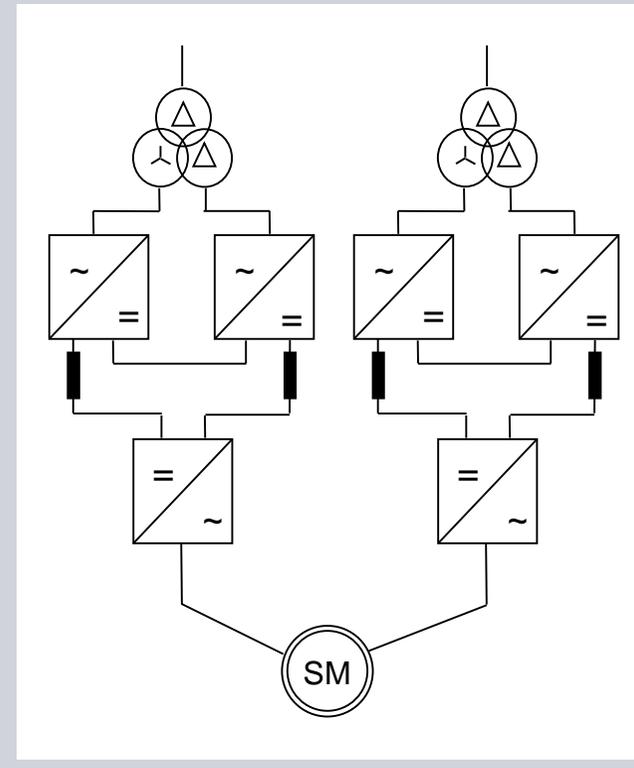
6/6-pulse



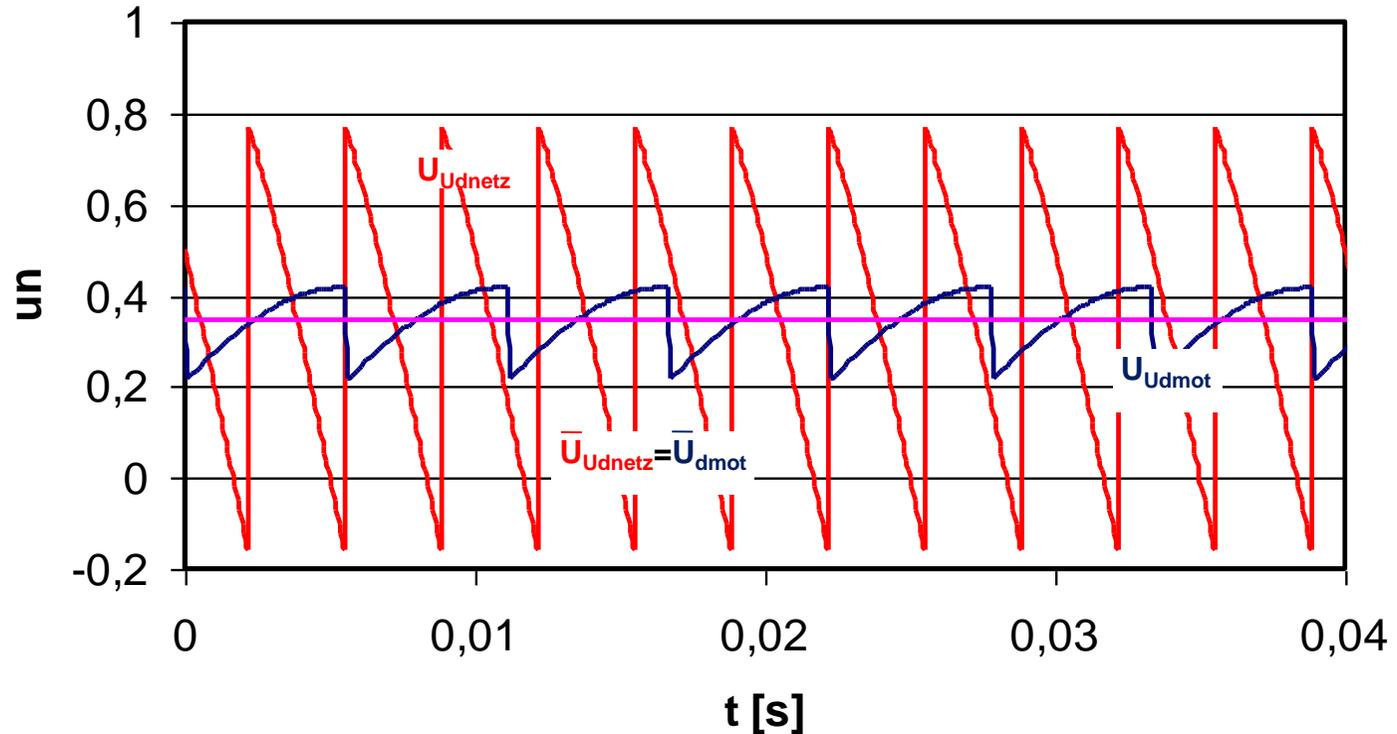
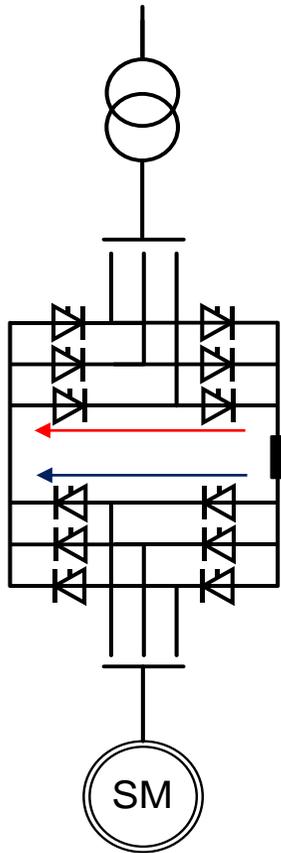
12/12-pulse



24/12-pulse



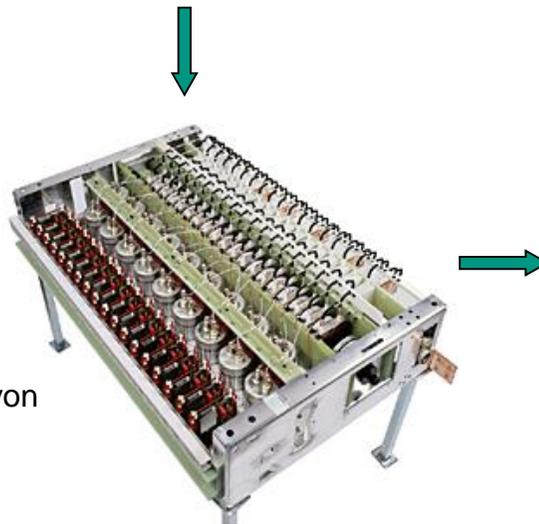
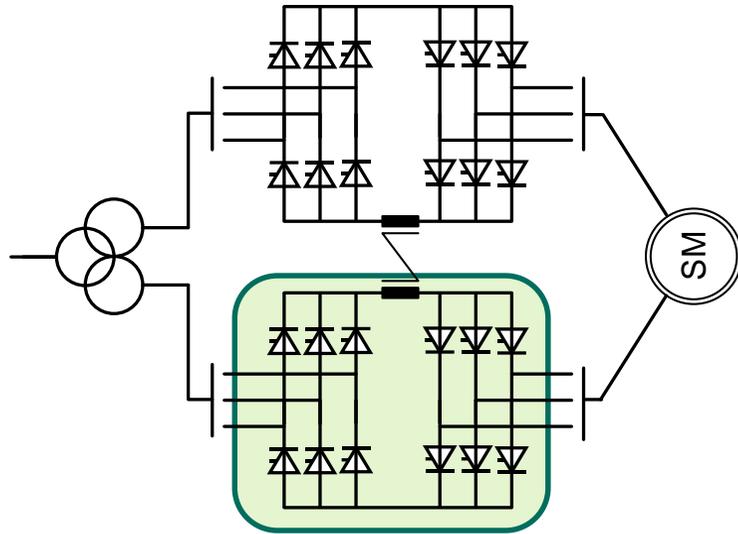
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)



Idealisierte Zwischenkreisspannungen:

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

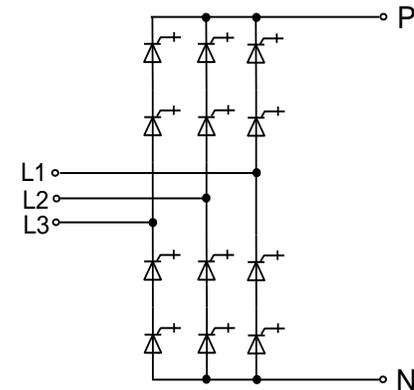
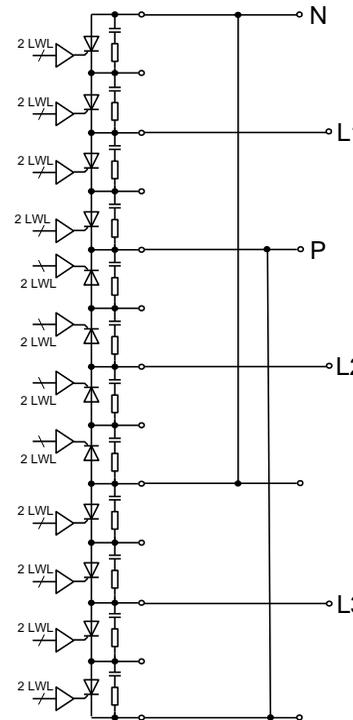
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Load Commutated Inverter (LCI)



Beispiel:
Mögliche Verschaltungen von 12 Thyristoren inkl. RC-Beschaltung

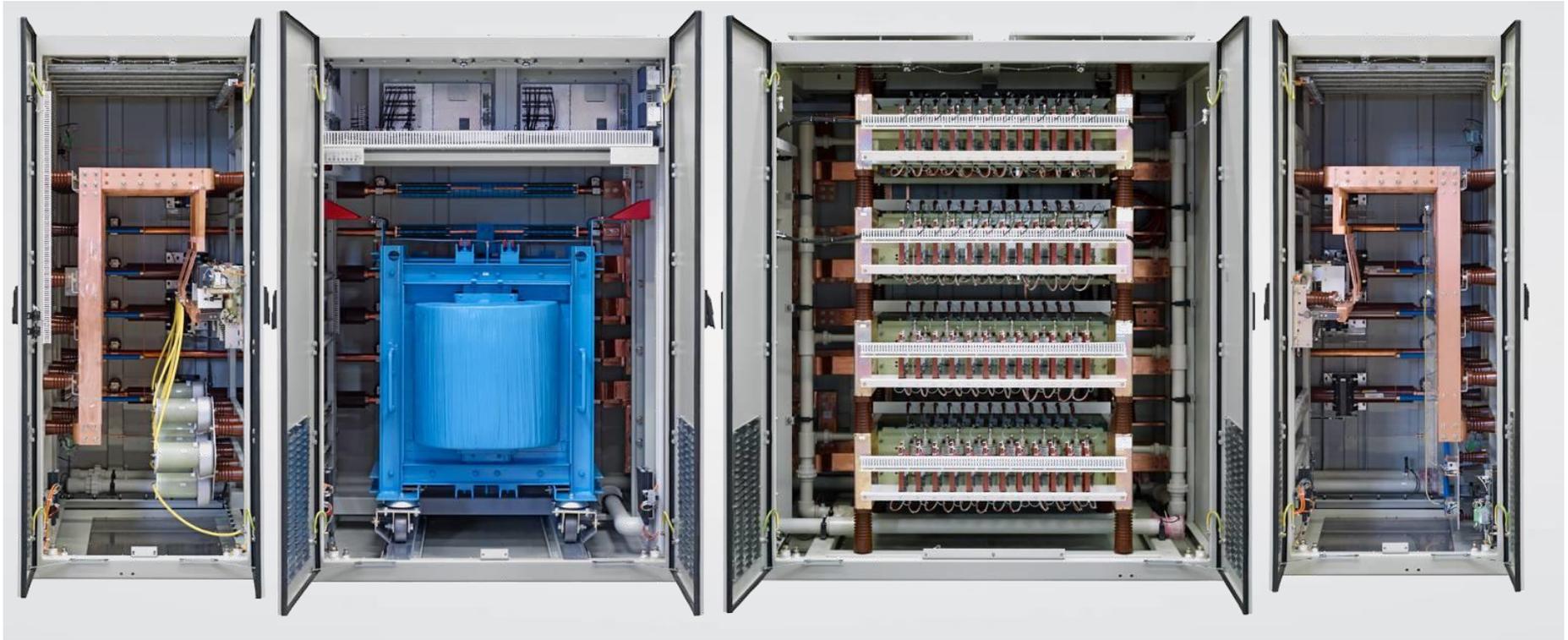
Ausführungsbeispiel:

- 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

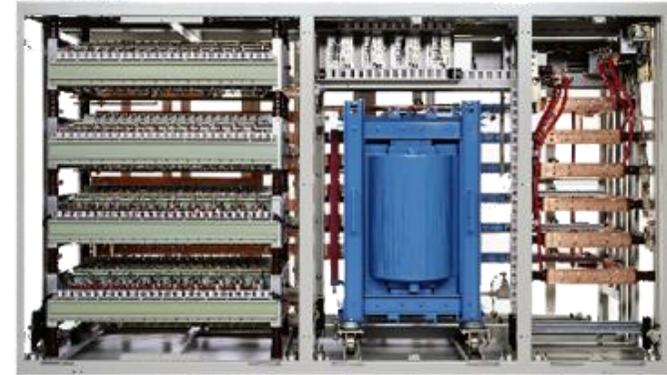
Netzanschluss-schrank

- Erdungsschalter
- Trennschalter

Quelle: Siemens

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

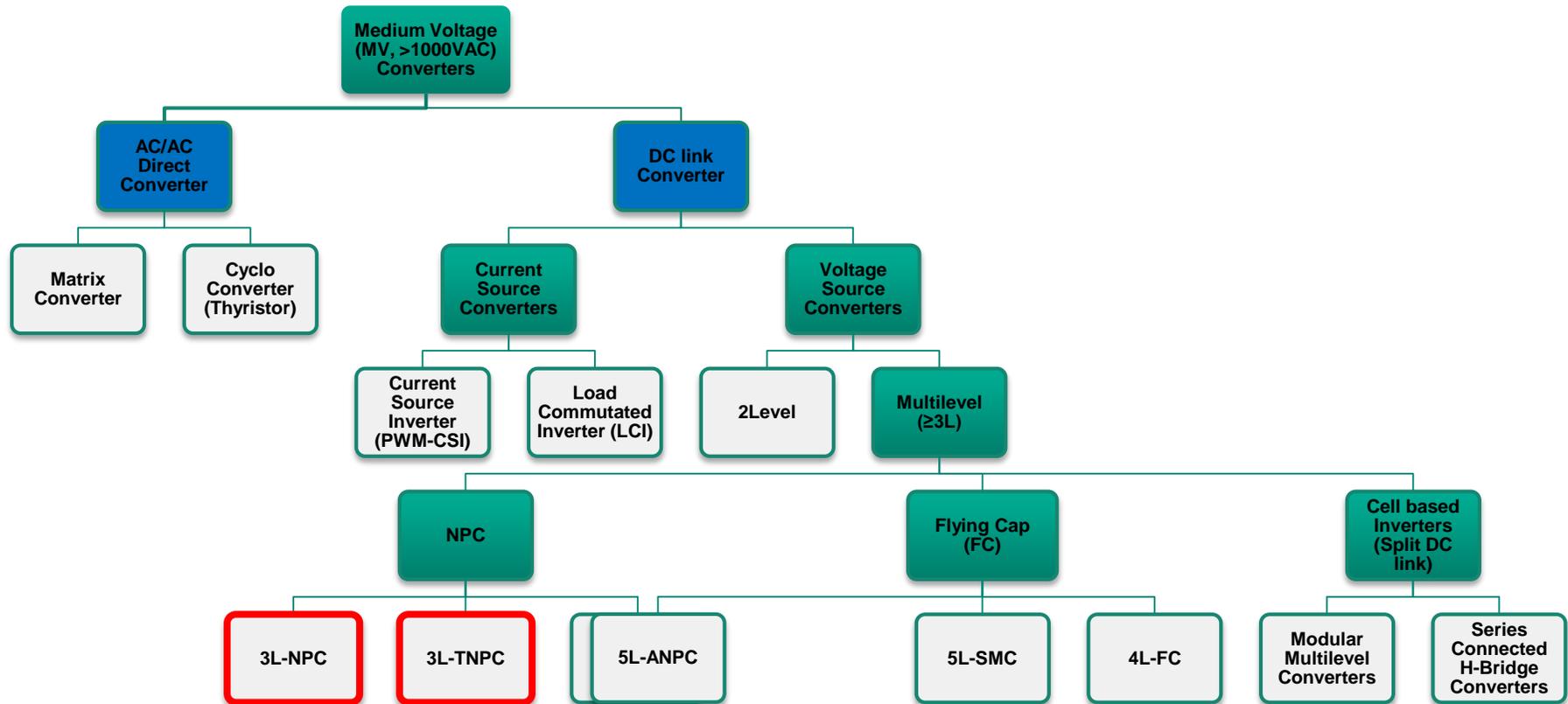
- Hauptanwendungsgebiete:
 - Gaskompressoren
 - Schiffsantriebe (Haupt- und Boosterantriebe)
 - Anfahrumsrichter (luftgekühlt)



- 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
 - Netzurückwirkungen insbesondere im Teillastbereich
 - Begrenzte Regeldynamik

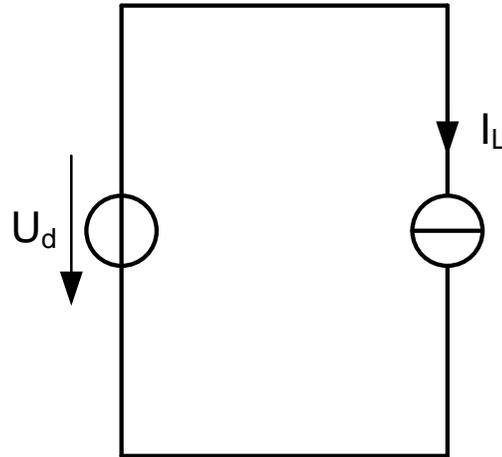
Quelle: Siemens

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



Multilevel Converters - Structure

Commutation Cell – 2-Level



Switching is always between a

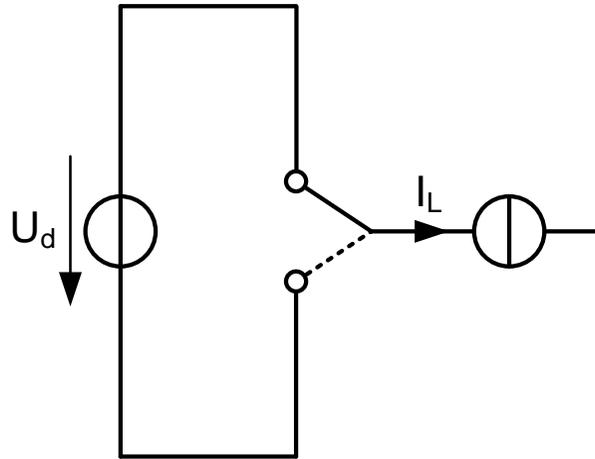
- Voltage source (e.g. DC link)

and

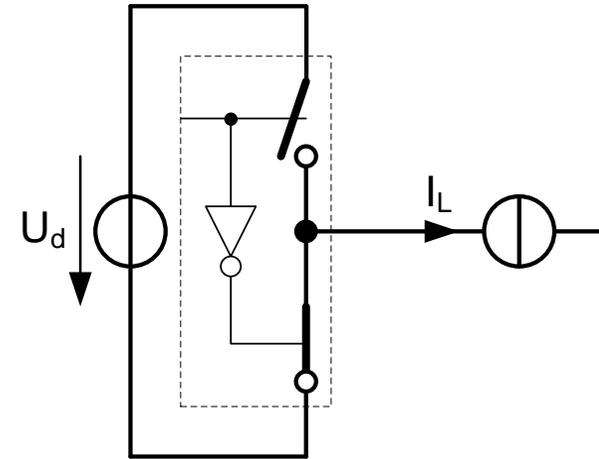
- Current source (e.g. inductive load)

Multilevel Converters - Structure

Commutation Cell – 2-Level



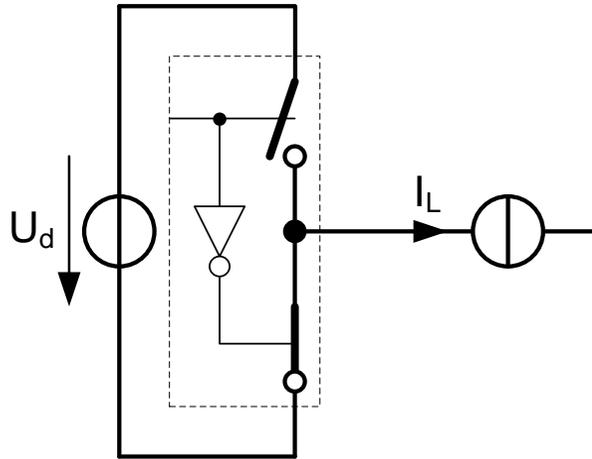
- Switching is always between a
- Voltage source (e.g. DC link)
- and
- Current source (e.g. inductive load)



- Basic commutation cell for
- Unipolar voltage
- and
- Bipolar current

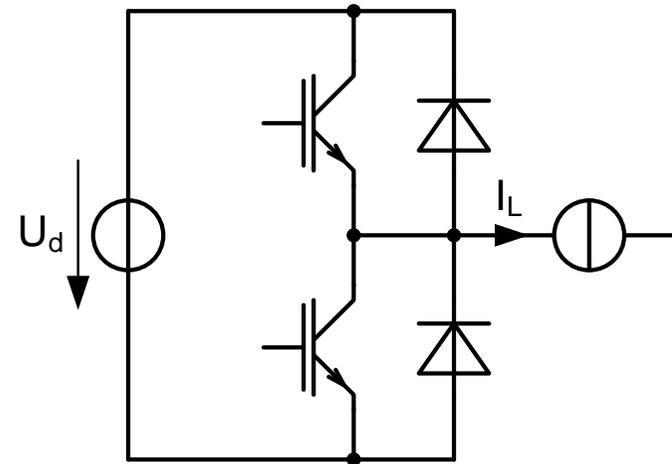
Multilevel Converters - Structure

Commutation Cell – 2-Level



Basic commutation cell for

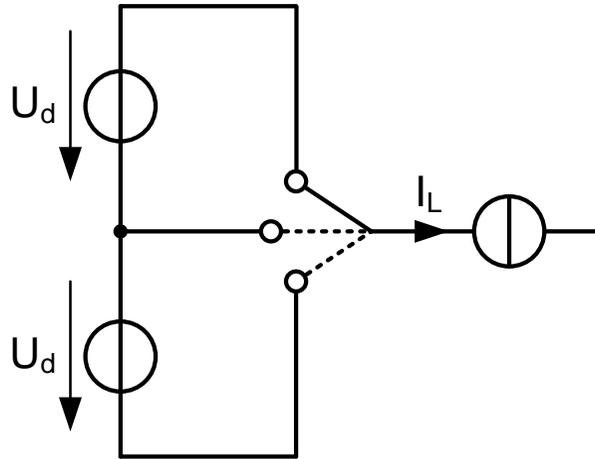
- Unipolar voltage
- and
- Bipolar current



2-Level commutation cell in half-bridge configuration

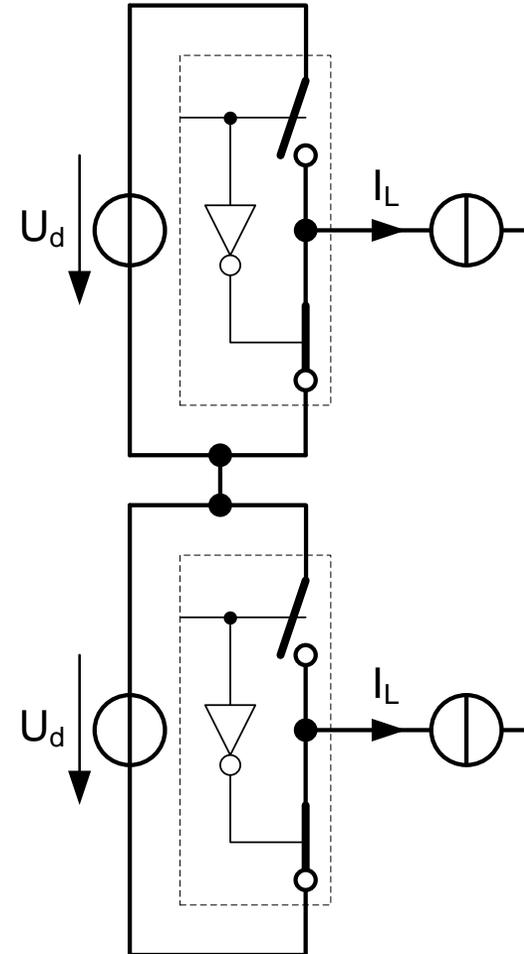
Multilevel Converters - Structure

Commutation Cell – 3-Level NPC



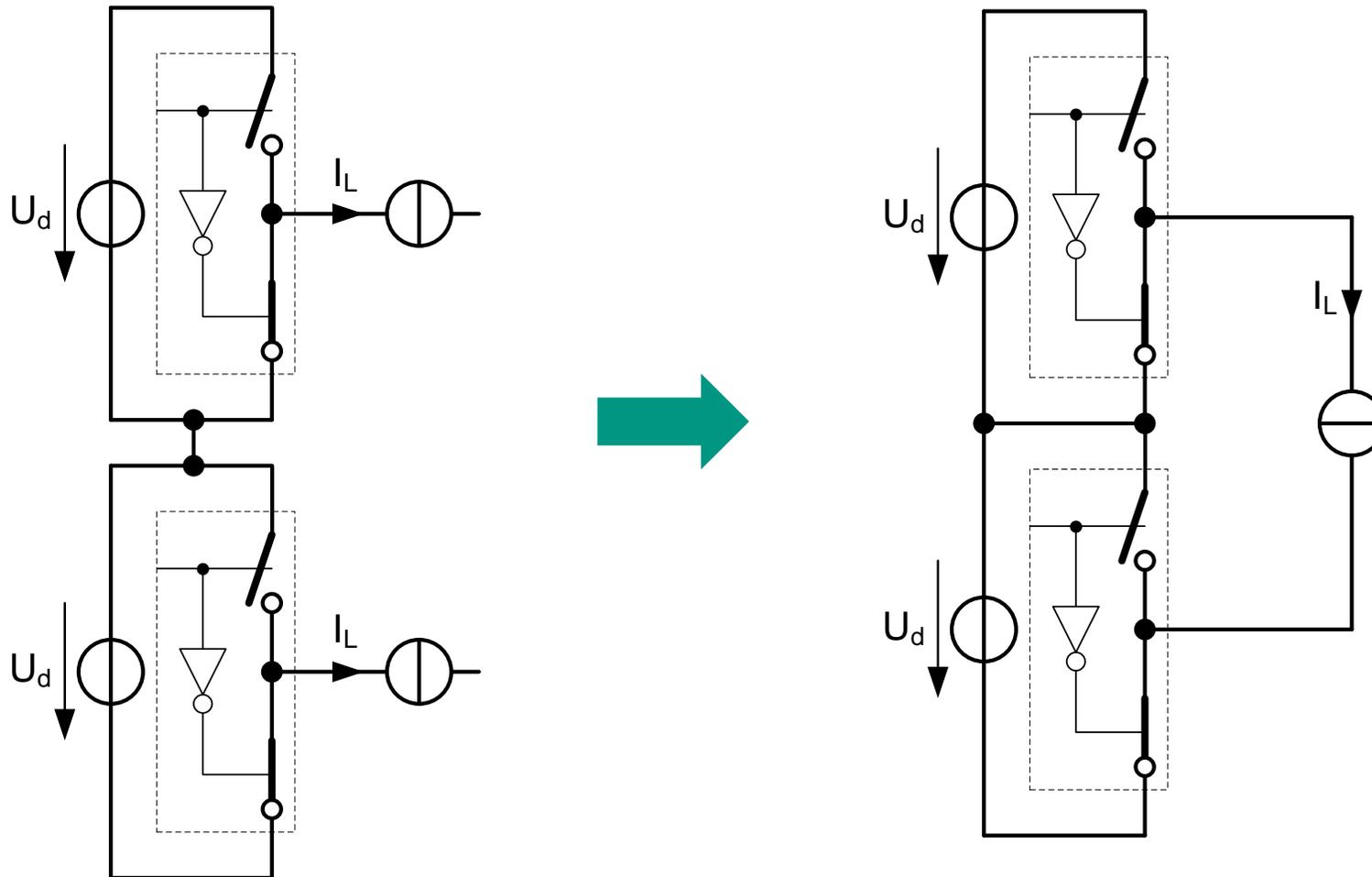
Switching is always between

- Two series connected voltage sources and
- Current source (e.g. inductive load)



Multilevel Converters - Structure

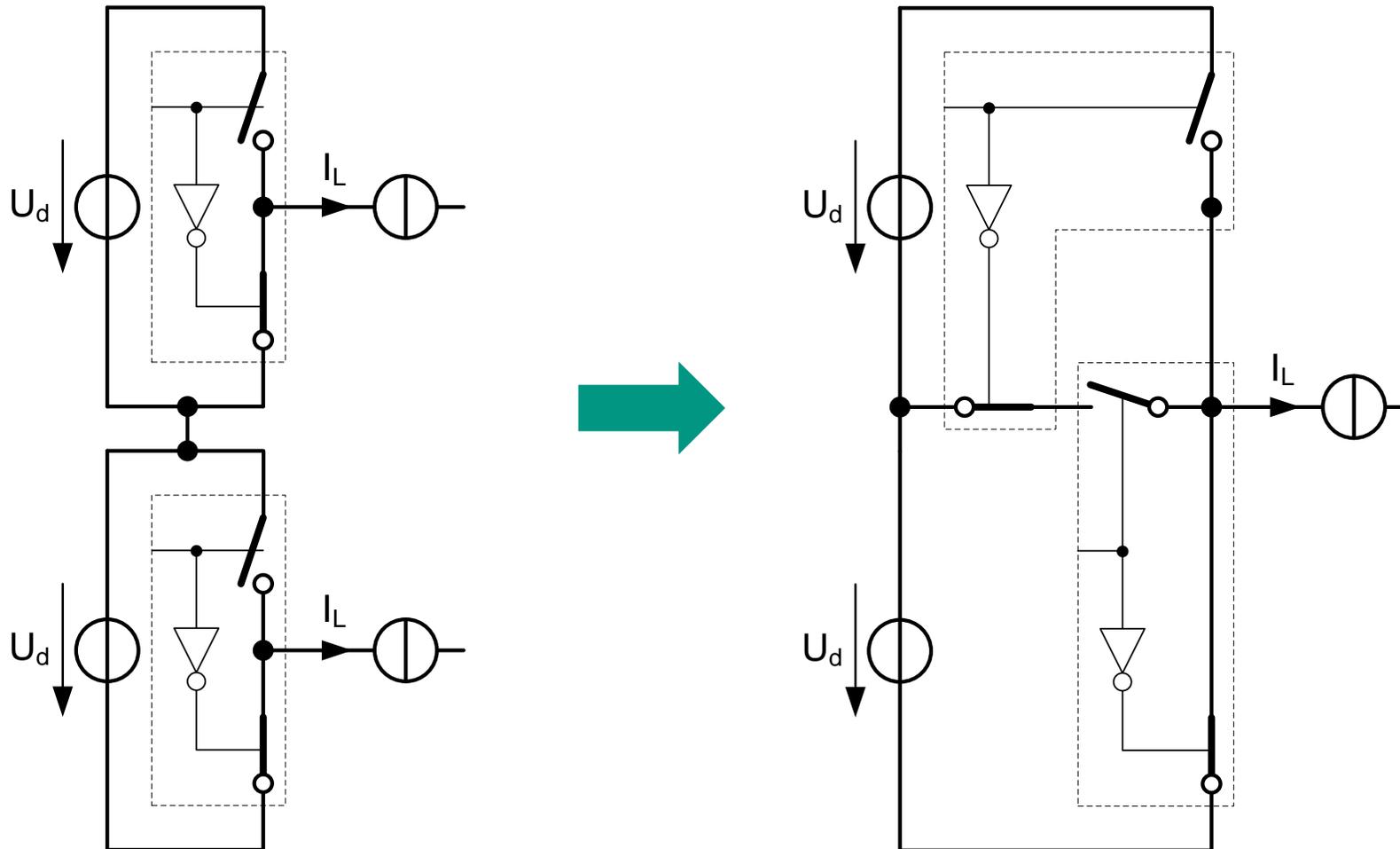
Combination of Commutation Cells → 3-Level NPC



Not suitable for star-connected 3ph load

Multilevel Converters - Structure

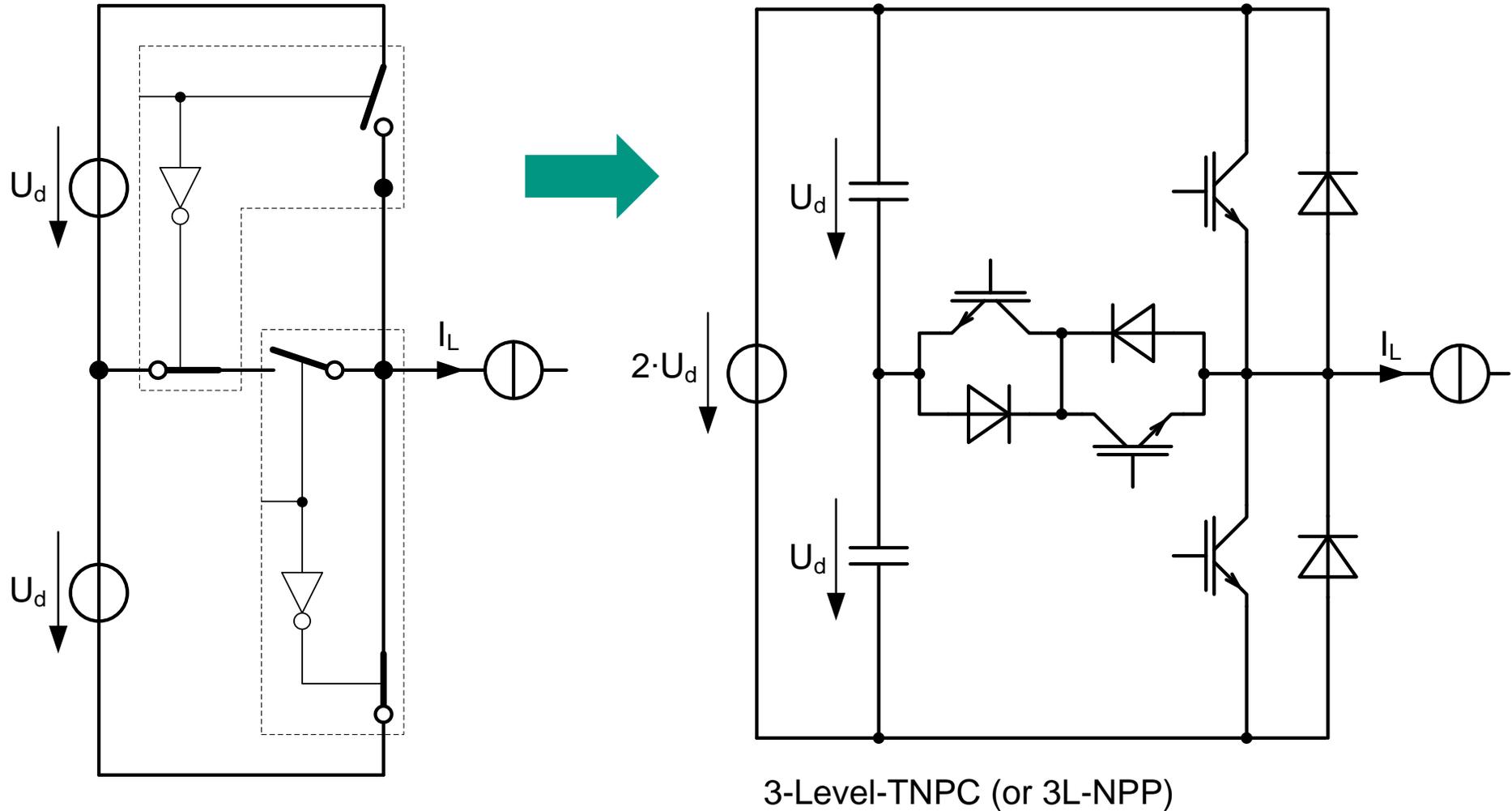
Combination of Commutation Cells → 3-Level-NPC



3-Level-NPC with two commutation cells

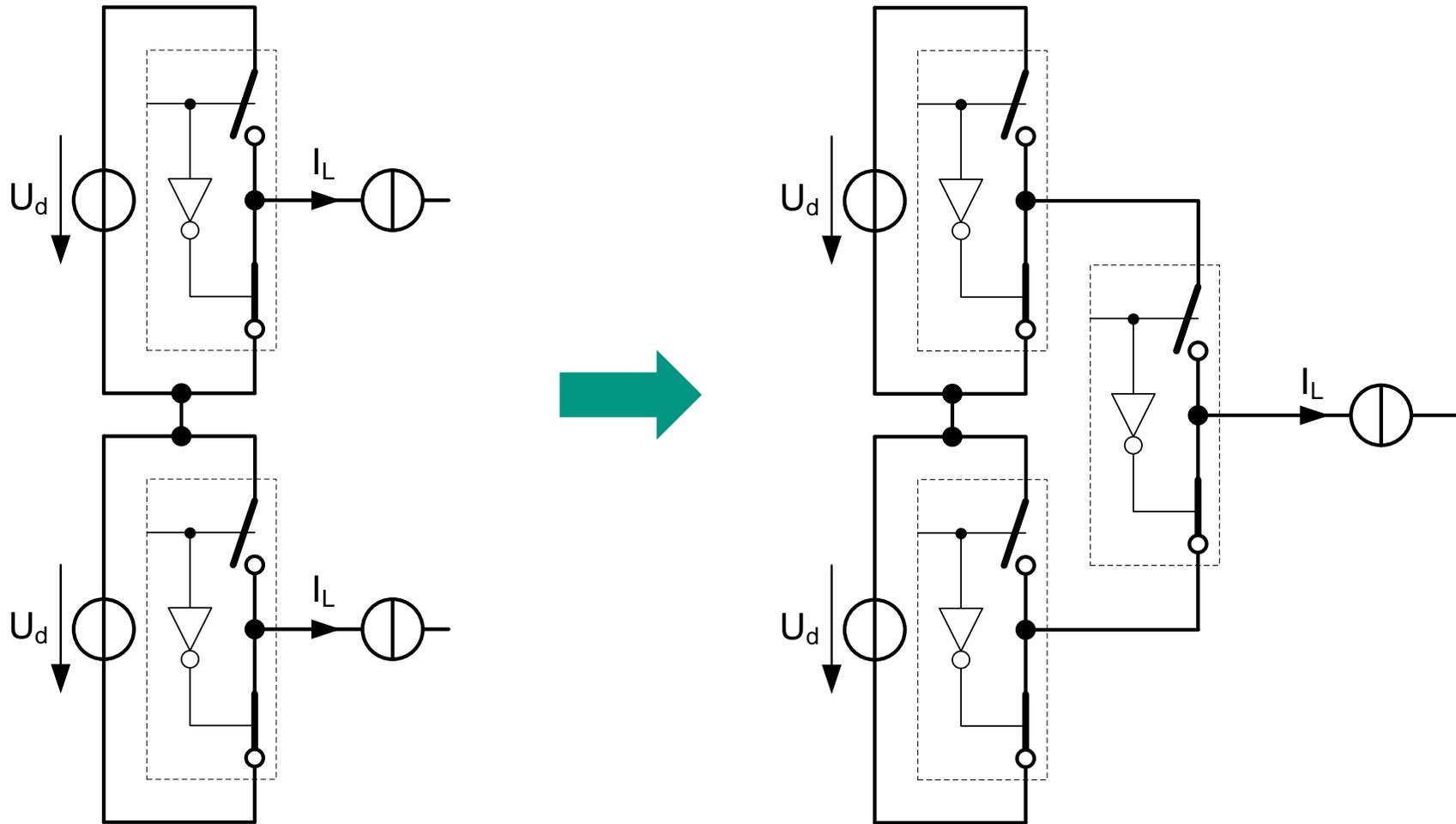
Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3-Level-NPC



Multilevel Converters - Structure

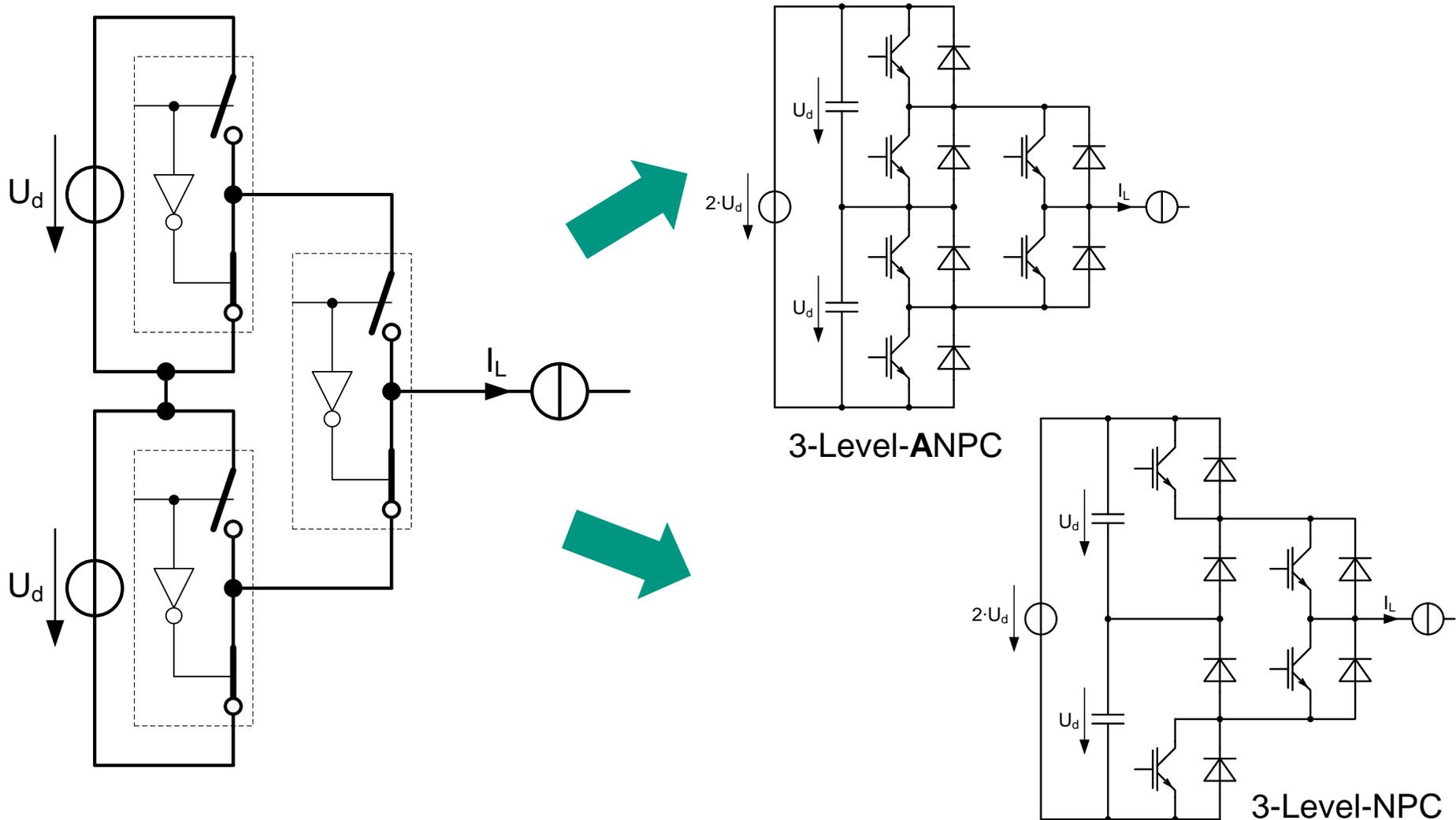
Combination of Commutation Cells → 3-Level-NPC



3-Level-NPC with three commutation cells

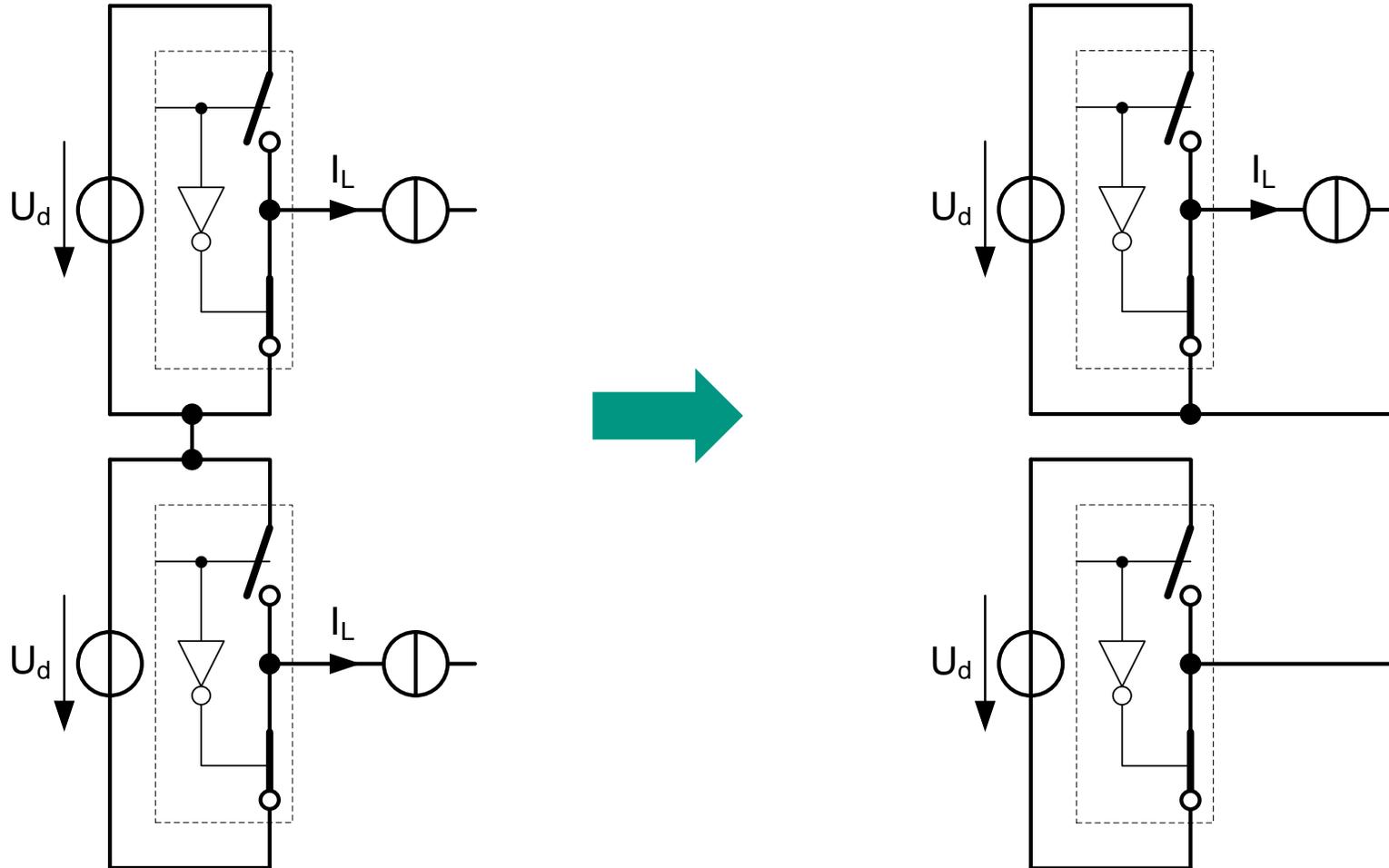
Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3-Level-NPC



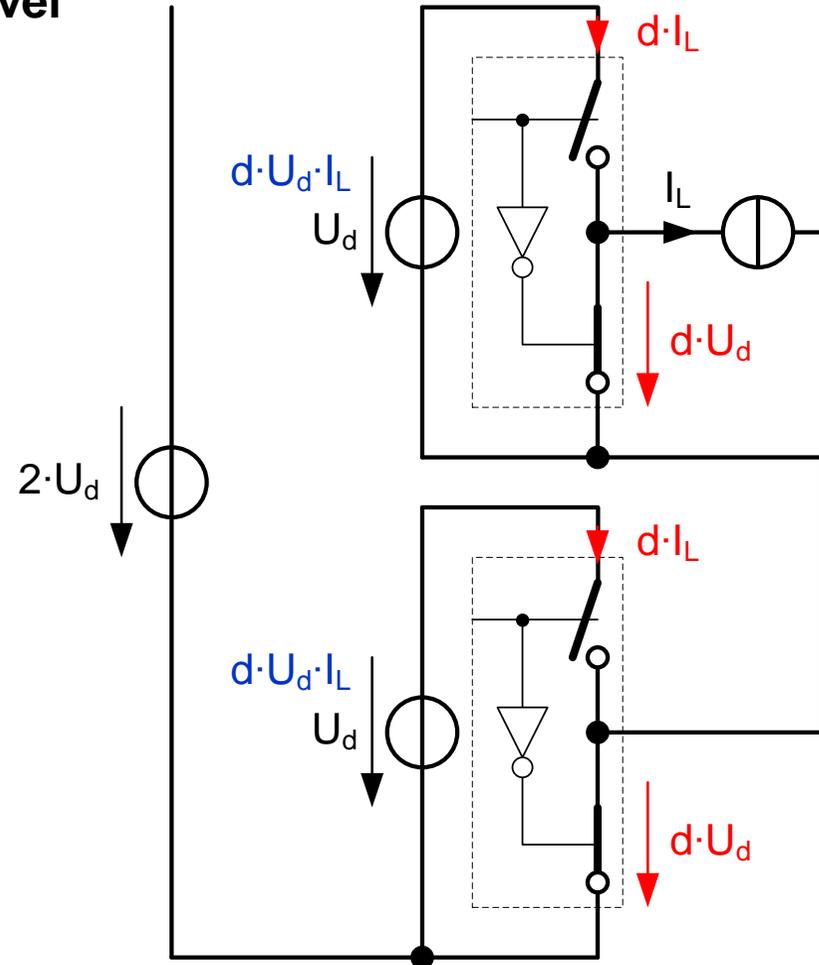
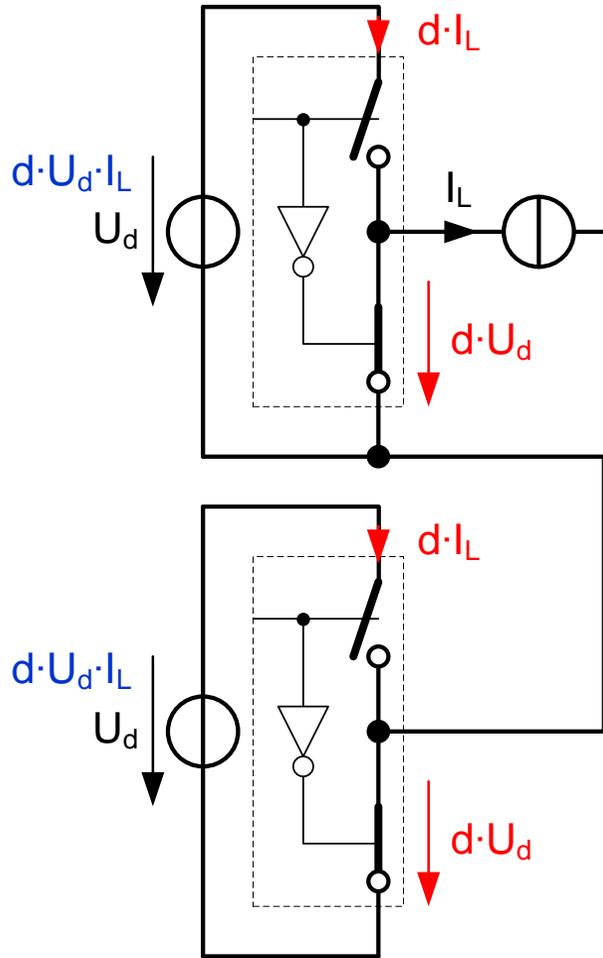
Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3-Level



Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3-Level



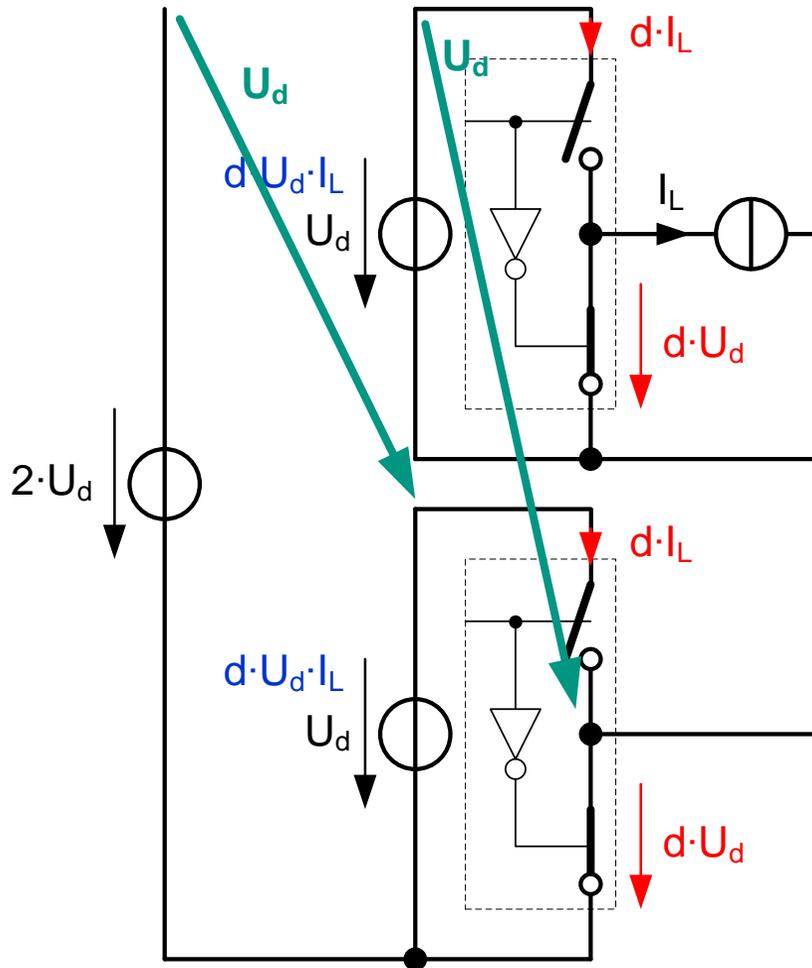
Goal: Load is fed from

- one single DC source and
- one DC source @ avg. power = 0 (capacitor)

Power and Voltages/Currents

Multilevel Converters - Structure

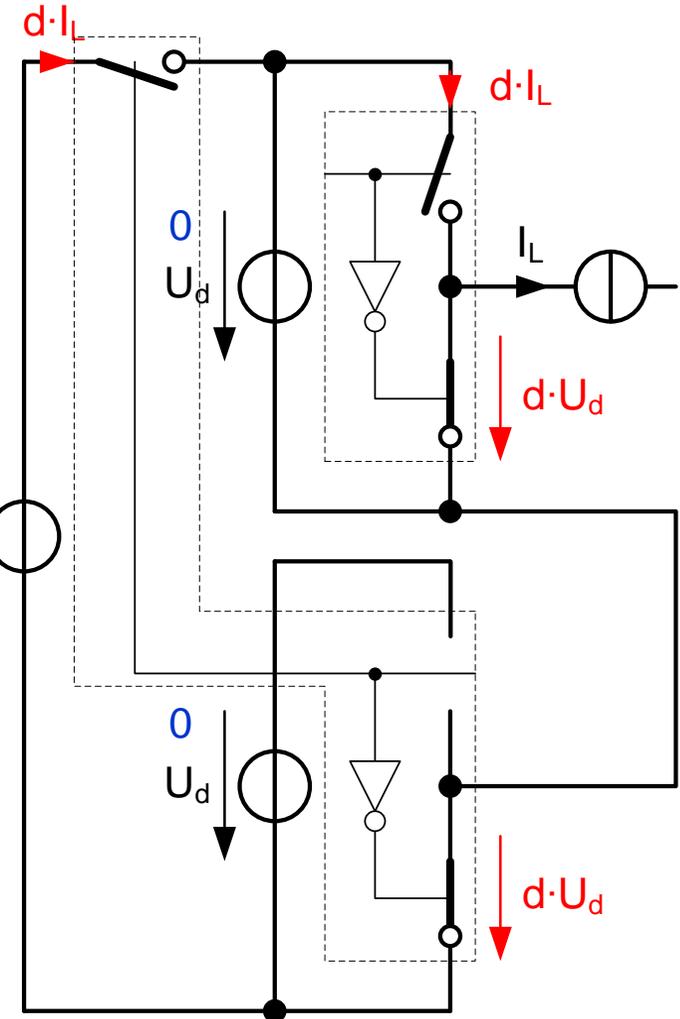
Combination of Commutation Cells → 3-Level



Switch can be shifted to positive DC link rail



$2 \cdot d \cdot U_d \cdot I_L$
 $2 \cdot U_d$

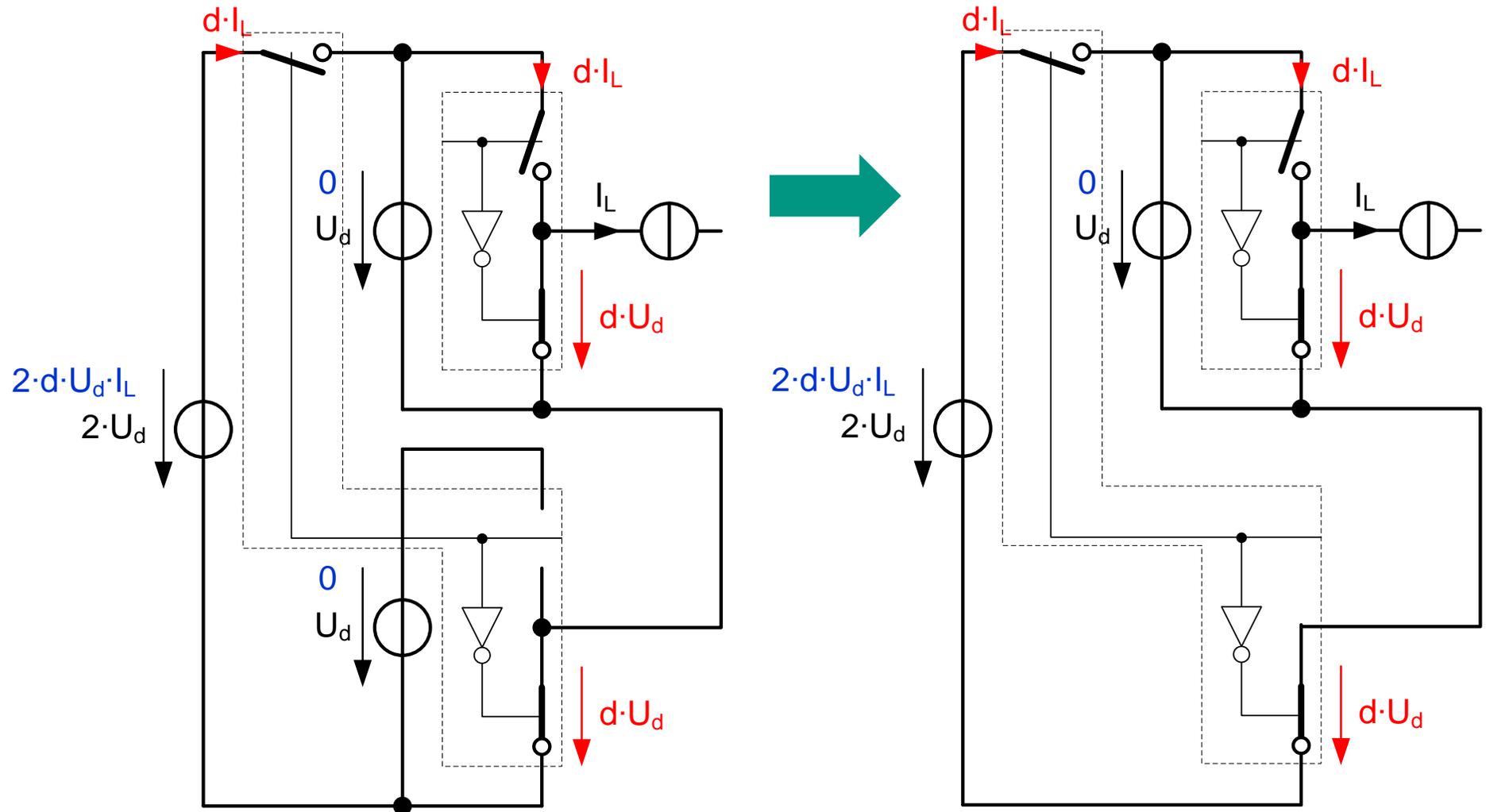


Upper voltage source: avg. power = 0

Lower voltage source: disconnected

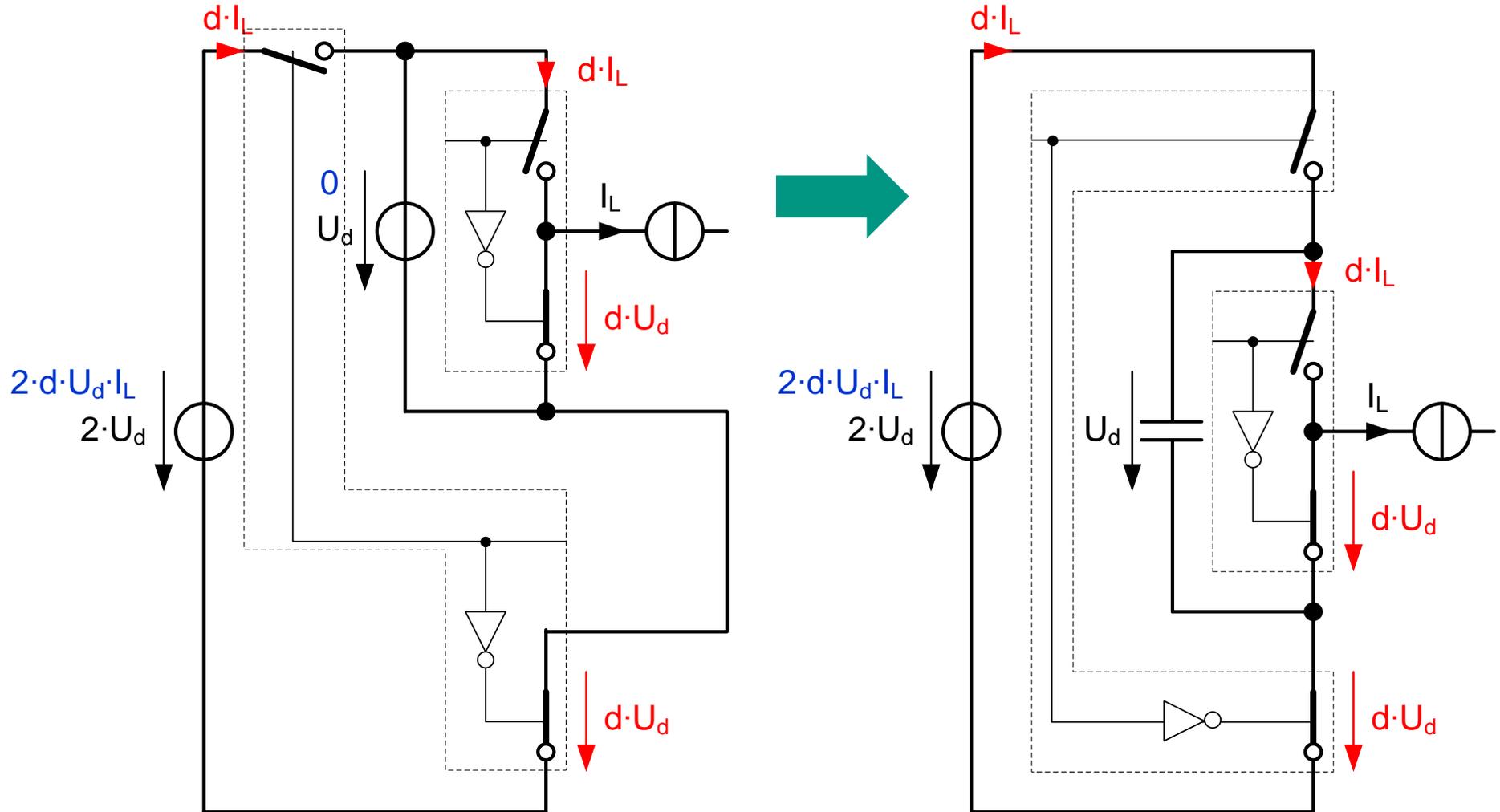
Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3-Level



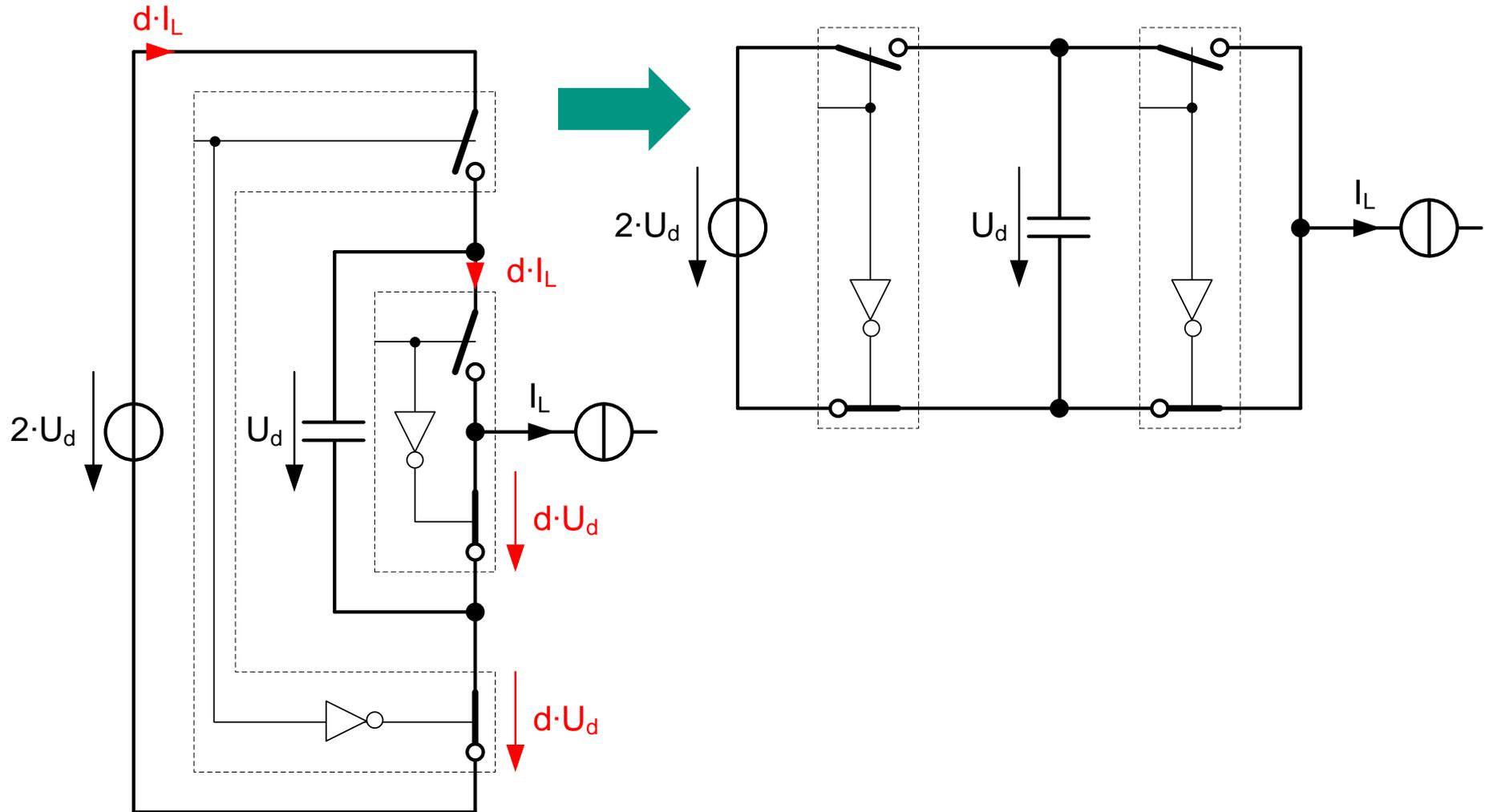
Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3-Level Flying Cap



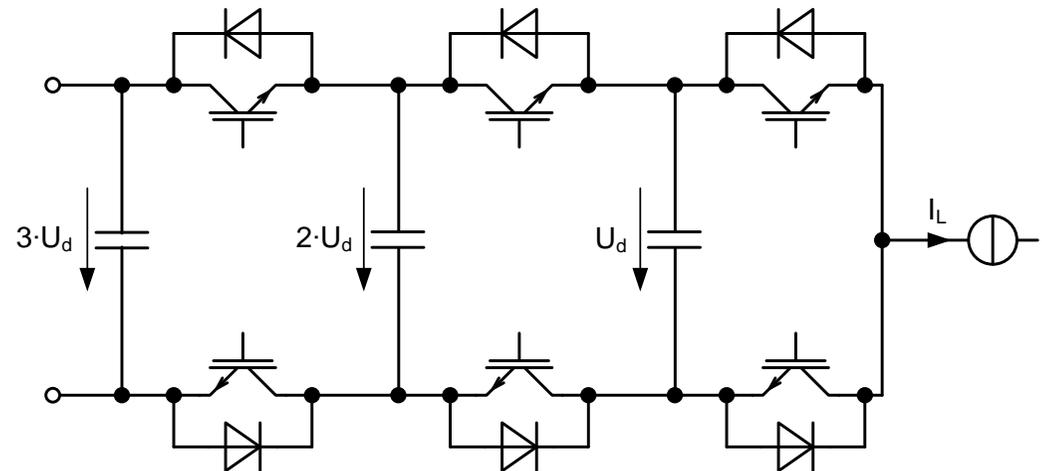
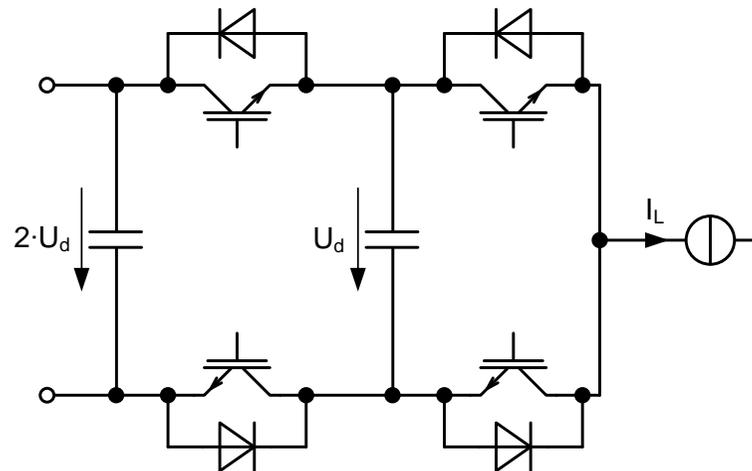
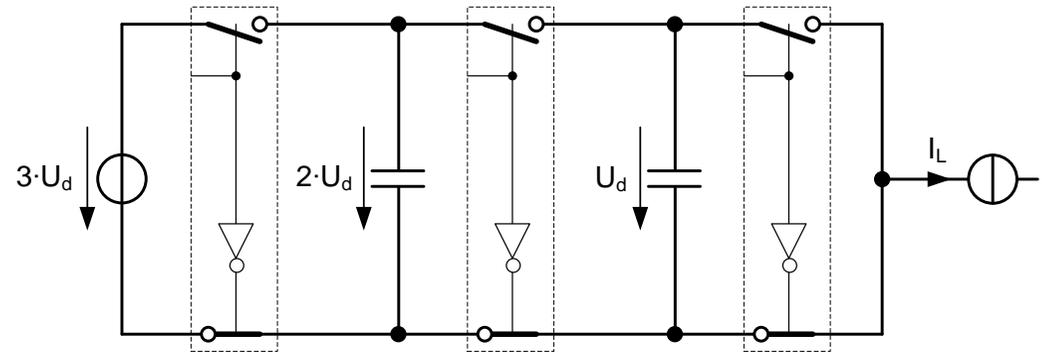
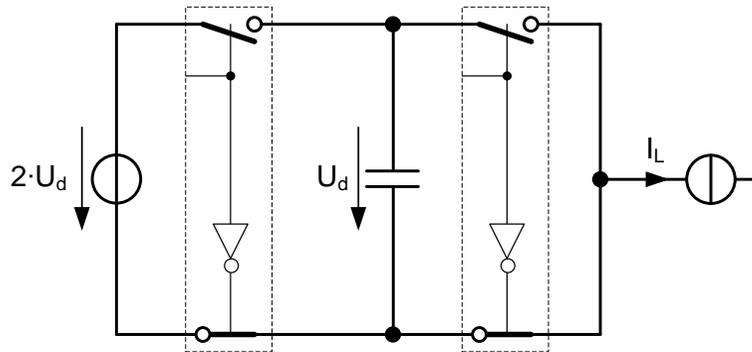
Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3-Level Flying Cap



Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 3(4)-Level Flying Cap

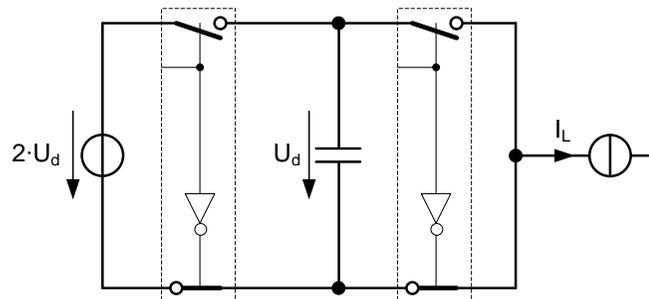


3-Level Flying Cap (3L-FC)

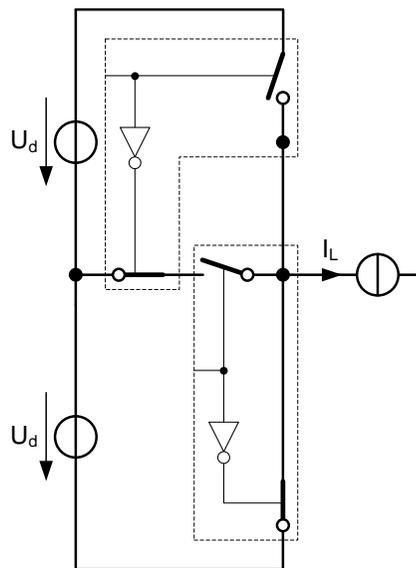
4-Level Flying Cap (4L-FC)

Multilevel Converters - Structure

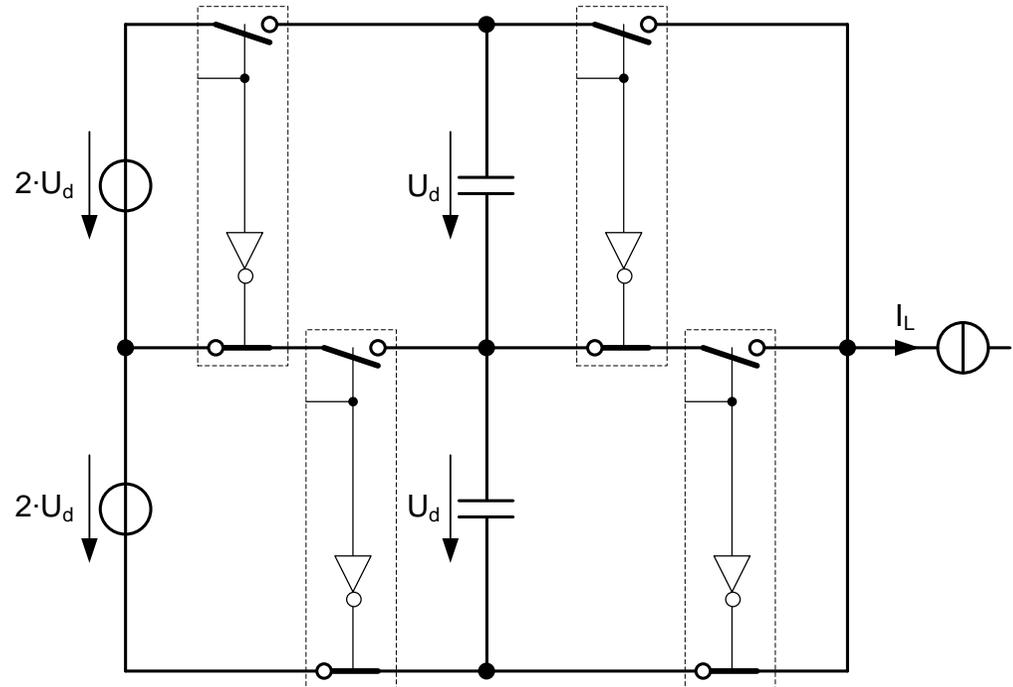
Combination of Commutation Cells → 5-Level



3-Level Flying Cap (3L-FC)



3-Level-TNPC



5-Level Stacked Multicell (5L-SMC)

i.e combination of

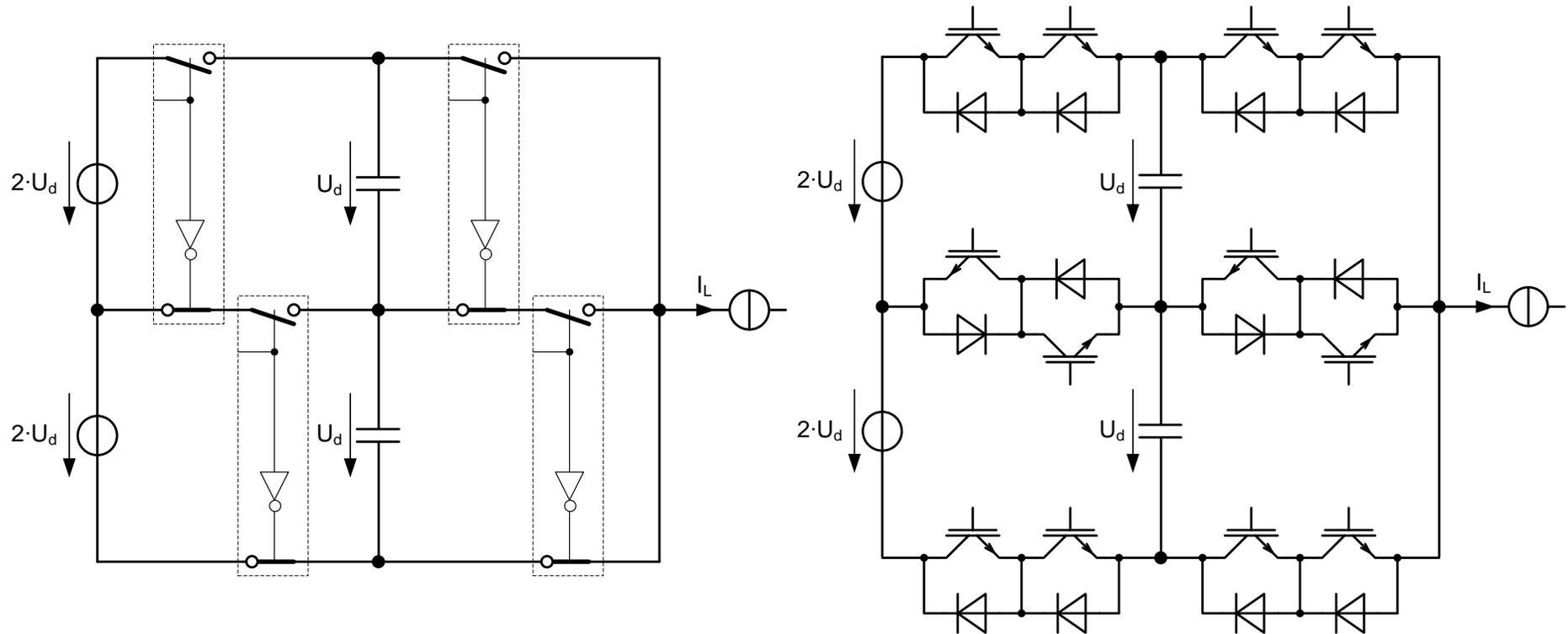
- 3L-Flying Cap

and

- 3L-TNPC

Multilevel Converters - Structure

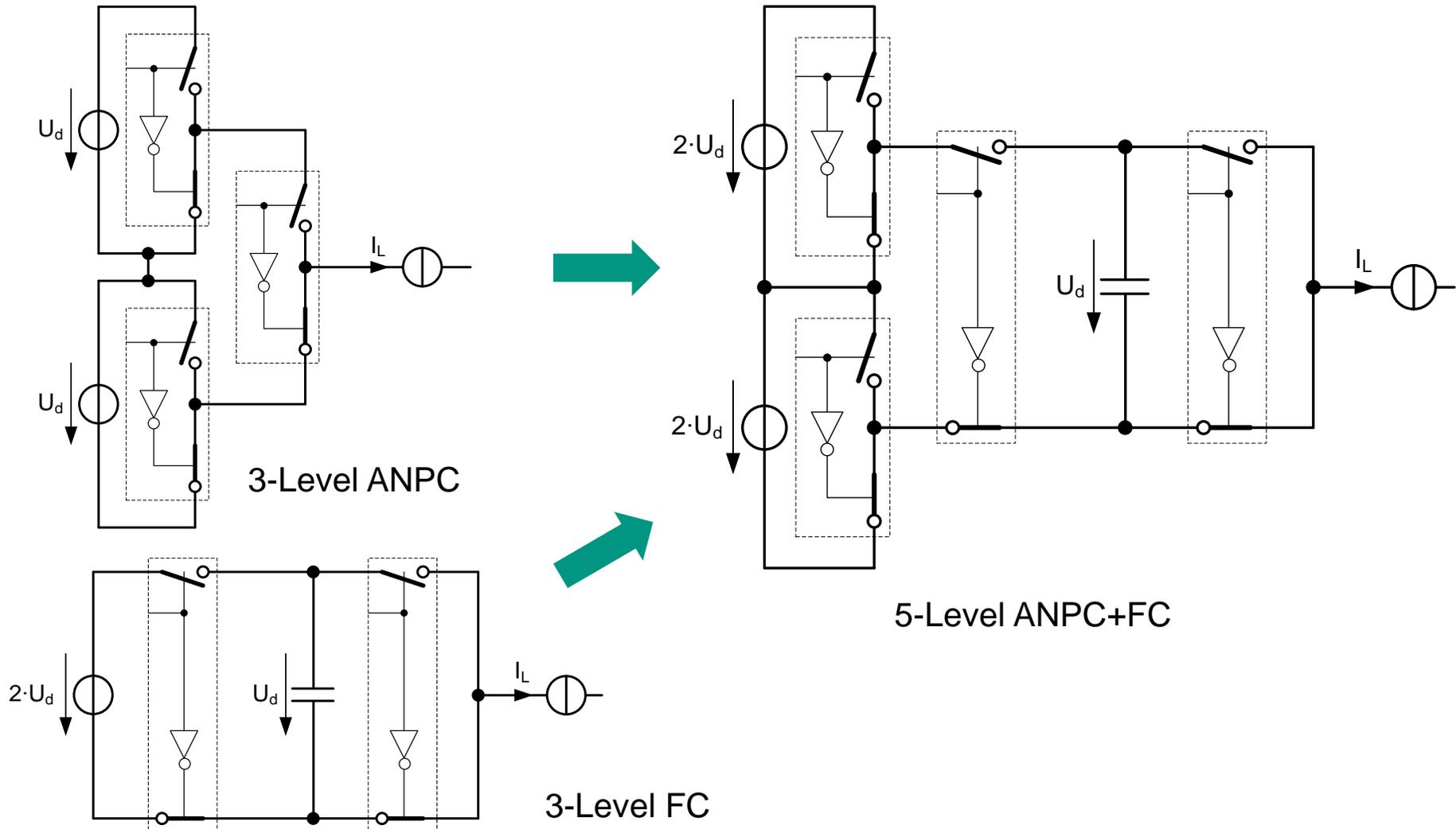
Combination of Commutation Cells → 5-Level SMC



5-Level Stacked Multicell (5L-SMC)

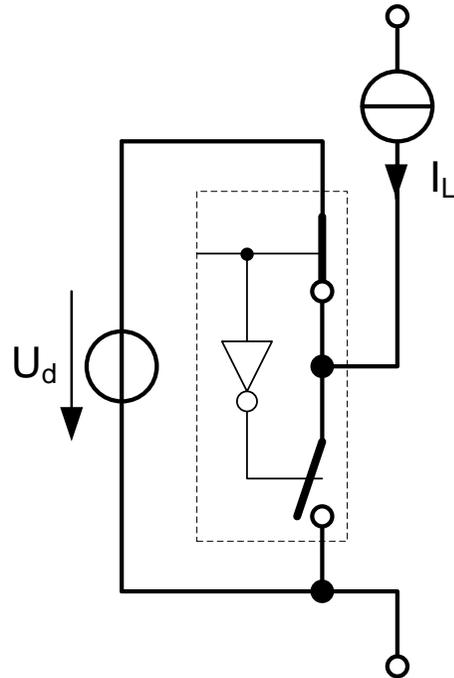
Multilevel Converters - Structure

Combination of Commutation Cells → 5-Level ANPC+FC

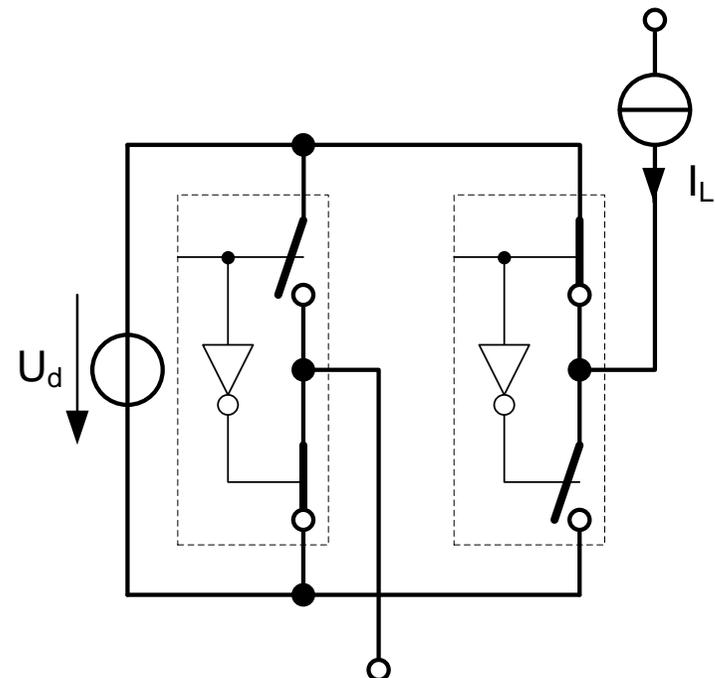


Multilevel Converters - Structure

Commutation Cells \rightarrow n-Level



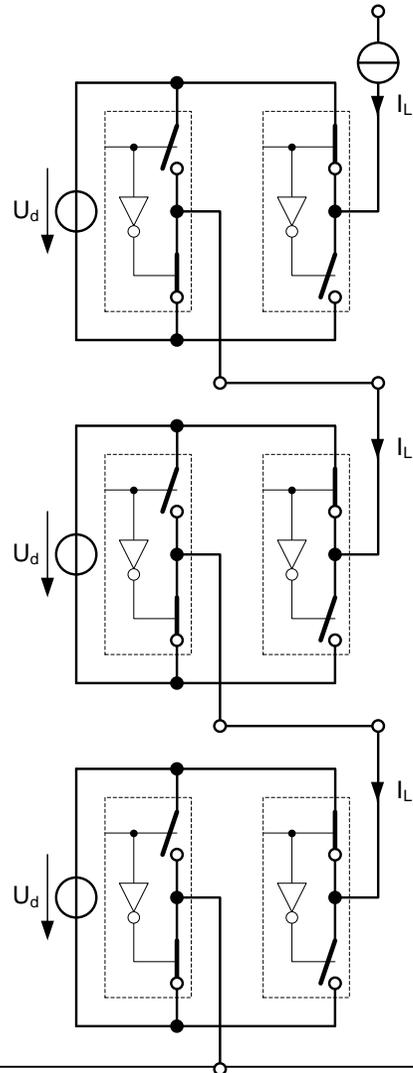
Half-bridge cell
(one commutation cell)



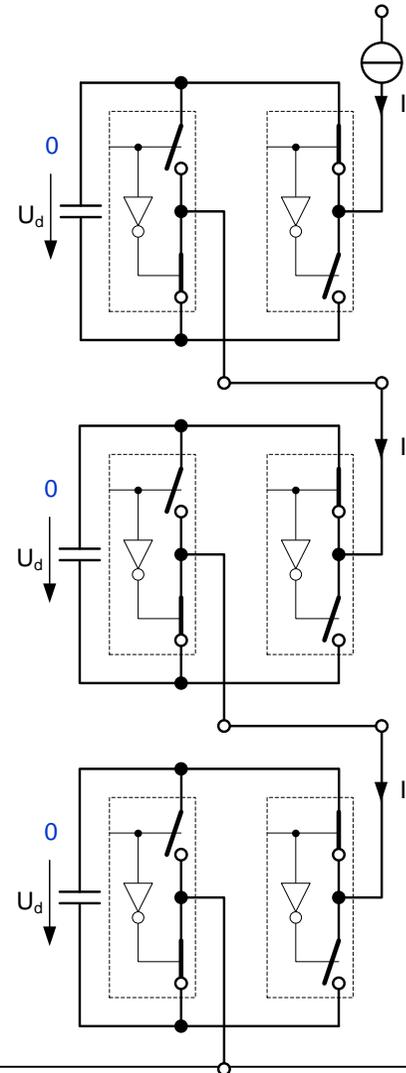
Full-bridge cell
(two commutation cells)

Multilevel Converters - Structure

Series-connection of Commutation Cells → n-Level



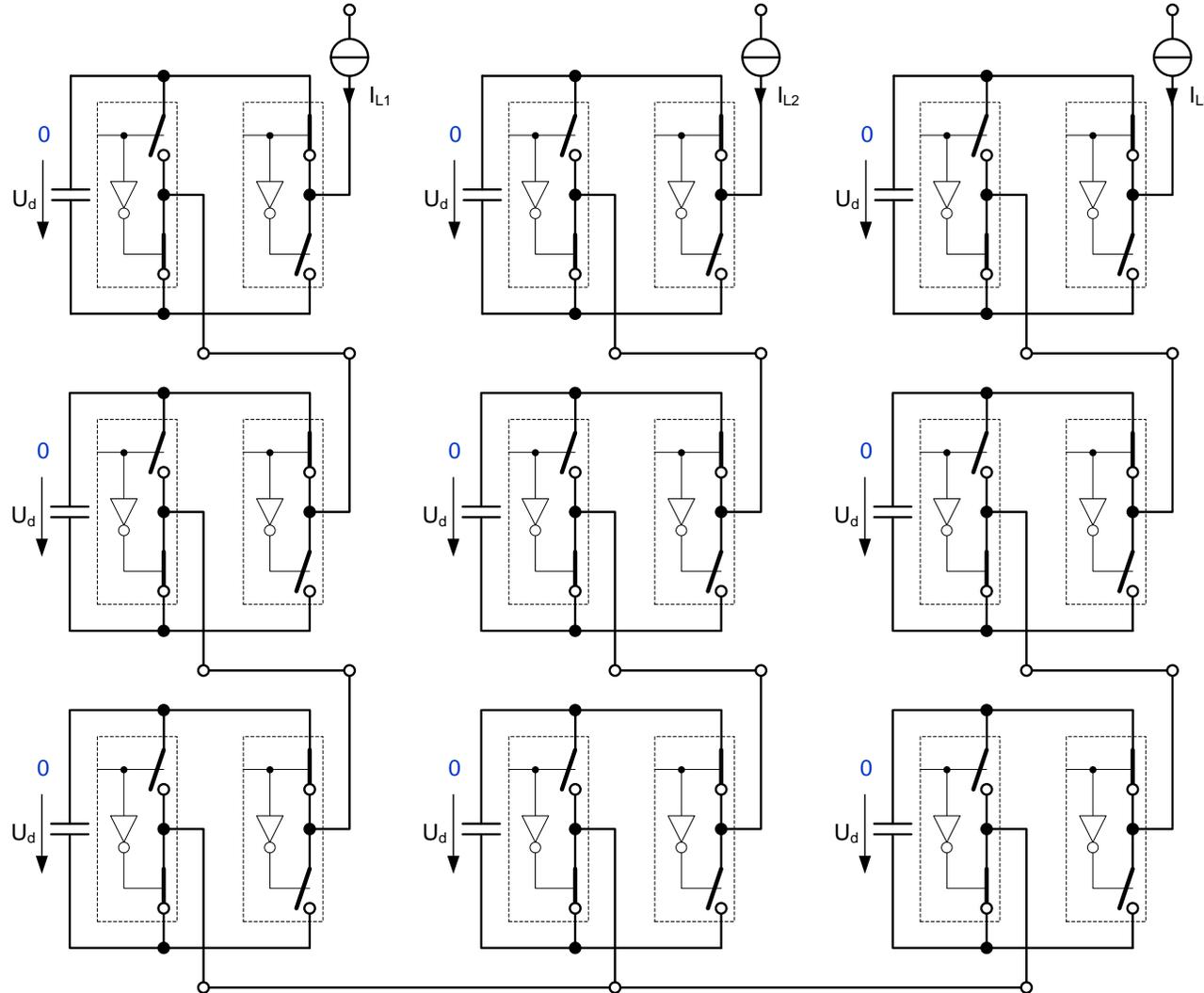
Series-connection of Full-bridge cells



Series-connection of Full-bridge cells with no cell DC power

Multilevel Converters - Structure

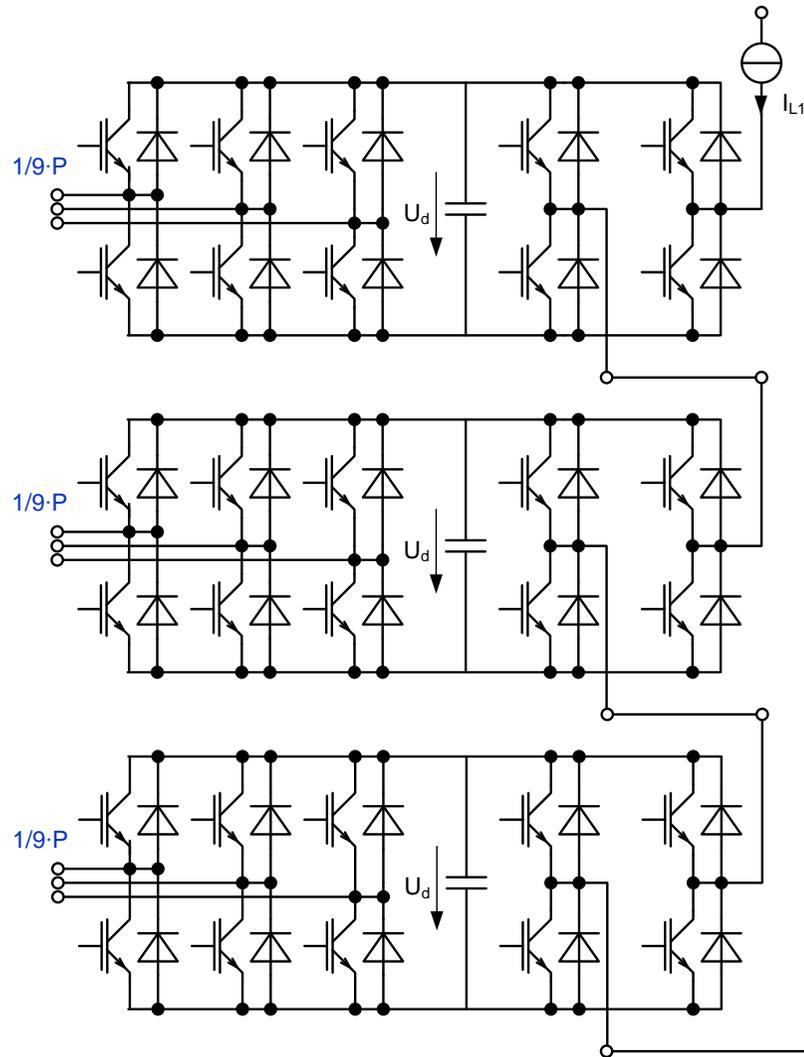
Series-connection of Commutation Cells → n-Level



3ph star-connected
Series-connection of
Full-bridge cells with
no cell DC power
supply

Multilevel Converters - Structure

Series-connection of Commutation Cells \rightarrow n-Level

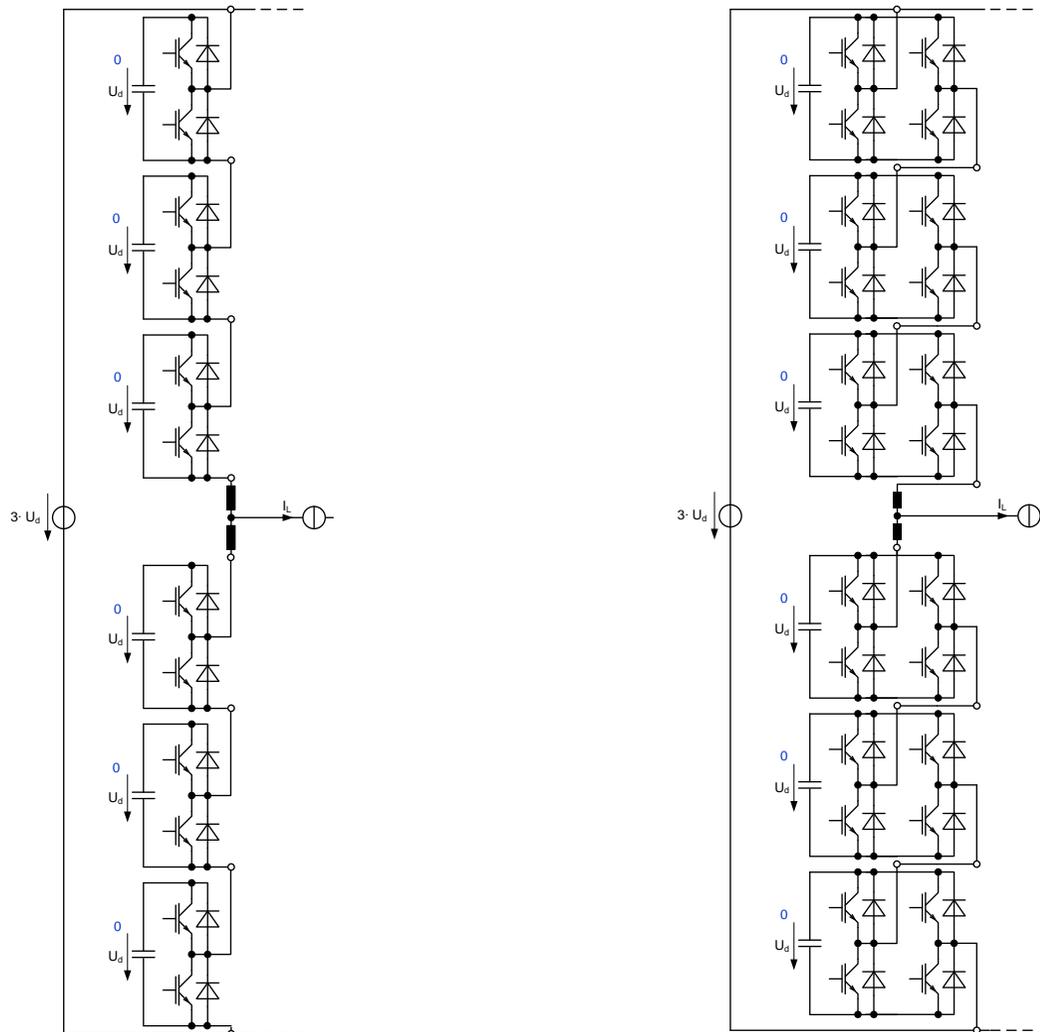


3ph star-connected Series-connection of Full-bridge cells with galvanically isolated cell DC power supply

Series Connected H-Bridge
("Perfect Harmony")

Multilevel Converters - Structure

Series-connection of Commutation Cells \rightarrow n-Level

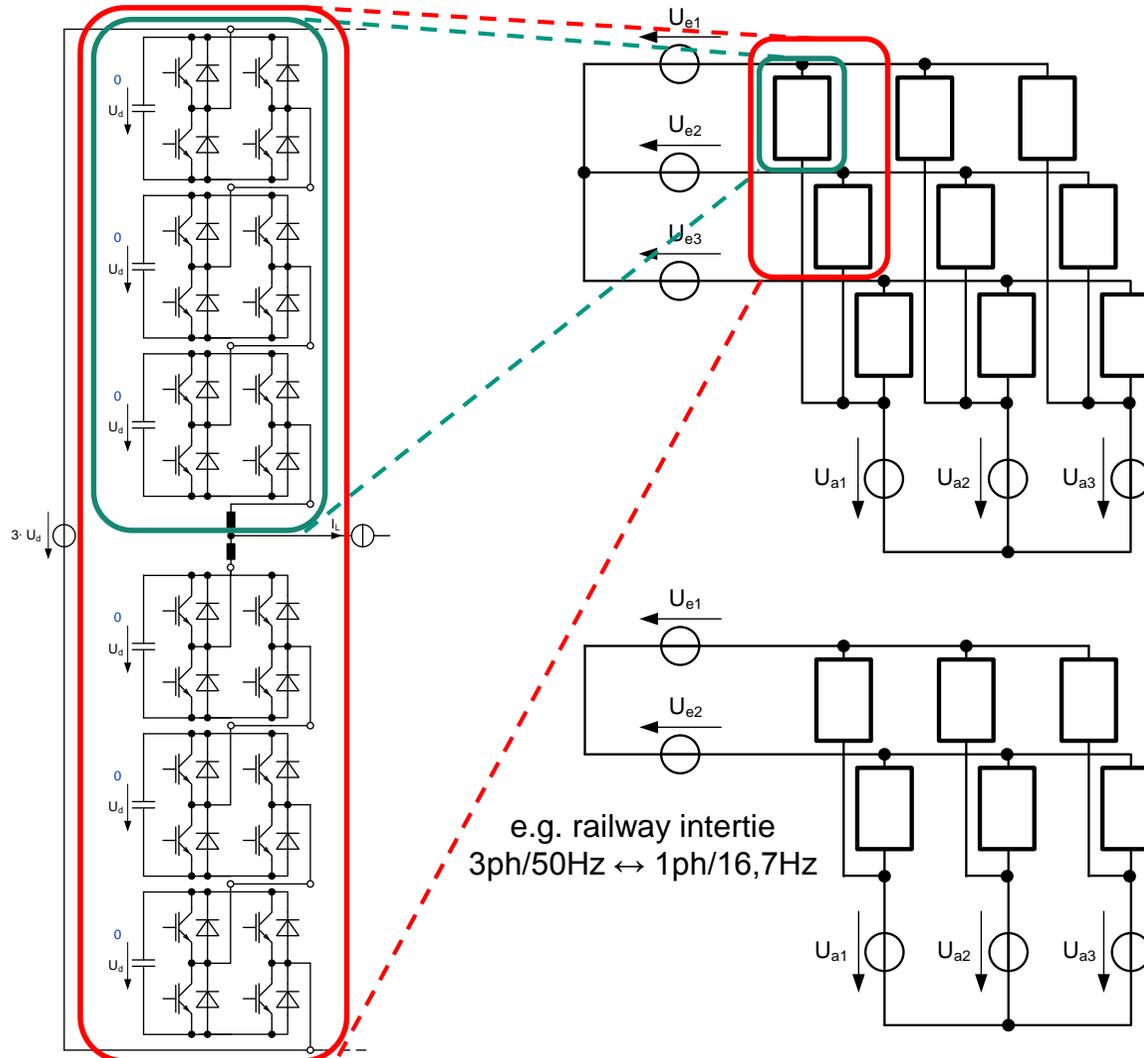


Series-connection of Half/Full-
bridge cells with
no Cell DC power supply
between
every input and output pole
Power is provided/*absorbed* by the
DC side.

Modular Multilevel Converters
("M2C", "MMC")

Multilevel Converters - Structure

Series-connection of Commutation Cells → n-Level



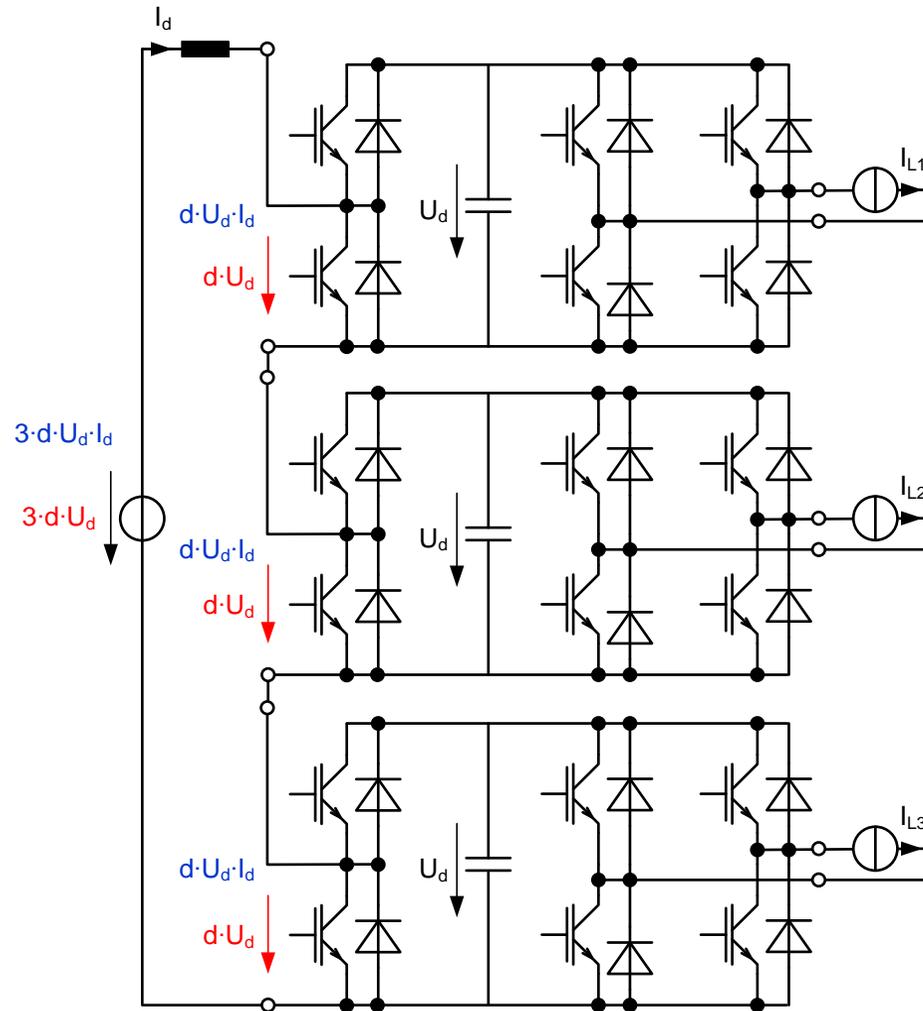
e.g. grid intertie
3ph/50Hz ↔ 3ph/60Hz

Series-connection of Half/Full-bridge cells with **no Cell DC power supply** between every input and output pole
Energy is provided/*absorbed* by any AC/DC side.

Modular Multilevel Converters
("M2C", "MMC", "M3C")

Multilevel Converters - Structure

Series-connection of Commutation Cells → n-Level



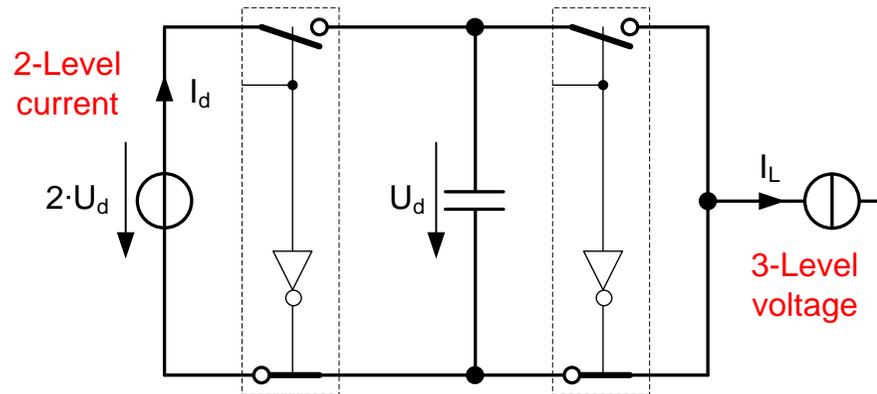
Series-connection of Half-bridge cells with **Cell DC power load/supply** (e.g. multiphase motor) to DC side.

Power is provided/absorbed by the common DC side (e.g battery).

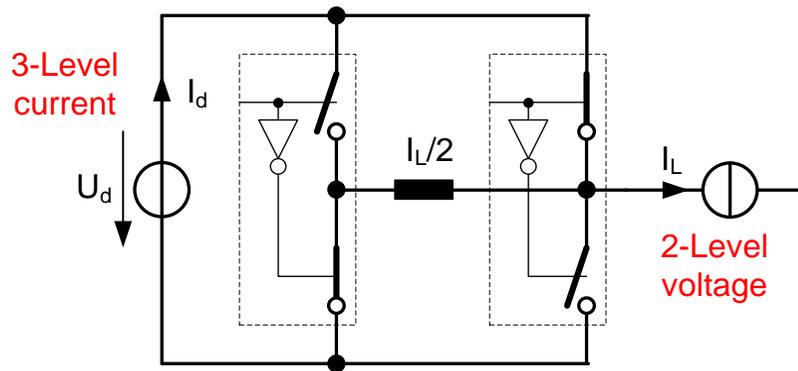
Modular High Frequency Converter (“MHF”)

Multilevel Converters - Structure

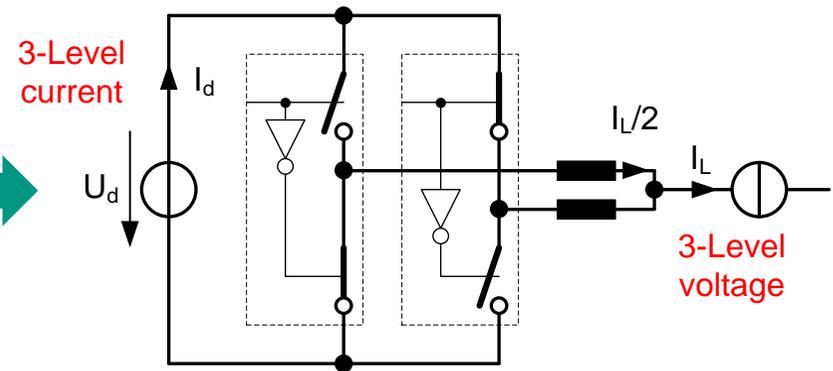
Parallel Connection of Commutation Cells



“Duale”
Schaltung

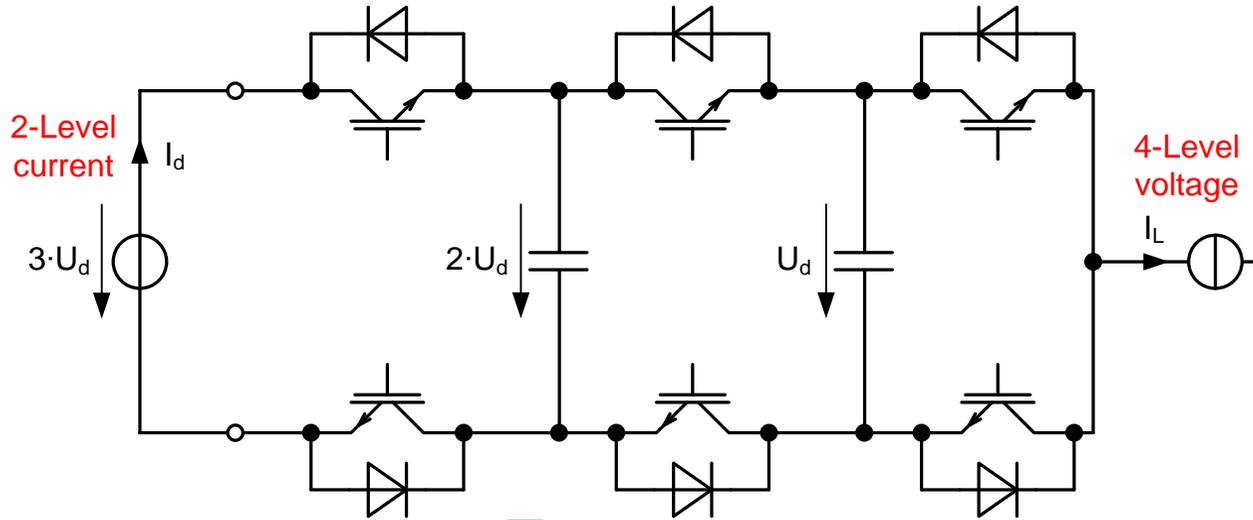


Parallel Multicell configuration

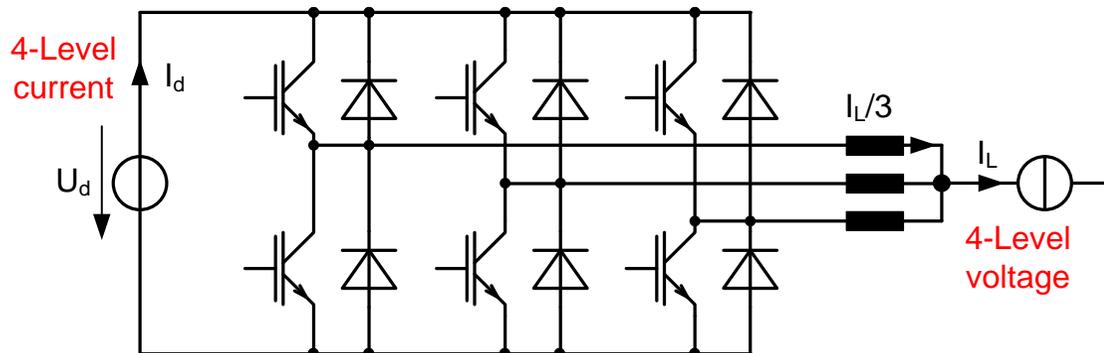


Multilevel Converters - Structure

Parallel Connection of Commutation Cells

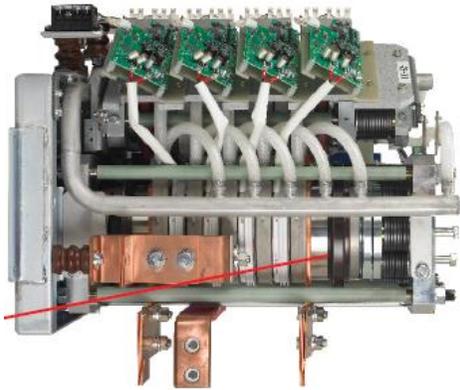


4-Level Flying Cap configuration, i.e. 4 voltage levels at the output

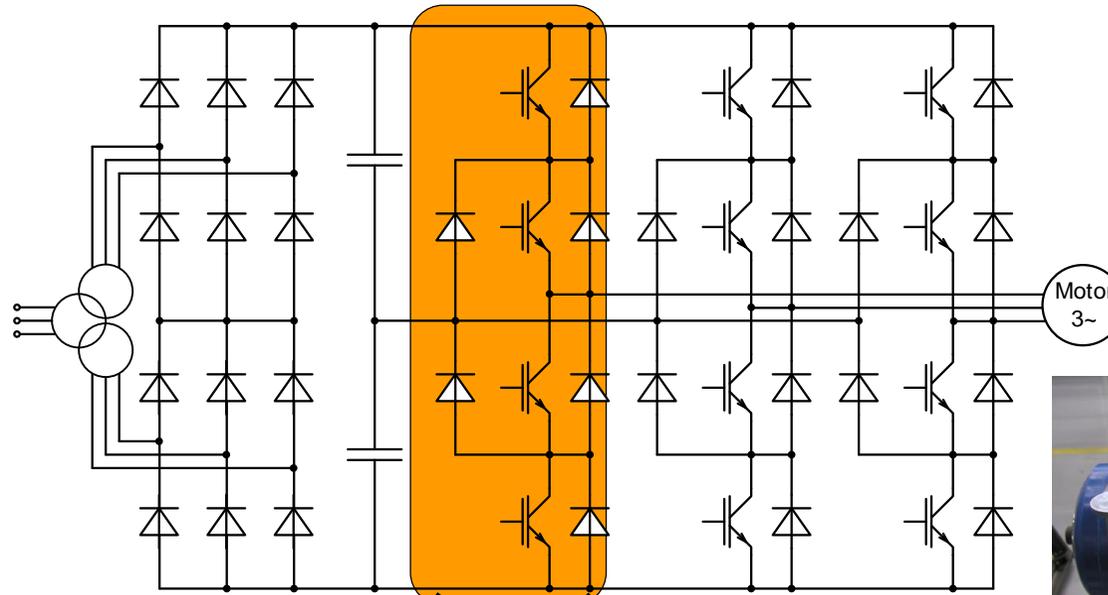


4-Level Parallel Multicell configuration with three cells, i.e. 4 voltage levels at the output

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



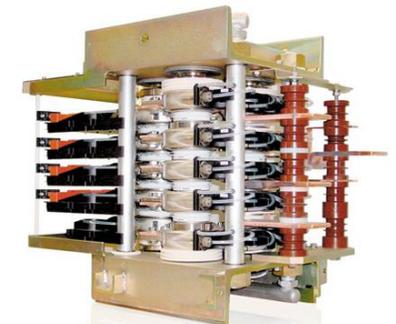
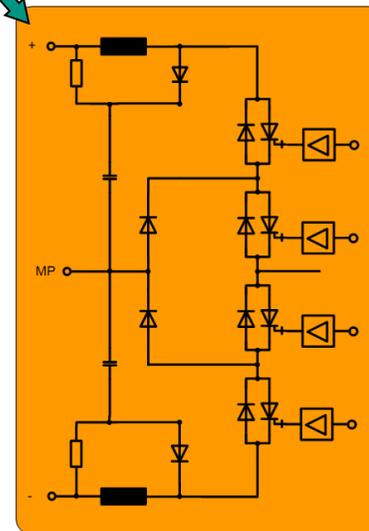
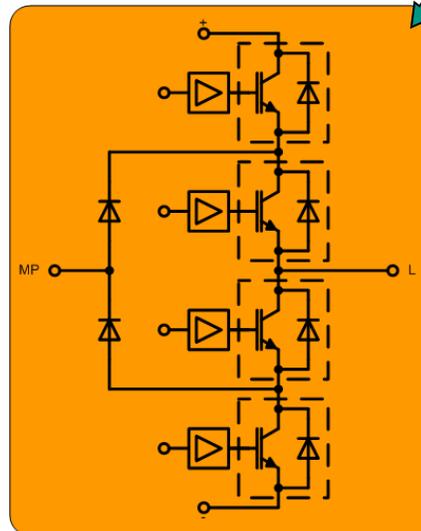
PP-IGBT-Phasenbaustein (TMEIC)



IGCT-Phasenbaustein (Siemens)



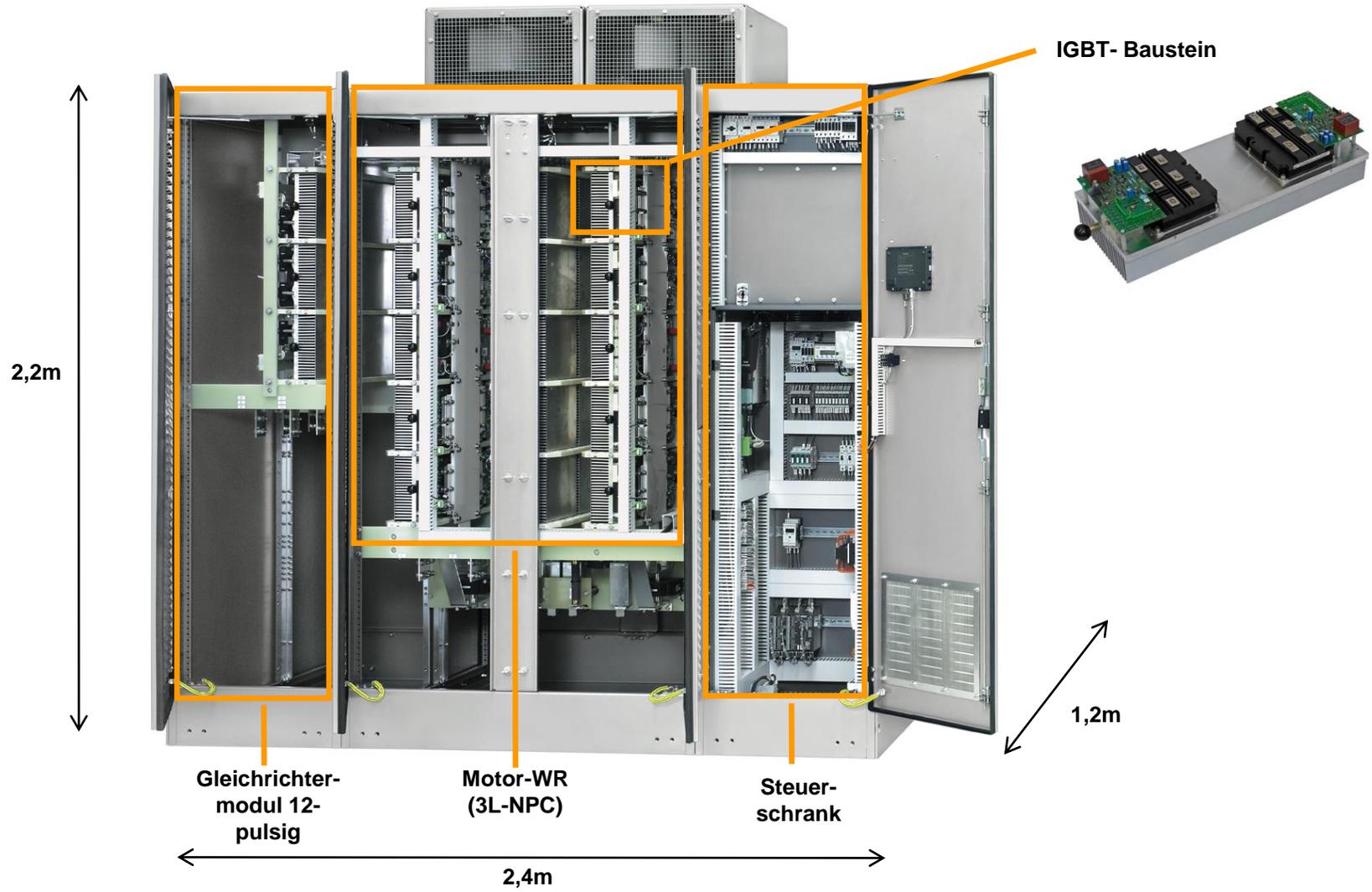
IGBT-Baustein (Siemens)



IGCT-Phasenbaustein (ABB)

Quelle: ABB, Siemens, TMEIC

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

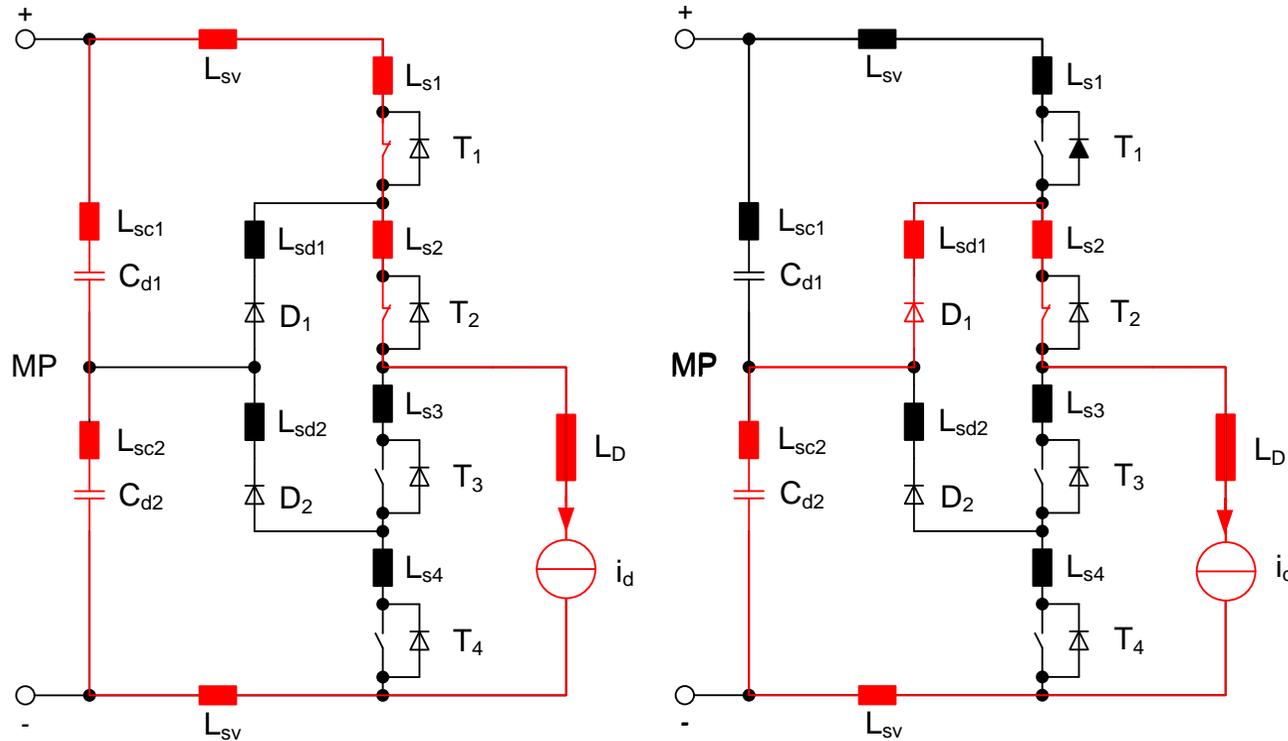


3L-NPC Umrichter: 4,16kV, 600A, 4,3MVA, luftgekühlt (Siemens SINAMICS GM150)

Quelle: Siemens

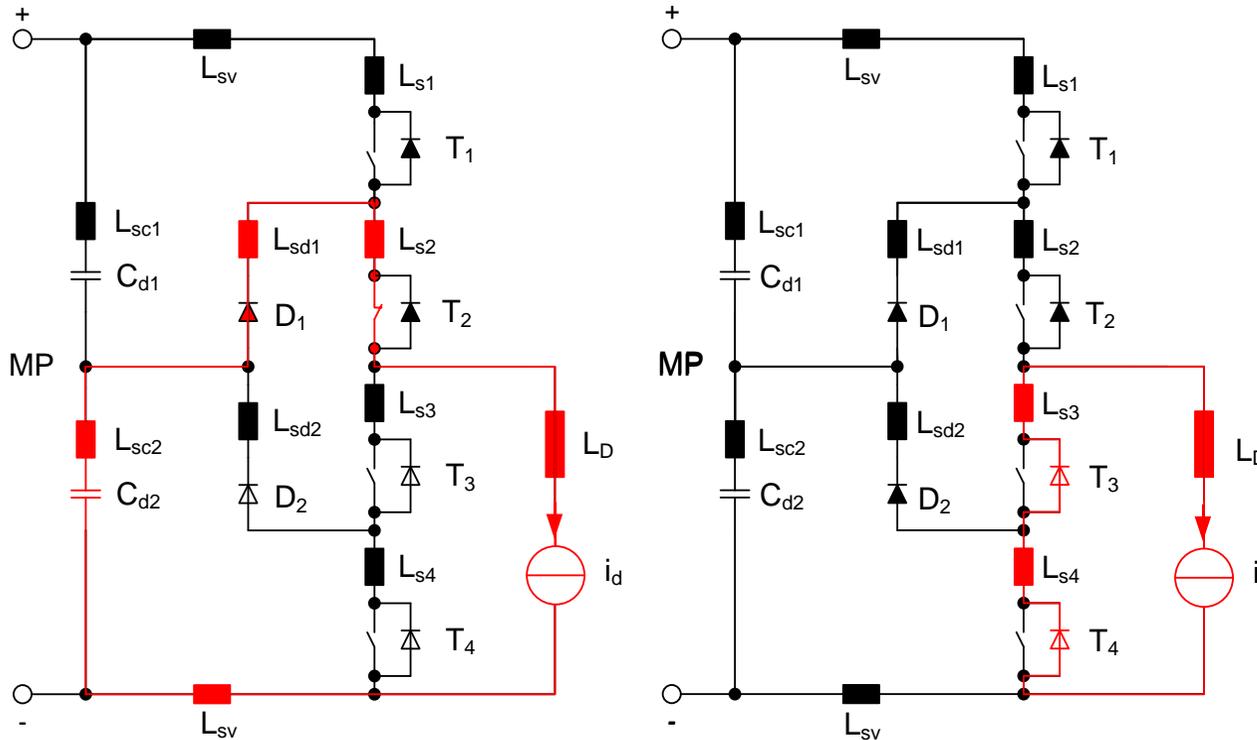
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC

Kommutierung im äußeren Kommutierungspfad: $T_1 \rightarrow D_1$

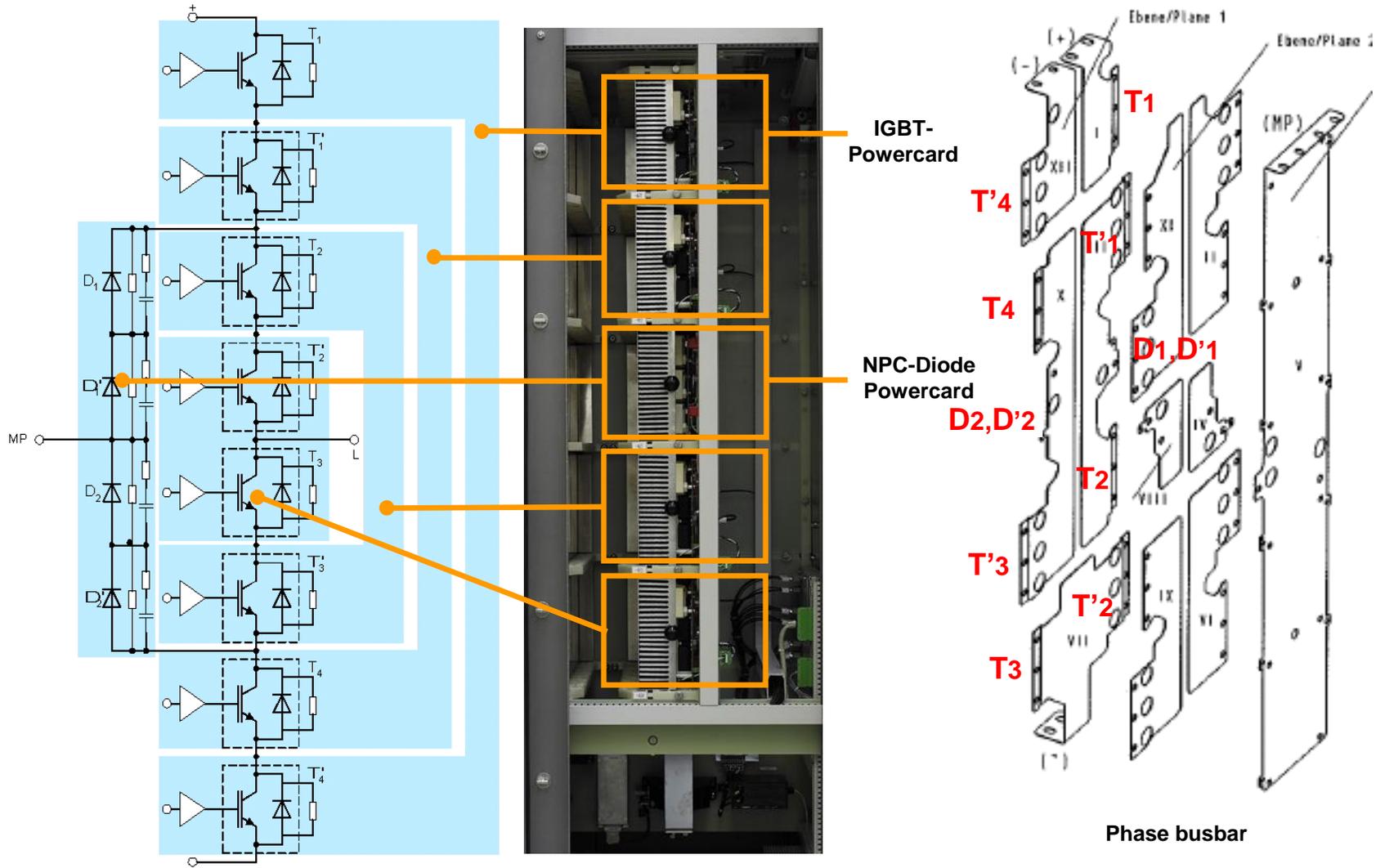


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC

Kommutierung im inneren Kommutierungspfad: $T_2, D_1 \rightarrow T_3, T_4$

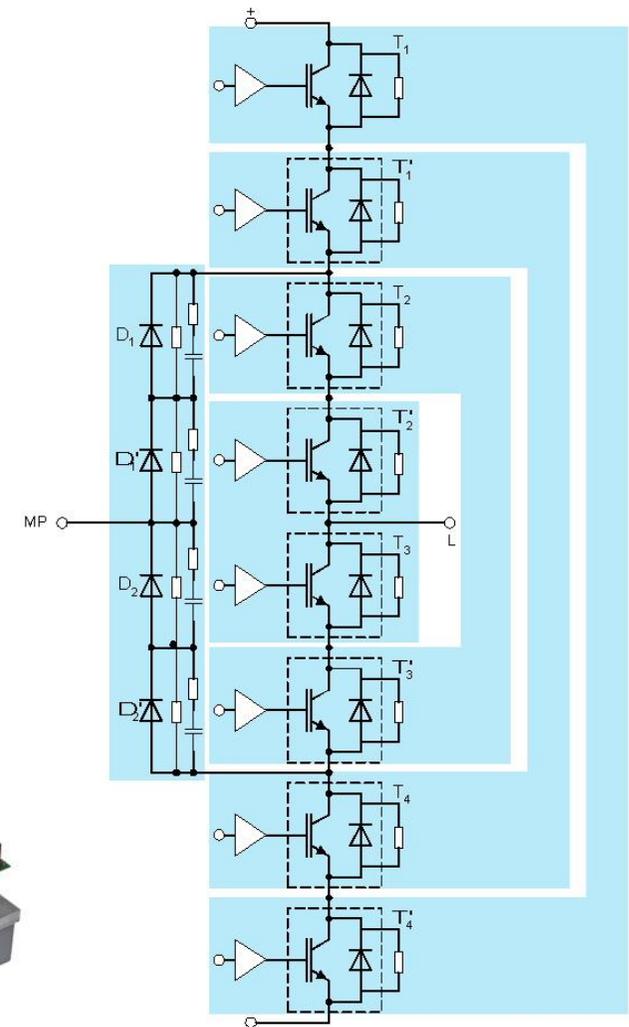
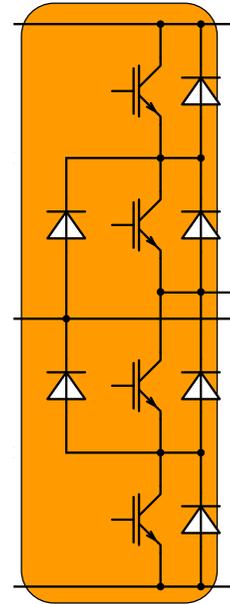
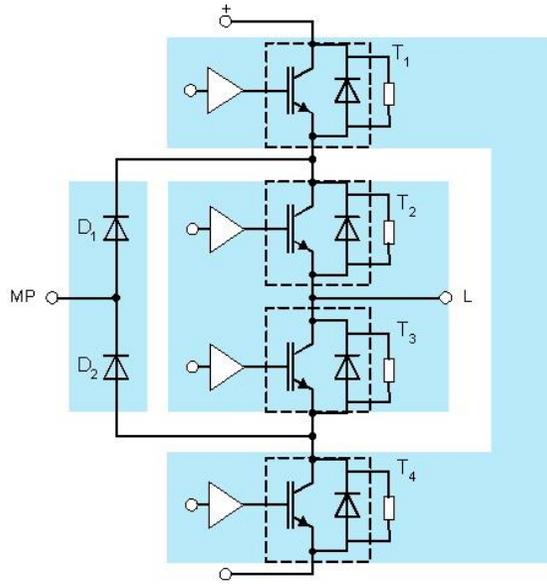


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 3L-NPC



Source: Siemens

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



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)

- $U_{mot} = 4,16kV; 6,6kV; 7,2kV$
- $U_d = 5,9kV; 9,2kV; 10kV$
- $U_{CES} = 2 \times 3,3 kV; 2 \times 4,5kV; 2 \times 6,5kV$
- $I_{Cnom} = 1500A; 1200A; 750A$

Quelle: Siemens

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

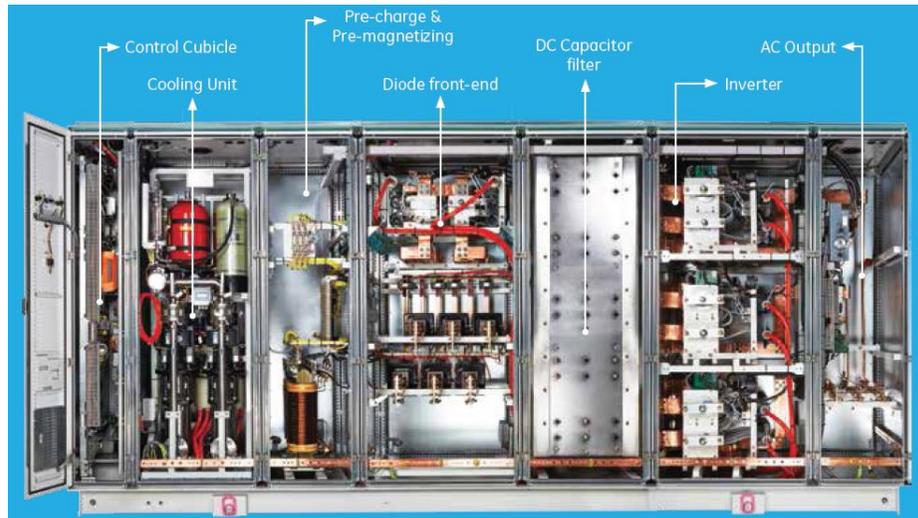
- Hauptanwendungsgebiete:
 - IGBT Module: Pumpen, Lüfter, Extruder, Schiffsantriebe, Mühlen
 - IGCT, PP-IGBT: Walzwerksantriebe, Schiffsantriebe, Mehrmotorenantriebe, Transrapid



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

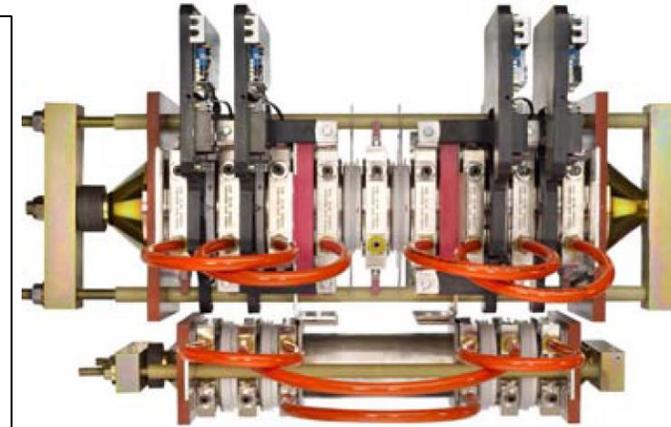
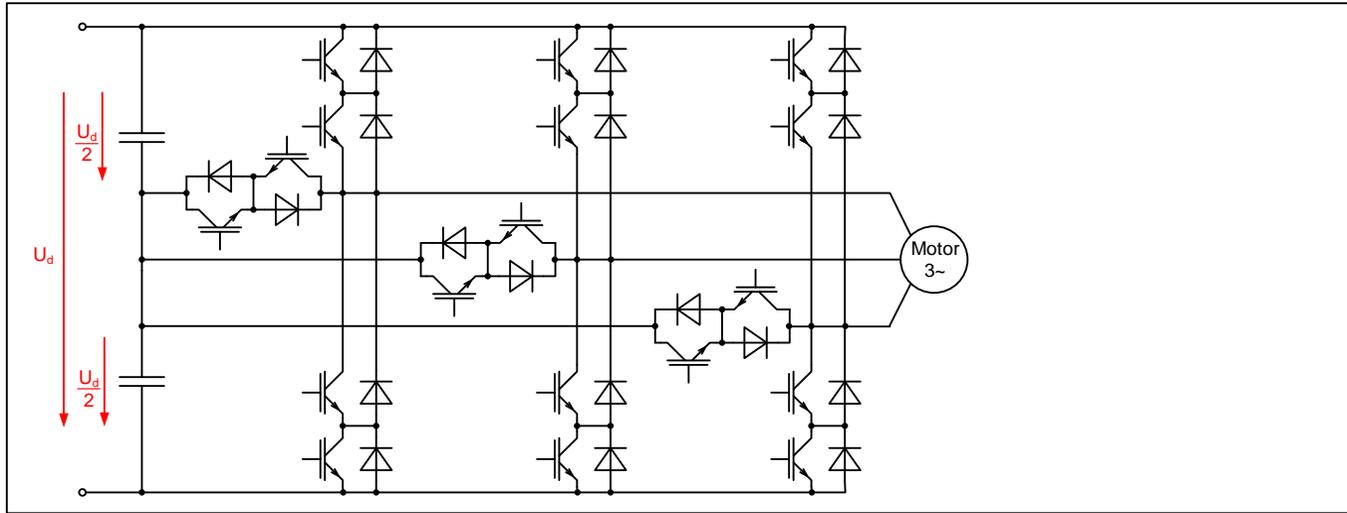
- Halbleiter:
 - IGBT-Module mit $U_{CES}=3,3-6,5kV$ (auch in Reihenschaltung)
 - Press Pack-IGBT mit $U_{CES}=4,5kV$ (auch in Reihenschaltung)
 - Press Pack-IGCT mit $U_{DRM}=4,5-5,5kV$
- Vorteile:
 - Flexible Wahl der Einspeisung möglich (Dioden-, Aktive Einspeisung)
 - Einfach an Kundenanforderungen 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

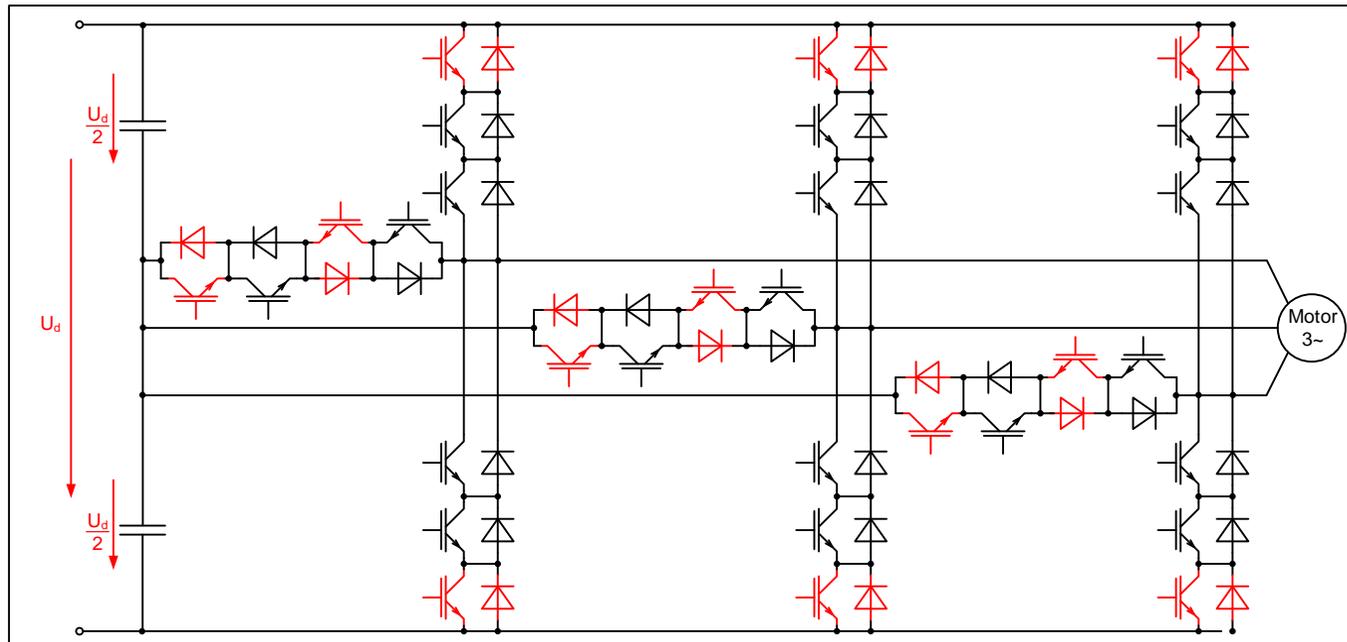


3L-NPC Umrichter: 3,3kV, 2100A, 12MVA, wassergekühlt (GE MV7000)

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



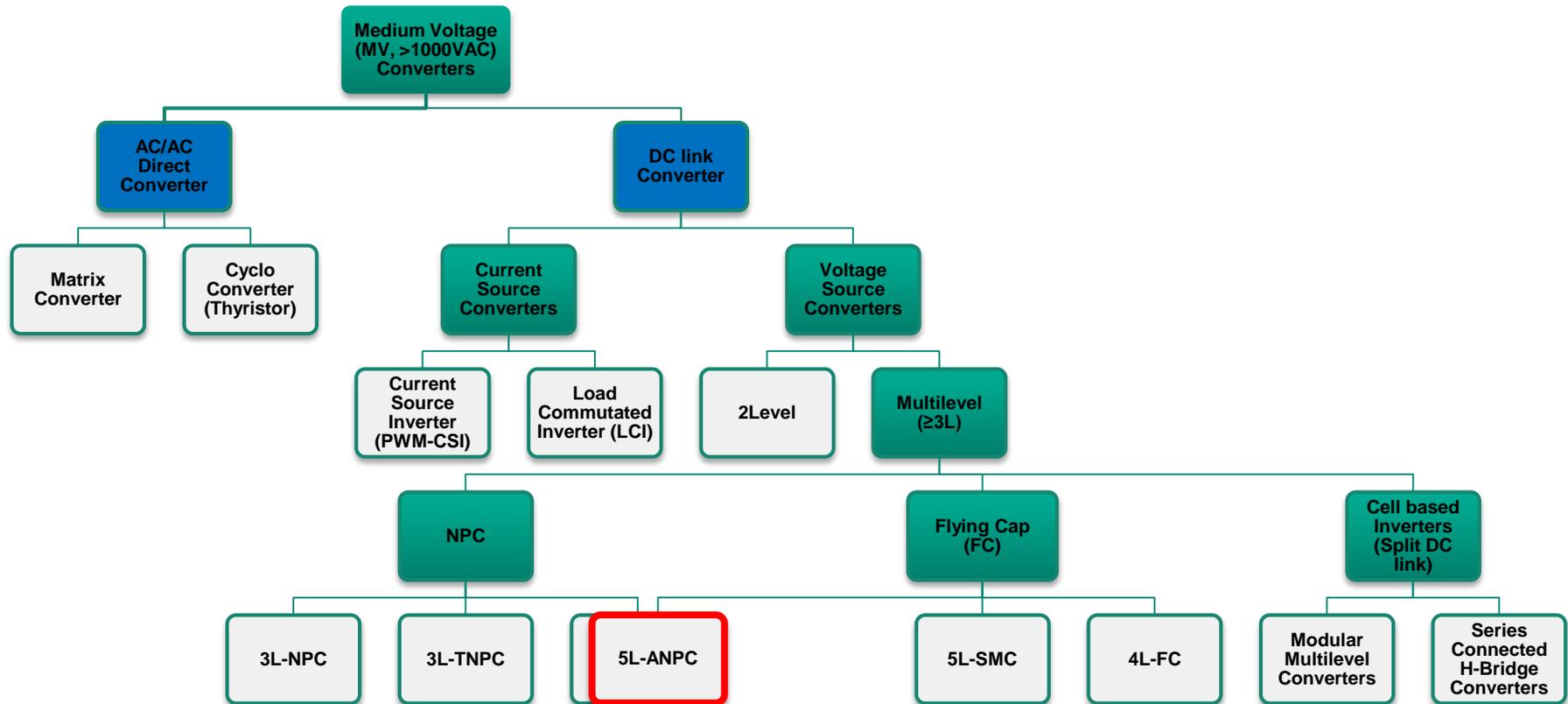
PP-IGBT-Phasenbaustein (GE)



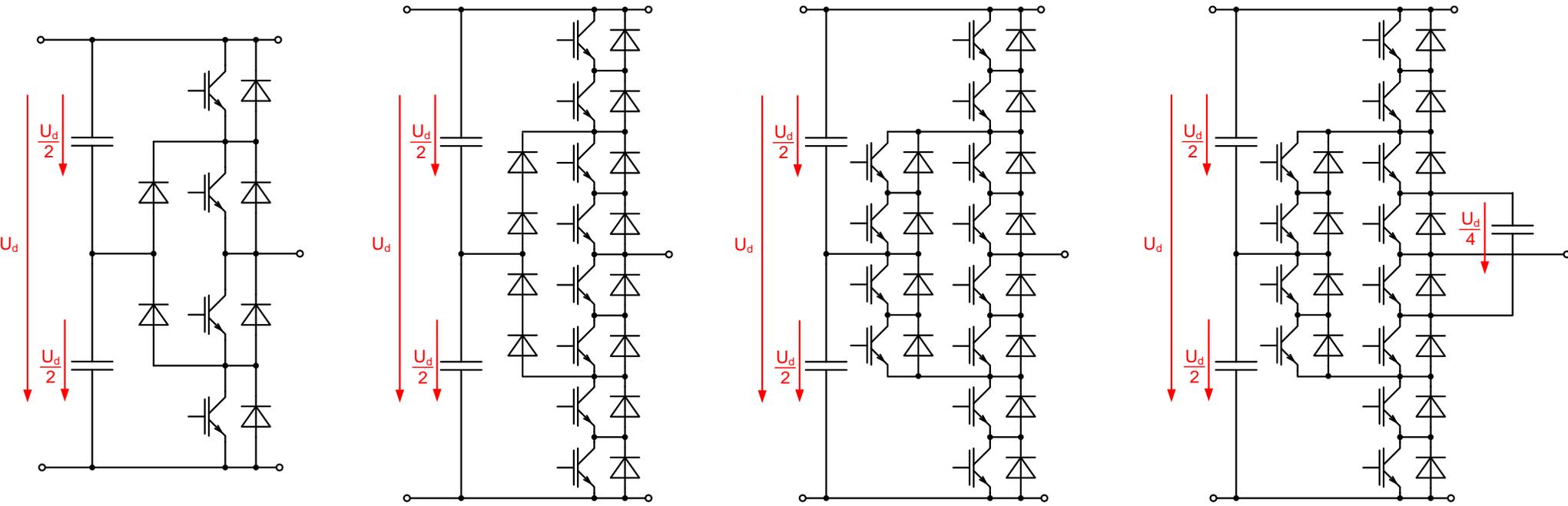
- 3L-NPP mit Press Pack IGBTs:
 - Einbau redundanter IGBTs möglich, da diese im Fehlerfall durchlegieren und den Betriebsstrom führen können
 - Deutliche Reduzierung der Ausfallraten des Gesamtumrichters, daher Erhöhung der Verfügbarkeit
 - Mit IGBT-Modulen wegen der komplexen Verschaltung und der daher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

Quelle: GE

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



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



3L-NPC mit n=1

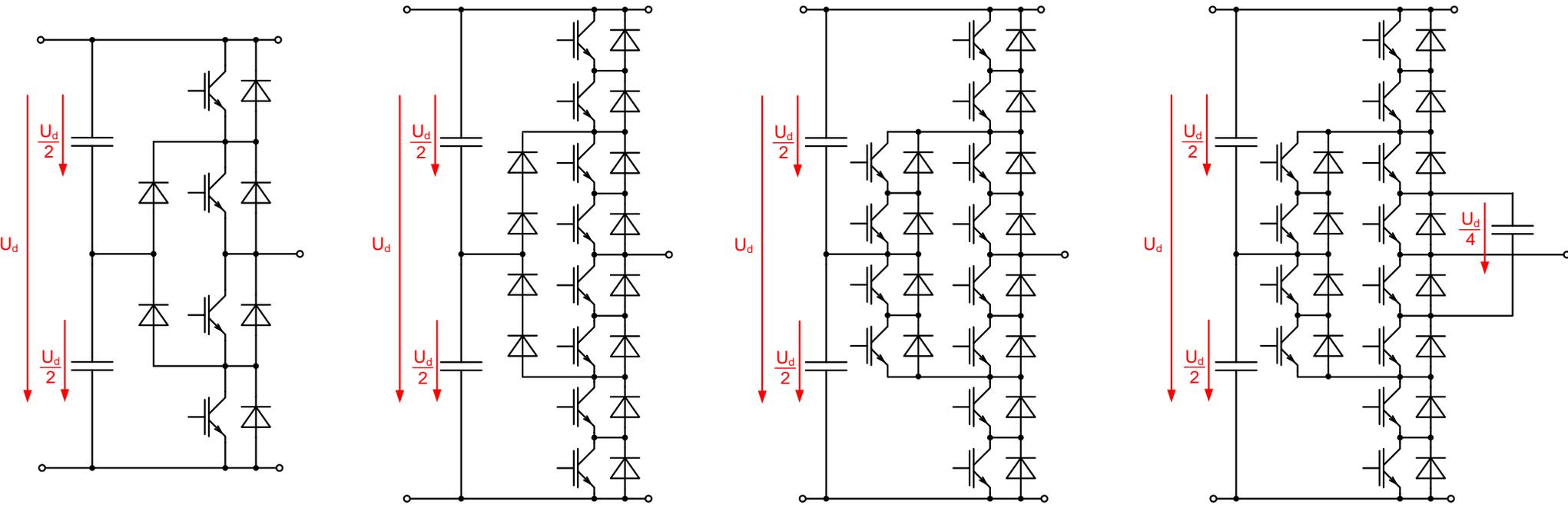
3L-NPC mit n=2

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

5L-ANPC mit n=2 und
Floating Capacitor

- 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 Spannungsniveaus
 - Reduzierte Harmonische am Ausgang
 - Erhöhter Regelungsaufwand

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



3L-NPC mit n=1

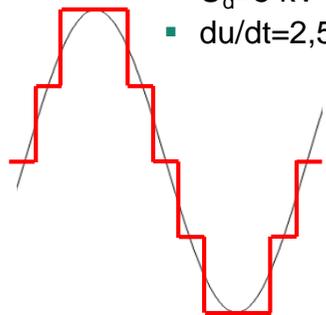
3L-NPC mit n=2

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

5L-ANPC mit n=2 und
Floating Capacitor

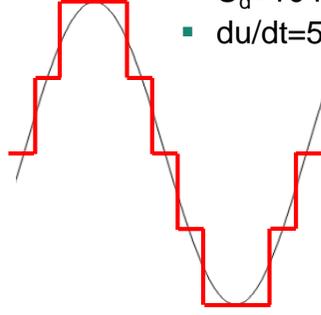
Bsp.:

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



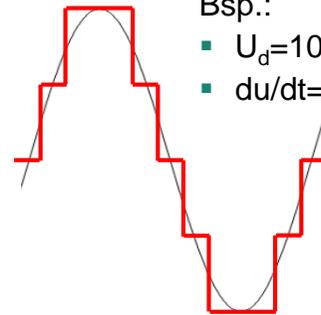
Bsp.:

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



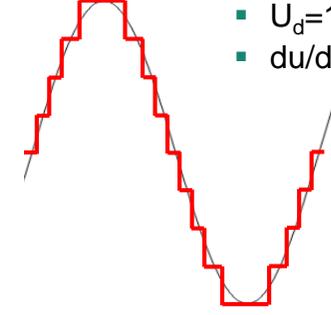
Bsp.:

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



Bsp.:

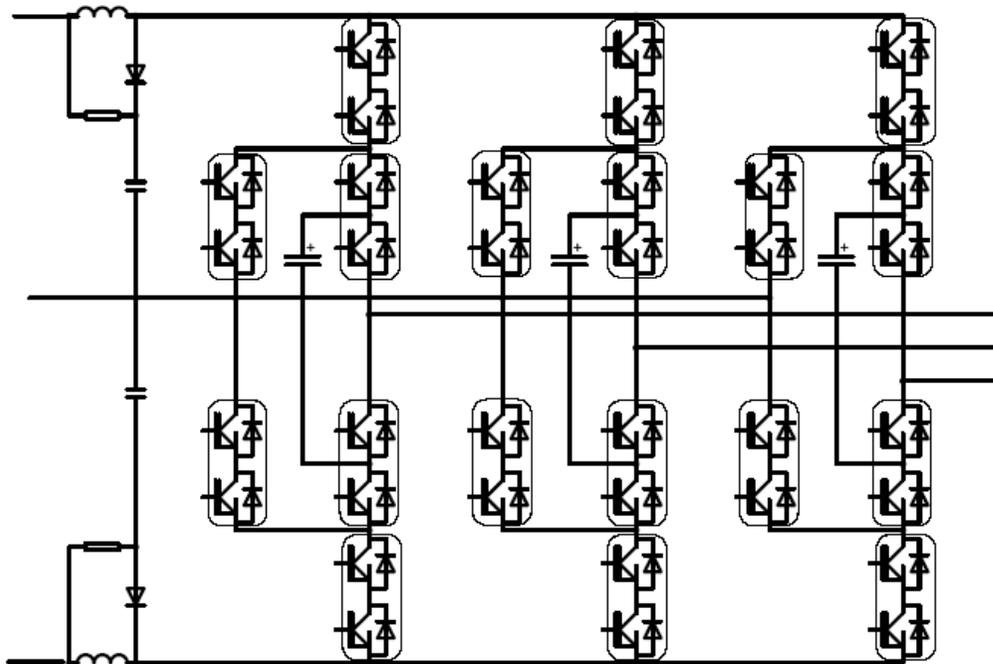
- $U_d=10\text{ kV}$
- $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



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

ACS 2000, 800kW, 6.9kV,
for operation with an external
transformer

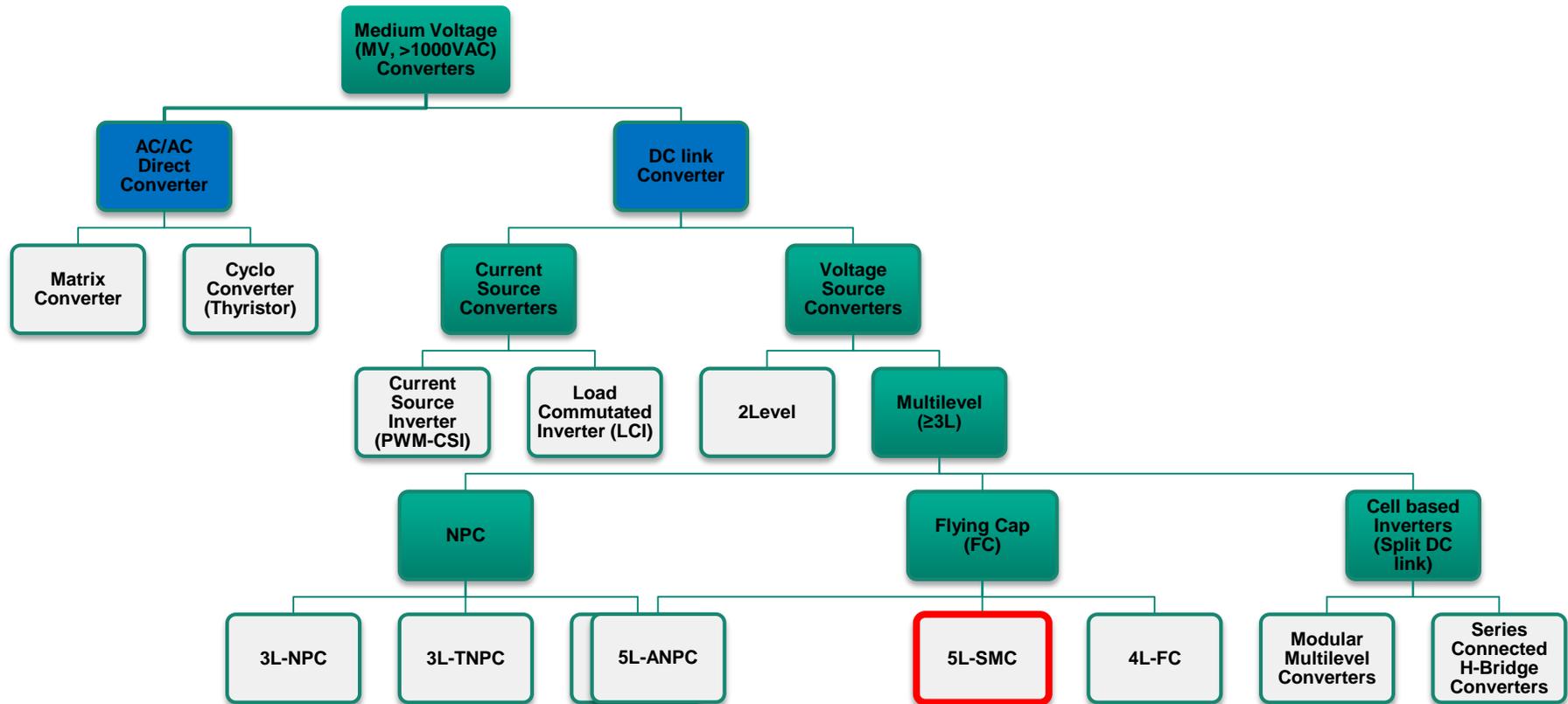
- Hauptanwendungsgebiete:
 - Pumpen, Lüfter, Kompressoren



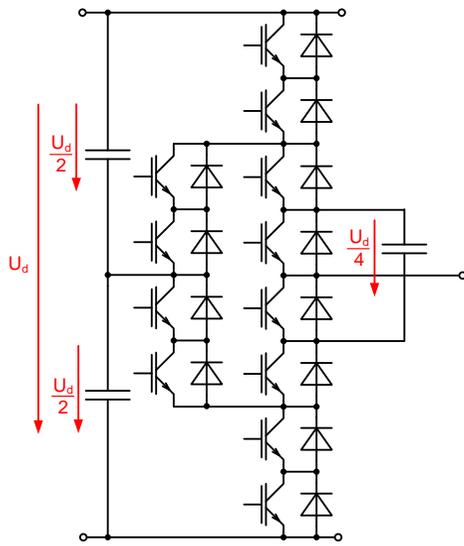
- Halbleiter:
 - IGBT-Module mit $U_{CES}=4,5kV$ (in Reihenschaltung $n=2$)
- Vorteile gegenüber 3L-NPC:
 - Höhere Stufenzahl, geringere Netzrückwirkungen Harmonische auf der Netzseite
 - Ggf. ohne zusätzliche Maßnahmen für den Einsatz von Standardmotoren geeignet
- Nachteile gegenüber 3L-NPC:
 - Höhere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

Quelle: ABB

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



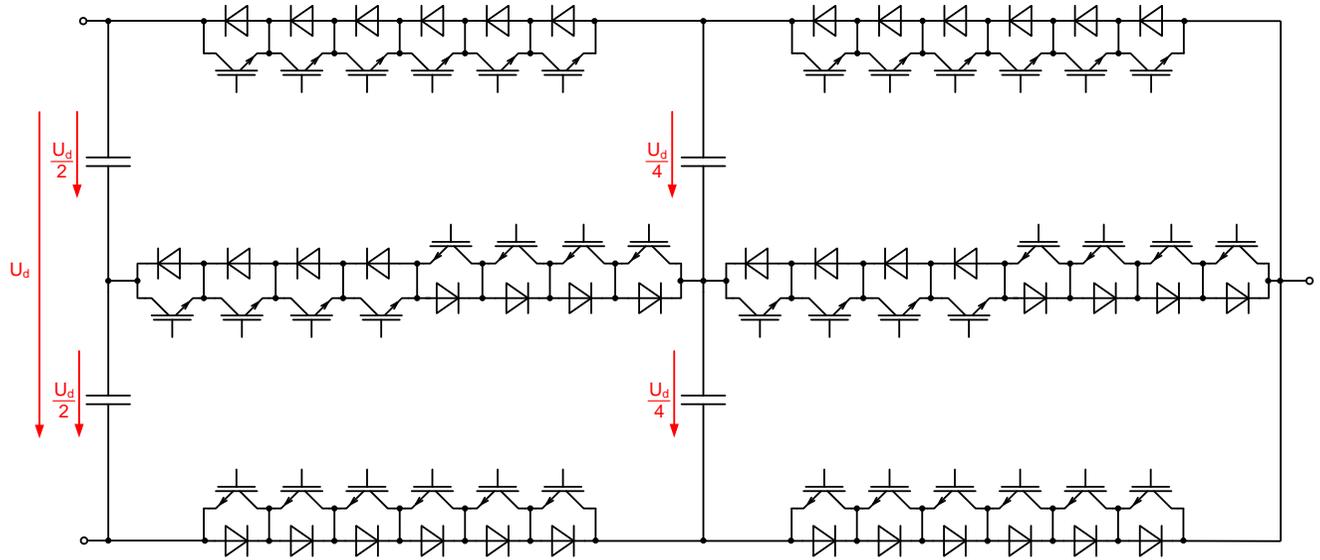
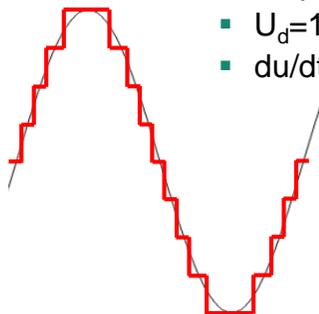
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-NPP



5L-ANPC with n=2 and Floating Capacitor

Example:

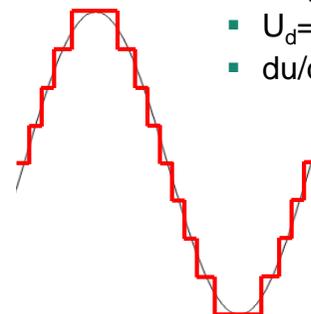
- $U_d=10\text{ kV}$
- $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



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

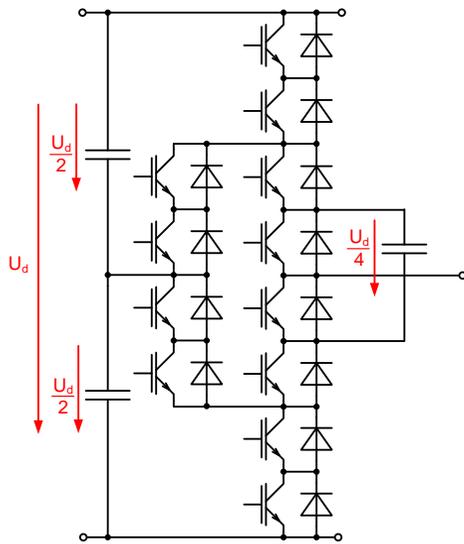
Example:

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



Source: GE

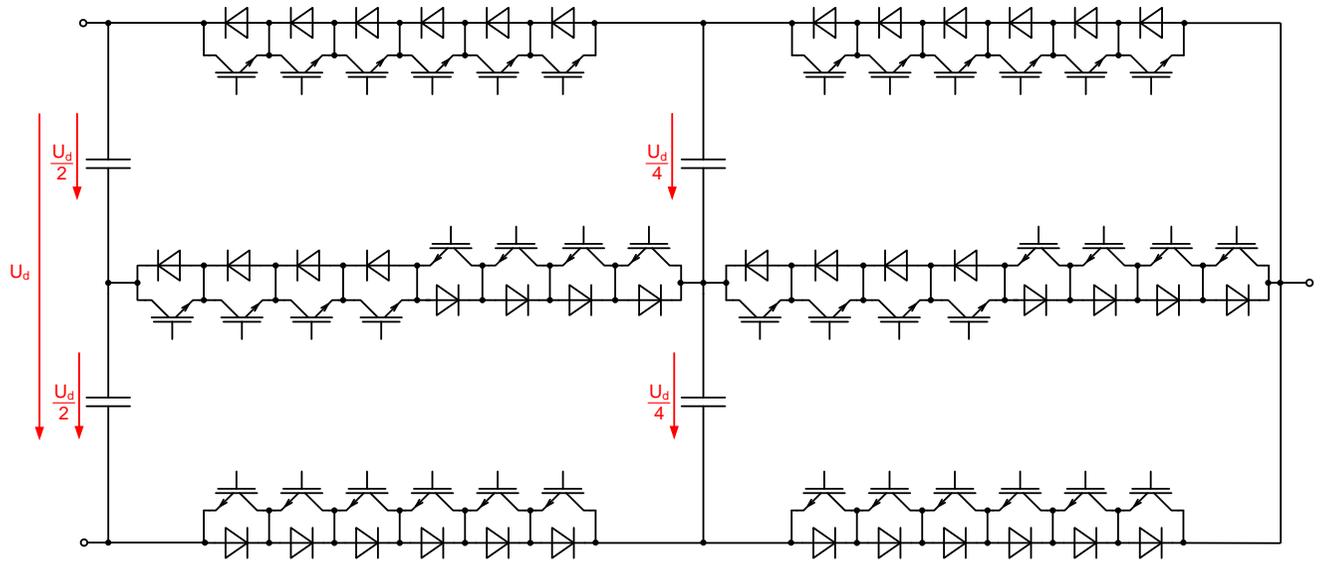
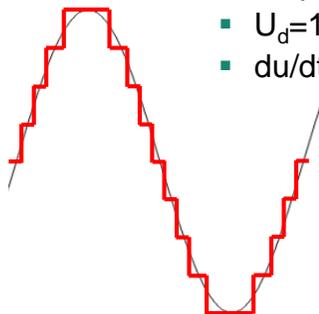
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – 5L-NPP



5L-ANPC with n=2 and Floating Capacitor

Example:

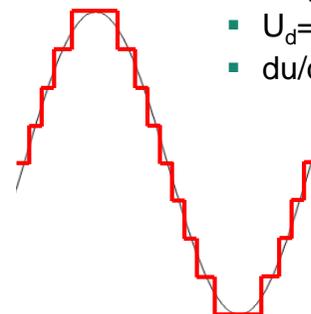
- $U_d=10\text{ kV}$
- $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



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

Example:

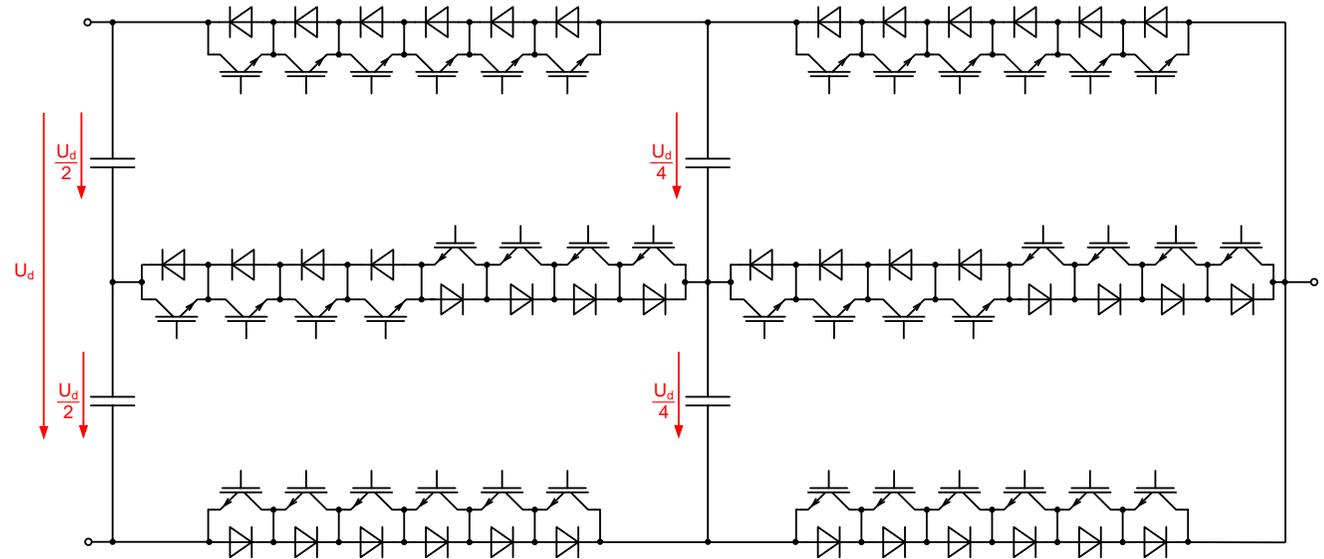
- $U_d=10\text{ kV}$
- $du/dt=2,5\text{ kV}/\mu\text{s}$



Source: GE

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

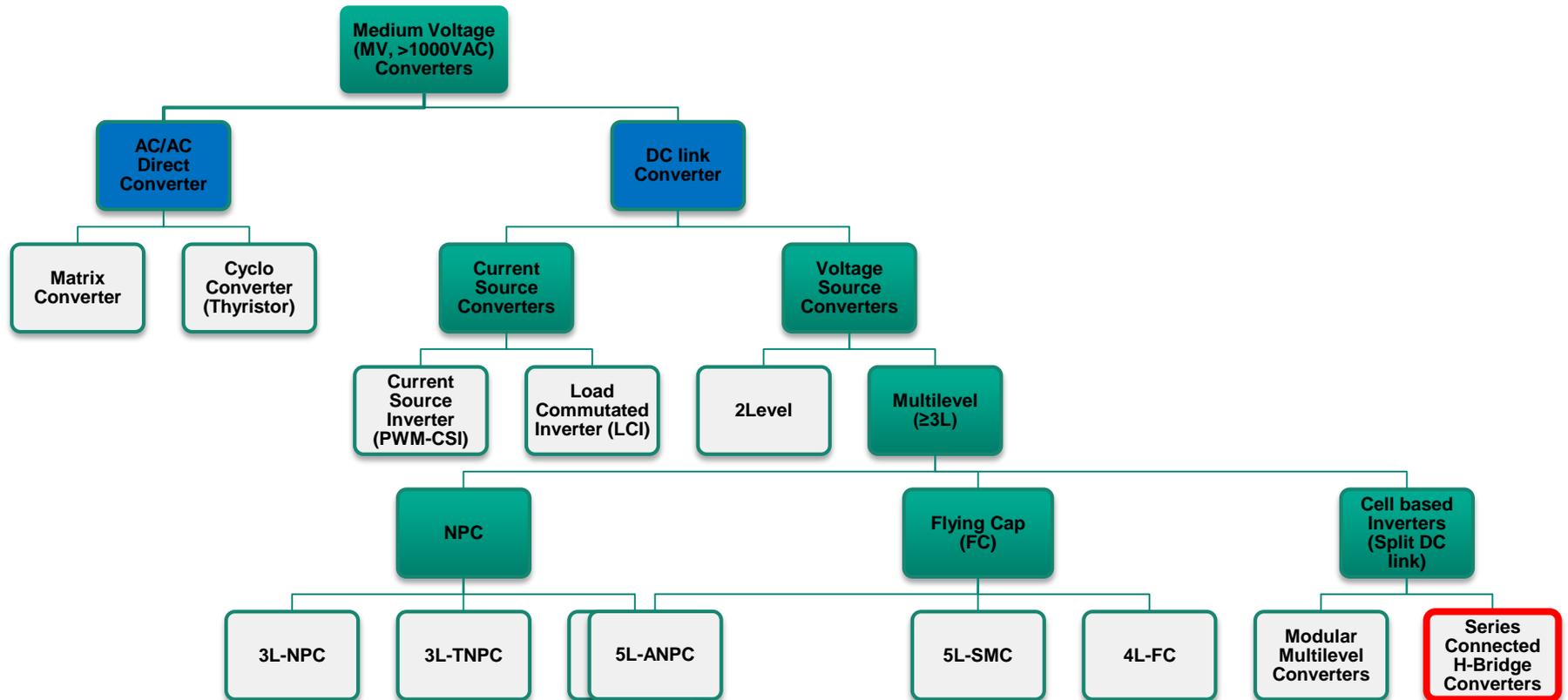
- **Main applications:**
 - General purpose applications like pumps, blowers, compressors



- **Power semiconductors:**
 - IGBT-Module mit $U_{CES}=1,7kV$ (in Reihenschaltung $n \leq 6$)
- **Advantages vs. 3L-NPC:**
 - Höhere Stufenzahl, geringere Netzurückwirkungen 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

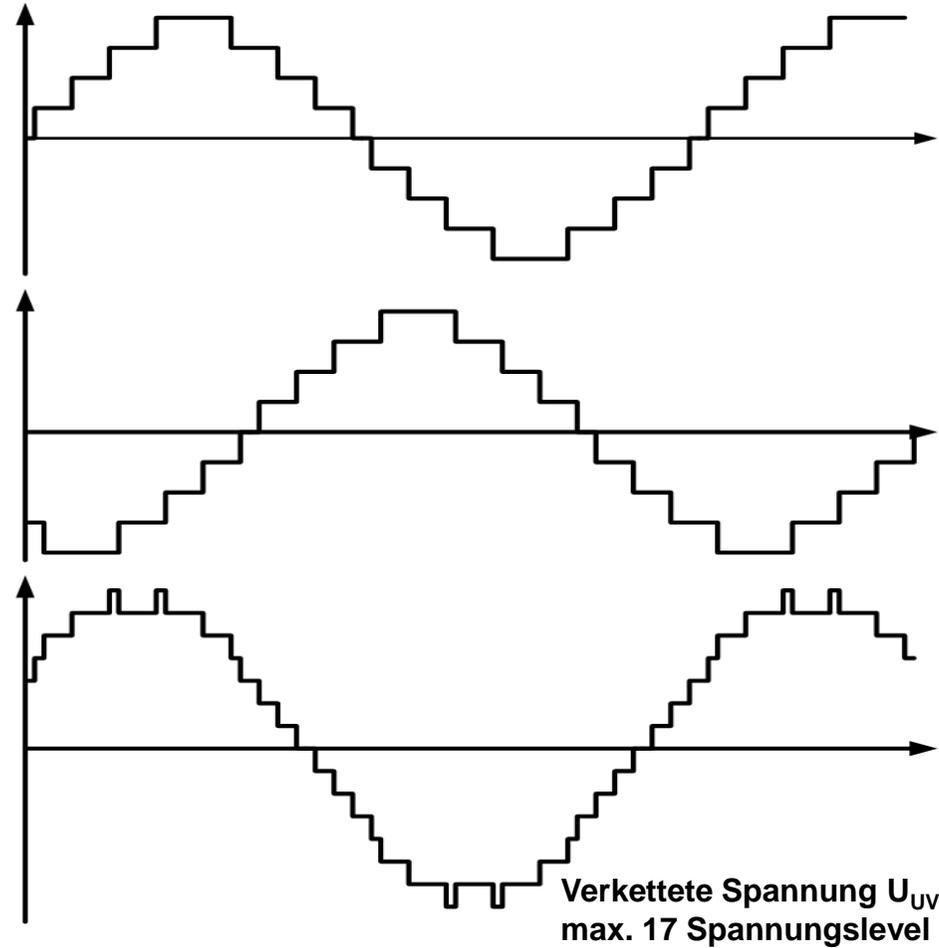
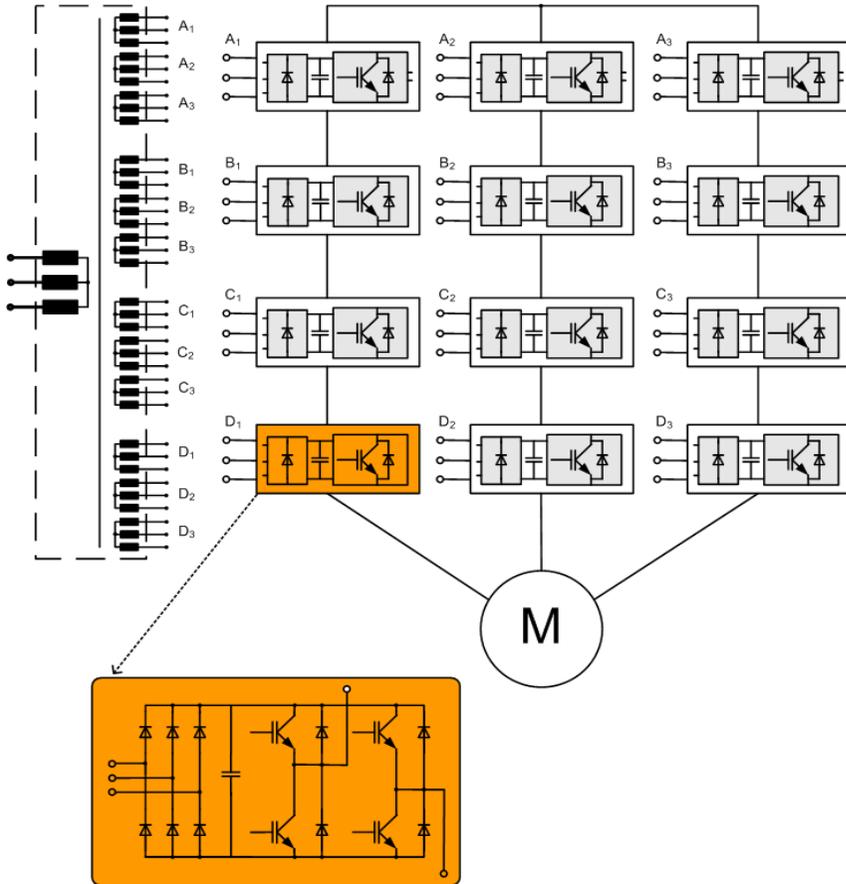
Source: GE

5. Topologien – Mittelspannung (MV)



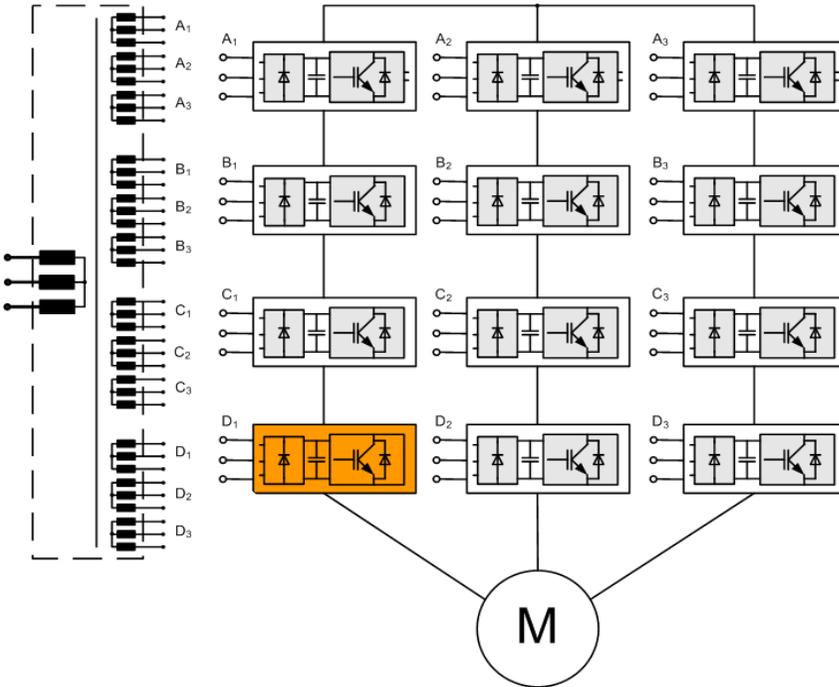
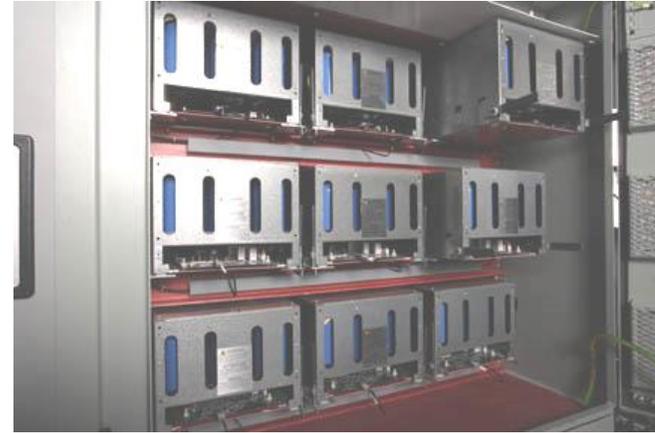
5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Series Cell Umrichter (SC)

9-Level H-Brückenschaltung



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

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

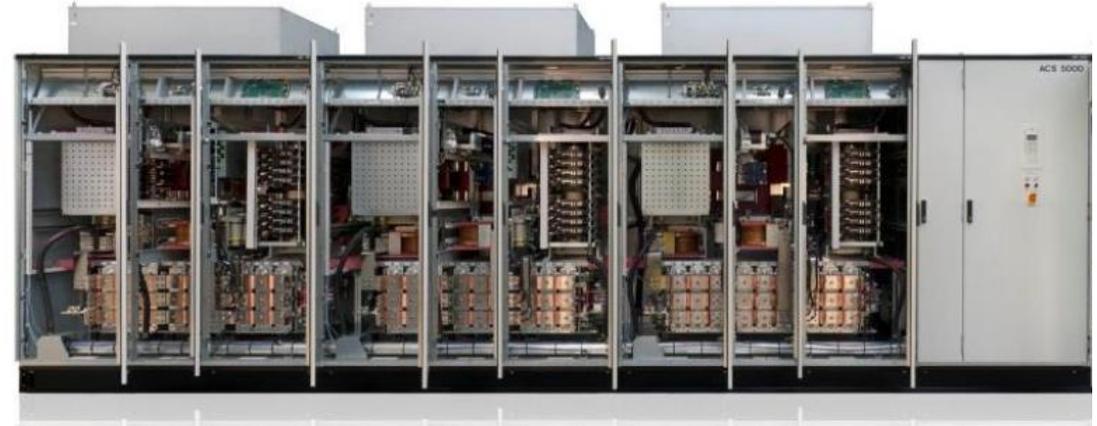
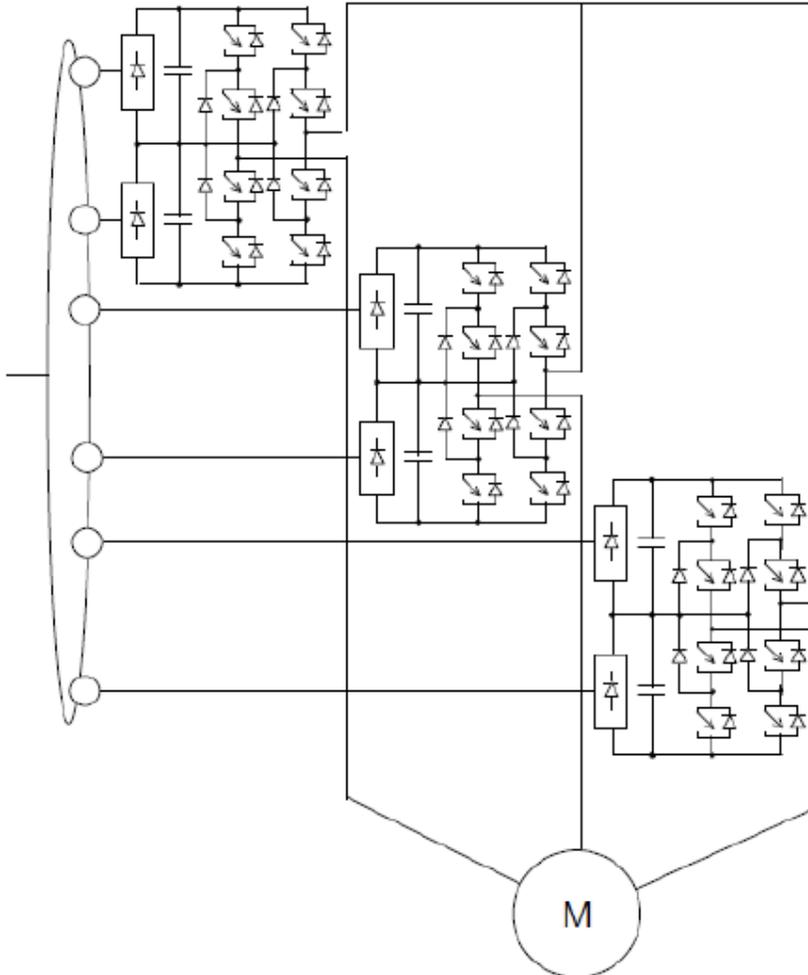


- Halbleiter: IGBT-Module mit $U_{CES}=1,7kV$
- Vorteile:
 - Einfache Spannungskalierbarkeit durch Reihenschaltung von H-Brückenzellen
 - Anwendbar für Standard-Motoren ohne Ausgangsfilter
 - Redundanz ist optional möglich
 - Durch hohe Pulsigkeit der Ausgangsspannungen für schnell laufende Antriebe 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

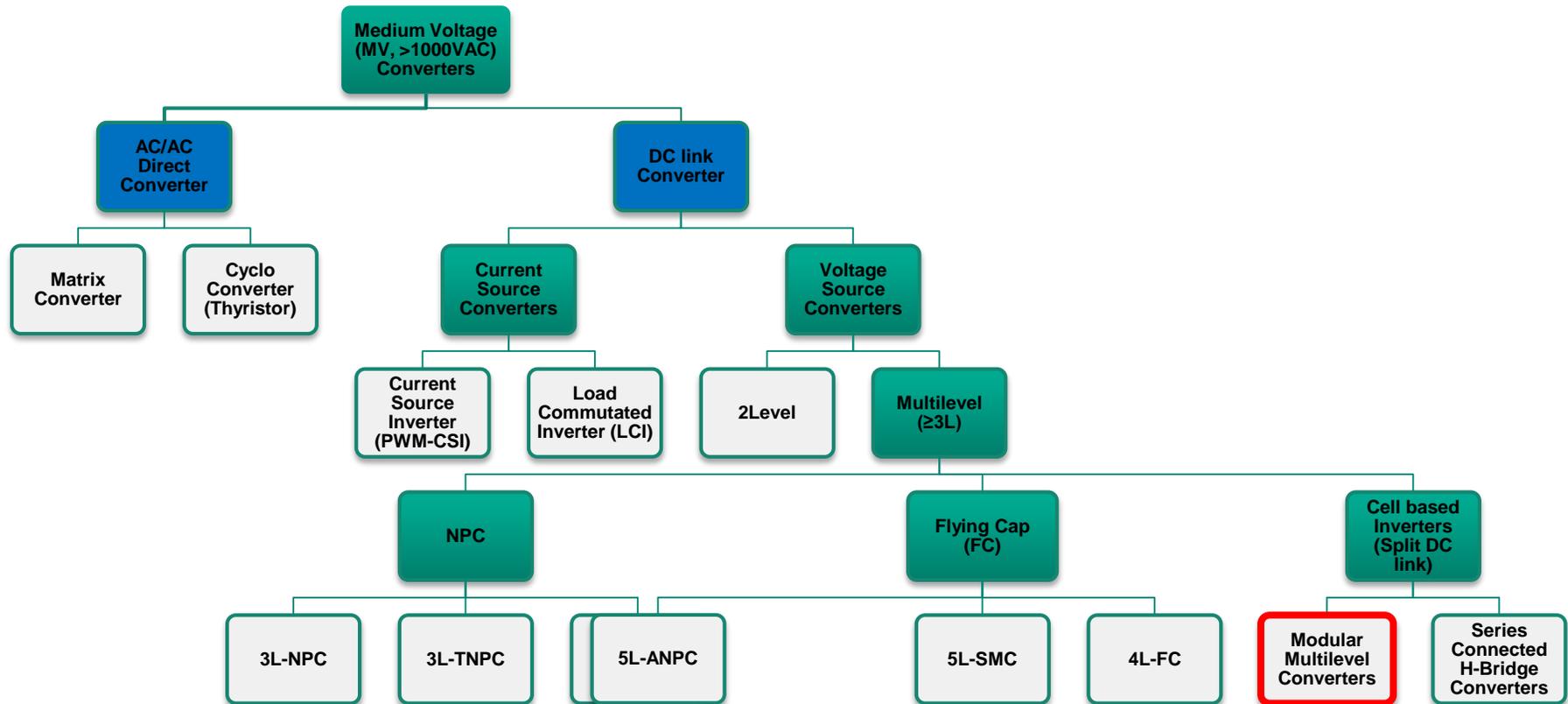


SC Umrichter: 6,6kV, 1500A, 17MVA,
wassergekühlt (ABB ACS5000)

- 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

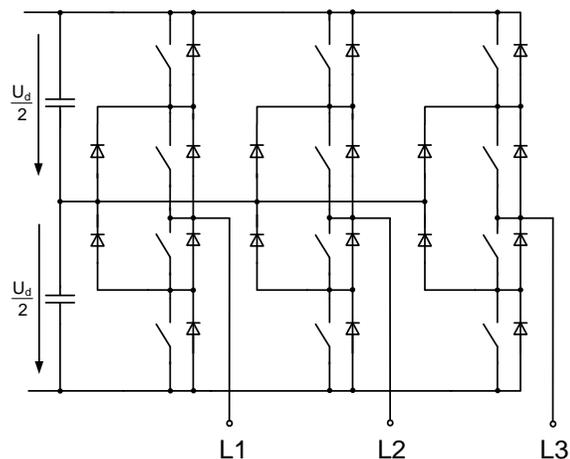
Quelle: ABB

5. Topologien – Mittelspannung (MV)

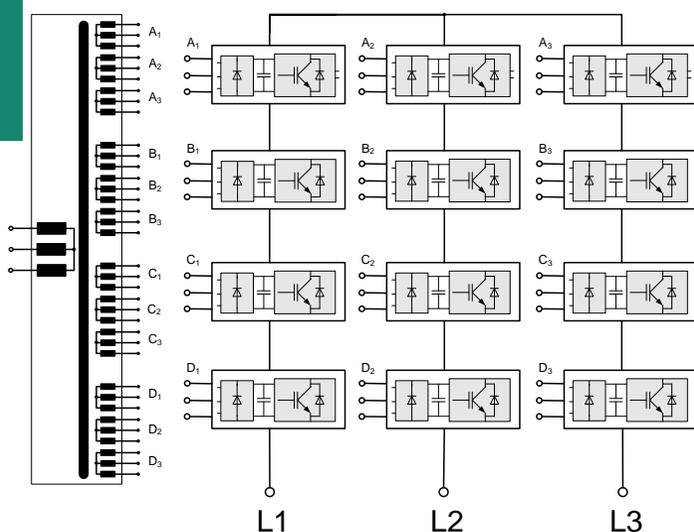


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)

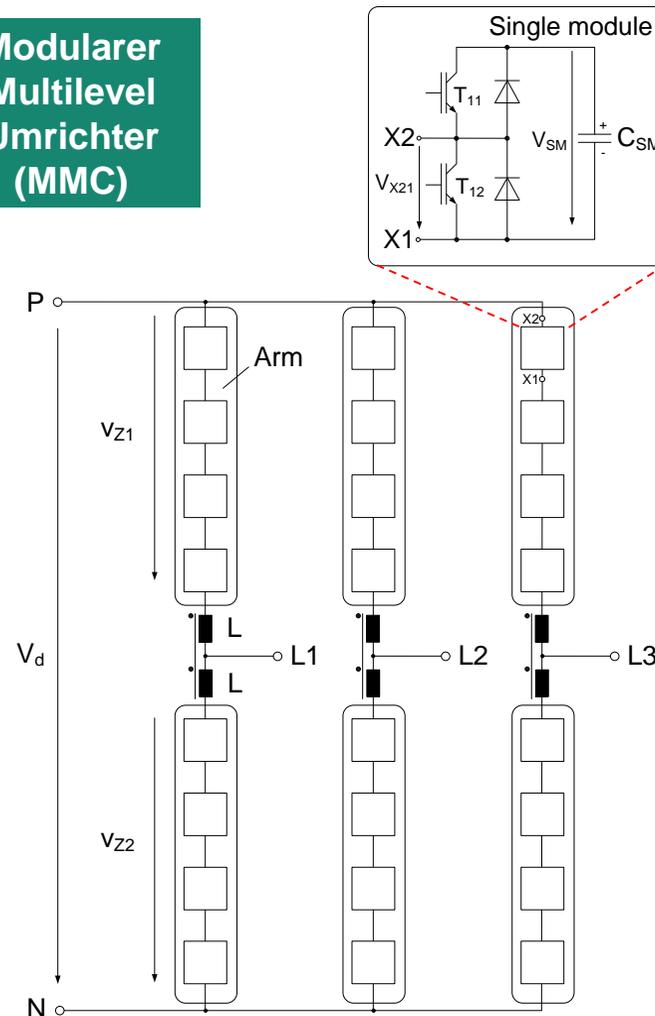
3L-NPC



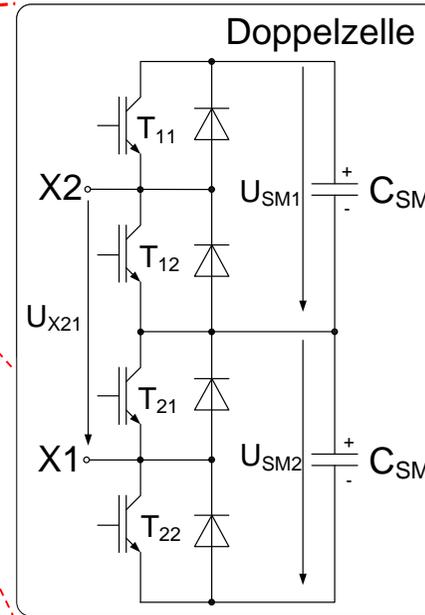
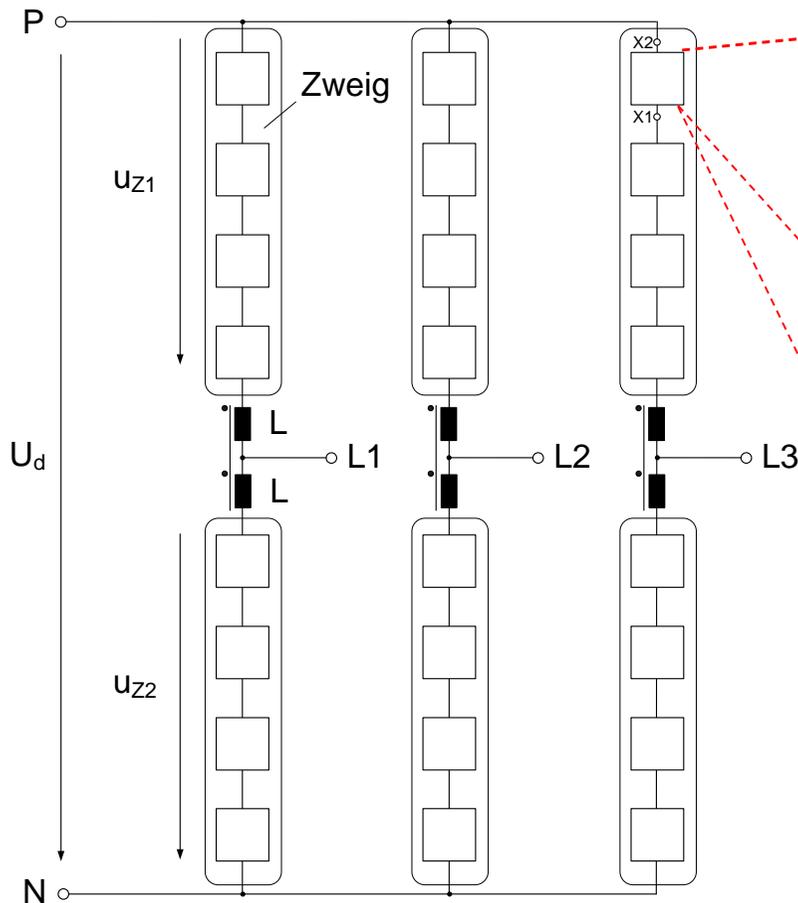
Series Cell Umrichter (SC)



Modularer Multilevel Umrichter (MMC)

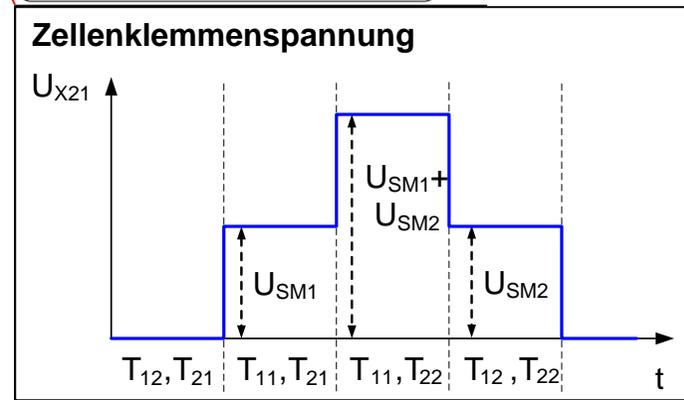


5. Topologien – Mittelspannung (MV) – Modularer Multilevel Umrichter (MMC)

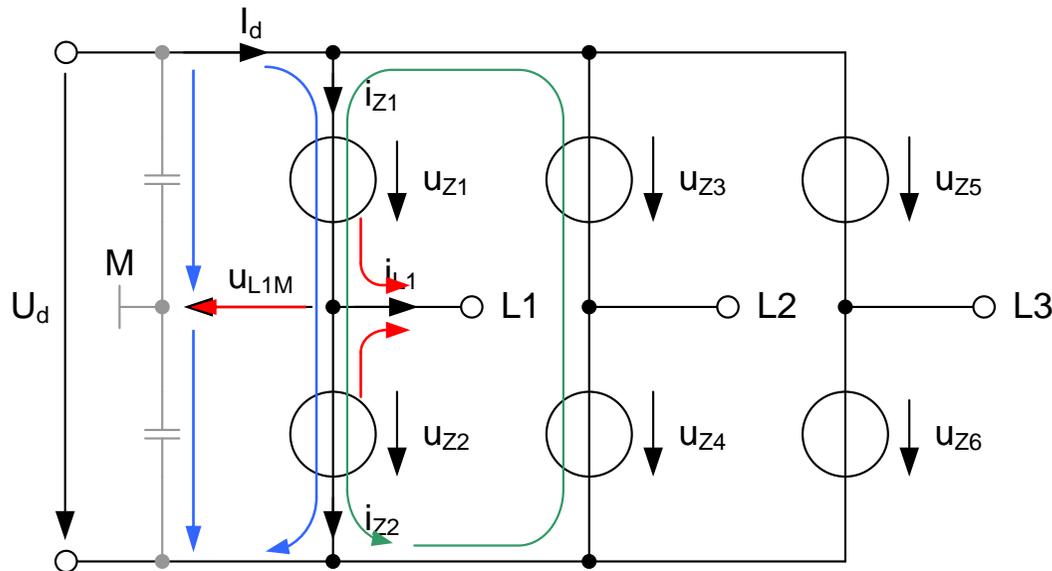


- Zellen sind Zweipole ohne zusätzliche Energieversorgung
- Einsatz identischer Zellen für Netz- und Motorseite
- Einfacher Aufbau ohne Anforderungen an Streuinduktivität ($n=6..300$)
- Einsatz von Niederspannungskomponenten in MV-Anwendungen, z.B.
 - 1,7kV-IGBT-Module
 - 1,2kV-Folienkondensat.

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



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



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

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

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

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

**kontinuierliche
Zweigströme**

Die Umrichterzweige stellen 6 unabhängig voneinander steuerbare Spannungsquellen dar:

Gesamt: 6 Freiheitsgrade in der Regelung

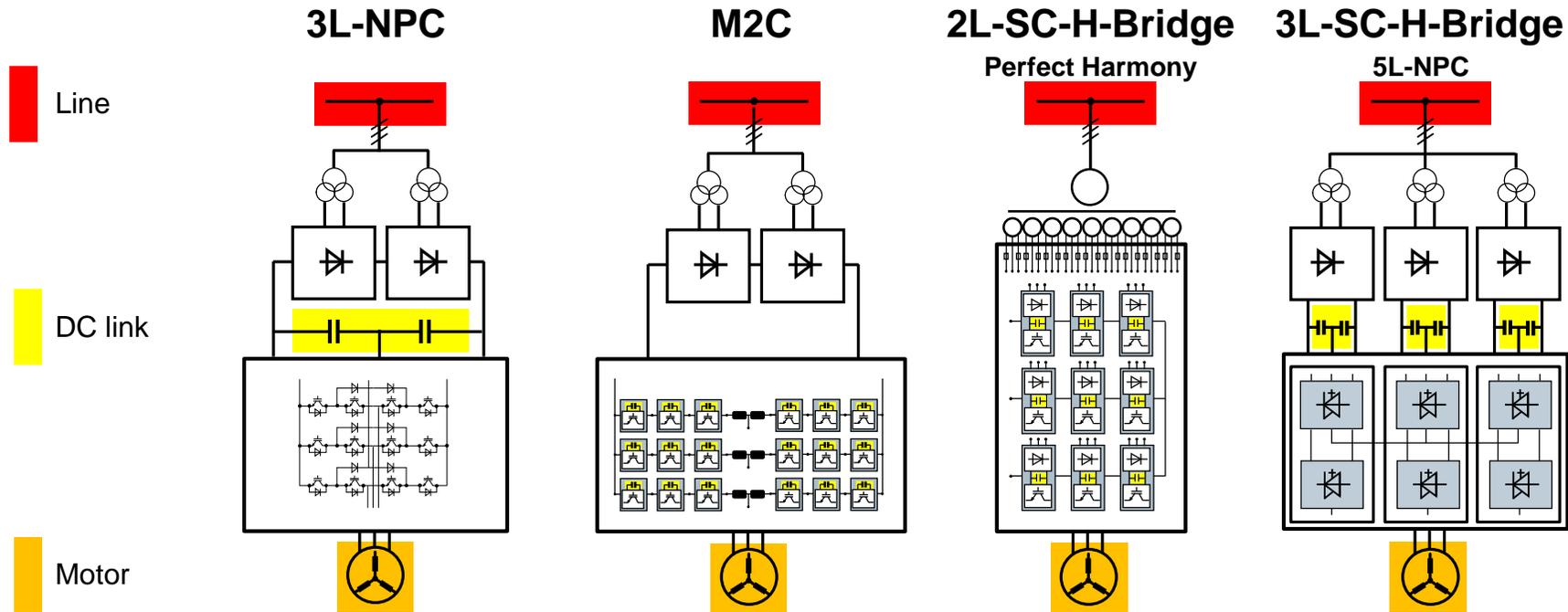
3 Freiheitsgrade in den Ausgangsgrößen

- 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



- Halbleiter: IGBT-Module mit $U_{CES}=1,7kV$
- Vorteile:
 - Einfache Spannungsskalierbarkeit 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

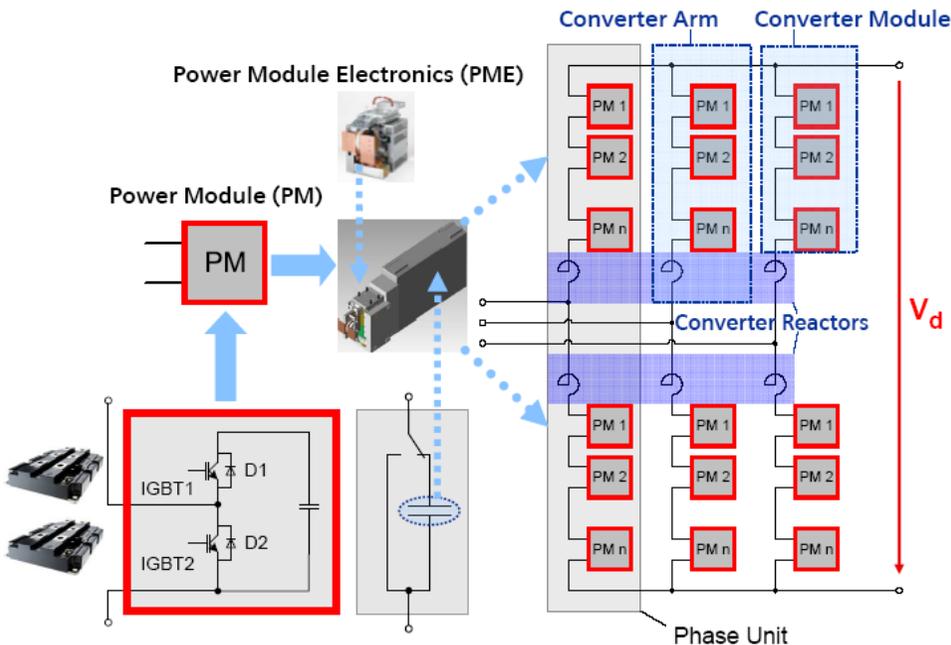
Quelle: Siemens



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

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
 - Netzzrückwirkungen



- 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

Zeitplan

	KW	Datum	Inhalt
PLS1	KW42	17.10.2017	Einleitung
PLS2	KW43	24.10.2017	Systemübersicht
	<i>KW44</i>	<i>31.10.2017</i>	<i>Keine Vorlesung - Feiertag</i>
PLS3	KW45	07.11.2017	Systemübersicht
PLS4	KW46	14.11.2017	Stromrichterauslegung
PLS5	KW47	21.11.2017	Stromrichterauslegung
PLS6	KW48	28.11.2017	Stromrichterauslegung
PLS7	KW49	05.12.2017	Halbleiterauslegung
PLS8	KW50	12.12.2017	Systembetrachtungen
PLS9	KW51	19.12.2017	Kabel, Filter
	<i>KW52</i>	<i>26.12.2017</i>	<i>Keine Vorlesung - Weihnachtspause</i>
	<i>KW1</i>	<i>02.01.2018</i>	<i>Keine Vorlesung - Weihnachtspause</i>
PLS10+11	KW2	09.01.2018	Doppel-Veranstaltung (Dozent: Hr. Tischmacher, Siemens AG): Wechselwirkung Umrichter/Maschine
PLS12	KW3	16.01.2018	Netzanwendungen
PLS13	KW4	23.01.2018	Netzverhalten, Netzanwendungen
PLS14	KW5	30.01.2018	Systembetrachtungen, Fragestunde
	<i>KW6</i>	<i>06.02.2018</i>	<i>Keine Vorlesung</i>