

Vorlesung Praxis Leistungselektronischer Systeme

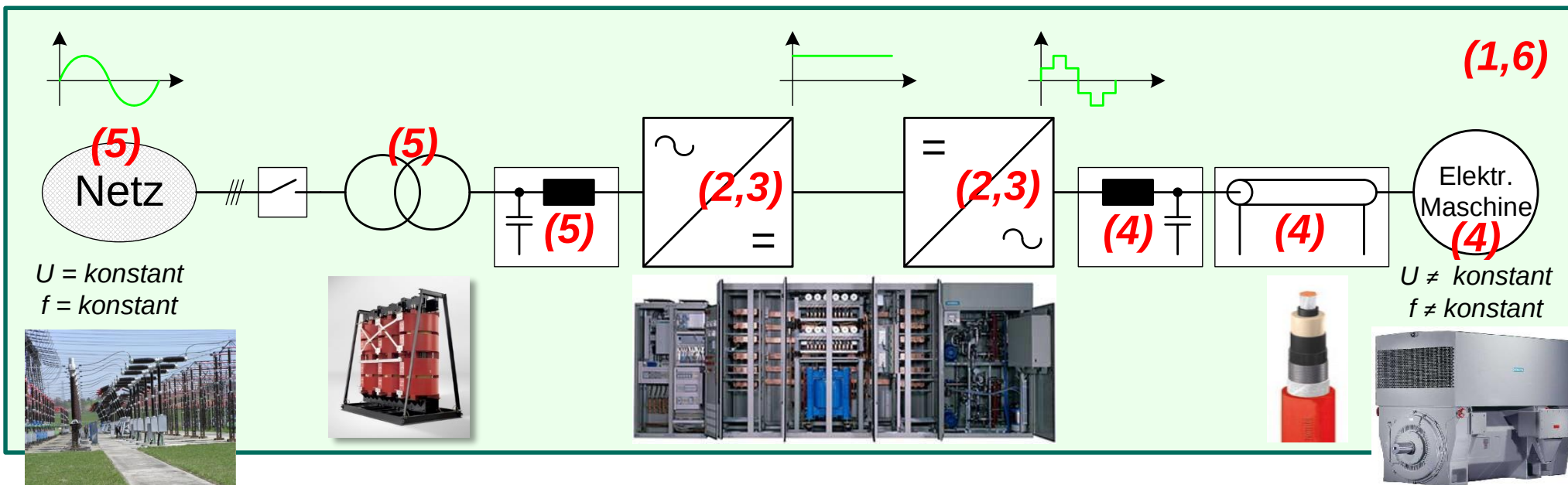
WS2017/18

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

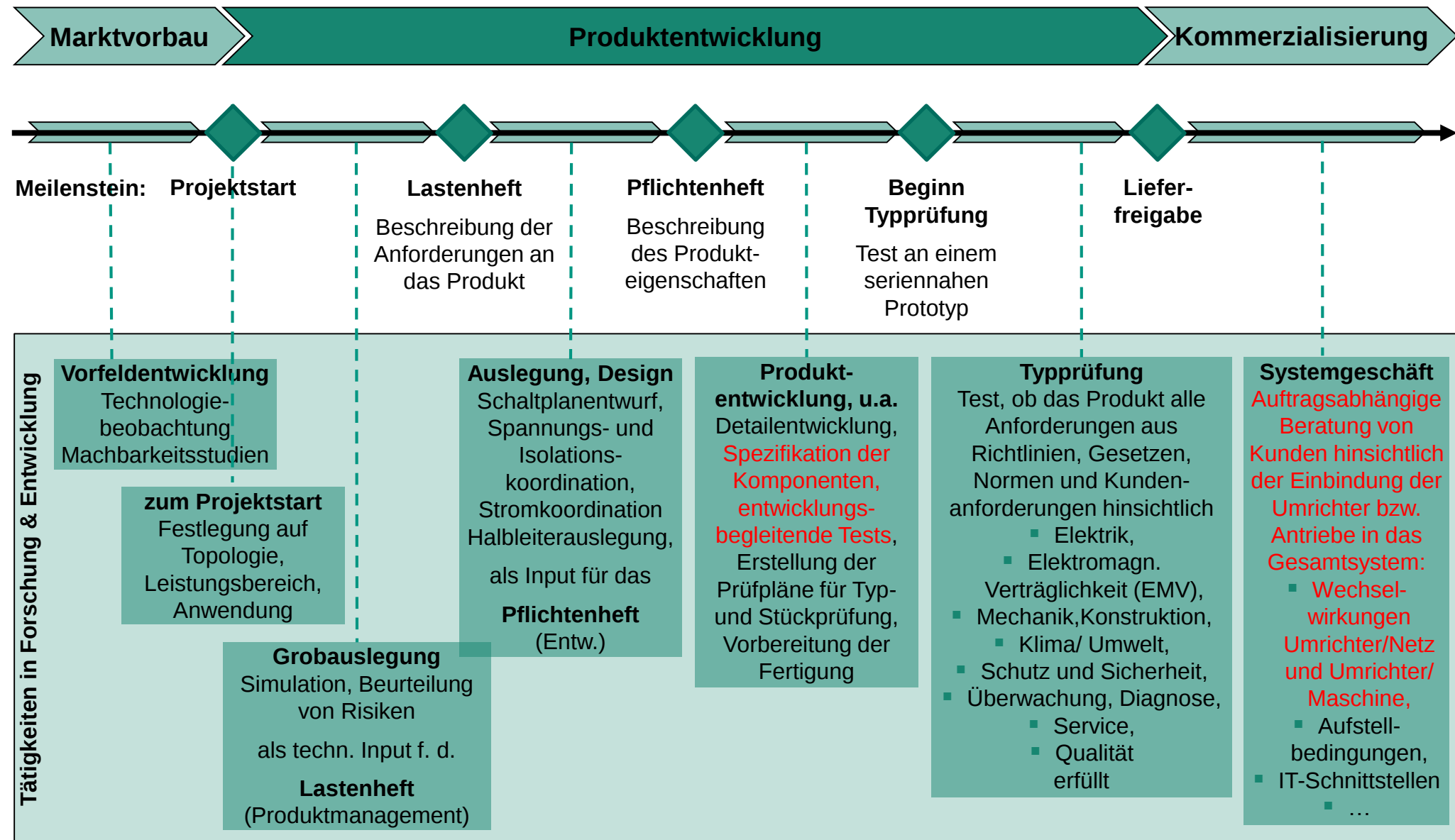


Gliederung

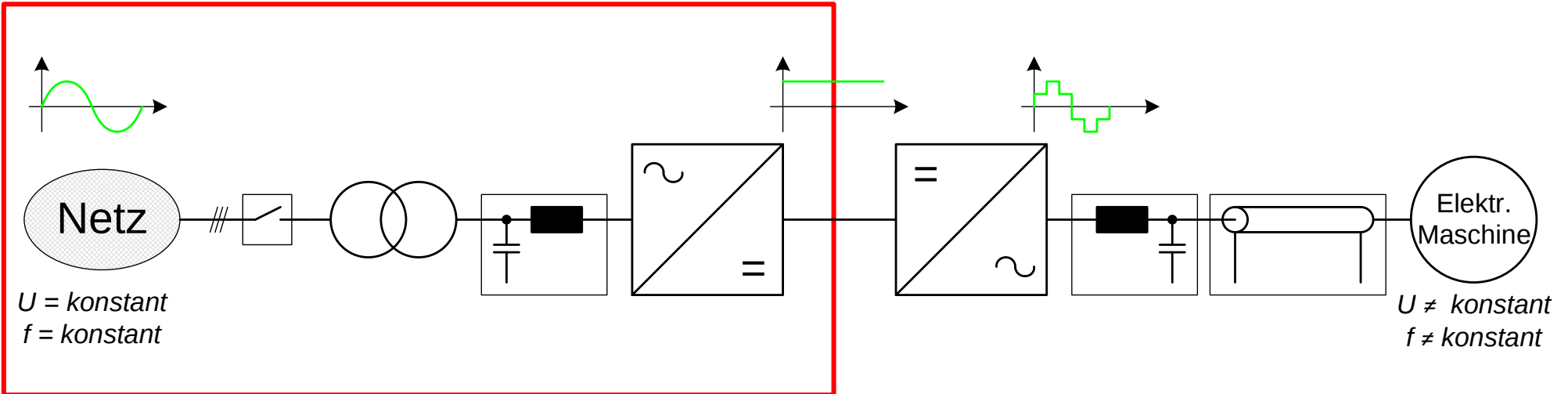
Wechselwirkungen Umrichter-Netz

1. Übersicht
2. Netzanwendungen
3. Transformatoren für Umrichterbetrieb
4. Netzurückwirkungen
5. Netzfilter
6. Zusammenfassung

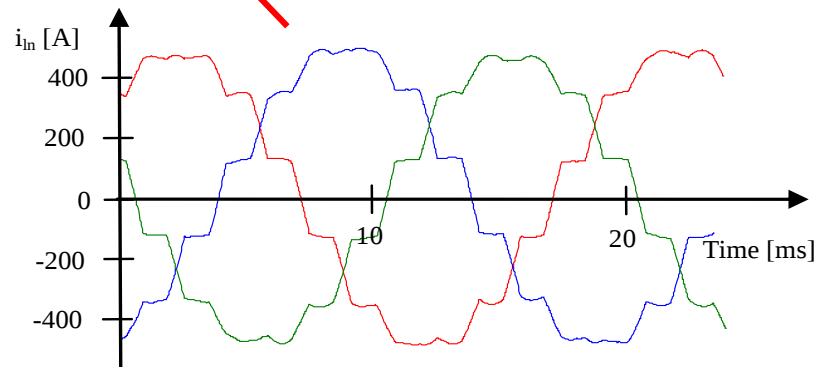
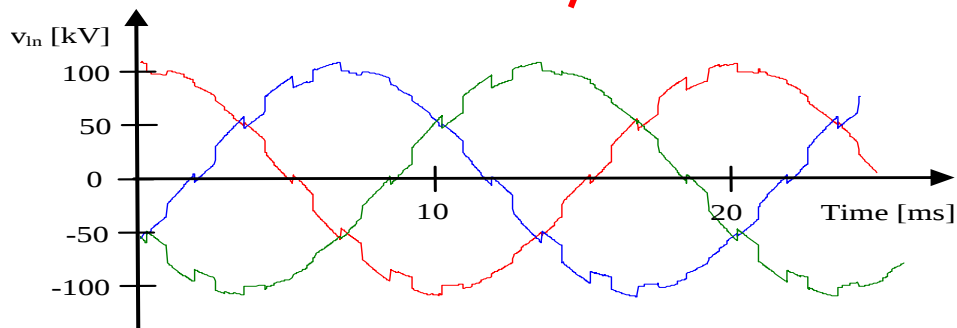
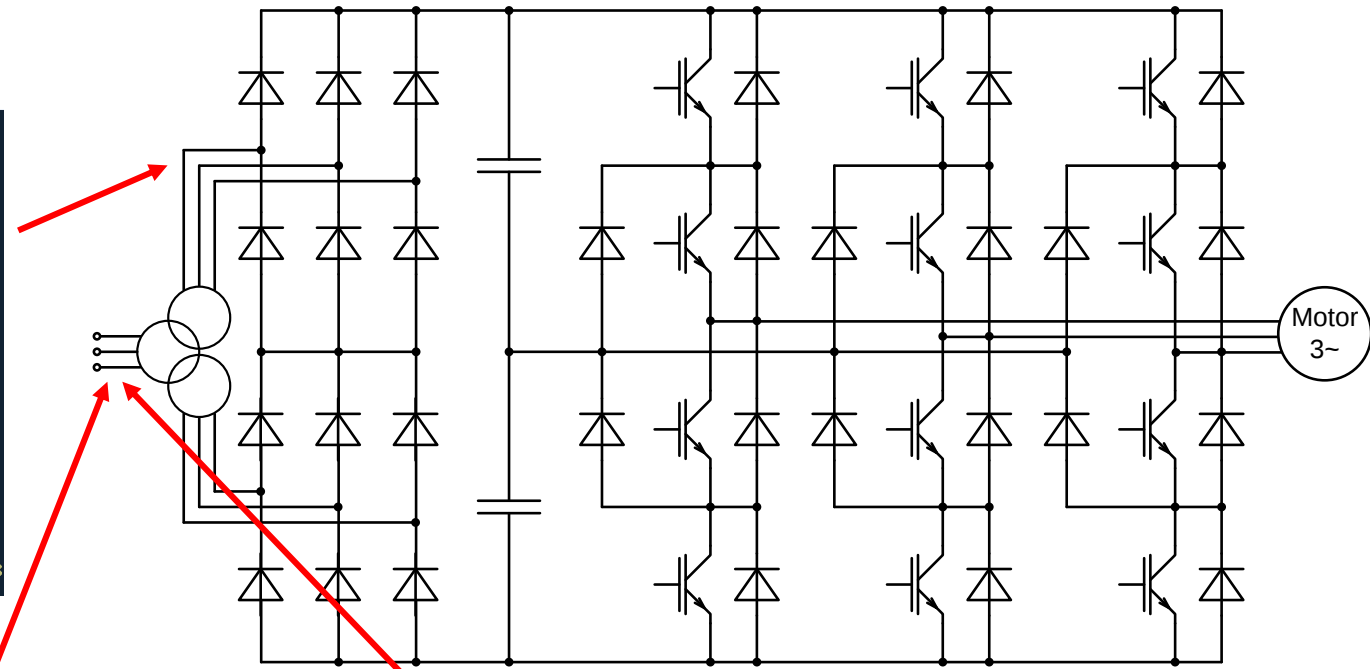
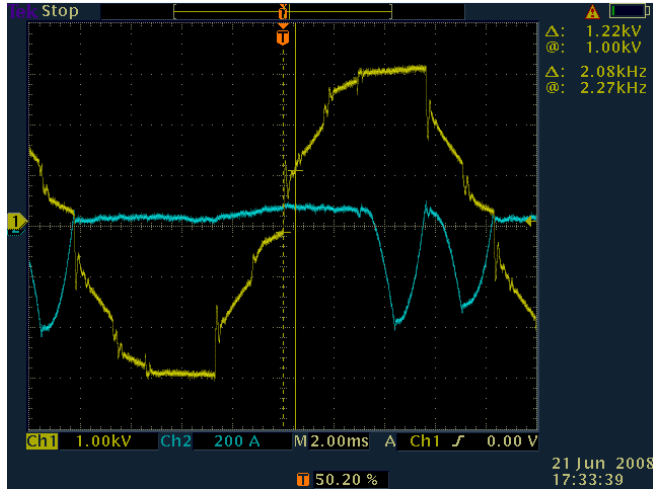
1. Übersicht – Bedeutung im Entwicklungsprozess



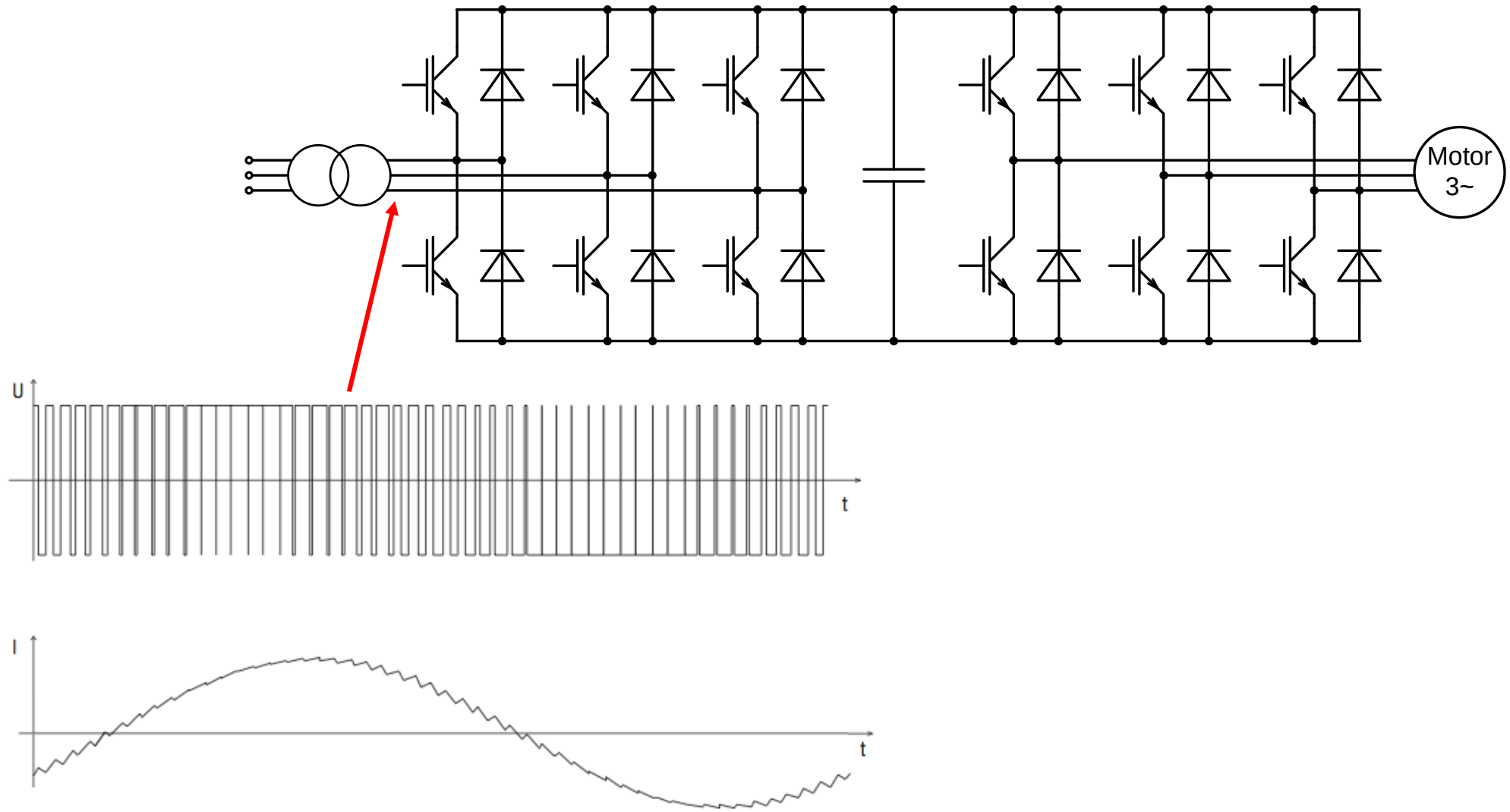
1. Übersicht



1. Übersicht



1. Übersicht

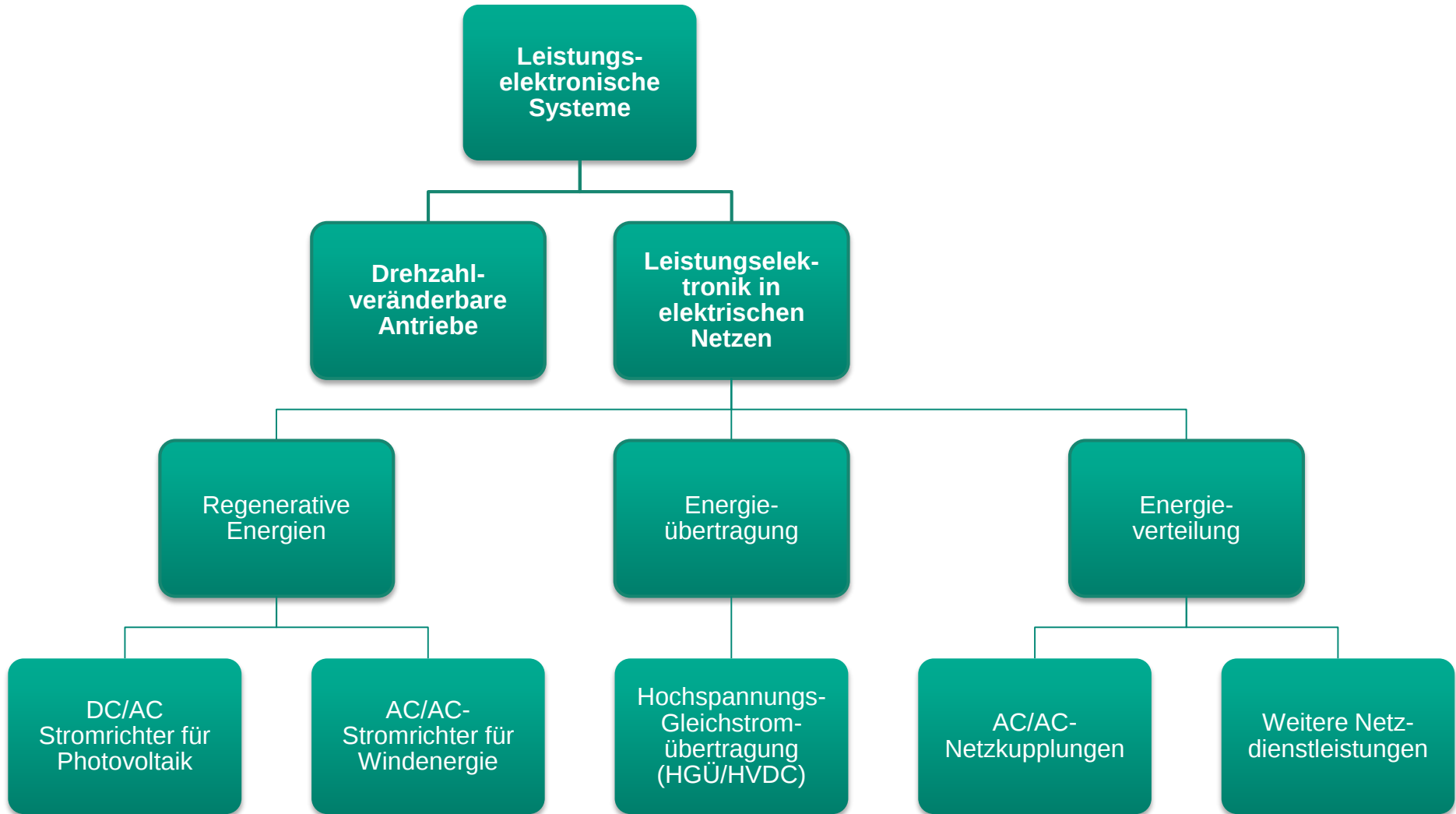


Gliederung

Wechselwirkungen Umrichter-Netz

1. Übersicht
2. Netzanwendungen
3. Transformatoren für Umrichterbetrieb
4. Netzurückwirkungen
5. Netzfilter
6. Zusammenfassung

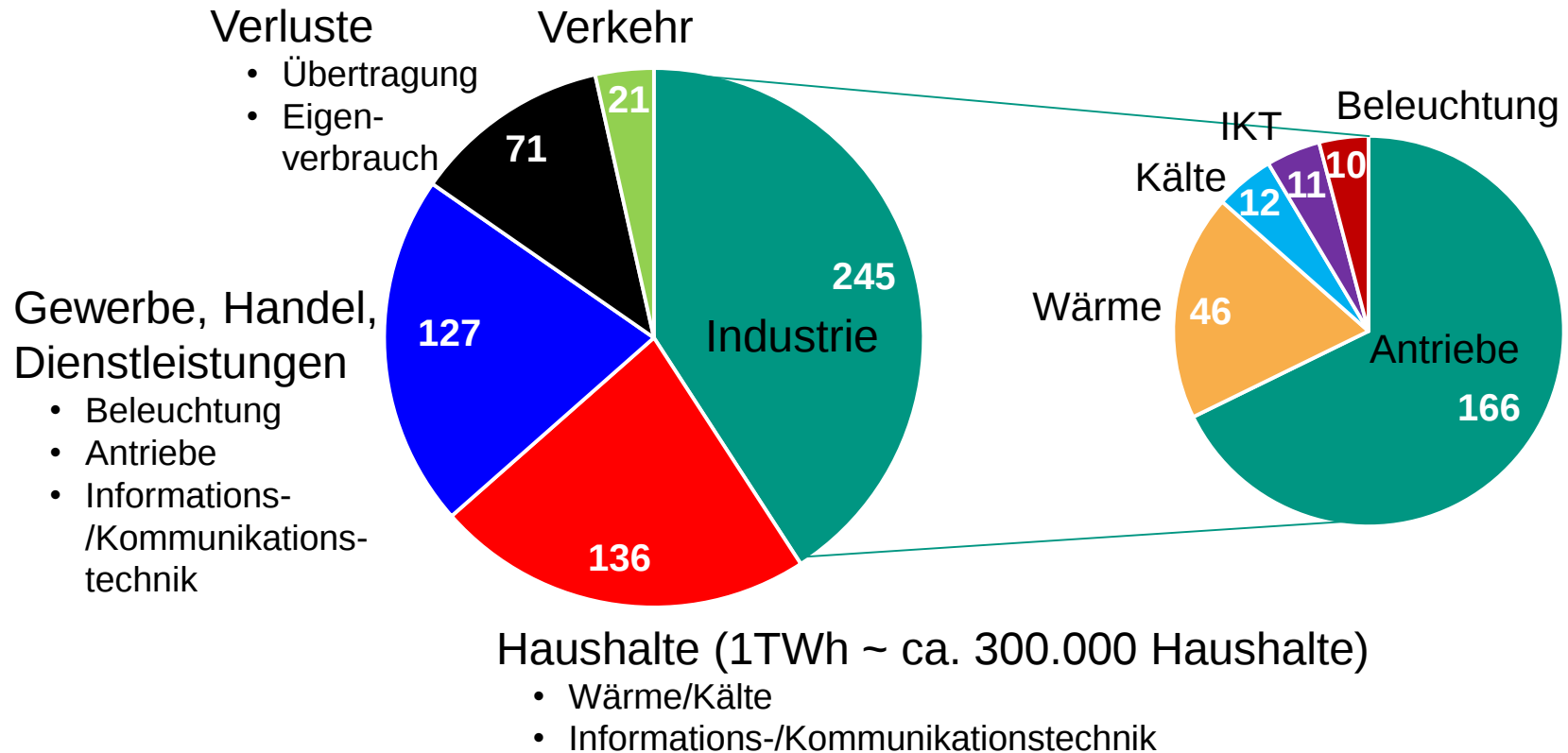
2. Anwendungen – Netzstromrichter



2. Anwendungen – Netzstromrichter

■ Stromverbrauch 2013 in Dtl.: 600 TWh

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

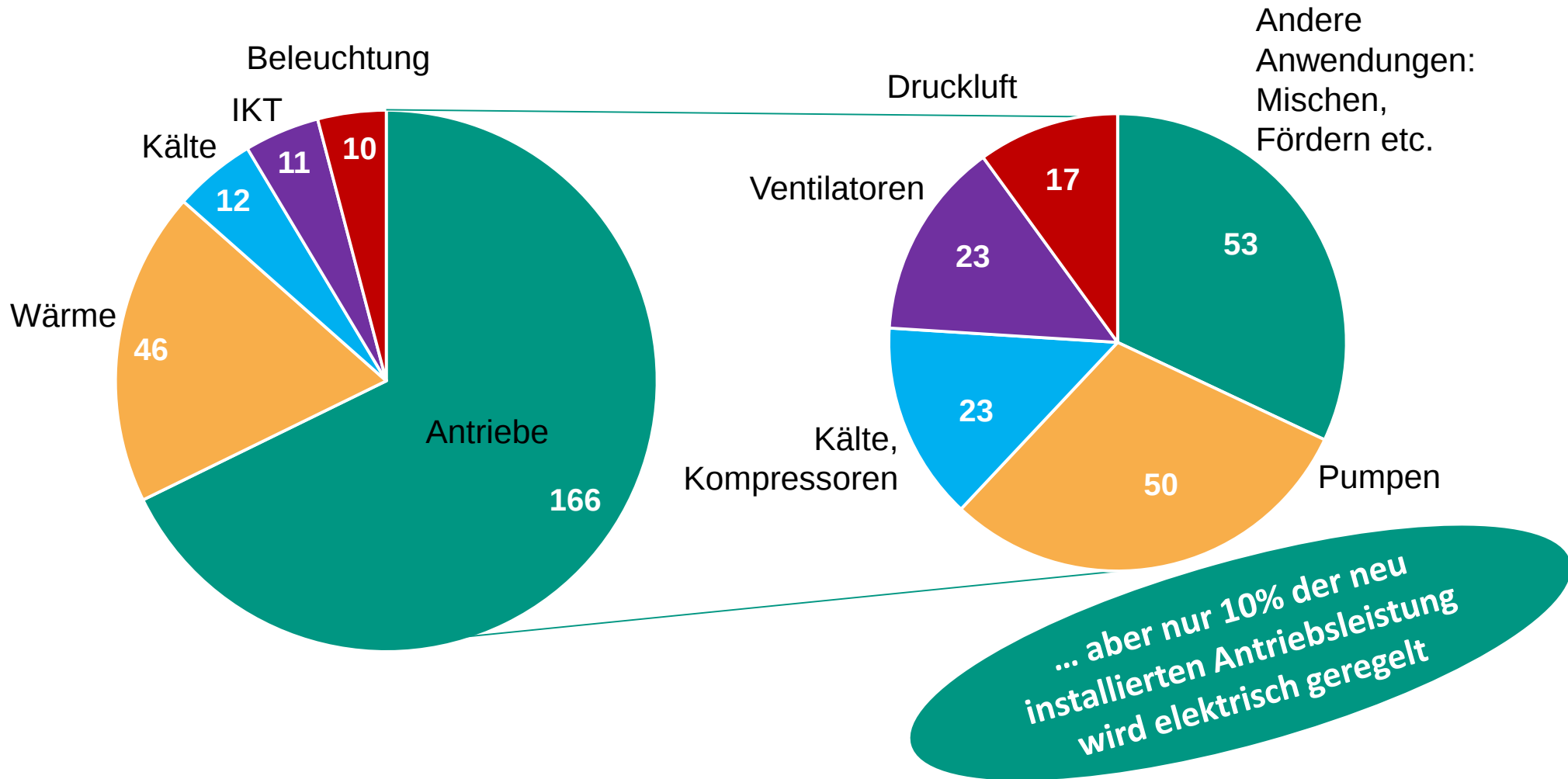


alle Angaben in TWh

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

2. Anwendungen – Netzstromrichter

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



alle Angaben in TWh

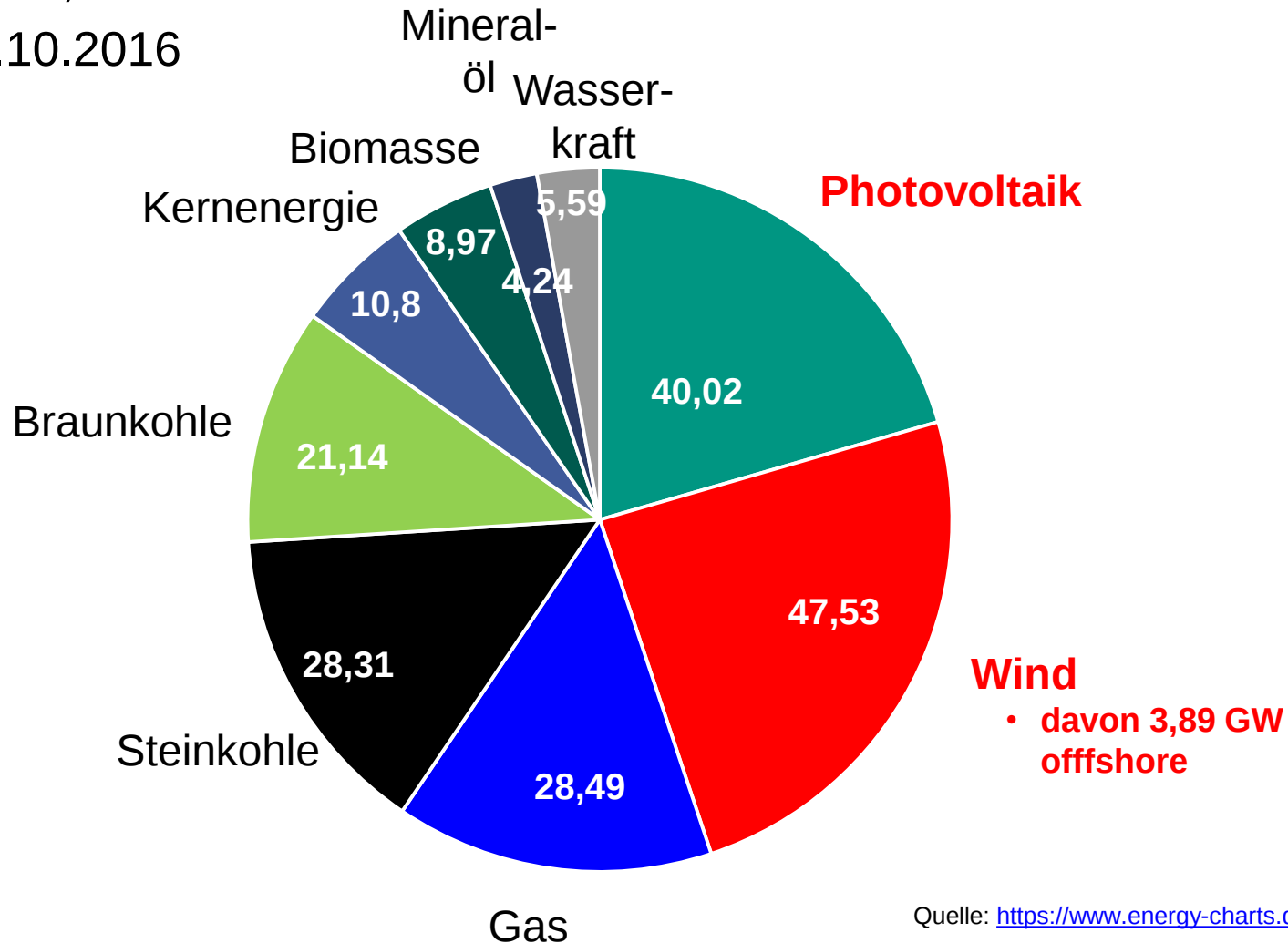
Quelle: Rationelle Energiegewinnung in der Industrie, Fraunhofer Institut System und Innovationsforschung Karlsruhe; Siemens

2. Anwendungen – Netzstromrichter

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

■ Gesamt: 195,09 GW

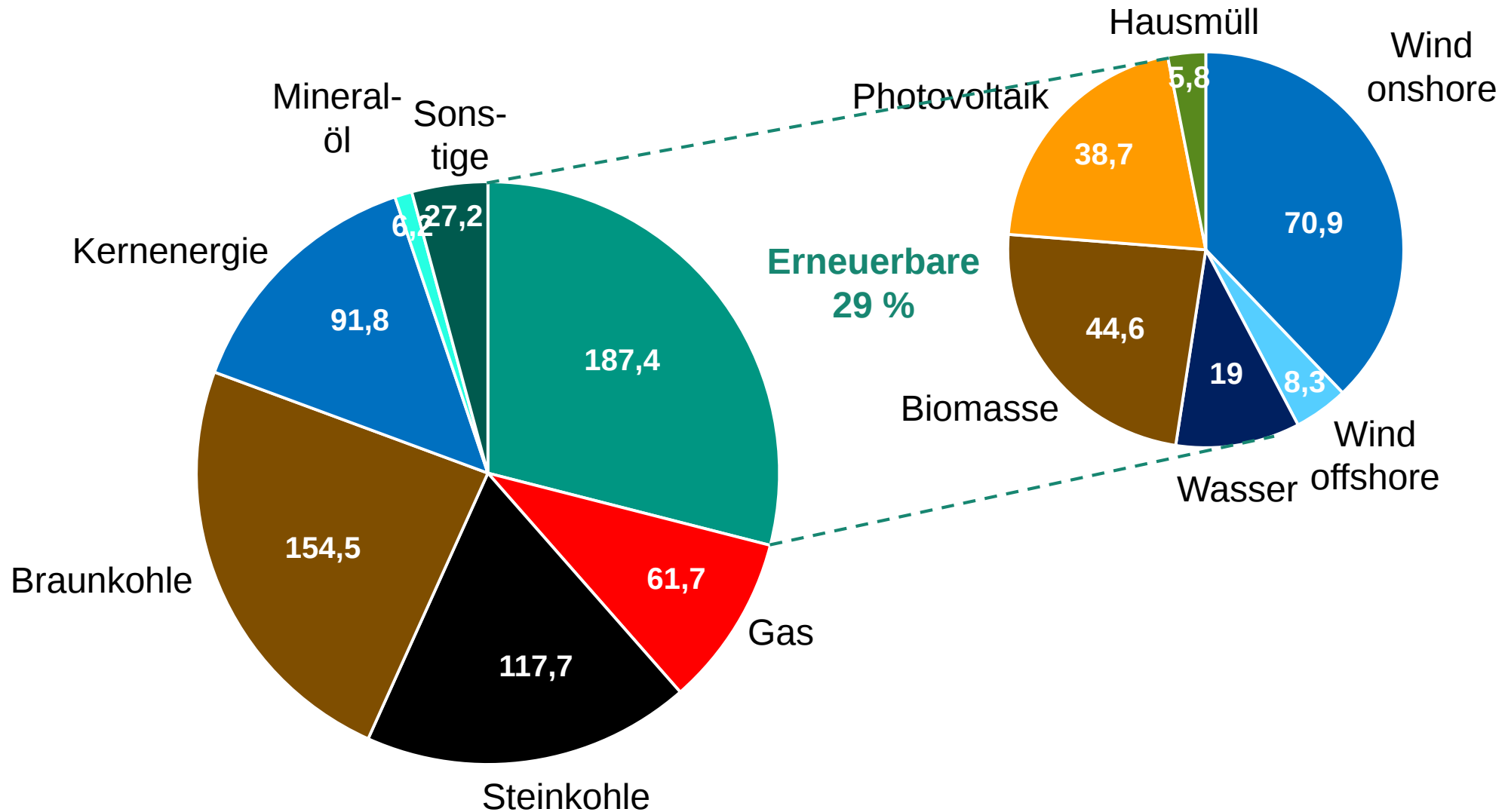
■ Stand: 04.10.2016



Quelle: https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm,
Bundesnetzagentur

3. Anwendungen – Netzstromrichter

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



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

2. Anwendungen – Hochspannungs-Gleichstromübertragung

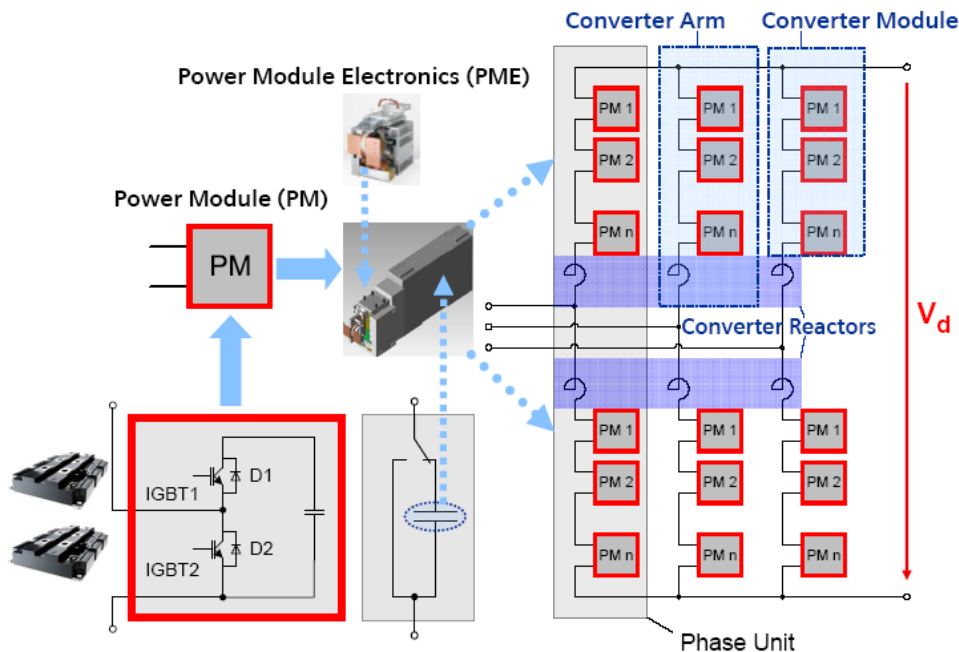
- Notwendiger Aus- und Umbau des Übertragungsnetzes
 - Nachhaltige Sicherstellung der Versorgungssicherheit (15min / Jahr)
 - Integration Erneuerbarer Energien
 - Weiterentwicklung des europäischen Energiemarkts
- 3-4 Korridore für **Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)**
Trassenlänge: max. 2.100km
Übertragungsleistung: 12 GW
- AC-Leitungsneubau in Bestandstrassen: 3.400 km



Quelle: Netzentwicklungsplan

2. 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

2. Anwendungen – Netzkupplung Hafenstromversorgung

- Netzkupplung zwischen Hamburger Stadtnetz und Bordnetz
- Kriterien:
 - Skalierbare Spannung
 - Hohe Regeldynamik
 - Hohe Verfügbarkeit
 - Netzurückwirkungen



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

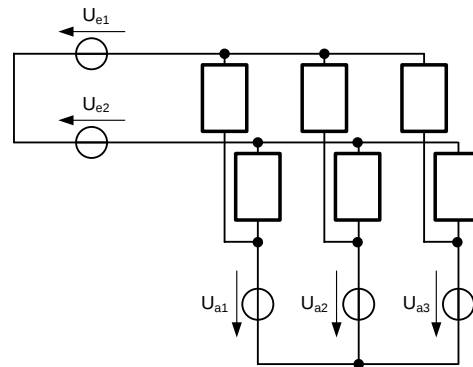
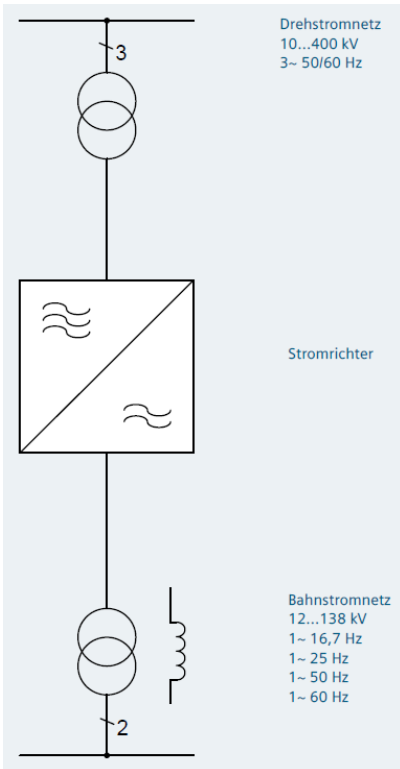
Quelle: Siemens



2. Anwendungen – Bahnstromversorgung aus dem 3ph-Drehstromnetz

- **Application example:**
VSC based static frequency converter for the AC railway grid supply (<120MW) featuring

- Modular design, scalable voltage, i.e. power
- High efficiency
- High availability
- Low harmonics



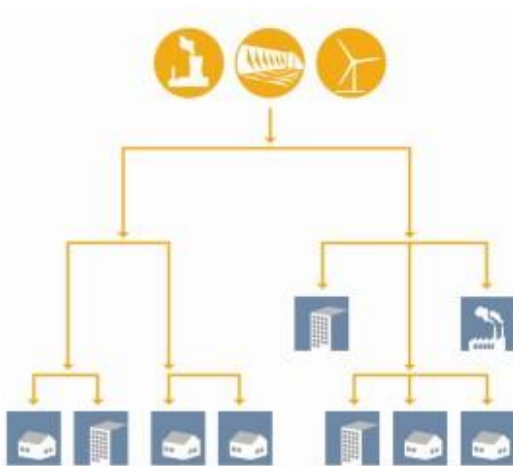
- **Power semiconductors:**
 - IGBT-modules with $V_{CES}=3,3-6,5$ kV (single n=1)
 - Press Pack-IGBT with $V_{CES}=4,5$ kV: future ?
 - Press Pack-IGCT: future ?
- **Advantages:**
 - Filterless, highly modular
 - Lower costs due to standard transformers

Quelle: Siemens

2. Anwendungen – Zukünftige Netzstrukturen

State-of-the-art grid structure

- **Centralized** power generation
- **Unidirectional** power flow
- Power generation following the load
- Centralized grid management
- Centralized top down structure



Future grid structure

- **Decentralized** power generation, higher distances between source and load
- **Bidirectional** power flow and balancing
- Power generation independent from the load
- Decentralized grid management
- Decentralized bottom up structure (public/private) requiring refurbishment and upgrades

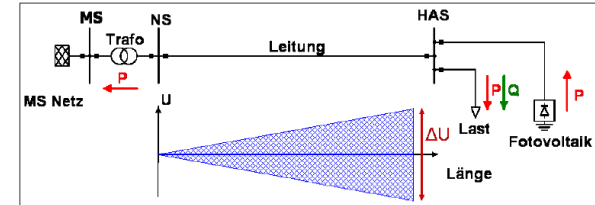
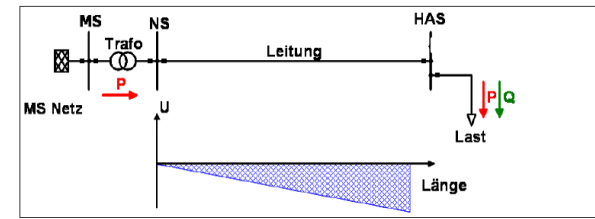


2. Anwendungen – Weitere Netzdienstleistungen

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

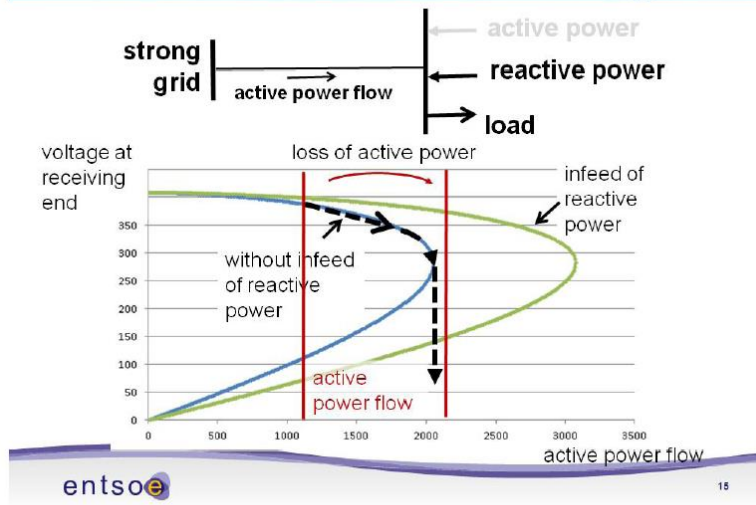


Quelle: TU München, Prof. Witzmann

Zukünftig: Leistungselektronik muss netzbildende Eigenschaften bekommen

- 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



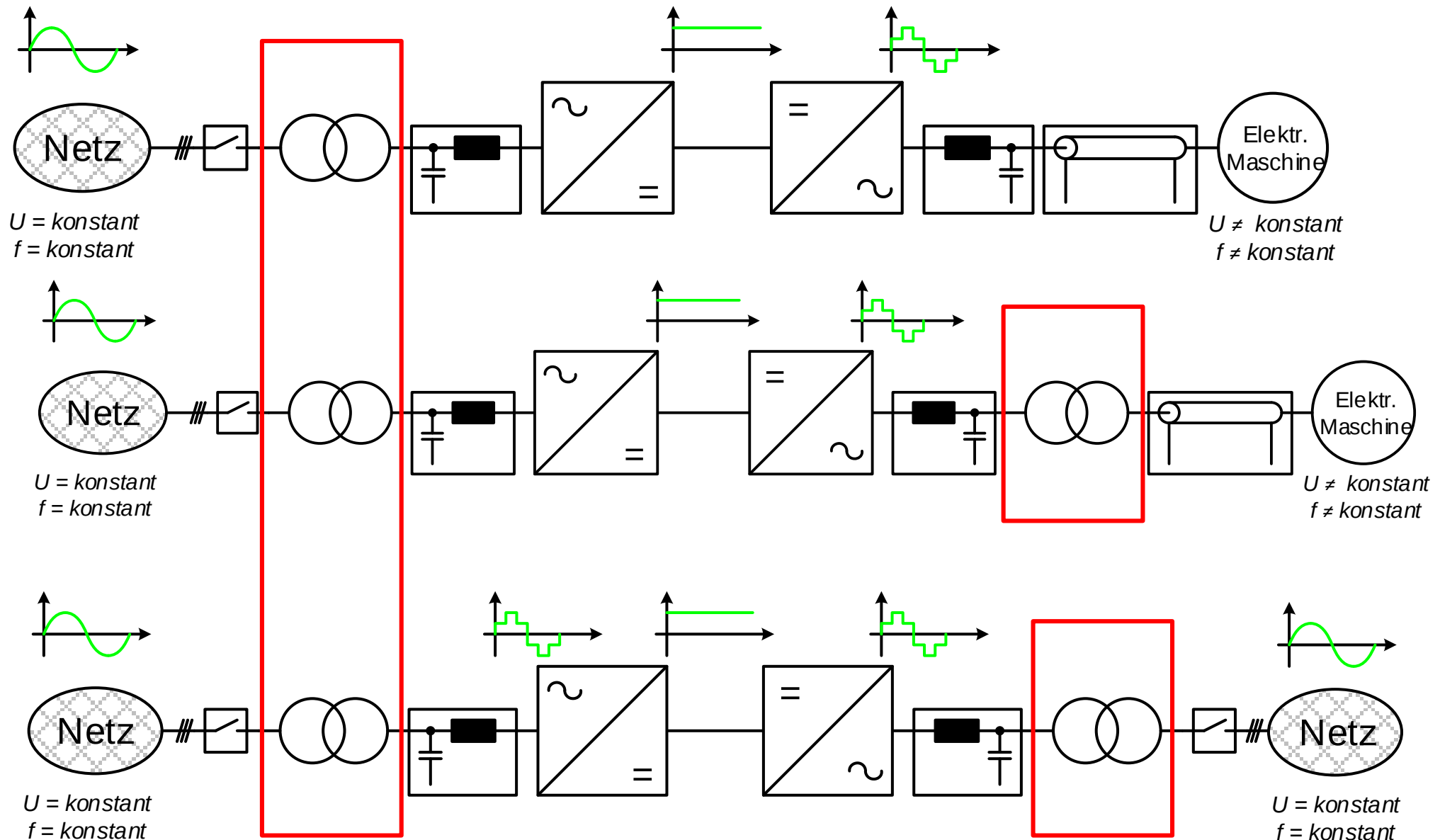
Quelle: Dr. Grebe, Amprion bei ENTSO-E Workshop Emergency Defence Plan 19.3.2012

Gliederung

Wechselwirkungen Umrichter-Netz

1. Übersicht
2. Netzanwendungen
- 3. Transformatoren für Umrichterbetrieb**
4. Netzurückwirkungen
5. Netzfilter
6. Zusammenfassung

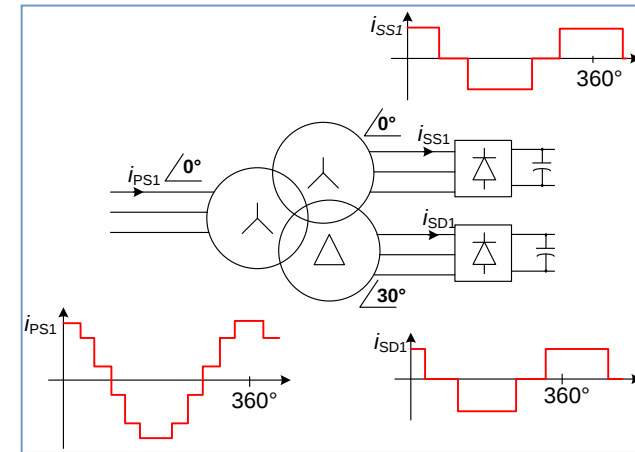
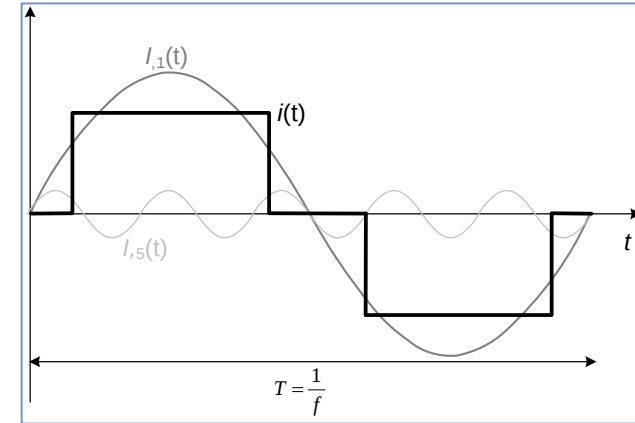
3. Transformatoren für Umrichterbetrieb



3. Transformatoren für Umrichterbetrieb

Besonderheiten gegenüber reinem Netzbetrieb

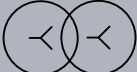
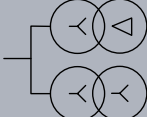
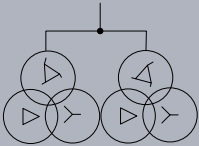
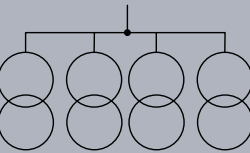
- Nicht sinusförmige Ströme
- Mögliche DC-Ströme durch Umrichter (z.B. durch Offsetfehler in der Strommessung): Gefahr der Sättigung → großer Luftspalt
- Zusatzverluste durch Stromharmonische:
 - Eisenverluste im Kern
 - Wirbelstromverluste in Windungen und weiteren Metallteilen
- Bei Netztransformatoren
 - Drei- oder Mehrwicklungstransformatoren für die Reduzierung/Eliminierung niederfrequenter Netzharmonischer
- Bei Step-Up/Down-Transformatoren zwischen Umrichter und Motor:
 - Variable Frequenz
 - Derating im Anlaufverhalten durch Betrieb mit kleinen Motorfrequenzen:
→ erhöhter Kernquerschnitt, → nur quadratische Kennlinie möglich



3. Transformatoren für Umrichterbetrieb

Netztransformatoren

- Die Zahl der Transformatoren und deren Wicklungskonfiguration ist sehr stark von den jeweiligen Randbedingungen abhängig (z.B. Kühlung, verfügbarer Platz, Hersteller)

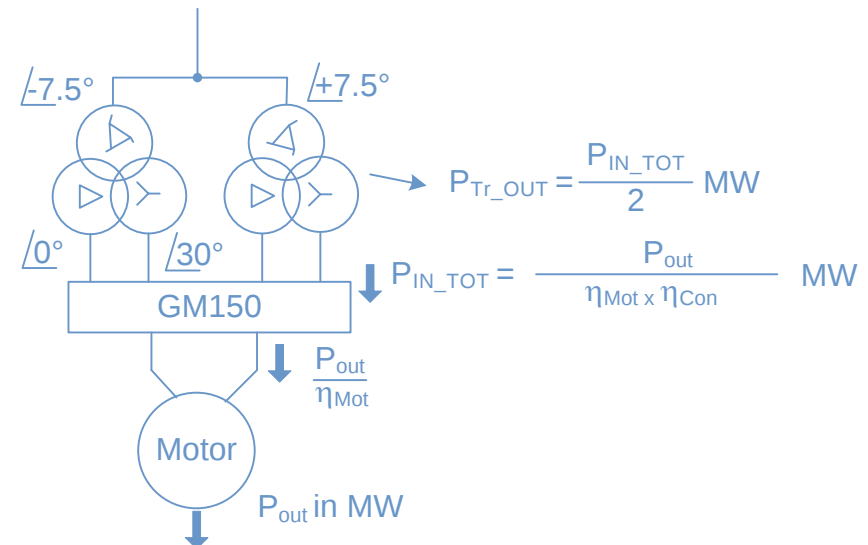
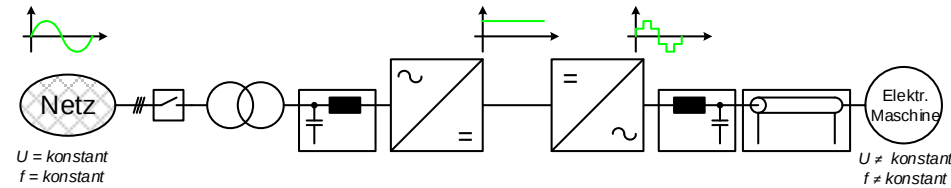
Pulszahl	Mögliche Transformator-Konfigurationen	Phasenverschiebung zwischen den Systemen	Beispiel der Wicklungskonfiguration
6	Zweiwickler 	-	Zweiwickler: Yd1, Yd5, Dd0
12	1x Dreiwickler  2x Zweiwickler 	30°	Dreiwickler: Yd11d0, Dy5d0
24	1x Fünfwickler  2x Dreiwickler  4x Zweiwickler 	15°	2x Dreiwickler: D(+7.5°)y5d0 und D(-7.5°)y5d0

$$|\Delta\phi_{v2el}| = \frac{360^\circ}{n_{pulse}}$$

3. Transformatoren für Umrichterbetrieb

Auslegungsaspekte

- Spannungsauslegung:
 - Primärspannung: Nennspannung, inkl. Spannungstoleranz (z.B. +/- 10%)
 - Sekundärspannung: Nennspannung im Leerlauf
→ Spannungsabfall unter Last muss berücksichtigt werden
- Frequenzauslegung:
 - Nennnetzfrequenz (z.B. +/- 3%)
 - Bei Step-Up/Down-Transformatoren zwischen Umrichter und Motor: Betriebsbereich Maschine
- Nennleistung: Spezifiziert werden
 - die Ausgangswirkleistung P_{Tr_out} des Transformators,
 - $\cos\varphi$ am Umrichtereingang,
 - THD_i des Umrichtereingangsstroms.
 - Nicht spezifiziert werden: Grund- und Oberschwingungsverluste



3. Transformatoren für Umrichterbetrieb

Auslegungsaspekte

- Oberschwingungsverluste durch nicht rein sinusförmige Ströme:
 - Wirbelstromverluste in den Wicklungen

$$P_{WE} = F_{WE} \times P_{WE1}$$

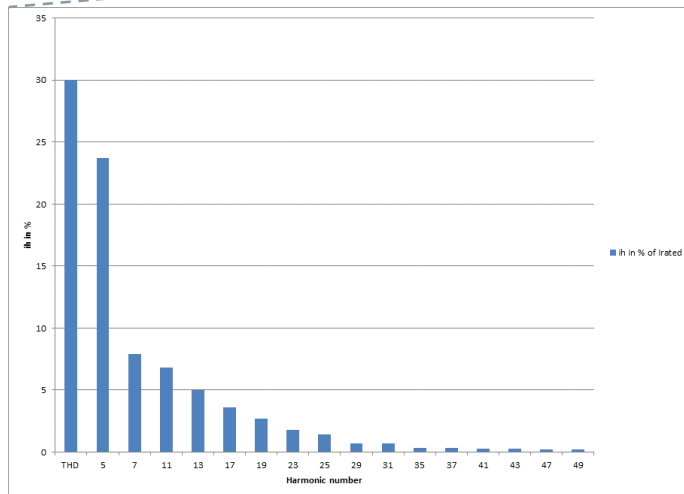
wobei,

P_{WE} : Wirbelstromverluste bei nicht sinusförmigem Strom

P_{WE1} : Wirbelstromverluste durch Grundswingungsstrom

F_{WE} : Faktor für Berücksichtigung der Wirbelstromverluste durch Harmonische

$$F_{WE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2 \times \left(\frac{P_{WE1h}}{P_{WE1}} \right)$$



Abhängig von Geometrie
(Angabe durch Hersteller)

3. Transformatoren für Umrichterbetrieb

Auslegungsaspekte

- Oberschwingungsverluste durch nicht rein sinusförmige Ströme:
 - Eisenverluste im Kern

$$P_{SE} = F_{SE} \times P_{SE1}$$

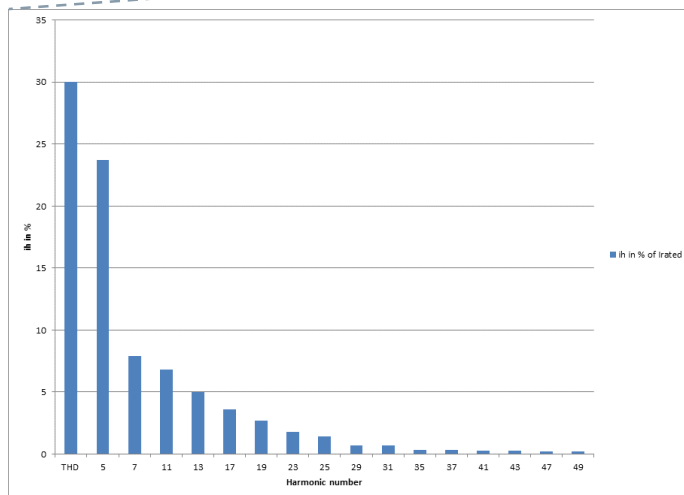
wobei,

P_{SE} : Eisenverluste bei nicht sinusförmigem Strom

P_{SE1} : Eisenverluste durch Grundswingungsstrom

F_{SE} : Faktor für Berücksichtigung der Eisenverluste durch Harmonische

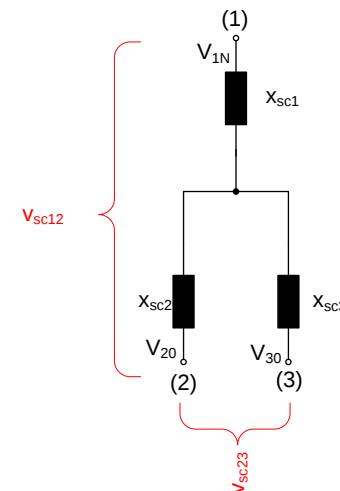
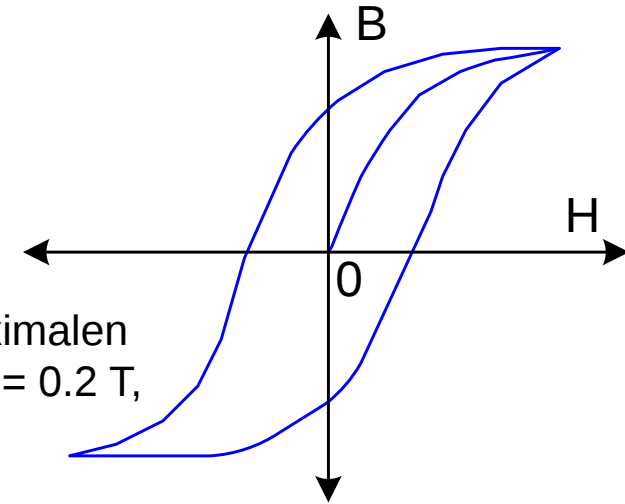
$$F_{SE} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8}$$



3. Transformatoren für Umrichterbetrieb

Auslegungsaspekte

- Maximale Flussdichte:
 - Eisensättigung muss vermieden werden, da es durch diese Nichtlinearitäten zu Spannungsverzerrungen kommt
 - i.d.R. wird nicht der absolute Wert, sondern der Abstand zur maximalen Sättigungsflussdichte spezifiziert (z.B. für Netztransformator: $\Delta B = 0.2 \text{ T}$, d.h. $B_{\text{max}} = 1,6 \text{ T}$ bei $B_{\text{sat}} = 1.8 \text{ T}$)
- DC Offsetstrom:
 - Mögliche DC-Ströme verursacht durch den Umrichter führen zu schneller Eisensättigung
→ Überhitzung, Vibrationen, Geräusche
 - Muss spezifiziert werden, z.B. max (4 A, 1 % des Grundschwingungs-Nennstroms). Stellt einen Erfahrungswert dar.
- Kurzschlussimpedanz
 - $u_{k,\text{min}}$: abh. vom Kurzschlussstrom und Lichtbogenfestigkeit
 - $u_{k,\text{max}}$: abh. von maximal zulässigem Spannungsabfall über dem Transformator bzw. minimal zulässige Zwischenkreisspannung U_d
 - Angabe eines Bereichs und einer Toleranz geben dem Hersteller größere Freiheitsgrade in der Produktion, da u_k schwer exakt einstellbar ist

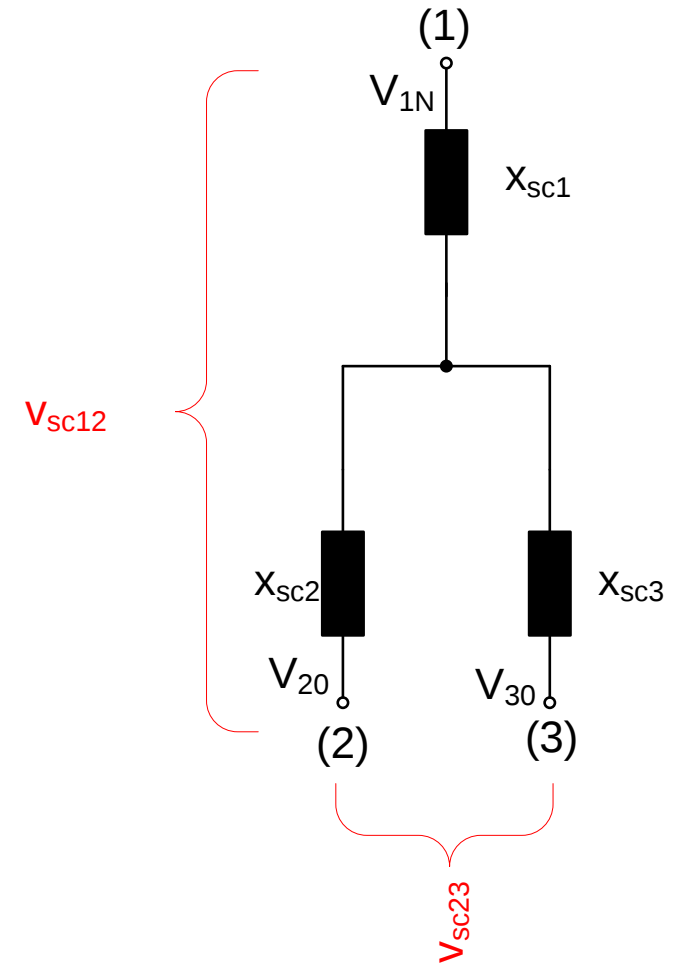


3. Transformatoren für Umrichterbetrieb

Auslegungsaspekte

- Kopplungsfaktor:
 - Definiert die maximal zulässige Kopplung zwischen den Sekundärwicklungen eines Mehrwicklungs-Transformators
 - Ziel: möglichst gute Entkopplung zwischen den Sekundärsystemen, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden, z.B. $k=10..15\%$

$$k = \frac{X_{sc1}}{X_{sc1} + X_{sc2}}$$
$$= \frac{X_{sc1}}{V_{sc12}}$$
$$V_{sc23} = 2 \cdot V_{sc12} \cdot (1 - k)$$



Gliederung

Wechselwirkungen Umrichter-Netz

1. Übersicht
2. Netzanwendungen
3. Transformatoren für Umrichterbetrieb
- 4. Netzurückwirkungen**
5. Netzfilter
6. Zusammenfassung

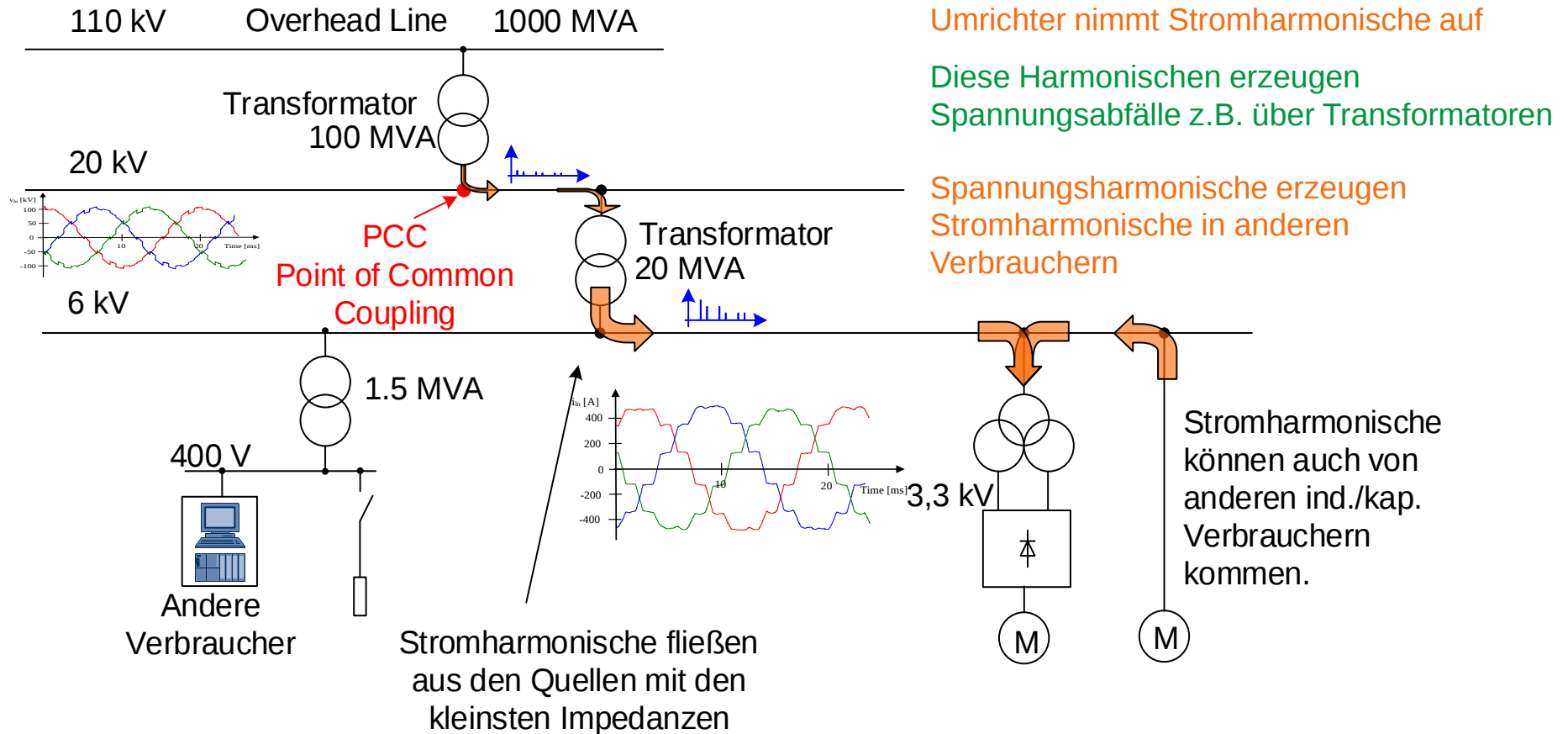
4. Netzurückwirkungen

Auswirkungen

- Zusätzliche Verluste in Bauteilen
 - Transformatoren, Drosseln,
 - Kabel (ohmsch, dielektrisch)
 - Motoren
 - Kondensatoren (dielektrisch)
- Zusätzliche Isolationsbelastung von Betriebsmitteln
- Störung von elektronischen Geräten, z.B. Uhren, Messgeräte
- Fehlerhafte Auslösung von Schaltern oder Sicherungen
- Anregung von Resonanzen im Netz oder bei anderen Verbrauchern

4. Netzurückwirkungen

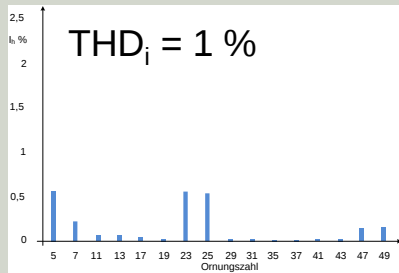
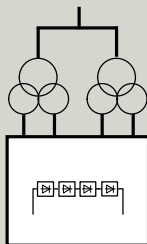
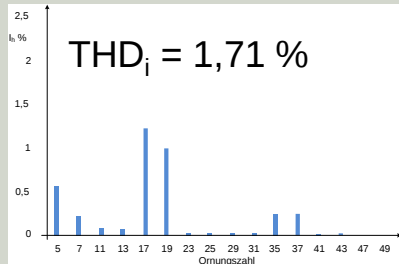
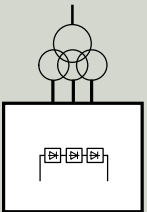
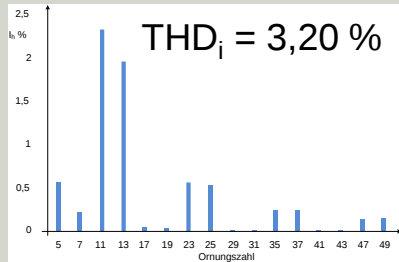
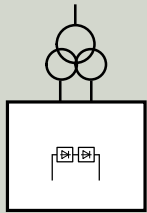
Ausbreitung von Harmonischen bei Dioden-Gleichrichter am Netz



4. Netzurückwirkungen

Abhilfemaßnahmen

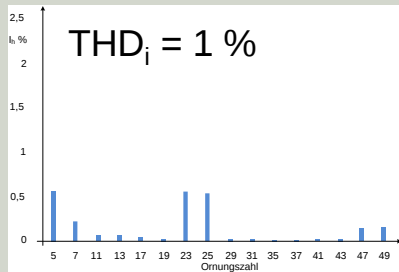
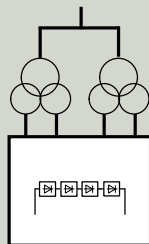
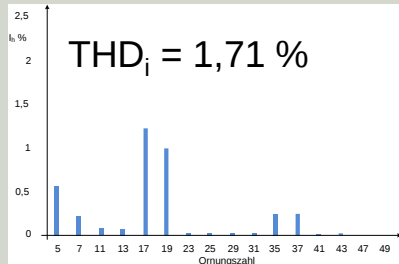
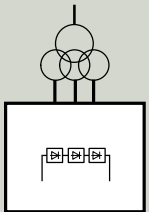
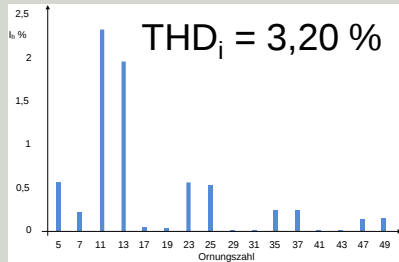
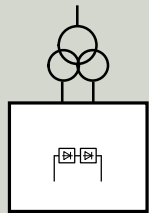
Höhere Pulszahl



4. Netzurückwirkungen

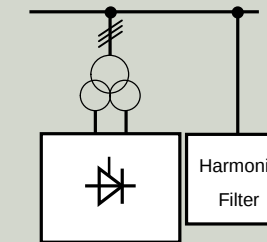
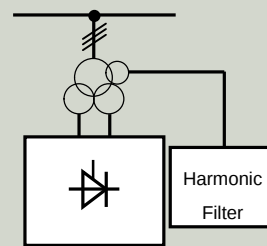
Abhilfemaßnahmen

Höhere Pulszahl

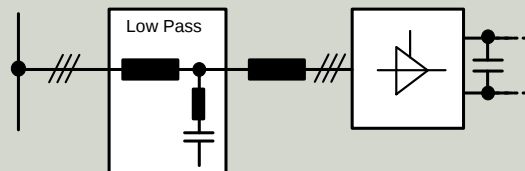


Netzfilter

MV

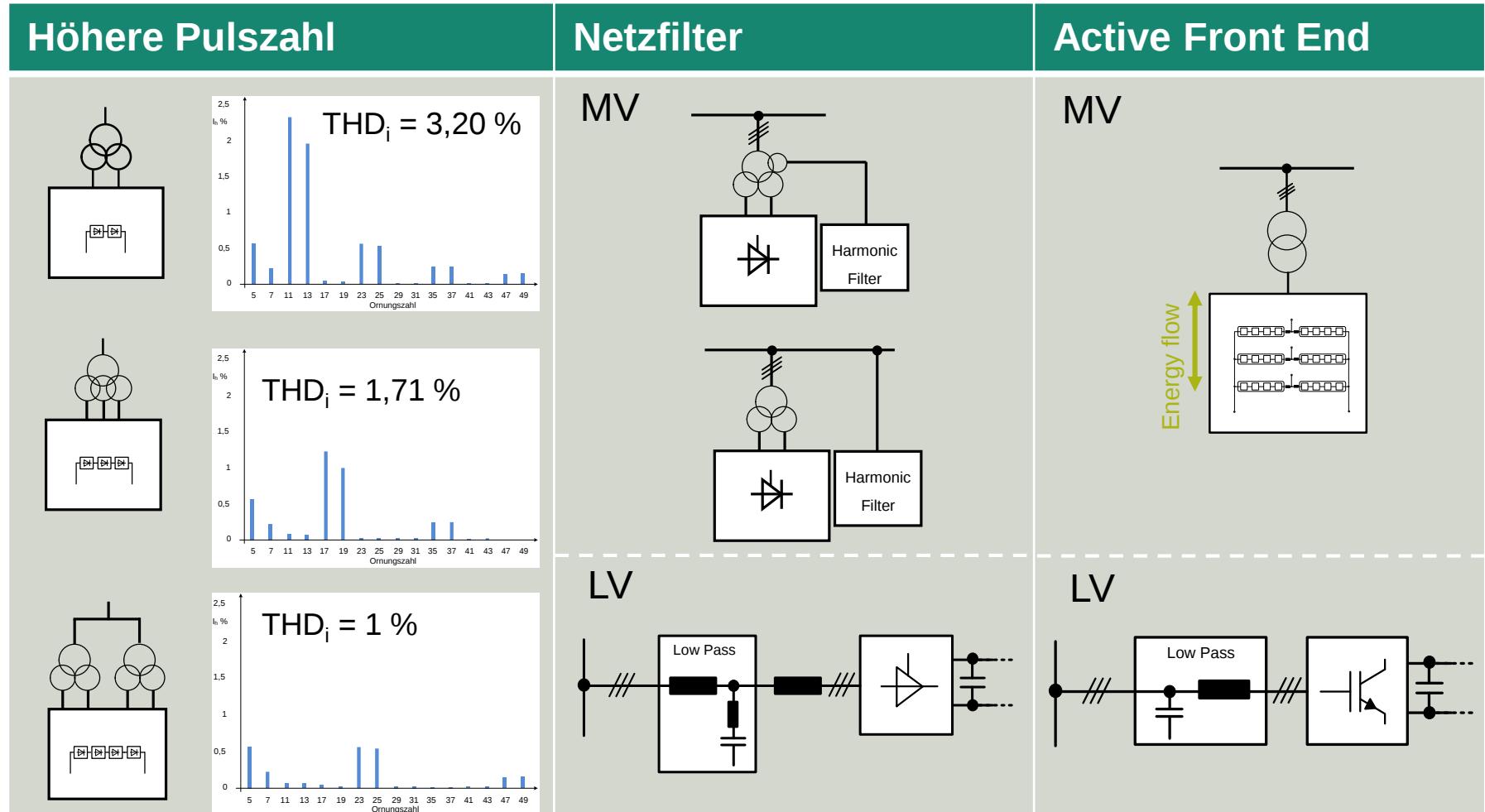


LV



4. Netzurückwirkungen

Abhilfemaßnahmen



Gliederung

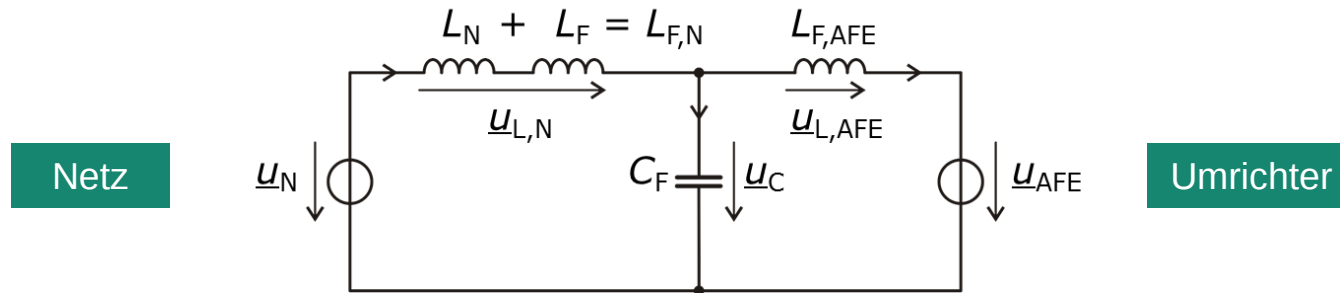
Wechselwirkungen Umrichter-Netz

1. Übersicht
2. Netzanwendungen
3. Transformatoren für Umrichterbetrieb
4. Netzurückwirkungen
- 5. Netzfilter**
6. Zusammenfassung

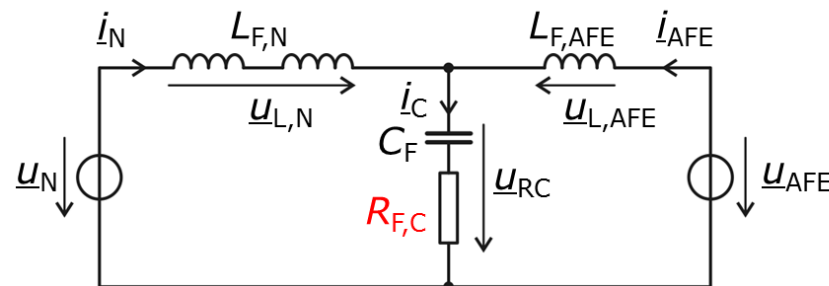
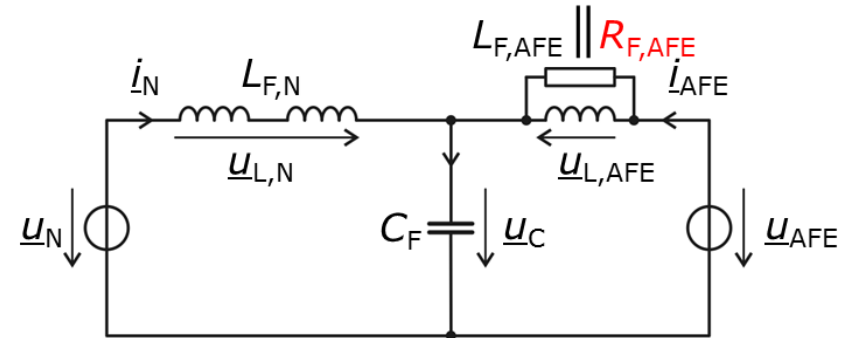
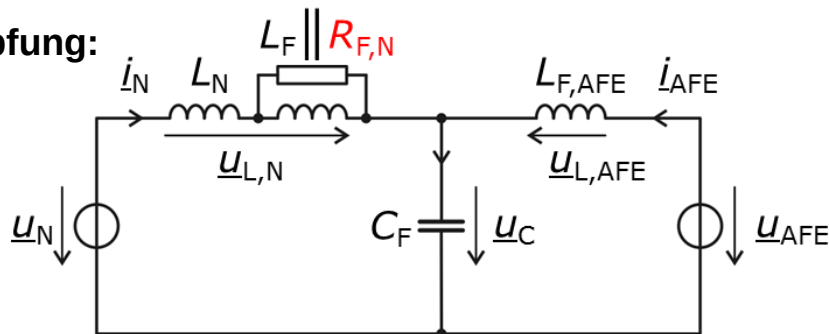
5. Netzfilter

Beispiel: T-Netzfilter

ohne Dämpfung:



mit Dämpfung:



- Vorteil: keine ungedämpften Schwingkreise
- Evtl. Kombination mit Drosseldämpfung bei zu hohen Kernverlusten

5. Netzfilter

Motivation

- Einhaltung von Anforderungen zu Netzharmonischen (z.B. IEEE-519, Grid Codes)

Current harmonic limits in percentage of rated current amplitude according to IEEE-519

Maximum odd harmonic current distortion (in percent) of I_G for general distribution systems (120V–69kV)

I_{SC}/I_G	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$
$< 20^*$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4

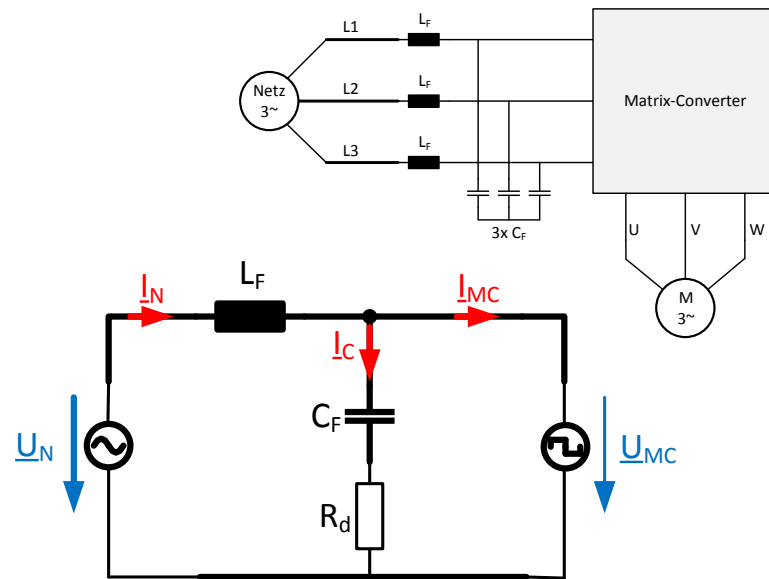
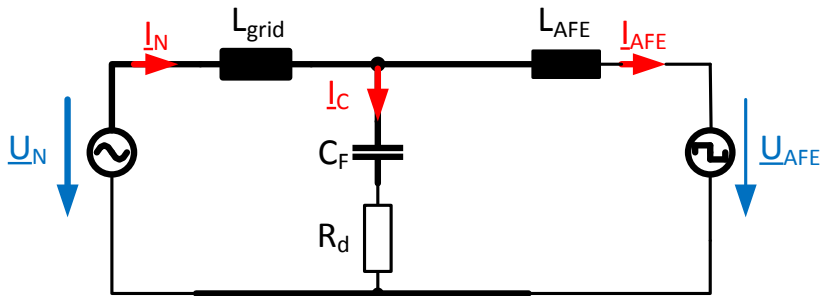
I_{SC} : grid short circuit current.

I_G : maximum demand grid current.

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics.

*All power generation equipment is limited to this value of current distortion.

Schaltungsauswahl



5. Netzfilter

Randbedingungen

▪ Resonanzfrequenz des Filters

$$f_{res,LCL} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_{Netz} + L_{AFE}}{L_{Netz} \cdot L_{AFE} \cdot C_F}} \quad \text{wobei} \quad 10 \cdot f_N < f_{res,LCL} < \frac{1}{2} \cdot f_S$$

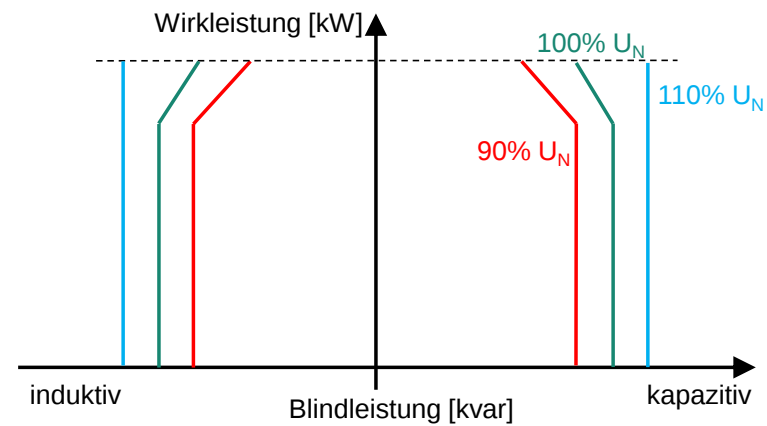
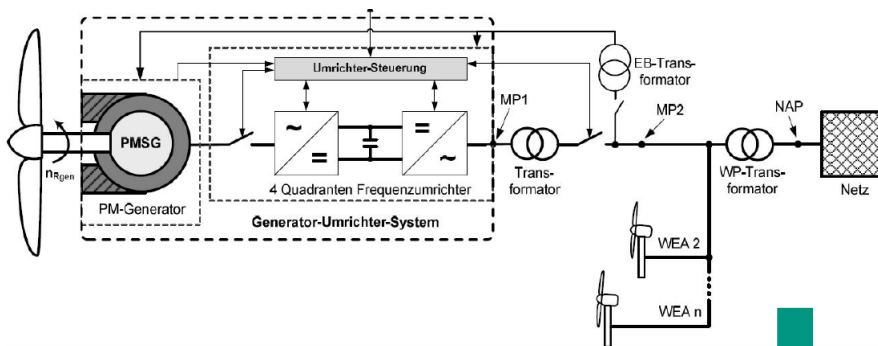
(f_S : result. Schaltfrequenz, f_N : Netzfrequenz)

▪ Berücksichtigung des **Spannungsabfalls über den Filter**

- im gesamten P/Q-Betriebsbereich des Umrichters
- im gesamten Bereich der Netzspannung U_N am PCC

Bei gleichzeitiger Einhaltung einer ausreichenden Spannungsreserve für die Stromregelung

▪ max. Scheinleistung des Stromrichters



5. Netzfilter

Randbedingungen

- **netzseitige Stromharmonische** (z.B. IEEE-519, Grid Codes)

Current harmonic limits in percentage of rated current amplitude according to IEEE-519

Maximum odd harmonic current distortion (in percent) of I_G for general distribution systems (120V–69kV)

I_{SC} / I_G	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$
$< 20^*$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4

I_{SC} : grid short circuit current.

I_G : maximum demand grid current.

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics.

* All power generation equipment is limited to this value of current distortion.

5. Netzfilter

Randbedingungen

- **Optimierung** des Filters:
 - minimale, mittlere gespeicherte Energie
 - Hier besonders wichtig: Gespeicherte Energie in den Drosseln (verbaute „Drosselenergie“ ist wesentlich teurer als „Kondensatorenergie“)
 - minimale Filterverluste
 - minimale Baugröße
 - fertigungstechnische Randbedingungen (Standardreihen, Bemessungswerte,...)
- **Optimierung** auf Systemebene:
 - Kritisch: Vermeidung von Resonanzen mit dem Netz in allen möglichen Netzkonfigurationen
 - minimale Gesamtsystemkosten
 - minimale Gesamtsystemverluste

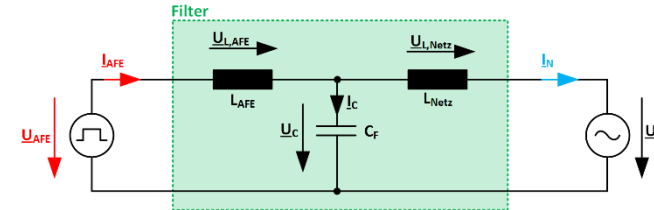
5. Netzfilter

Modellierung, Simulation, Auslegung

- Verhältnissfaktor r zwischen L_{AFE} und L_{Netz} legt das Verhältnis zwischen den Induktivitäten fest

$$L_{Netz} = r \cdot L_{AFE}$$

$$r = 0 \dots 1$$



- Die Induktivität L_{AFE} ist aus regelungsdynamischen Gründen vorteilhaft größer als L_{Netz}
- Die Stromregelung hat nur direkten Einfluss auf I_{AFE} über L_{AFE} und U_{AFE}
- Gesamtinduktivität für Filterwirkung vorgegeben – Aufteilung variabel
- Bestimmung der Harmonischen mit dem größten Amplituden/Frequenz-Verhältnis $|A|/f$
- Für die μ -te Stromharmonische gilt:

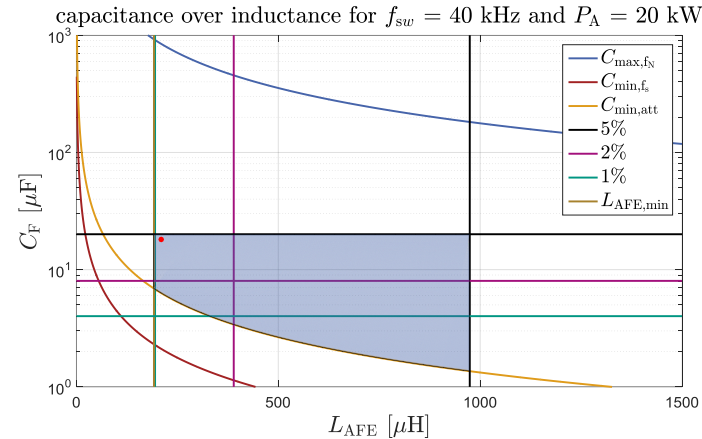
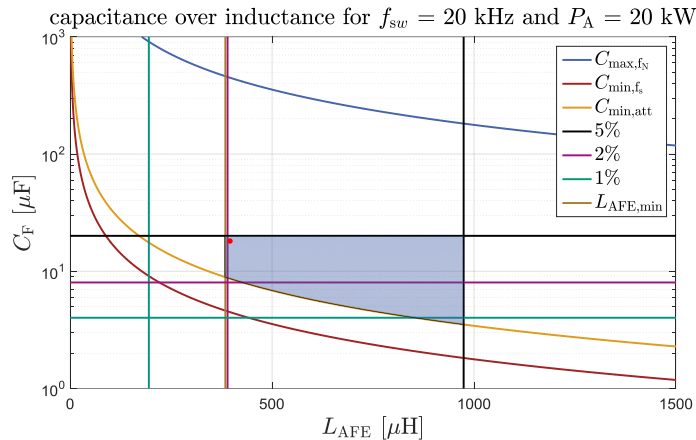
$$i_{\mu} = \left| \frac{\underline{U}_{AFE,\mu}}{-j\omega_{\mu}^3 \cdot (L_{Netz} \cdot L_{AFE} \cdot C_F) + j\omega_{\mu} \cdot (L_{Netz} + L_{AFE})} \right|$$

- Die Filterresonanzfrequenz kann so bestimmt werden, dass die Amplitude der Harmonischen mit dem höchsten $|A|/f$ kleiner als der gewünschte Zielwert ist oder der THD eingehalten wird.

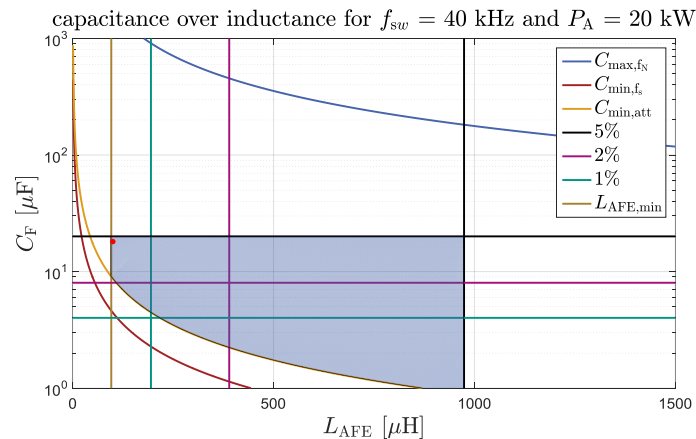
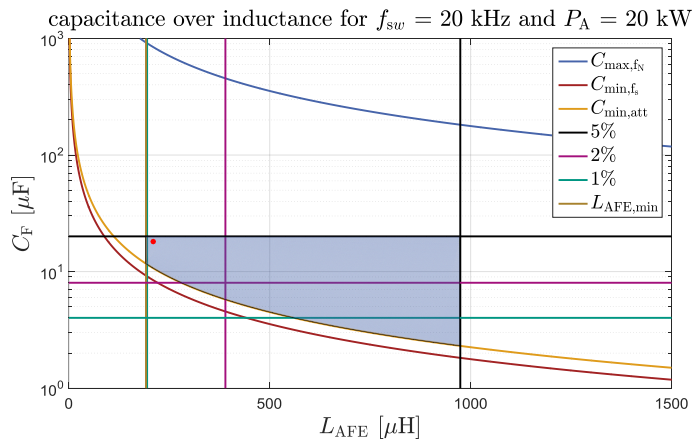
5. Netzfilter

Modellierung, Simulation, Auslegung

- Beispiel für **2-Level Umrichter** ($P=20\text{kW}$) bei $f_s=20$ bzw. 40kHz



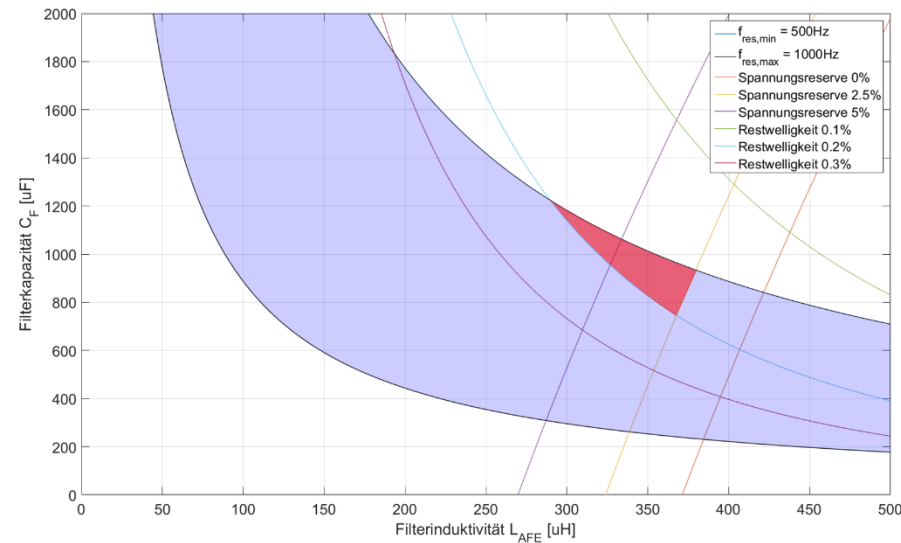
- Beispiel für **3-Level Umrichter** ($P=20\text{kW}$) bei $f_s=20$ bzw. 40kHz



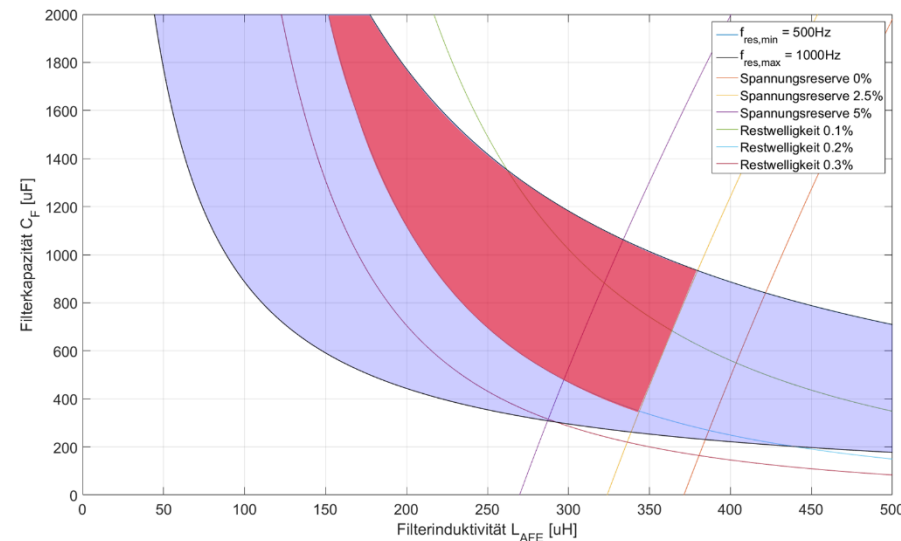
5. Netzfilter

Modellierung, Simulation, Auslegung

- Beispiel für **2-Level Umrichter** ($P=1,5\text{MW}$) bei $f_s=2\text{kHz}$



- Beispiel für **3-Level Umrichter** ($P=1,5\text{MW}$) bei $f_s=2\text{kHz}$



6. Wechselwirkungen Umrichter-Netz

Zusammenfassung

- Viele Aspekte die für die Wechselwirkung Umrichter-Maschine gelten, sind auch hier gültig (z.B. Verhalten von Kabelstrecken, Reflexionen)
 - Auslegung von Filtern ist ein Systemthema und wird beeinflusst von u.a. Netzkonfiguration, weiteren Verbrauchern, Stromrichterauslegung
 - Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Netzqualität sind:
 - Vermeidung von Oberschwingungen durch den Umrichter,
 - Passive Netzfilter,
 - Aktive Netzfilter (Umrichter),
 - Kompensationsanlagen.
 - Wechselwirkung Umrichter-Netz nimmt immer mehr an Bedeutung zu:
 - Anteil von Leistungselektronik im Netz steigt,
 - Anforderungen an Leistungselektronik zur Bereitstellung von Netzdienstleistungen steigen sehr stark an.
- Gegenstand aktueller Forschungsthemen