

Berthold Fuld

Oberschwingungsströme:
EN 61000-3-2 & EN 61000-3-12
Ansätze zur Erfüllung ihrer Anforderungen

Vortrag am 10. Mai 2001 an der TU Darmstadt

Aktualisiert 10.2006/ Ergänzt 8.2007, 11.2007, 5.2010, 11.2011, 7.2013, 3.2015

Falls Sie an einer Präsentation interessiert sein sollten, bitten wir Sie, mit uns in Verbindung zu treten

Berthold Fuld
Dr. Fuld Ing.-GmbH
Frankfurter Landstr. 112
61352 Bad Homburg
Tel.: 06172 928 928
Fax: 06172 928 927
E-Mail: bfuld@fuld.de

Unser Konzept

- **Modernste Leistungselektronik**
- **Optimierung des Kundennutzens**
- **Betreuung über die Produktlebensdauer**

Wir bieten

- ***Beratung***
- ***Forschung***
- ***Entwicklung***

Wir befassen uns mit

- ***Getakteten Stromversorgungen / Netzteilen***
- ***Umrichtern, z.B. für Antriebe, USV-Anlagen***

Unser Ziel

- **Stets in Ihrem Interesse die beste Lösung finden**

Berthold Fuld

Oberschwingungsströme: **EN 61000-3-2 & EN 61000-3-12** **Ansätze zur Erfüllung ihrer Anforderungen**

Vortrag am 10. Mai 2001 an der TU Darmstadt

Aktualisiert 10.2006/ Ergänzt 8.2007, 11.2007, 5.2010, 11.2011, 7.2013, 3.2015

Inhalt

Einleitung

Normen

- EN 61000-3-2
- EN 61000-3-12
- Regelwerke für Ströme außerhalb der Anwendungsbereiche o.g. Normen

Lösungsansätze

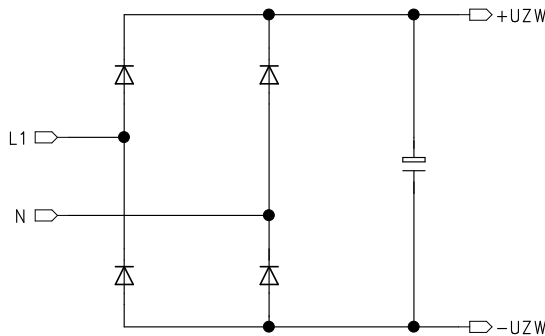
- Einphasige Lösungen
- Dreiphasige Lösungen

Zusammenfassung

Problematik: Hohe Oberschwingungsströme bei elektronischen Geräten mit Stromrichtern, insbesondere mit Dioden-GR

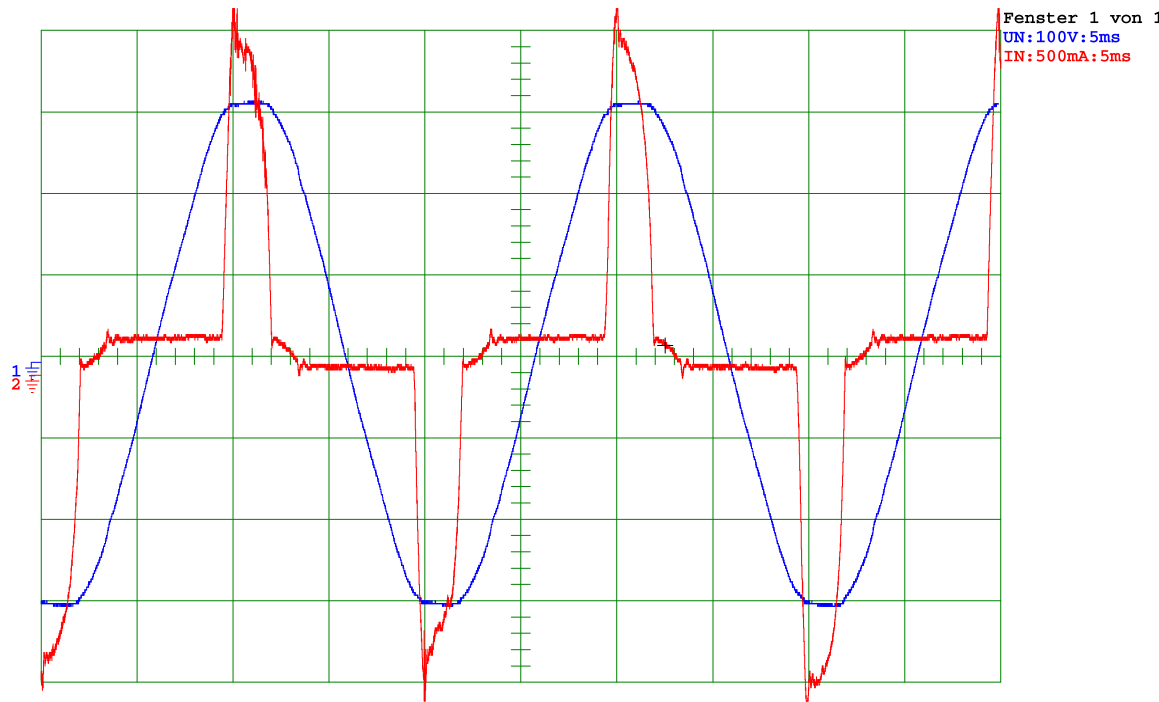
Kritische Baugruppen:

- Primär getaktete Schaltnetzteile
- Sekundär getaktete Schaltnetzteile
- Linear nachgeregelt Netzteile mit Netzfrequenztrafo
- Ungeregelt Netzteile mit Netzfrequenztrafo
- Elektronische Vorschaltgeräte für Leuchtstoffröhren
- U-Umrichter
- *Netzgeführte gesteuerte Stromrichter (auch klassische I-Umrichter)*
- *An- und Abschnittsteuerungen*
- *Dimmer*

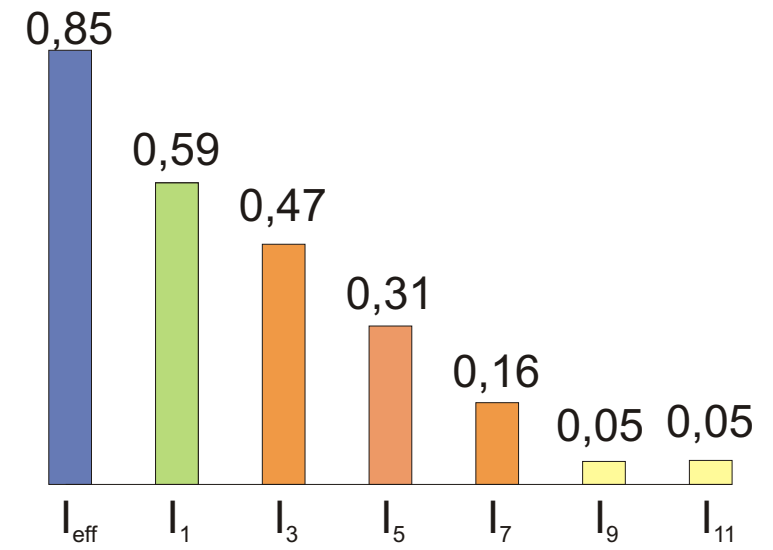


Oszillogramm und Oberschwingungsanalyse zeigen ein unbefriedigendes Verhalten

Eingangsstrom eines Oszilloskops



Spektrum des Eingangstroms [A]



$$\cos \varphi = \frac{P}{U_1 I_1} \sim 1$$

$$\lambda = \frac{P}{U_{eff} I_{eff}} \sim 0,5..0,7 \text{ (hier } 0,677)$$

Zusätzlicher Aufwand für stärker dimensionierte Stromversorgungsanlagen

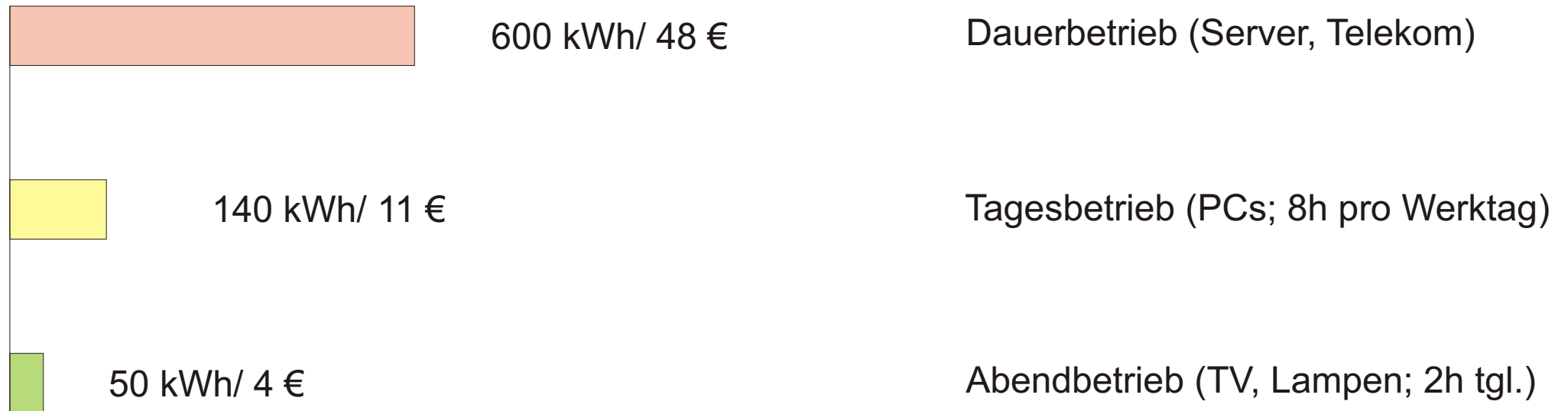
Verzerrung der Netzspannung

Verluste durch Oberschwingungsströme im Stromversorgungsnetz, deren Kosten dem Kunden nicht in Rechnung gestellt werden können

Daten: $P=130W$, $I_N=0,85A$

Die von Oberschwingungsströmen in den Versorgungsnetzen hervorgerufenen Verluste sind bei Dauerbetrieb erheblich

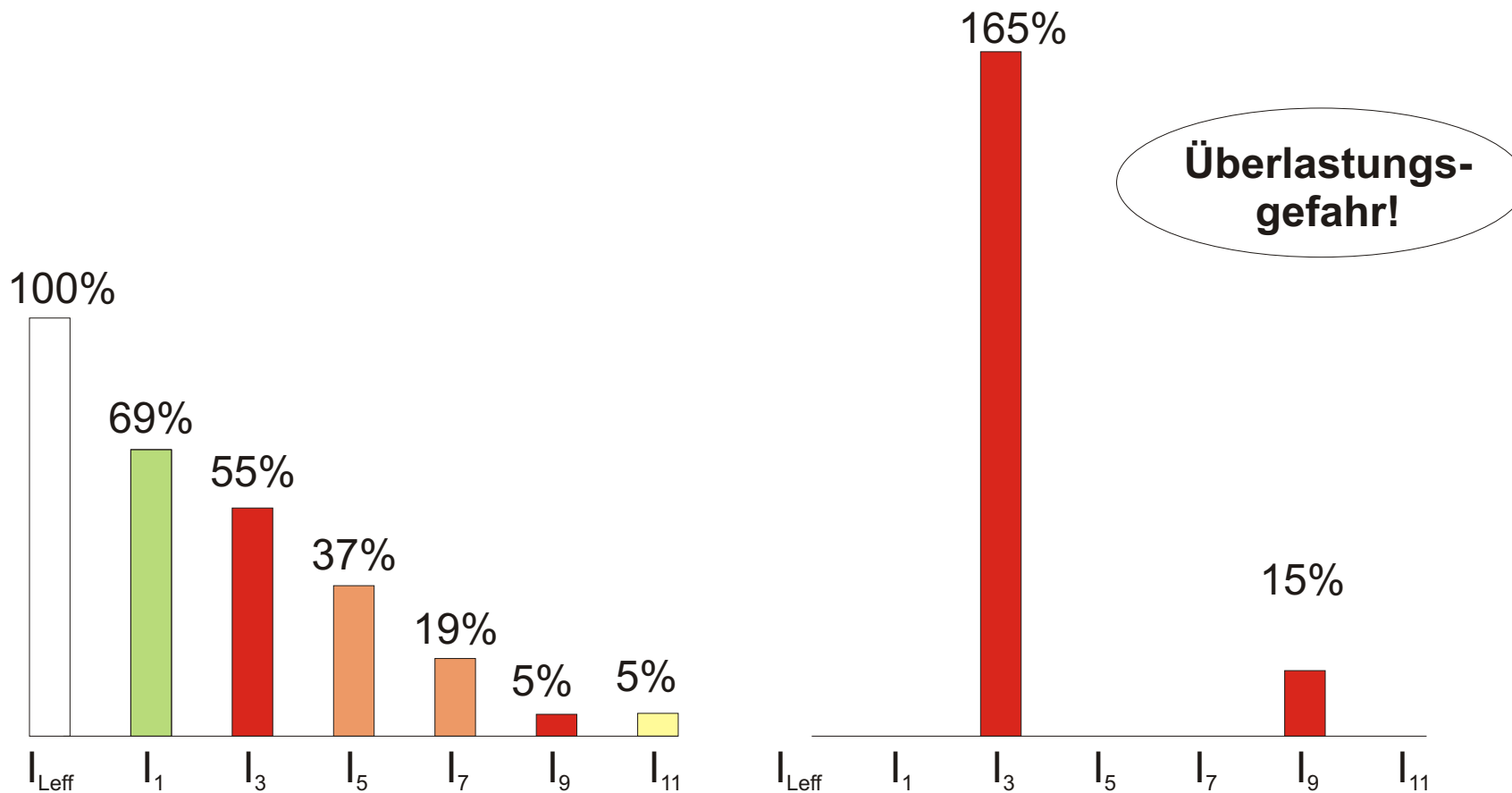
Verluste pro Jahr und Kilowatt und zugehörige Kosten in €



Annahmen: $p_v = 5\%$, $\lambda = 0,6$ ($Q = 1,33 \text{ VA/W}$), $k = 0,08 \text{ €/kWh}$

Bei auf die Phasen verteiltem symmetrischen Anschluss mehrerer einphasiger Geräte tritt ein hoher Oberschwingungsstrom im Nulleiter auf!

Auf I_{Leff} bezogenes Spektrum in den Phasenleitern und im Nulleiter



In den Phasenleitern

Im Nulleiter (Überlagerung der durch 3 teilbaren ungeradzahligten Oberschwingungsströme)

Ansatz für Ströme < 16 A: Begrenzung der zulässigen Oberschwingungsströme durch Norm EN 61000-3-2

Titel: Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter)

***“Geräte”*: Alle elektrischen und elektronischen Apparate, Anlagen und Systeme, die elektrische und/oder elektronische Bauteile enthalten (EMV Richtlinie 89/336/EWG)**

Anwendung: Auf alle elektrische Geräte, die zum Anschluss an das öffentliche Niederspannungs-Verteilnetz mit 220V oder mehr vorgesehen sind, mit einer Leistung von mehr als 75W (50W), sowie Beleuchtungseinrichtungen unabhängig von der Leistung

Aber: Grenzwerte für Geräte hoher Leistung (> 1 kW) zum professionellen Gebrauch sind in der Norm nicht festgelegt

Da Eingangsstrom als aufgenommener Strom definiert ist, gilt die Norm nicht für stromabgebende Geräte; TAB (Technische Anschlussbedingungen) des VDN (Verband der Netzbetreiber) verweisen aber auch für Erzeugungsanlagen auf diese Norm

Norm ist auch für professionelle Geräte gültig seit 1.1.2001

Grenzwerte nach EN 61000-3-2

Oberschwingungsordnung n	Klasse A A	Klasse B (tragbare Elektrowerkzeuge) A	Klasse C (Beleuchtungseinrichtungen) I_N/I_1 in %	Klasse D (TV und PC mit $P < 600$ W) mA/W
Ungeradzahlige Oberschwingungen				
3	2,3	3,45	30 λ	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,16	7	1
9	0,4	0,6	5	0,5
11	0,33	0,5	3	0,35
13	0,21	0,32	3	0,3
15 - 39	$0,15 * 15/n$	$0,225 * 15/n$	3	$3,85/n$
Geradzahlige Oberschwingungen				
2	1,08	1,62	2	
4	0,43	0,65		
6	0,3	0,45		
8 - 40	$0,23 * 8/n$	$0,35 * 8/n$		

Klassen A und B: Absolutwerte !

Klassen C und D: Bezogene Werte; bei 600 W Grenzwerte Klassen A und D identisch; außer für 2.OS bei Klasse C keine Grenzwerte für geradzahlige OS

Erleichterungen seit 2001

- Untere Leistungsgrenze wieder 75W
- Keine Anwendung auf Dimmer unter 1 kW
- Definition Klasse D: Nicht mehr nach “spezieller Kurvenform”, sondern ausschließlich für PCs und Rundfunkempfangsgeräte unabhängig von Kurvenform
- Für veränderliche Lastzustände Mittelwertbildung der Oberschwingungsströme; der Kurzzeitgrenzwert wurde allgemein auf 150% und für Klasse A auf 200% festgesetzt
- Für Klasse C bei $P \leq 25W$ $I_3 / I_1 < 0,86$ und $I_5 / I_1 < 0,61$
- Eingefügt:

“Professionell genutzten Geräten, die die Anforderungen dieser Norm nicht erfüllen, kann der Anschluß an bestimmten Arten von Niederspannungsversorgung erlaubt werden, wenn die Bedienungsanleitung eine Anforderung enthält, daß das jeweils zuständige Energieversorgungsunternehmen nach einer Anschlußgenehmigung gefragt werden muss.”

Änderungen in Ausgabe DIN EN 61000-3-2(VDE 0838-2):2010-03

- Angaben zur Wiederhol- und Vergleichspräzision bei Messungen
- Bei kleinen Änderungen mit einer Änderungen der Leistungsaufnahme um weniger als 20% im Falle erheblicher Unterschreitung der Grenzwerte (z.B. bei aktiver PFC-Schaltung) vereinfachte Prüfung
- Möglichkeit, Grenzwerte anhand von Leistungen zu bestimmen, die um +/- 10% von der gemessenen Leistung abweichen (d.h., der untere Leistungsgrenzwert für Klasse A wurde faktisch auf 82,5 W erhöht; für professionell genutzte Geräte gelten die Grenzwerte faktisch nur für eine aufgenommene Leistung bis 910 W)
- Präzisierung der Prüfbedingungen für
 - . Audioverstärker (Volllast)
 - . Lampen (Alterung vor Prüfung)
 - . Waschmaschinen (Aufheizung, sofern diese nicht programmgesteuert erfolgt)
 - . PCs (Nutzung von Erweiterungssteckplätzen mit maximal möglicher Leistungsaufnahme; Deaktivierung von Energiesparmodi; bei Anlagen mit zusammen gelieferten Energieversorgungseinheiten, z.B. USV)
 - . Nutzung von externen Netzteilen (Wahlweise Systemprüfung oder Netzteil bei Nennlast)

Geplante Änderungen nach Entwurf DIN EN 61000-3-2/A3:2013-04

- Anwendung der Klasse D für Kühl- und Gefriergeräte mit variablem Antrieb
- Neue bzw. geänderte Prüfbedingungen für Kühl- und Gefriergeräte, Hochdruckreiniger, Staubsauger und Lichtbogenschweißeinrichtungen, die nicht zu professionellen Zwecken verwendet werden
- Klarstellung, dass Haushaltgeräte mit eingebauten Beleuchtungseinrichtungen nicht unter den Begriff "Beleuchtungseinrichtung" fallen

EVUs legen Wert auf geringe Oberschwingungsströme

Auszug aus Entwurf Technische Anschlussbedingungen TAB2007 des VDN

10.1 Allgemeines

- (1) Elektrische Verbrauchsgeräte und Anlagen dürfen nach dem Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit (EMVG) keine störenden Einflüsse auf andere Kundenanlagen sowie auf das Verteilungsnetz und auf Anlagen des Netzbetreibers ausüben.
- (2) Im Allgemeinen gilt Absatz 1 als erfüllt, wenn die Verbrauchsgeräte und Anlagen die einschlägigen Normen, Vorschriften und Richtlinien der Europäischen Union erfüllen und insbesondere die Grenzwerte nach **EN 61000-3-x** (DIN VDE 0838-x) einhalten.
- (3) Für Verbrauchsgeräte, welche die Grenzwerte der Norm bzw. des Abschnittes 10.2 nicht einhalten, holt deren Betreiber für den Anschluß und den Betrieb eine Einzelzustimmung des Netzbetreibers ein. Diese kann entfallen, wenn durch das positive Ergebnis einer **Untersuchung** sichergestellt wurde, dass die Geräte am vorgesehenen Netzanschlußpunkt keine störenden Rückwirkungen auf das Versorgungsnetz oder andere Kundenanlagen verursachen.

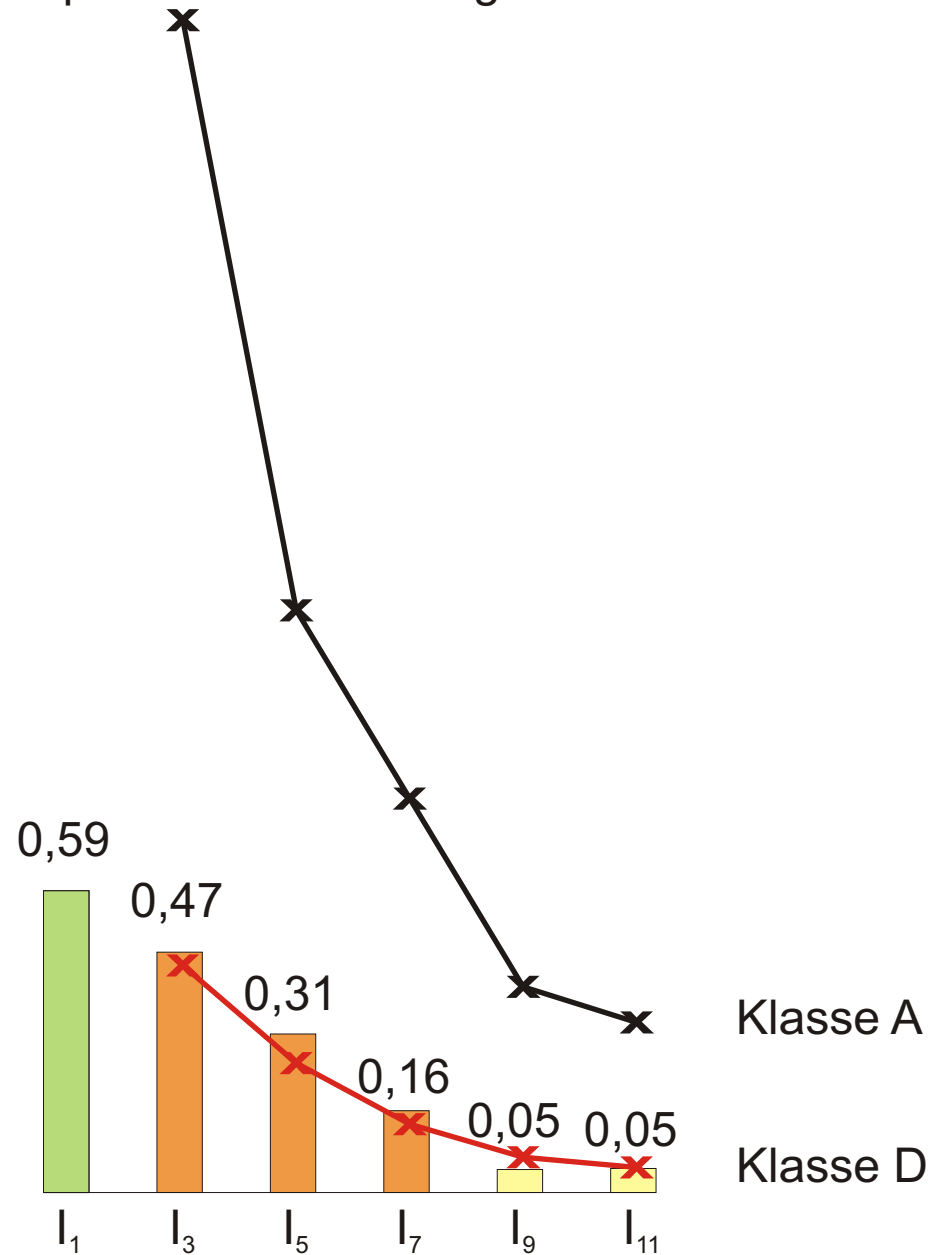
Für diese Untersuchung werden je nach Erfordernis herangezogen:

- ! die einschlägigen Normen, vor allem DIN EN 61000-3-x (DIN VDE 838-x) und/oder
- ! die "Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen", herausgegeben von der VDN und/oder
- ! die Hinweise in der Gebrauchsanweisung des anzuschließenden Gerätes.

- (4) Darüber hinaus ergreift der Betreiber dann Maßnahmen zur Begrenzung der Rückwirkungen auf ein nicht störendes Maß, wenn aufgrund einer Häufung von Geräten in einer Kundenanlage störende Rückwirkungen auf andere Kundenanlagen zu erwarten sind.

Dieses Gerät hält Klasse A, nicht aber Klasse D ein

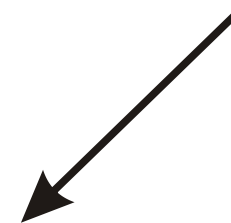
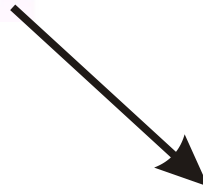
Beispiel: Oszilloskop mit 130W Leistungsaufnahme



Vorsicht: Aufgrund der als Absolutwert definierten Grenzwerte genügt es nicht, dass die Komponenten die Norm erfüllen



Erfüllt Norm



Erfüllt Norm

Normerfüllung muss geprüft werden!

Auch relevant: ENERGY STAR-Richtlinie



- US-amerikanische Kennzeichnungsrichtlinie für Strom sparende Bürogeräte
- Auch in der EU gültig
- U.a. wird für Computer, Drucker u.ä. ein totaler Leistungsfaktor λ über 0,9 gefordert (bei Vollast), nicht aber für Bildschirme
- Aktuelle Regelungen gültig seit 2009

Einhaltung der EN61000-3-2 bedeutet nicht automatisch $\lambda > 0,9$

Bis zu einer Leistung von ca. 1 kW kann die EN61000-3-2 mit $\lambda < 0,9$ eingehalten werden

Ansatz für Ströme $> 16 \text{ A}$ und $\leq 75 \text{ A}$: Begrenzung der zulässigen Oberschwingungsströme durch Norm EN 61000-3-12

Titel: Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 3-12: Grenzwerte: Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom $> 16 \text{ A}$ und $\leq 75 \text{ A}$ je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind

Angegeben sind

- Relative Werte für I_n für $n = 3 \dots 13$ (Sonderfall Gleichrichtung mit geringer Glättung bis $n = 37$), bezogen auf den Grundschwingungsanteil des Bemessungs-Leiterstromgrundschwingungsstrom, als Mittelwerte
- THC für $n = 2 \dots 40$
- PWHC (gewichtete Oberschwingungs-Teilverzerrung) für $n = 14 \dots 40$
- Kurzzeitig dürfen die Werte 150% der für den Mittelwert festgelegten Grenzwerte betragen
- Grenzwerte bis 240 V einphasig/ 690 V dreiphasig ; Netzfrequenz 50 Hz oder 60 Hz

Norm ist gültig seit 1.11.2005, geändert Juni 2012

Wesentliche Änderungen in EN 61000-3-12:2011 gegenüber Vorversion

- Grenzwerte werden auf Bezugs-Effektivstrom statt auf Grundschwingungsstrom bezogen
- Ergänzung um Grenzwerte für symmetrische dreiphasige Geräte, die geringe Oberschwingungsströme niedriger Ordnung und hohe Oberschwingungsströme höherer Ordnung aufweisen, z.B. Umrichter mit kleiner Zwischenkreiskapazität
- Festsetzung von Prüfbedingungen für Klimageräte und Durchlauf-Wassererhitzer

Grenzwerte sind abhängig von der Kurzschlussleistung des Versorgungsnetzes

$$S_{sc} = U_{nenn}^2 / Z$$

$$R_{sce} = S_{sc} / (3 S_{equ}) \text{ für einphasige Geräte}$$

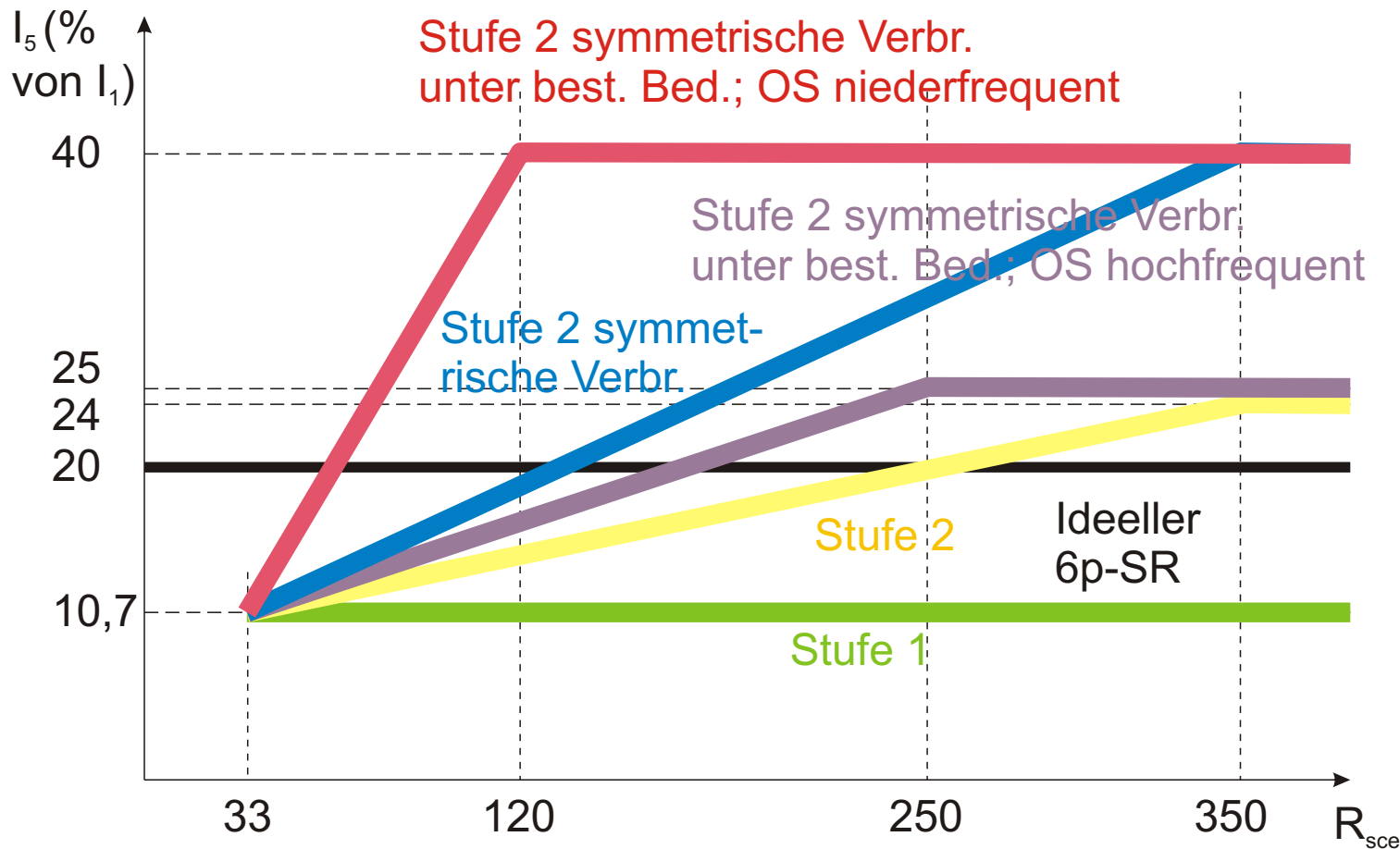
$$R_{sce} = S_{sc} / S_{equ} \text{ für dreiphasige Geräte}$$

Hersteller muss Mindestwert der Kurzschlussleistung angeben, sofern die maßgeblichen Grenzwerte nur bei $R_{sce} > 33$ eingehalten werden

Sofern Grenzwerte auch bei $R_{sce} > R_{sцемax}$ (liegt bei 120 für symmetrische dreiphasige Geräte unter besonderen Bedingungen, die bei Stromrichtern oft erfüllt sind, oder bei 350 für andere Geräte) nicht eingehalten werden, soll darauf hingewiesen werden, dass im Einzelfall eine Vereinbarung mit dem EVU getroffen werden soll.

EN61000-3-12 (für Ströme bis 75A): Konformität mit verbraucher- und anschlussabhängigen Anforderungen

Grenzwerte für 5. Harmonische



Stufe 1:
Allgemeine Erlaubnis

Stufe 2:
Maximale Kurzschlussimpedanz muss angegeben und vom EVU bestätigt werden

Stufe 3 ($I_{os} > \text{Grenzwerte:}$)
Betrieb erfordert Vereinbarung mit EVU

Für professionelle Geräte $>1 \text{ kW}$ und $I < 16 \text{ A}$, die die Grenzwerte der EN61000-3-2 nicht einhalten, ist Stufe 3 anzuwenden.

Stromrichter sind oft symmetrische dreiphasige Geräte, die die besonderen Bedingungen für die weichen Grenzwerte erfüllen

Bedingungen sind meist erfüllt bei

- Ungesteuerten Gleichrichterbrücken mit nachgeschaltetem Kondensator, sofern ein x_n von 3% oder ein x_d von 4% eingesetzt wird
- Vollgesteuerten Thyristorbrücken
- 12-pulsige Geräte

Auch für Ströme >75 A gibt es limitierende Regelwerke

EN 61000-2-2 (für öffentliche Netze), EN 61000-2-4 (für Industrienetze) und EN50160 begrenzen Oberschwingungsspannungen

Oberschwingungsordnung n	Klasse 1 (Öffentliche Netze) U_n/U_1 in %	Klasse 2 (Öffentliche Netze) U_n/U_1 in %	Klasse 3 (Industrienetze) IU_n/U_1 in %
Ungerade Oberschwingungen			
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5

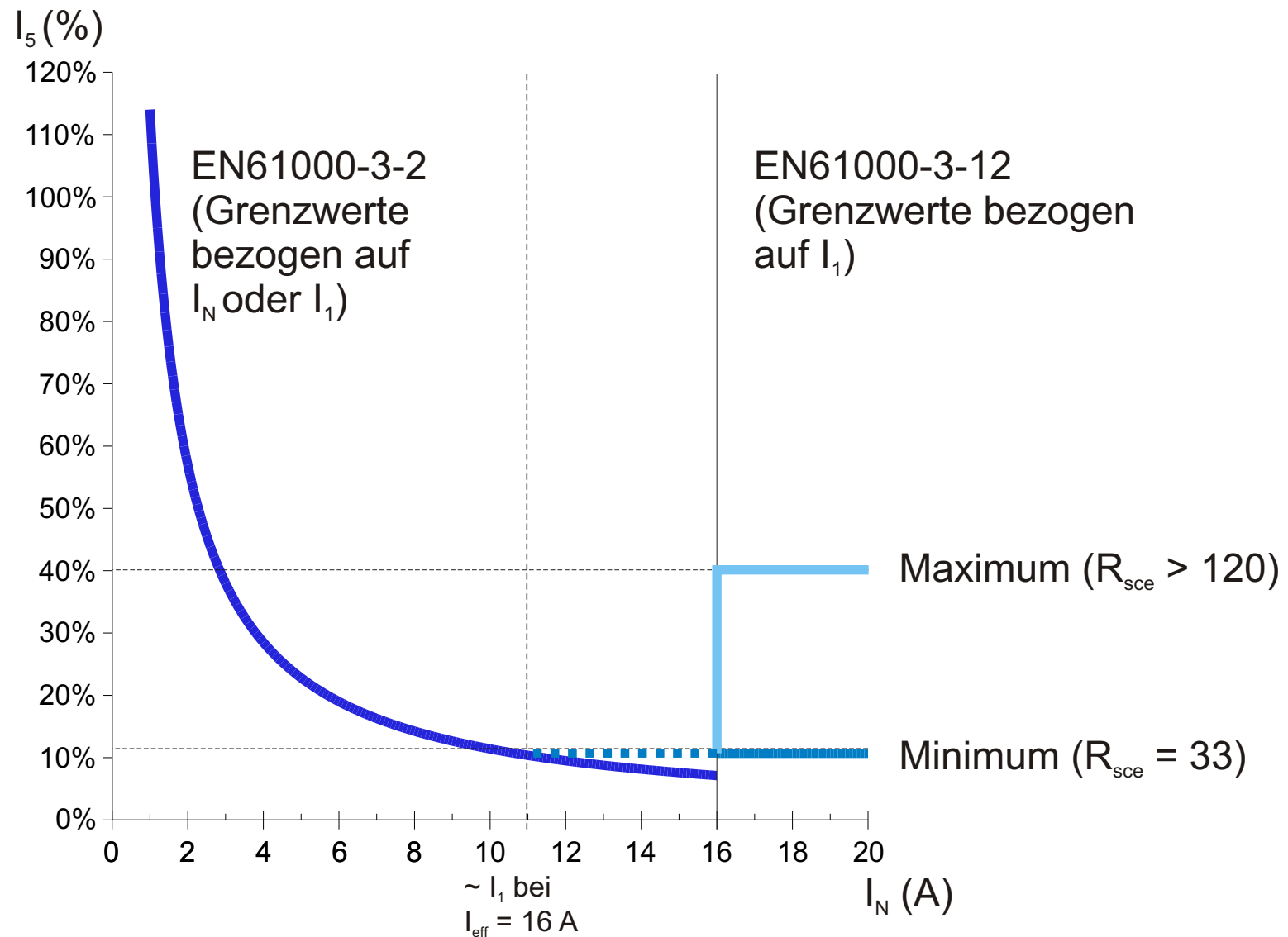
=> Zulässige Oberschwingungsströme abhängig von Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt

EN50178:

- Minimale Kurzschlußimpedanz von Kommutierungs-drosseln gesteuerter Stromrichter: 4%

EN61000-3-2 und -12: Harte Anforderungen im Bereich 6 A bis 16 A

Grenzwerte für 5. Harmonische (EN61000-3-2: Klasse A; EN 61000-3-12: Bereich)



Ansätze zur Erfüllung der Anforderungen

Passive Lösungen

- Dreiphasige statt einphasige Einspeisung
- Kondensator-Ladung über Widerstände
- Anodendrosseln
- Gleichstrom-Glättungsdrosseln
- Filter und Saugkreise

Aktive Lösungen

Einphasige Lösungen

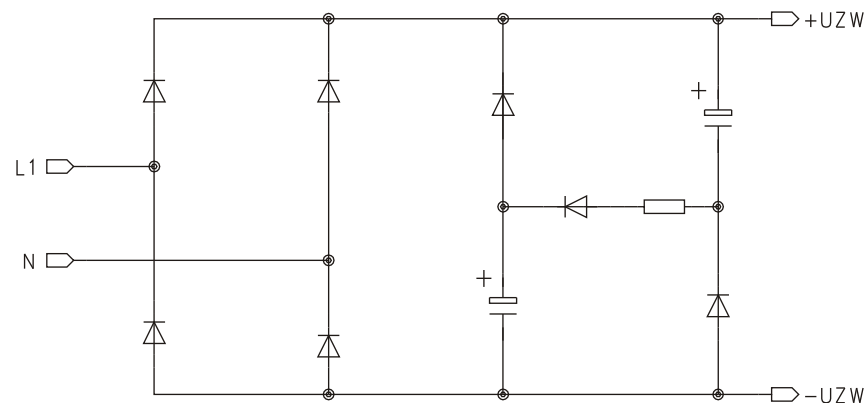
- Hochsetzsteller als PFC
- Bei Netzteilen: Eintransistorlösung für PFC und Wandler
- Netzseitiger U-Umrichter

Dreiphasige Lösungen

- Hochsetzsteller
- U-Umrichter
- Vienna-Rectifier

Aktive Kompensatoren

Für kleinste Leistungen: Ladung über Vorwiderstand



Vorgeschlagen für elektronische Vorschaltgeräte

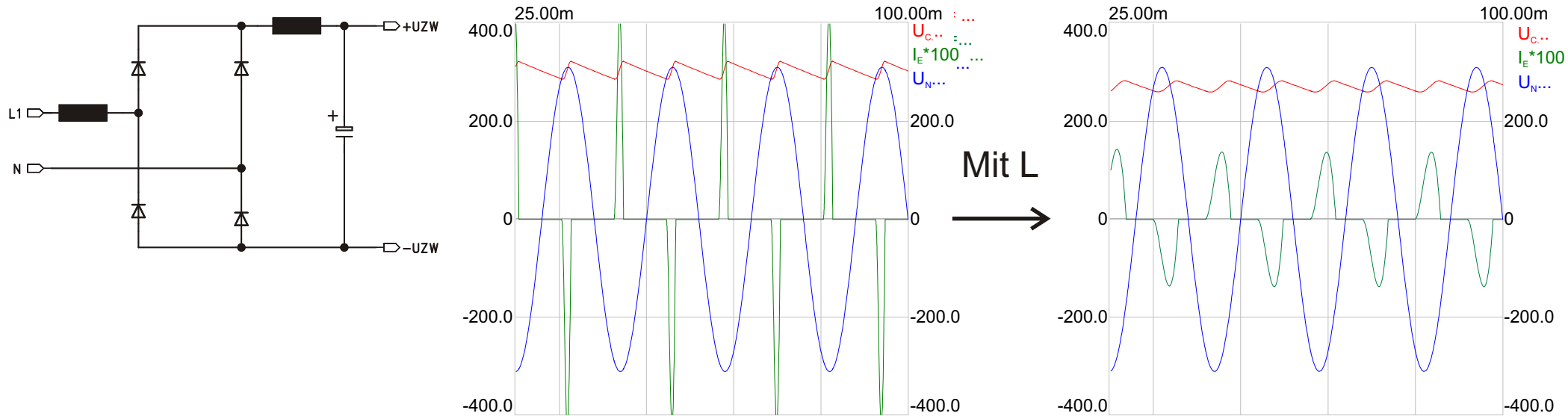
Vorteil:

- Preiswert

Nachteile

- Ladung verlustbehaftet
- Sehr hohe Spannungswelligkeit (50%)

Anoden- oder Gleichstromdrosseln: Mit Spannungsabfall verbunden



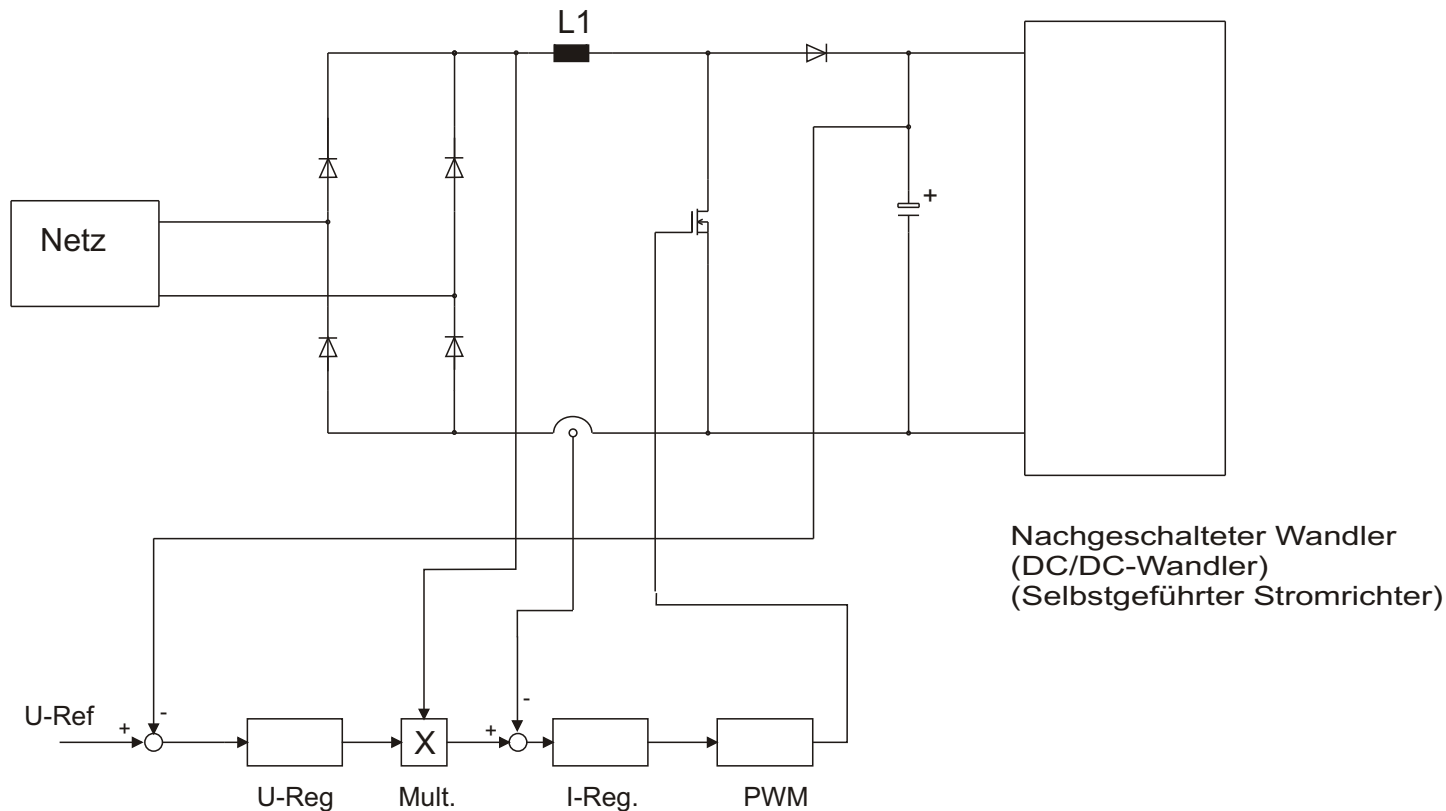
Vorteile

- Technisch einfach
- Keine zusätzlichen EMV-Probleme
- Bei kleinen Leistungen und Klasse A-C sowie bei dreiphasigen Geräten mäßiger Aufwand

Nachteile

- Erheblich niedrigere Zwischenkreisspannung unter Last insbesondere bei einphasigen Anwendungen
- Bei größeren Leistungen große, schwere und teure Drossel erforderlich
- Nur mäßige Reduzierung der Oberschwingungsströme
- Leistungsfaktor λ typisch kleiner 0,9; erfüllt nicht Energy-Star-Richtlinie

Die verbreitetste aktive Lösung: Hochsetzsteller als PFC



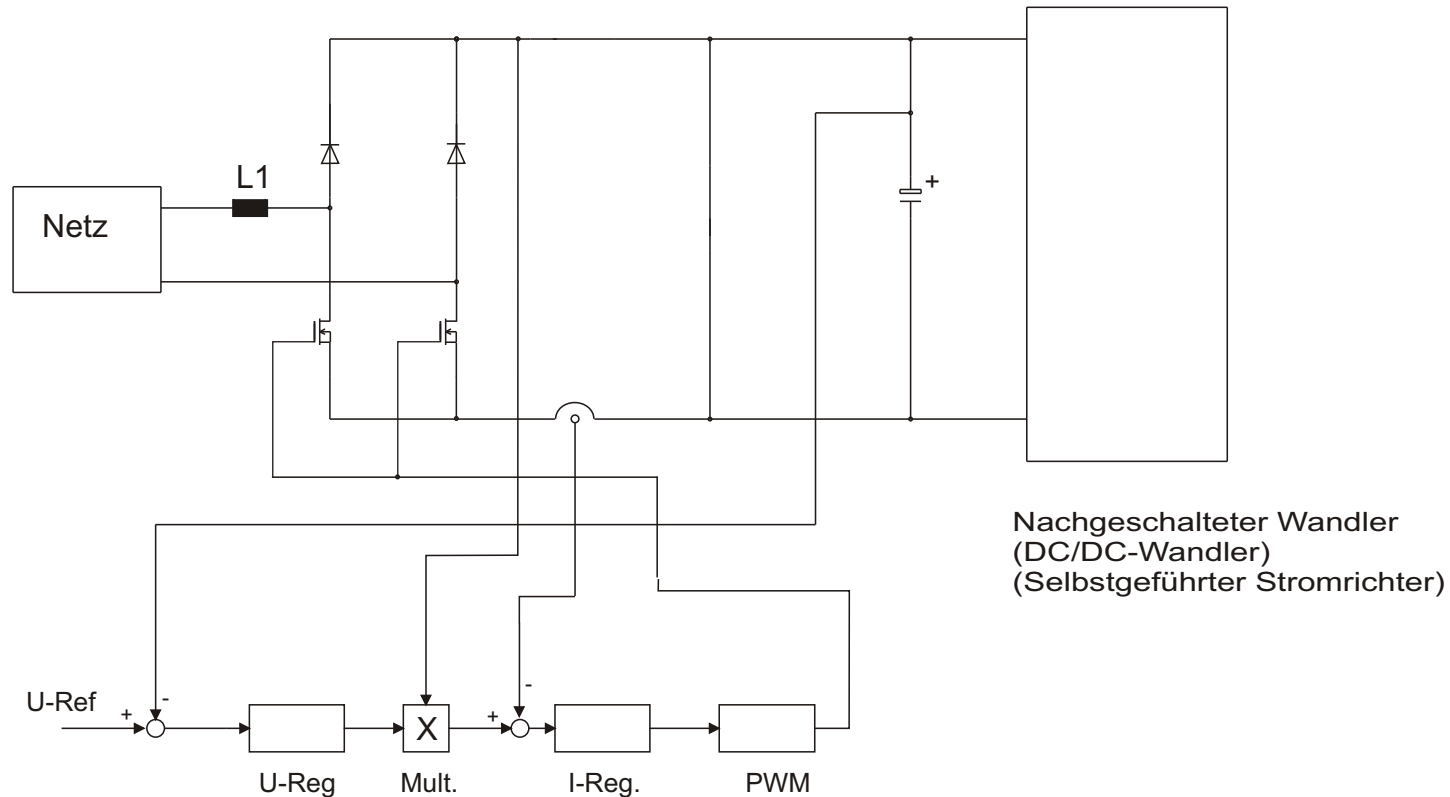
Vorteile

- Praktisch völlige Elimination der Oberschwingungsströme
- Geregelte Zwischenkreisspannungen oberhalb der ideellen Gleichspannung
- Weitbereichseingang (90-264 V_{eff}) möglich
- Mäßig große Drossel

Nachteile

- EMV-Emissionen (HF > 150 kHz)

Variante: Zwei MOSFETs in der Gleichrichterbrücke



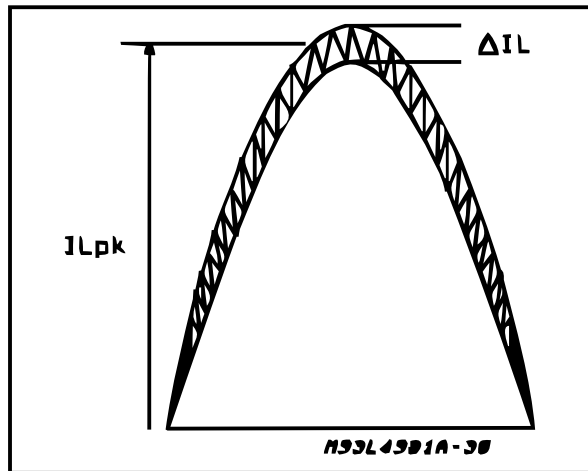
Vorteil

- Geringere Leitverluste (eine Diode weniger im Stromkreis)

Nachteil

- Höherer Bauteilaufwand (Schnelle Brückendiode erforderlich)

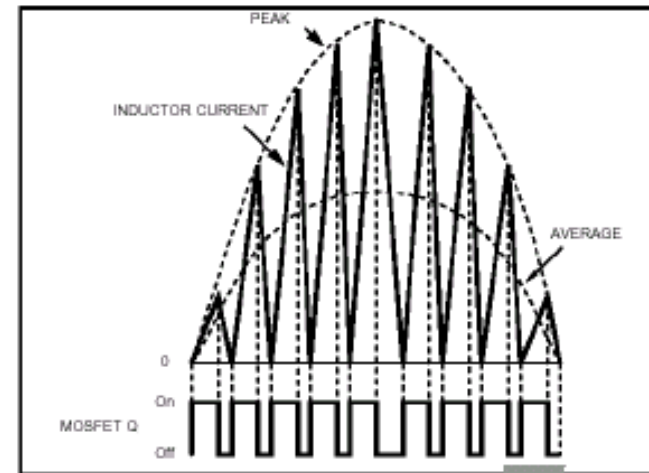
Zwei Auslegungsansätze: Kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Stromverlauf



- Kleinerer Effektivstrom
- Niedrige Kernverluste der Drossel
- Geringerer HF-Anteil; kleineres Filter

Für größere Leistungen meist verwendet

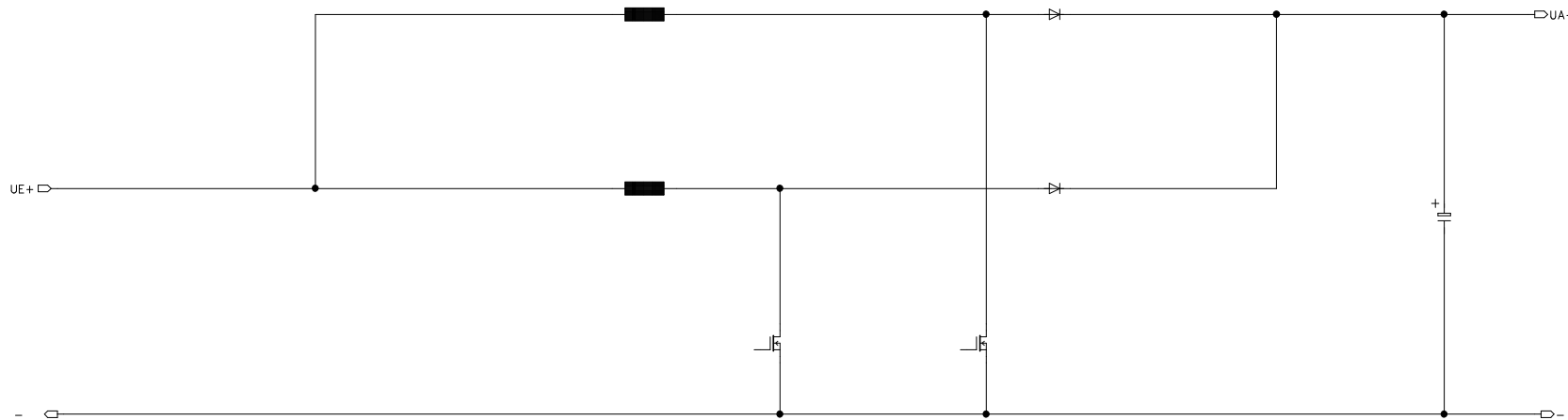
Bei neuartigen SiC-Dioden entfällt Nachteil der Einschaltverluste der Diode



- Geringfügig kleinere Drossel
- Einfachere Regelung (Spitzenstrommodus)
- Keine Einschaltverluste der Diode
- Grenzfall: Critical-Conduction-Mode

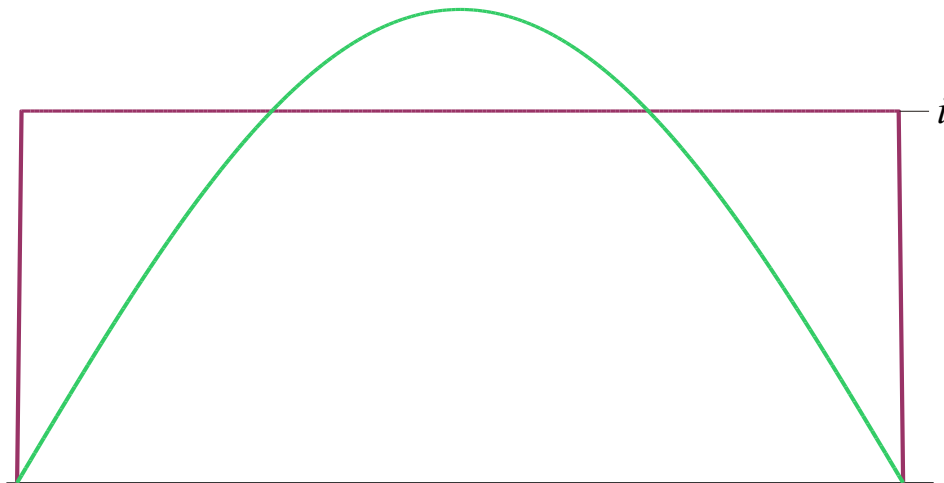
Geeignet für kleine Leistungen

Für größere Leistungen: Zwei im Gegentakt betriebene Steller



- Reduzierte Welligkeit des Netzstroms
- Geringere Effektivstrombelastung des Glättungskondensators
- Kleinere Glättungsdrossel und Filter möglich
- Ansteuer- ICs verfügbar

Rechteckstrombetrieb ist grundsätzlich möglich und fallweise auch sinnvoll



$$\hat{i}_1 = \frac{4}{\pi} i$$

$$I_{eff} = 1,11 I_1$$

$$W_L = 1 \mathcal{L} L i^2$$

=> bei Rechteckstrom 38%
kleiner

Vorteile

- Interessanter Ansatz bei kurzzeitigen Betrieb mit Überstrom
- Prinzipiell geringe Komplexität der Schaltung
- Bessere Ausnutzung der Drossel
- Auch Zwischenlösungen zwischen Rechteck- und Sinusprinzip möglich (Trapezform)
- Leistungsfaktor $\lambda > 0,9$ kann ggf. mit zusätzlicher netzseitiger Kapazität erreicht werden

Nachteile

- Norm wird bis etwa 650 W (bei Einhaltung des Grenzwerts für die 11. Oberschwingung) erfüllt
- Höhere Belastung des Schalters
- Keine hierfür vorgesehenen ICs verfügbar

Weitbereichseingang ist möglich, aber auch immer sinnvoll?

Marketingabteilungen fordern Weitbereichseingang, um weltweit einheitliche Produkte anbieten zu können; Spannungsverdopplungsschaltung ist nicht möglich

Nachteile (115V-230V vs. 230V- Betrieb)

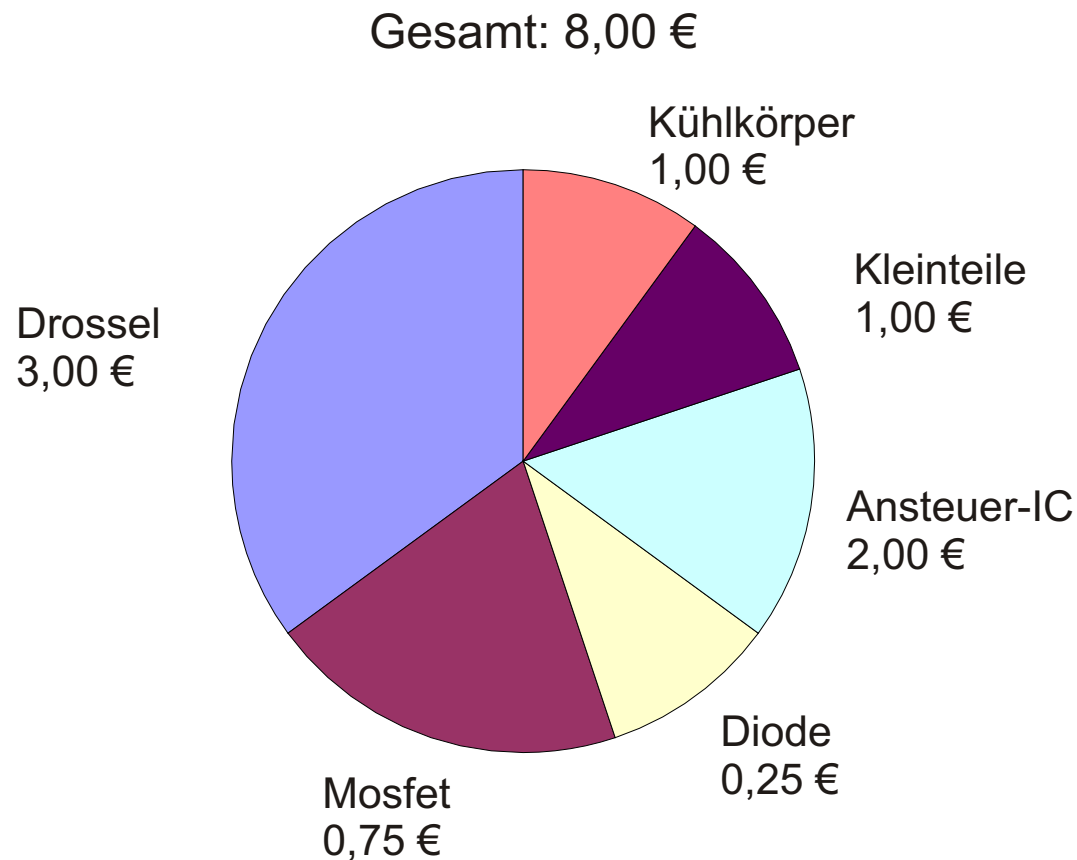
- Erheblich höherer Bauteileaufwand
 - . Effektivstrom des Schalters: x3
 - . Schaltverluste der Diode: x2
 - . Energieinhalt der Speicherdrossel: x4
 - . Filterdrosselaufwand: x2
- Verluste bei 115V: > x2; Wirkungsgrad 88-93% ggü. 95-98% bei 230 V

Mehrkosten gegenüber Einbereichseingang ca. 30%

- Bei einer reinen 115V-Lösung kann man die Zwischenkreisspannung reduzieren
 - . Verwendung von Leistungshalbleitern geringerer Spannungsfestigkeit
 - . Geringere Einschaltdauer des Schalters führt zu einer geringeren Belastung
 - . Reduzierte Schaltverluste
 - . Kleinere Drossel

Die Kosten für einen PFC liegen in einer noch akzeptablen Größenordnung

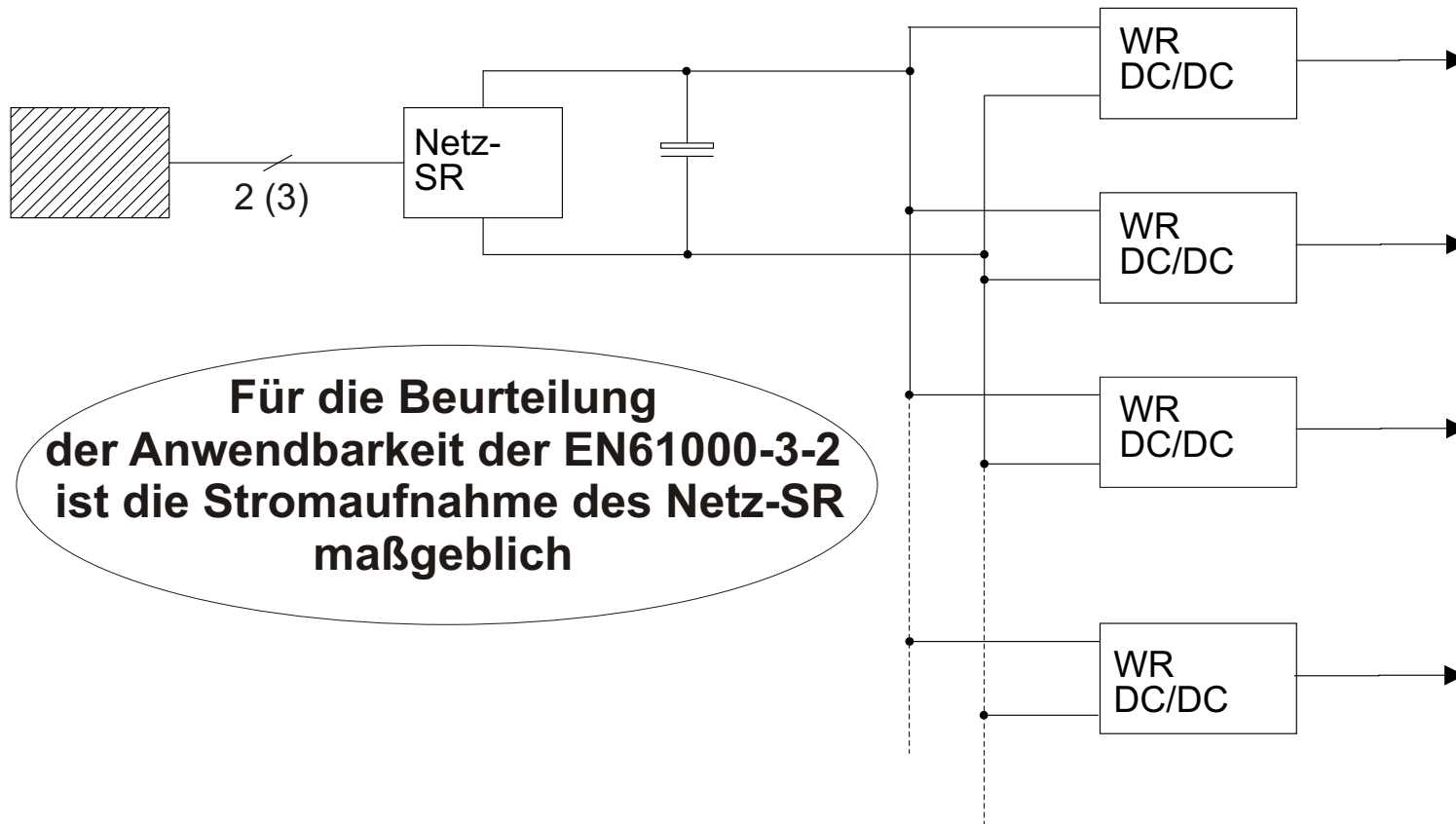
Beispiel: Material Eingangsschaltung für 500W/ Einbereichseingang 230V / 1000 St. p.a.



Die Kosten für die Einholung einer Anschlussgenehmigung sind höher

Ein Ansatz zur Kostensenkung: Versorgung mehrerer Verbraucher über einen einzelnen netzseitigen Stromrichter

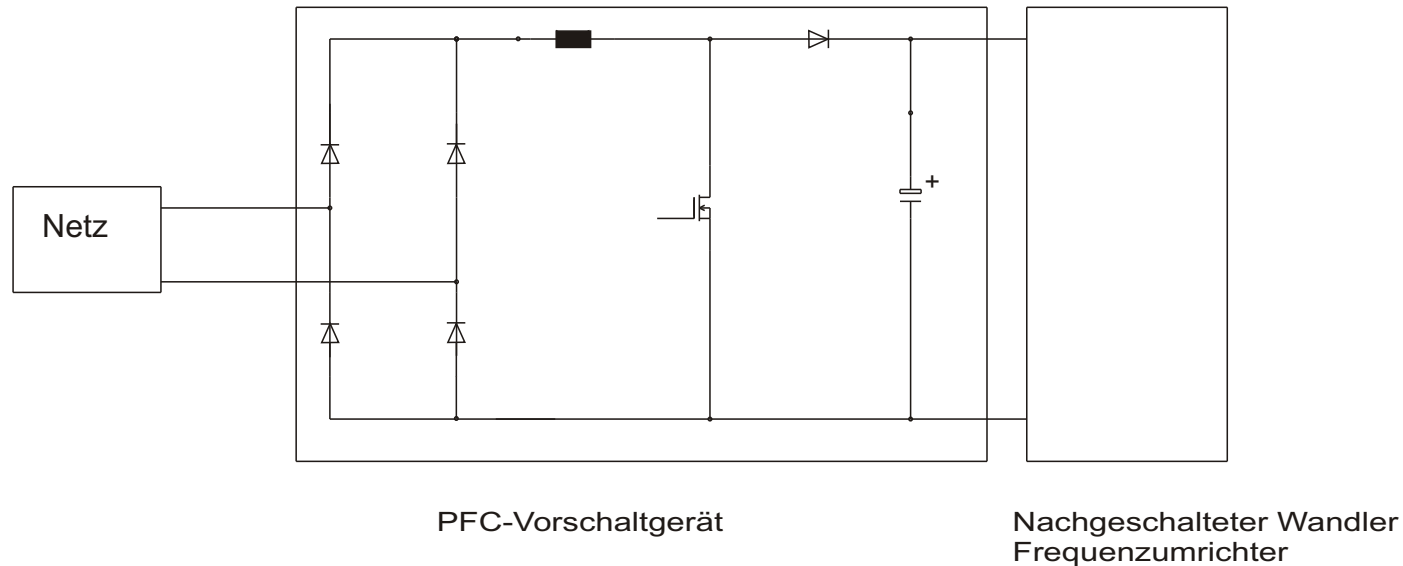
Konzept



Für die Beurteilung der Anwendbarkeit der EN61000-3-2 ist die Stromaufnahme des Netz-SR maßgeblich

➔ **Modulare Systeme**

Nicht empfehlenswert: Vorgeschaltetes PFC-Gerät vor Umrichtern



Nachteile gegenüber integrierter Lösung

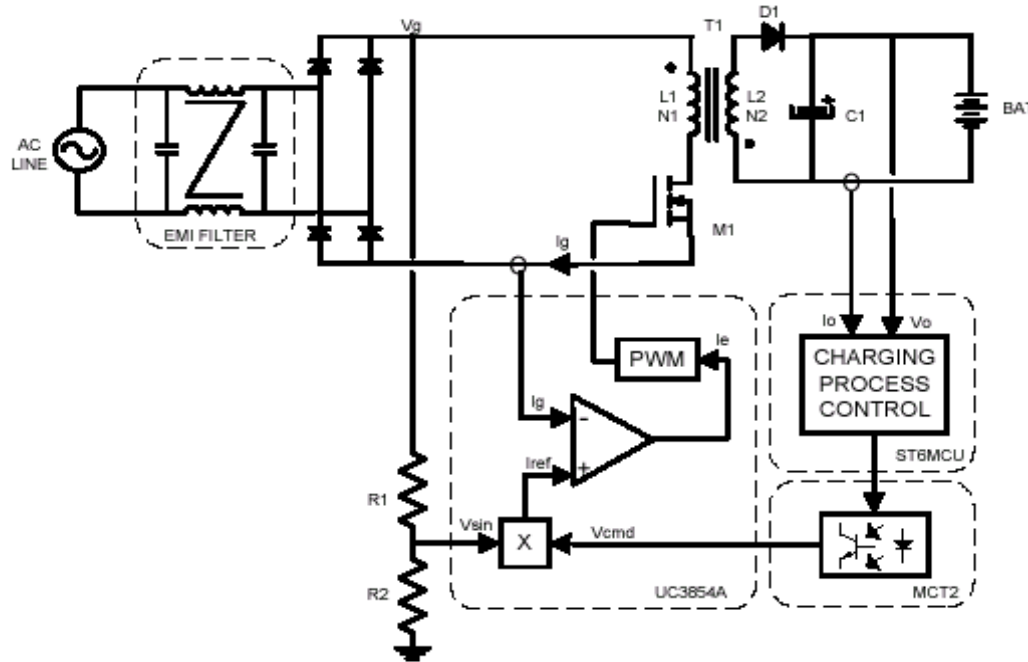
Technische Probleme

- (Vom Zwischenkreiskondensator abhängige) Regleroptimierung
- ggf. Koordination von Ausgangsspannungsregelung und Bremsstellerfunktion

Höherer Aufwand durch

- Doppelten Gleichrichter
- Doppelten Filter
- Zusätzliches Gehäuse
- Zusätzliche Steuersatzversorgung

Einschalterlösungen: Attraktiv?



Vorteile

- Geringe Komplexität der Schaltung

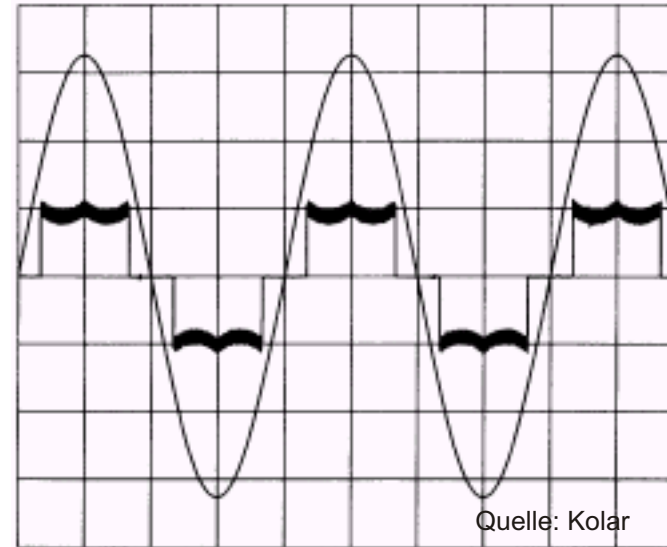
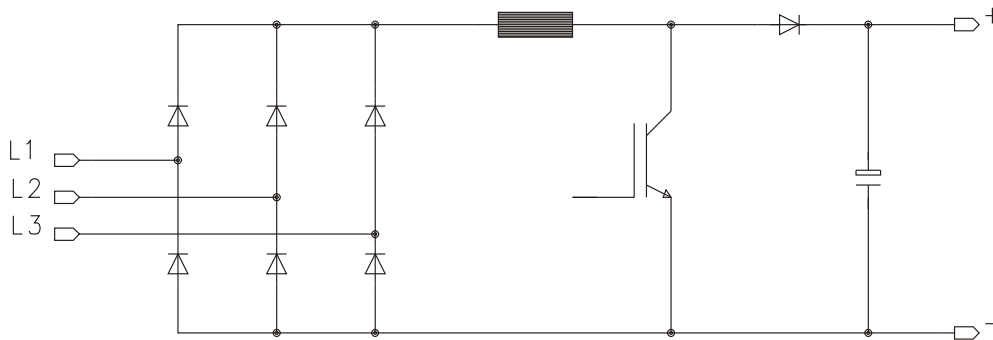
Nachteile

- Nur für diskontinuierlichen Stromfluss; hohe schaltfrequente Ströme
- Keine Reduzierung der Schaltleistung des MOSFETs
- 100 Hz-Welligkeit im Transformator und im ausgangsseitigen Kondensator

Für dreiphasige Anwendungen sind sechs transformatorlose aktive Lösungsansätze aussichtsreich

- Hochsetzsteller mit Blockstrom
- Hochsetzsteller mit diskontinuierlichem sinusförmigen Eingangsstrom
- Selbstgeführte Vollbrücke
- "Vienna"-Stromrichter
- Sechs-Schalter Tiefsetzsteller
- "Swiss"-Stromrichter

Einfacher Hochsetzsteller: Geringer Aufwand, aber nur teilweise Reduzierung der Oberschwingungsströme



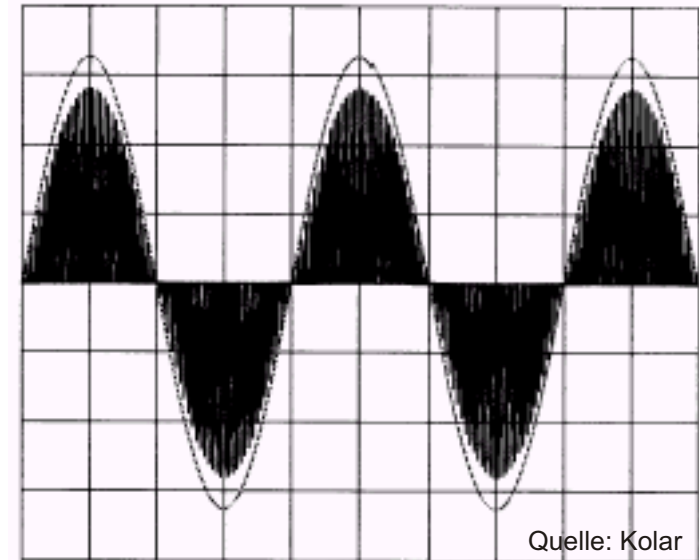
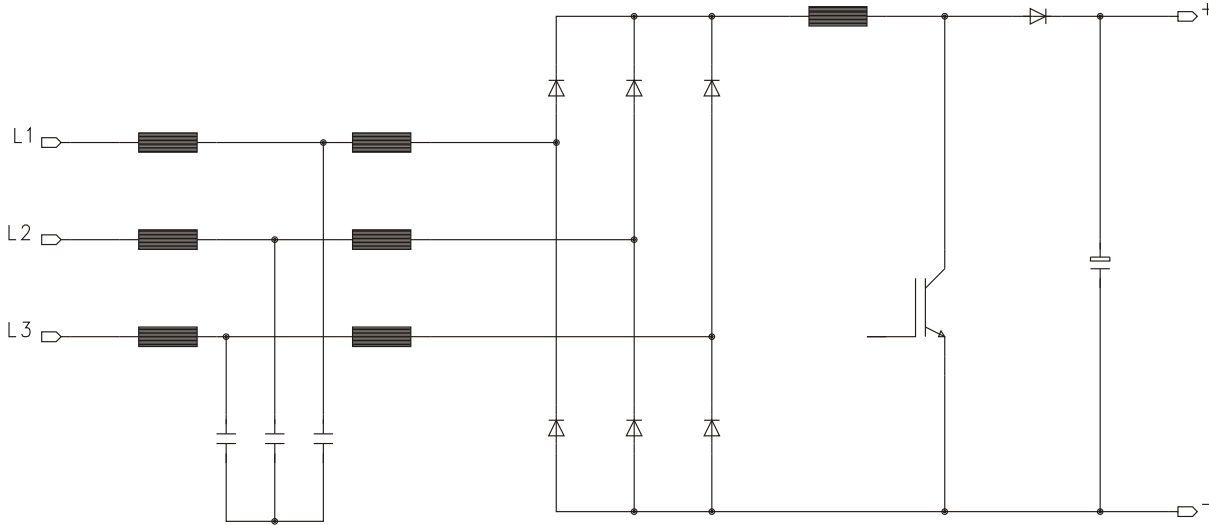
Vorteile

- Geringer Aufwand für Regelung, Leistungshalbleiter und Drossel; evtl. geringer als für klassische (50 Hz-) Anoden- oder Gleichstromdrosseln
- Abhängig vom Boost-Faktor geringe Strombelastung des Schalters

Nachteile

- Grenzwerte werden nach EN61000-3-2 nur bis ca. 2 kW eingehalten (Berücksichtigung 11. Oberschwingung ohne zusätzliche Filterung)
- Nach EN61000-3-12 werden Grenzwerte nur bei $R_{s_{ce}} > 33$ eingehalten

Einschalterlösungen mit diskontinuierlichem Stromverlauf



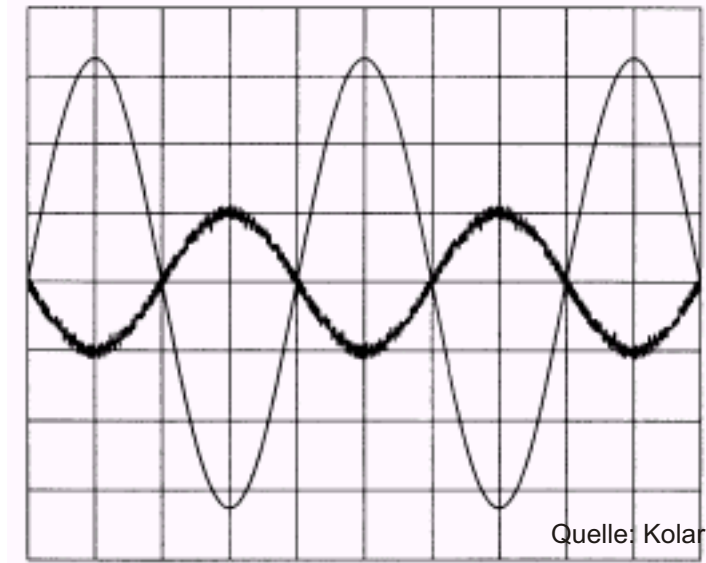
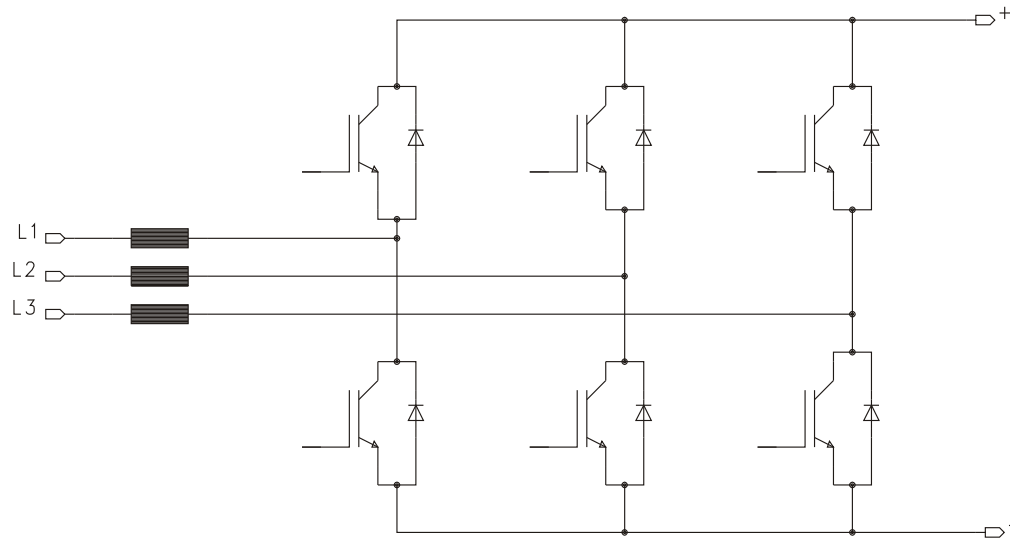
Vorteile

- Mäßiger Aufwand für Regelung und Leistungshalbleiter
- Einhaltung der Grenzwerte auch bei höheren Leistungen

Nachteile

- Hoher Effektivstrom
- Hohe Kernverluste der Drosseln
- Hoher Filteraufwand

Selbstgeführte Vollbrücke: Energierückspeisung möglich



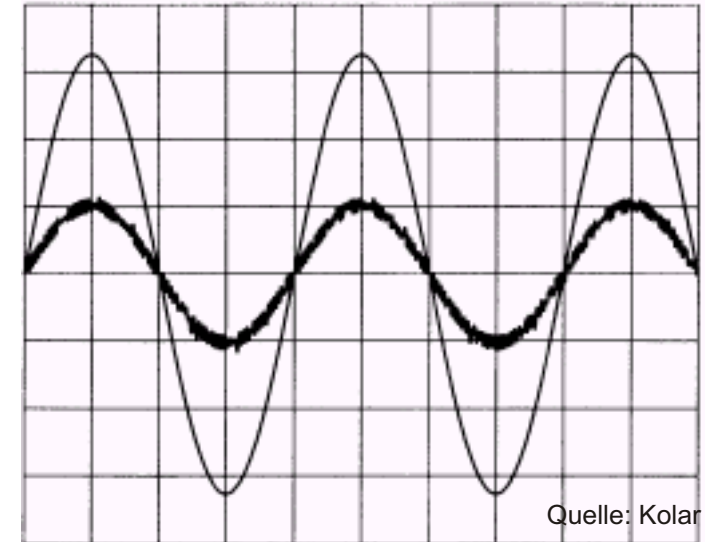
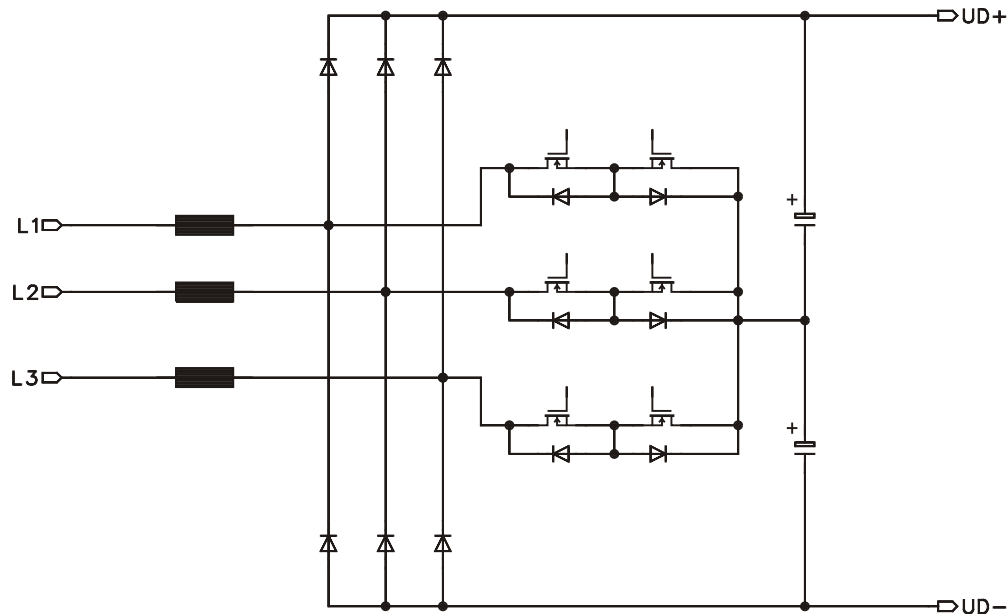
Vorteile

- Sehr geringer Oberschwingungsgehalt des Stromes
- Energierückspeisung möglich
- Blindleistungs- und Oberschwingungskompensation möglich

Nachteile

- Hoher Aufwand für Leistungshalbleiter und Regelung
- Standardmodule für Motorbetrieb ausgelegt

“Vienna”-Stromrichter: Mäßiger Aufwand und Verluste



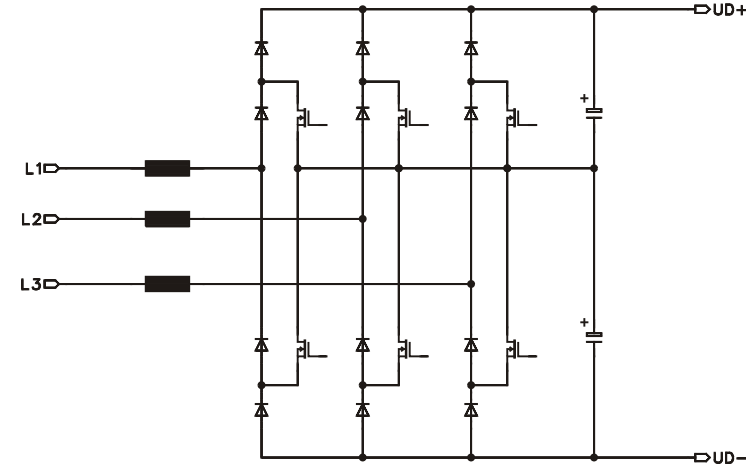
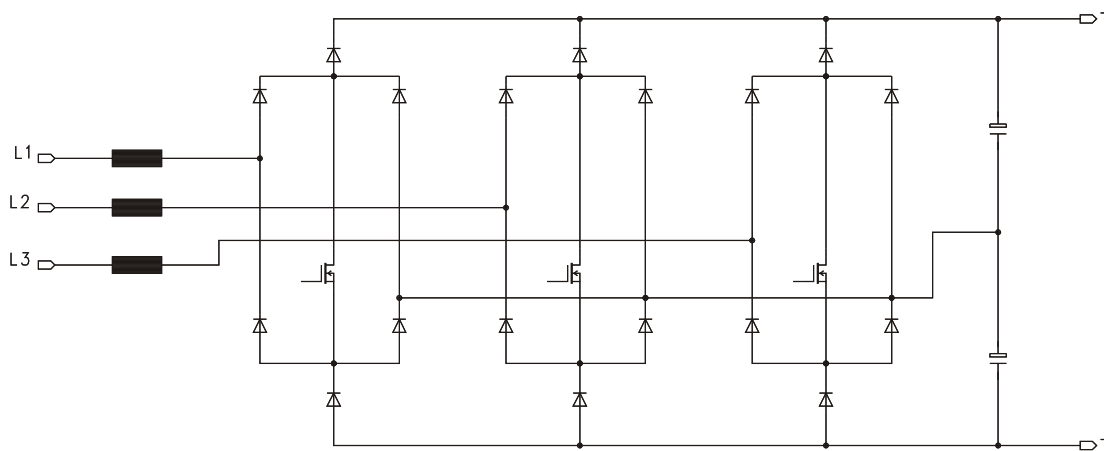
Vorteile

- Sehr geringer Oberschwingungsstrom
- Mäßiger Aufwand für Leistungshalbleiter und Ansteuerung
- Dreipunktverhalten
 - Geringe Schaltverluste
 - Für 400V-Netze 500V-MOSFETs einsetzbar
 - Hohe Schaltfrequenz möglich

Nachteil

- Schnelle 1200V-Dioden erforderlich

“Vienna”-Stromrichter: Varianten mit Diodenreihenschaltung



Vorteile gegenüber Ur-Form

- Halbierte Anzahl Schalter
- Für 400V-Netze 500V-Dioden einsetzbar
- Geringere Schaltverluste

Nachteile

- Vielzahl von Dioden
- Deutlich erhöhte Leitverluste
- Hohe Belastung der Schalter

Vorteile gegenüber Ur-Form

- Für 400V-Netze 500V-Dioden einsetzbar
- Geringere Schaltverluste

Nachteile

- Vielzahl von Dioden
- Erhöhte Leitverluste

“Vienna”-Stromrichter: Keine eindeutigen Kostenvorteile

Leistungshalbleiterpreise “Vienna”-Stromrichter (3-MOSFET-Lösung) vs. Vollbrücke

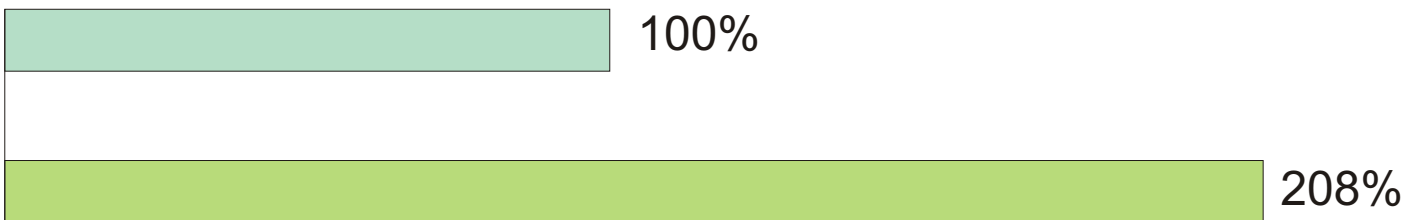
Bei 10 kW



MWI50-12A7
(Brücke; Sixpack)

VUM25-05
(Vienna; Halbbrücke)

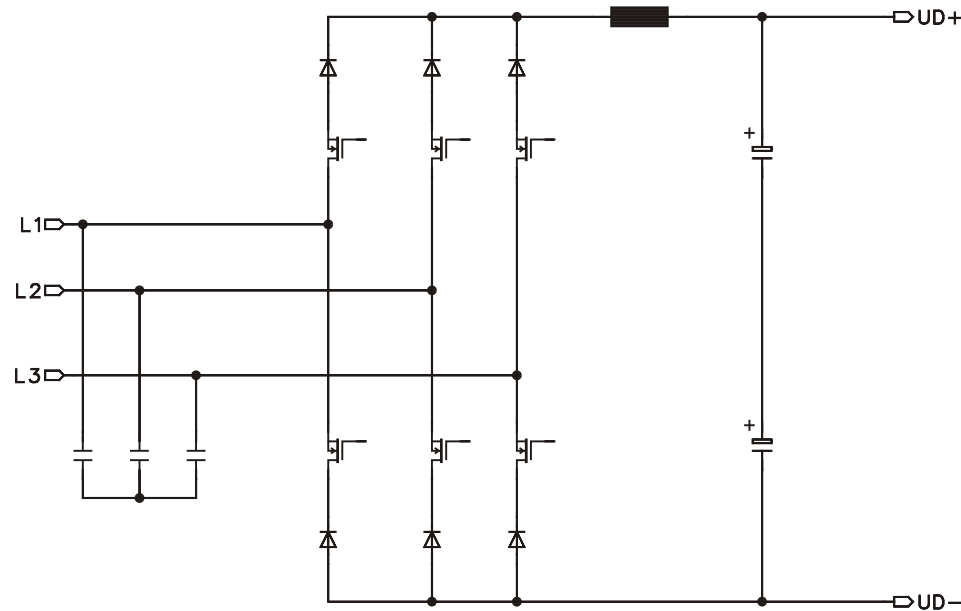
Bei 30 kW



BSM 75 GD120 DN2
(Brücke; Sixpack)

VUM85-05
(Vienna; Halbbrücke)

6-Schalter-Tiefsetzsteller



Vorteile

- Niedrigere Zwischenkreisspannung; Einsatz von Standard DC/DC-Wandlern möglich
- Nur eine Drossel erforderlich
- Zusätzliche Einschaltstrombegrenzung unnötig

Nachteile

- Strom fließt stets über 2 Schalter und 2 Dioden; höhere Leitverluste
- Es muss je Halbbrücke stets mindestens ein Schalter durchgeschaltet sein
- Hohe Schaltleistung der Schalter
- Resonanzen zwischen netzseitigen Kondensatoren und Netzimpedanzen möglich

Aktive Eingangsschaltungen bieten auch Vorteile

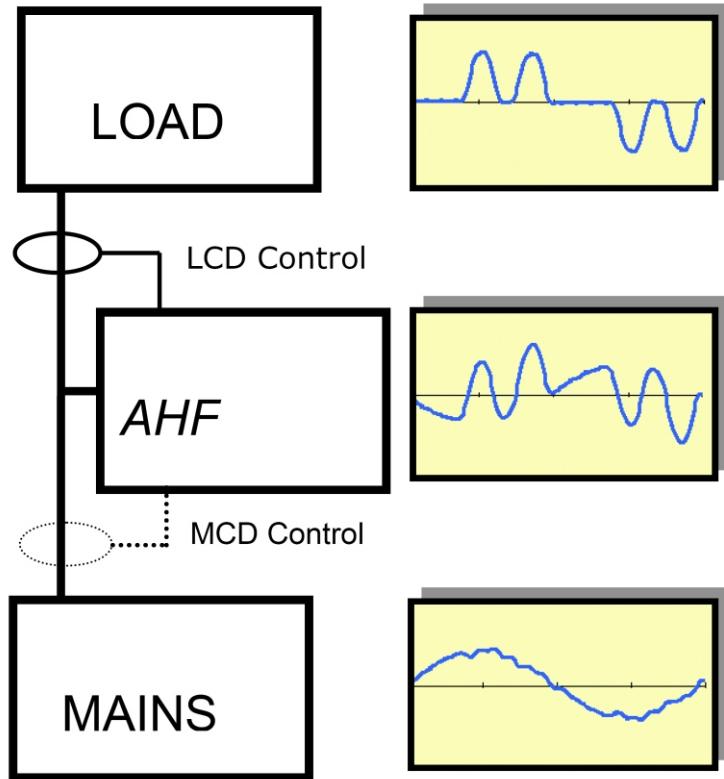
Reduzierung der Eingangsblindleistung:

- Eingangsschaltungen und Stromversorgungsanlagen können kostengünstiger ausgeführt werden
- Bei einphasigen Geräten keine Belastung des Nullleiters durch Oberschwingungsströme

Geregelte Gleichspannung/ Zwischenkreisspannung:

- Generell
 - . Ausgleich von Netzspannungsschwankungen
- Bei Netzteilen
 - . Erheblich bessere Ausnutzung der Zwischenkreiskapazität bei Netzausfall
 - . Geringere Schwankungen ermöglichen engere Auslegung des DC/DC-Wandlers
- Bei Antrieben
 - . Erheblich bessere Ausnutzung der Maschine durch geringfügig höhere geregelte Zwischenkreisspannungen

Notlösung: Vorgeschaltetes Kompensationsgerät

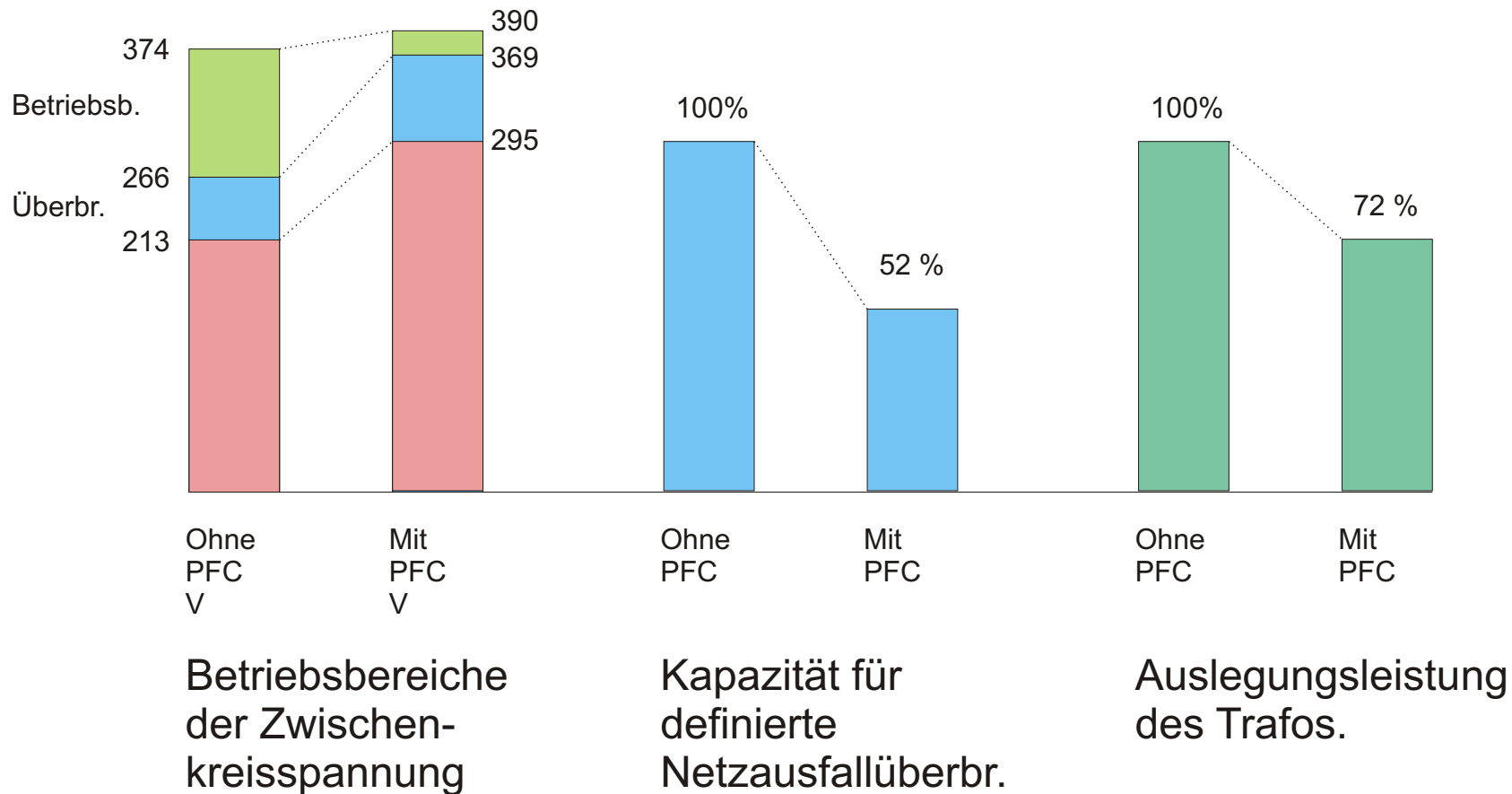


Aktiver Filter AHF entspricht einem U-Umrichter

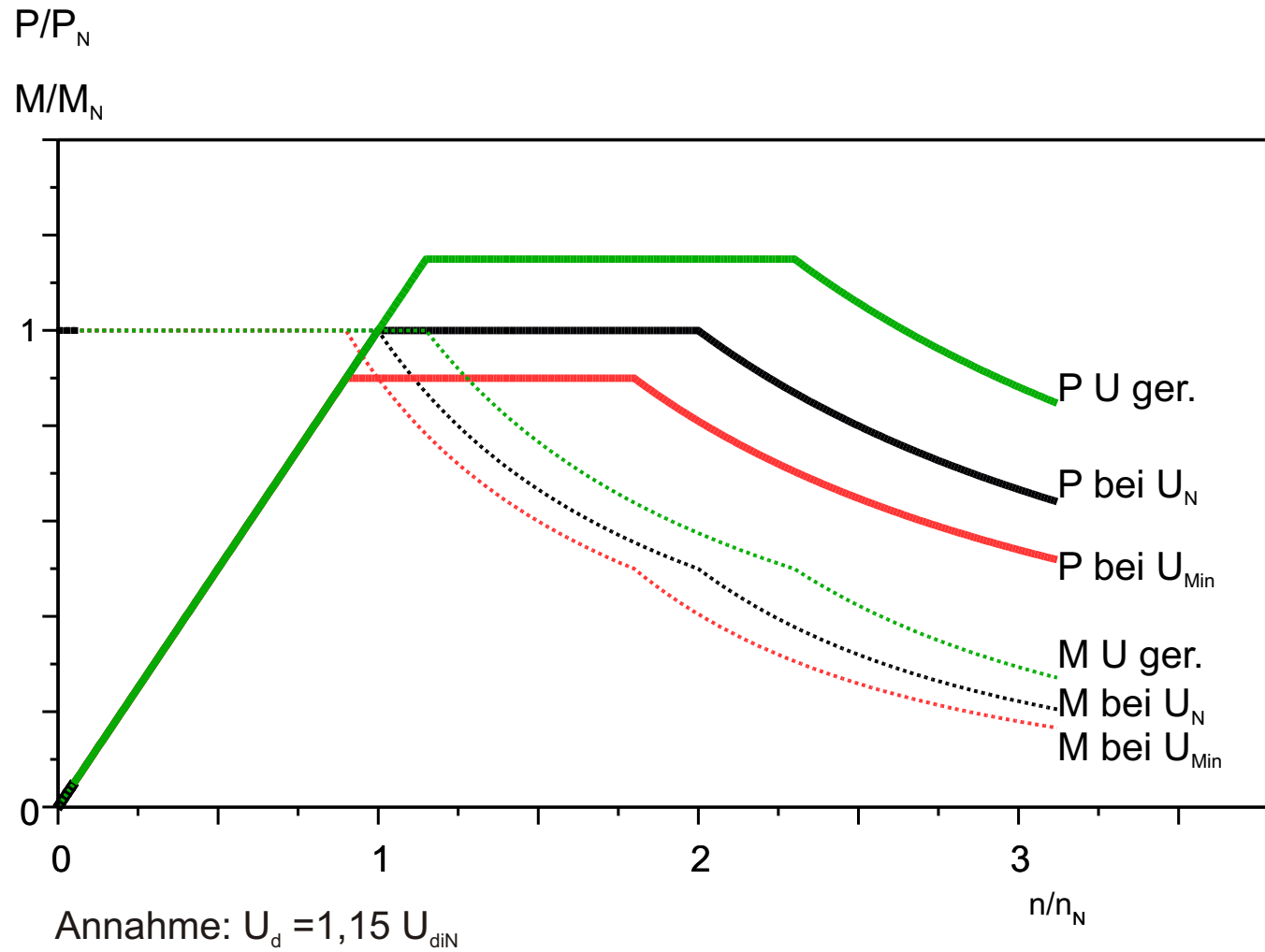
- Aufwand höher als für eine selbstgeführte Vollbrücke netzseitig (Zusätzliches Gehäuse, zusätzlicher Netzfilter, zusätzliche interne Stromversorgung..)
- Zusätzliche Verluste (ca. 2% der kompensierten Blindleistung).
- Keine Möglichkeit der Energierückspeisung beim Bremsen

Einsatz ggf. sinnvoll, um zentral eine Oberschwingungskompensation einer größeren Anzahl vorhandener Verbraucher durchzuführen

Bei Netzteilen: Erforderliche Kapazität reduziert dank eingeschränktem Betriebsbereich



Bei Antrieben: Erheblich bessere Ausnutzung im oberen Drehzahlbereich



Optimierung durch aktuelle Entwicklungen:

Leistungshalbleiter

- Schalter: Low-Gate-Charge MOSFETs und Ultrafast IGBTs, SiC-MOSFETs, GaN-FETs
- Diode: Optimierte Si-Dioden, GaAs, SiC-Schottky

Drossel

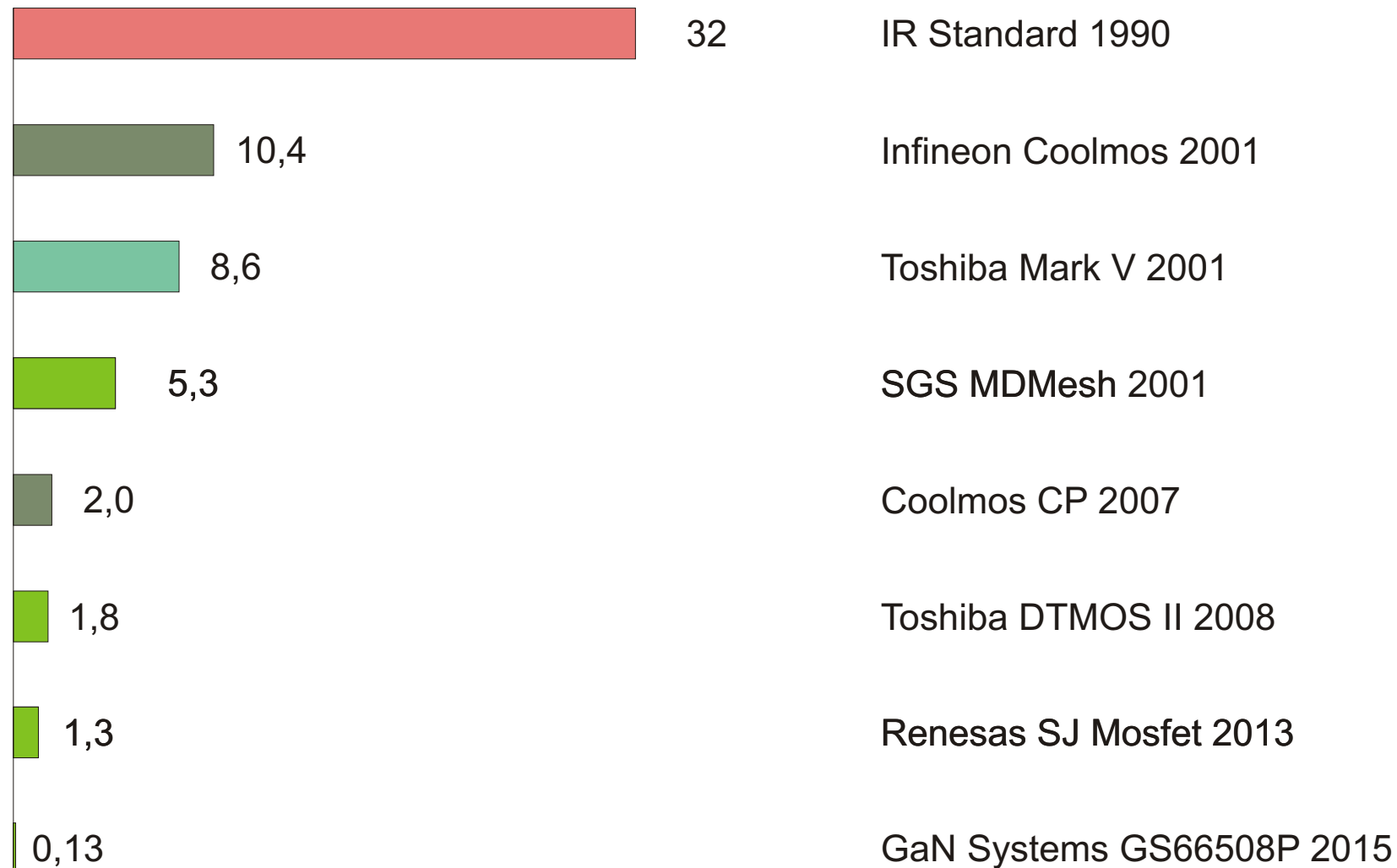
- Reduzierte Verluste durch verlustarme Kerne; kleinere Bauform durch höhere Schaltfrequenz

Steuerung&Regelung

- Preiswerte integrierte Schaltkreise mit Treiber und Multiplizierer
- Integrierte Schutzfunktionen (Überspannung; Brown-Out)
- Verbesserte Dynamik durch Laststromaufschaltung
- "Combo"-ICs mit Integration von PFC und DC/DC-Wandler Ansteuerung
- ICs mit reduzierter Schaltfrequenz im Standby
- Reduzierte EMV-Emissionen durch veränderliche Schaltfrequenz
- Einsatz von DSP anstelle analoger Reglerschaltungen

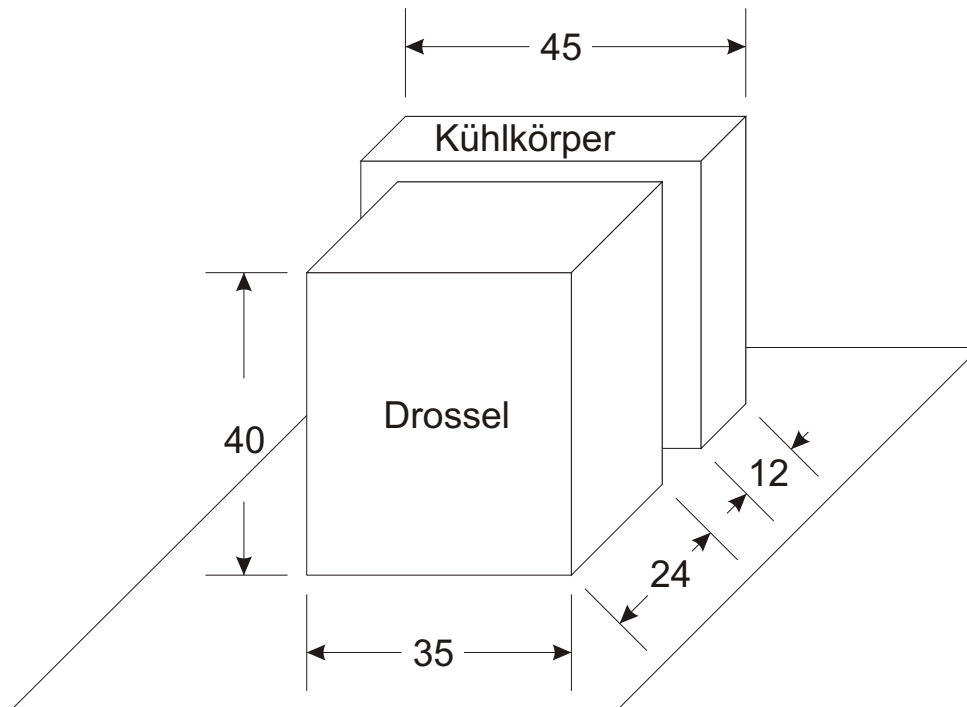
Deutliche Fortschritte bei der Verringerung der Schaltverluste von MOSFETs in den letzten Jahren

Kennziffer Q_{GD} ("Miller-Kapazität")/ G_{DS} in nC/S bei 500V (600V) MOSFETs bei $\Delta U=80\% V_{DS}$



Kompakte PFC-Lösungen sind jetzt möglich

Leistungsteil für 1 kW, Spannungsbereich 220V - 240 V, Schaltfrequenz 500 kHz, Selbstkühlung



Zusammenfassung

- Normenwerk begrenzt Oberschwingungsströme soweit, dass zusätzliche Maßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte in vielen Fällen (aber nicht immer) erforderlich werden
- Lösungsansätze sind wirtschaftlich gerade noch tragbar
- Aktive Lösungen bieten Vorteile hinsichtlich reduziertem Aufwand für Anlagen und verbesserter Maschinenausnutzung sowie u.U. durch Energierückspeisung beim Bremsen
- Innovative Leistungshalbleiter, Kernmaterialien und Steuer-ICs ermöglichen effizientere und kompaktere Lösungen