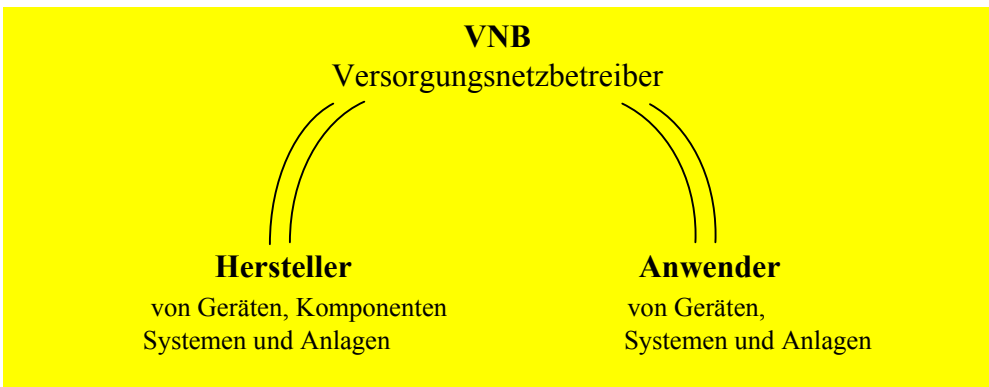
Oberschwingungen

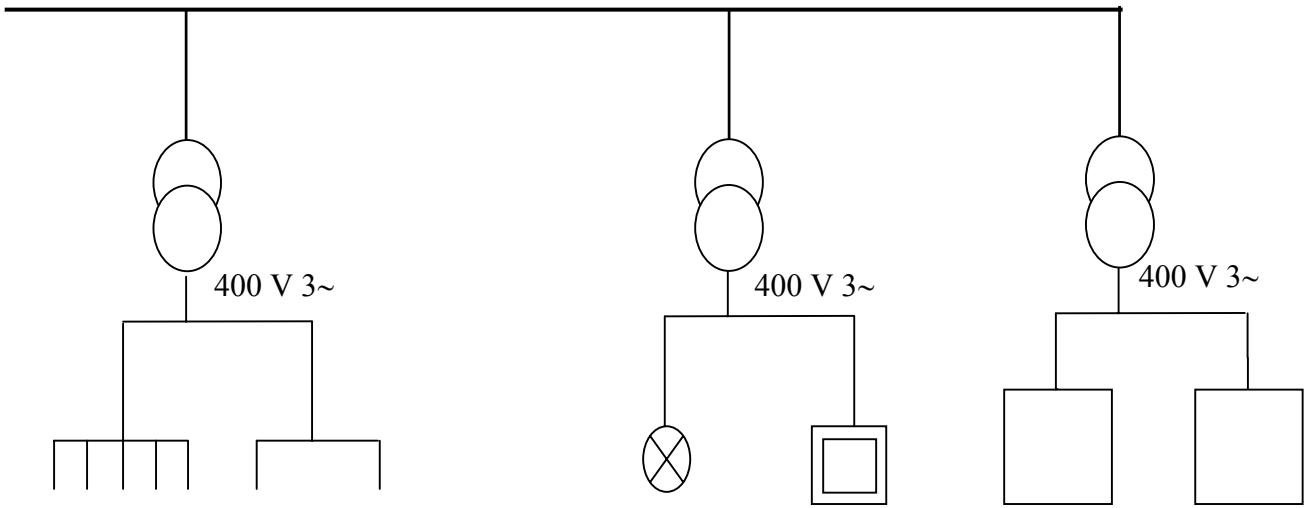
- **Nennen Sie einige Verbraucher die Oberschwingungen erzeugen!**

Das Thema der Belastung öffentlicher Netze spricht drei Hauptgruppen gleichermaßen an:

- **die VNB (Versorgungsnetzbetreiber) als Lieferant und Garant für einwandfreie Netzqualität nach den bestehenden gesetzlichen Vorschriften (z. B. ZVEI-Richtlinien, VDE-Normen, z. B. DIN EN 50160)**
- **die Gerätehersteller, welche nach bestehenden Produktnormen unter Einhaltung der für diese Geräte zutreffenden Vorschriften und Normen produzieren und dieses mit der CE-Kennzeichnung am Gerät sichtbar machen**
- **die Anwender bzw. Endkunden, die eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte gemeinsam in einem Netz betreiben (Mitverursacher).**



Gesetzliche Vorschriften



Haushaltsanschlüsse

EN 50081-1 St-A
EN 50082-1 St-F
EN 55011 St-A

Gewerbe-anschluss

Starkstromanlage
St-F: VDE 0160
St-A: VDEW-Richtlinien
EN 6055-2 St-A
EN 6055-3 St-A

Beleuchtung

Rechner

EN 50081-2 St-A
EN 50082-2 St-F

Stromrichter

Stosslast

EN 55011 St-A
VDE 0160 St-F

St-F = Störfestigkeit
St-A = Störausendung

Normen

national (VDE), EU (EN) und weltweit IEC

- allg. Netzspannungsbeding.:
VDE 0160,
EN 50178

- EMV-Umgebungsbedingung:
VDE 0839-2,
EN 61000 2-2,
IEC 1000 2-2

- Messverfahren:
VDE 0847-4-7,
EN 61000-4-7,
IEC 1000-4-7

- Stromrichter:
VDE 0558-11,
EN 60146-11,
IEC 146-11

- Hausgeräte:
VDE 0838-2,
EN 60555-2,
IEC 555-2

Beschreibung der Störgrößen und ihre Auswirkungen

- **Sie steigern insbesondere die Eisenverluste in Transformatoren; hier kann es zu einer thermischen Überlastung kommen.**
- **Sie erhöhen den Blindleistungsanteil, da die Leistung, die die Oberschwingungsströme hervorrufen, nicht effektiv genutzt werden können.**
- **Sie beeinflussen die Abschaltcharakteristik von Leistungsschaltern; dies kann zu einer frühzeitigen Auslösung führen (Warum?).**
- **Sie bilden häufig eigene Drehfelder, die schneller umlaufen als das übliche Drehfeld der 50 Hz-Netzspannung. Außerdem können diese Oberschwingungs-Drehfelder zusätzlich zum Netzdrehfeld gegenläufig sein. Motoren, die durch das Drehfeld der Netzspannung angetrieben werden (z. B. Asynchronmotoren) werden dadurch beeinflusst, laufen unruhig, werden laut und überlastet (erhöhte Verluste).**

- **Sie überlasten den Neutralleiter und können so zum Neutralleiterbruch führen (vor allem durch die 3. harmonische Oberschwingung); hierdurch entstehen Brände bzw. konstant auftretende Überspannung bei angeschlossenen Betriebsmitteln.**

- **Sie überlasten Kompensationsanlagen – dabei wird die Verlustleistung in diesen Anlagen erhöht; auch in diesem Fall ist ein Anlagenausfall oder ein Brand zu befürchten.**

- **Bei in der Anlage vorhandenen Kondensatoren (wie Kompensationsanlagen, Filter usw.) können sie zu Resonanzerscheinungen führen und so für Überspannungen sorgen.**

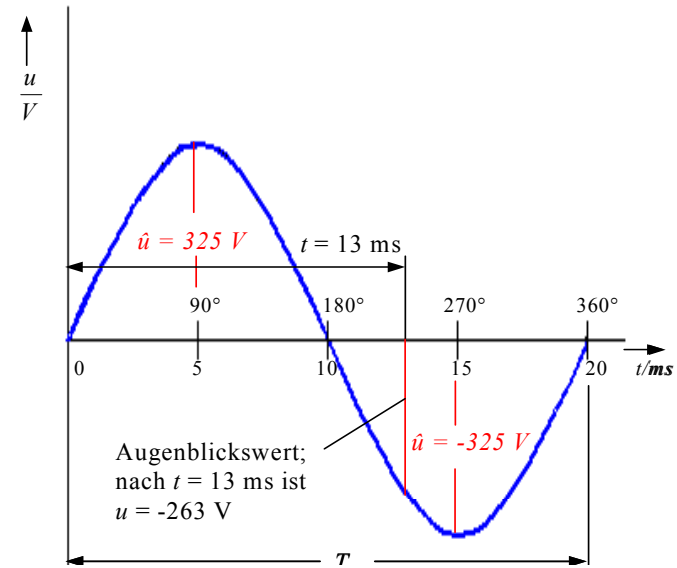
- **Sie verzerren die Netzspannung, da die verzerrten Ströme an den Netzimpedanzen (vergleiche "Netz-innenwiderstand") einen ebenso verzerrten Spannungsfall hervorrufen. Die Spannungsverzerrungen werden so direkt über galvanische Verbindungen oder durch Trans-formatoren auf die darunter liegenden Spannungsebenen übertragen.**
  Damit treten oberschwingungsbehaftete Spannungen auch in Netzbereichen auf, in denen keine Oberschwingungs-erzeuger betrieben werden.
- **Die Störwirkung des magnetischen Feldes von Oberschwingungsströmen ist wegen der höheren Frequenzen größer. Dadurch belasten sie zusätzlich die "elektromagnetische Umwelt" der übrigen Geräte und Anlagenteile.**

Wichtige Begriffe in der Oberschwingungstheorie

➢ **Augenblickswert oder Momentanwert:**

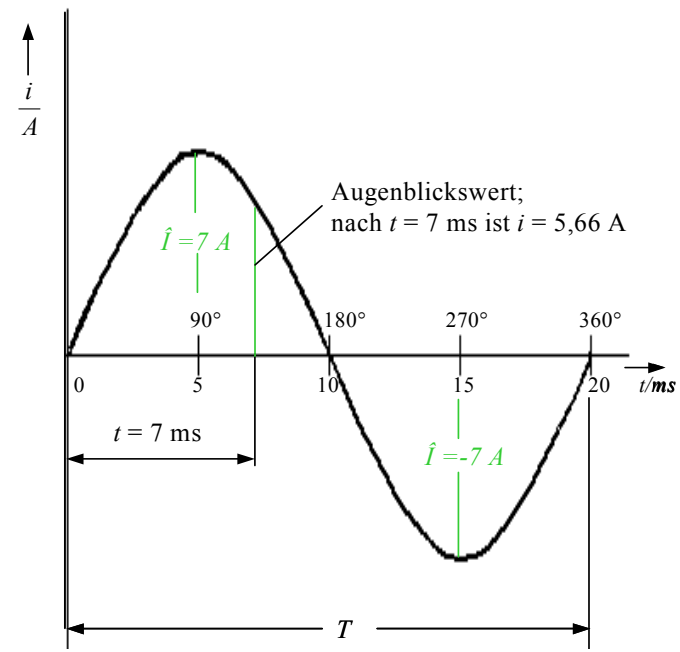
$$u = \hat{u} \cdot \sin \alpha$$

u: Augenblickswert der sinusförmigen Spannung
$\hat{u}$: Scheitelwert, Spitzenwert
α: elektrischer Winkel



$$i = \hat{i} \cdot \sin \alpha$$

i: Augenblickswert des sinusförmigen Stroms
$\hat{i}$: Scheitelwert, Spitzenwert
α: elektrischer Winkel



Wichtige Begriffe in der Oberschwingungstheorie

Beispiel: Welchen Wert hat eine sinusförmige Spannung u bei den Winkeln 25°, 90°, 245°, wenn der Scheitelwert der Spannung 325 V beträgt?

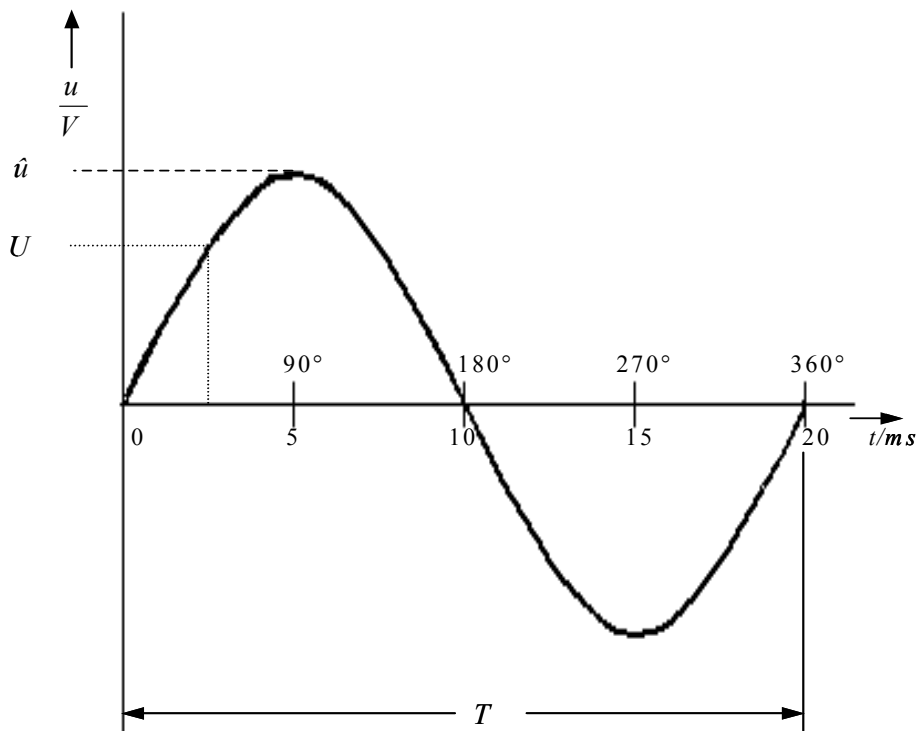
Lösung: $u = \hat{u} \cdot \sin \alpha$

$$u = 325\ \text{V} \cdot \sin 25° = 137{,}35\ \text{V}$$
$$u = 325\ \text{V} \cdot \sin 90° = 325\ \text{V}$$
$$u = 325\ \text{V} \cdot \sin 245° = -294{,}55\ \text{V}$$

Wichtige Begriffe in der Oberschwingungstheorie

Effektivwert (quadratischer Mittelwert) und Gleichrichtwert:

(gleiche Leistung am Widerstand R erbringt, wie ein ebenso großer Gleichstrom oder Gleichspannung)



$$\frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = U_{eff} = U \quad und \quad \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} = I_{eff} = I$$

$$U = U_{eff} = 0{,}707 \cdot \hat{u}$$

$$I = I_{eff} = 0{,}707 \cdot \hat{i}$$

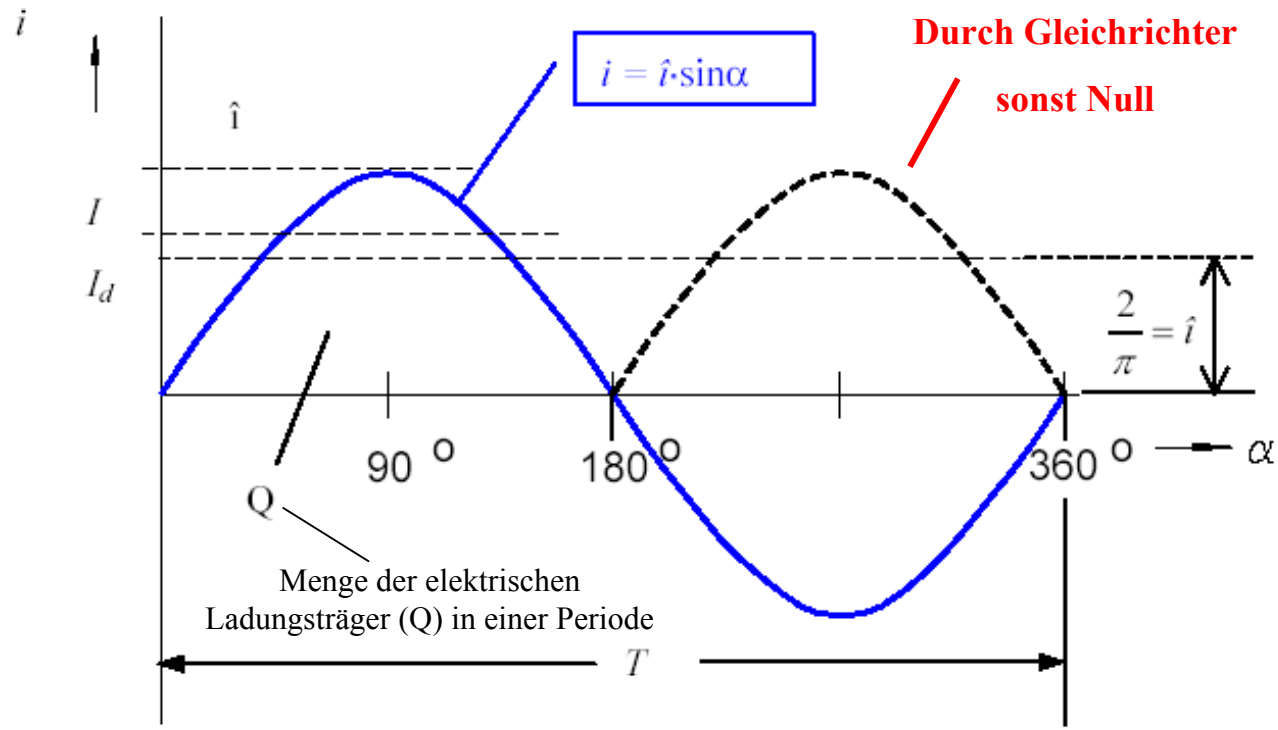
Zusammenhang zw. Scheitelwert und Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung

Wichtige Begriffe in der Oberschwingungstheorie

Gleichrichtwert

- Der **Gleichrichtwert** I_d stellt den über eine Periode genommenen arithmetischen Mittelwert der Beträge ***i*** der Augenblickswerte eines Wechselstroms dar.

- $\boldsymbol{I_d = I}$-



Formfaktor

Das Verhältnis von Effektivwert zum Gleichrichtwert wird Formfaktor genannt.

F: Formfaktor
U: Effektivwert der Spannung
U_d: Gleichrichtwert der Spannung

$$F = \frac{U}{U_d} \quad und \quad F = \frac{I}{I_d}$$

F: Formfaktor
I: Effektivwert des Stroms
I_d: Gleichrichtwert des Stroms

Für sinusförmige Wechselspannung ist der Formfaktor

$$F = \frac{0{,}707 \cdot \hat{u}}{0{,}637 \cdot \hat{u}} = \frac{0{,}707}{0{,}637} = 1{,}11$$

Weicht der Formfaktor von F = 1,11 ab, so liegt in der Regel keine sinusförmige Wechselspannung vor.

Scheitelfaktor und Crestfaktor

In der Isolationstechnik, für die Durchschlagsfestigkeit von festen, flüssigen und gasförmigen Isolierstoffen, ist jedoch nicht nur der Effektivwert, sondern vor allem der Scheitelwert (Spitzenwert) eines Wechselstromes ausschlaggebend.

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U \quad \rightarrow \quad \frac{\hat{u}}{U} = \sqrt{2} = 1{,}414$$

Scheitelfaktor und Crestfaktor

Das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert einer Wechselspannung nennt man Scheitelfaktor.

$$\xi = \frac{\hat{u}}{U}$$

ξ = **Zeta**

$\hat{u}$: Scheitelwert der Spannung
U: Effektivwert der Spannung
ξ: Scheitelfaktor oder Crestfaktor (bei sinusförmigen Größen ist dies $\sqrt{2} = 1{,}414$)

Beispiel:

$U = 230$ V wie hoch ist der Scheitelwert dieser Spannung?
$\hat{u} = 1{,}414 \times 230$ V $= 325$ V

Die Aussage dieses Faktors ist:

Welchen „effektiven Nutzen“ (Effektivwert) hat eine zeitlich sich verändernde Größe und wie groß ist dabei der maximal vorkommende Wert (Scheitelwert)? Je größer dieser Faktor ist, um so größer ist der Scheitelwert im Verhältnis zum „effektiven Nutzen“.

- kurzer Impuls, sehr kleiner Effektivwert

  (Scheitelwert extrem hoch, <u>Crestfaktor sehr hoch</u>)

- Gleichstrom, Maximalwert ist gleich Stromhöhe

  <u>(Crestfaktor ist gleich 1)</u>

$$\xi = \frac{\hat{u}}{U}$$

Die Formfaktoren und Scheitelfaktoren sind also abhängig von der Schwingungs-form, deshalb sind nachstehend die Werte für einige wichtigste Schwingungs-formen genannt.

Schwingungsform	Formfaktor F	Scheitelfaktor
Sinus	**1,11**	**1,414**
Rechteck	**1**	**1**
Dreieck / Sägezahn	**1,1547**	**1,732**

Die übrigen Bezeichnungen, die im Zusammenhang mit Oberschwingungen benutzt werden, sind: **(Info, in der Anwendung)**

Grundschwingung	Jede periodische Schwingung (also jede Schwingung, deren Kurvenform sich ständig wiederholt) kann in Sinusschwingungen mit jeweils verschiedenen Frequenzen zerlegt werden (siehe Abschnitt 8.2). Die Sinusschwingung, die die gleiche Frequenz aufweist wie die periodische (nicht-sinusförmige) Ausgangsschwingung, ist die Grundschwingung.
Grundschwingungsstrom:	I_1 (als Effektivwert)
Oberschwingungsstrom I_h:	I_h (Effektivwert irgendeines Oberschwingungsstroms wie I_2 oder I_3 usw. – **einschließlich I_1**)
Oberschwingungsströme I_O:	I_O (geometrischer Mittelwert aus allen Oberschwingungsströmen wie I_2, I_3 usw. **ohne I_1**) $I_O = \sqrt{(\Sigma I_h^2)}$ (ΣI_h^2 = Summe aller I_h^2 wie $I_2^2+I_3^2+I_4^2$... **ohne I_1**)
Effektivstrom (Gesamtstrom) I_{eff}:	I_{eff} (Effektivwert der Summe <u>aller</u> Ströme) $I_{eff} = \sqrt{I_1^2 + I_O^2}$

Grundschwingungsgehalt:

$$g = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

g macht Aussagen zum Anteil des Grundschwingungsstrom $\boldsymbol{I_1}$ an den Gesamtstrom $\boldsymbol{I_{eff}}$.

Da die Grundschwingung allein den „effektiven Nutzen" des Gesamtstroms bewirkt, ist ***g*** ein Maß dafür, wie effektiv der Gesamtstrom genutzt wird. Je größer ***g*** ist, um so geringer ist der Oberschwingungsanteil des Gesamtstroms, d.h. um so höher ist der „effektive Nutzen" des Gesamtstroms.

g ist 1, wenn bei einer sinusförmigen Spannung ein sinusförmiger Strom fließt – bei vorhandenen Oberschwingungen ist ***g*** somit stets < 1.

Oberschwingungsgehalt (Klirrfaktor):

$$k = \frac{I_O}{I_{eff}}$$

Im Gegensatz zu ***g*** gibt ***k*** den Anteil der Oberschwingungsströme $\boldsymbol{I_O}$ an den Gesamtstrom $\boldsymbol{I_{eff}}$ an.

So wie ***g*** den „Nutzen" des Gesamtstroms beschreibt, so ist ***k*** ein Maß für den Verlust – denn je größer ***k*** ist, um so höher liegt der Anteil der Oberschwingungen.

k ist Null, wenn bei einer sinusförmigen Spannung ein sinusförmiger Strom fließt.

Verzerrungsfaktor (THD):

$$d = \frac{I_O}{I_1}$$

Mit ***d*** wird der sogenannte **THD-Wert** angegeben. Er gibt das Verhältnis der Oberschwingungsströme $\boldsymbol{I_O}$ zum Grundschwingungsstrom $\boldsymbol{I_1}$ an.
Je größer ***d*** ist, um so höher liegt der Oberschwingungsanteil. Dieser Wert ist sehr verwandt mit dem zuvor beschriebenen Klirrfaktor ***k***. Der THD-Wert ***d*** gibt allerdings noch direkter das Verhältnis vom „nutzbaren" Grundschwingungsstrom zu den „nicht nutzbaren" Oberschwingungsströmen an – ist also ein Maß für das Verhältnis von „Blindgrößen" zu den „Nutzgrößen" des Gesamtstroms.
d ist Null, wenn bei einer sinusförmigen Spannung ein sinusförmiger Strom fließt.
Der THD-Wert wird häufig in % angegeben (z. B. 155, statt 1,55).

➢ Wirk-, Blind- und Scheinleistung (ohne Oberschwingungen)

S: Scheinleistung in W oder VA
U: Effektivwert der Netzspannung in V
I: Effektivwert des Stromes in A

$$S = U \cdot I$$

P: Wirkleistung in W
U: Effektivwert der Netzspannung in V
I: Effektivwert des Stromes in A

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

cos φ: Leistungsfaktor (φ ist der Winkel – die Phasenverschiebung - zwischen Strom und Spannung ist) häufig auch mit λ angegeben.

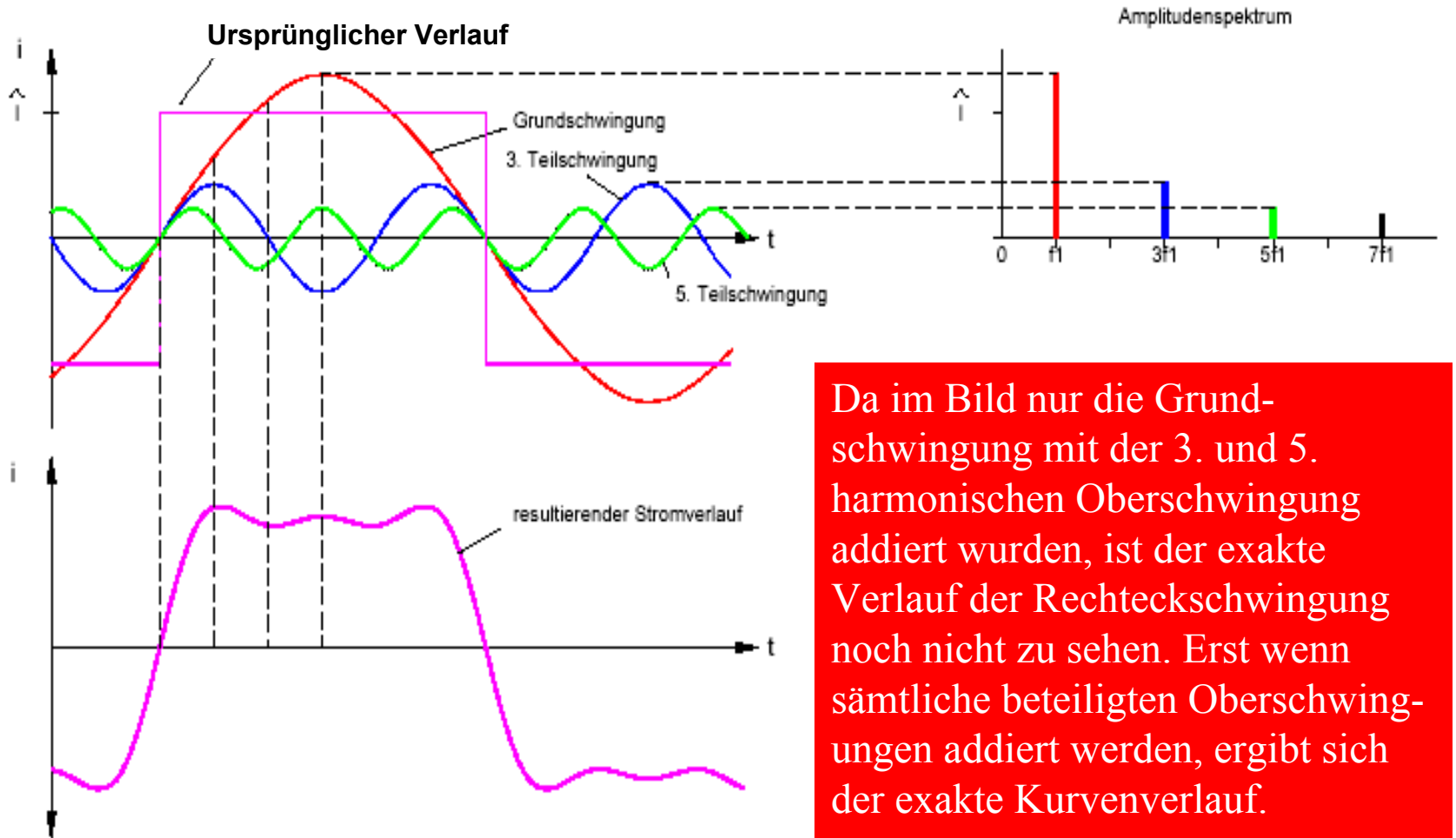
Q: Blindleistung in var
U: Effektivwert der Netzspannung in V
I: Effektivwert des Stromes in A

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

sin φ: Blindfaktor (φ ist der Winkel – die Phasenverschiebung - zwischen Strom und Spannung ist)

Grundsätzliches zur Oberschwingungstheorie

- Ein mathematisch exakter sinusförmiger Spannungs- oder Stromverlauf enthält keine Oberschwingungen, sondern nur die sog. Grundschwingung. Jede von der Sinusform abweichende periodische Kurvenform dagegen enthält Oberschwingungen.
- Der französische Mathematiker und Physiker Fourier hat herausgefunden, dass **jede periodische Funktion (also jeder ständig wiederkehrende Verlauf einer Kurvenform) in eine endlose Reihe von Sinus-Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen zerlegt werden kann**.
- Man nennt dieses Verfahren „Fourier-Analyse“.



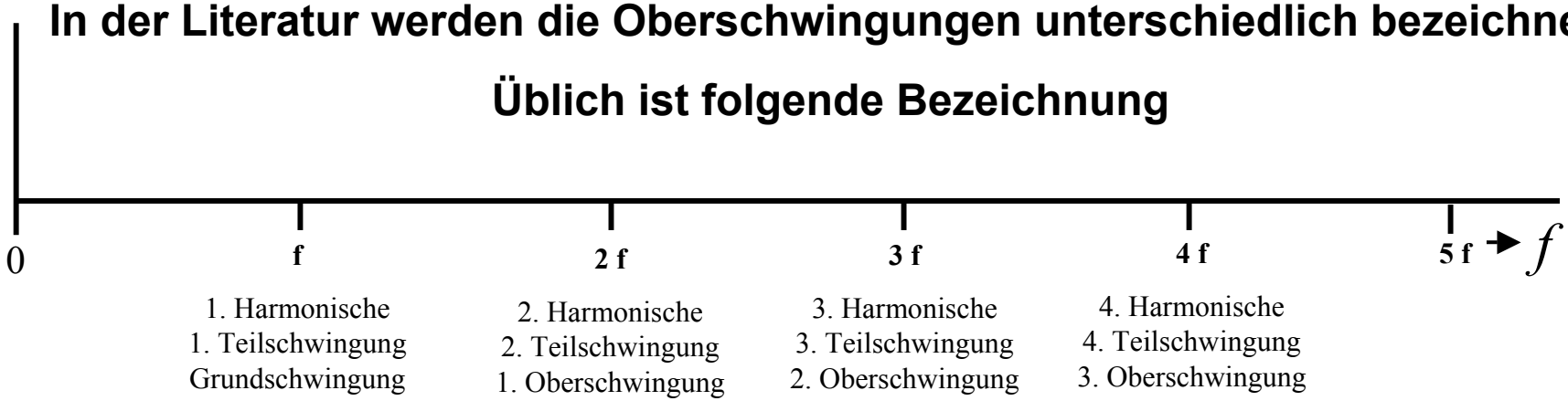
Da im Bild nur die Grundschwingung mit der 3. und 5. harmonischen Oberschwingung addiert wurden, ist der exakte Verlauf der Rechteckschwingung noch nicht zu sehen. Erst wenn sämtliche beteiligten Oberschwingungen addiert werden, ergibt sich der exakte Kurvenverlauf.

„In jedem Augenblick findet eine Addition statt.“

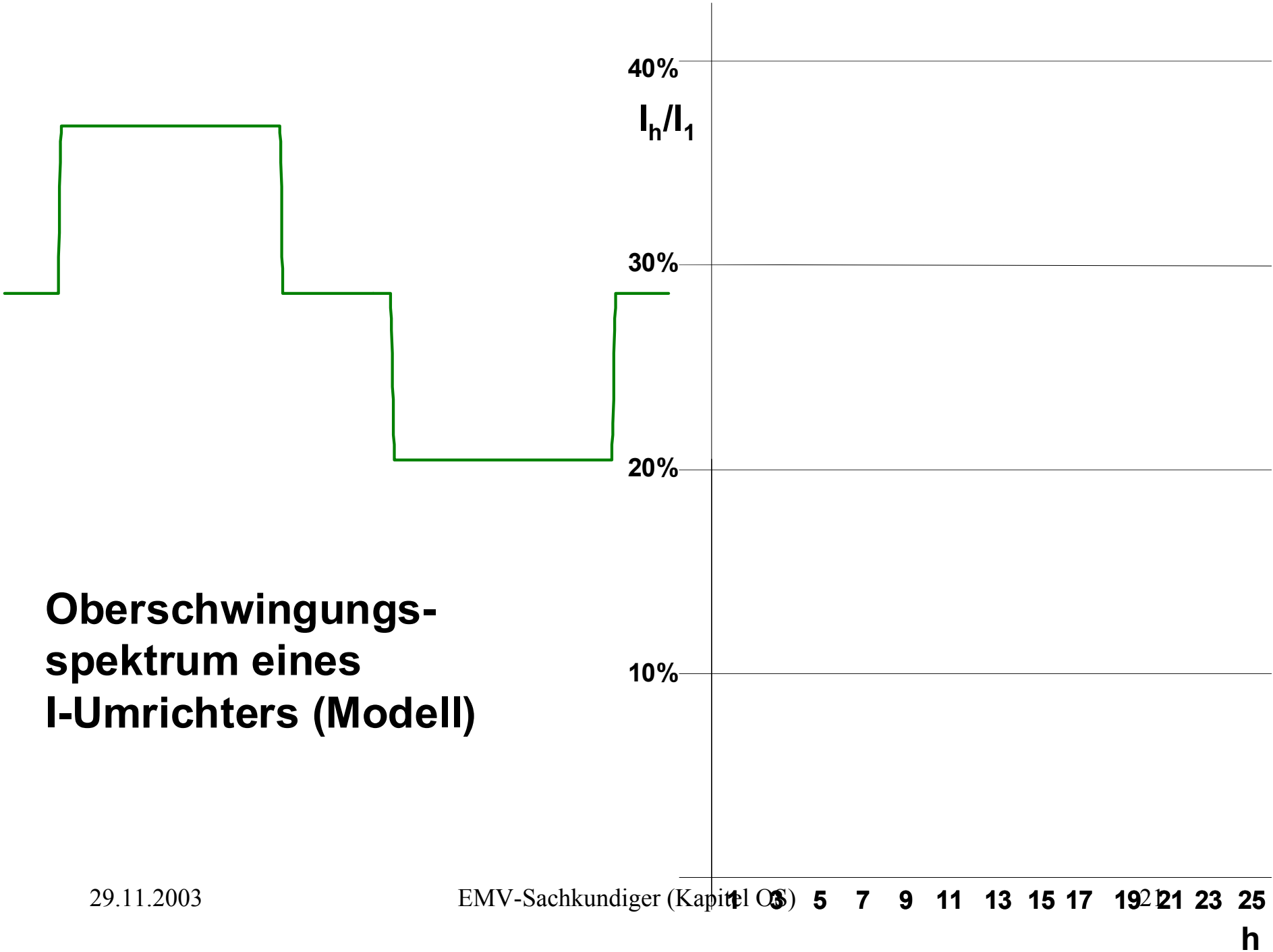
Bezeichnungen von Oberschwingungen

In der Literatur werden die Oberschwingungen unterschiedlich bezeichnet!

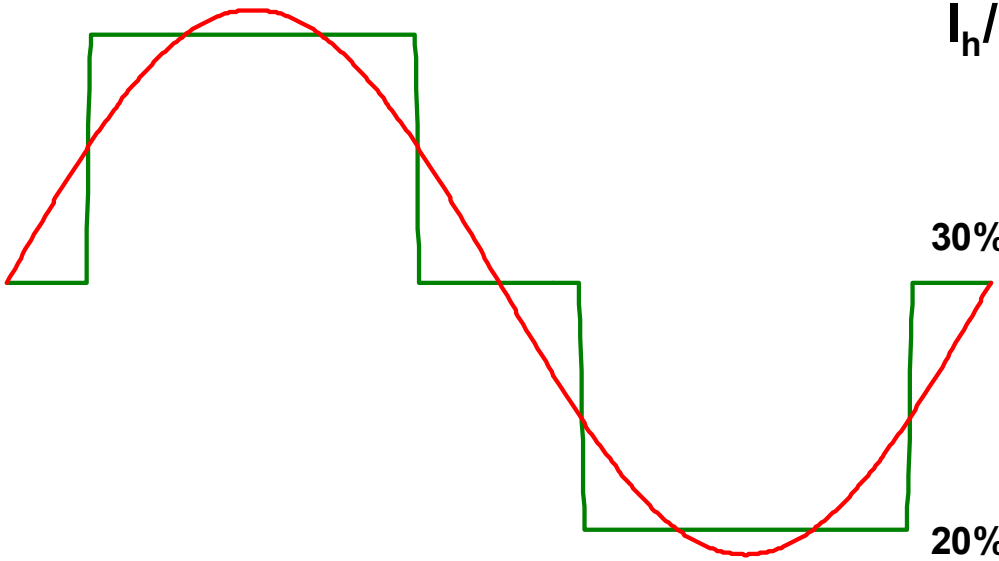
Üblich ist folgende Bezeichnung

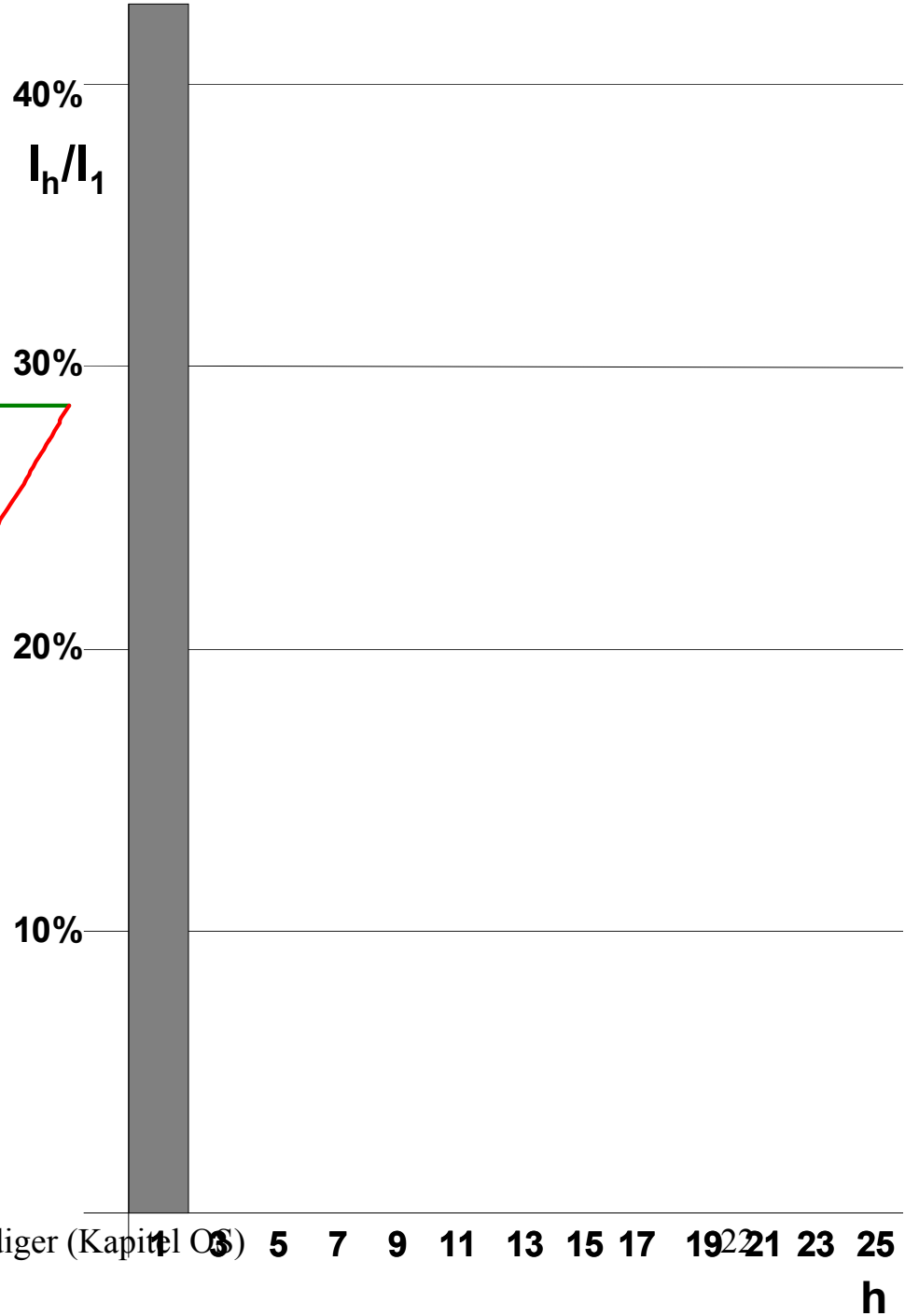


- Gleichbedeutend ist die Bezeichnung: „Harmonische“, „harmonische Oberschwingung“ oder „harmonische Teilschwingung“. Dabei ist die **1. Harmonische** (oder die **1. harmonische Teilschwingung** oder die **1. harmonische Oberschwingung**) identisch mit der **Grundschwingung**.
- Davon zu unterscheiden ist die Bezeichnung „Oberschwingung“. Da hier die Grundschwingung nicht hinzugerechnet wird, ist die **1. Oberschwingung** identisch mit der **2. Harmonischen** (oder der **2. harmonischen Teilschwingung** oder der **2. Harmonischen Oberschwingung**)

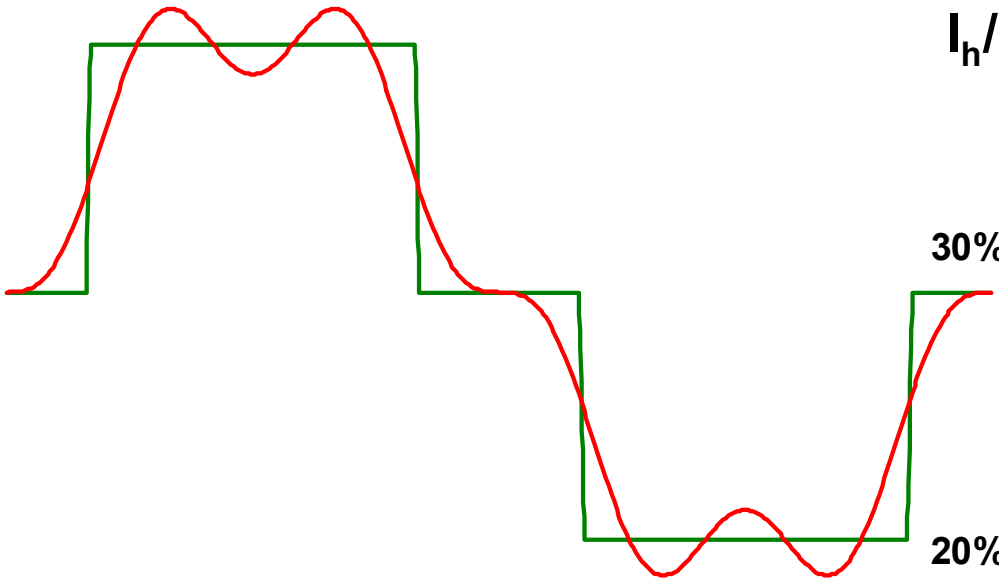


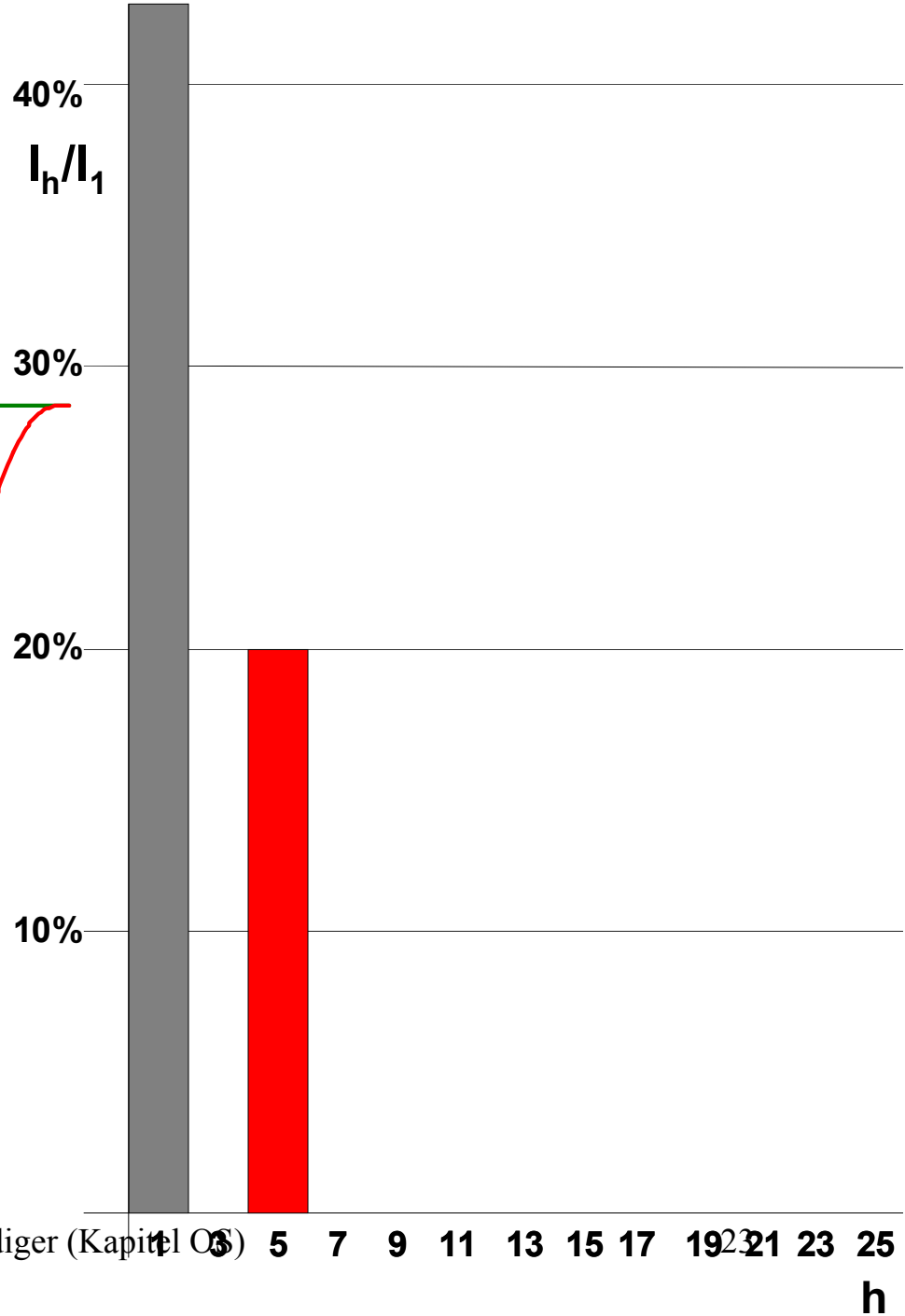
Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)



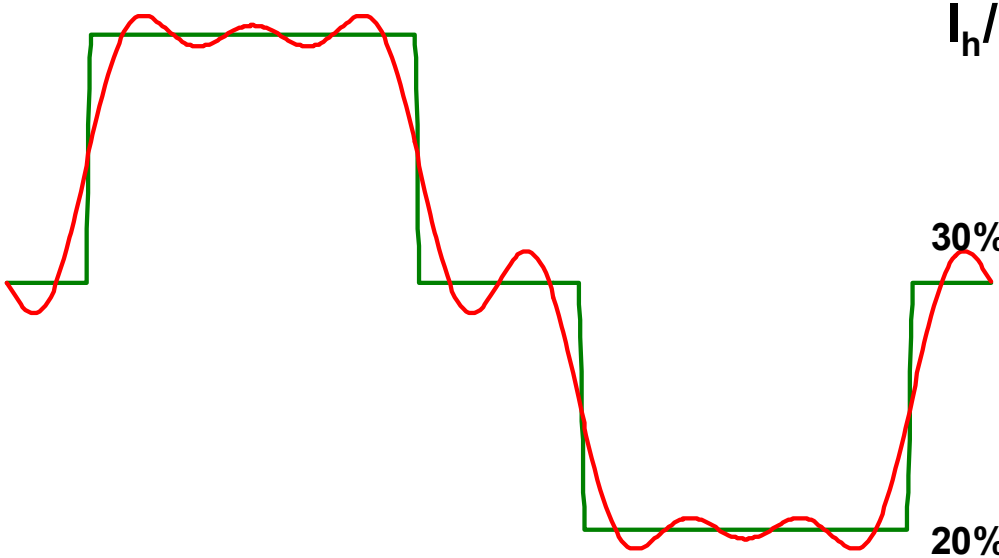


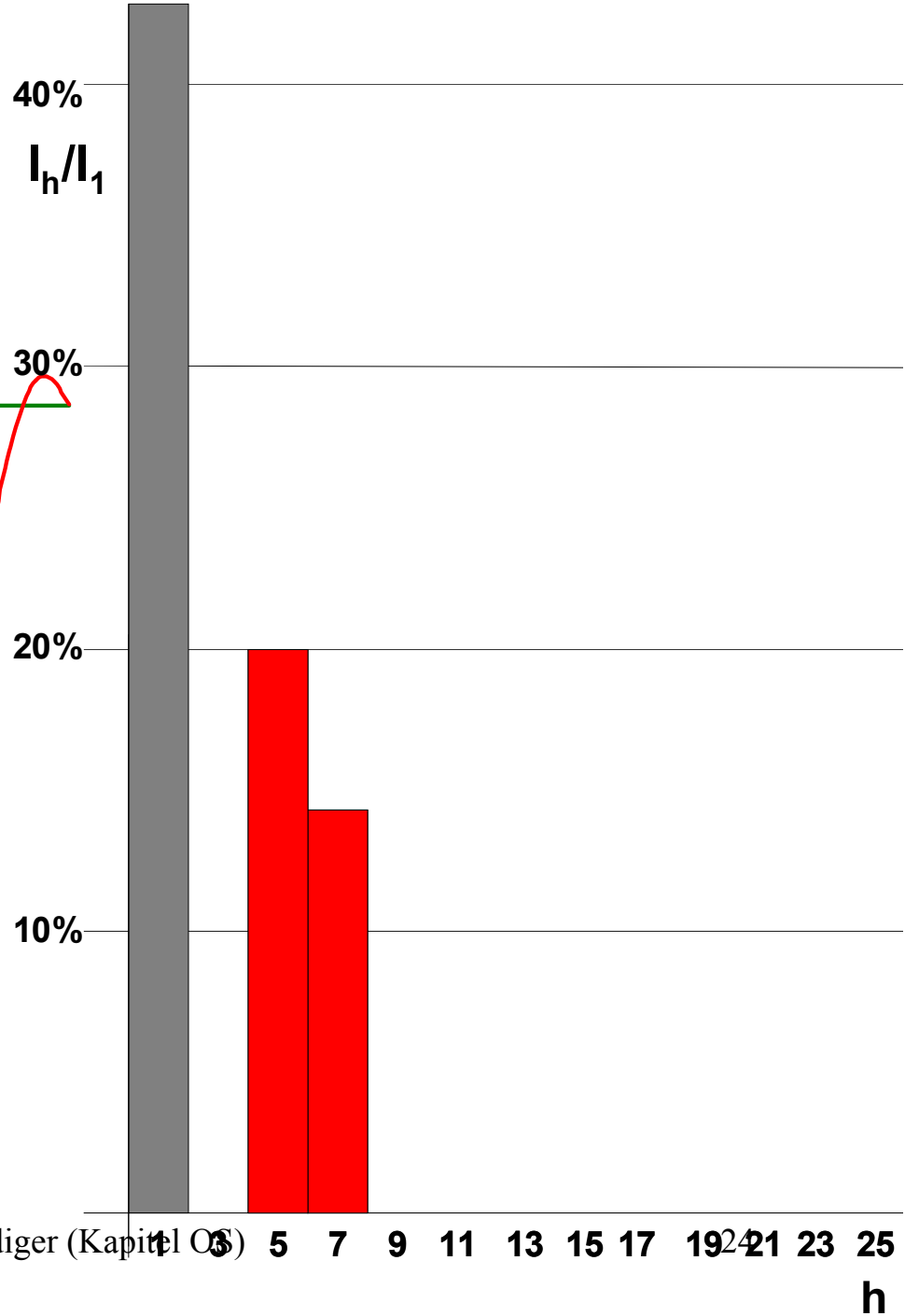
Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)



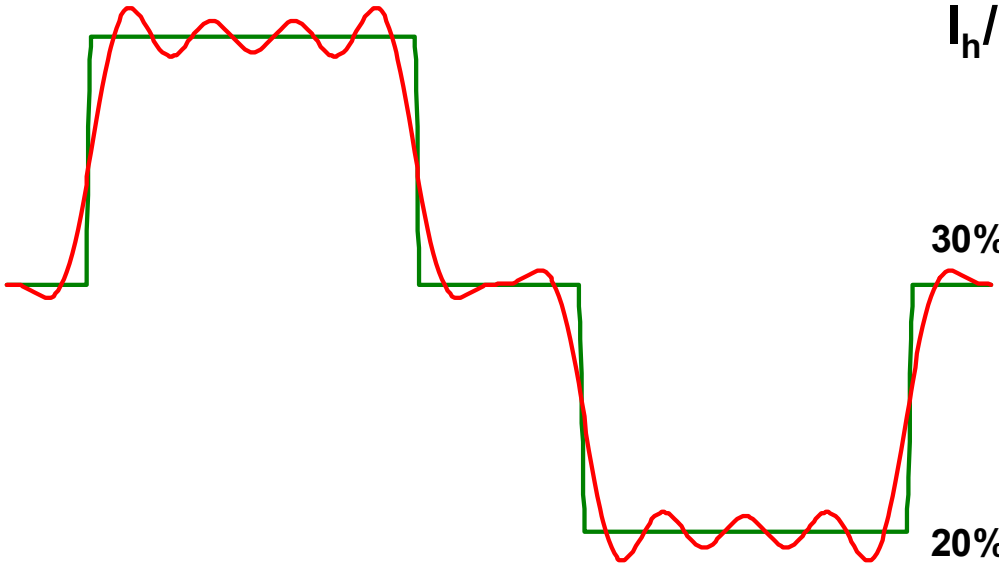


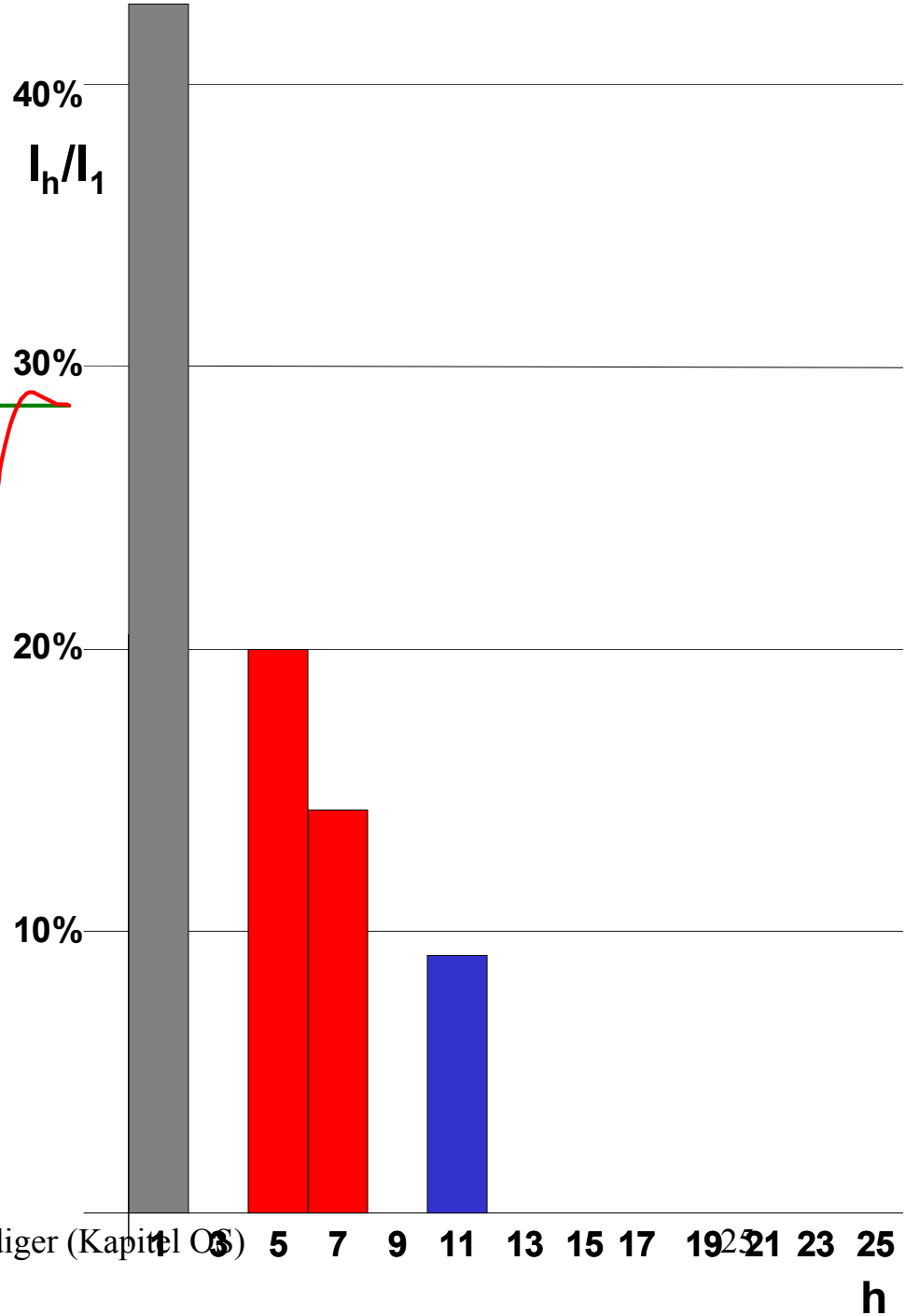
Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)



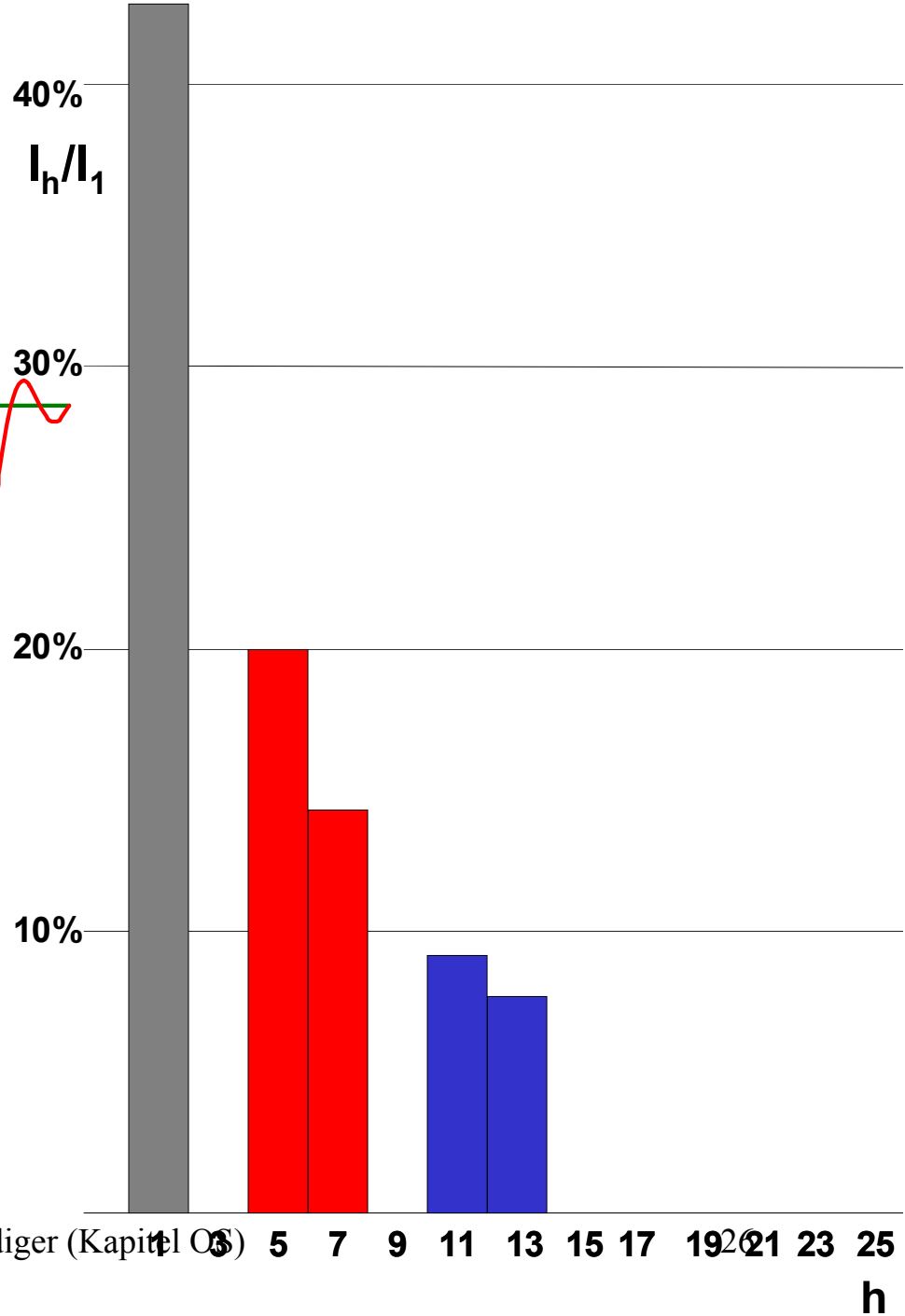


Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)

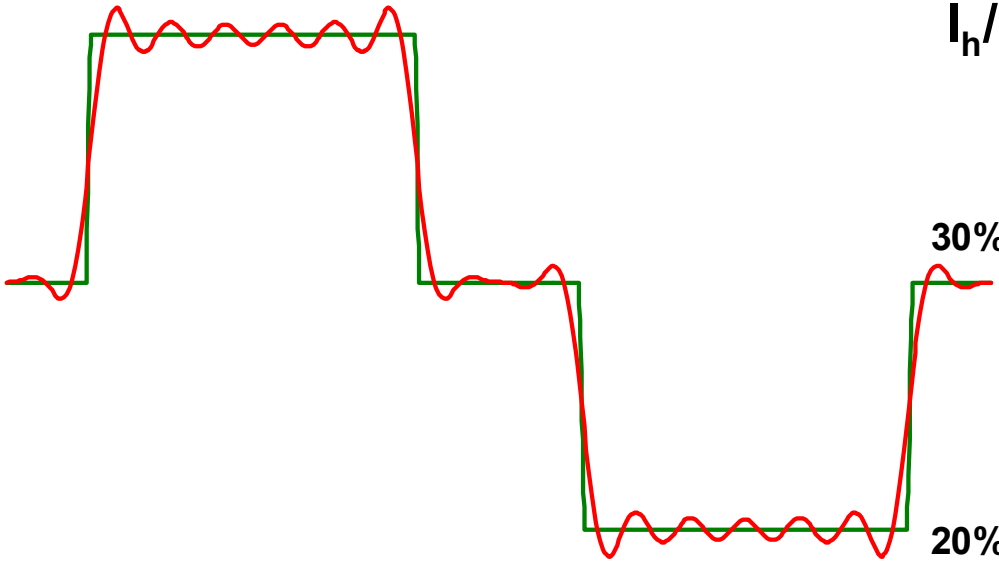


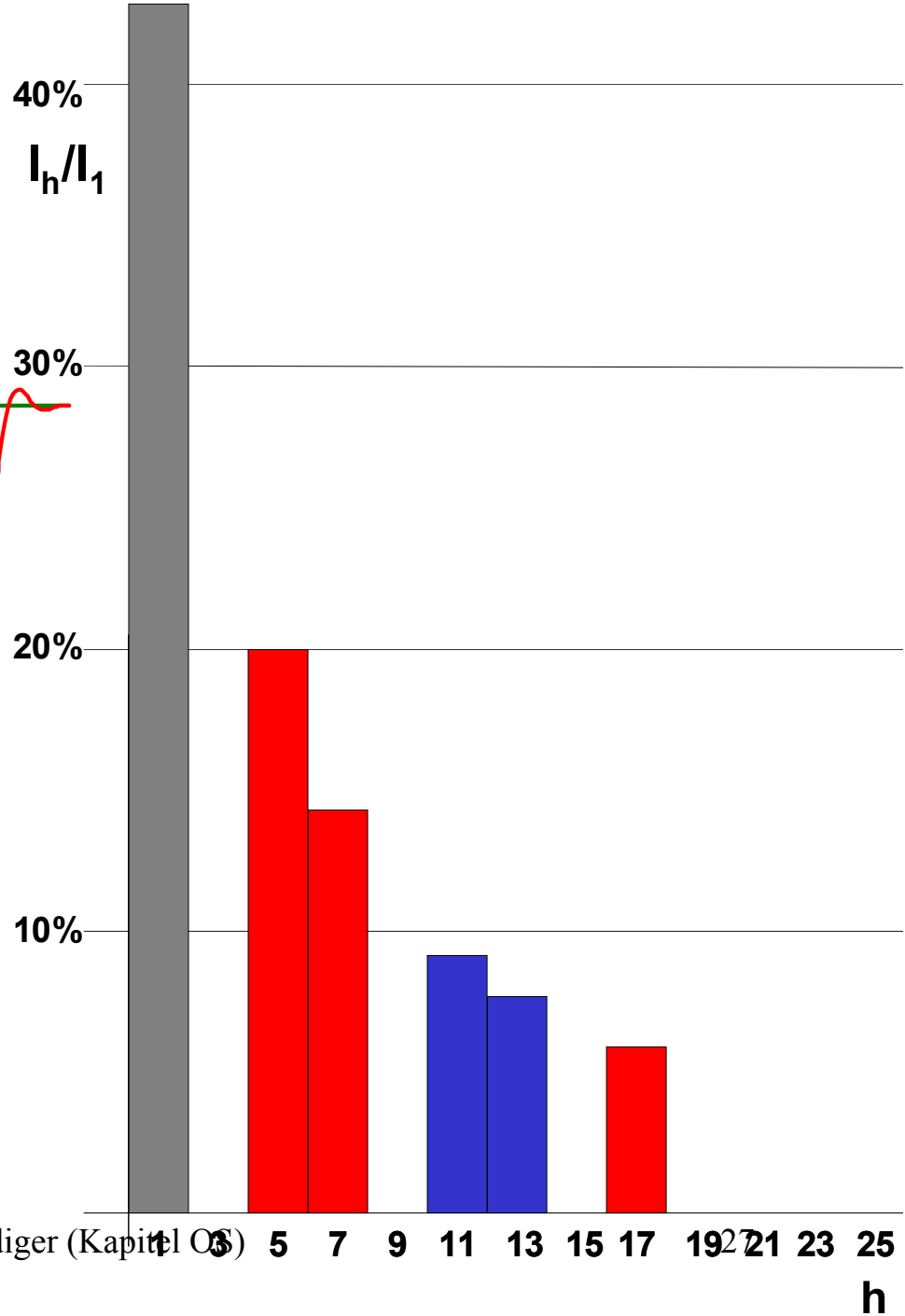


Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)

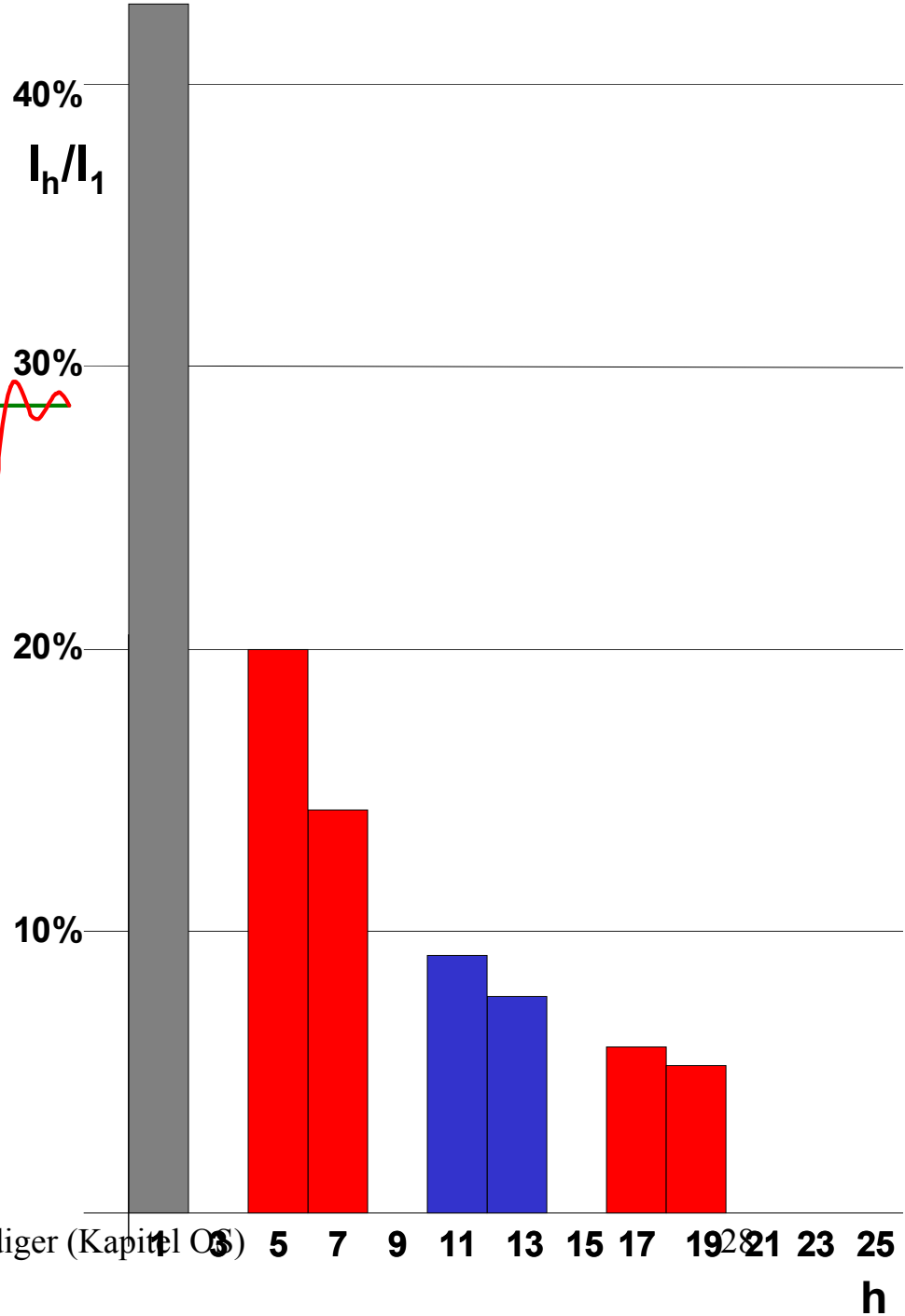


Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)

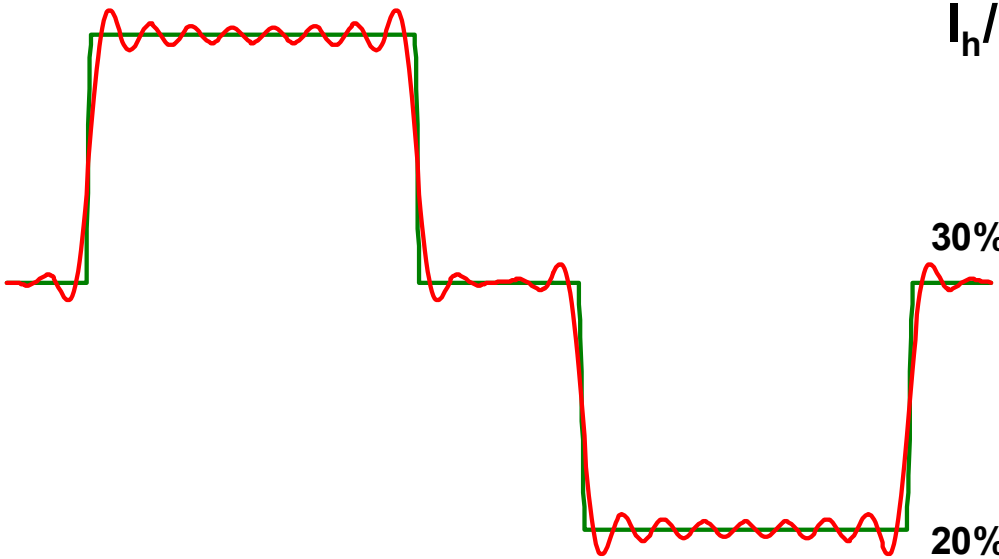


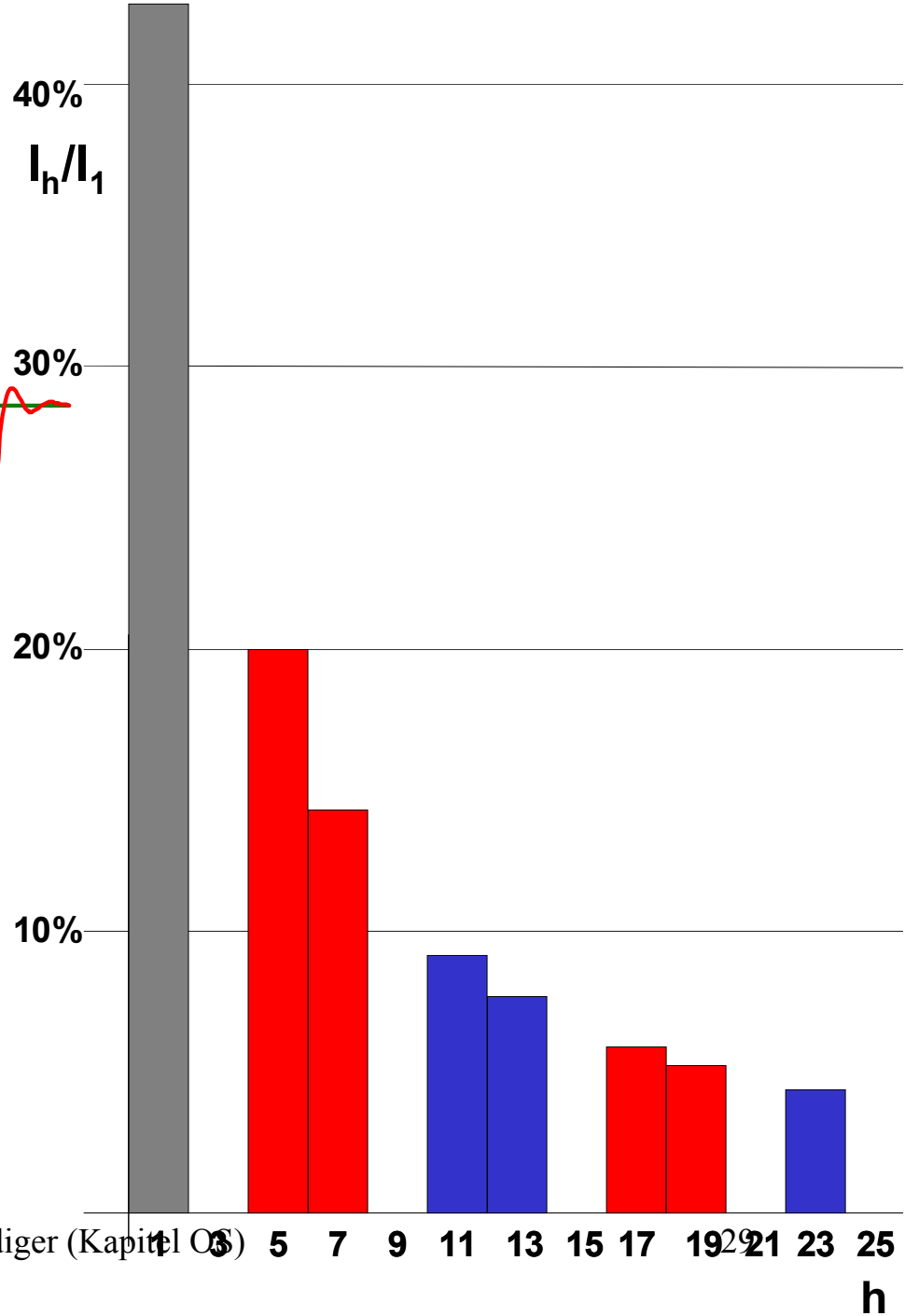


Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)

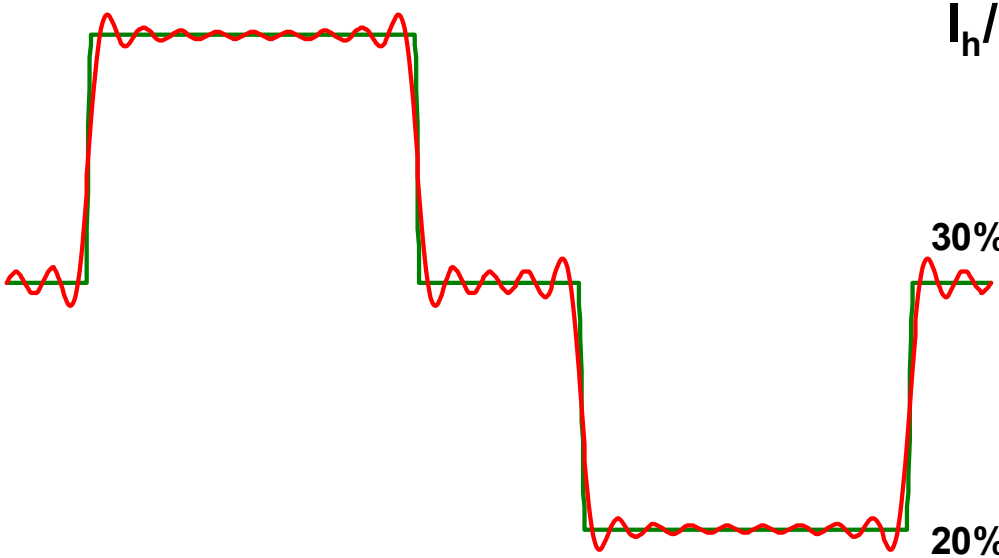


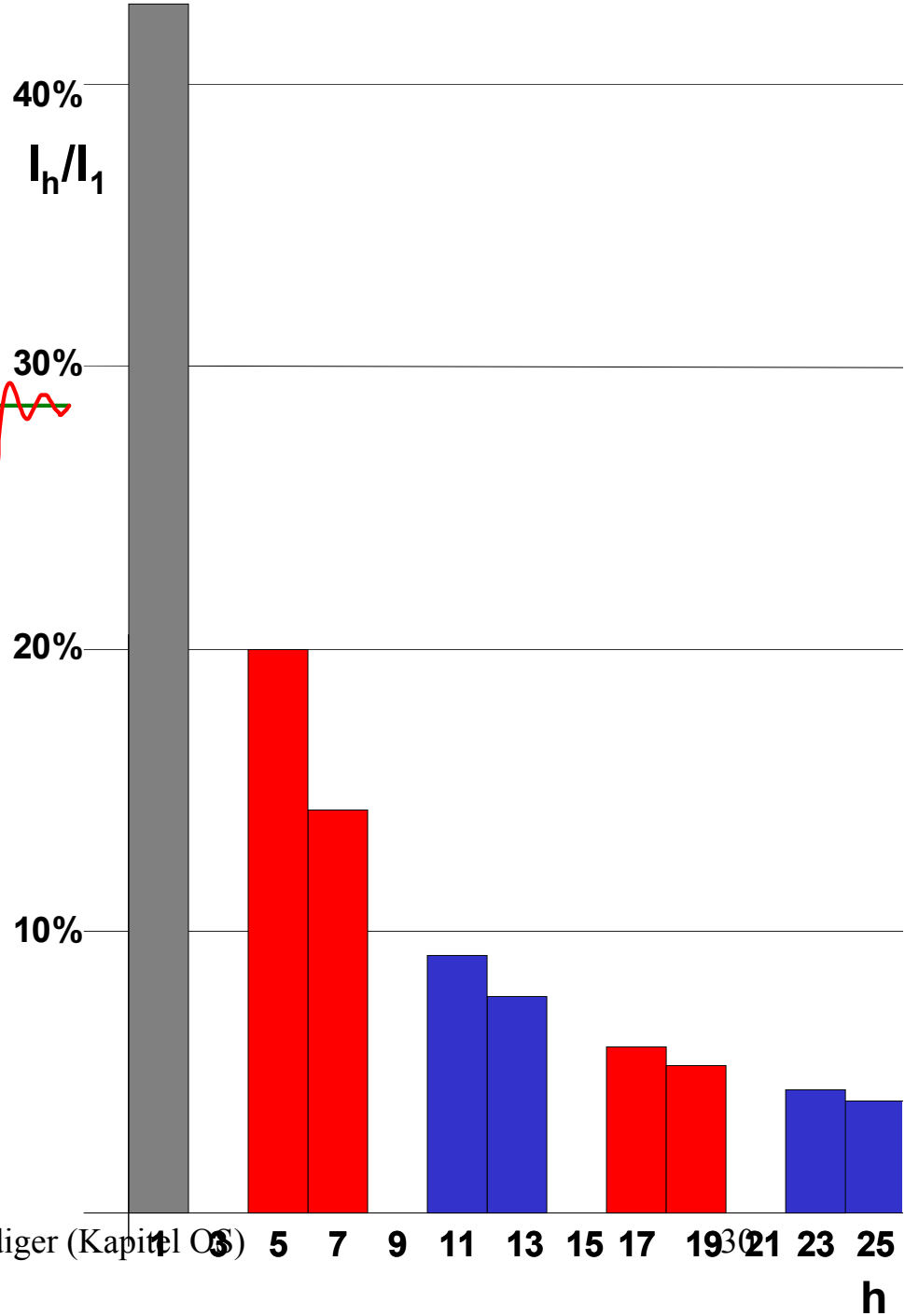
Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)



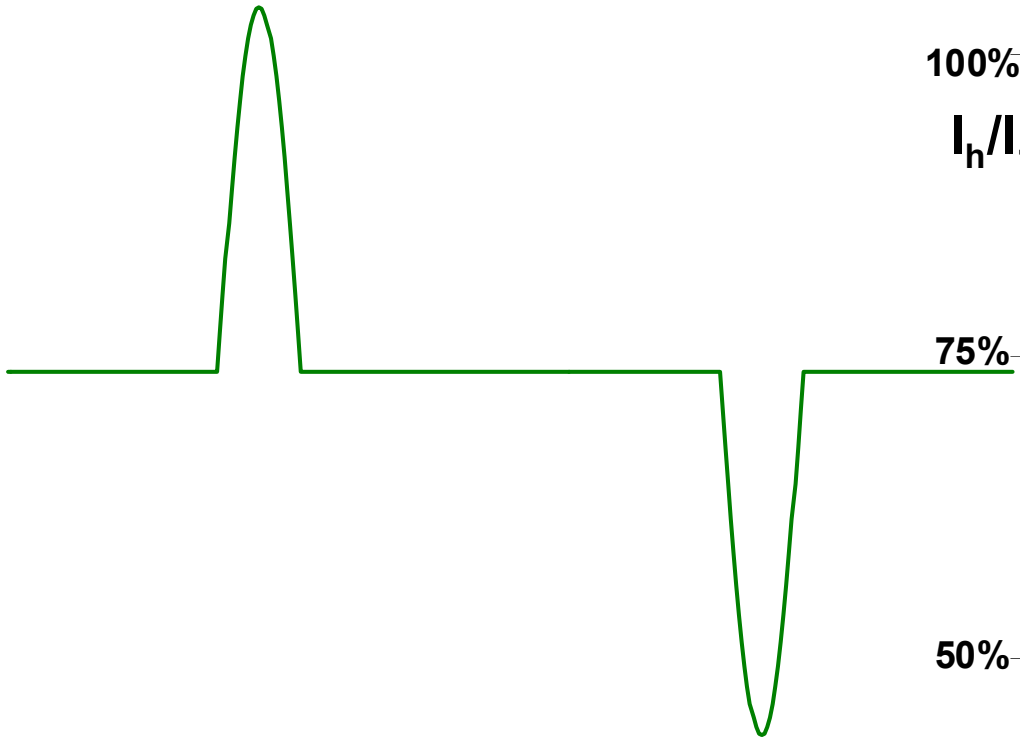


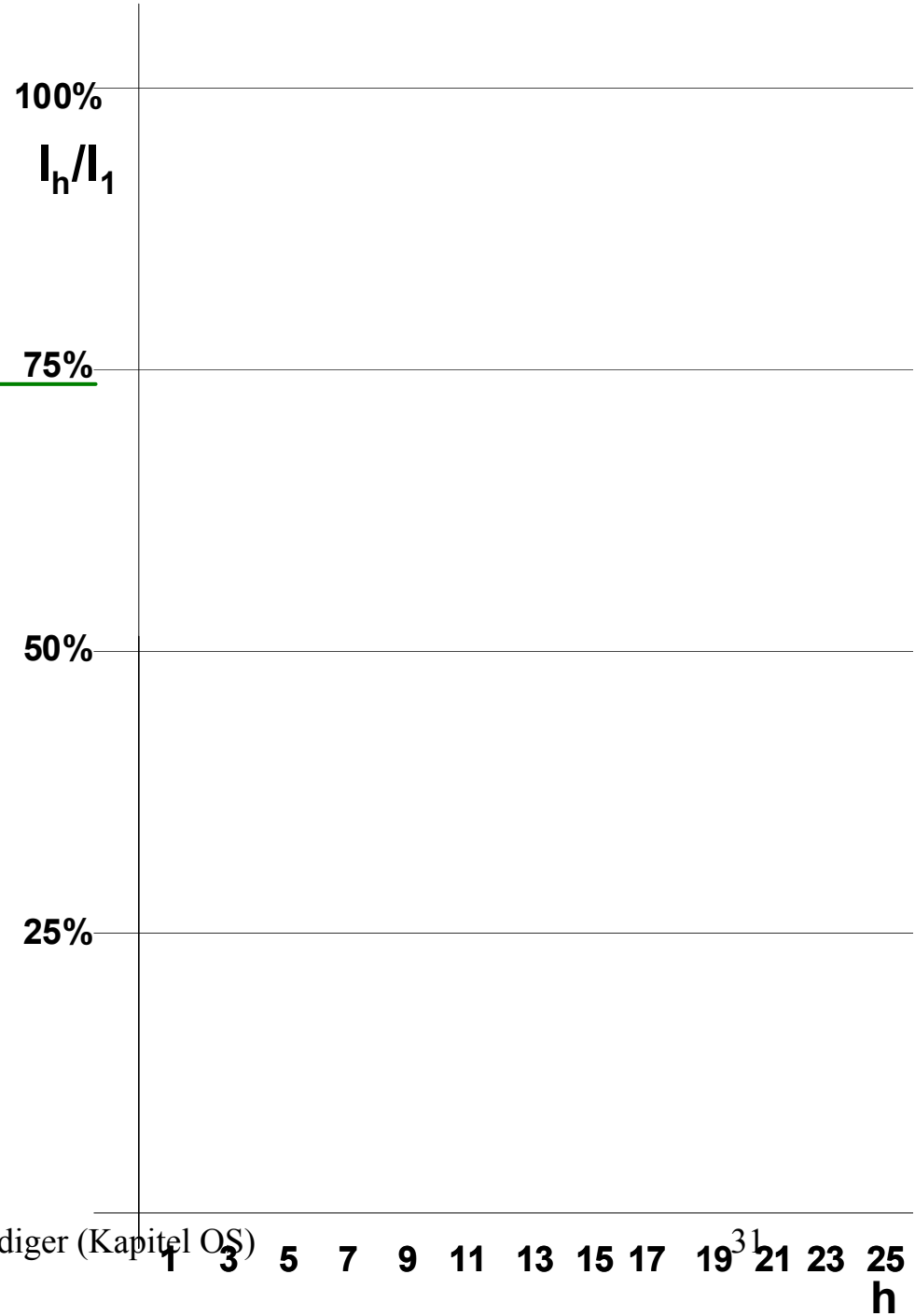
Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)



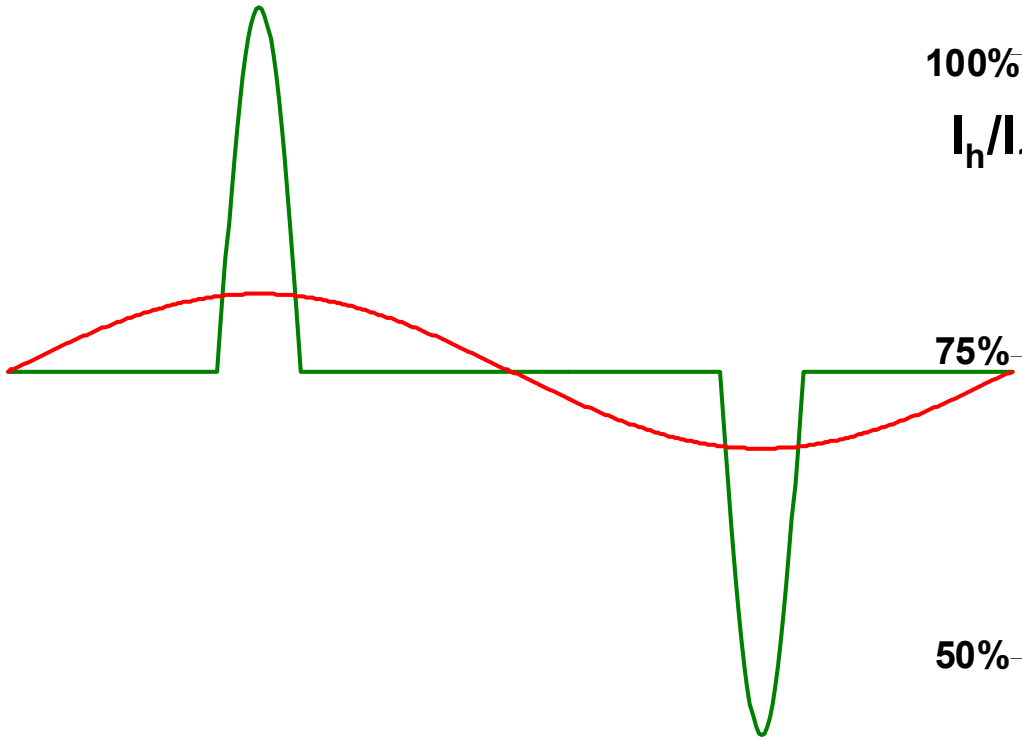


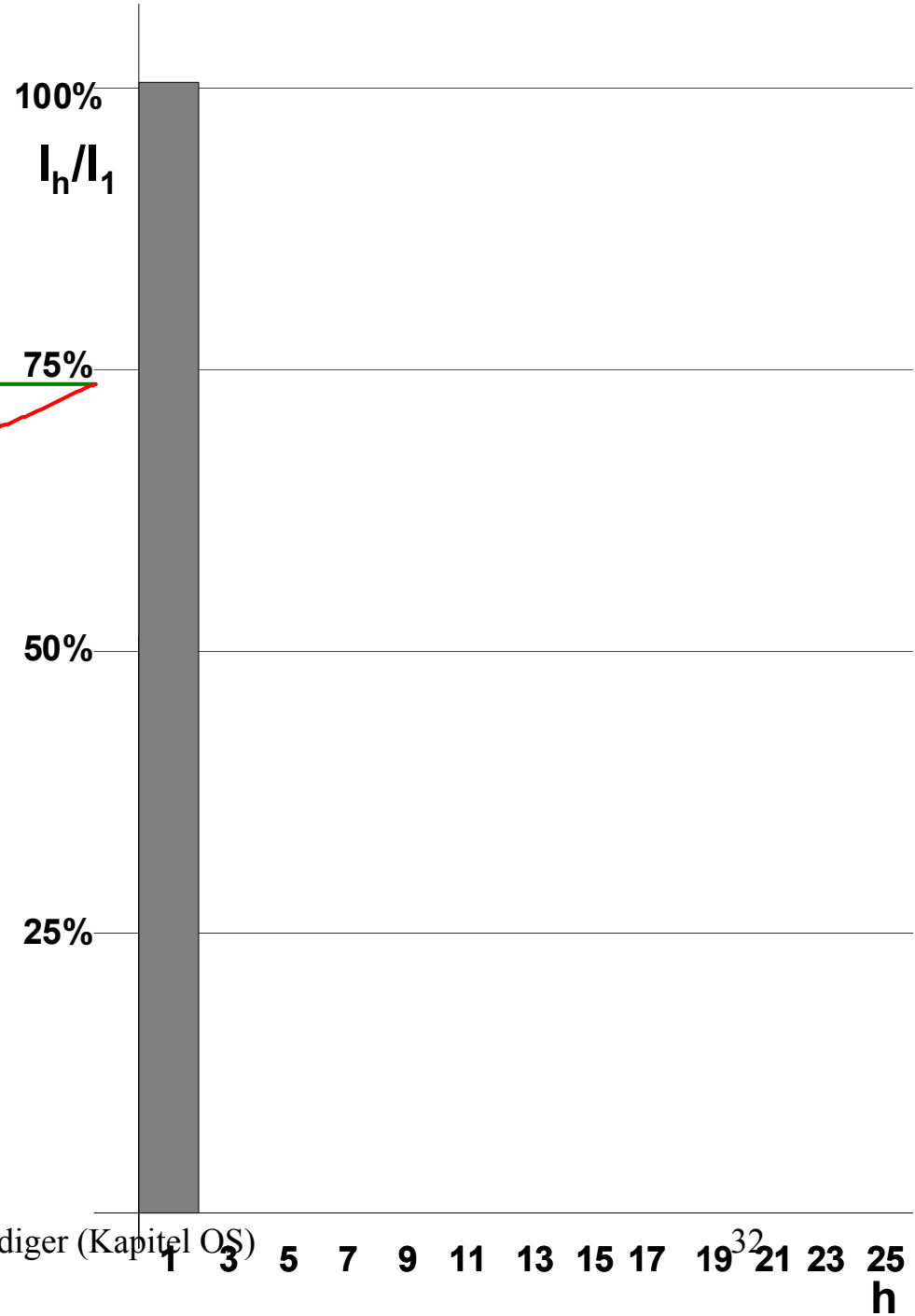
Oberschwingungs-spektrum eines I-Umrichters (Modell)



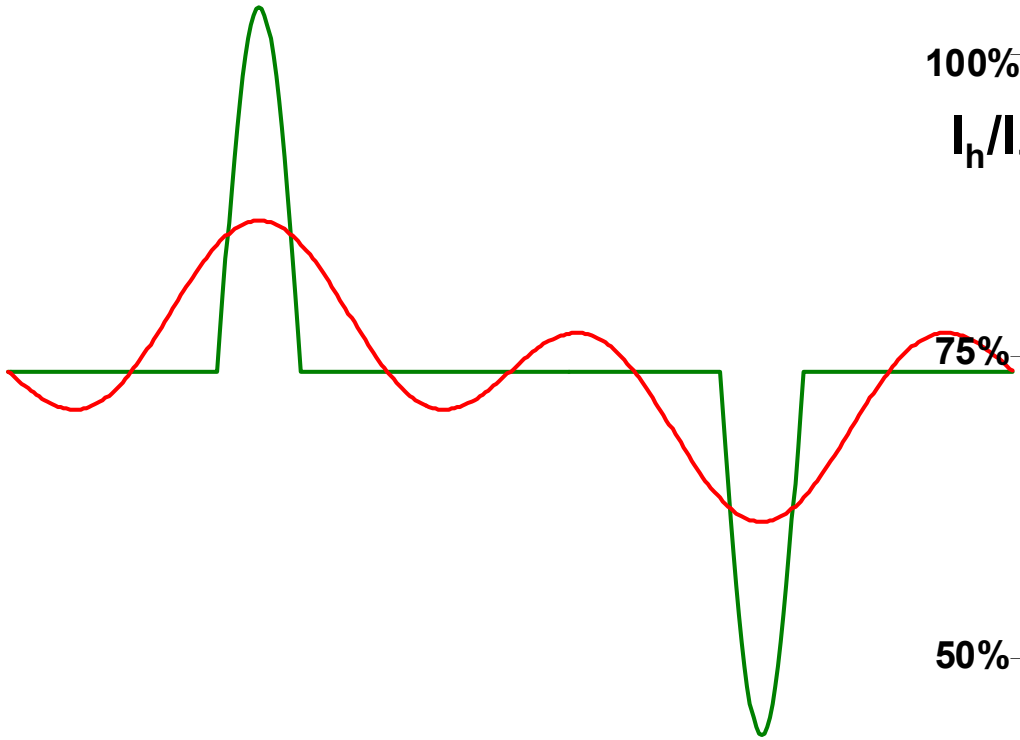


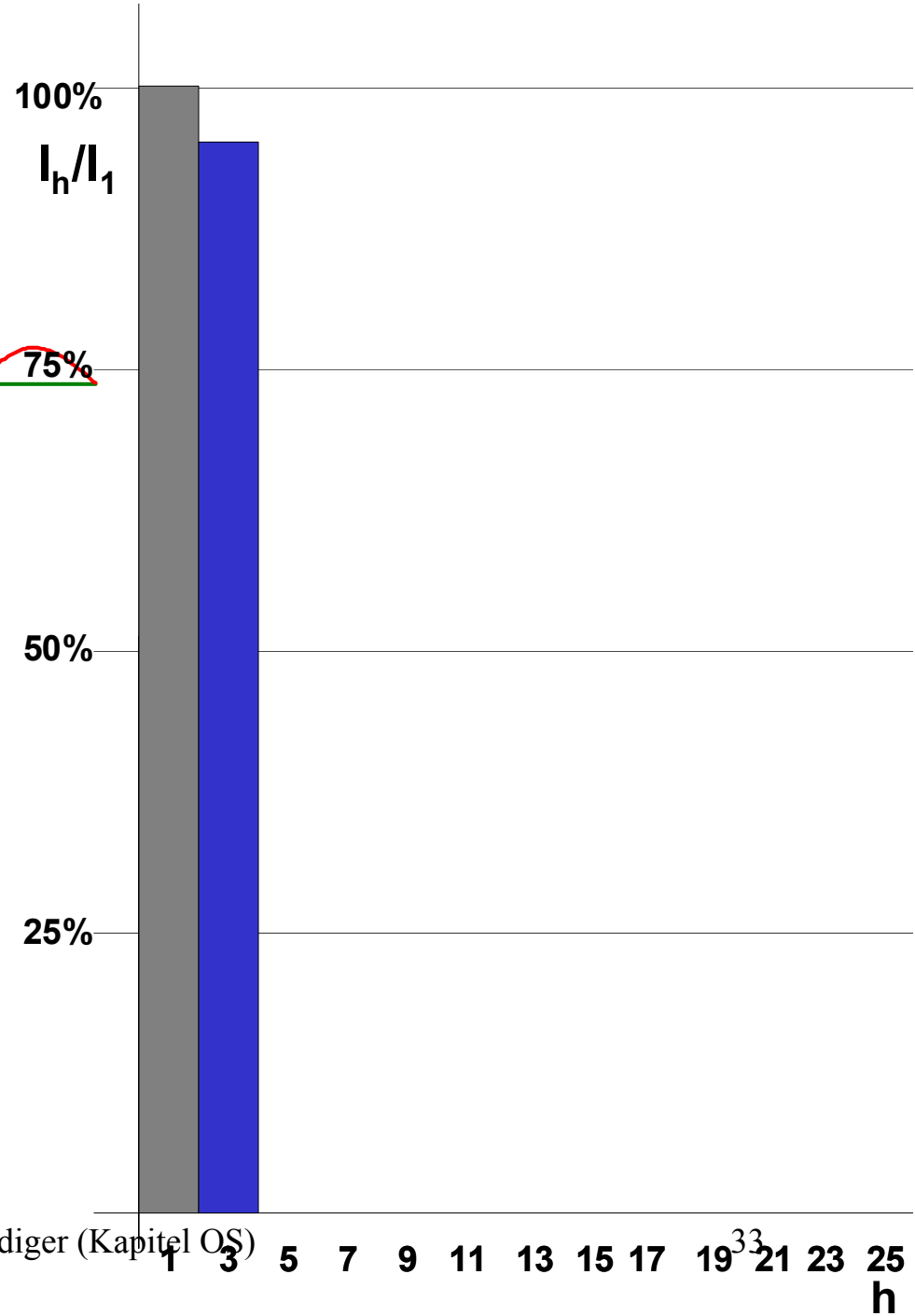
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



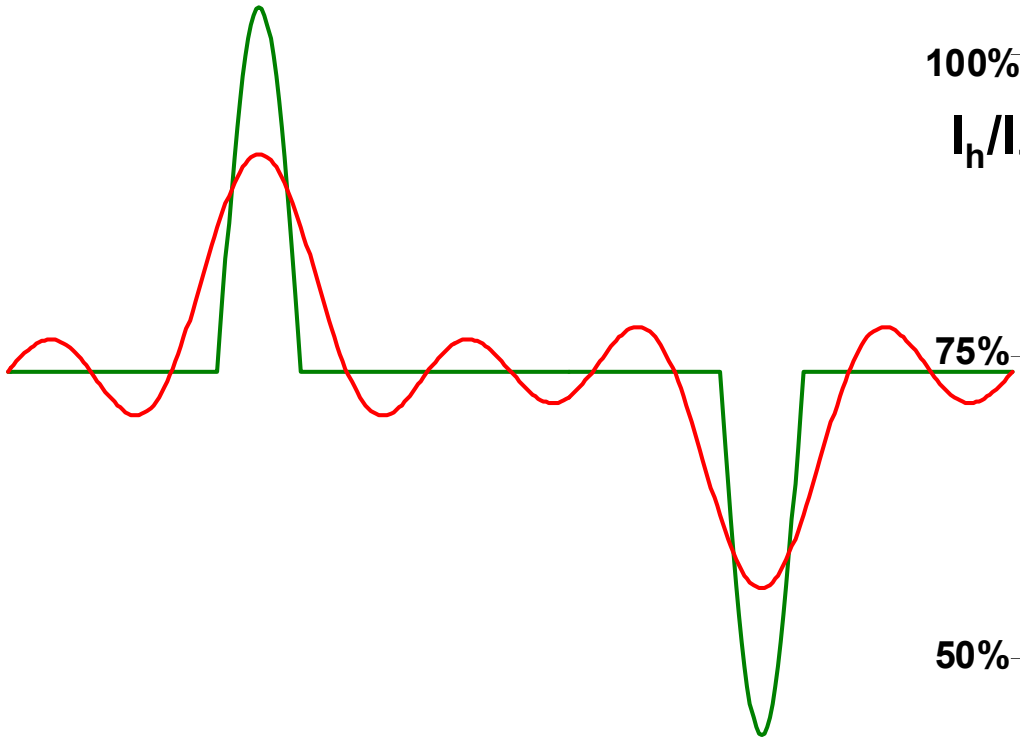


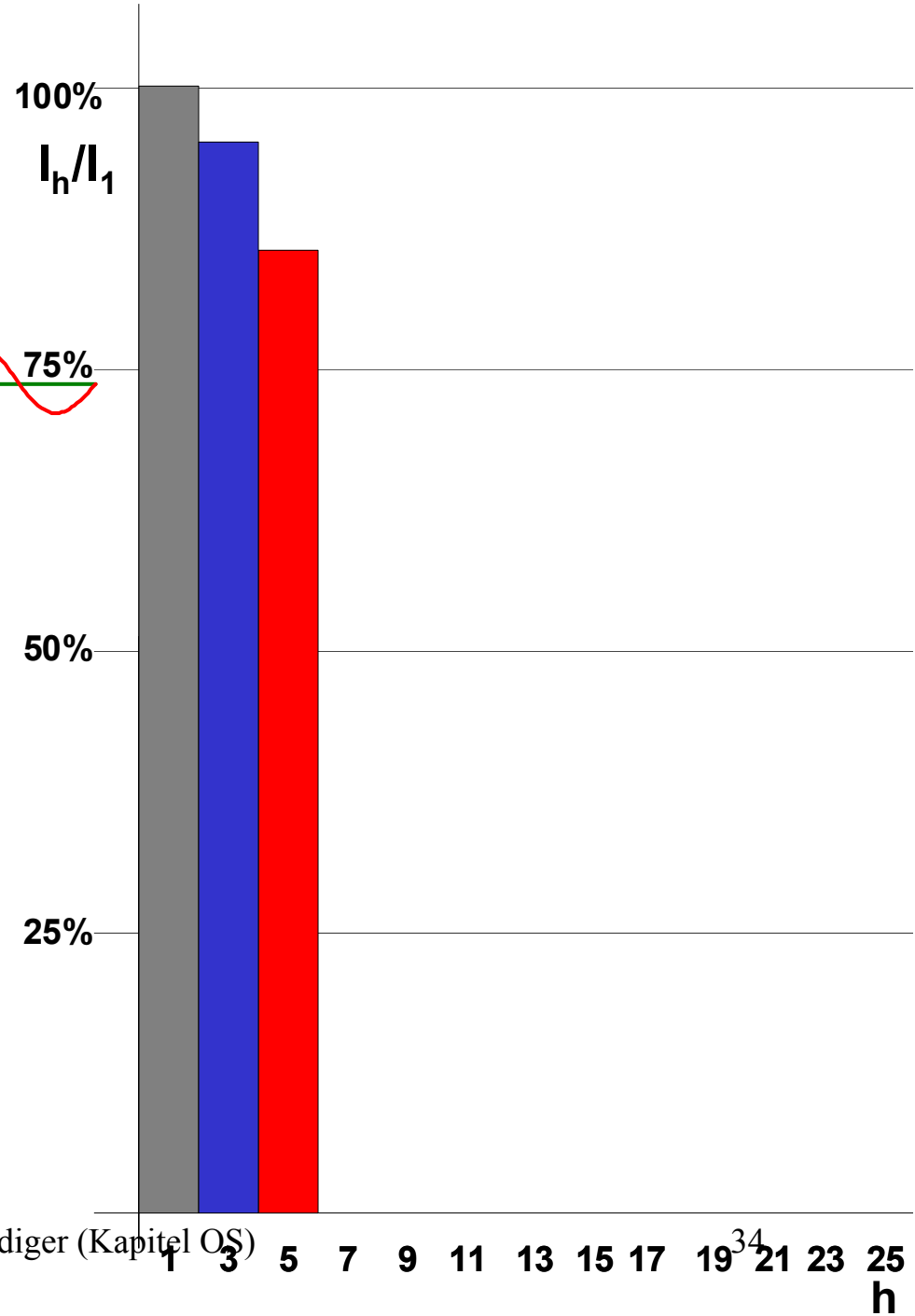
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



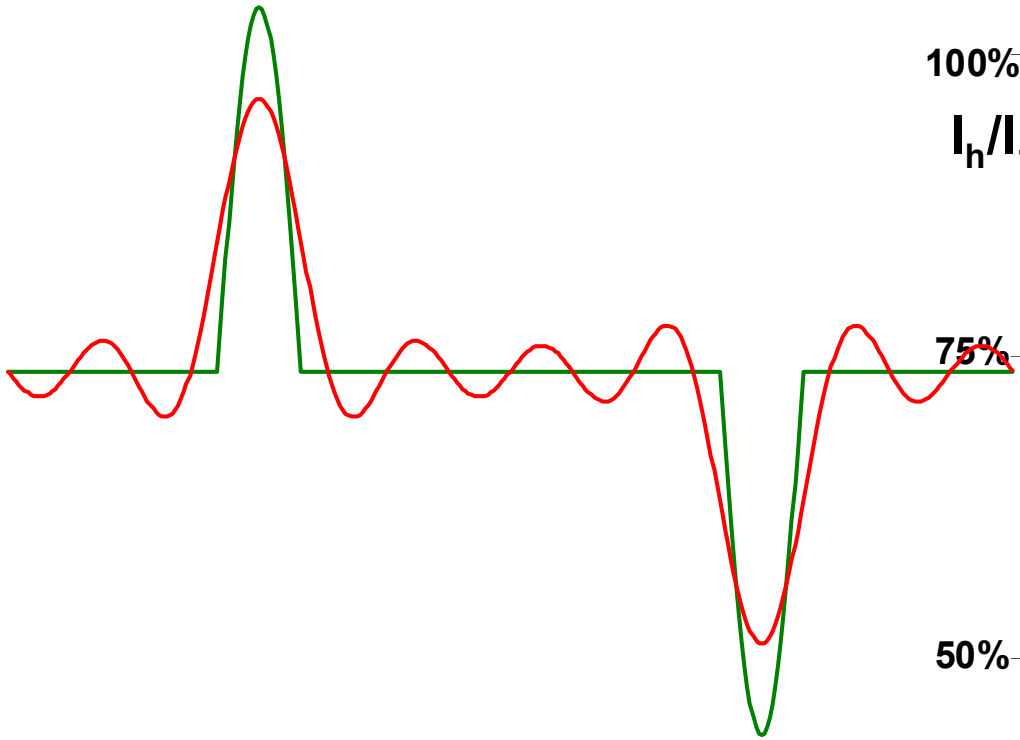


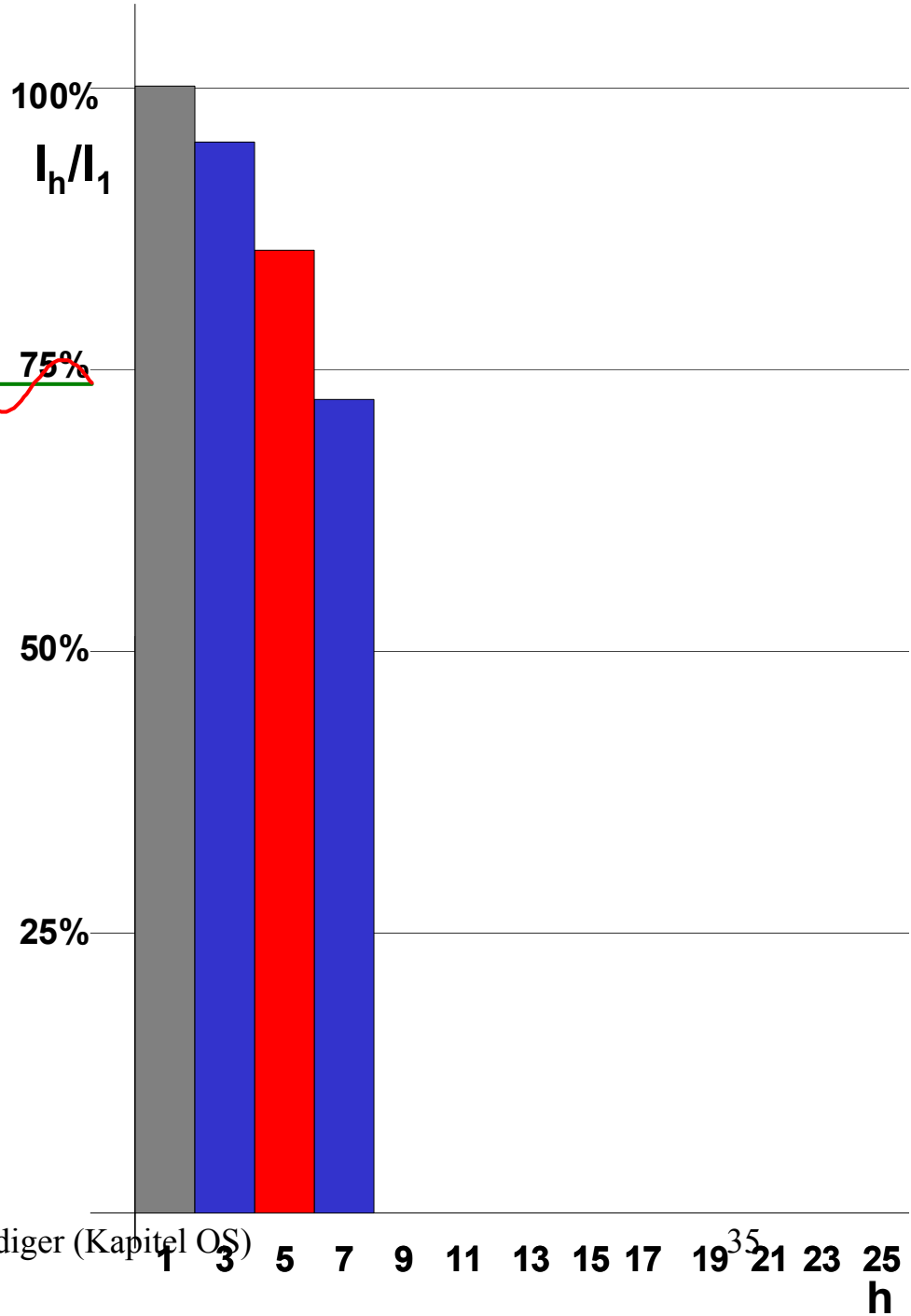
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



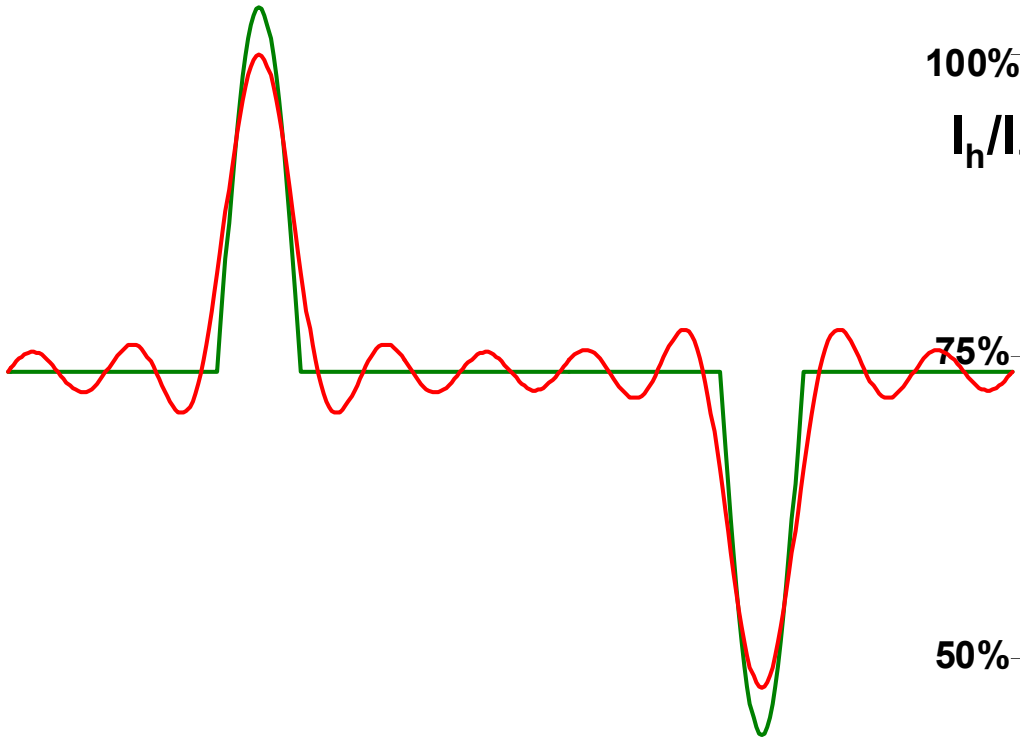


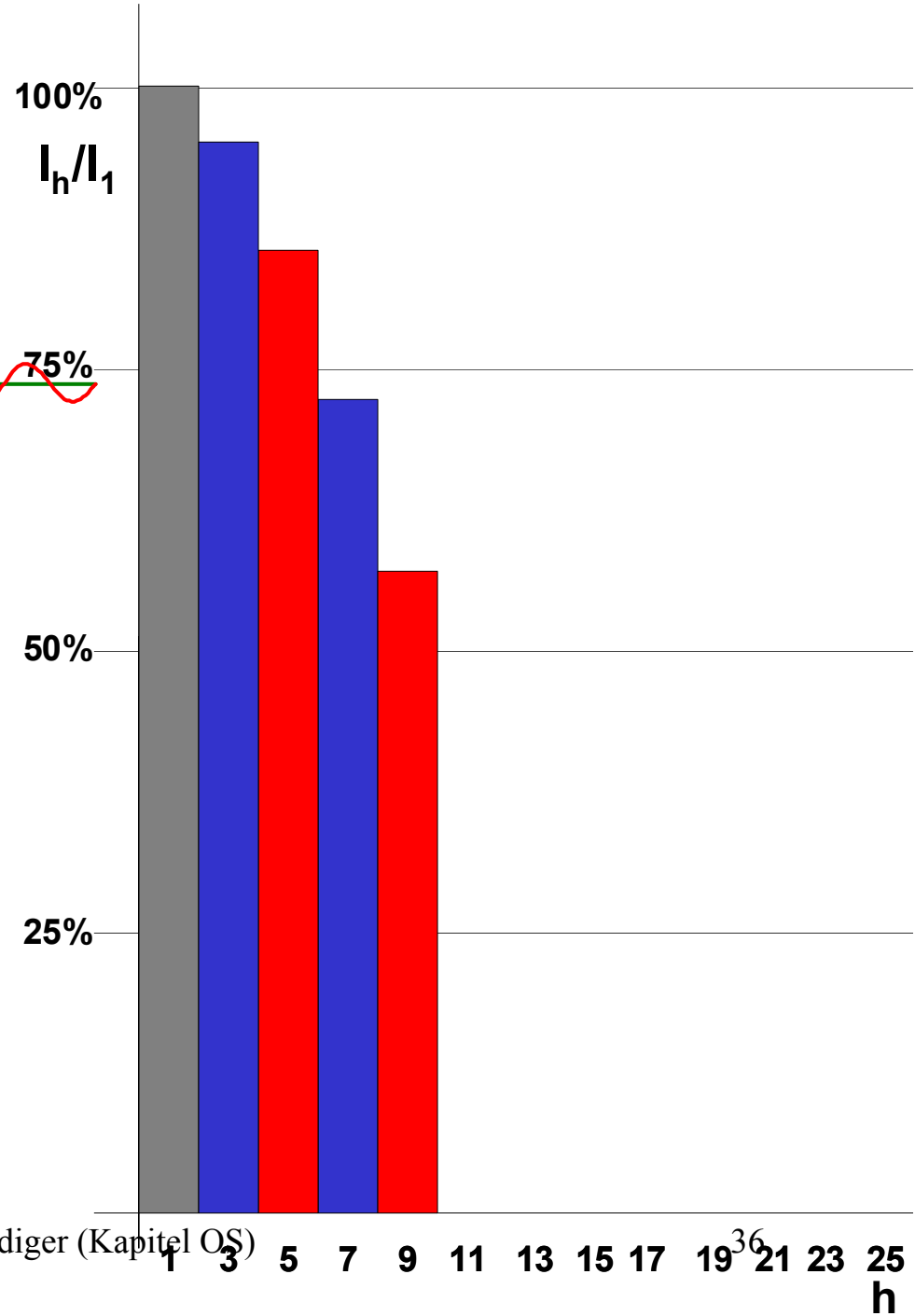
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



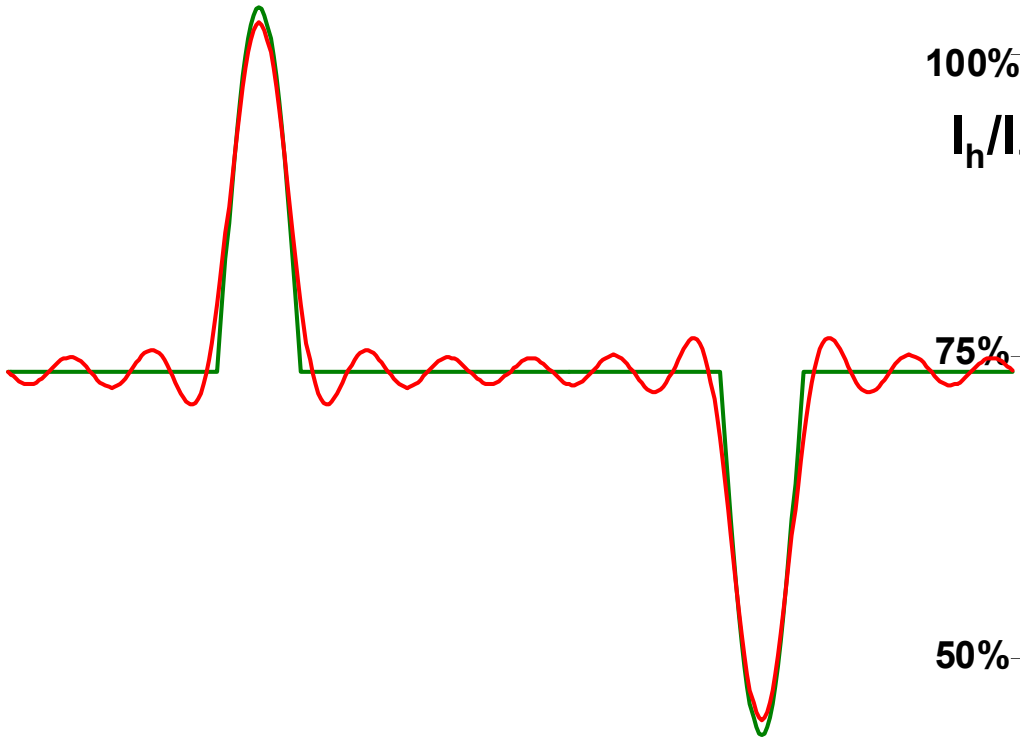


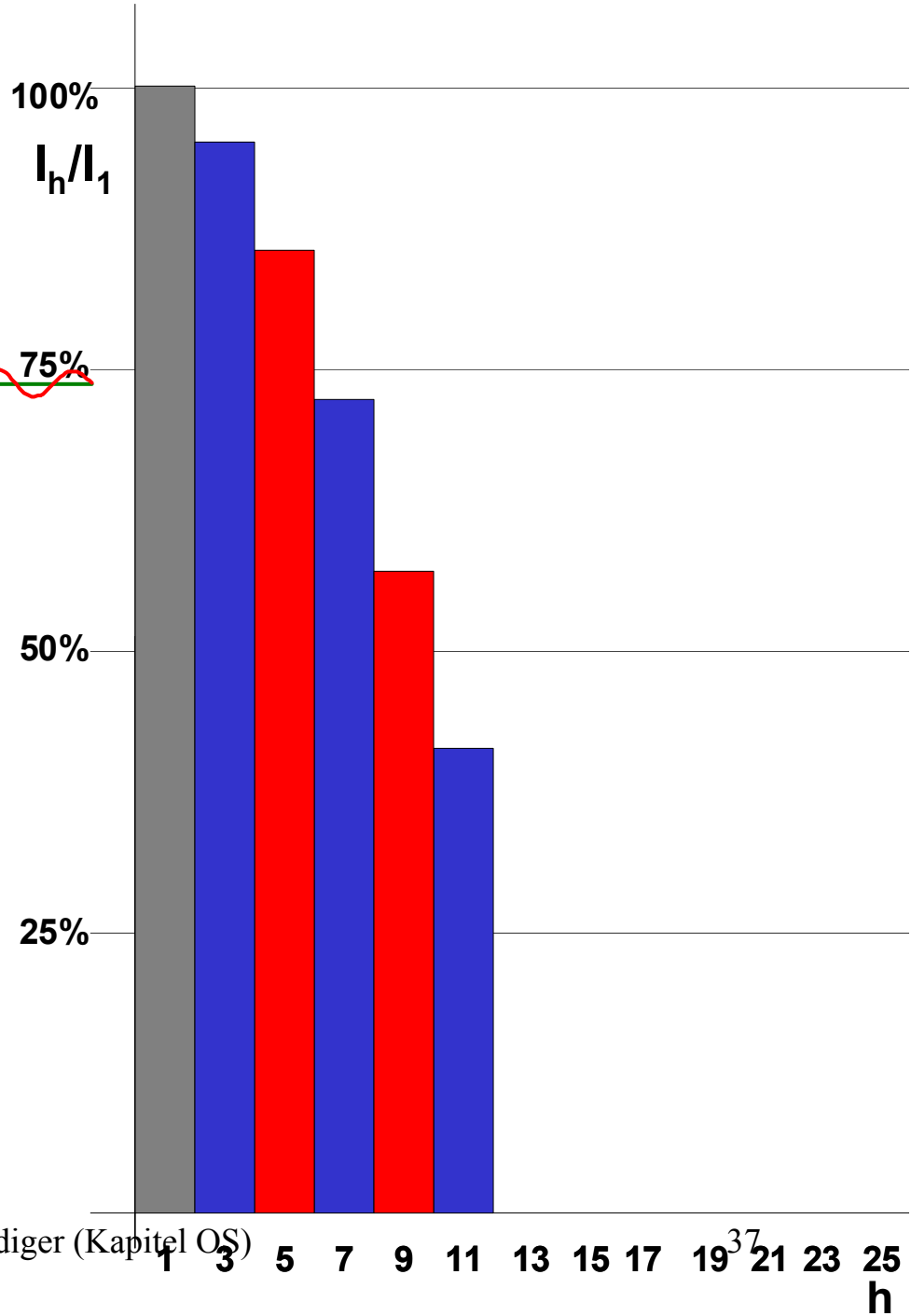
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



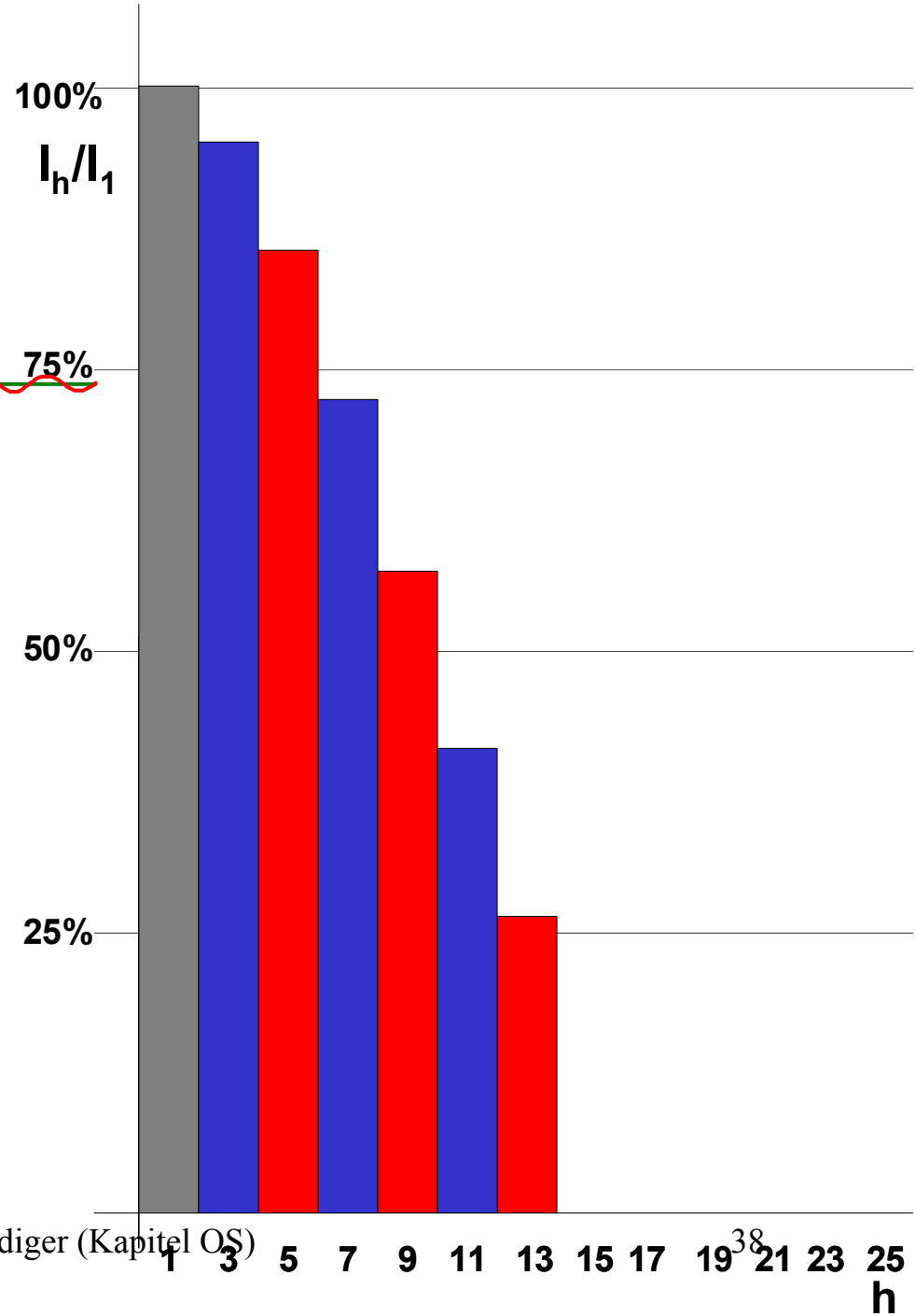


Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)

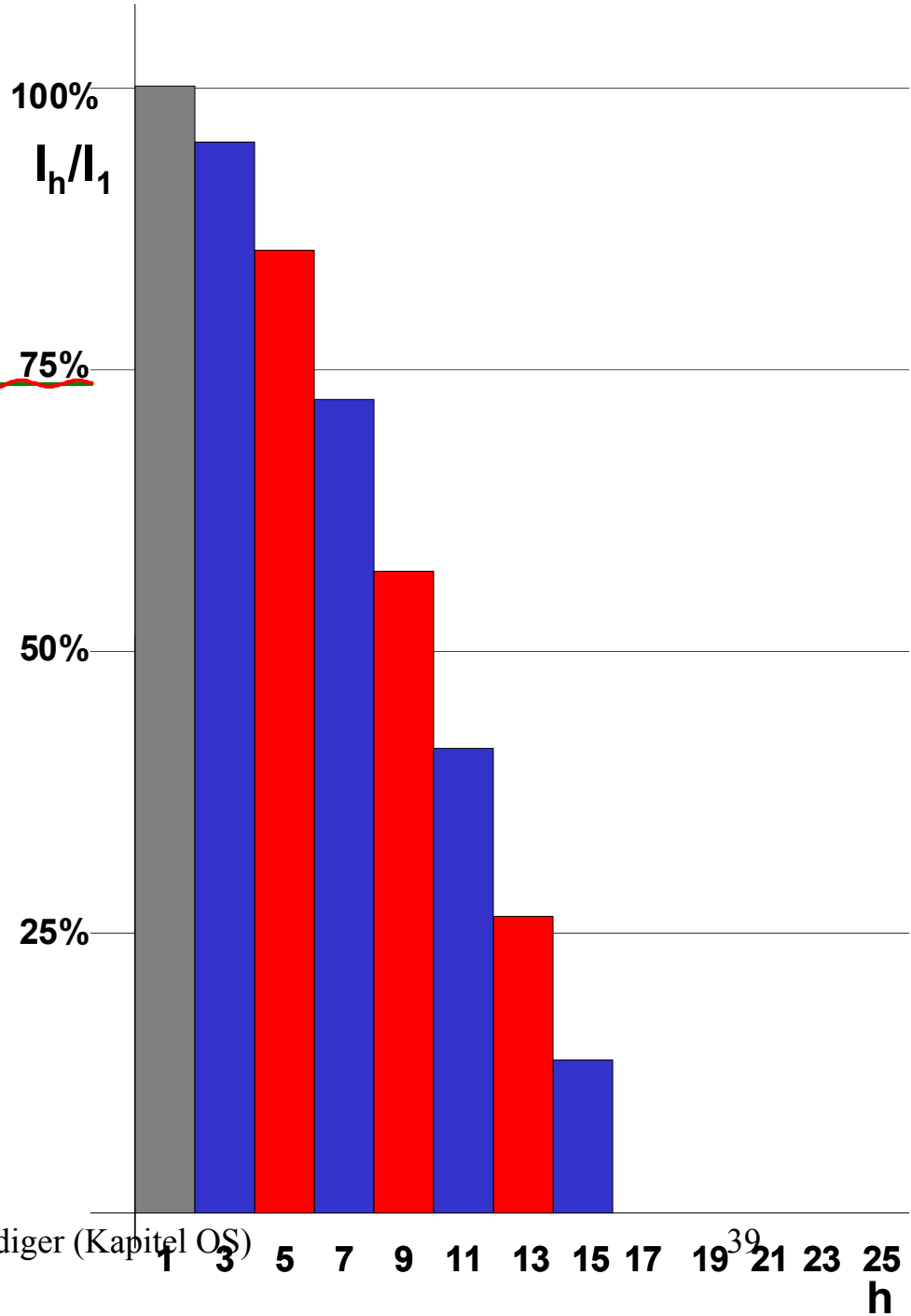




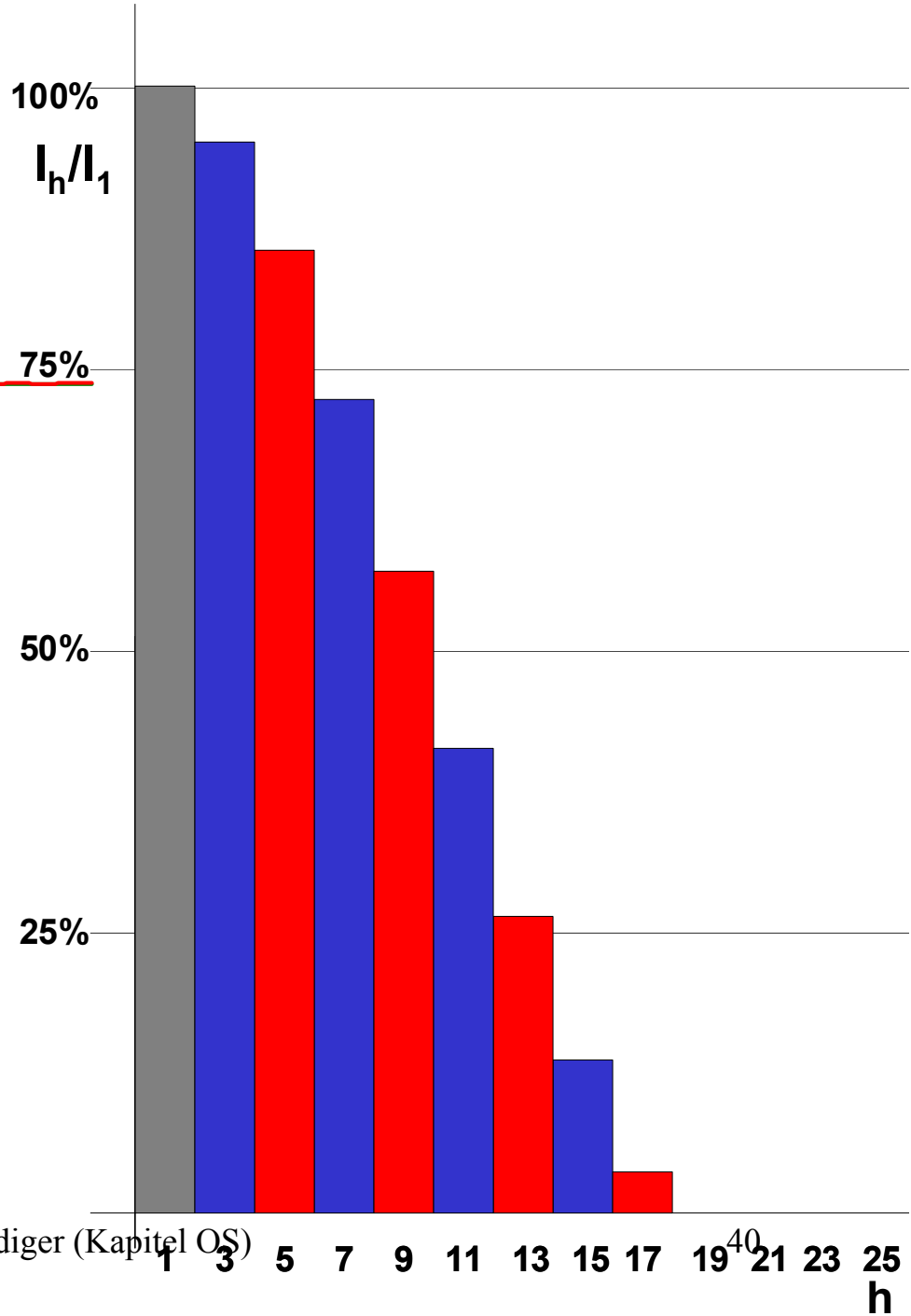
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



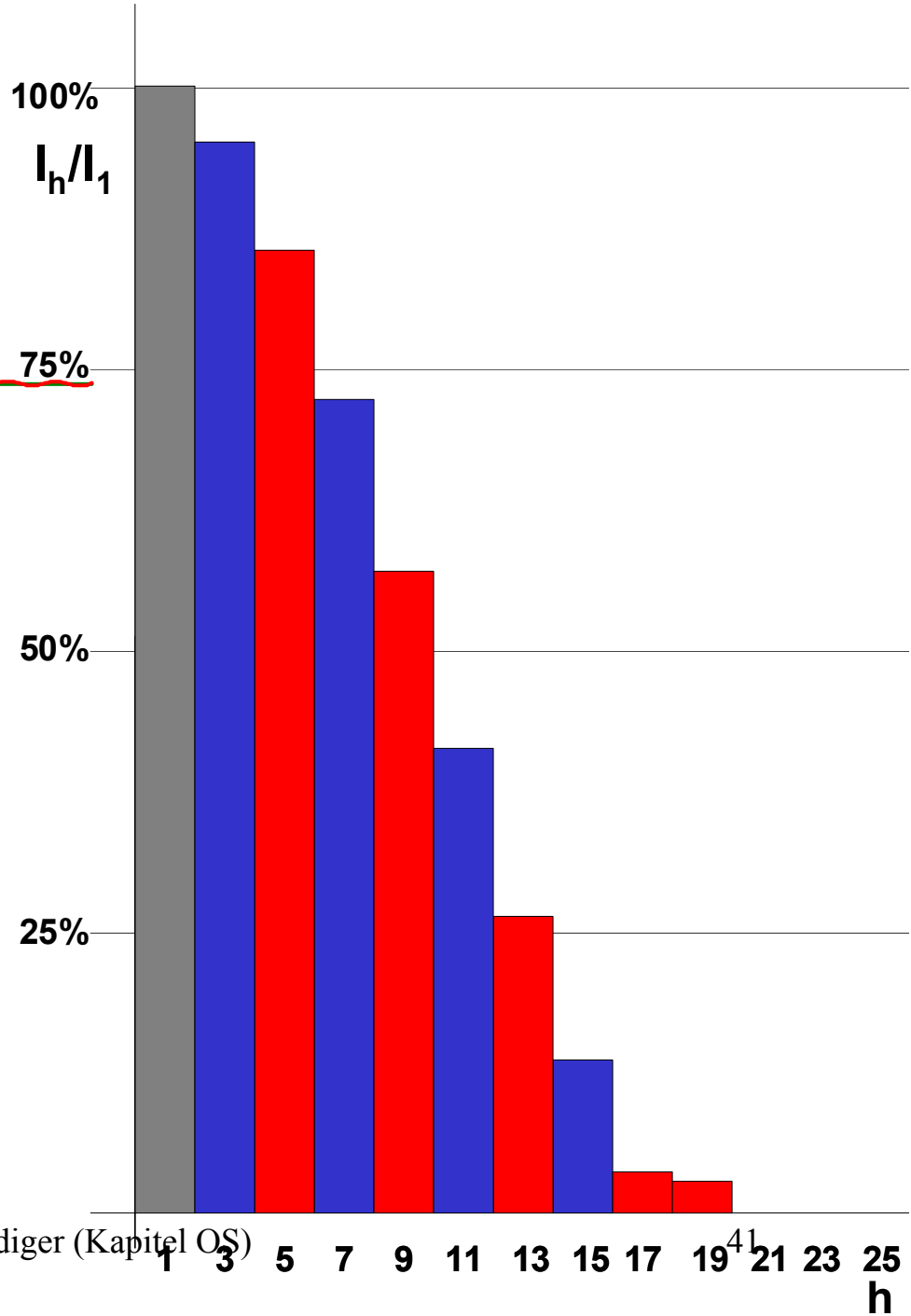
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



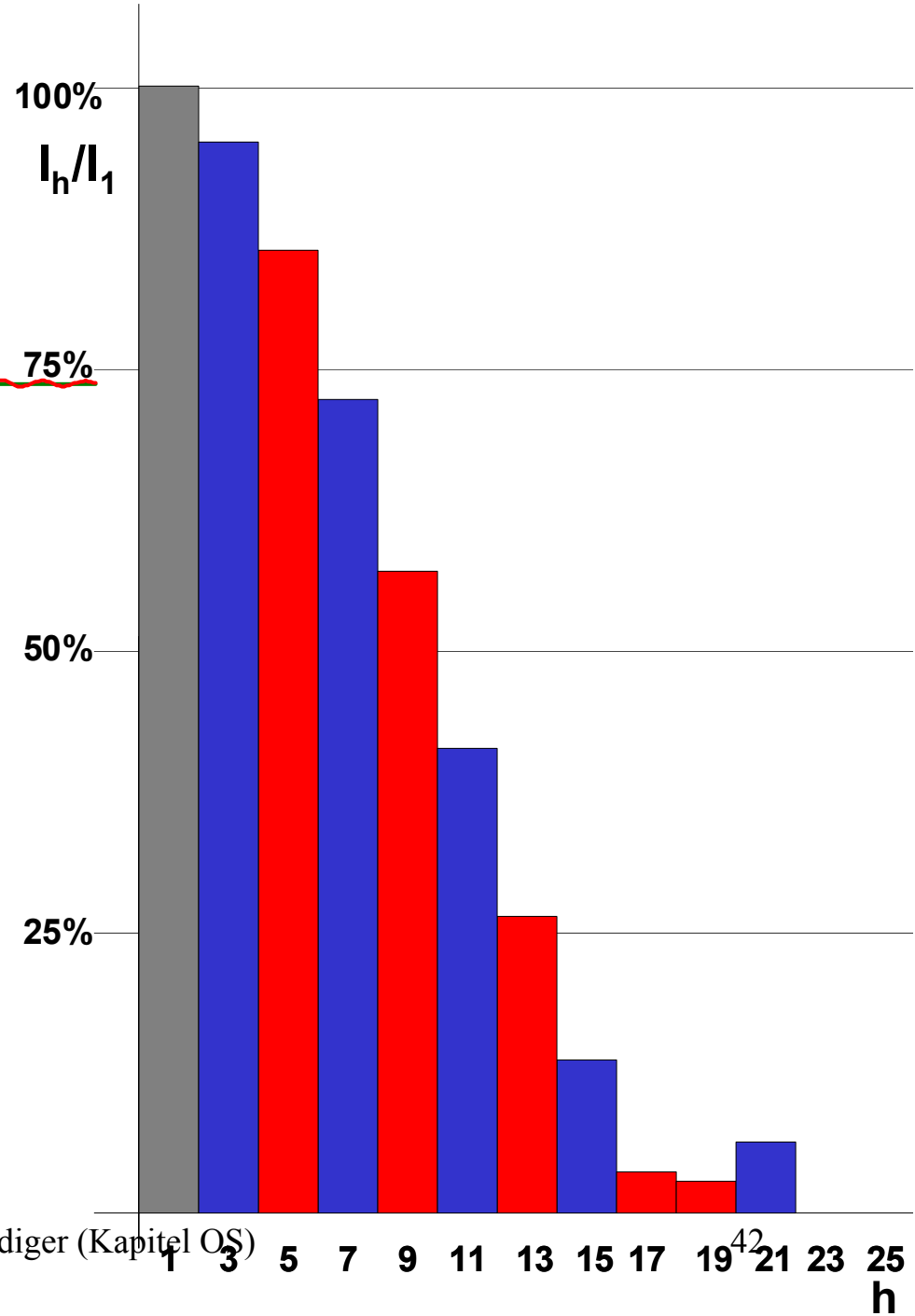
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



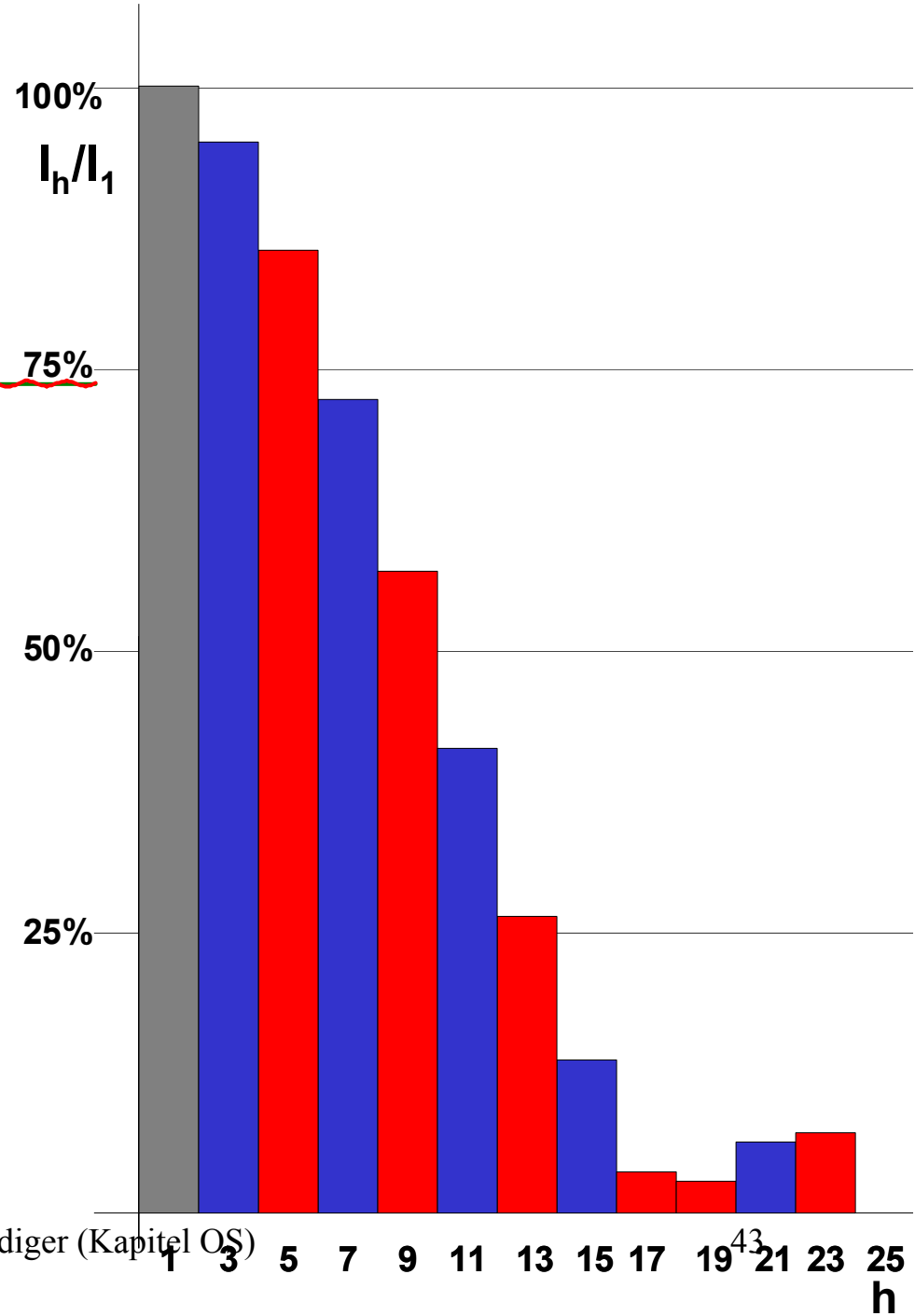
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



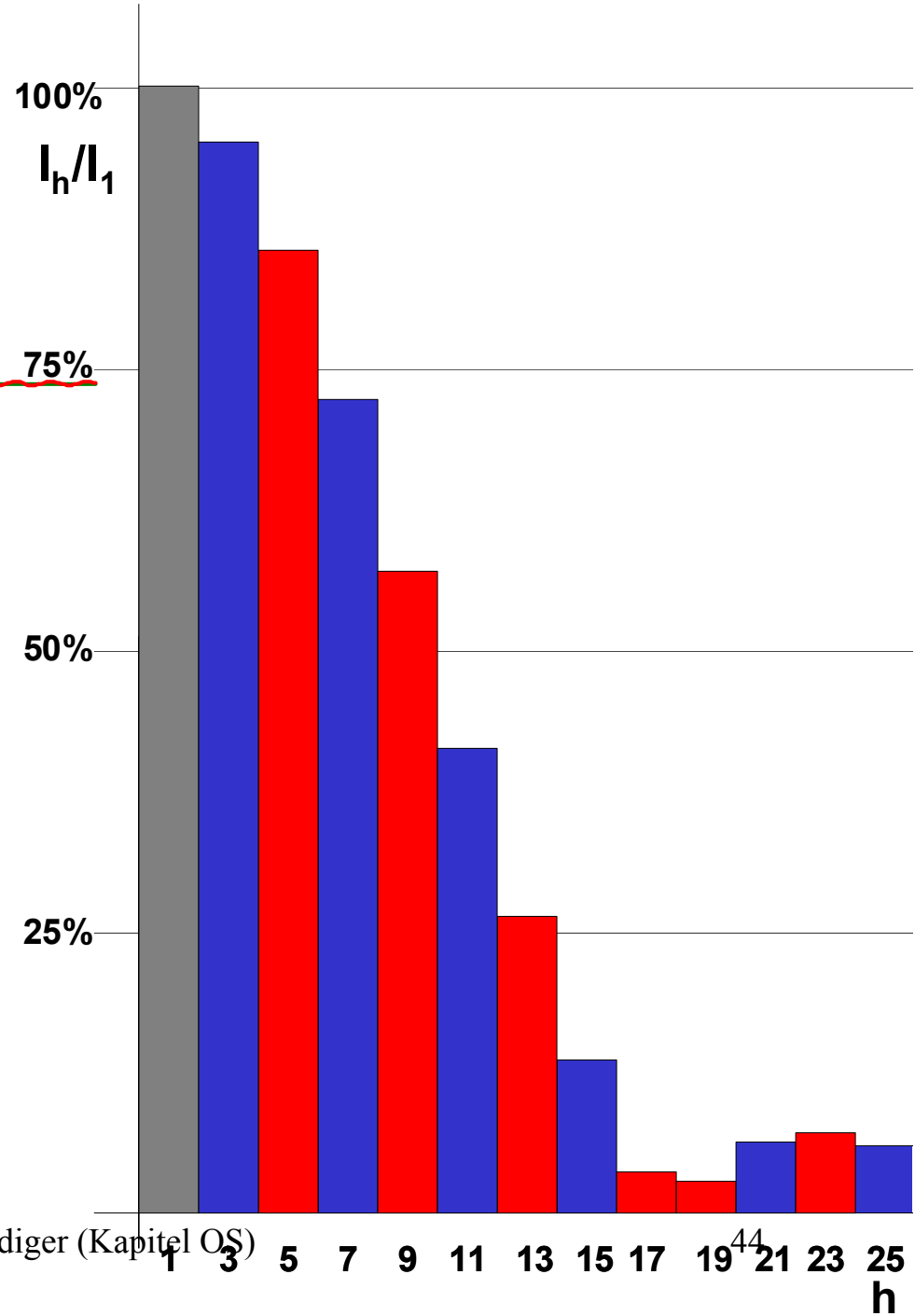
Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)



Oberschwingungs-spektrum eines Netzteiles (Modell)

Oberschwingungserzeuger

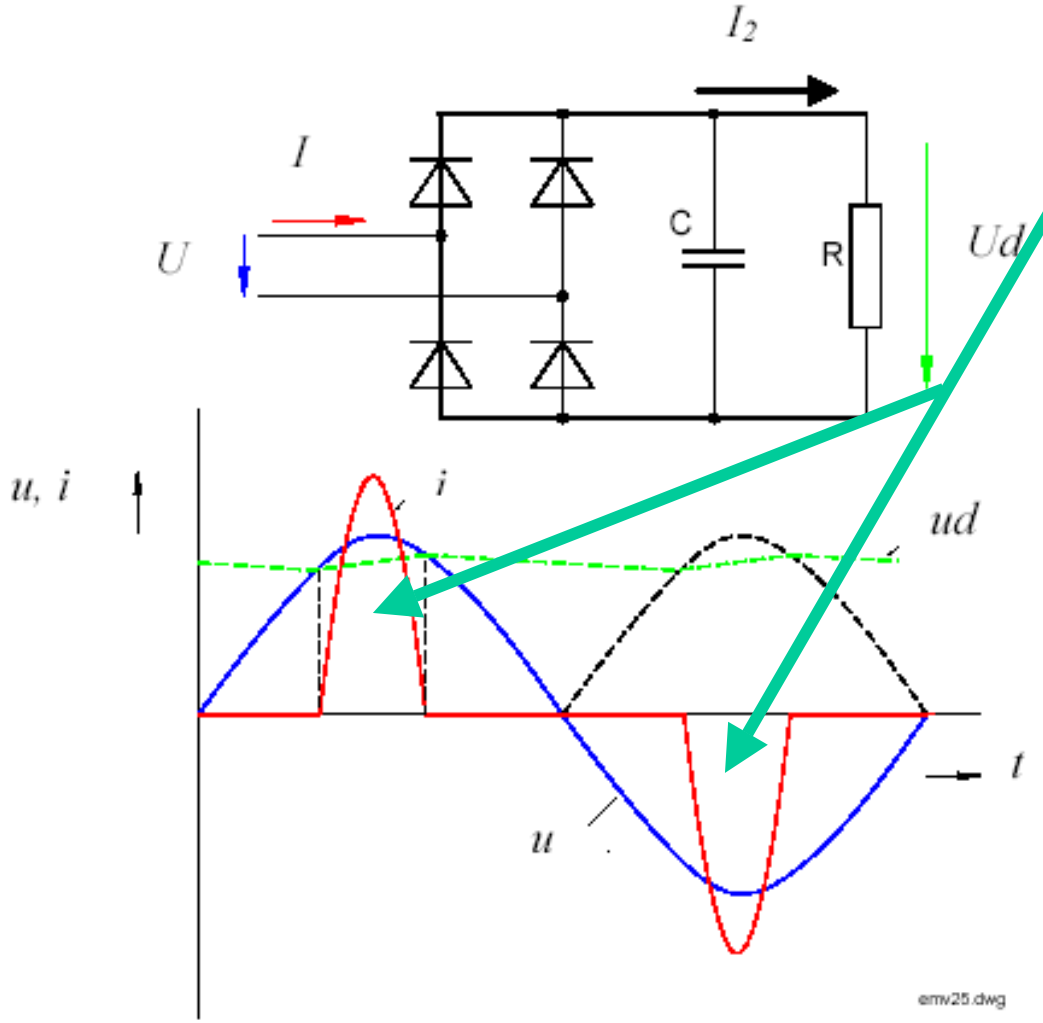
- Stromrichter, Frequenzumrichter, Gleichstromsteller usw.
- EDV-Anlagen mit USV (= unterbrechungsfreier-Stromversorgung),
- sämtliche Verbraucher mit elektronischen Netzteilen wie Computer, Drucker, Kopierer, Geräte der Unterhaltungselektronik, Haushalts-geräte, Elektronische Vorschaltgeräte (EVG) in der Beleuchtungstechnik u.a.

• In den letzten Jahren tritt besonders die 3. harmonische Ober-schwingung hervor, die zum Teil erhebliche Brandgefahren verursachen kann, da sie in Summe den Neutralleiter überlastet.

• In der Regel ergibt sich als Eingangsschaltung für diese Verbraucher ein zweiphasiges Netzgerät mit kapazitiver Glättung.
<u>Hier tritt die 3. Harmonische sehr intensiv auf.</u>

• 6-pulsige Drehstrombrückenschaltungen hier liegt der Anteil an der 3. Harmonischen oft im unkritischen Bereich.

Die Besonderheit der dritten Oberschwingung



Wirkungsweise/Ursache

Prüfung!

- massenhafter Einsatz
- hohen Gleichzeitigkeits-faktors
- Verbrauchern die ihre Spannung zwischen einem Außenleiter und dem N-Leiter abgreifen

Eigenschaft der Oberschwingungen

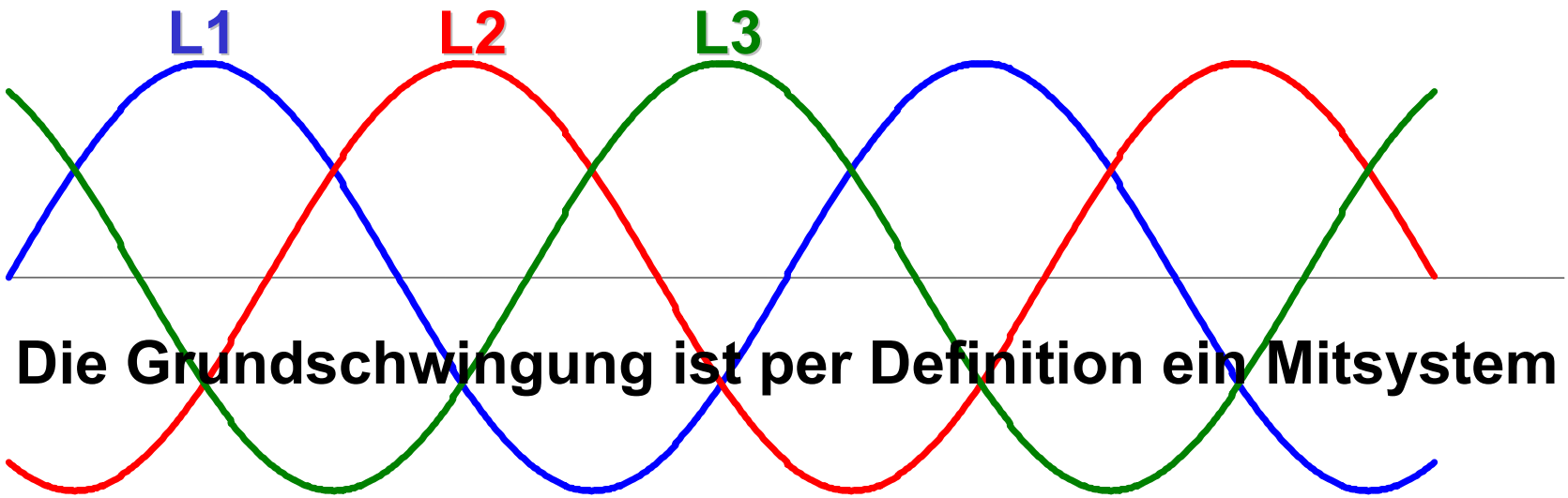
Die Grundschwingungen bilden im Drehstromnetz normalerweise ein rechtsdrehendes Drehfeld, das als Mitsystem definiert wird.

Oberschwingungen bilden im Vergleich dazu:

ebenfalls - Mitsysteme
oder - Gegensysteme
oder - Nullsysteme

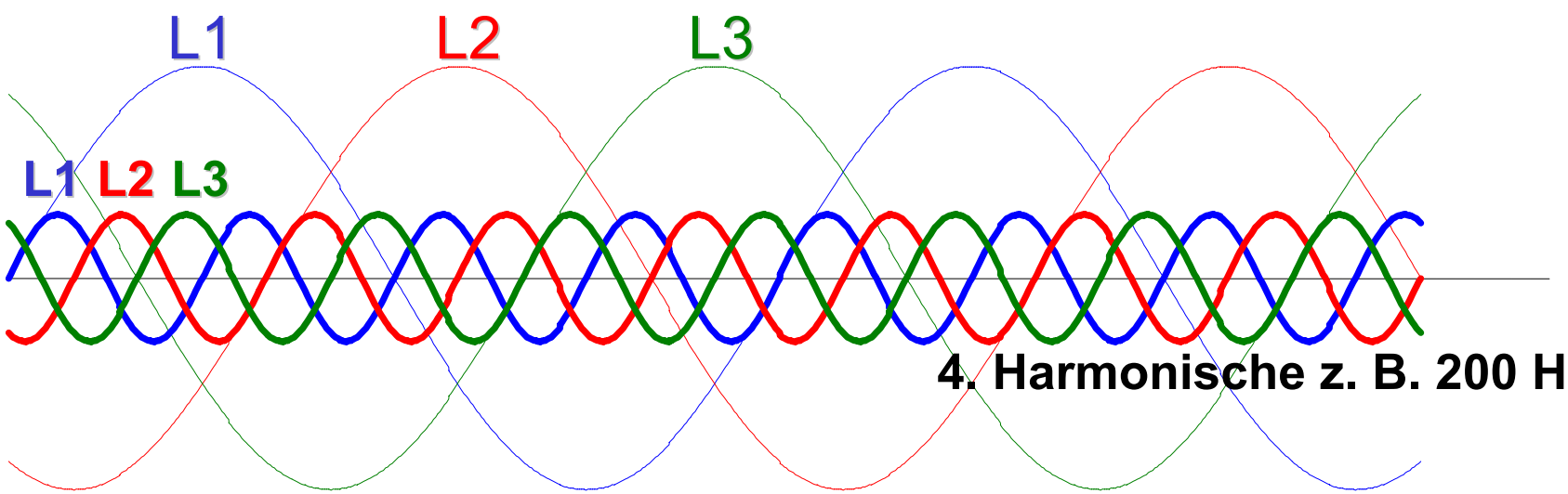
Die Ströme der Mit- und Gegensysteme aller drei Phasen ergeben bei symmetrischen Strömen bzw. symmetrischer Lastverteilung in Summe immer Null, löschen sich also im Sternpunkt aus.

Die Ströme der Nullsysteme hingegen addieren sich, sie fließen daher als arithmetische Summe über den Neutral-leiter zum Erzeuger zurück.

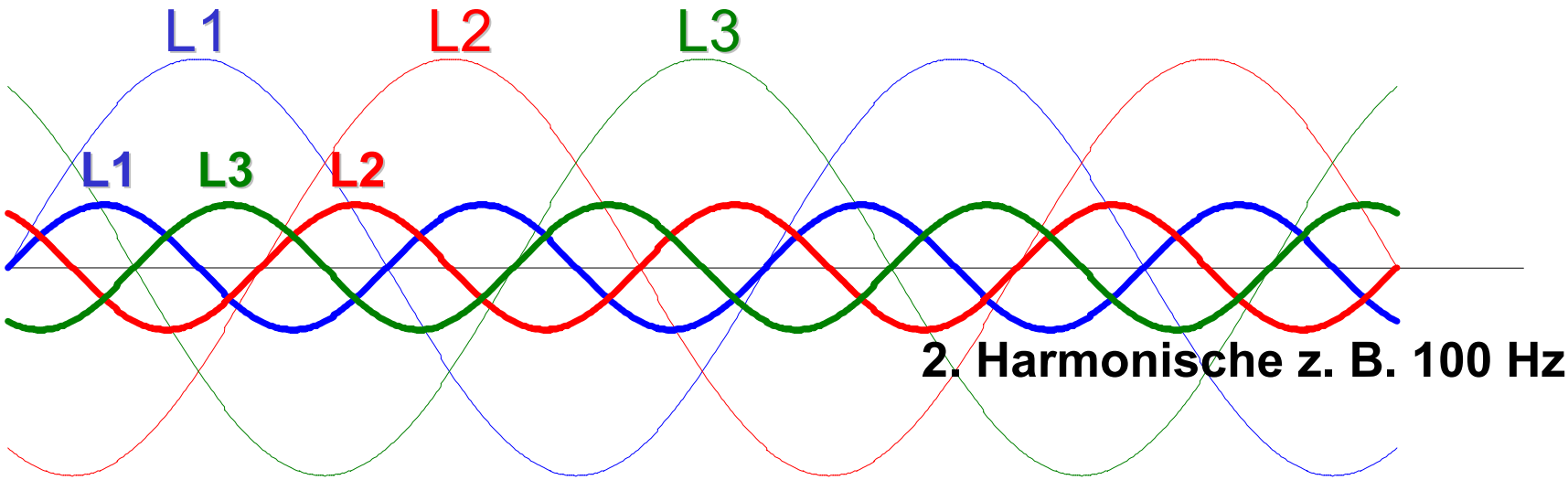


Die Grundschwingung ist per Definition ein Mitsystem

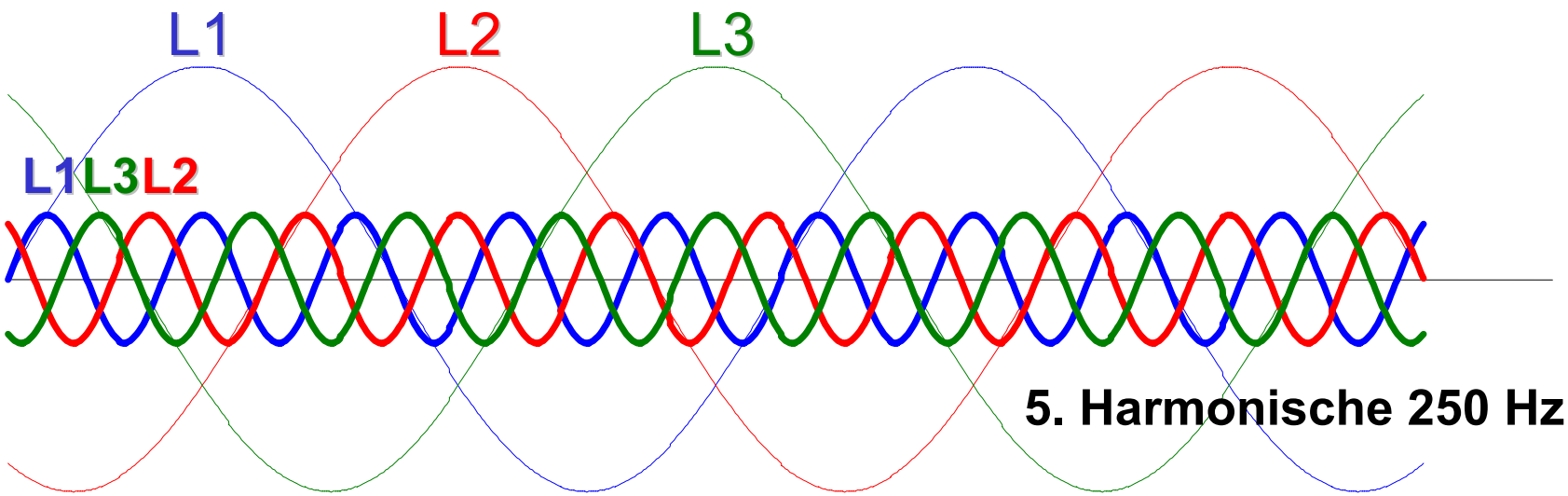
Mitsysteme 1., 4., 7. usw. **(rechtes Drehfeld)** f_N

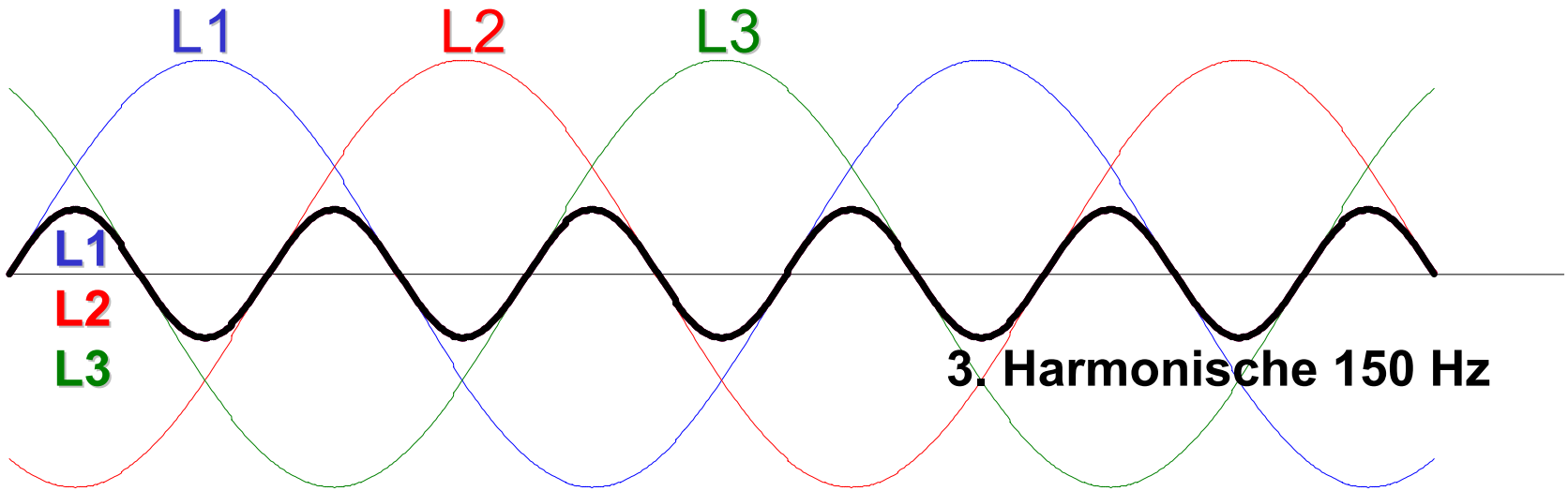


4. Harmonische z. B. 200 Hz

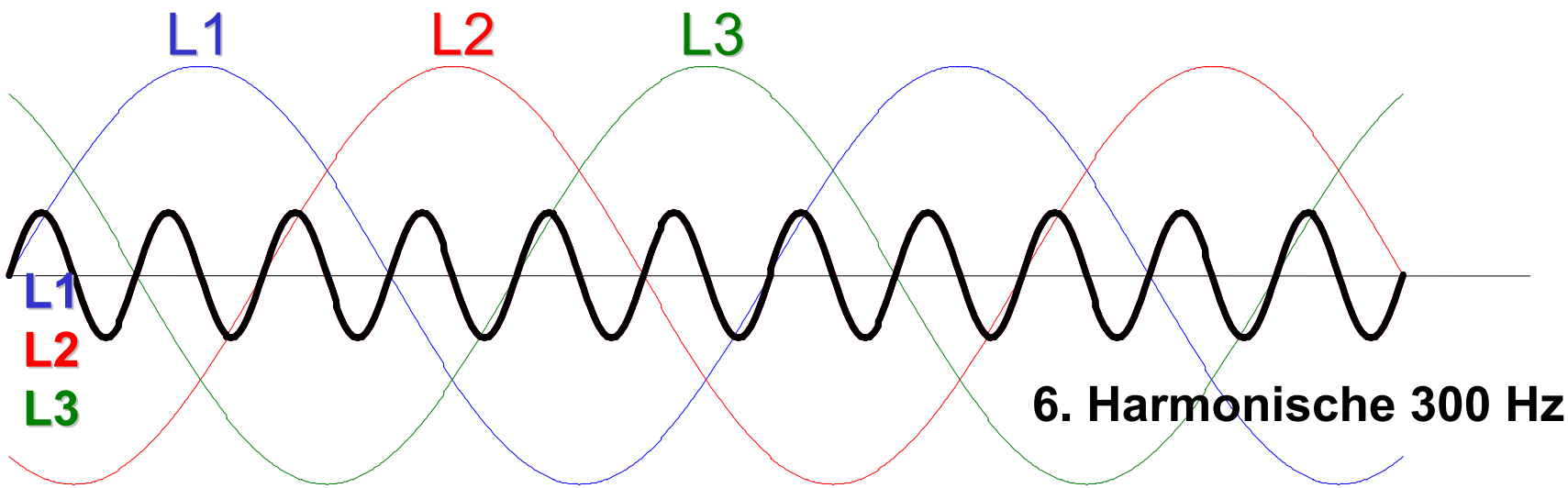


Gegensysteme 2., 5., 8 usw. **(linkes Drehfeld)** f_N





Nullsysteme 3., 6., 9. usw. **(kein Drehfeld)** f_N



Man kann also abzählen:

Grundschwingung = Mitsystem

2. Harmonische = Gegensystem

3. Harmonische = Nullsystem usw.

Die Oberschwingungen, die Mit- oder Gegensysteme bilden, heben sich im Sternpunkt bzw. im Neutralleiter auf (wenn sie in den drei Außenleitern gleich groß sind).

Die Oberschwingungen, die ein Nullsystem bilden, addieren sich hingegen im Neutralleiter, da sie <u>phasengleich</u> sind (Bild 8-7). Die Oberschwingung, die hier besonders stark in den Vordergrund tritt, ist die 3. harmonische Oberschwingung.

Blindleistung durch Oberschwingungen

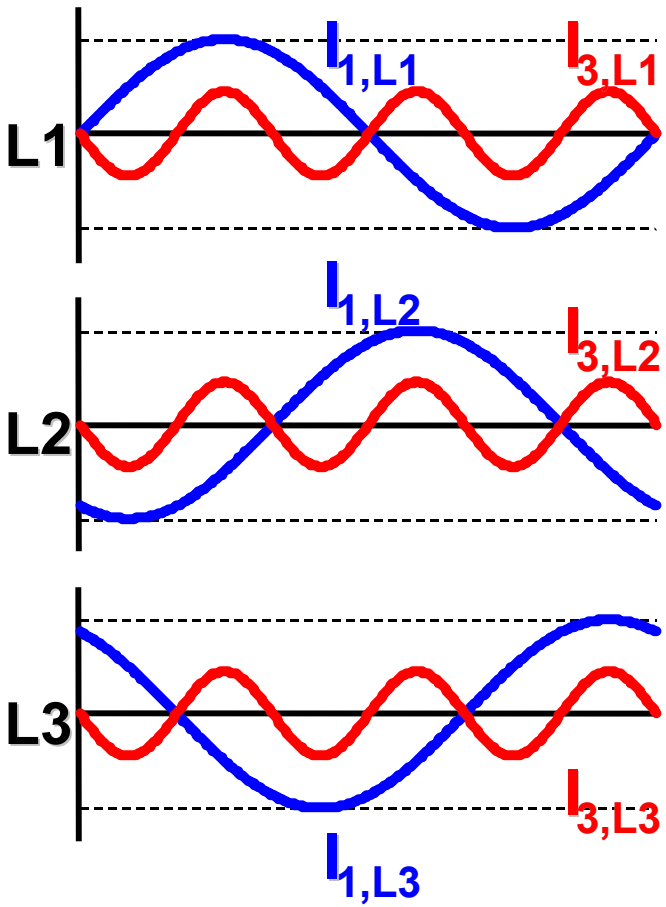
- Oberschwingungsströme haben <u>ähnliche Eigenschaften</u> wie Blindströme.
- Sie erhöhen den Gesamtstrom und damit die Netzbelastung ohne eine Erhöhung der effektiv am Verbraucher wirksamen Leistung zu bewirken (Stichwort: Blindleistung).
- Oberschwingungen verschlechtern also auf alle Fälle den Leistungsfaktor (*cos φ bzw.* **<u>λ</u>**).

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + Q_O^2}$$

Lineare Verbraucher

Oberschwing-ungsblind-leistung

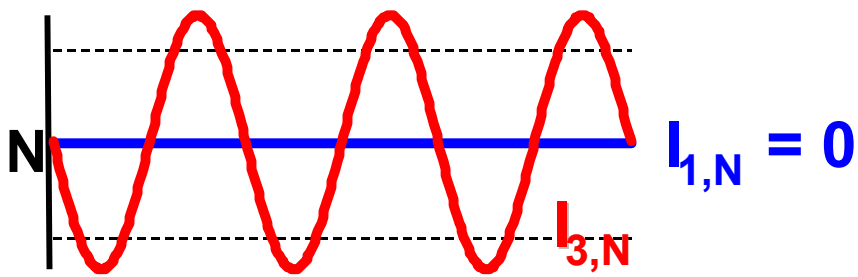
N-Leiterüberlastung und N-Leiterunterbrechung

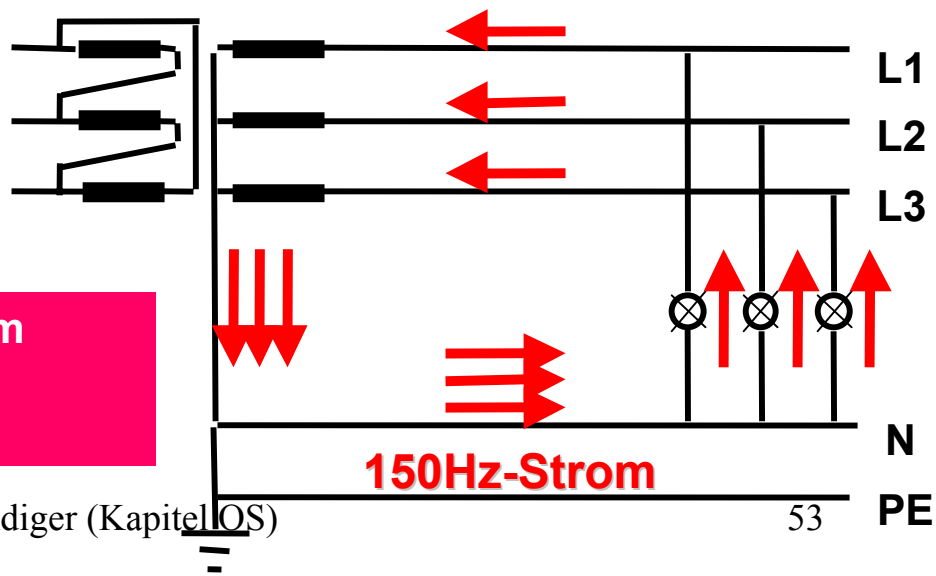


N-Leiterbelastung bei symmetrischer Lastverteilung:

$$I_{1,N} = \Sigma I_{1,L} = 0$$

$$I_{3,N} = \Sigma I_{3,L} = 3 \cdot I_{3,L}$$





Merke: Oberschwingungen entstehen im Verbraucher und fließen von dort „stromaufwärts“

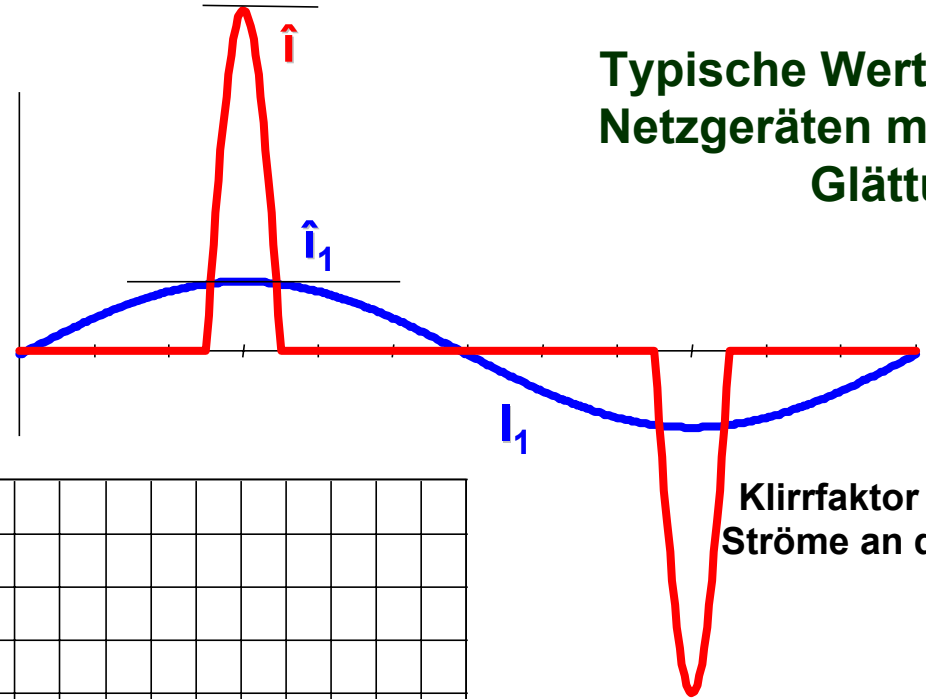
Typische Werte von OS bei Netzgeräten mit kapazitiver Glättung

$\hat{i} / \hat{i}_1 \approx 4{,}71$

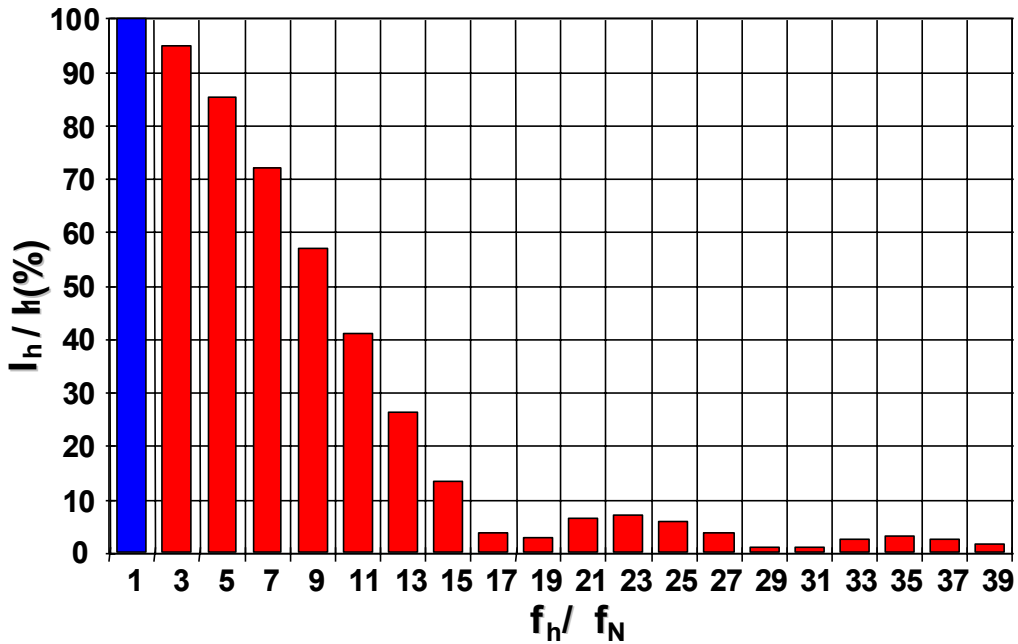
$\hat{i} / I_1 \approx 6{,}66$

$\hat{i} / I_{eff} \approx 3{,}44$

$\lambda \approx 0{,}52$



Klirrfaktor (k) = Anteil aller OS-Ströme an den Gesamtstrom I_{eff} .



THD (I) $\approx 165\%$ (Verzerrungsfaktor Os-Ströme zu Grundschw.-Strom)

$I_1/I_{3,9}\ldots \approx 0{,}88$

$I_1/I_3 \approx 1$

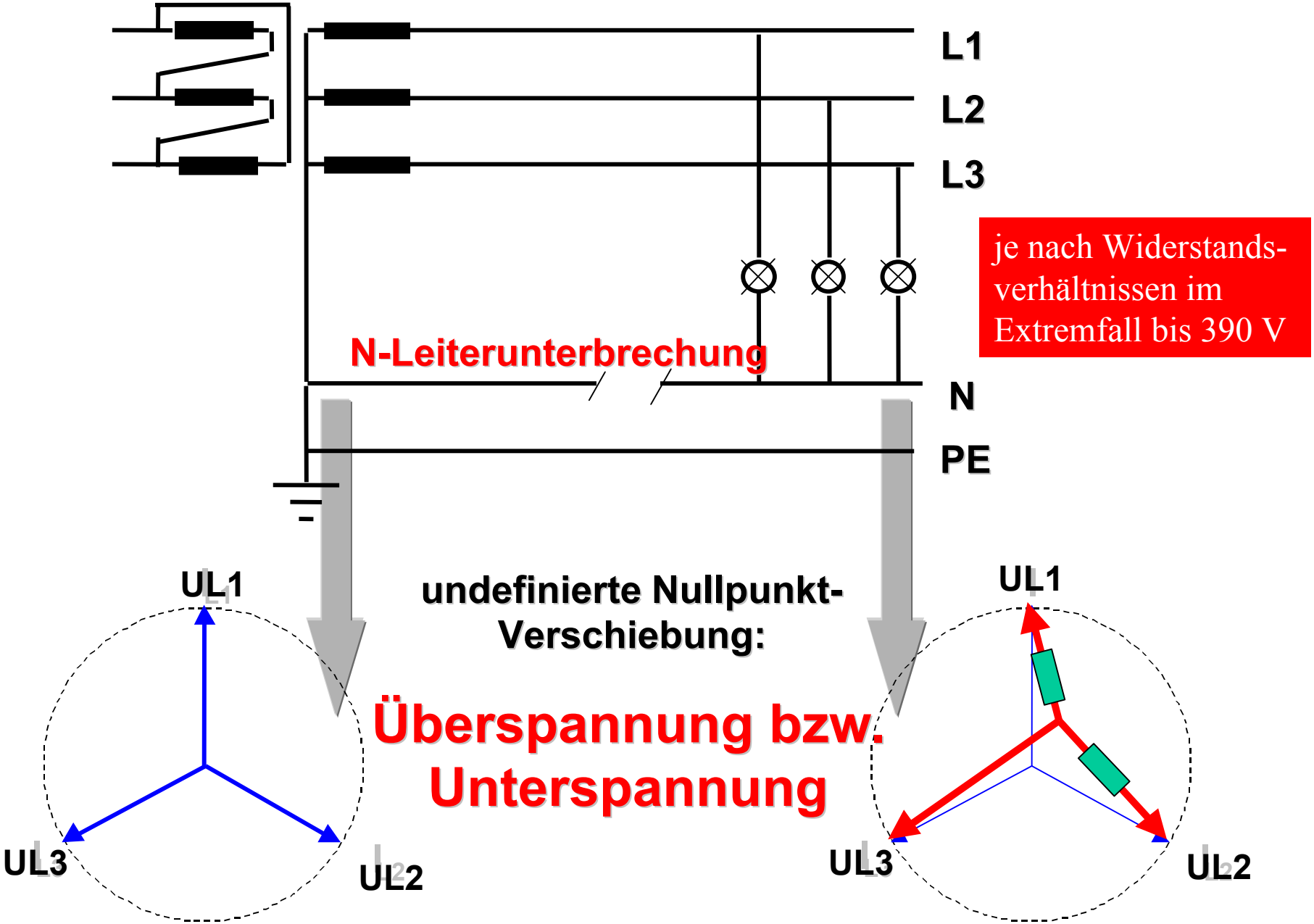
$g = I_1/I_{eff} \approx 0{,}5$ (aufgenommener Wirkstrom)

Fazit: Das Netz kann nur zu etwa 50% mit nutzbarer Wirkleistung ausgelastet werden

Berechnungsbeispiel: N-Leiterüberlastung durch OS-Strom

Netz:	3 x 400 V / 50 Hz		
Sicherungsabgang:	125 A		
Leitungsquerschnitt:	3 x 50 / 25 mm² Cu	(N-Leiterquerschnitt)	
Auslastung:	80%	(= 100 A) Geräte mit Netzteilen	
50 Hz-Strom (Wirkstrom):	51,8 A	[100 A / 1,93]	
Oberschwingungsstrom:	85,5 A	[51,8 A • 1,65]	(THD 165 %)
davon $I_{3,9,...}$:	58,0 A	[51,8 A • 1,12]	(THD 112 %)
N-Leiterbelastung:	174 A	[3 • 58 A]	(Summe $I_3 + I_9$ von $_{L1, L2, L3}$)
N-Leiterbelastbarkeit:	80 A	(25 mm² Cu)	
Übertemperaturbei I_N:	40 K	(Umgebungstemperatur 30°C)	
Übertemperatur(175A):	189 K	[40 K • (174 A / 80 A)²]	
N-Leitertemperatur:	219°C	[30°C + 189 K]	

Ergebnis: Brandgefahr !


L1
L2
L3
N
PE
N-Leiterunterbrechung
je nach Widerstands-verhältnissen im Extremfall bis 390 V
undefinierte Nullpunkt-Verschiebung:
Überspannung bzw. Unterspannung
UL1
UL2
UL3
UL1
UL2
UL3

Bemessung des Stromversorgungssystems

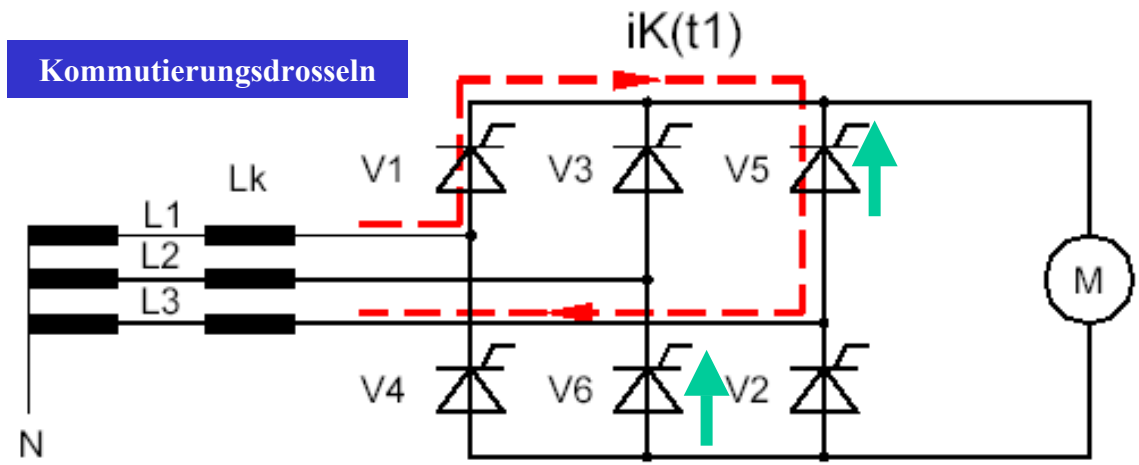
- Für die Bemessung des Stromversorgungssystems ist unbedingt die **Scheinleistung** der angeschlossenen elektrischen Verbraucher zugrunde zu legen.
- Bei nichtlinearen Verbrauchern wird die **Scheinleistung** überwiegend durch den Oberschwingungsanteil (Blindstromanteil) bestimmt.
- die Scheinleistung liegt bei nichtlinearen Verbrauchern deutlich über der Wirkleistung.
- Grundsätzlich gilt folgende Faustformel:

  Erreicht die Gesamtleistung der nichtlinearen elektrischen Verbraucher 20 % (Watt-Angabe) oder 40 % (VA-Angabe) der Bemessungsleistung des Stromversorgungssystems, sind bereits Schutzmaßnahmen notwendig. (siehe VdS-Richtlinie 2349)

- **Im Zweifelsfall ist bei nichtlinearen Verbrauchern deren doppelte Wirkleistung anzunehmen.**

Spannungseinbrüche bei gesteuerten Stromrichtern

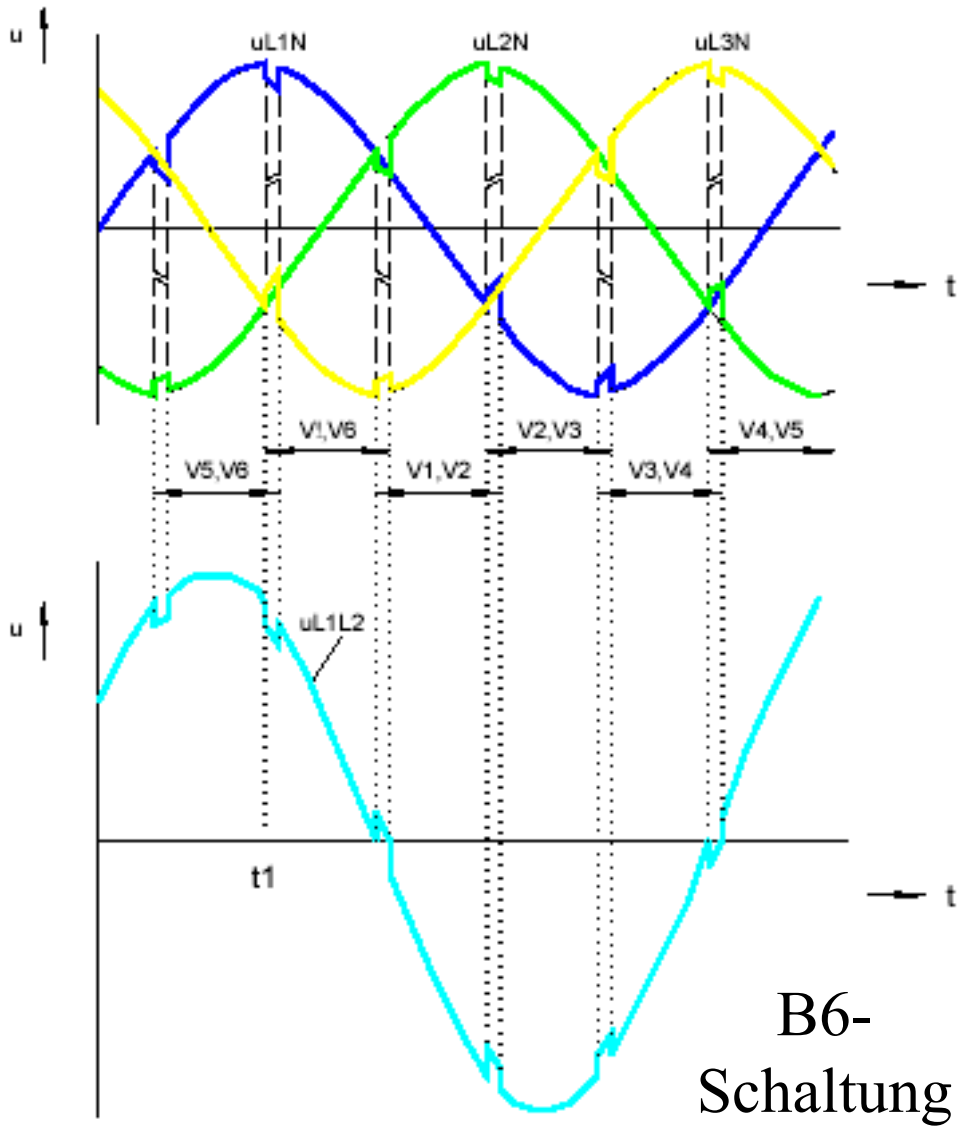
- Anfang: **(Stromfluss über V5 und V6)**
- Die Ausgangsspannung wird dann durch die Spannungsdifferenz der Augenblickswerte u_{L3} und u_{L2} gebildet.
- Zum Zeitpunkt t_1 übernimmt der Thyristor V1 den Strom.
- Da vorher der Thyristor V5 leitend war, sind in seinem Halbleiterkristall noch so viele Ladungsträger gespeichert, dass ein Strom von u_{L1} getrieben über V1 rückwärts durch den Thyristor V5 fließt. Es kommt (bedingt durch den noch leitenden Halbleiter) zu einem extrem niederohmigen Pfad zwischen L1 und L3 (ähnlich einem Kurzschluss).
- Die Dauer dieses Zustandes ist extrem kurz (einige 100 µs) – trotzdem macht sich dieser impulsartige Kurzschluss bemerkbar, da hier die Netzspannung leicht zusammenbricht.
- dies nennt man Kommutierungseinbrüche (Kommutierungsstörungen)



Erkenntnisse:

- Kommutierungsvorgänge bewirken an den Netzinduktivitäten hohe Spannungs-fälle wegen der hohen Flankensteilheit (100 µs...)
- sind Hauptursache für Störungen in elektronischen Schaltungen.
- Kommutierungseinbrüche erkennt man am besten mit einem Oszilloskop.
- Die einzig mögliche Gegenmaßnahme ist der Einbau ausreichend großer Kommutierungsdrosseln.

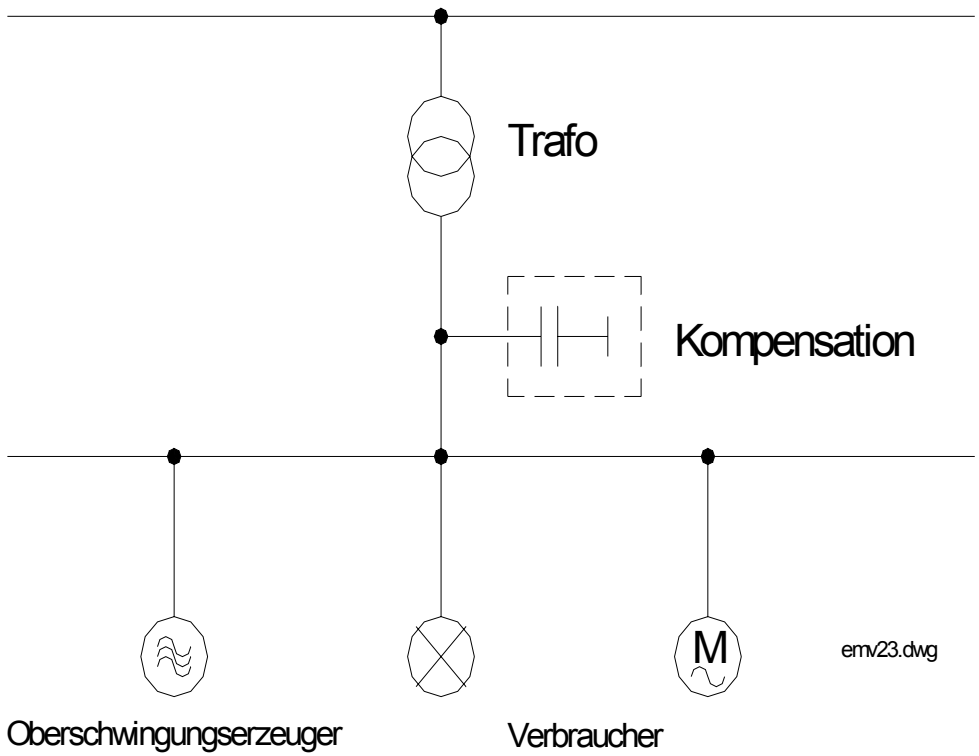
Rücksprache mit Herstellern!



B6-Schaltung

Kopplungsarten

- **leitungsgebunden**
- **über das entstehende magnetische Feld**



Schwingkreis-bildung möglich!

Und die Folgen?

$$X_L = X_C$$

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

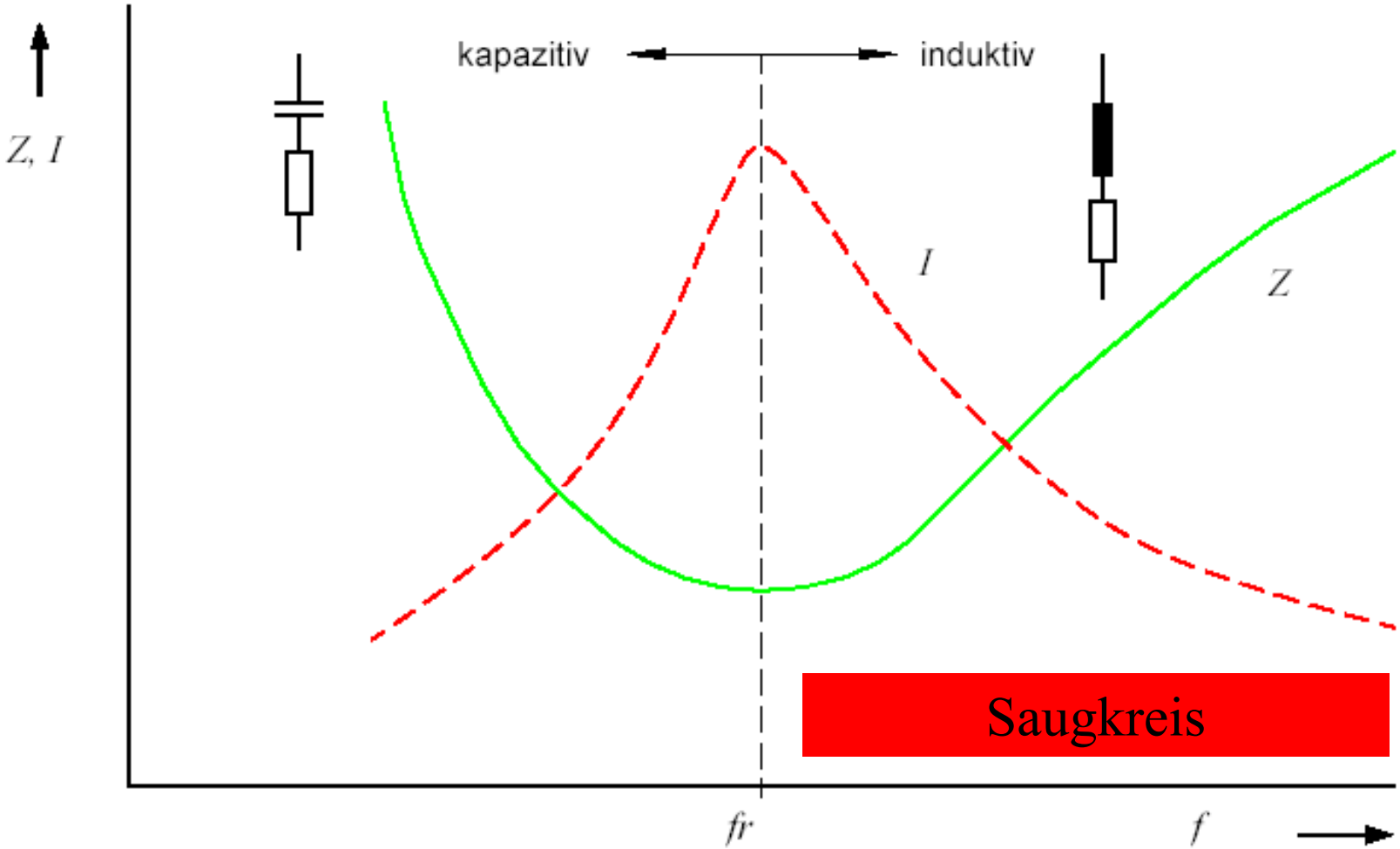


Bild 9-2: Resonanzkurve eines Reihenschwingkreises

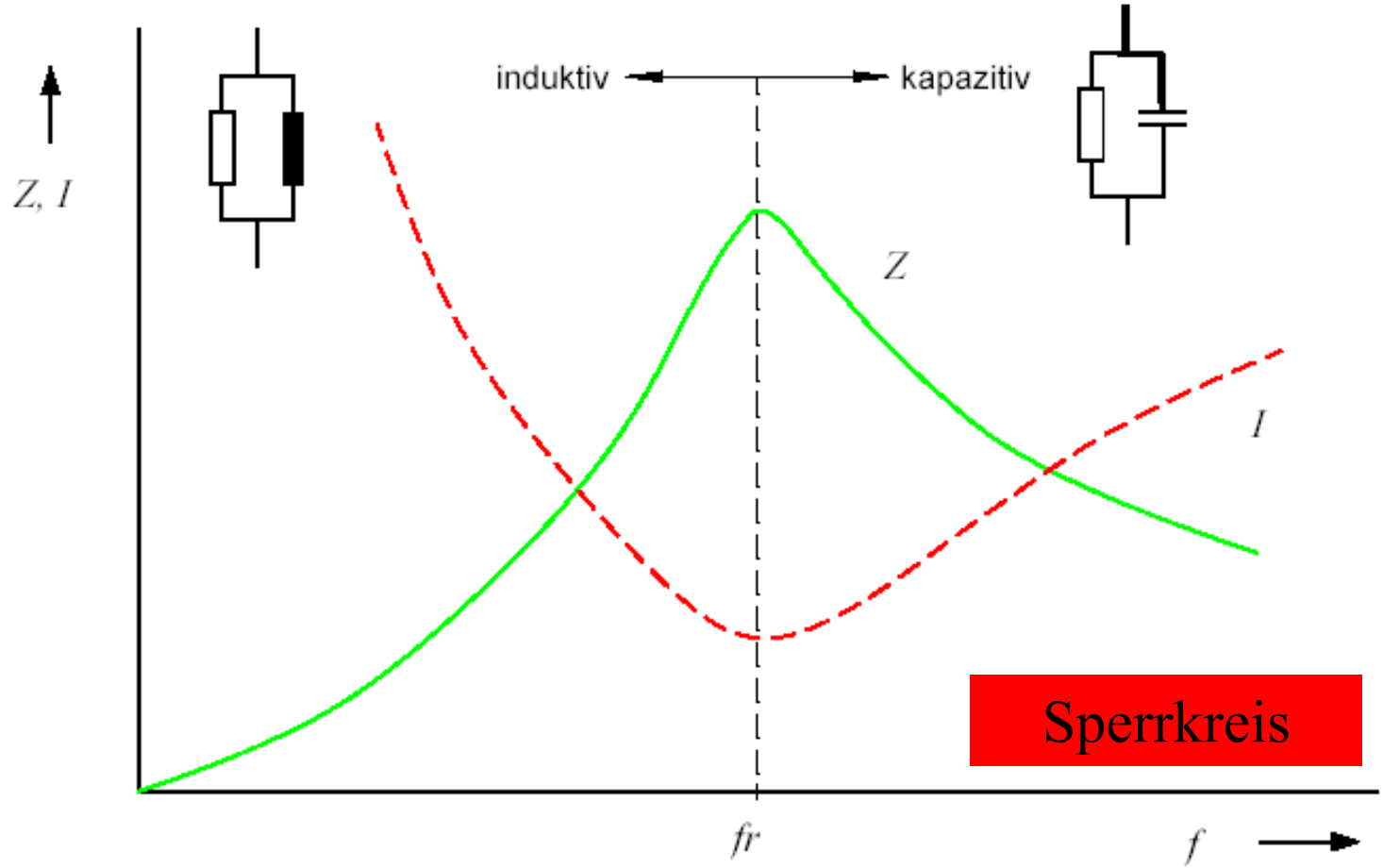
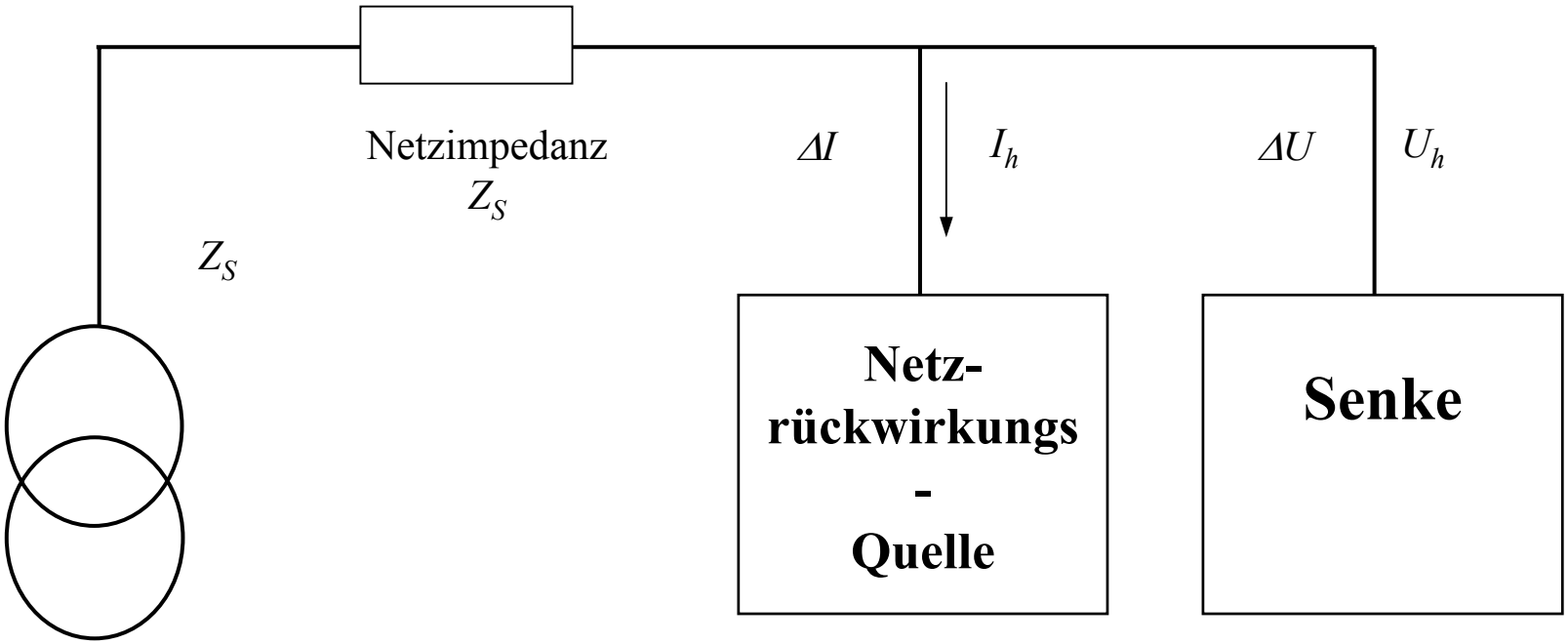


Bild 9-3: Resonanzkurve eines Parallelschwingkreises

- Spannungsschwankungen
- Oberschwingungen

$$\Delta I \cdot Z_S = \Delta U$$



Die Netzspannung ist nun ebenso oberschwingungsbelastet und diese Oberschwingungen wirken sich weiter im Verbrauchernetz aus.

Maßnahmen gegen Auswirkungen von Oberschwingungen

Errichten des Stromversorgungssystems

- neu zu errichtende elektrische Anlagen sind als TN-S-Systeme zu planen

(ohne N-Leiterreduzierung)

Die Überlast verhindern

- Richtige Wahl z. B. Frequenzumrichter

Möglichkeiten

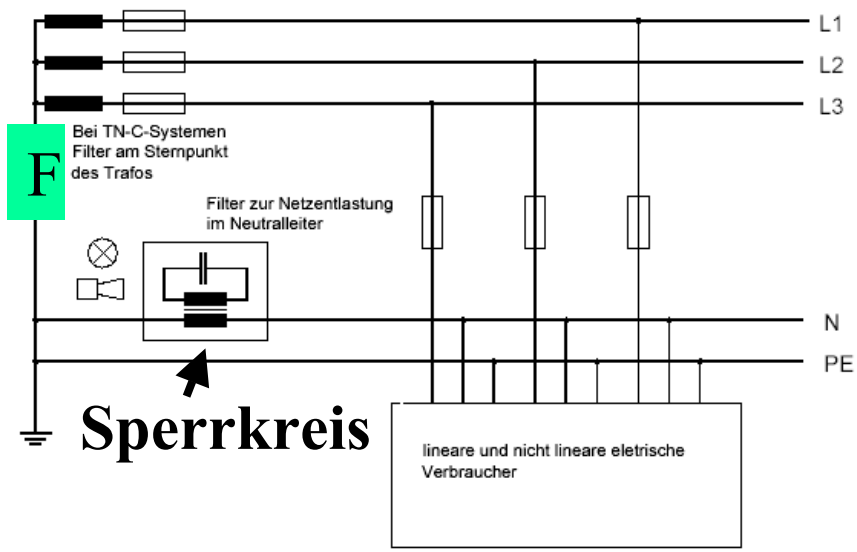
1. **Netzentlastung durch Filter**
2. **Maßnahmen ohne Netzentlastung**

Maßnahmen mit Netzentlastung durch Filter

Vorsicht: Wirksamkeit der Schutzmaßnahme darf nicht behindert werden

Werden sie in den N-Leiter eingebaut, sind die beteiligten Stromkreise zusätzlich durch eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (FI, RCD) zu schützen, um zu verhindern, dass es zu unzulässigen Brücken zwischen dem N- und PE-Leiter kommt. (OS-Ströme fließen sonst über den PE)

Wenn die Netzentlastung im Transformator-Sternpunkt errichtet wird, muss der dadurch erhöhte Schleifenwiderstand des Netzes beachtet werden. Der Schleifenwiderstand muss immer noch so niederohmig sein, dass nach DIN VDE 0100-410 die nötigen Abschaltzeiten der Überstrom-Schutzeinrichtungen bei Körperschluss erreicht werden.

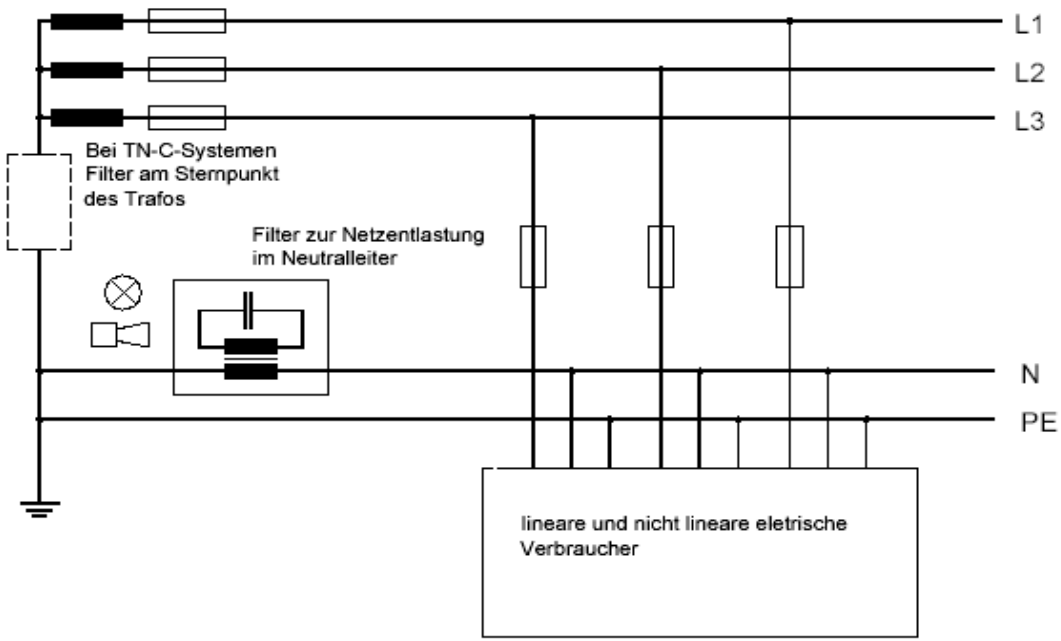


Weitere wichtige Aussagen

Es sind Netzfilter mit optischer und akustischer Meldeeinrichtung auszuwählen, um damit eine Weiterleitung der Meldung zu ermöglichen.

Hinweis: In Stromversorgungssystemen mit PEN-Leiter darf die Netzentlastungs-einrichtung die PE-Schutzfunktion nicht beeinträchtigen. Der Einbau in den PEN-Leiter ist daher nicht möglich.

Die Filter sollten möglichst auch die anderen Oberschwingungen, insbesondere die 5. und 7. harmonische Oberschwingung, aufheben.



Oberschwingungsfilter

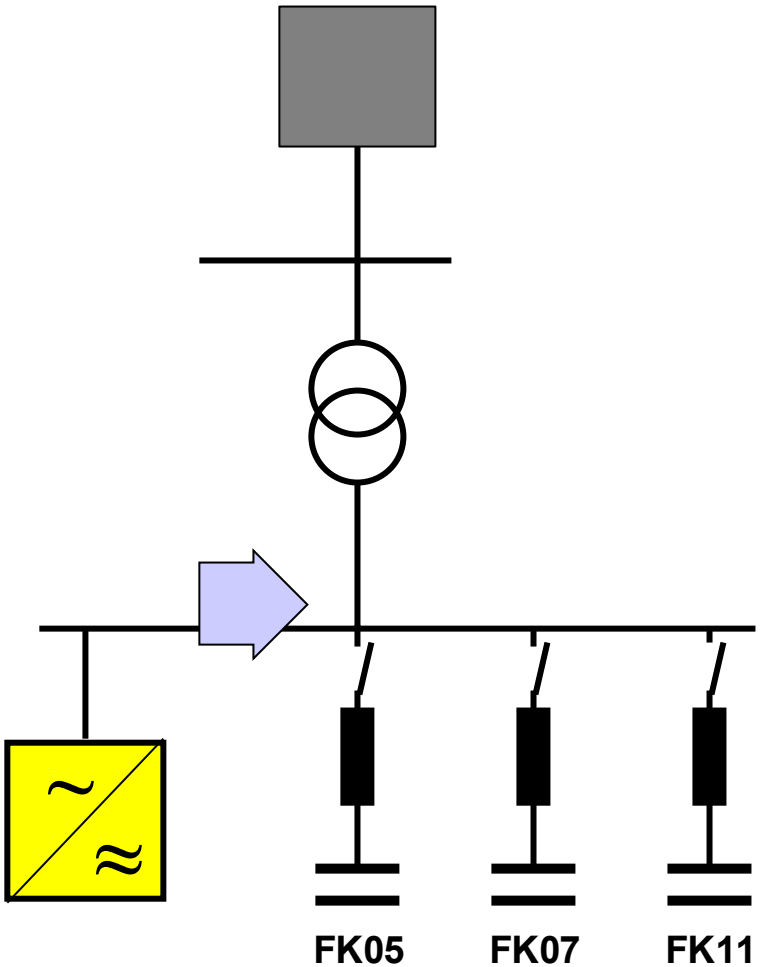
Passivfilter:

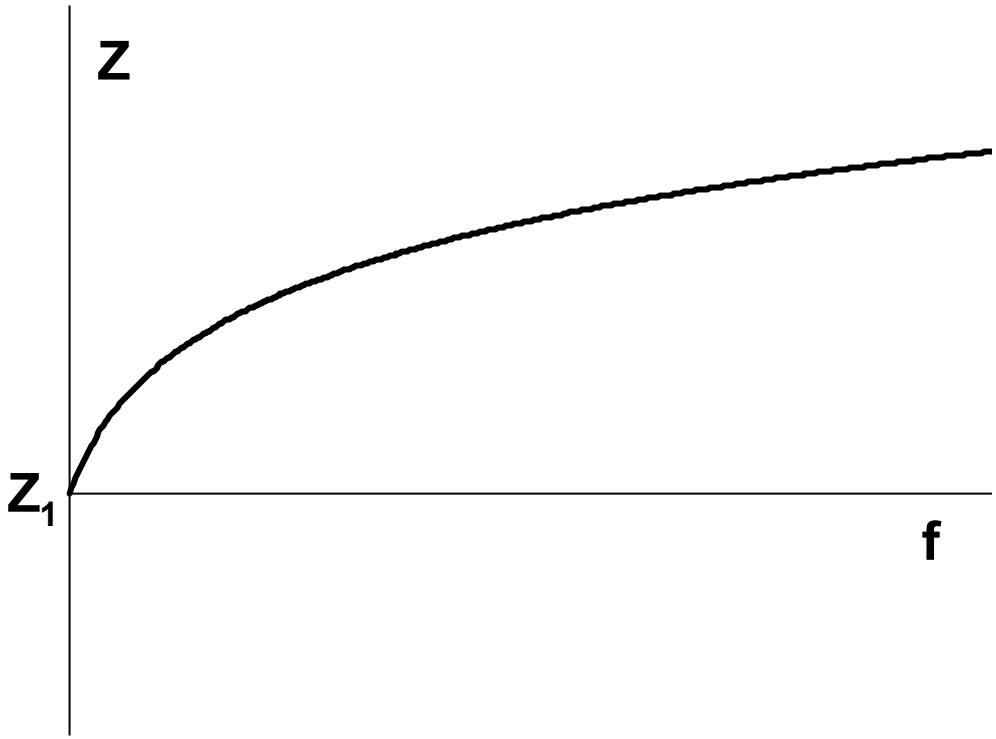
- benötigen mehr Platz, sind aber billiger
- bieten zugleich auch immer Kompensationsleistung
- wirken breitbandig, also auch auf höhere Frequenzen
- wirken auf die resultierende Oberschwingungsspannung
- müssen in Hinsicht auf TF-Verträglichkeit gebaut werden
- ...

Aktivfilter:

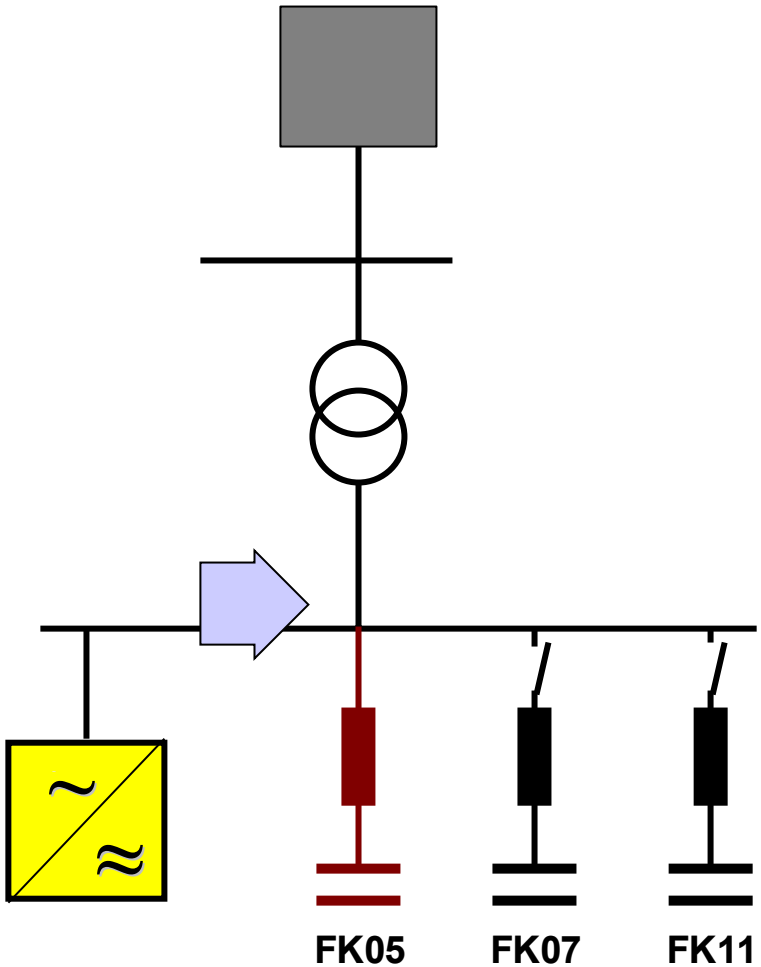
- werden kompakter gebaut, haben aber höhere Verluste
- können, müssen aber nicht Blindstrom liefern
- können einzelne diskrete OS-Frequenzen selektieren
- wirken nur auf den gemessenen Oberschwingungsstrom
- erlauben eine Filterung auf vorgegebene Grenzwerte
- ...

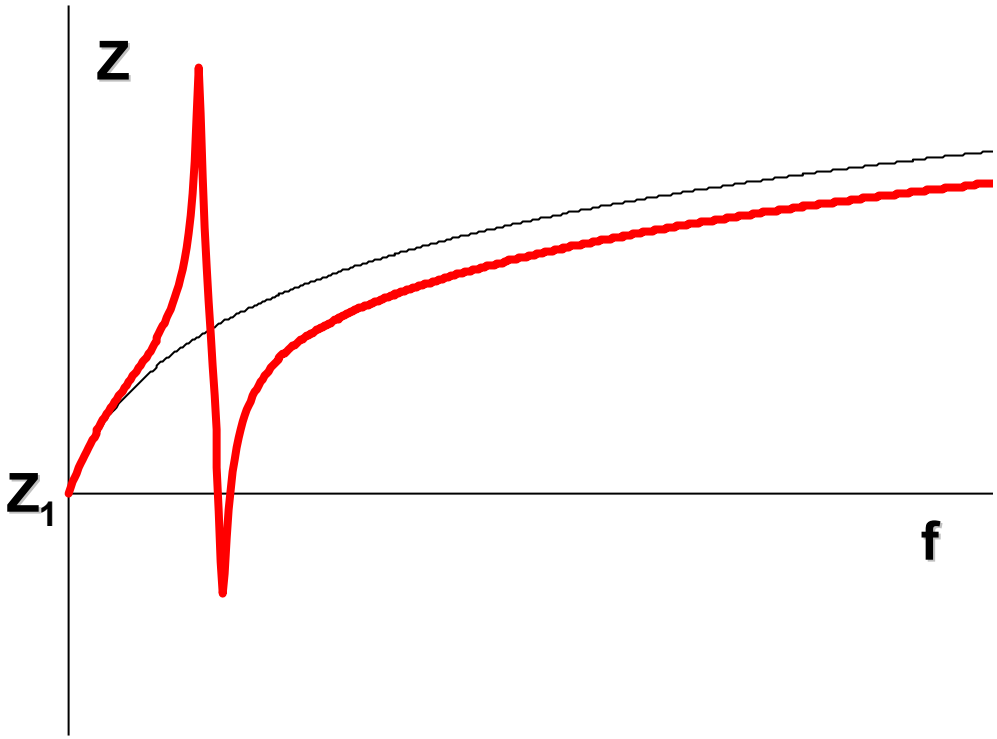
Schaltfolge von Filterkreisen



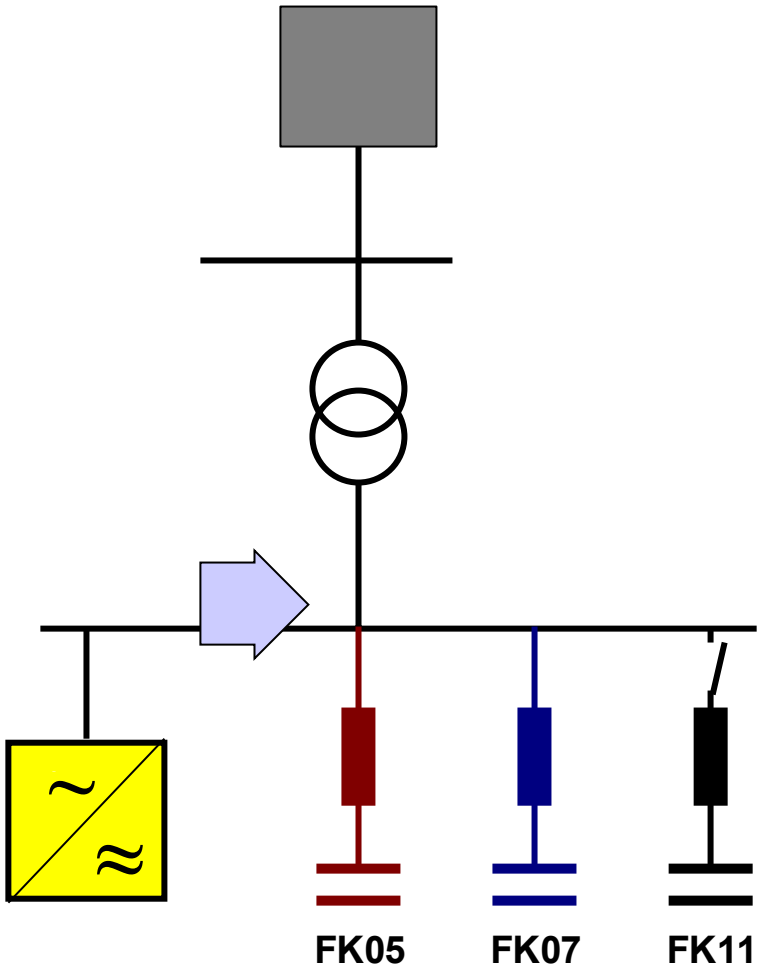


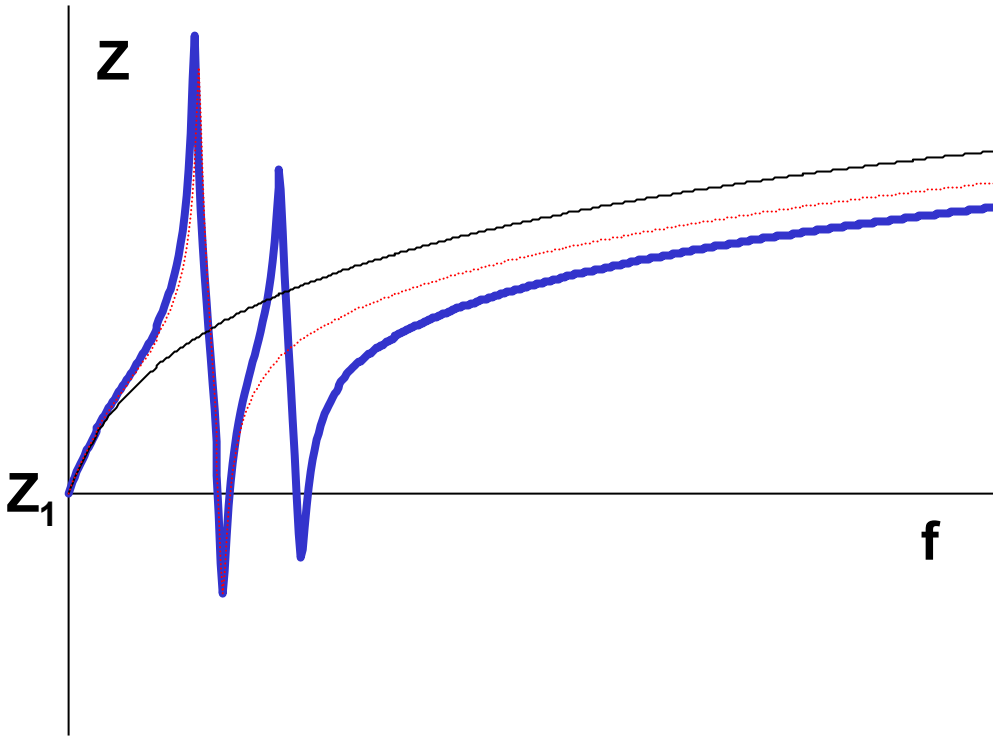
Schaltfolge von Filterkreisen



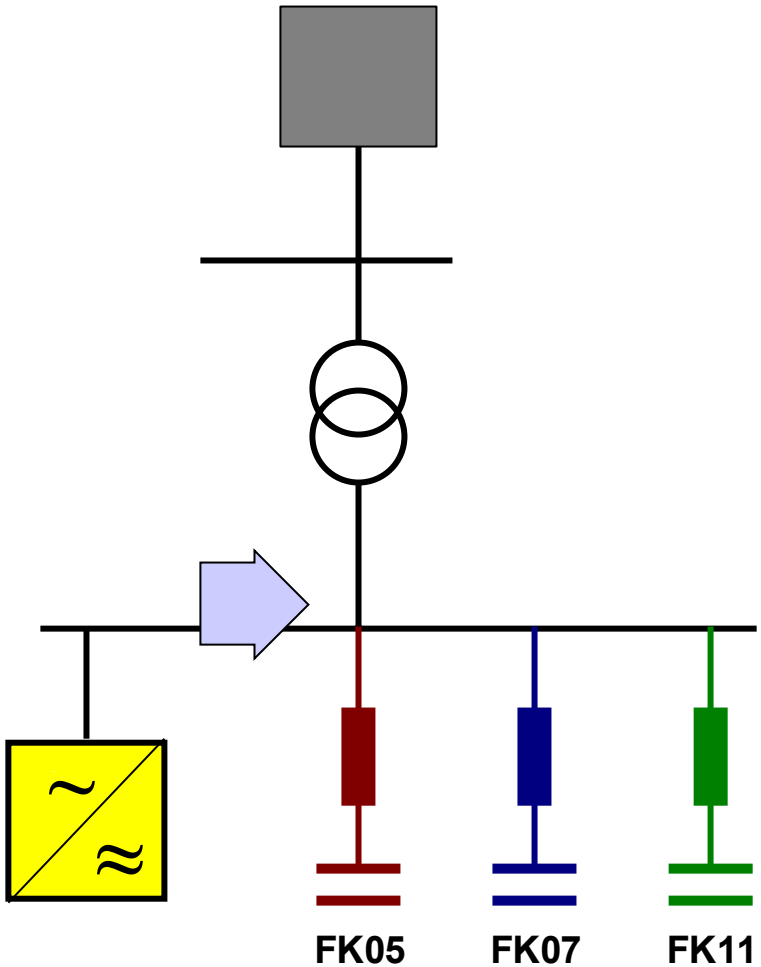


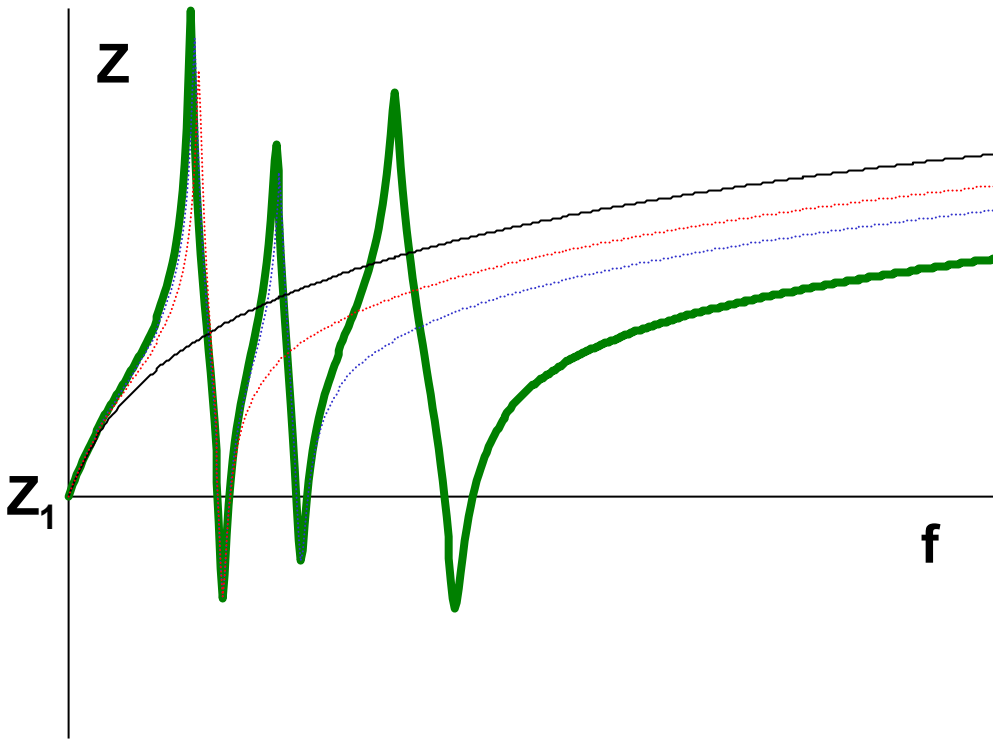
Schaltfolge von Filterkreisen



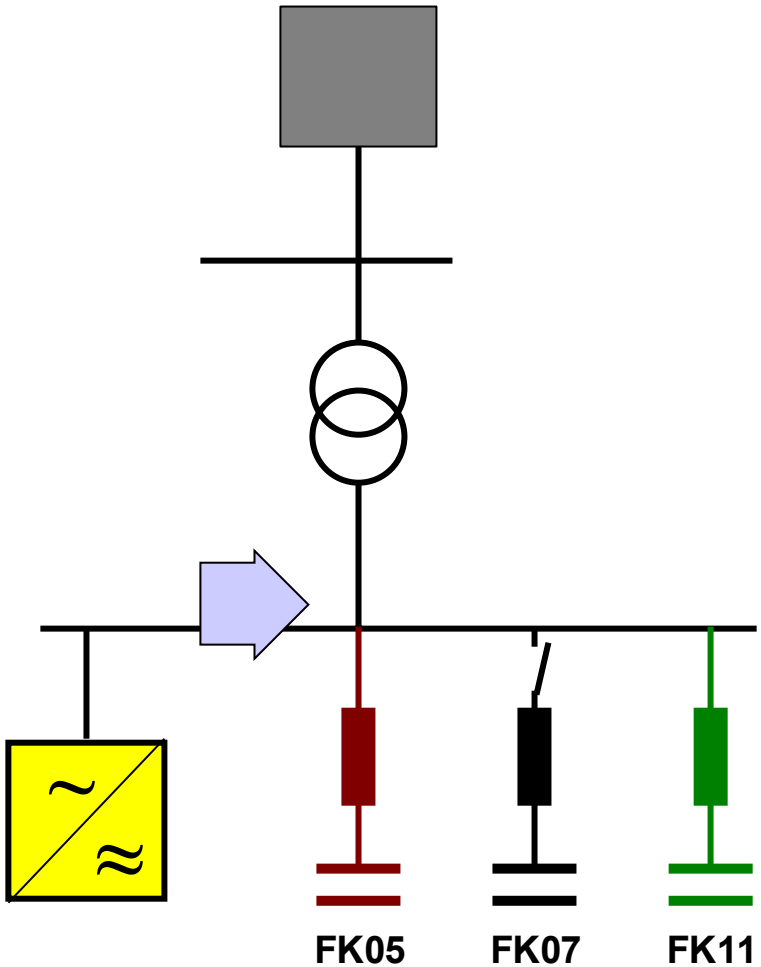


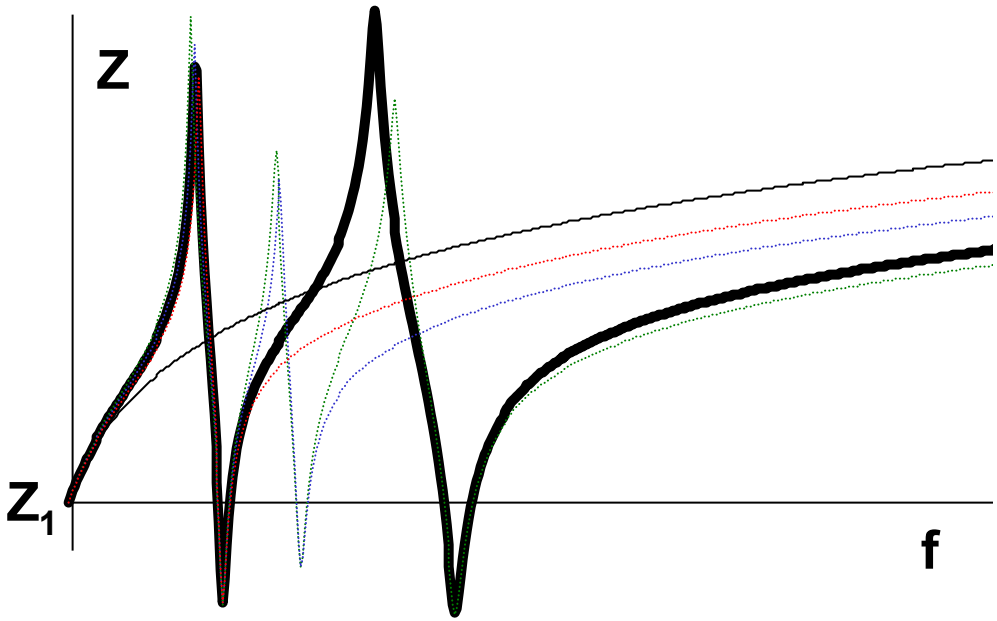
Schaltfolge von Filterkreisen





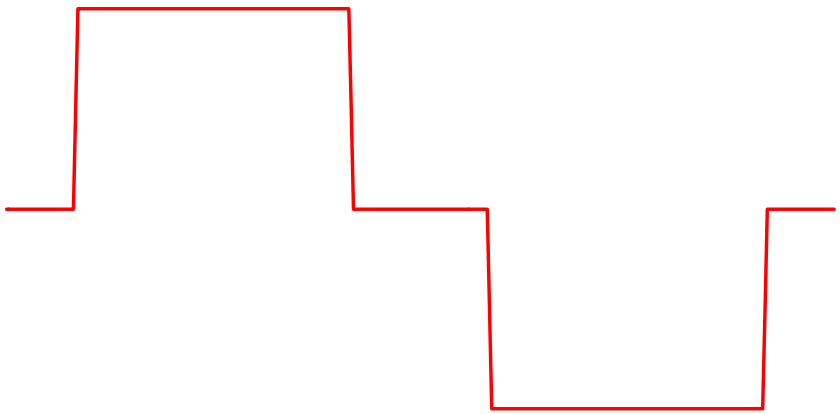
Schaltfolge von Filterkreisen

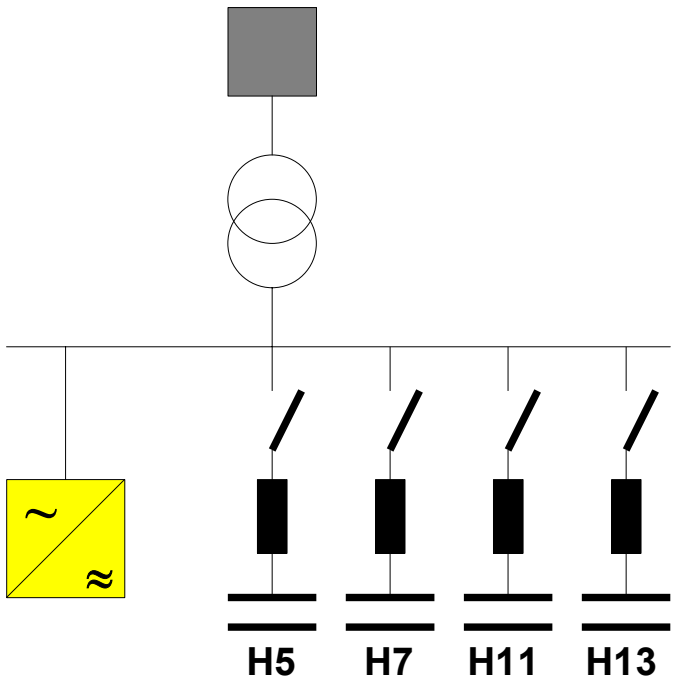


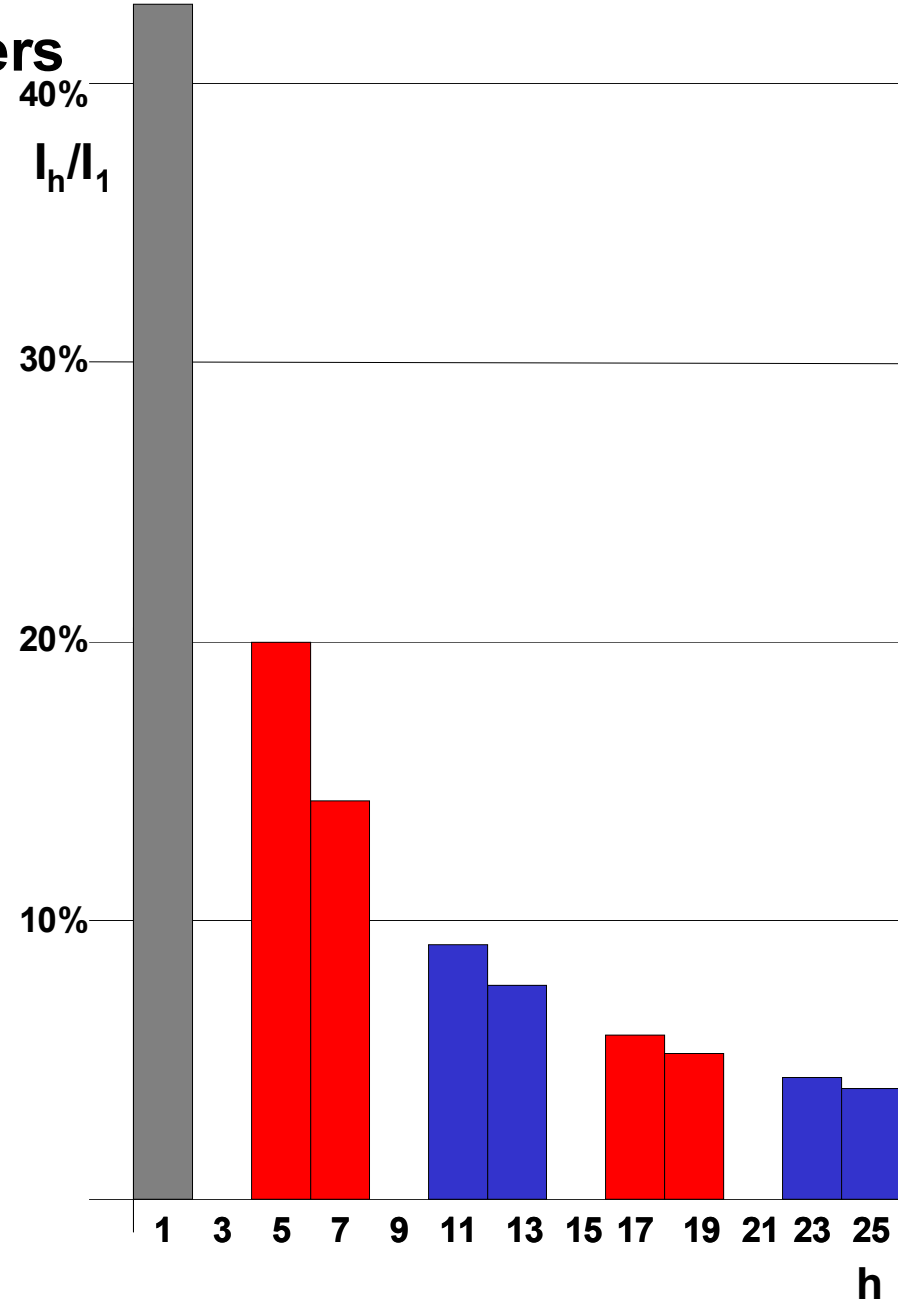


Resonanzverstärkung

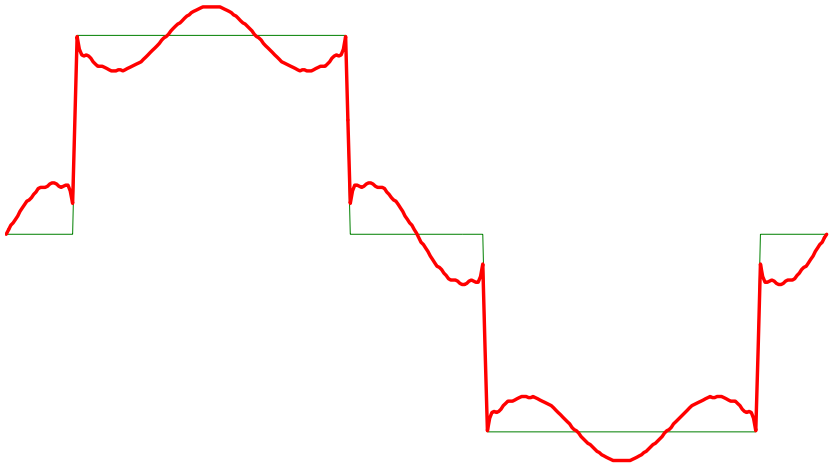
Filterwirkung eines Passivfilters

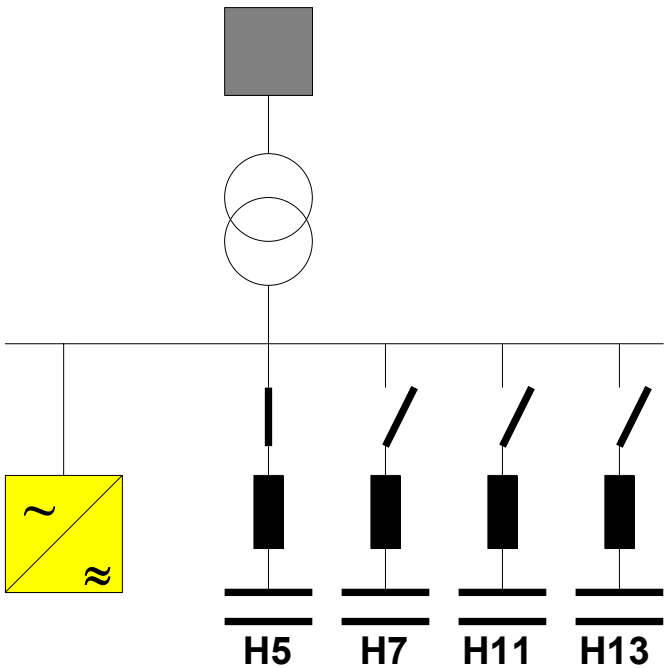


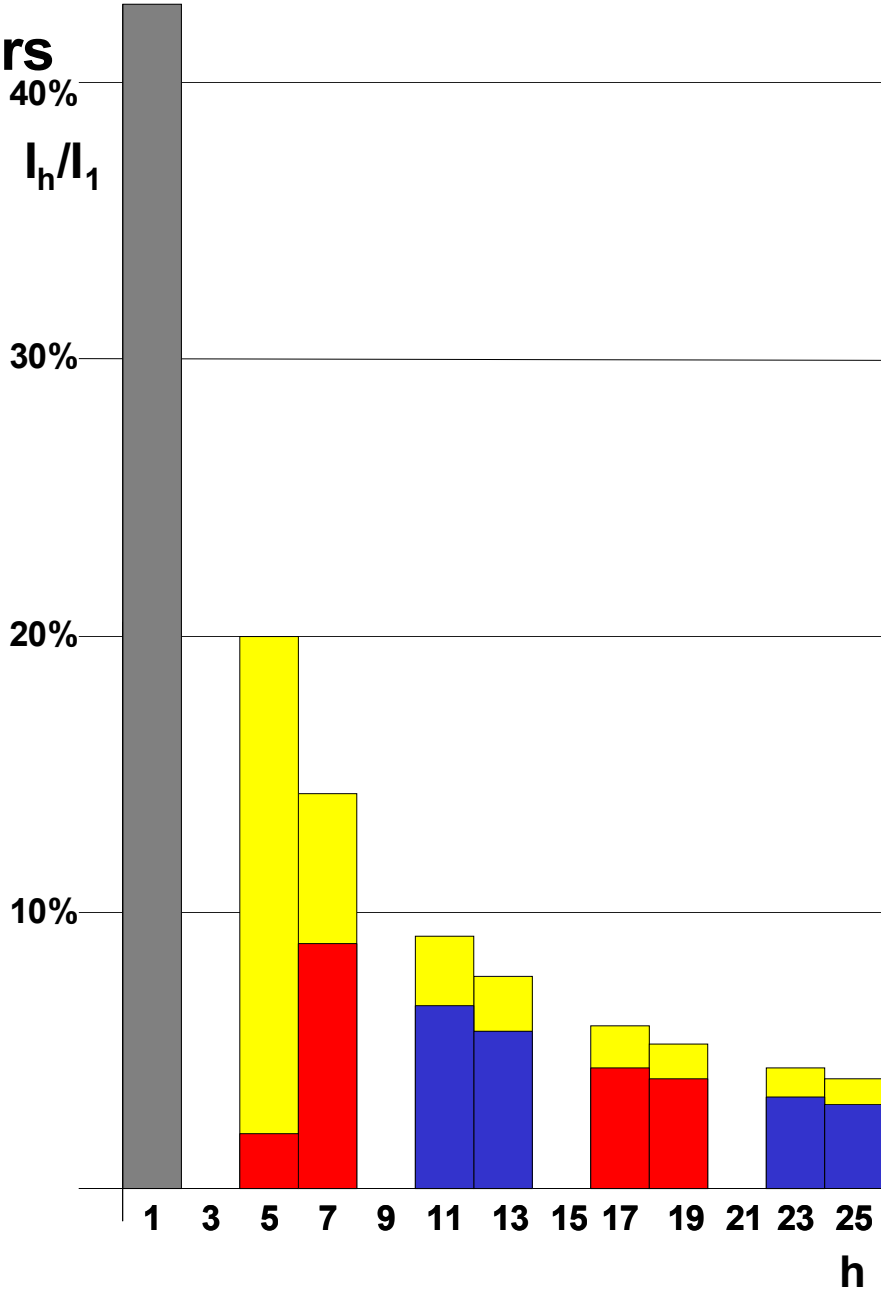




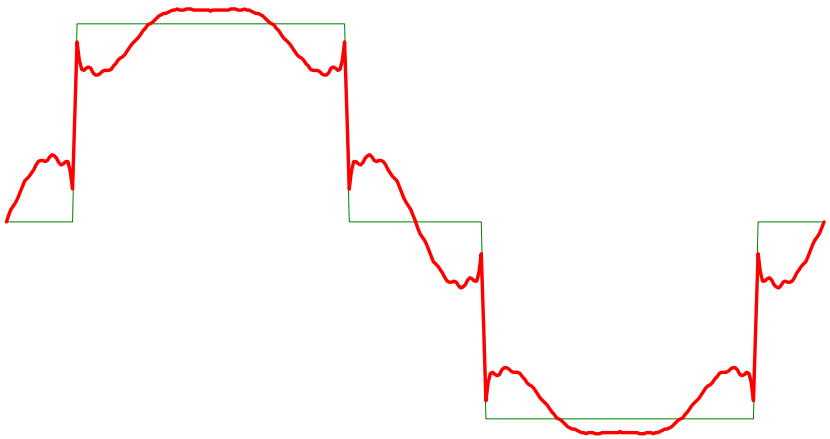
Filterwirkung eines Passivfilters

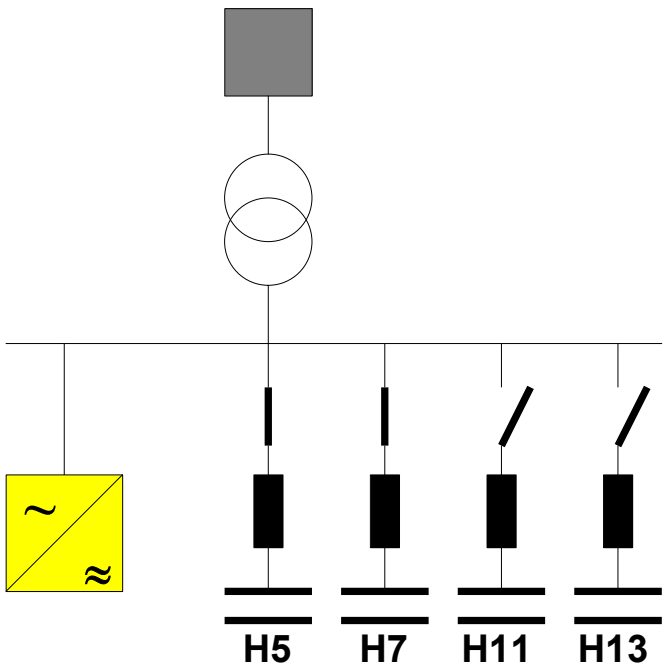


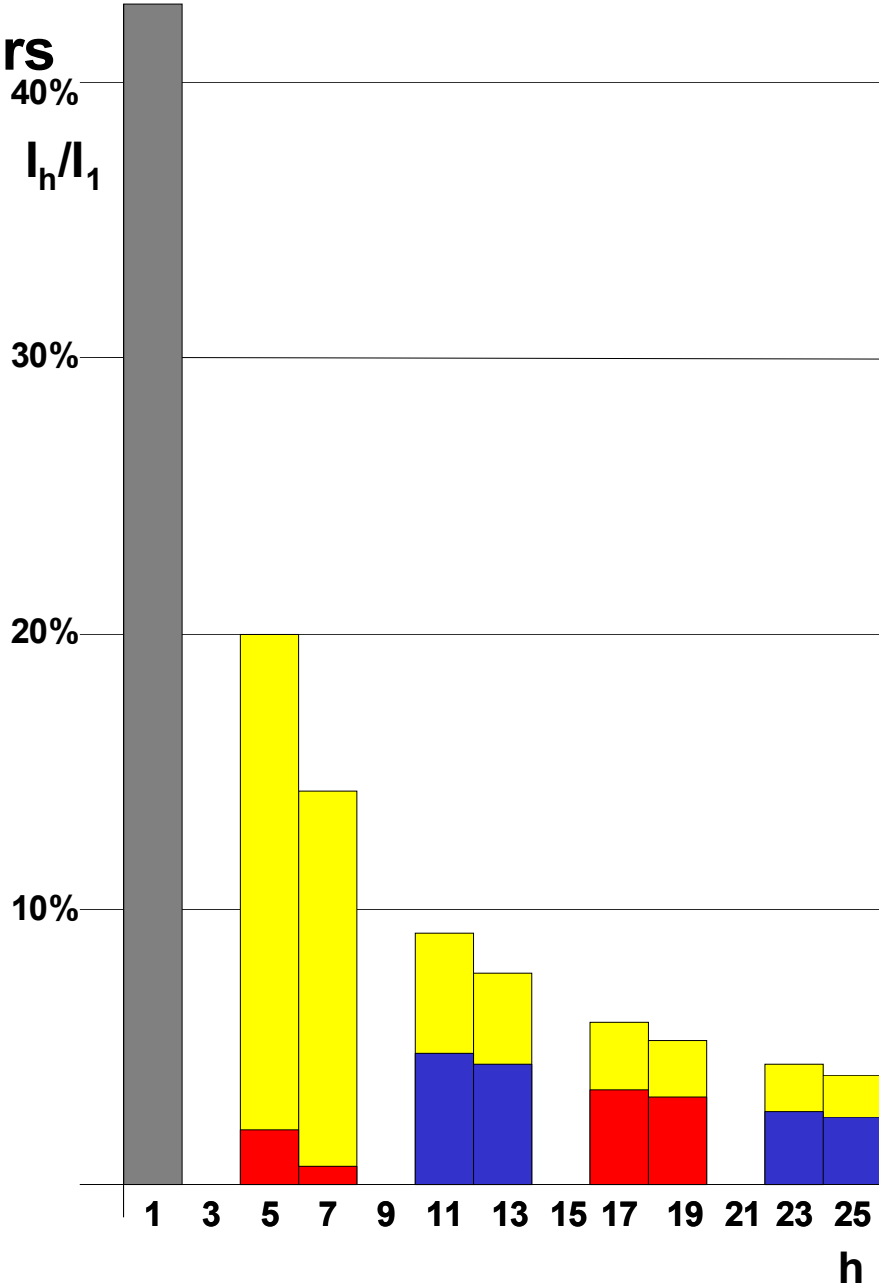




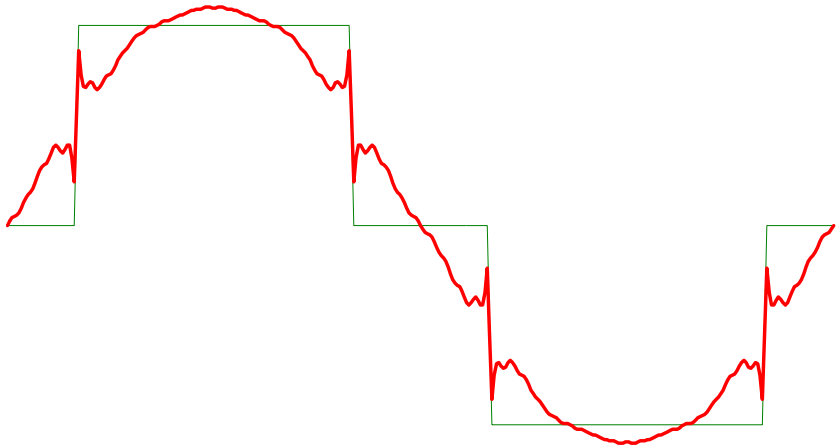
Filterwirkung eines Passivfilters

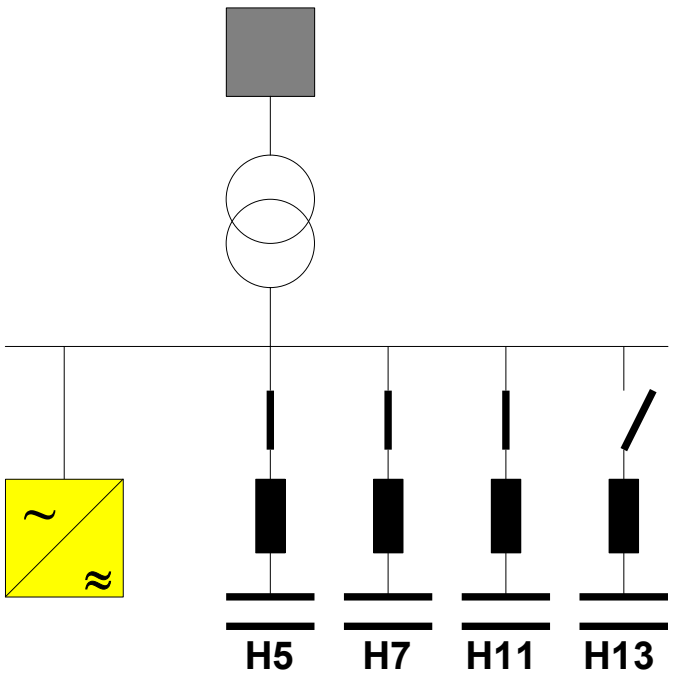


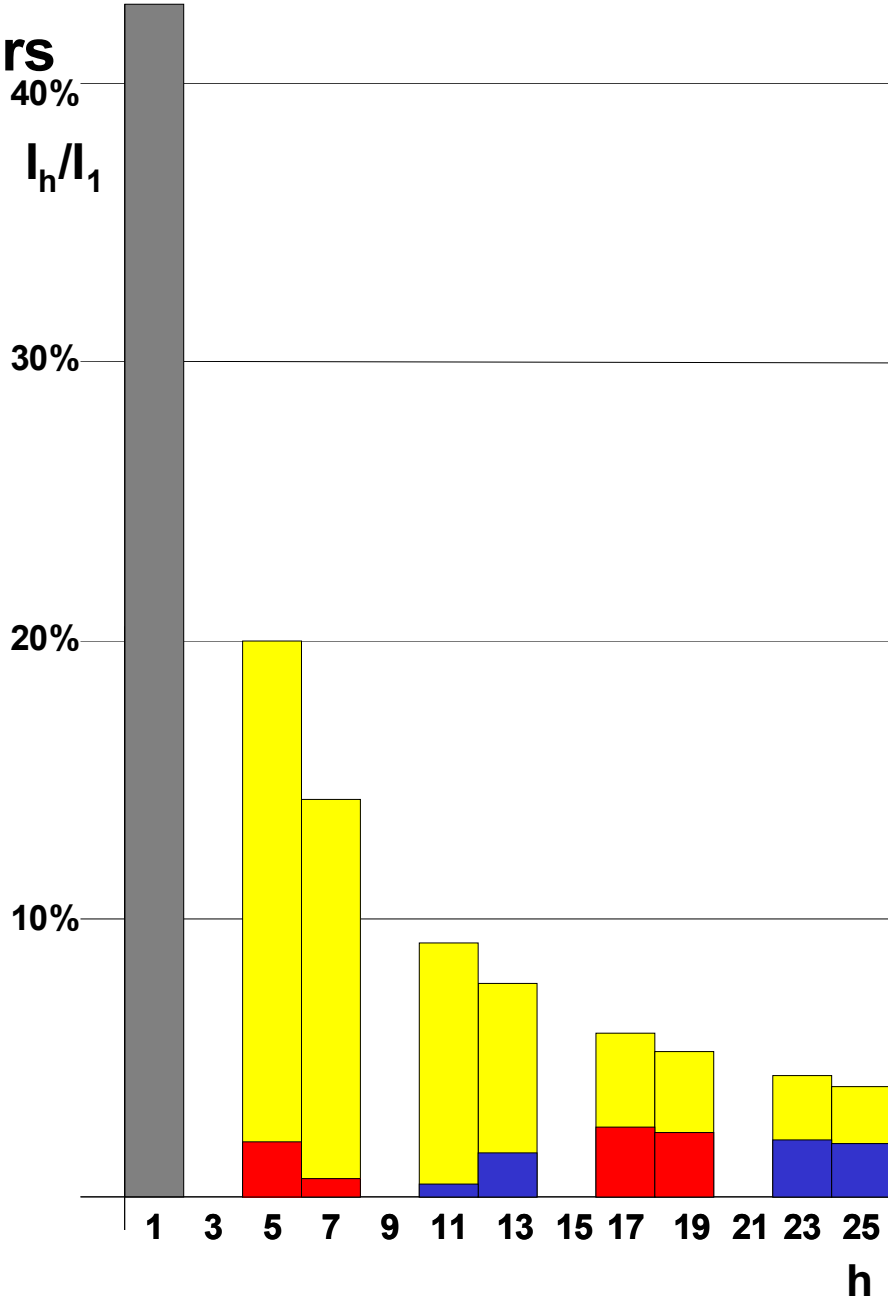




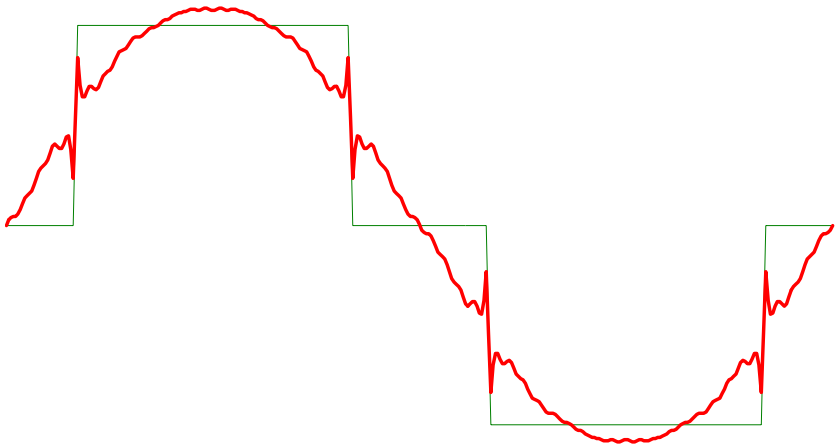
Filterwirkung eines Passivfilters

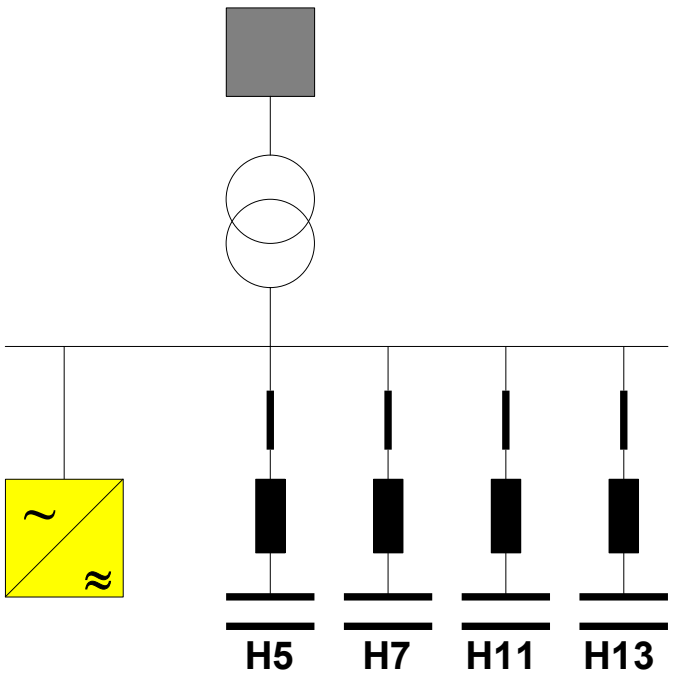


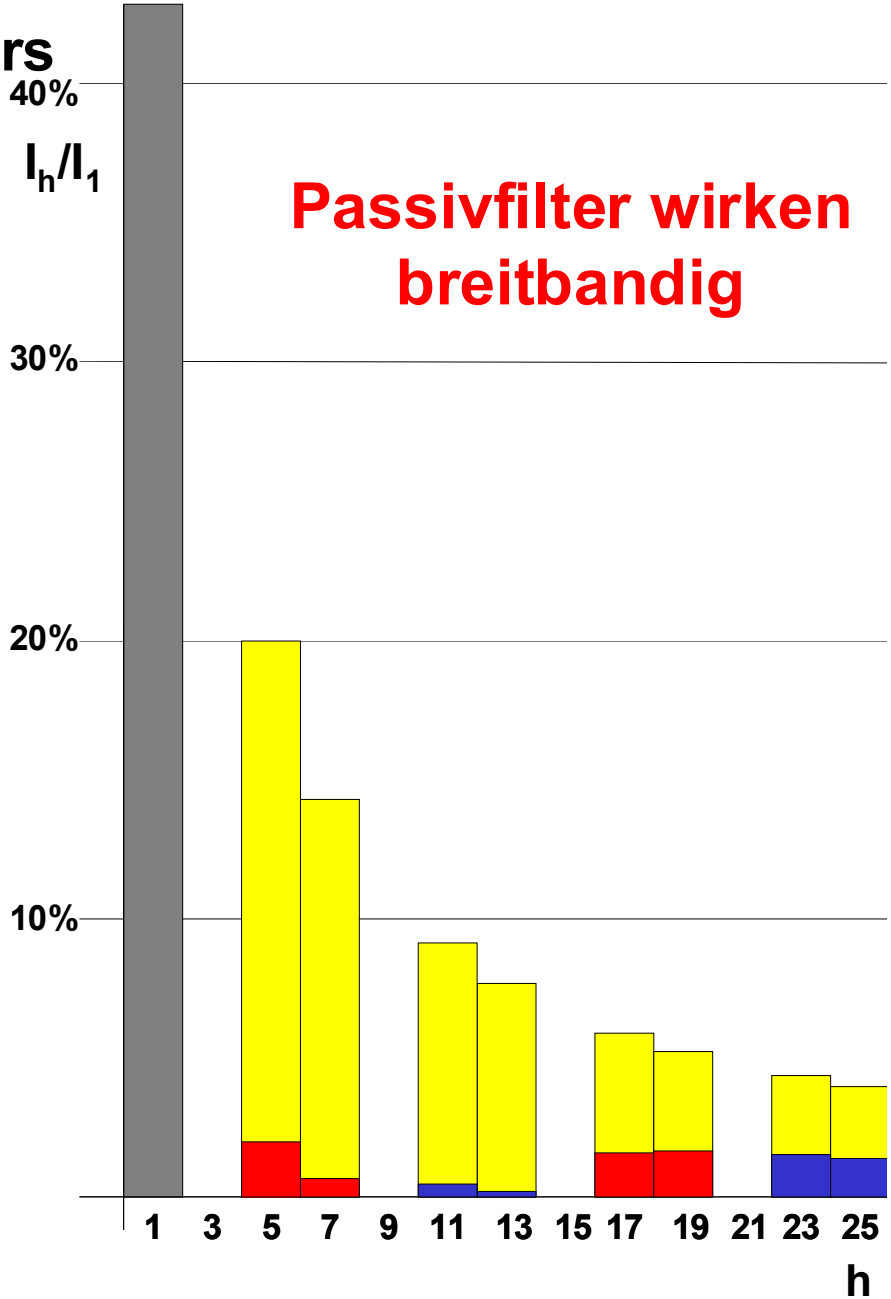




Filterwirkung eines Passivfilters





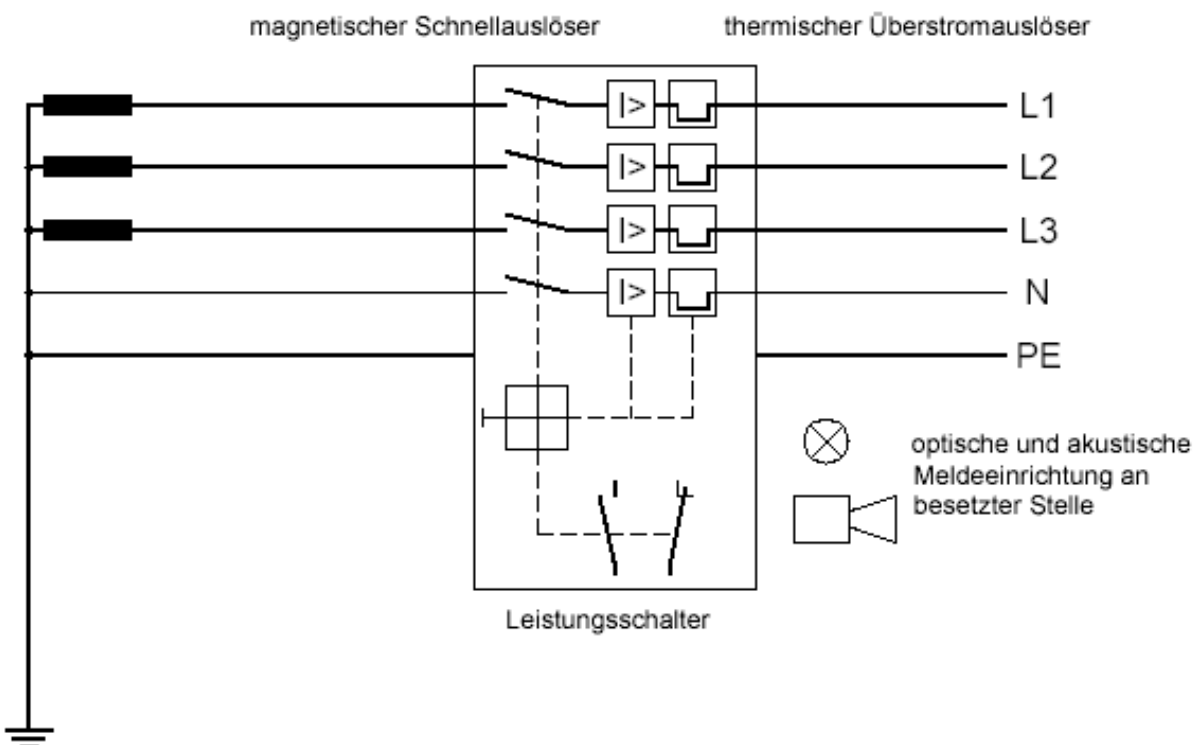


Passivfilter wirken breitbandig

Maßnahmen ohne Netzentlastung

a) In allen Fällen gilt: Einen **PEN-Leiter stets vermeiden** (TN-S-System).

b) **N-Leiter müssen gegen Überstrom geschützt werden**.
Nicht nur die Außenleiter müssen gegen Überstrom überwacht werden, sondern auch der N-Leiter - z. B. durch Leistungsschalter.



Schaltfolge

<u>Aus</u>

L1, L2, L3 danach N

<u>Ein</u>

N danach L1, L2, L3

c) Es ist sinnvoll mit einer **Meldeeinrichtung** anzuzeigen, dass die Anlage wegen Überlastung des N-Leiters abgeschaltet wurde.

d) Bei der Auslegung der Spannungsquellen, wie **Transformatoren, ist die zweifache Wirkleistung** der nichtlinearen elektrischen Verbraucher zu berücksichtigen. Darüber hinaus müssen bei der Dimensionierung auch die höheren Verluste, die durch andere als 3. Harmonische Oberschwingungen verursacht werden, beachtet werden.

e) Auf eine Reduzierung des N-Leiters sollte stets verzichtet werden.

f) Bei der Bemessung der **Leitungsquerschnitte ist die zweifache Wirkleistung** der angeschlossenen nichtlinearen elektrischen Verbraucher zu berücksichtigen. PEN- bzw. N-Leiter sind mindestens für die Summe der Ströme der 3. harmonischen Oberschwingung in allen Außenleitern zu dimensionieren. Wenn also zu erwarten ist, dass wegen hoher Oberschwingungsströme die N-Leiterbelastung höher liegt als die Außenleiterbelastung, so muss der Querschnitt des Kabels bzw. der Leitung nach der Belastung des N-Leiters ausgelegt werden.

Hinweis 1:

Wird der PEN- (wenn vorhanden) bzw. N-Leiter für den doppelten, vorstehend ermittelten Außenleiterquerschnitt dimensioniert, ist üblicherweise nicht mit einer Überlastung zu rechnen.

Hinweis 2:

Da der N-Leiter (bzw. wenn vorhanden der PEN-Leiter) jedoch bei einem hohen Anteil von Oberschwingungsströmen des Nullsystems höher belastet sein kann als die Außenleiter, kommt es dazu, dass für den benötigten Betriebsstrom viel zu hohe Querschnitte verlegt werden müssen. Dies trifft im übrigen auch für die oberschwingungsbelasteten Außenleiter selbst zu, da die Oberschwingungen Blindleistungen produzieren.

Aus diesem Grund lohnt sich letztlich bei hoher Oberschwingungsbelastung nur der Einsatz eines entsprechenden Netzfilters.

g) **Kompensationskondensatoren sind zu verdrosseln** (Abschnitt 10.5), um schädliche Netzresonanzen zu vermeiden. Dabei ist das Ton-Frequenz-Rundsteuersignal (TF) zu beachten.

h) Die Auslastbarkeit von **USV-Anlagen** kann ggf. durch einen zu hohen Crestfaktor begrenzt werden. Bei ihrer Auslegung sind deshalb die nichtlinearen Verbraucher mit der **dreifachen Wirkleistung** zu berücksichtigen.

Verdrosselte Kompensationsanlagen

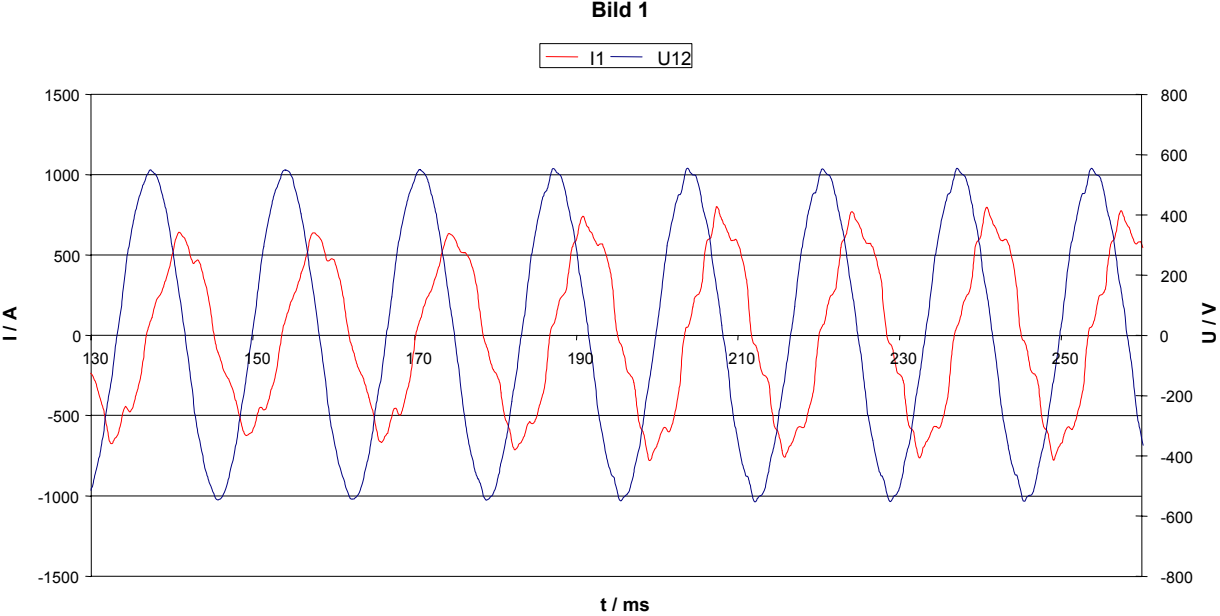
- Es sollte eine verdrosselte Kompensationsanlage eingesetzt werden, wenn das Verhältnis von Oberschwingungserzeugern (in kW) zu der Gesamtleistung des Betriebes einen Wert von 15% überschreitet.

  - Beispiel: Gesamtleistung 180 kW, davon sind 27 kW nichtlineare Verbraucher. In dem Fall sollte also eine verdrosselte Kompensationsanlage eingesetzt werden.

  - Als weiteren Hinweis dafür, dass es sinnvoll ist eine Anlagen zu verdrosseln wäre,

    Oberschwingungsspannung von 2 % bei der 5. harmonischen Oberschwingung (250 Hz) oder von 3 % beim gesamten Oberschwingungsspektrum gesehen werden.

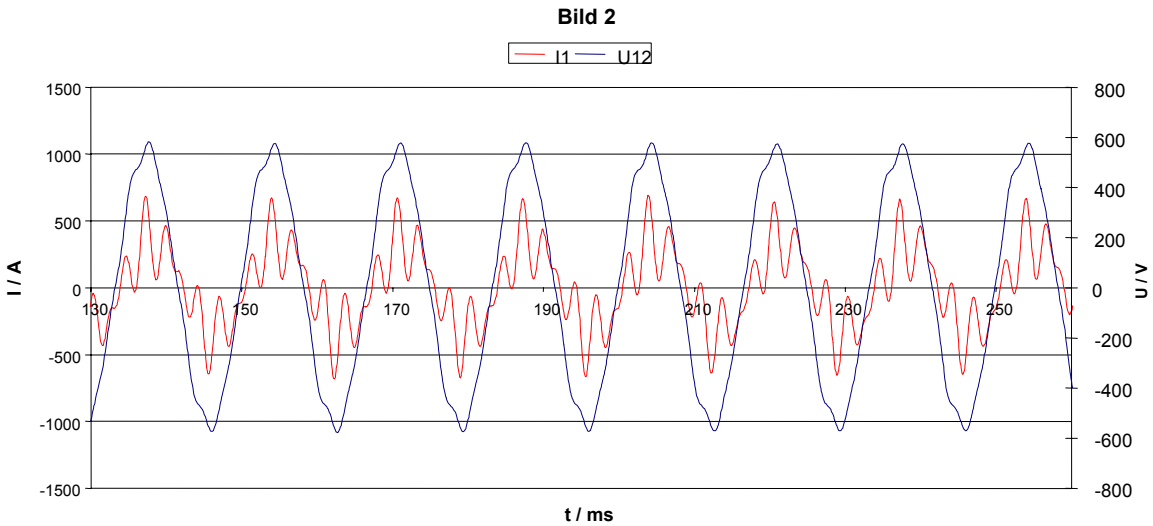
Zur Bestimmung der notwendigen Werte ist eine Netzanalyse notwendig!



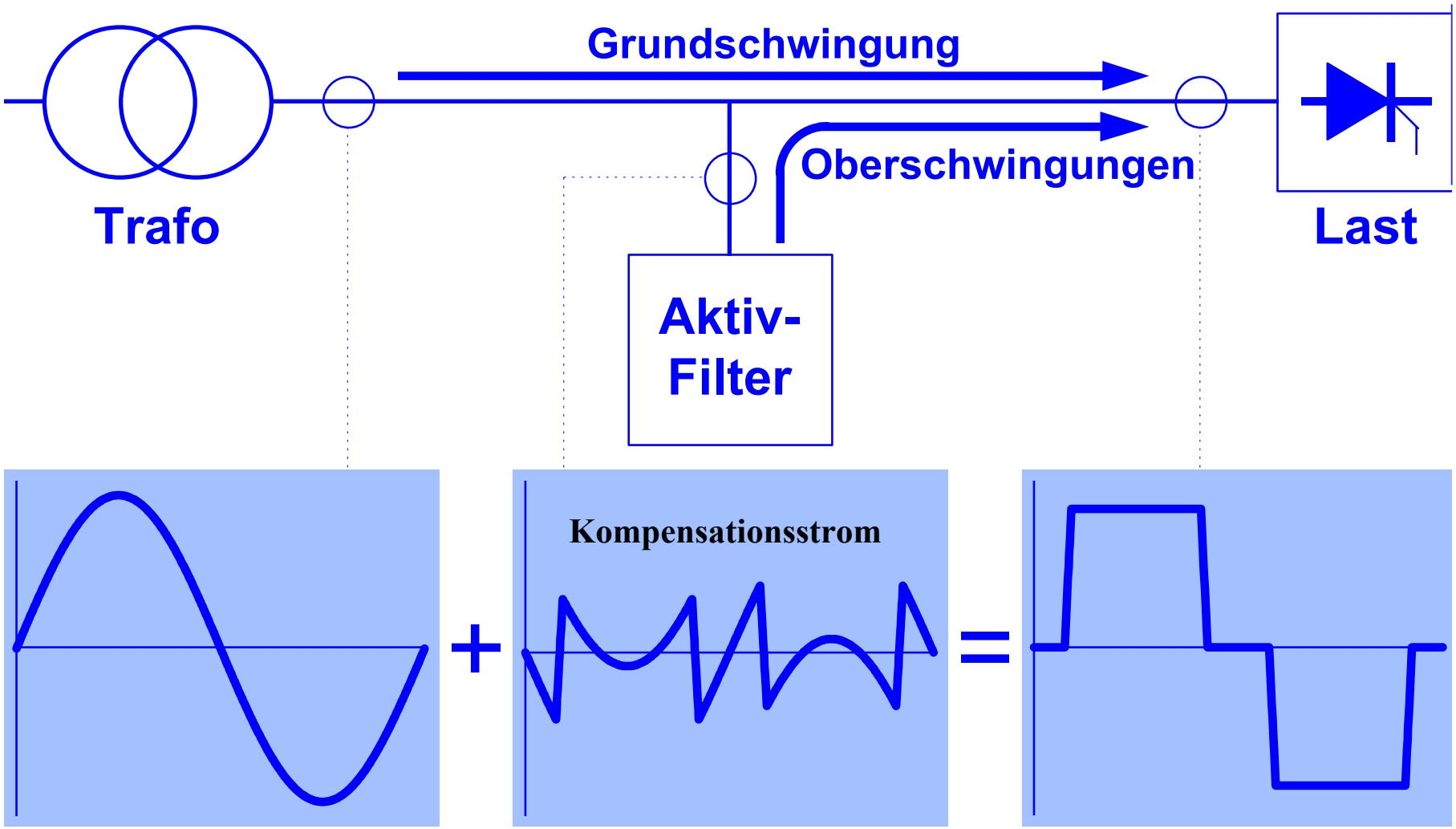
Strom- und Spannungsverlauf ohne Kompensation

Resonanzverstärkung durch unverdrosselte Kondensatoren

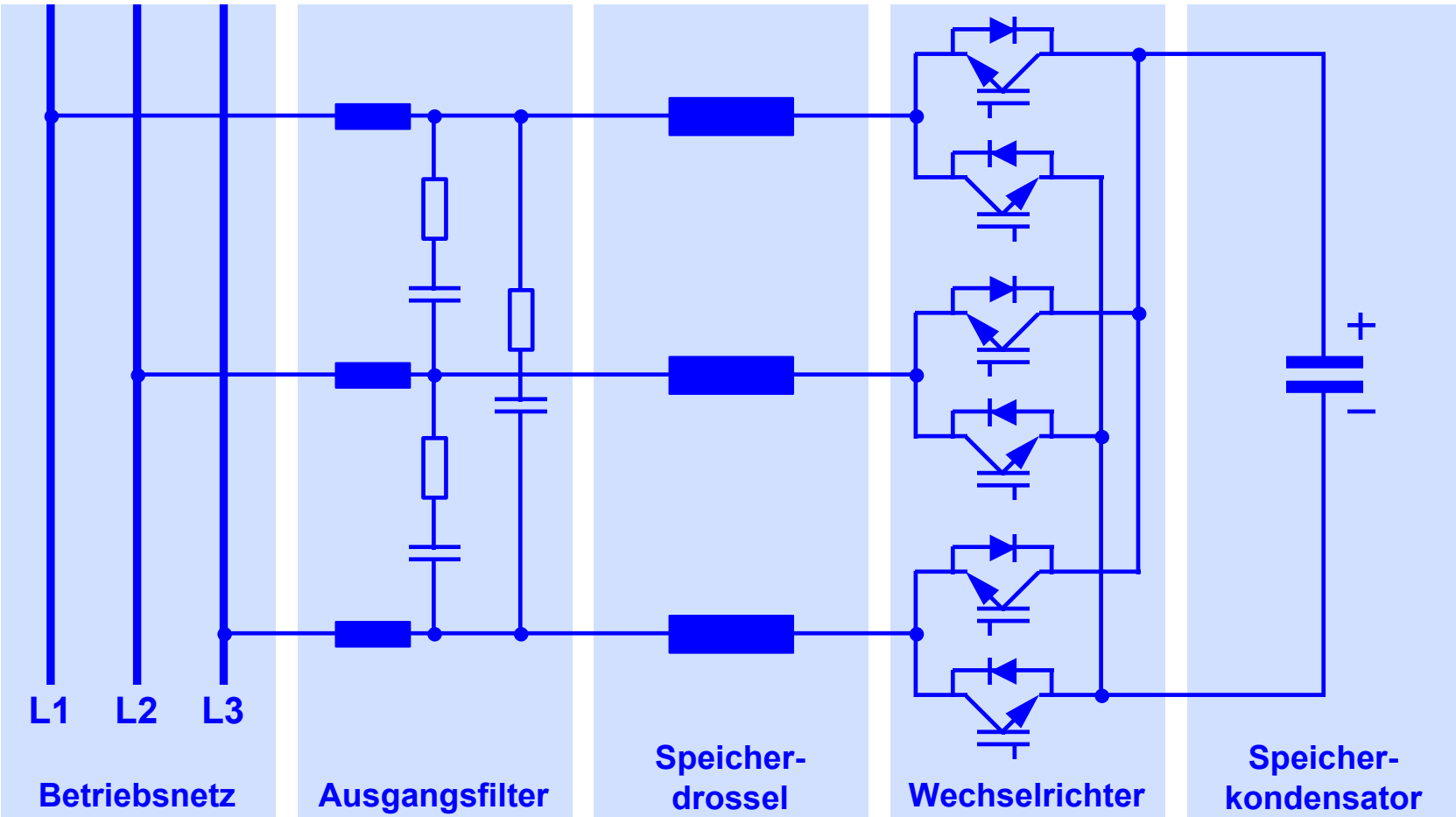
Strom- und Spannungsverlauf mit Kompensation

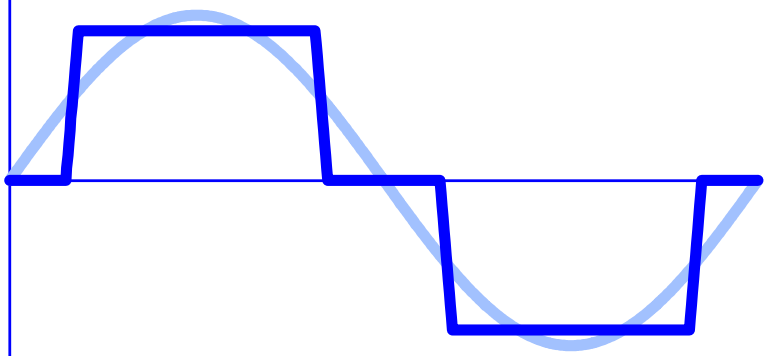


Wirkungsweise eines Aktivfilters

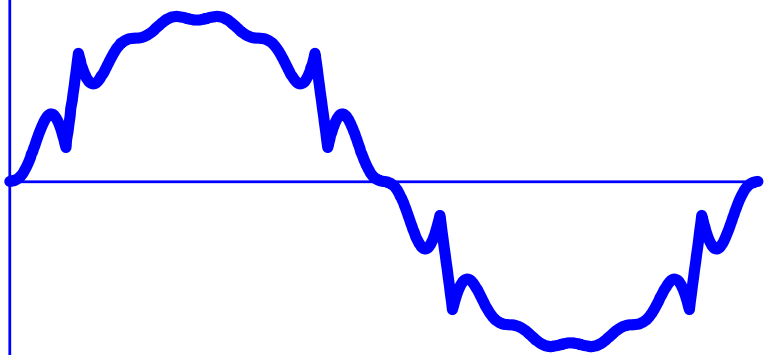


Bauprinzip eines Aktivfilters

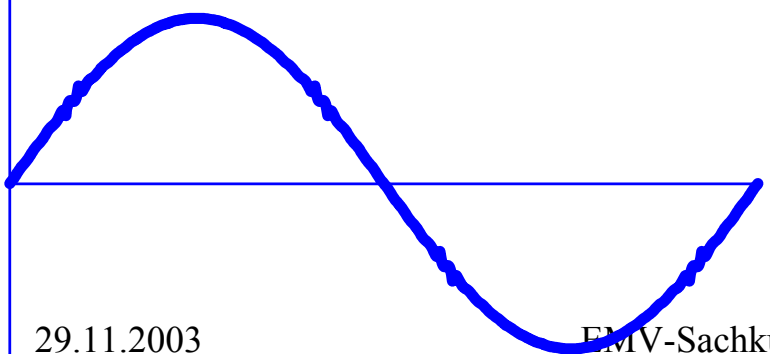




Trapezförmiger Laststrom



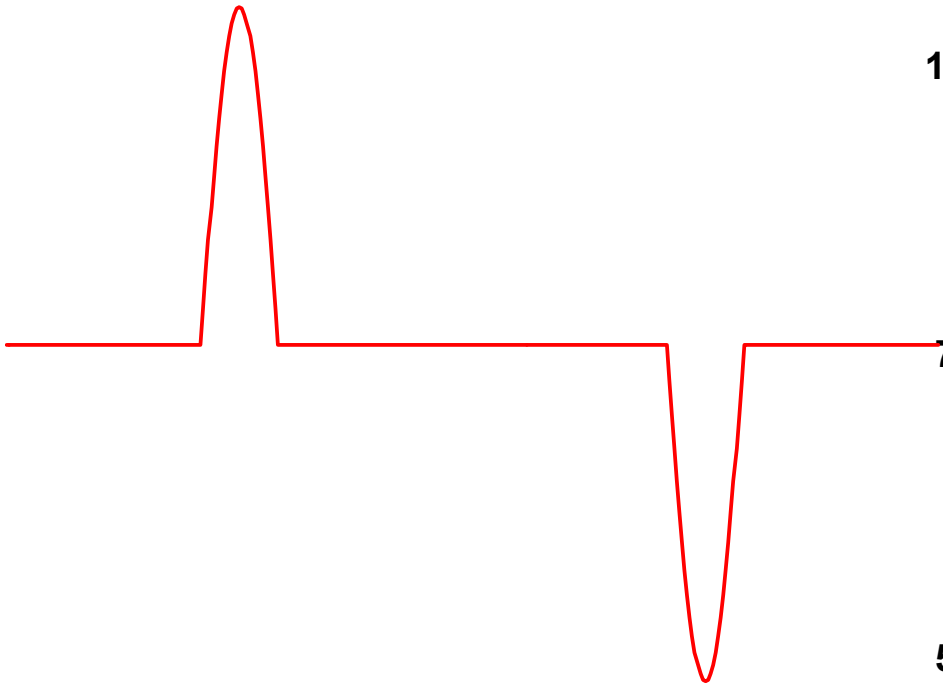
Aktivfilter 5. bis 13. Harmonische



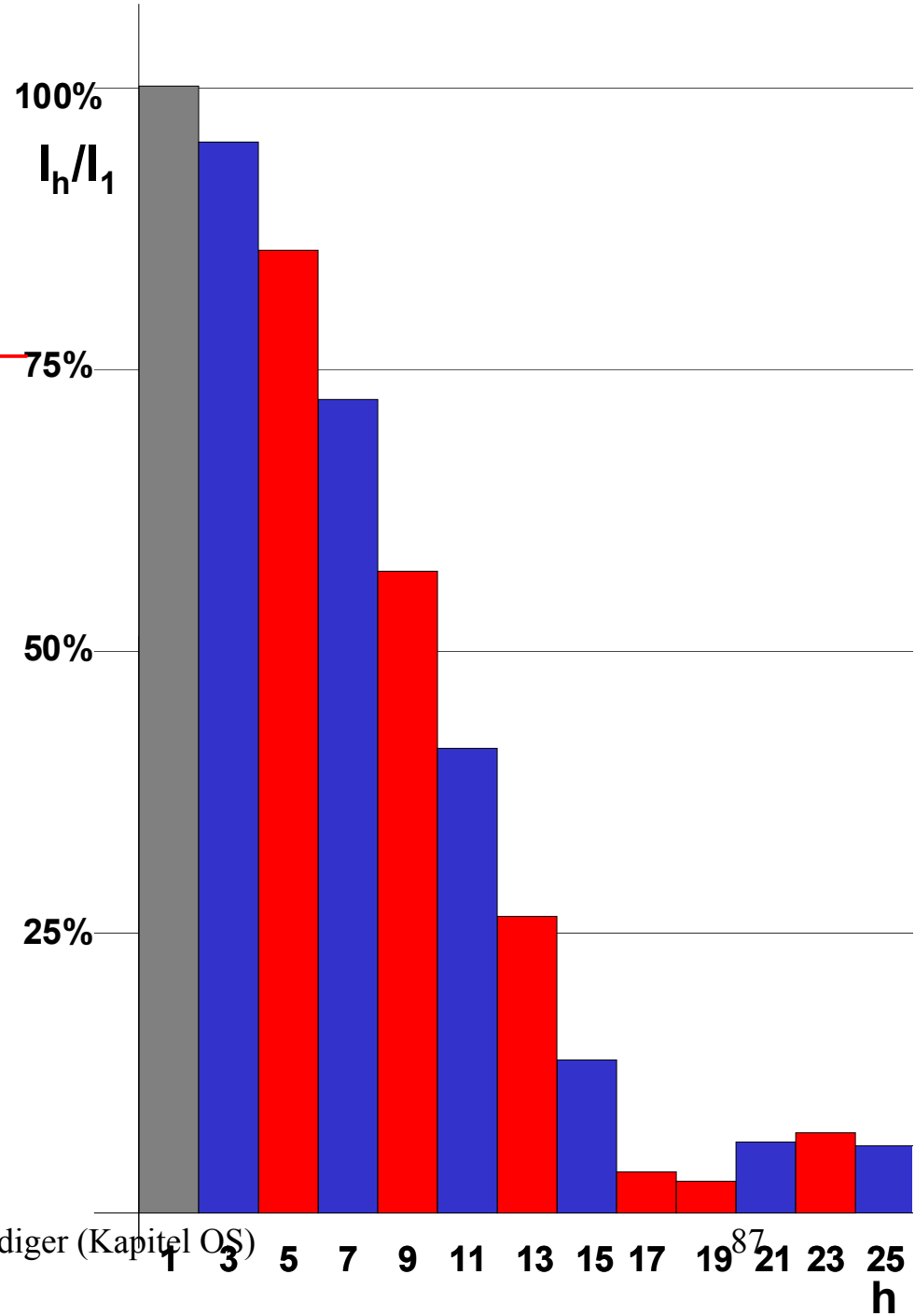
Aktivfilter 5. bis 49. Harmonische

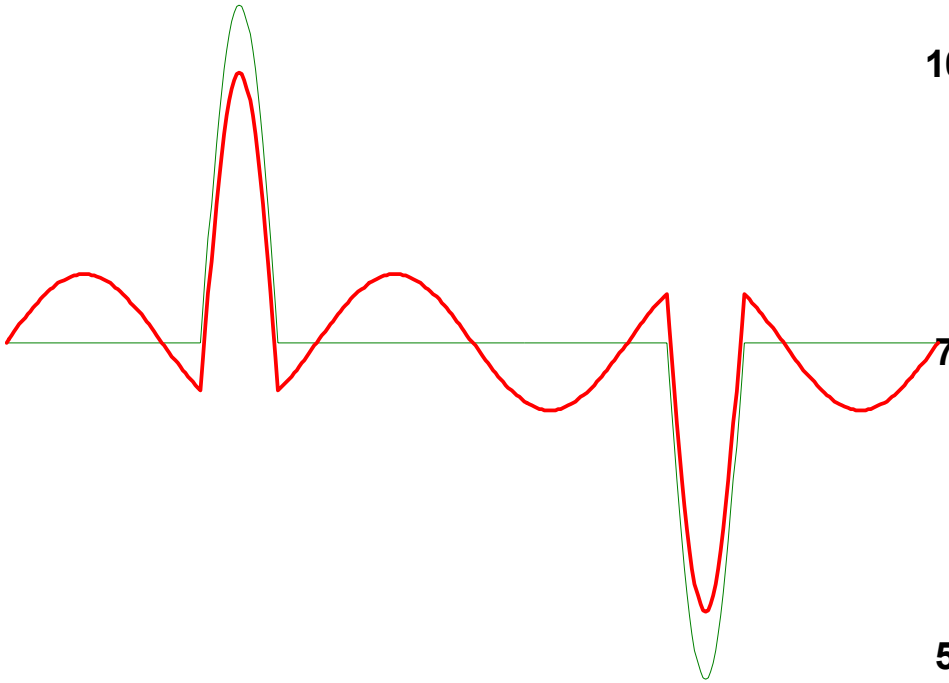
Der verfügbare Frequenzbereich eines Aktivfilters entscheidet über die Möglichkeit der Verbesserung der Spannungsqualität.

Insbesondere zur Reduzierung der Kommutierungen sind hohe Filterfrequenzen erforderlich

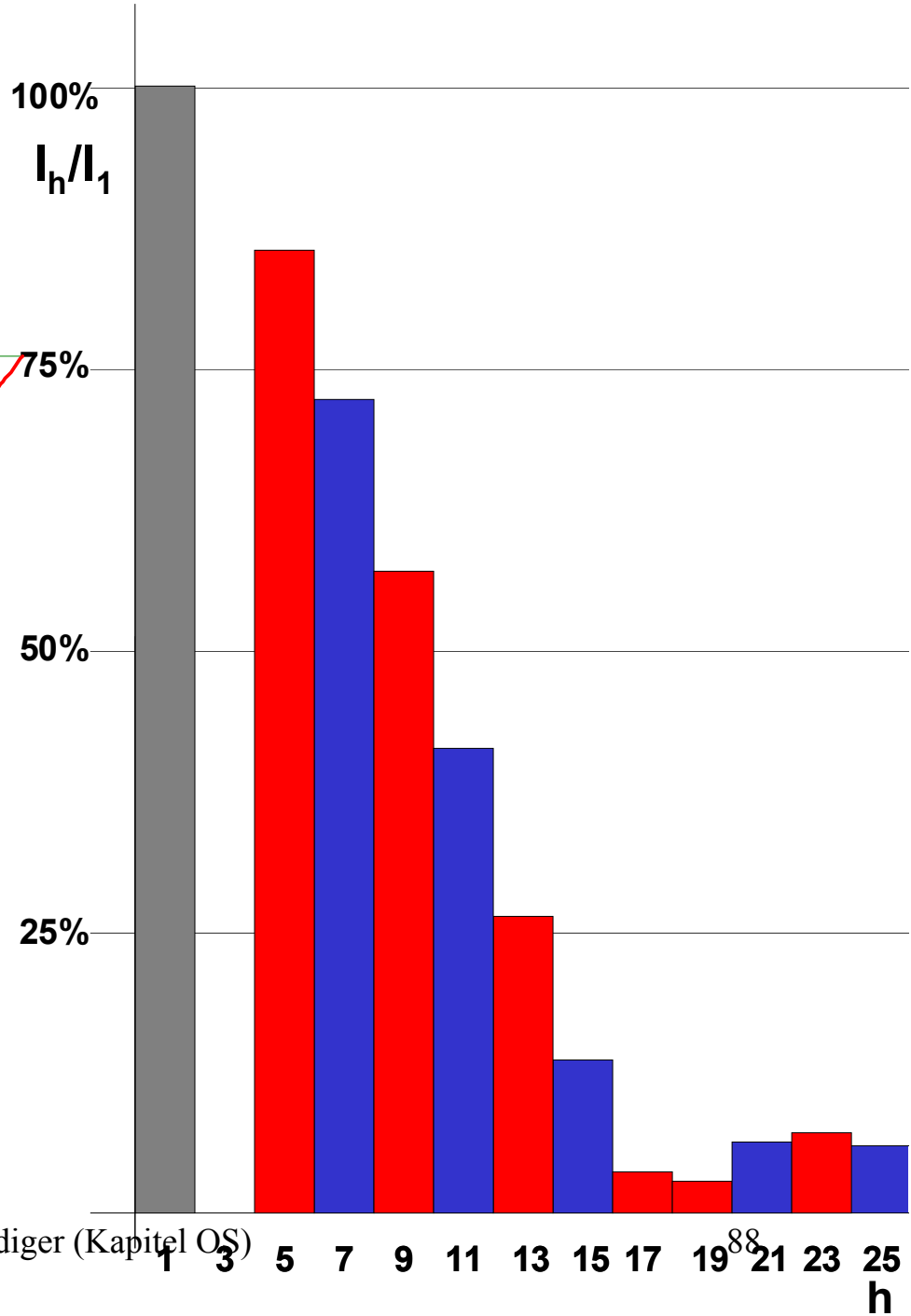


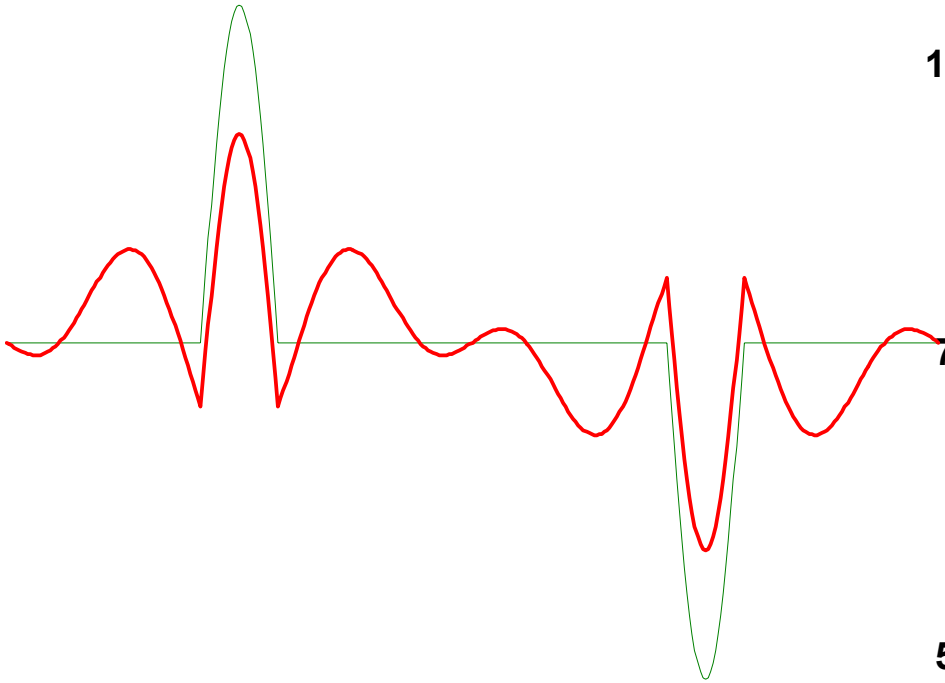
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



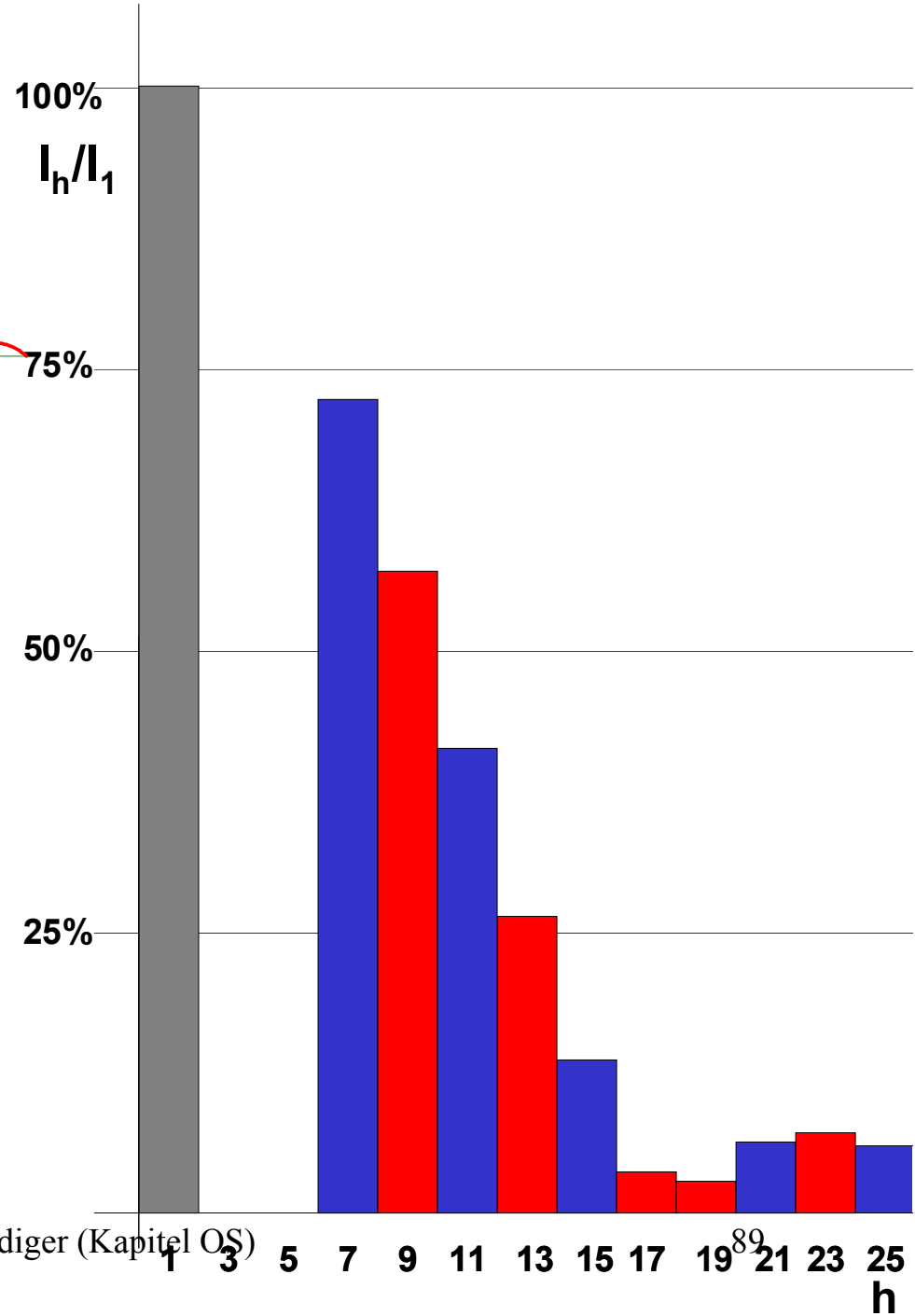


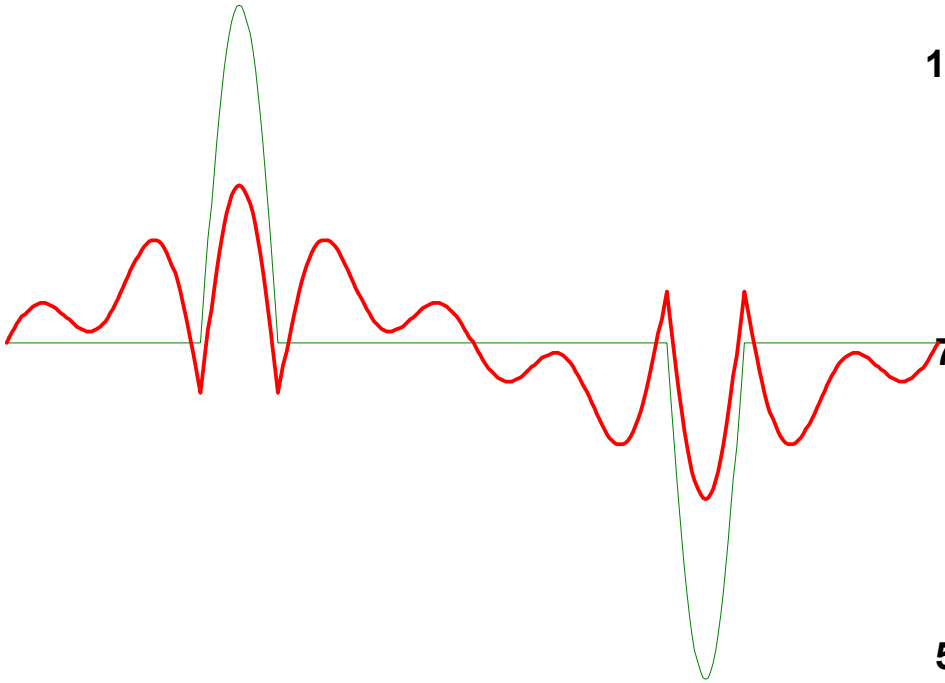
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



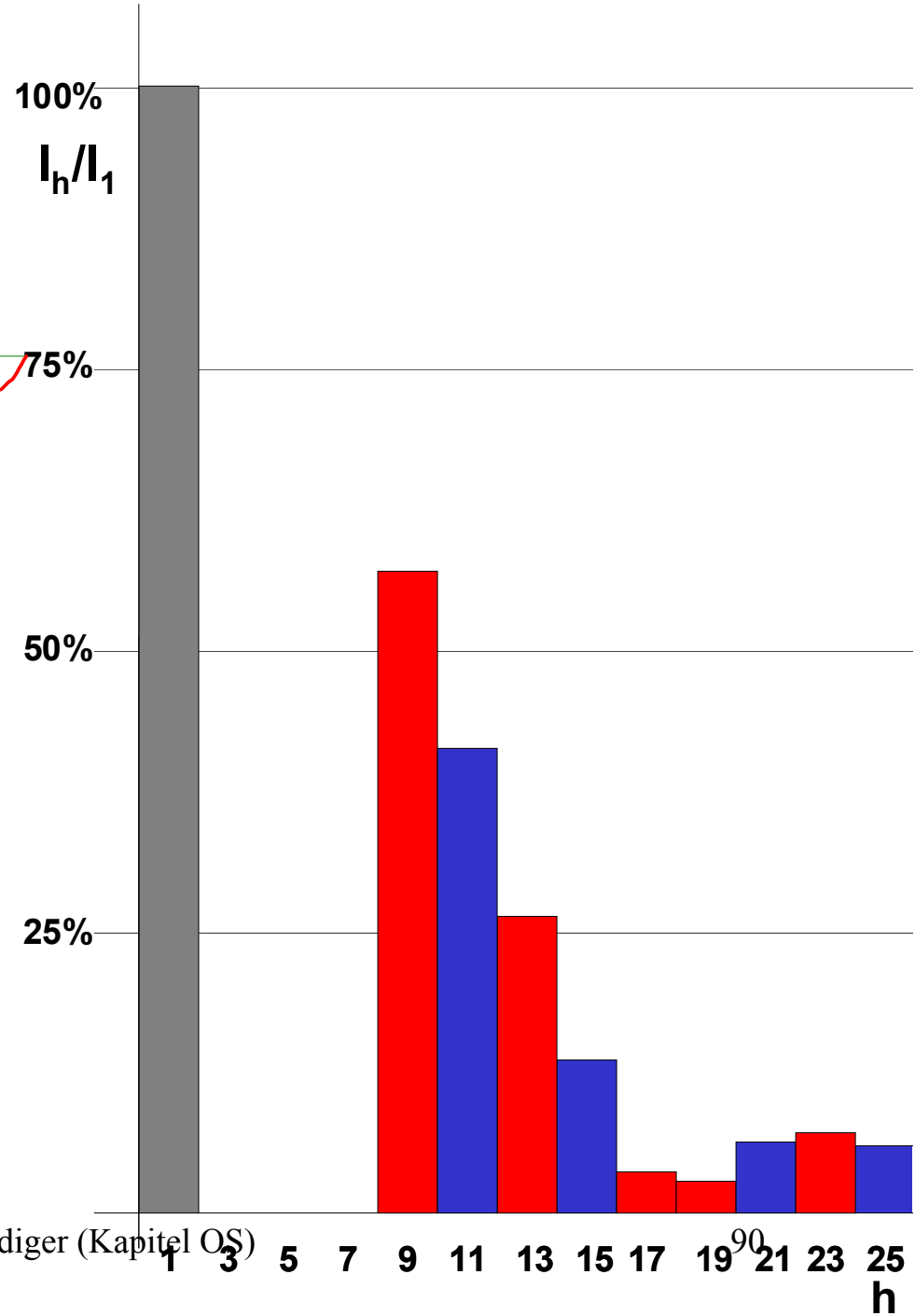


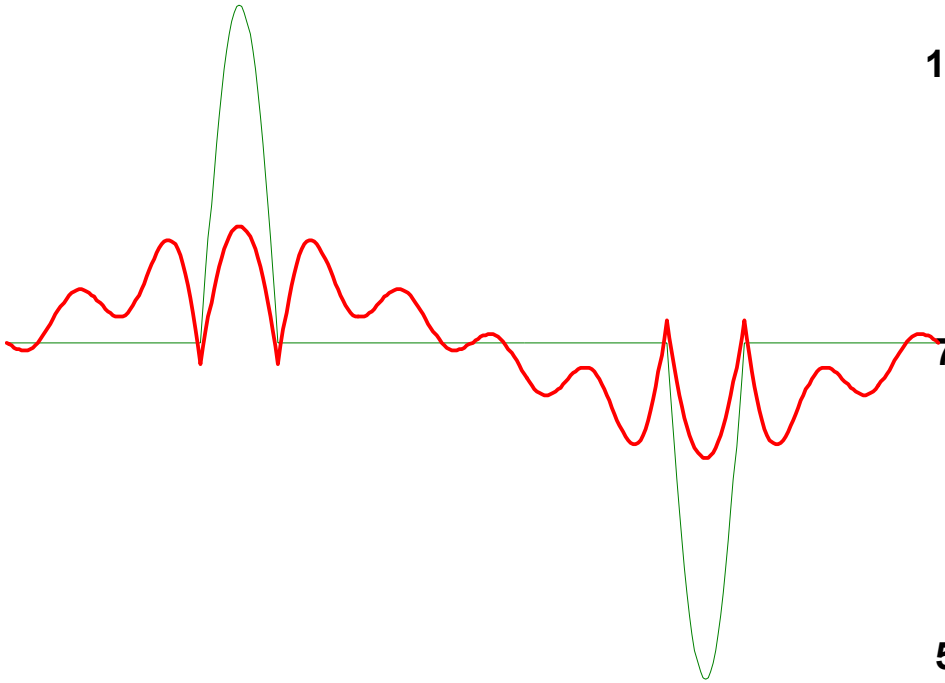
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



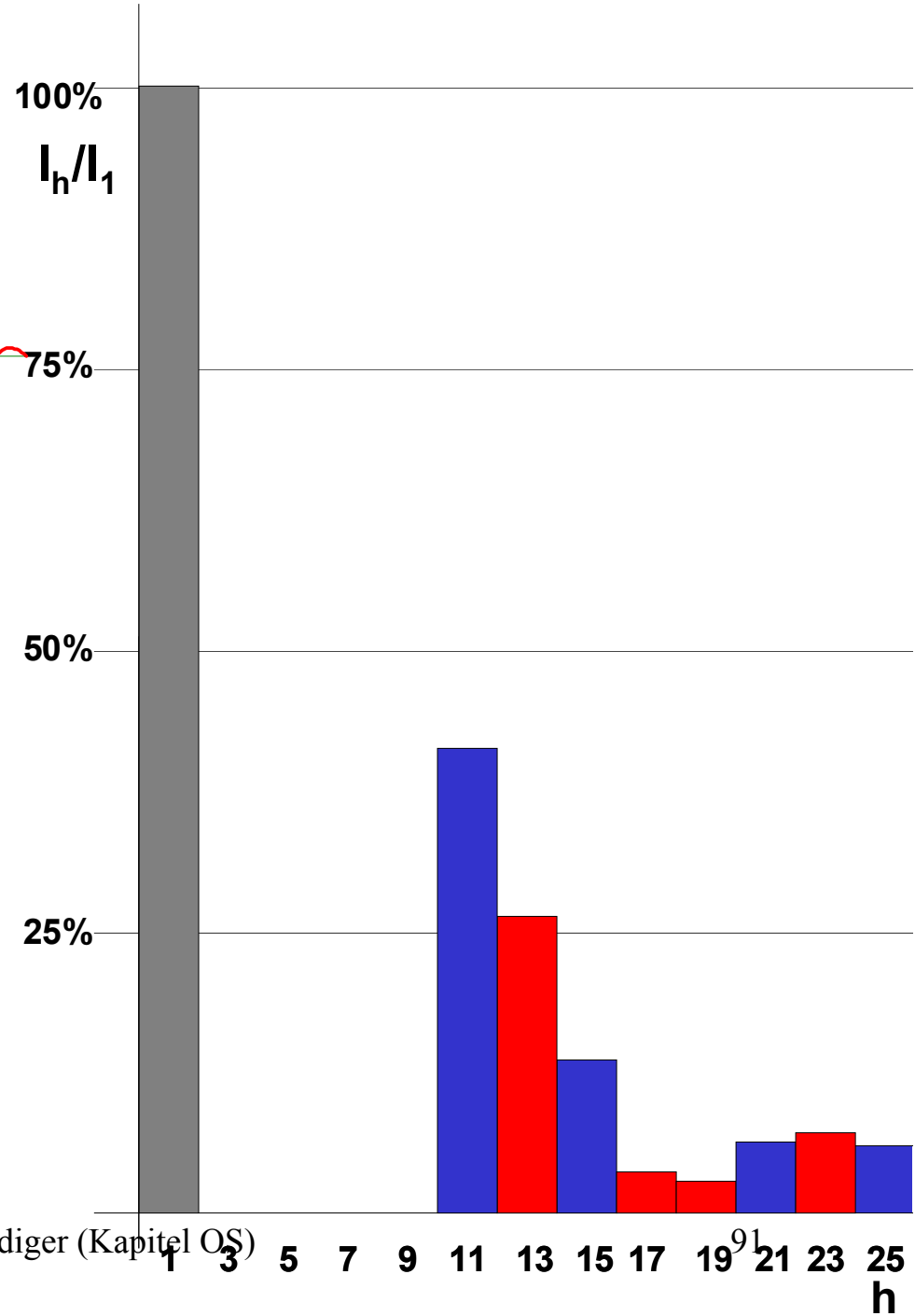


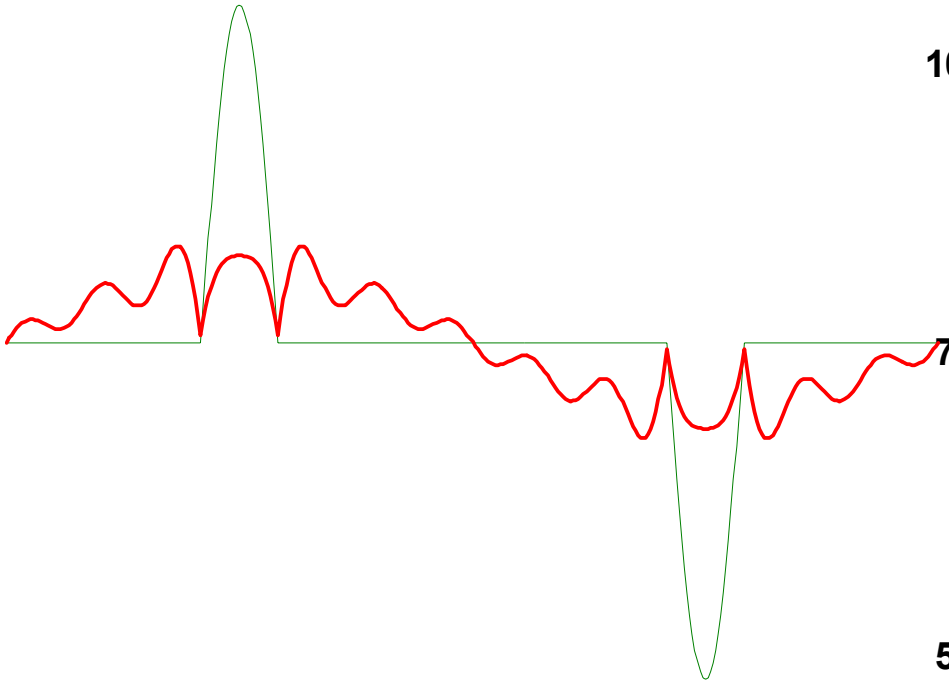
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



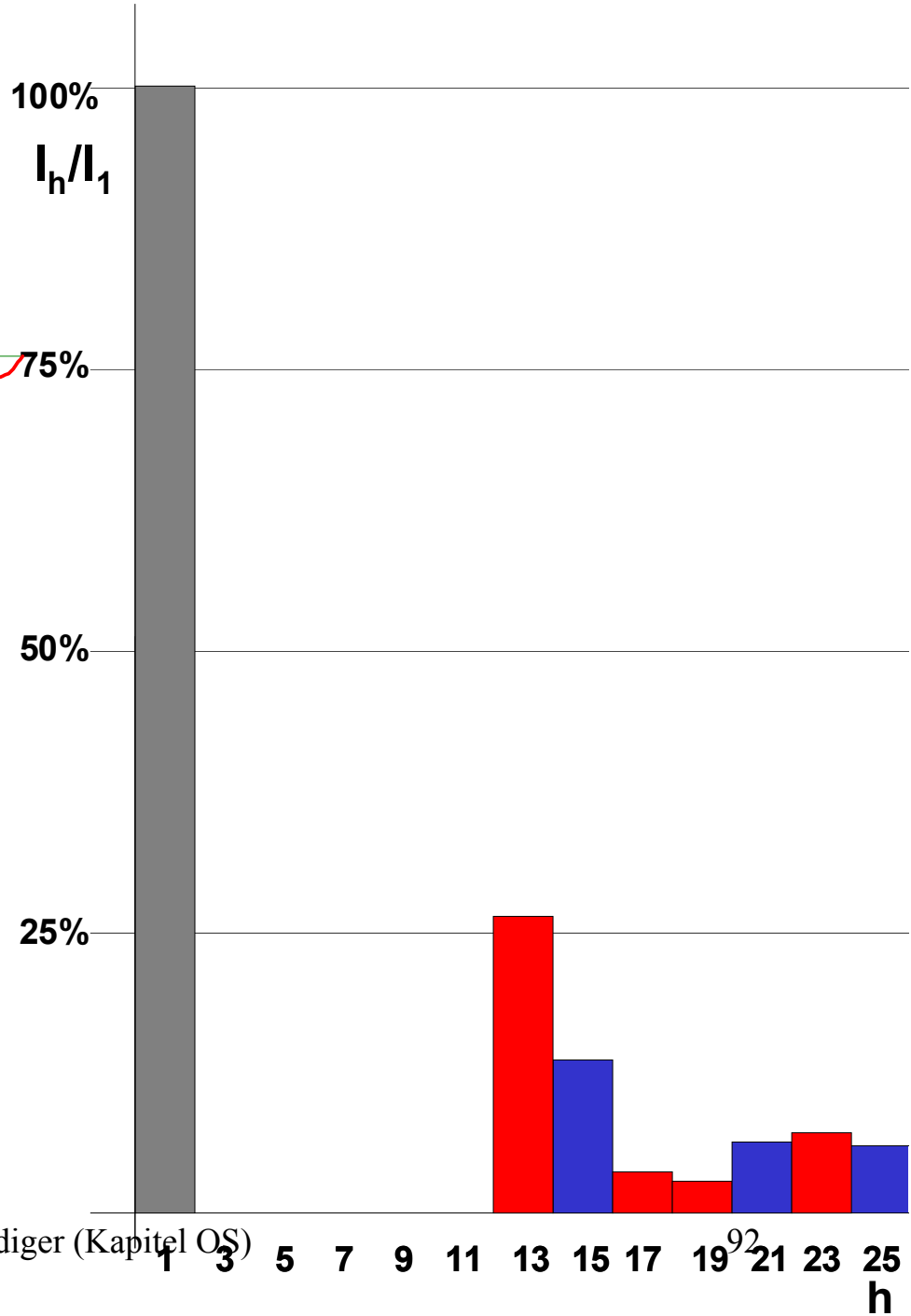


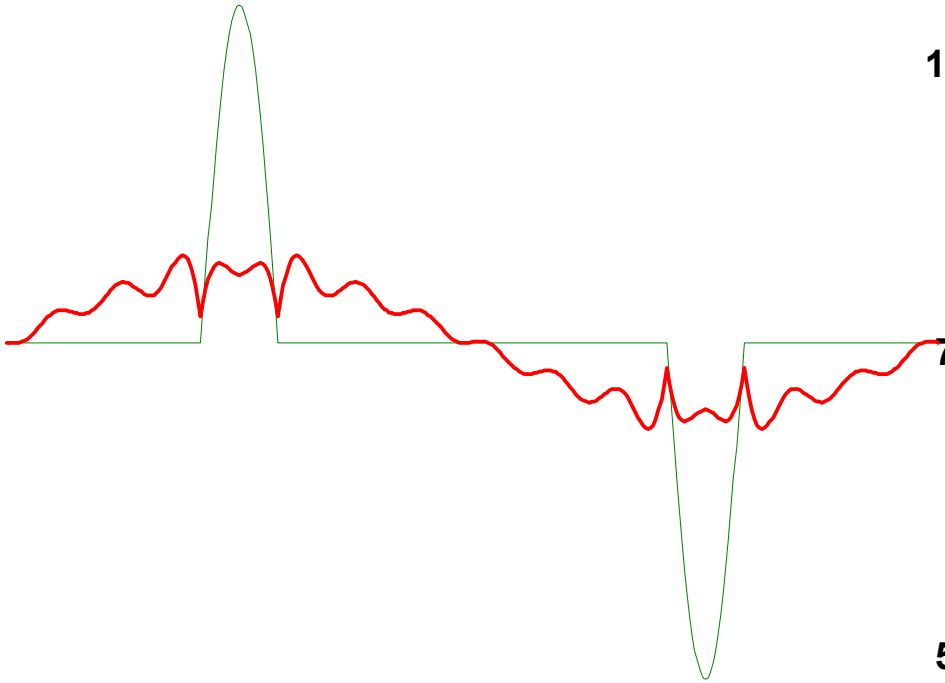
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



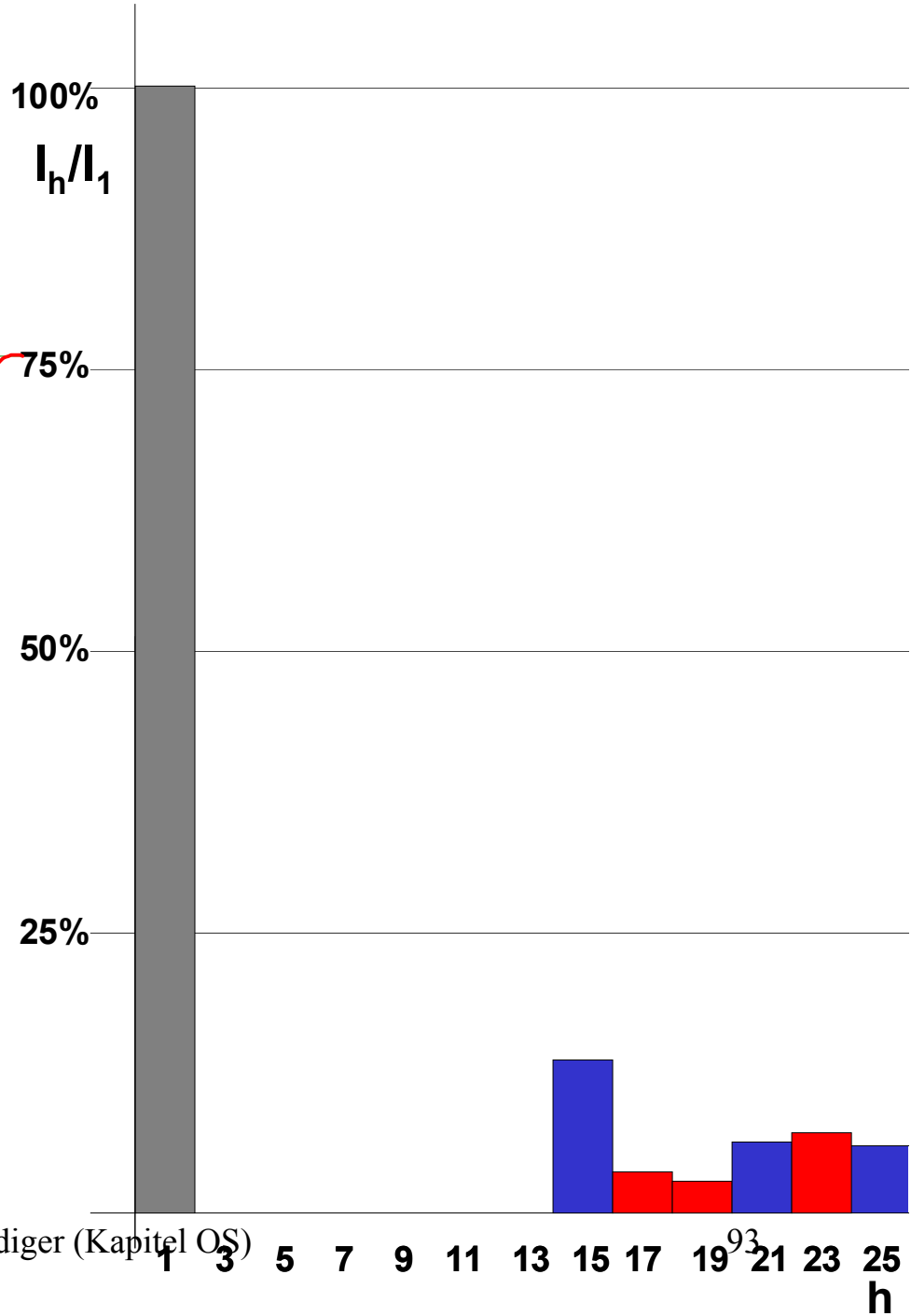


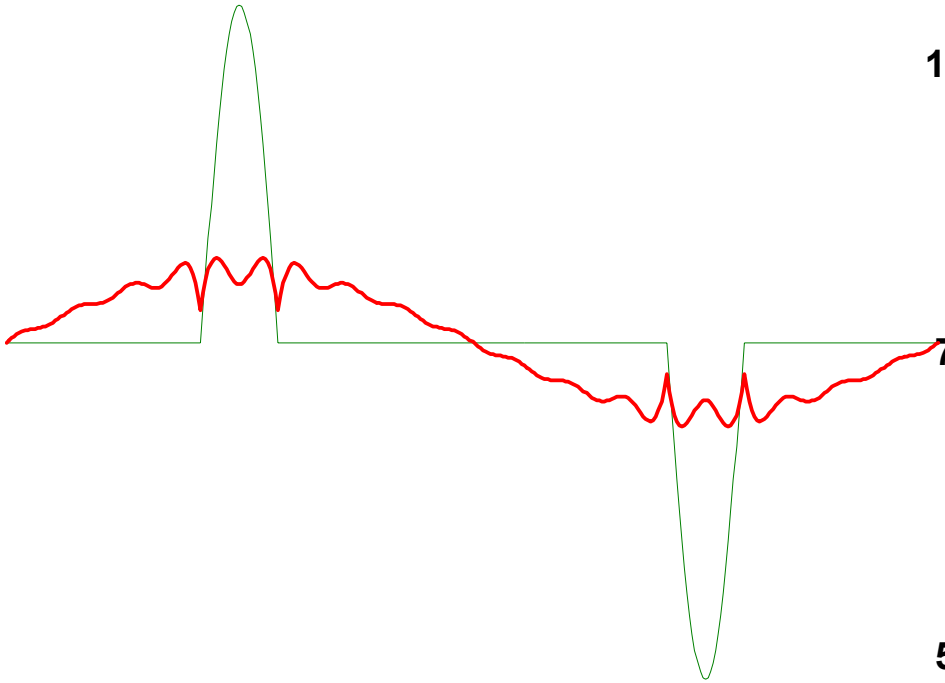
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters

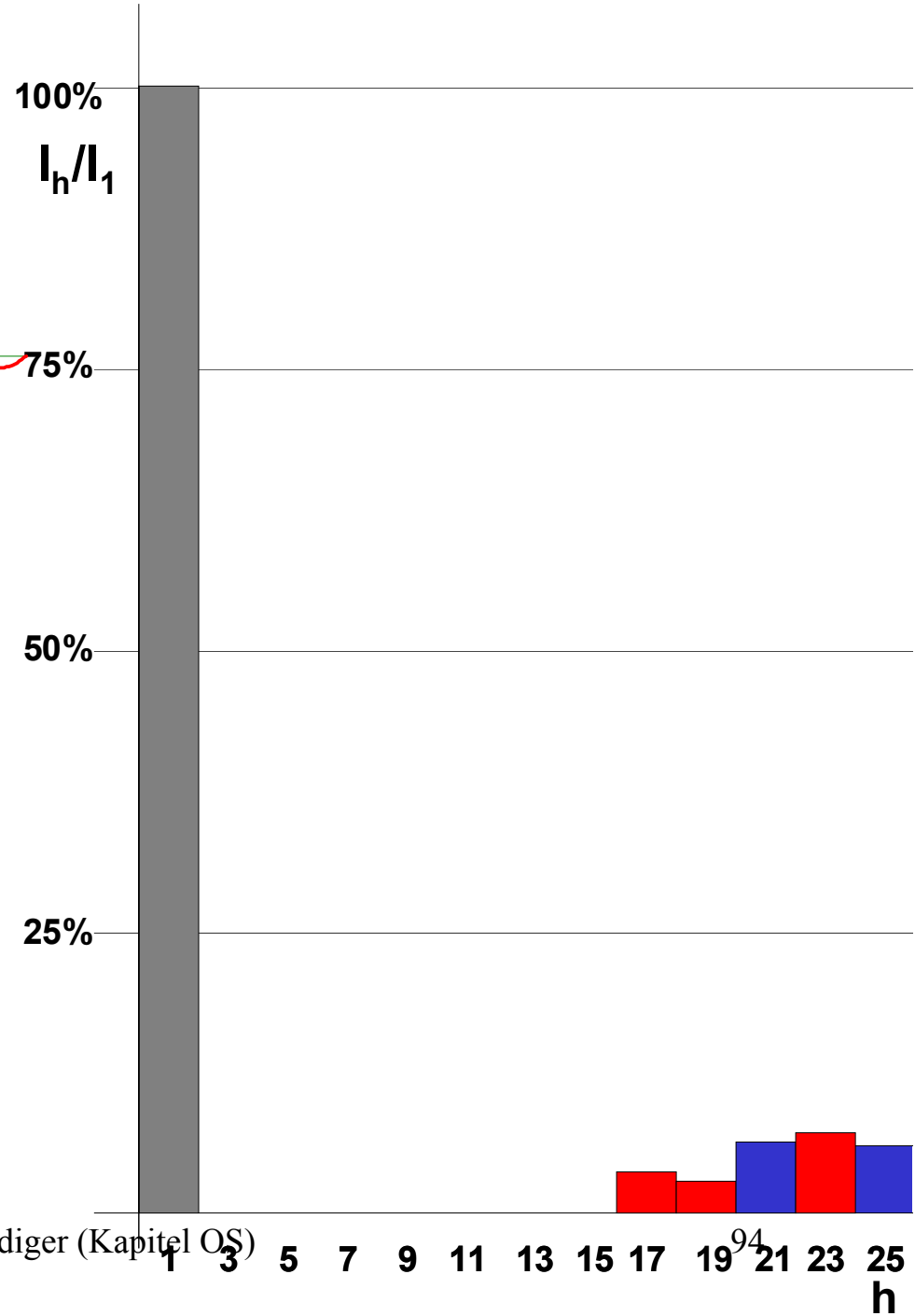




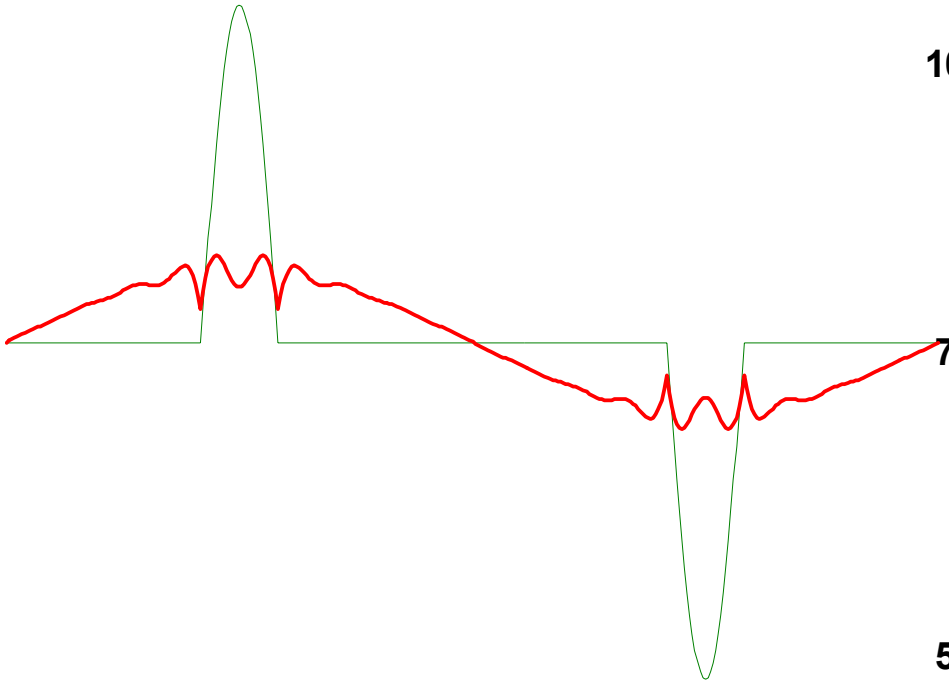
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



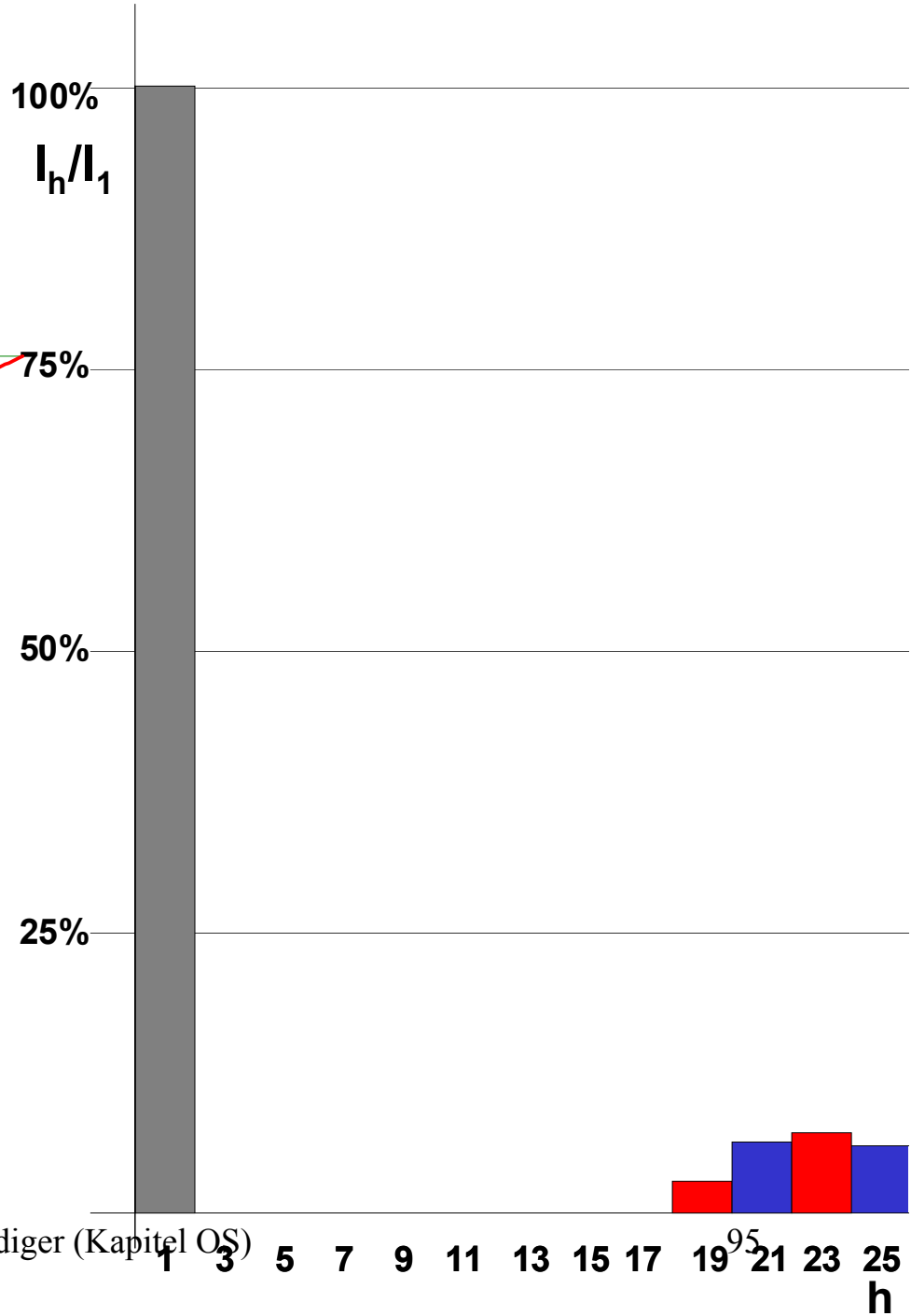


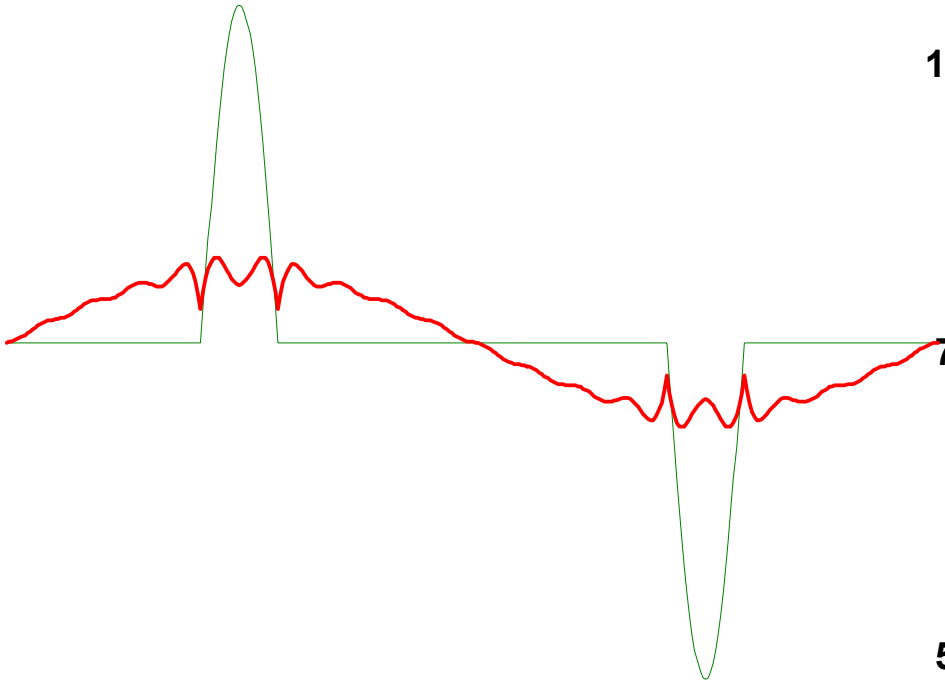


Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters

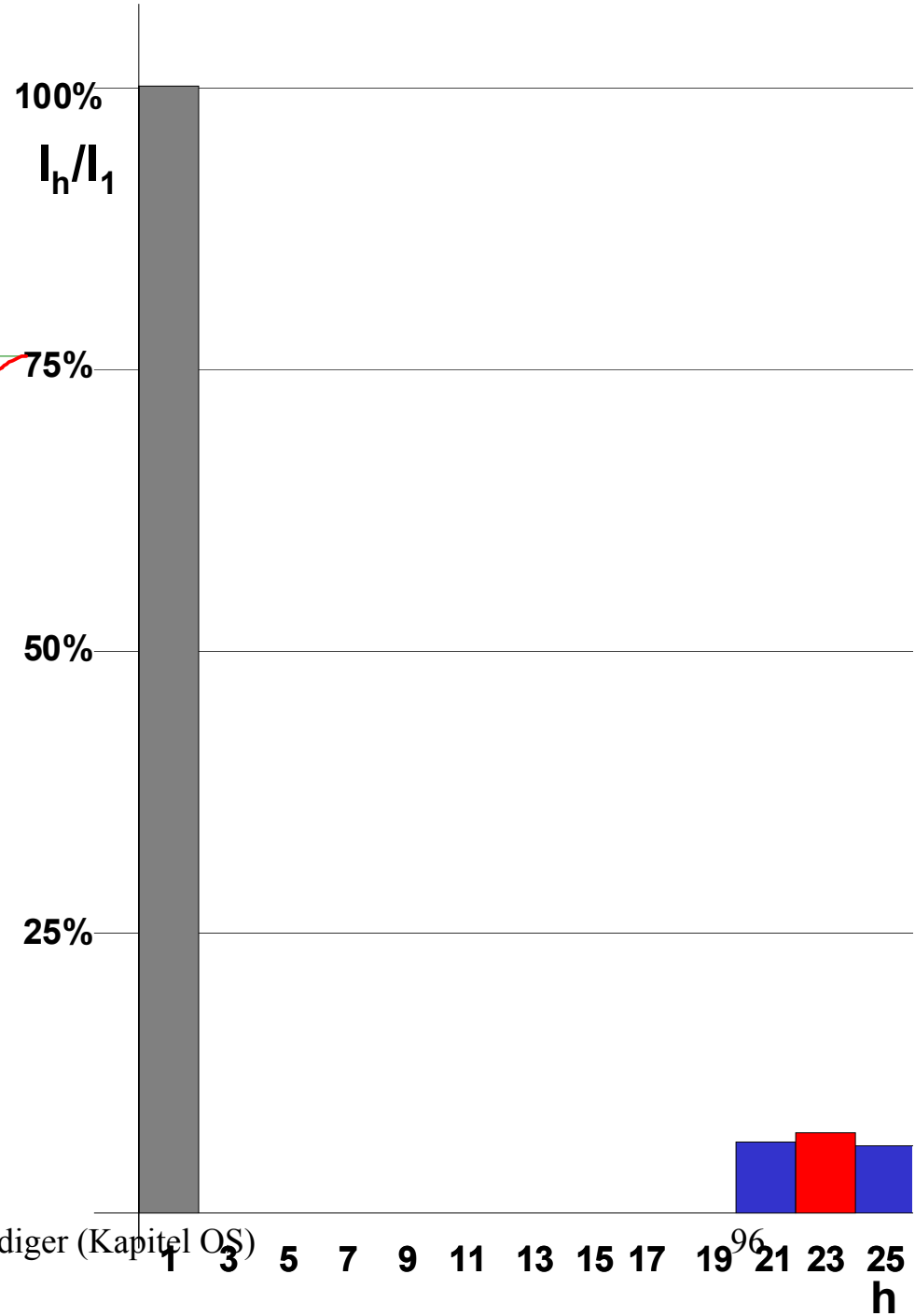


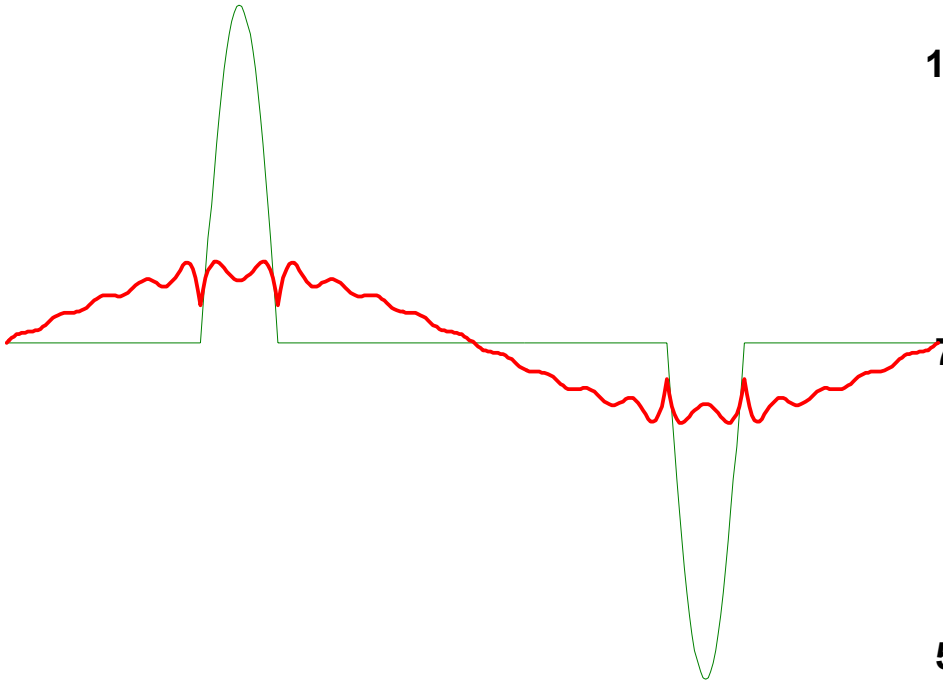
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



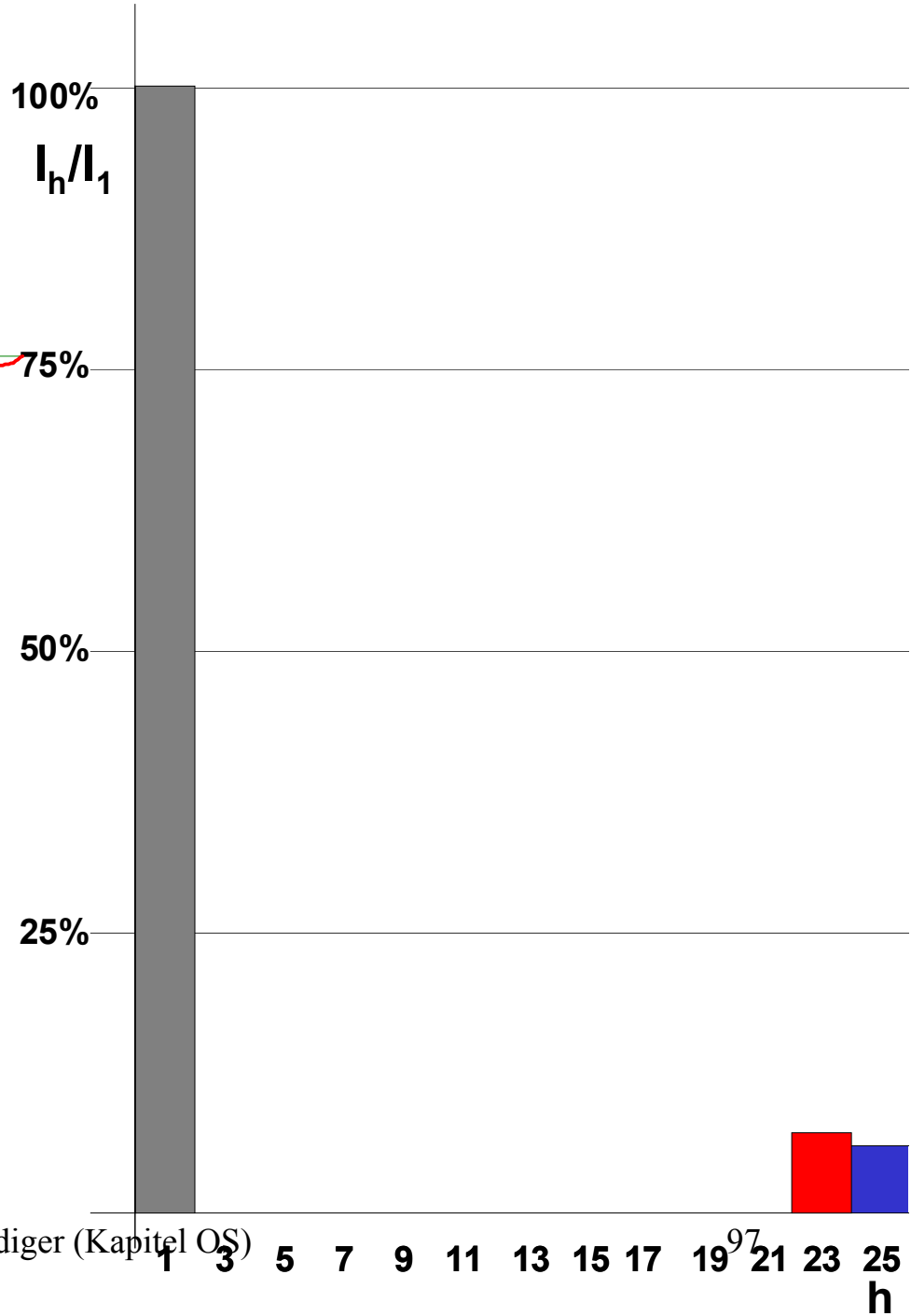


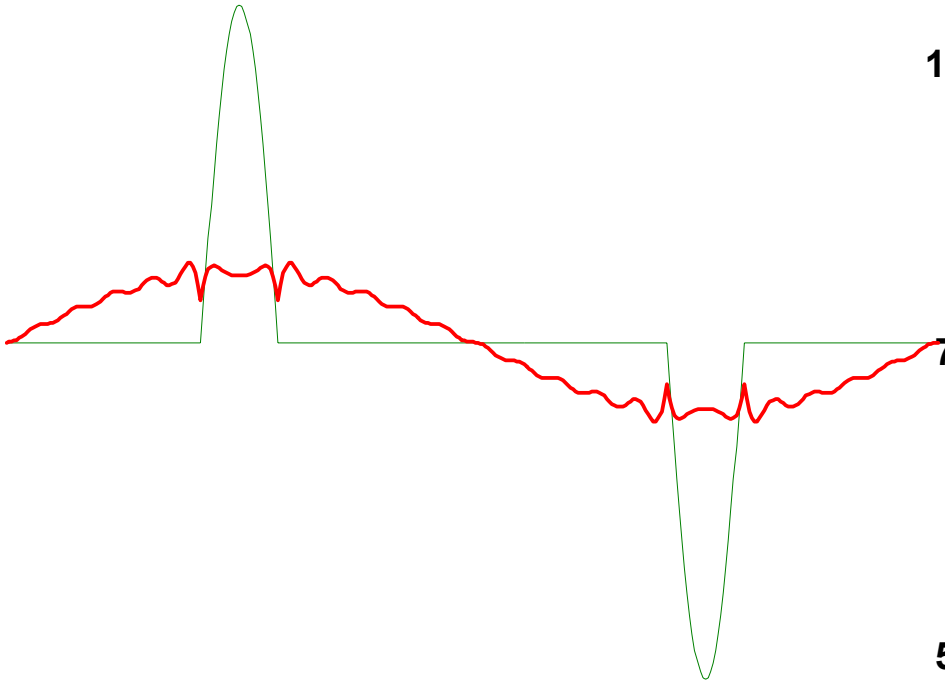
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters



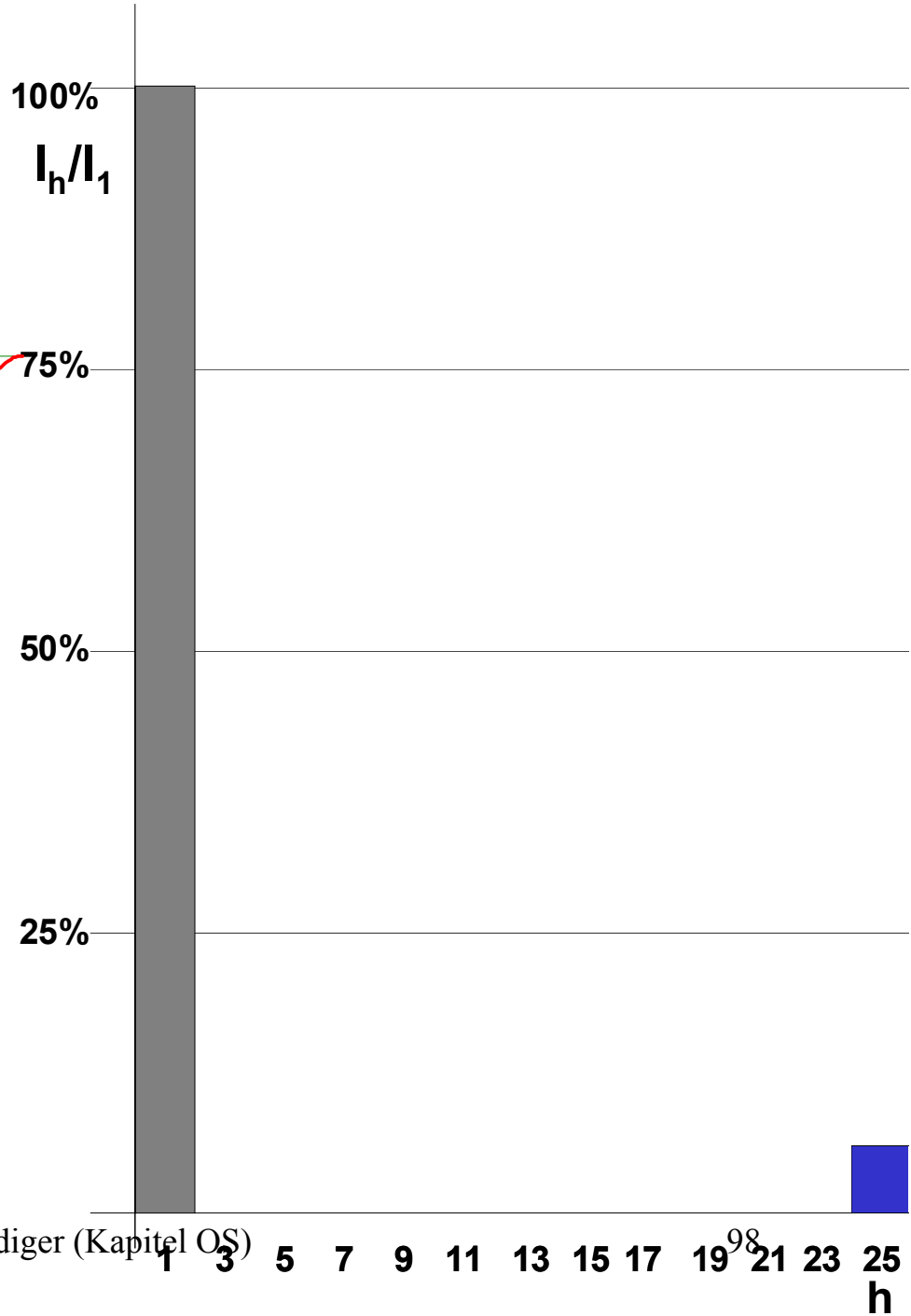


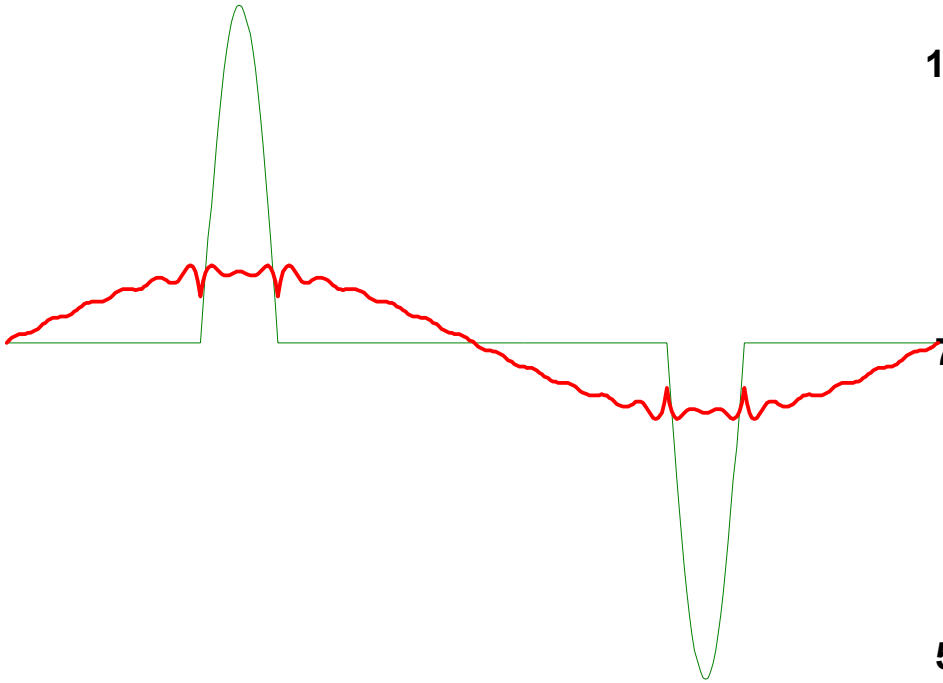
Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters

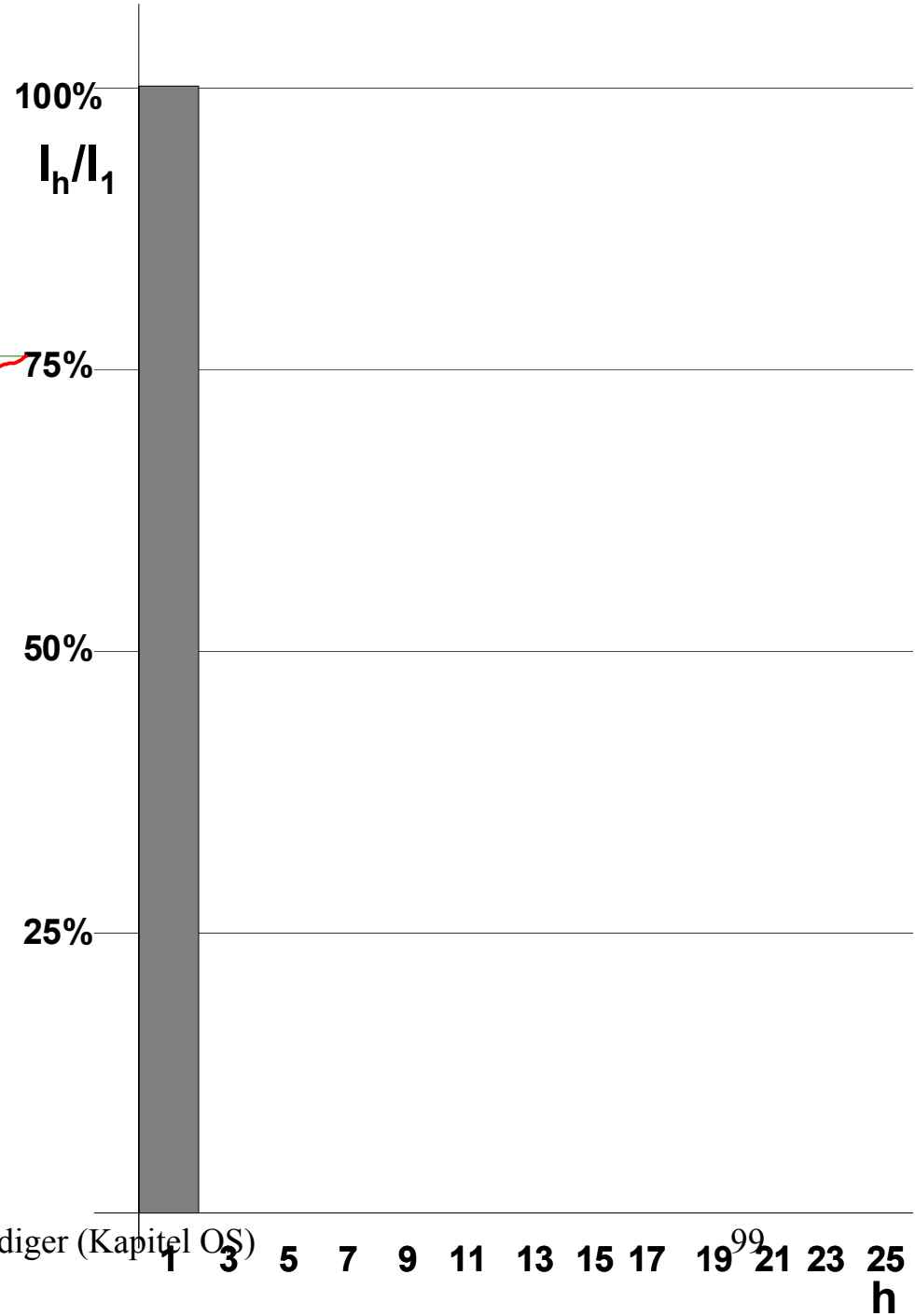




Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters





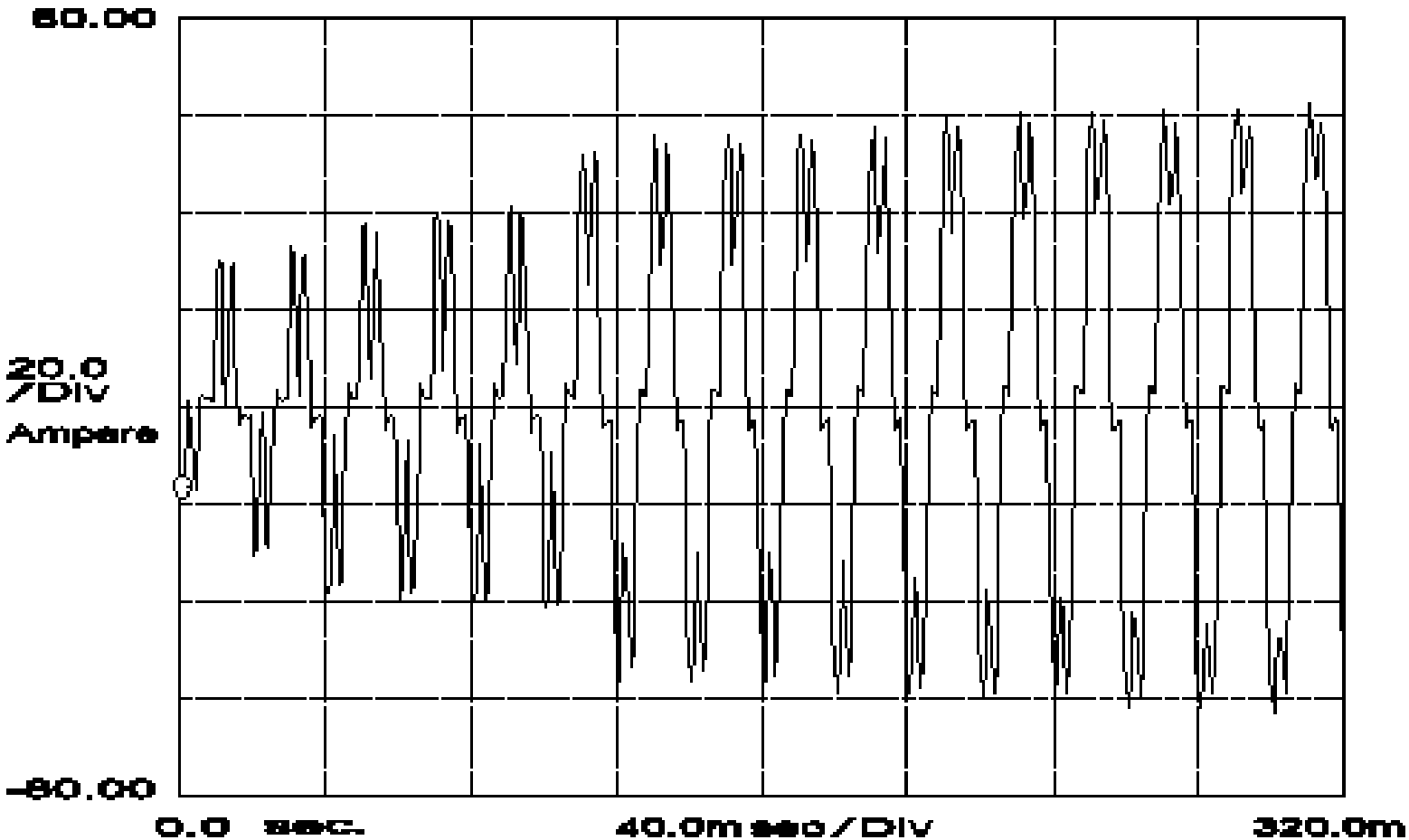


Selektives filtern einzelner Oberschwingungen mittels eines Aktivfilters

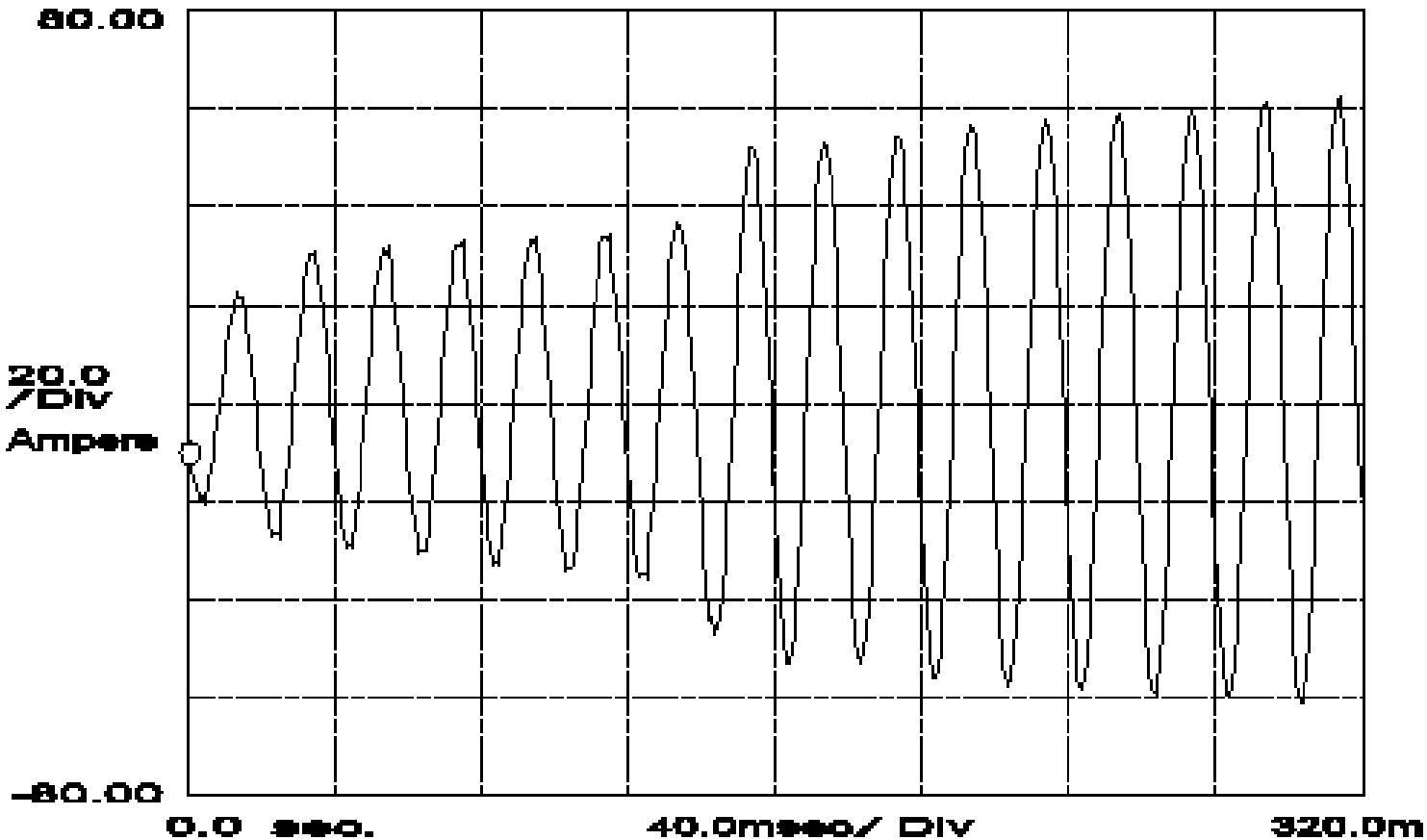
Restverzerrung durch höhere Frequenzen

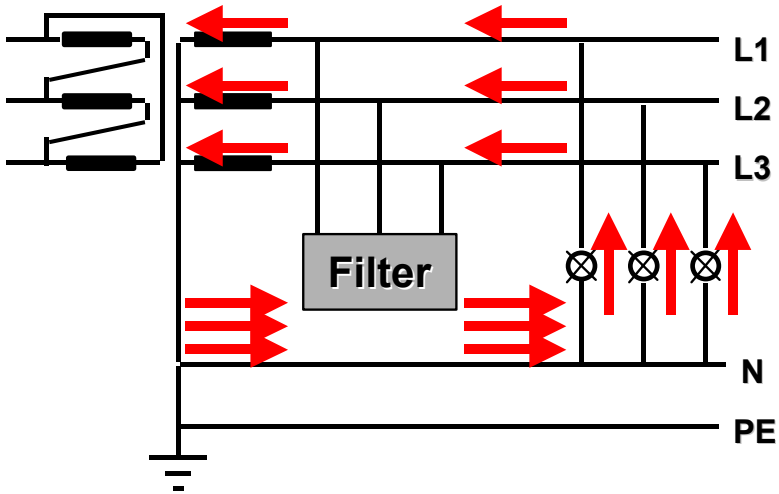
Aktive Netzfilterung (Beispiel)

Leiterstrom eines Fahrstuhlantriebes - unkompensiert

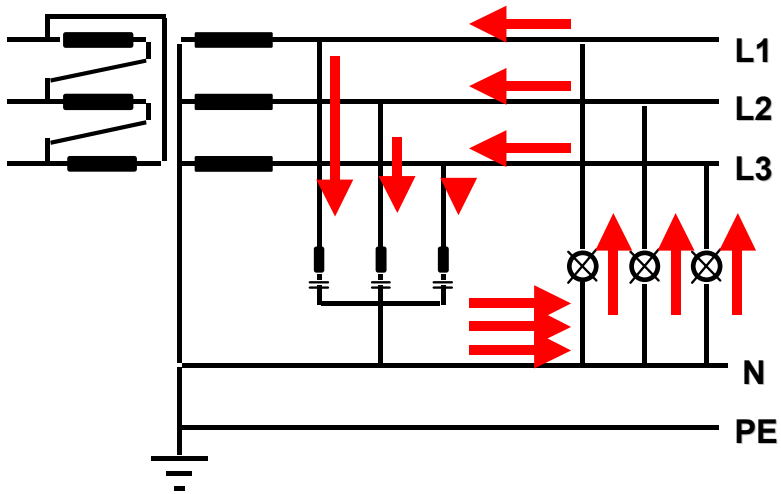


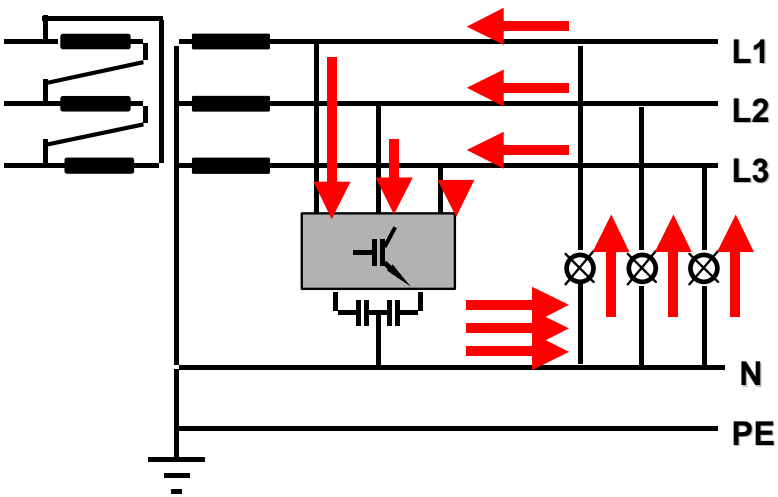
Leiterstrom eines Fahrstuhlantriebes mit aktiver Filterung





Filter ohne N-Leiteranbindung haben keine entlastende Wirkung





Filtermaßnahmen zwischen Phase und N-Leiter lenken den 150Hz-Strom lediglich um, entlasten also nur den Trafo, nicht aber das lastseitige Netz

Verträglichkeitspegel

- **Klasse 1:** Geschützte Versorgungen, wie DV-Einrichtungen, Automatisierungseinrichtungen, Ausrüstung technischer Labors.
- **Klasse 2:** Verknüpfungspunkte mit dem öffentlichen Netz.
- **Klasse 3:** Anlageninterne Anschlusspunkte, wie z.B. häufiger Motorstart bei hohen Anlaufströmen, Schweißmaschinen, Stromrichteranlagen, etc.

Oberschw.	Verträglichkeitspegel In %			
*)	Netz	Industrieanlagen		
		Kl. 1	Kl. 2	KL. 3
5	6	3	6	8
7	6	3	5	7
11	3,5	3	3,5	5
13	3	3	3	4,5
17	2	2	2	4
19	1,5	1,5	1,5	4
23	1,5	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	1,5	3,5
**)				
3	5	3	5	6
9	1,5	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,3	0,3	2
21	0,2	0,2	0,2	1,75
***)				
2	2	2	2	3
4	1	1	1	1,5
6	0,5	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	0,5	1

Klasse 1: Geschützte Versorgungen, wie DV-Einrichtungen, Automatisierungseinrichtungen, Ausrüstung technischer Labors.

Klasse 2: Verknüpfungspunkte mit dem öffentlichen Netz.

Klasse 3: Anlageninterne Anschlusspunkte, wie z.B. häufiger Motorstart bei hohen Anlaufströmen, Schweißmaschinen, Stromrichteranlagen, etc.

*) ungeradzahlige, nicht durch drei teilbare Werte

**) ungeradzahlige durch drei teilbare Werte

***) geradzahlige Werte

$$\text{Verträglichkeitspegel} = \frac{U_h}{U} \cdot 100$$

Uh: Effektivwert der h-ten Oberschwingung

U: Effektivwert der Netzspannung

Netzanalyse

- Darstellung des vorhandenen Netzes
- Feststellen der Daten der Netzeinspeisung bzw. des Trafos (Leistung, Kurzschlussleistung, Kurzschlussspannung)
- Messen der Netzoberschwingungen ohne verzerrende Betriebsmittel (beispielsweise Stromrichter) und Überprüfung auf EN/VDE Grenzwerte
- Zuschalten von verzerrenden Betriebsmitteln und Messen der Netzoberschwingungen
- Auswerten der Ergebnisse und Überprüfung auf Überschreiten der Grenzwerte
- ggf. Vorsehen notwendiger Maßnahmen (Glättungsdrosseln, Kommutierungsdrosseln, verdrosselte Kompensationsanlagen, aktive Filter).

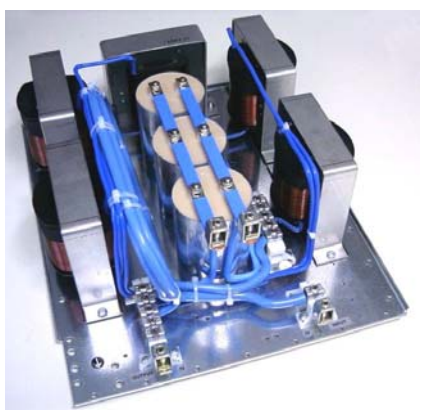
150 Hz Filter (N-Leiter-Filter) Typenreihe THX

THX / THF Nennstrom	Sicherung Nennstrom	Trafo Nennlstg.
25 A	25 A	--
63 A	63 A	--
80 A	80 A	--
100 A	100 A	--
125 A	125 A	--
160 A	160 A	--
200 A	200 A	--
250 A	250 A	160 kVA
315 A	315 A	200 kVA
400 A	400 A	250 kVA

THX / THF Nennstrom	Sicherung Nennstrom	Trafo Nennlstg.
500 A	500 A	315 kVA
630 A	630 A	400 kVA
800 A	800 A	500 kVA
1000 A	1000 A	630 kVA
1250 A	1250 A	800 kVA
1600 A	--	1000 kVA
2000 A	--	1250 kVA
2500 A	--	1600 kVA
3000 A	--	2000 kVA
3750 A	--	2500 kVA

Die Anlagenauswahl richtet sich stets nach dem Nennstrom des Netzbereiches

(Parallel-Resonanz kreis)

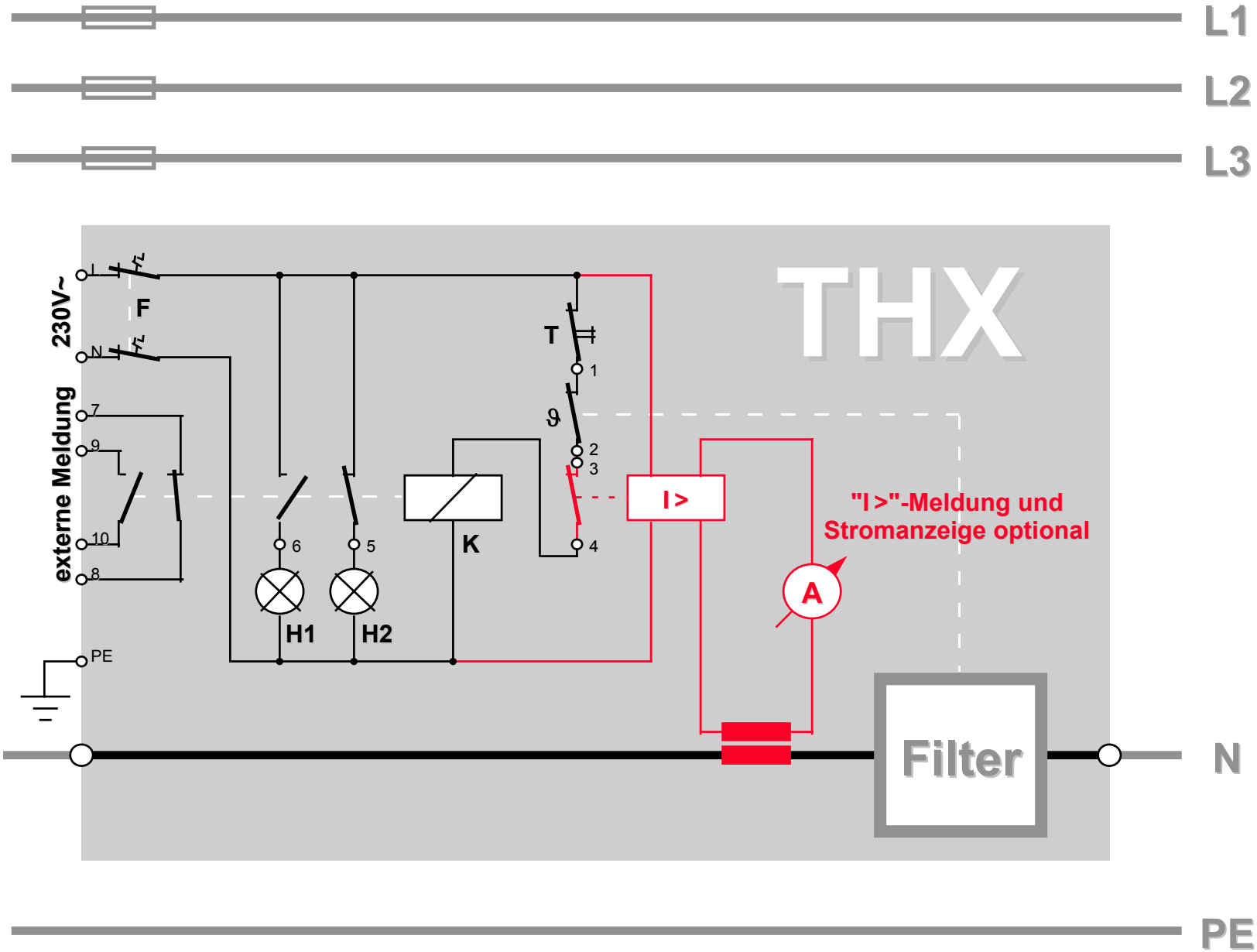


Belastbarkeit THX

- Dauerbelastbarkeit 1,1 I_N
- großer Prüfstrom 1,6 I_N (VDE 0636 Teil 21)
- Kurzschlussfestigkeit 25 I_N

Anlagenschutz:

Temperatur- und Stromüberwachung


L1
L2
L3
THX
230V~
L
N
F
externe Meldung
7
9
10
8
PE
T
1
ϑ
2
3
4
6
5
H1
H2
K
I >
"I >"-Meldung und
Stromanzeige optional
A
Filter
N
PE

Problemerkennung durch einfache Strommessung!

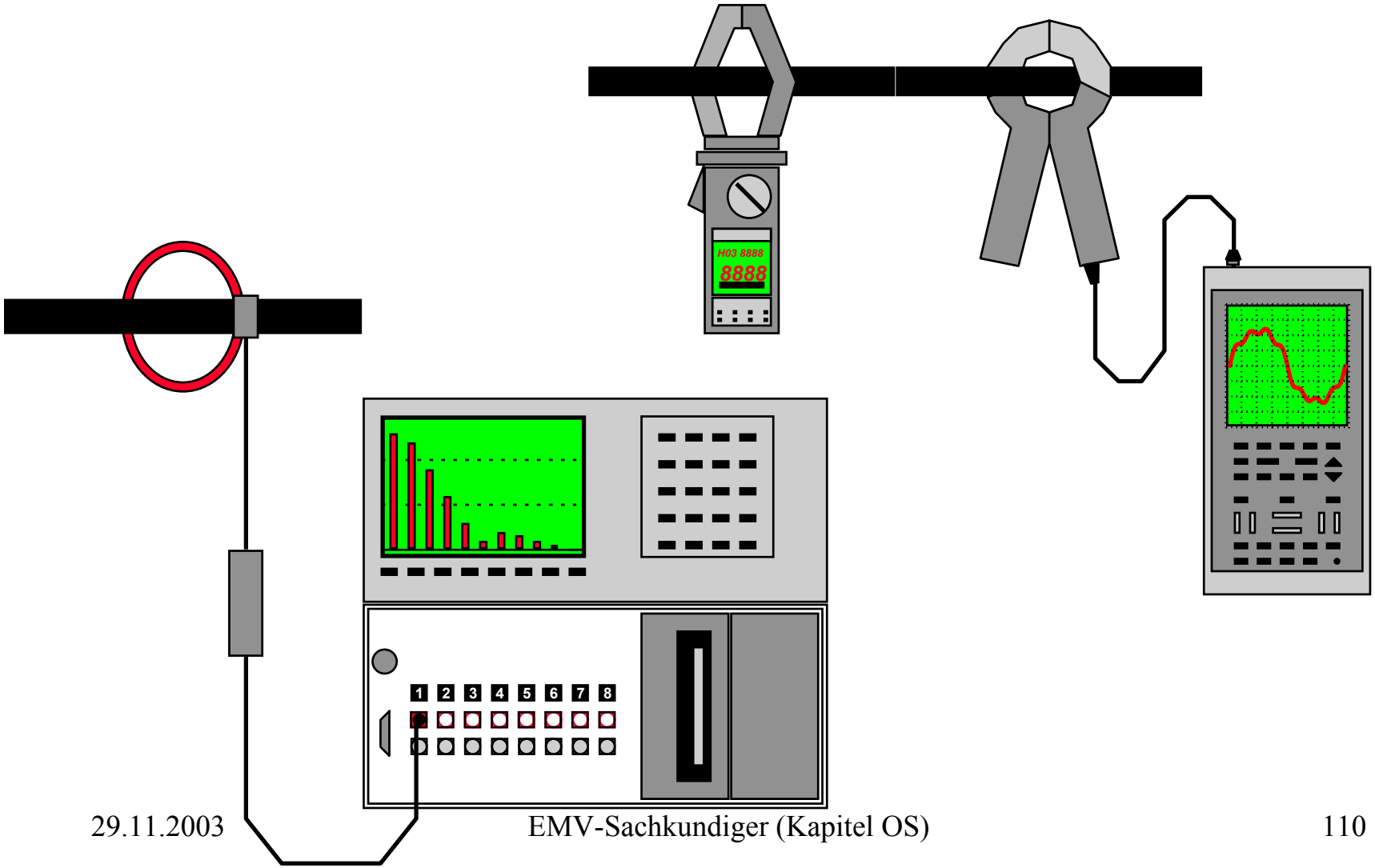
- Wird durch Messung festgestellt, dass der N-Leiterstrom größer ist, als der größte Unterschied zwischen den Außenleiterströmen, so sind Oberschwingungsströme zu erwarten.

Beispiel: $I_{L1} = 62A$; $I_{L2} = 78A$; $I_{L3} = 81A$; $I_N = 65A$

$$DI_L = 81A - 62A = 19A$$

Der N-Leiterstrom von 65A ist nicht durch unsymmetrische Last erklärbar. Hier liegt wahrscheinlich ein 150 Hz-Problem vor.

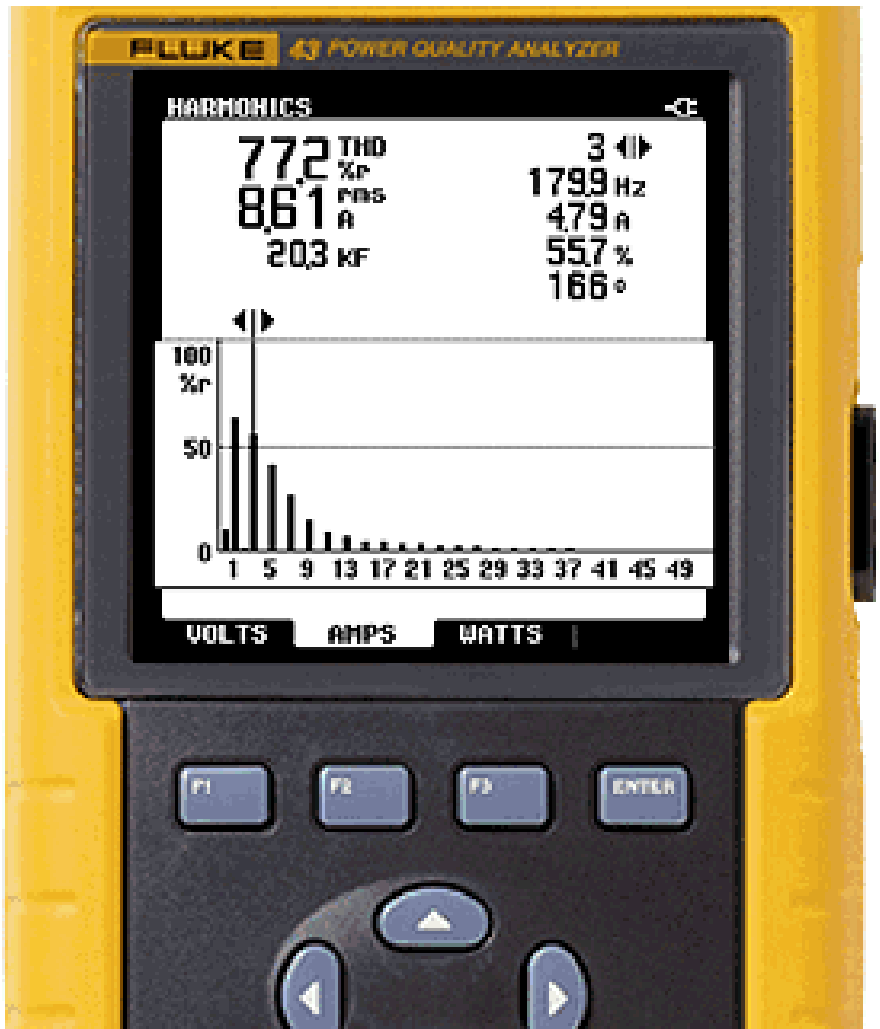
Problemerkennung durch Oberschwingungsanalyse



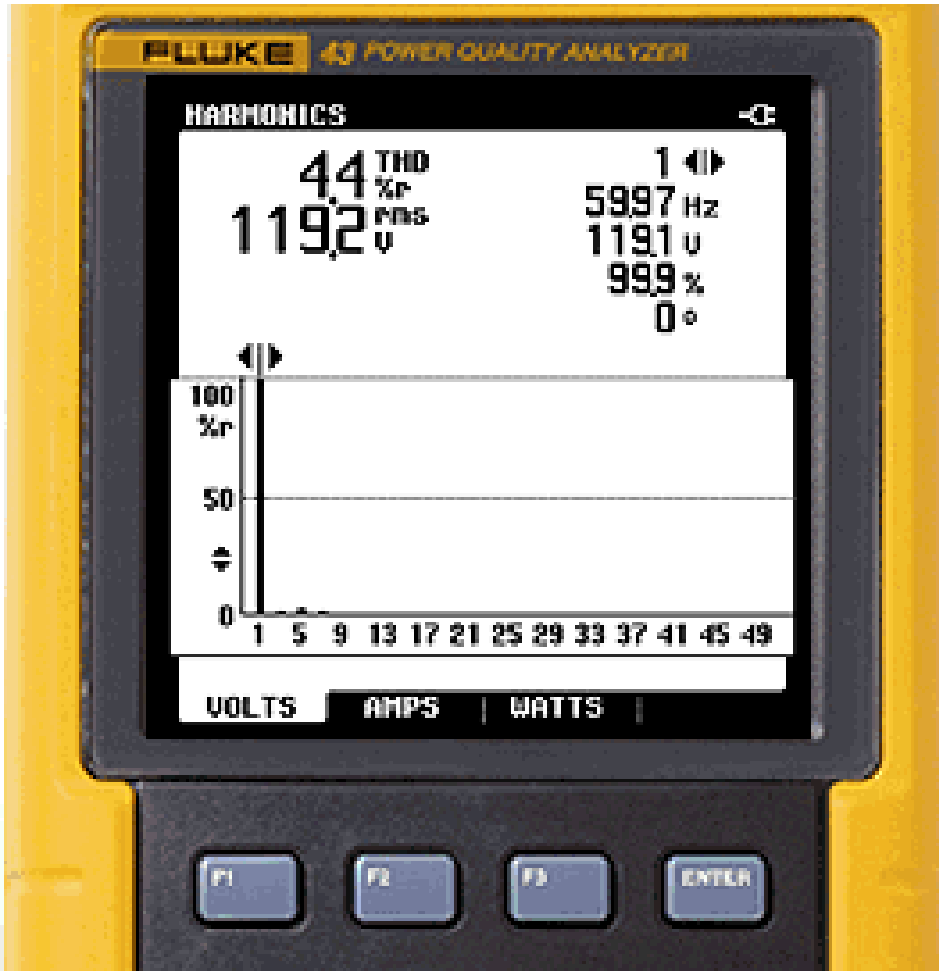
Menüauswahl eines Oberschwingungsmessgerätes

Strom- und Spannungsmessung

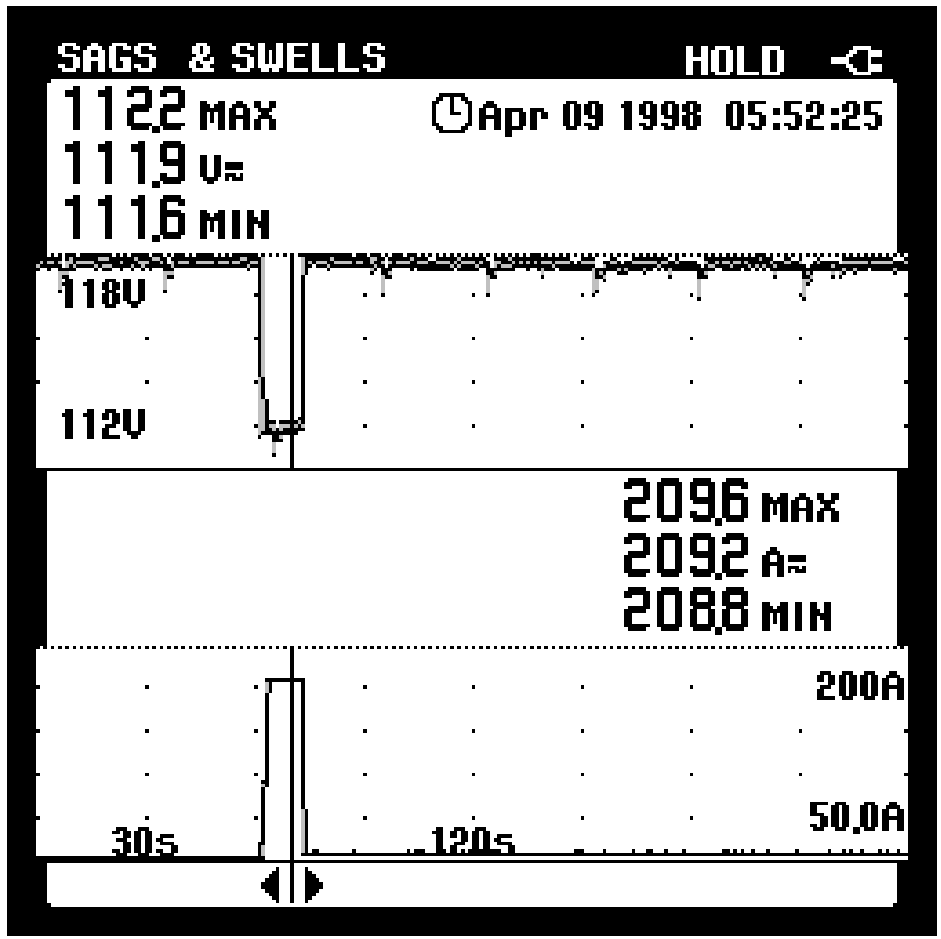
Oberschwingungsspektrum des Stromes



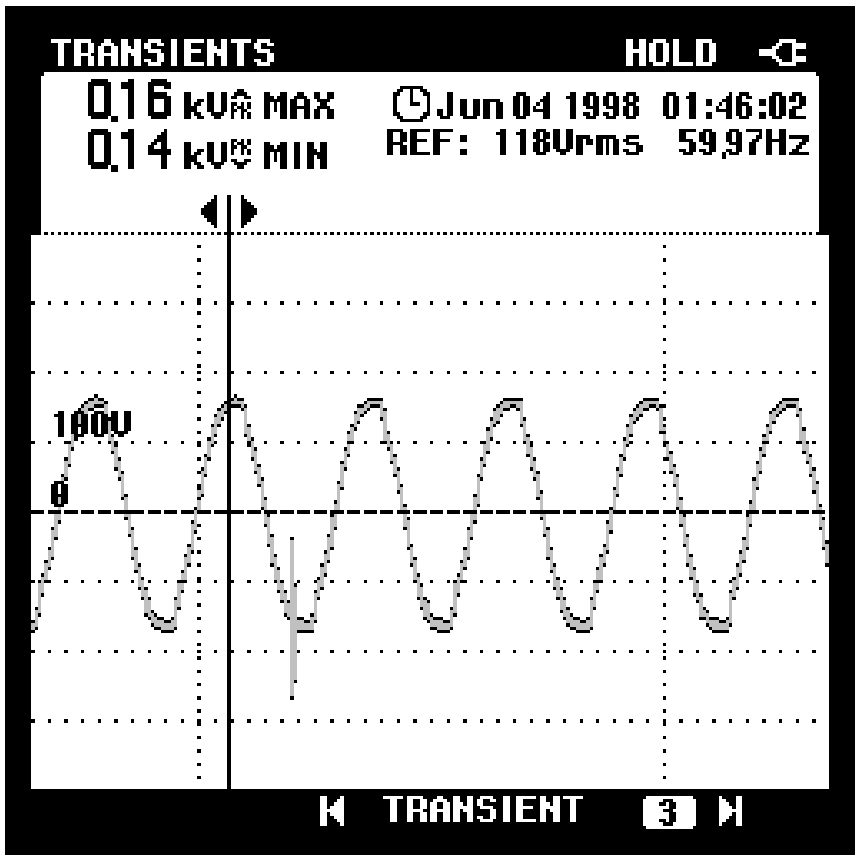
Oberschwingungsspektrum der Spannung

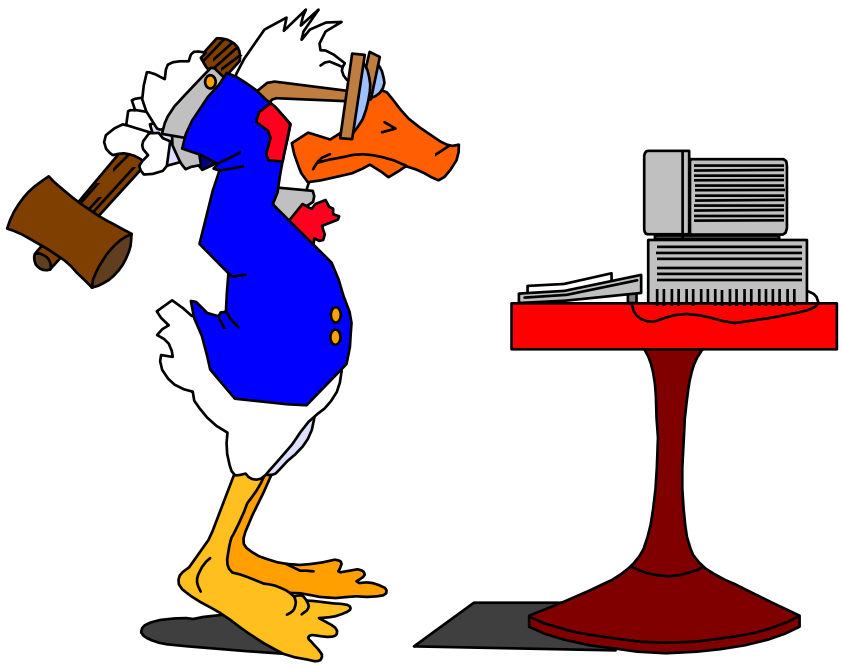
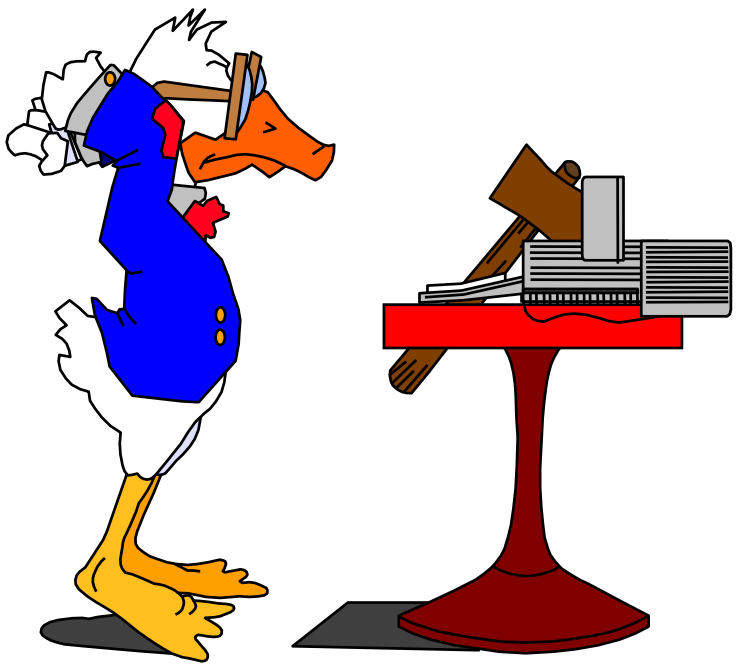


Spannungseinbruch durch Einschaltstrom



Spannungstransiente





ENDE