



E-CONTROL

**Technische und organisatorische Regeln
für Betreiber und Benutzer
von Netzen**

**Teil D:
Besondere technische Regeln**

**Hauptabschnitt D3:
Tonfrequenz-Rundsteuerung;
Empfehlung zur Vermeidung
unzulässiger Rückwirkungen**

Version 2.1
2006

Dokument-Historie

Version	Veröffentlichung	Inkrafttreten	Verantwortlich	Anmerkungen
1.0	1. März 2001	1. März 2001	BMWA	1. Ausgabe, 2001 (VEÖ-Broschüre – Tonfrequenz-Rundsteuerung, 3. überarbeitete Ausgabe 1997)
2.0	22. Oktober 2004	1. November 2004	E-Control	Ersetzt Version 1.0 Hauptabschnitt D3 (1. Ausgabe, 2001); Generelle Überarbeitung und Harmonisierung mit dem gültigen Regelwerk
2.1	8. Februar 2006	1. März 2006	E-Control	Richtigstellung des Kapitels 4.2.2.2

Die geltenden technischen und organisatorischen Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) stehen auf der Website der Energie-Control GmbH (www.e-control.at) zur allgemeinen Verfügung. Verweise auf die TOR verstehen sich somit immer auf die jeweils aktuell geltende Version. Jede Anwendung, Verwendung und Zitation der TOR hat unter diesen Prämissen zu erfolgen.

Für den Inhalt verantwortlich:

Energie-Control GmbH

Rudolfsplatz 13a

A-1010 Wien

Tel: +43-1-24724-0

E-Mail: tor@e-control.at

Inhaltsangabe:

1. Einleitung	4
2. Begriffe und Kurzbezeichnungen	5
2.1 Begriffe	5
2.2 Kurzbezeichnungen	5
3. Beurteilungsgrundsätze	7
3.1 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Hochspannungsnetz	8
3.2 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Mittelspannungsnetz	10
3.3 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Niederspannungsnetz	13
3.4 Störspannungen von Anlagen von Netzbenutzern	15
3.5 Zusätzliche Beurteilungskriterien bezüglich <i>Netzurückwirkungen</i>	16
4. Kompensationsanlagen	17
4.1 Direkt angeschlossene Kompensationskondensatoren	18
4.2 Verdrosselte Kompensationskondensatoren	21
4.2.1 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei Rundsteuerfrequenzen > 250 Hz	23
4.2.2 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz	24
4.3 Sonstige Schaltungen von Kompensationsanlagen	26
4.3.1 Verdrosselte Kondensatoren in Parallelschaltung	26
4.3.2 Gesperrte Kompensationanlagen	28
4.4 Kompensation von Leuchtstofflampen	32
5. Tonfrequenz-Sperrkreis	36
6. Saugkreisanlagen	38
7. Aktive Oberschwingungskompensation	41
8. Motoren und Generatoren	42
9. Eigenerzeugungsanlagen	43
9.1 Eigenerzeugungsanlagen, die über statische Umrichter an das Netz angeschlossen werden	44
9.2 Eigenerzeugungsanlagen, die direkt an das Netz angeschlossen werden	44

10. Sonstige Betriebsmittel	46
10.1 Symmetrierung von unsymmetrischen Lasten mittels Kondensatoren	46
10.2 Kapazitiv geglättete Netzteile	46
Anhang A	47
Anhang B	48
Erforderlicher Verdrosselungsgrad von Kompensationsanlagen	48
Anhang C	53
Maximal zulässige Steuerpegelabsenkung	53

1. Einleitung

Bei der Tonfrequenz-Rundsteuerung werden dem *Netz* Tonfrequenzimpulse überlagert, welche die angeschlossenen Rundsteuerempfänger zu bestimmten Schaltungen veranlassen. Damit die Rundsteuerung zuverlässig funktioniert, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

a) Einwandfreie Funktion der Rundsteuerempfänger

Die Tonfrequenzimpulse müssen eine *Steuerspannung* aufweisen, die mit ausreichendem Abstand über der *Funktionsspannung* der Empfänger liegt. Damit ist die notwendige Betriebssicherheit der Rundsteuerung gewährleistet. Die *Anlagen von Netzbenutzern* dürfen diese *Steuerspannung* nicht unzulässig absenken und keine unzulässig hohen *Störspannungen im Bereich der Rundsteuerfrequenz (Oberschwingungen, Zwischenharmonische)* erzeugen und in das öffentliche *Netz* einspeisen.

b) Einwandfreie Funktion der Sendeanlagen

Die *Anlagen von Netzbenutzern* dürfen die Sendeeinrichtungen nicht übermäßig belasten.

Die Betriebsmittel stellen wegen der Frequenzabhängigkeit der Impedanzen bei Tonfrequenz ganz andere Belastungen als bei Frequenz dar. Nur rein ohmsche Belastungen bleiben praktisch unverändert. Besonders ausgeprägt sind die Impedanzänderungen bei Motoren, Kondensatoren, Transformatoren und Kabeln. Die *Netze* bestehen aus einer vielfältigen Zusammenschaltung von Kapazitäten und Induktivitäten, wodurch sich recht komplexe Wirkungen ergeben, die stark frequenzabhängig sind. Im Resonanzfall heben sich die Reaktanzen von Kapazitäten und Induktivitäten auf, so dass nur noch der ohmsche Anteil verbleibt. Damit ändert sich die Impedanz extrem.

2. Begriffe und Kurzbezeichnungen

2.1 Begriffe

Die in diesem Hauptabschnitt D3 der technischen und organisatorischen Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) verwendeten Begriffe und Definitionen sind im Teil A „Allgemeines, Begriffserklärungen, Quellenverweise“ der TOR gesammelt enthalten.

2.2 Kurzbezeichnungen

C_C	installierte Kapazität der Kompensationsanlage
C_K	wirksame Kapazität der Kompensationsanlage (z.B. an der Sammelschiene)
ε	<i>Impedanzfaktor</i> der gesamten <i>Anlage des Netzbenutzers</i>
ε^*	<i>Impedanzfaktor</i> der <i>Anlage des Netzbenutzers</i> ohne Berücksichtigung der <i>Last</i>
f	<i>Frequenz</i> (50 Hz)
f_0	<i>Resonanzfrequenz</i>
f_{0P}	<i>Parallelresonanzfrequenz</i>
f_{0R}	<i>Reihenresonanzfrequenz</i>
f_s	Steuerfrequenz der Rundsteuerung (Rundsteuerfrequenz)
HS	Hochspannung
I_n	Nennstrom (z.B. der Asynchronmaschine)
I_a	Anlaufstrom (z.B. der Asynchronmaschine)
k	<i>Kompensationsgrad</i>
MS.....	Mittelspannung
NS	Niederspannung
n	Verhältnis der Rundsteuerfrequenz zur Frequenz
v	Ordnungszahl einer Oberschwingung
p	<i>Verdrosselungsgrad</i>
Q_C	<i>Blindleistung</i> der Kondensatoren der <i>Anlage des Netzbenutzers</i>
Q_K	wirksame <i>Blindleistung</i> der Kompensationsanlage (z.B. an der Sammelschiene, kann von Q_C infolge Zusatzbeschaltung abweichen)
R_{sM}	Resistanz (ohmscher Widerstand) des Motors bzw. Generators bei Rundsteuerfrequenz
σ	Pegelfaktor (Verhältnis aus <i>Steuerpegel</i> zu <i>Funktionspegel</i> des Rundsteuerempfängers)
S_M	<i>Scheinleistung</i> des Motors bzw. Generators
S_{rT}	Bemessungsscheinleistung des Transformators
S_{Ver}	<i>Vertragsleistung</i>

- U_f Funktionsspannung der Rundsteuerempfänger
 u_f *Funktionspegel* der Rundsteuerempfänger
 u_k relative Kurzschlussspannung des Transformators
 U_n *Nennspannung* eines Netzes
 U_s *Steuerspannung*
 u_s *Steuerpegel*
 u_{sE} *Steuerpegel* am Rundsteuerempfänger
 u_{sMS} *Steuerpegel* im Mittelspannungsnetz
 Δu maximal zulässige Absenkung des *Steuerpegels*
 V *Verknüpfungspunkt*
 X_C Reaktanz der Kondensatoren bei *Frequenz* (50 Hz)
 X_{Dr} Reaktanz der Drossel bei *Frequenz* (50 Hz)
 X_K Reaktanz (induktiver Widerstand) der Kompensationsanlage
 X_{sM} Reaktanz (induktiver Widerstand) des Motors bzw. Generators bei Rundsteuerfrequenz
 Z_A *Anschlussimpedanz* der *Anlage des Netzbenutzers* (bei 50 Hz)
 Z_C Impedanz der Kondensatoren bei *Frequenz* (50 Hz)
 Z_{Dr} Impedanz der Drossel bei *Frequenz* (50 Hz)
 Z_s Impedanz der *Anlage des Netzbenutzers* am *Verknüpfungspunkt V* bei Rundsteuerfrequenz f_s
 Z_s^* Impedanz von Transformator und Kompensationsanlage der *Anlage des Netzbenutzers* bei Rundsteuerfrequenz f_s
 Z_{sC} Impedanz der Kondensatoren bei Rundsteuerfrequenz f_s
 Z_{sDr} Impedanz der Drossel bei Rundsteuerfrequenz f_s
 Z_{sK} Impedanz der Kompensationsanlage bei Rundsteuerfrequenz f_s
 Z_{sT} Impedanz des Transformators bei Rundsteuerfrequenz f_s
 ω Kreisfrequenz

3. Beurteilungsgrundsätze

Damit die Rundsteuerung nicht durch die an das *Netz* angeschlossenen *Anlagen von Netzbenutzern* unzulässig beeinträchtigt wird, sind die nachfolgenden Einflussgrößen zu beachten:

- Belastung der Rundsteuersendeanlagen
- Steuerpegeländerungen
- *Störspannungen*

Bei der Beurteilung aus Sicht der Rundsteuerung wird nicht das einzelne *Betriebsmittel*, sondern die *Anlage des Netzbenutzers* in ihrer Gesamtheit am *Verknüpfungspunkt V* betrachtet.

Rundsteueranlagen werden für eine Belastung dimensioniert, die der Bemessungsleistung des *Netzes* entspricht. Die Höhe der Beeinflussung auf die Rundsteuerung, die eine *Anlage des Netzbenutzers* verursachen darf, ist abhängig von dem Verhältnis der *Vertragsleistung* der *Anlage des Netzbenutzers* zur gesamten Bemessungsleistung des jeweiligen *Netzes*. Es gilt der Grundsatz, dass eine höhere *Vertragsleistung* auch zu einer höheren Beeinflussung der Rundsteuerung führen darf.

Je nach Lage des *Verknüpfungspunktes* der *Anlage des Netzbenutzers* (Hoch-, Mittel- oder Niederspannungsnetz) sowie dem Typ der *Anlage des Netzbenutzers* (mit oder ohne Eigenerzeugung) sind unterschiedliche Beurteilungskriterien anzuwenden:

- a) *Anlagen von Netzbenutzern ohne Eigenerzeugung*
Anlagen von Netzbenutzern ohne Eigenerzeugung beziehen die elektrische Energie ausschließlich vom *Netzbetreiber*. Für die Beurteilung der Rückwirkungen auf die Rundsteuerung ist **Kapitel 3** anzuwenden.

- b) *Anlagen von Netzbenutzern mit Eigenerzeugung ohne Eigenverbrauch (reine Eigenerzeugungsanlagen)*
Anlagen von Netzbenutzern mit Eigenerzeugung ohne Eigenverbrauch speisen elektrische Energie in das öffentliche *Netz* ein (z.B. Windenergieanlagen). Für die Beurteilung der Rückwirkung auf die Rundsteuerung ist **Kapitel 9** sowie aus **Kapitel 3** die **Punkte 3.4** und **3.5** anzuwenden.

c) Anlagen von Netzbenutzern mit Eigenerzeugung und Eigenverbrauch

Anlagen von Netzbenutzern mit Eigenerzeugung und Eigenverbrauch können sowohl elektrische Energie aus dem öffentlichen *Netz* beziehen als auch in dieses einspeisen. Im Allgemeinen wird durch die Eigenerzeugung ein Teil der in der *Anlage des Netzbenutzers* benötigten Energie gedeckt. Für die Beurteilung der Rückwirkungen auf die Rundsteuerung ist **Kapitel 3** anzuwenden.

Die Beurteilungsgrundsätze setzen voraus, dass der Versorgungsbereich im Regelfall eine Vielzahl von *Anlagen des Netzbenutzers* unterschiedlichen Typs umfasst (*Verknüpfungspunkte V* der *Anlagen von Netzbenutzern* in unterschiedlichen Spannungsebenen, kompensierte bzw. un kompensierte Anlagen, Anlagen mit *Tonfrequenz-Sperrkreisen* usw.). Liegt eine solche Durchmischung im *Netz* nicht zugrunde, sind die nachfolgend aufgeführten Grenzwerte durch den *Netzbetreiber* anzupassen. Falls die in den Beurteilungsgrundsätzen genannten Grenzwerte nicht eingehalten werden können, ist der *Netzbetreiber* zu kontaktieren.

Eine genaue Berechnung der Impedanz der *Anlage des Netzbenutzers* bei Rundsteuerfrequenz setzt vor allem eine detaillierte Kenntnis der in der *Anlage des Netzbenutzers* angeschlossenen *Betriebsmittel* einschließlich deren Betriebsweise voraus.

Im Regelfall werden *Anlagen von Netzbenutzern* 3-phasig angeschlossen. Die Beurteilungsgrundsätze sind für jeden Außenleiter einzuhalten.

3.1 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Hochspannungsnetz

Anlagen von Netzbenutzern mit *Verknüpfungspunkt V* im Hochspannungsnetz werden im Regelfall über einen separaten Transformator angeschlossen. Mit einer unzulässigen Beeinflussung der Rundsteuerung ist nur dann zu rechnen, wenn der *Netzbetreiber* die *Steuerspannung* direkt in das Hochspannungsnetz einspeist.

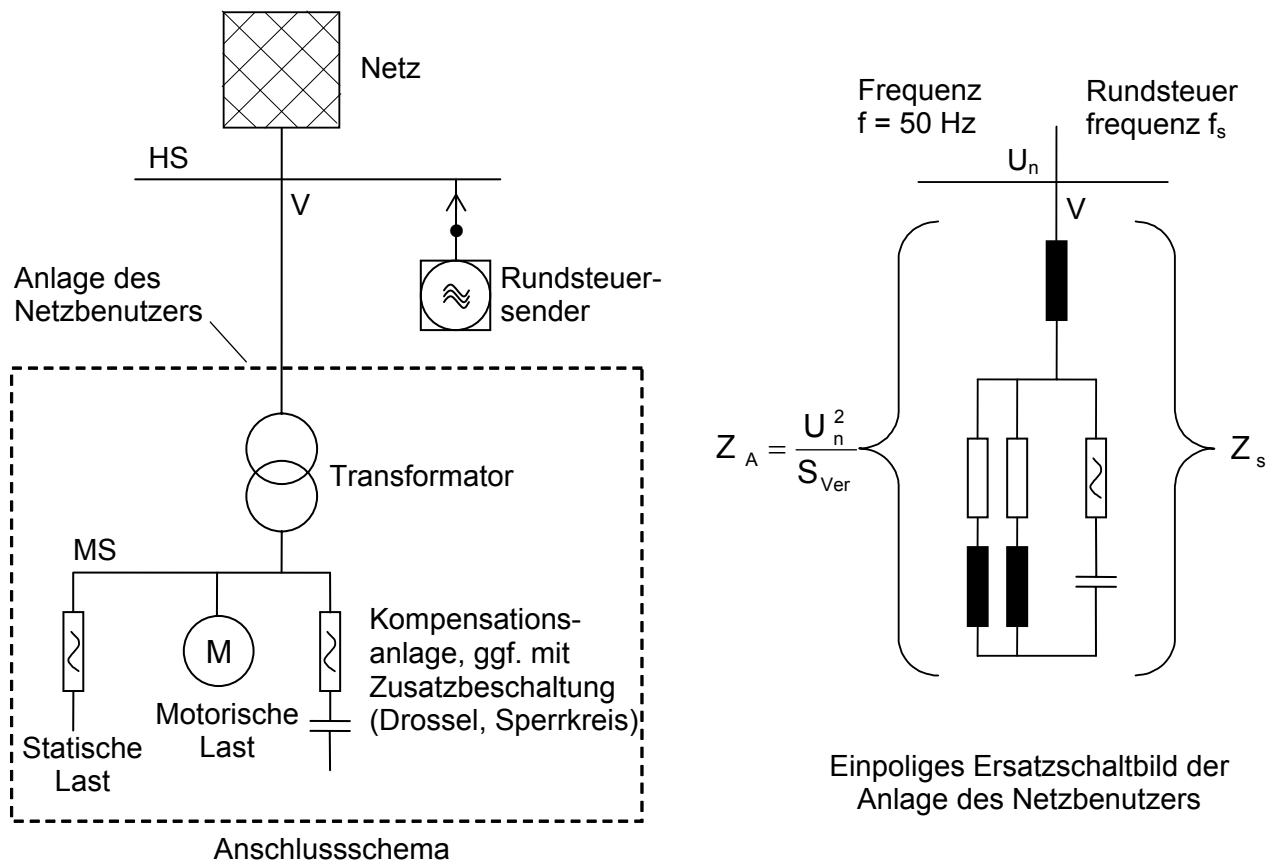


Bild 3-1: Tonfrequenzeinspeisung und *Anlage des Netzbenutzers* mit *Verknüpfungspunkt V* im Hochspannungsnetz

Impedanzfaktor ε

Betreibt oder plant der *Netzbetreiber* eine Rundsteuerung im Hochspannungsnetz und liegt der *Verknüpfungspunkt V* der *Anlage des Netzbenutzers* ebenfalls in diesem Hochspannungsnetz, so muss die *Tonfrequenzimpedanz Z_s* der *Anlage des Netzbenutzers* ausreichend hoch sein. Ansonsten wird die Rundsteuerung unzulässig beeinflusst.

Für *Anlagen von Netzbenutzern* mit *Verknüpfungspunkt V* im Hochspannungsnetz gilt:

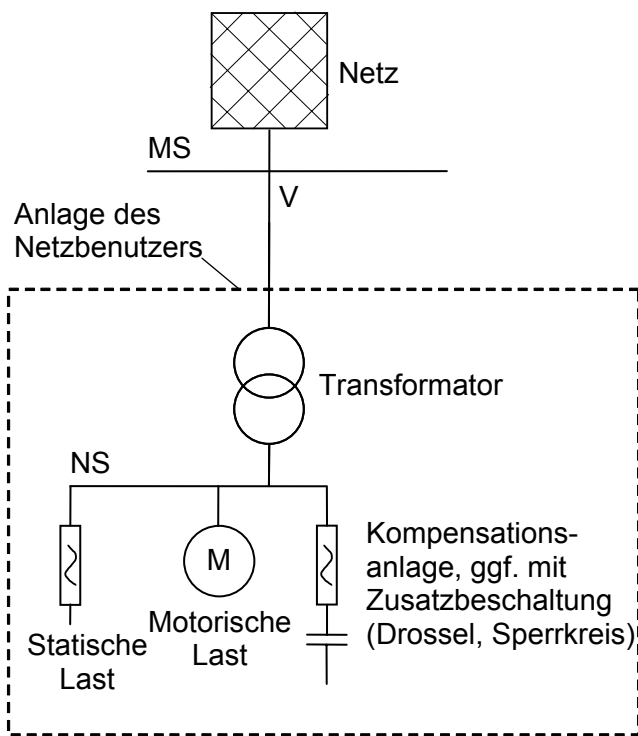
Die Impedanz Z_s einer *Anlage des Netzbenutzers* bei Rundsteuerfrequenz am *Verknüpfungspunkt* muss mindestens **gleich** der *Anschlussimpedanz Z_A* sein.

$$\varepsilon = \frac{Z_s}{Z_A} \geq 1$$

- ε *Impedanzfaktor* der gesamten *Anlage des Netzbenutzers*
- Z_s *Impedanz* der gesamten *Anlage des Netzbenutzers* am *Verknüpfungspunkt V* bei Rundsteuerfrequenz f_s
- Z_A *Anschlussimpedanz* der *Anlage des Netzbenutzers* (bei 50 Hz)

3.2 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Mittelspannungsnetz

Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt V im Mittelspannungsnetz werden im Regelfall über einen separaten Transformator angeschlossen. Im Niederspannungsnetz des Netzbenutzers werden im Allgemeinen keine Rundsteuerempfänger betrieben. In diesem Falle darf in diesen Anlagen von Netzbenutzern der Steuerpegel auf Werte abgesenkt werden, die keinen Betrieb von Rundsteuerempfängern mehr zulassen.



Anschlusschema

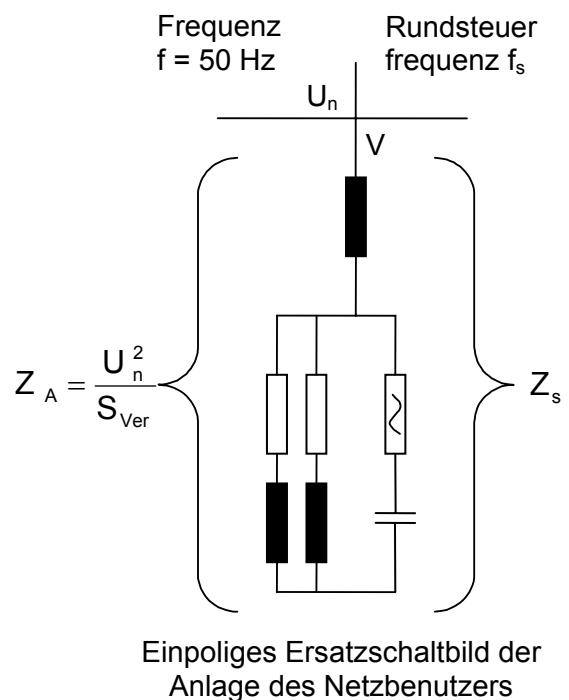


Bild 3-2: Tonfrequenzeinspeisung und *Anlage des Netzbenutzers* mit Verknüpfungspunkt V im Mittelspannungsnetz

Impedanzfaktor ε

Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt V im Mittelspannungsnetz müssen bei Rundsteuerfrequenz eine ausreichende Impedanz Z_s aufweisen, da ansonsten die Tonfrequenz-Rundsteuerung unzulässig beeinflusst wird.

Für Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt V im Mittelspannungsnetz gilt:

Die Impedanz Z_s einer Anlage des Netzbenutzers bei Rundsteuerfrequenz am Verknüpfungspunkt muss **mindestens 40 %** der Anschlussimpedanz Z_A betragen.

$$\varepsilon = \frac{Z_s}{Z_A} \geq 0,4$$

ε Impedanzfaktor der gesamten Anlage des Netzbenutzers

Z_s Impedanz der gesamten Anlage des Netzbenutzers am Verknüpfungspunkt V bei Rundsteuerfrequenz f_s

Z_A Anschlussimpedanz der Anlage des Netzbenutzers (bei 50 Hz)

Anmerkungen:

- Sollten in Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt V im Mittelspannungsnetz Rundsteuerempfänger angeschlossen werden, so bietet sich deren Anschluss über Wandler unmittelbar an das Mittelspannungsnetz an.
- Innerhalb eines Mittelspannungsnetzes können Rundsteueranlagen unterschiedlicher Netzbetreiber betrieben werden, so dass hinsichtlich der Tonfrequenzimpedanz gegebenenfalls auch mehrere Rundsteuerfrequenzen zu berücksichtigen sind.
- Unter bestimmten Bedingungen, z.B. keine Durchmischung des Versorgungsbereiches mit unterschiedlichen Anlagen von Netzbenutzern, ist der Impedanzfaktor ε anzuheben. Der erforderliche Wert ist mit dem Netzbetreiber abzustimmen.

Impedanzfaktor ε^* bei Kompensationsanlagen

Häufig wird eine unzulässige Rückwirkung auf die Rundsteuerung durch Kompensationsanlagen verursacht. Für die Beurteilung dieser Fälle reicht meistens eine vereinfachte Berechnung aus. Zur Bestimmung der Impedanz bei Rundsteuerfrequenz werden dann nur *Transformator* und Kompensationsanlage berücksichtigt. Unter diesen Voraussetzungen kann dann der *Impedanzfaktor* ε^* verwendet werden.

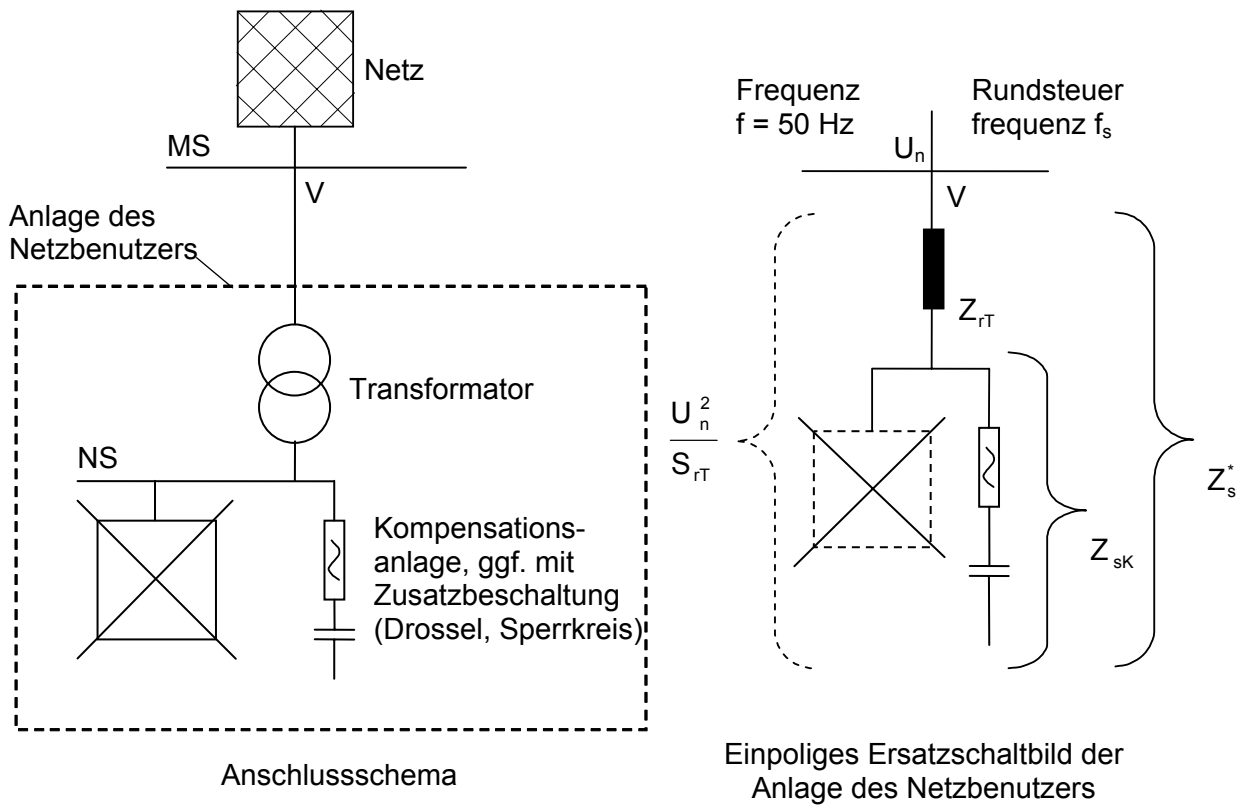


Bild 3-3: *Anlage des Netzbenutzers mit Verknüpfungspunkt V im Mittelspannungsnetz (vereinfachte Betrachtung)*

Der *Impedanzfaktor* ε^* errechnet sich wie folgt:

$$\varepsilon^* = \frac{Z_s^*}{U_n^2 / S_{rT}} \geq 0,5$$

- ε^* Impedanzfaktor der gesamten *Anlage des Netzbenutzers* ohne Berücksichtigung der *Last*
- Z_s^* Betrag der Impedanz von Transformator und Kompensationsanlage bei Rundsteuerfrequenz (siehe Anhang B)
- U_n *Nennspannung des Netzes*
- S_{rT} Bemessungsscheinleistung des Transformators
- U_n^2 / S_{rT} aus der Bemessungsscheinleistung des Transformators ermittelte Impedanz (siehe **Bild 3-3**)

Anmerkungen:

- *Unter bestimmten Bedingungen, z.B. keine Durchmischung des Versorgungsbereiches mit unterschiedlichen Anlagen von Netzbenutzern, ist der Impedanzfaktor ε^* anzuheben. Der erforderliche Wert ist mit dem Netzbetreiber abzustimmen.*
- *Mit Hilfe des Impedanzfaktors ε^* ist lediglich eine angenäherte Beurteilung der Rückwirkungen auf die Rundsteuerung möglich, da die Lastimpedanzen nicht berücksichtigt werden. Eine genaue Betrachtung der Verhältnisse (Impedanzfaktor ε) ist notwendig bei Anlagen von Netzbenutzern*
 - *mit nur einem geringen Teil ausgenutzter verfügbarer Transformatorleistung,*
 - *mit Versorgung über mehrere Transformatoren,*
 - *mit hohem Anteil an rotierenden Maschinen und bei niedrigen Rundsteuerfrequenzen (< 250 Hz) und*
 - *mit Eigenerzeugung.*

3.3 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Niederspannungsnetz

Im öffentlichen Niederspannungsnetz werden mehrere *Anlagen von Netzbenutzern* über einen gemeinsamen Transformator versorgt.

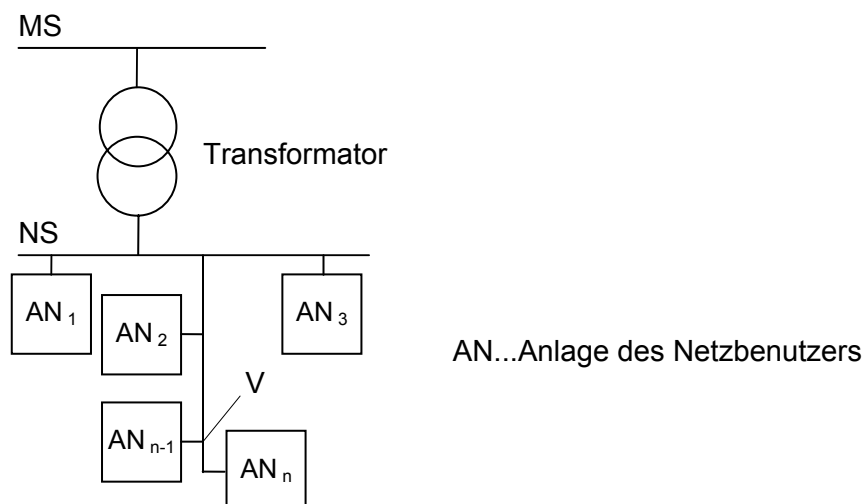


Bild 3-4: *Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt V im Niederspannungsnetz*

Änderung des Steuerpegels u_s

In öffentlichen Niederspannungsnetzen sind im Regelfall Rundsteuerempfänger in verschiedenen *Anlagen von Netzbenutzern* angeschlossen. Ein ordnungsgemäßer Betrieb dieser Empfänger setzt voraus, dass der *Steuerpegel* durch *Betriebsmittel* in den *Anlagen von Netzbenutzern* nicht unzulässig verändert wird.

Die an einem gemeinsamen Transformator angeschlossenen *Anlagen von Netzbenutzern* dürfen den *Steuerpegel* im Niederspannungsnetz gegenüber dem *Steuerpegel* im Mittelspannungsnetz (Oberspannungsseite des Transformators) nicht übermäßig absenken bzw. anheben.

Die zulässigen Grenzwerte für die Absenkung des *Steuerpegels* können **Anhang C** „Maximal zulässige Steuerpegelabsenkung“ entnommen werden

Bei üblichen Bemessungen der Rundsteuerung beträgt die zulässige Absenkung des *Steuerpegels* z.B. bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz max. 25 %.

Eine Anhebung des *Steuerpegels* im Niederspannungsnetz darf unabhängig von der Rundsteuerfrequenz nicht mehr als 50 % betragen.

Anmerkungen:

- Die im **Anhang C** „Maximal zulässige Steuerpegelabsenkung“ aufgeführten Grenzwerte beziehen sich auf die *Summenwirkung aller Betriebsmittel im betrachteten Niederspannungsnetz*.
- Die *Beurteilung der Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung in öffentlichen Niederspannungsnetzen nach einem gültigen und vereinfachten Verfahren ist nicht möglich, da die durch die Anlagen von Netzbenutzern verursachten Steuerpegeländerungen von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig sind. Es sind Einflussgrößen*

des Netzes

- *die Impedanz des vorgelagerten Mittelspannungsnetzes bei Rundsteuerfrequenz*
- *die Bemessungsleistung und die Kurzschlussspannung des einspeisenden Transformators*
- *die Impedanz der Niederspannungsleitung bei Rundsteuerfrequenz bis zum Verknüpfungspunkt*
- *die Belastungsstruktur, d.h. die Summenwirkung aller Betriebsmittel, im betrachteten Niederspannungsnetz*

der Anlage des Netzbenutzers

- die aktuell angeschlossene Leistung
- die Art der angeschlossenen Betriebsmittel (*motorische oder statische Last, Kompensationsanlagen etc.*) sowie deren Betriebsweise
- sonstige Einflussgrößen wie z.B. Eigenerzeugungsanlagen

der Rundsteueranlage

- die verwendete Rundsteuerfrequenz
- der Steuerpegel im Mittelspannungsnetz
- der Funktionspegel der verwendeten Rundsteuerempfänger
- sonstige Einflussgrößen wie z.B. Art der Ankopplung

3.4 Störspannungen von Anlagen von Netzbenutzern

Verschiedene *Betriebsmittel* in *Anlagen von Netzbenutzern* (z.B. drehzahlgesteuerte Antriebe) können *Störspannungen* im Bereich der vom *Netzbetreiber* verwendeten Rundsteuerfrequenz erzeugen. Diese werden dann am *Verknüpfungspunkt V* der *Anlage des Netzbenutzers* in das *Netz* eingespeist und können somit zu Fehlfunktionen der Rundsteuerempfänger führen.

Die von einer *Anlage des Netzbenutzers* verursachte *Störspannung*, deren Frequenz der örtlich verwendeten Rundsteuerfrequenz entspricht oder in deren unmittelbarer Nähe liegt, darf den Wert $0,1 \% U_n$ am *Verknüpfungspunkt V* nicht übersteigen.

Störspannungen, deren Frequenz einen Abstand von ± 100 Hz zur verwendeten Rundsteuerfrequenz aufweist, können infolge von Modulationseffekten ebenfalls zu Fehlfunktionen der Rundsteuerempfänger führen.

Die von einer *Anlage des Netzbenutzers* verursachte *Störspannung*, deren Frequenz auf den Nebenfrequenzen von ± 100 Hz zur örtlich verwendeten Rundsteuerfrequenz oder dazu in unmittelbarer Nähe liegt, darf am *Verknüpfungspunkt V* nicht mehr als $0,3 \% U_n$ betragen.

Anmerkungen:

- *In einem Mittelspannungsnetz können auch Rundsteueranlagen unterschiedlicher Netzbetreiber betrieben werden, so dass hinsichtlich der Störspannungen ggf. weitere Rundsteuerfrequenzen zu berücksichtigen sind.*
- *Verursachen in einem Versorgungsbereich mehrere Anlagen von Netzbenutzern Störspannungen, so muss die Summenwirkung betrachtet werden.*
- *Der Bereich der unmittelbaren Nähe zur verwendeten Rundsteuerfrequenz wird durch die Filterbandbreite der eingesetzten Rundsteuerempfänger bestimmt.*

3.5 Zusätzliche Beurteilungskriterien bezüglich Netzurückwirkungen

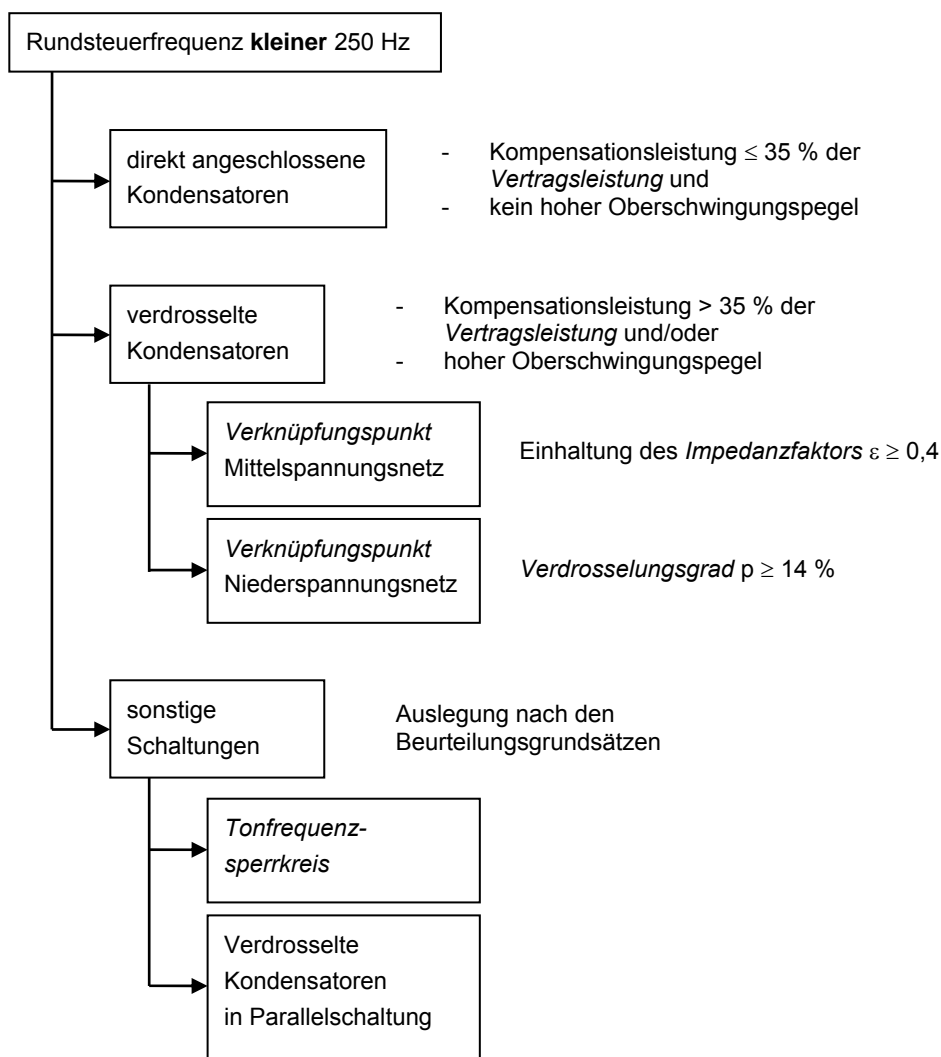
Bei der Auslegung und dem Betrieb von *Anlagen von Netzbenutzern* müssen neben den Rückwirkungen auf die Rundsteuerung vor allem die Anforderungen hinsichtlich *Netzurückwirkungen* beachtet werden. Diese sind in den TOR Hauptabschnitt D2 „Richtlinie zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“ behandelt.

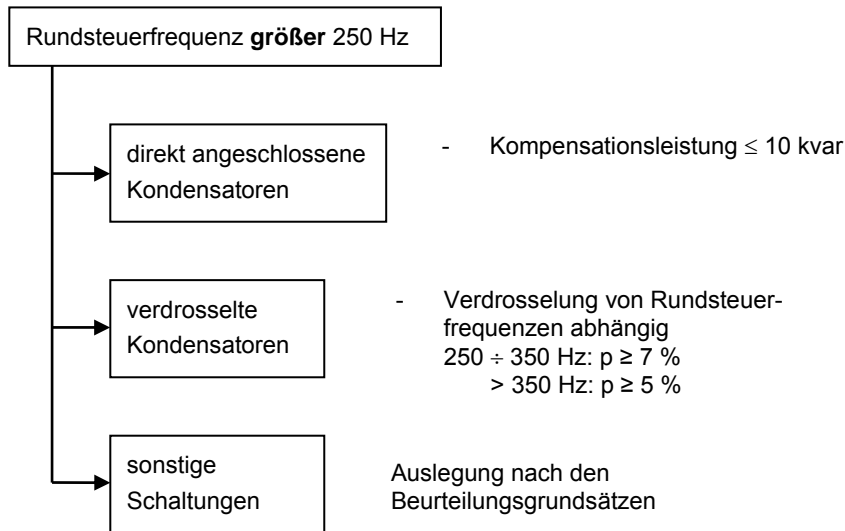
Maßnahmen zur Verringerung des *Oberschwingungspegels* in einer *Anlage des Netzbenutzers* (z.B. verdrosselte Kompensationsanlagen, Saugkreisanlagen) müssen ganz besonders im Hinblick auf die von ihnen verursachten Rückwirkungen auf die Rundsteuerung dimensioniert werden.

4. Kompensationsanlagen

Elektrische *Betriebsmittel* wie z.B. Motoren, Drosselspulen, Beleuchtungsanlagen und Stromrichter beziehen aus dem *Netz* neben der *Wirkleistung* auch *Blindleistung*. Der Transport dieser *Blindleistung* verursacht zusätzliche Übertragungsverluste.

Durch eine verbrauchernahe *Blindleistungskompensation* können die elektrischen *Netze* entlastet werden, da die *Blindleistung* nicht mehr über das *Netz* geliefert, sondern von den Kompensationsanlagen bereitgestellt wird. Es ist jedoch zu beachten, dass eine übermäßige Kompensation (Überkompensation) zu technischen Problemen und unter Umständen zu wirtschaftlichen Nachteilen führen kann. Dies gilt besonders im Hinblick auf die Oberschwingungsbelastung und die Rückwirkung auf die Rundsteuerung. Nachfolgende Aufstellung gibt einen Überblick über die Behandlung von Kompensationsanlagen aus der Sicht der Rundsteuerung, worauf im Weiteren näher eingegangen wird.





Anmerkung: Die Zusammenschaltung von Kompensationsanlagen unterschiedlichen Typs (wie z.B. verdrosselte Kompensationsanlagen und solchen mit Sperrkreisen) kann zu ungewollten Resonanzen im Bereich der Oberschwingungsfrequenzen führen.

4.1 Direkt angeschlossene Kompensationskondensatoren

Bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz und Kompensationsleistungen ≤ 35 % der *Vertragsleistung* ist im Allgemeinen ein direkter Anschluss der Kompensationskondensatoren aus Sicht der Tonfrequenz-Rundsteuerung zulässig.

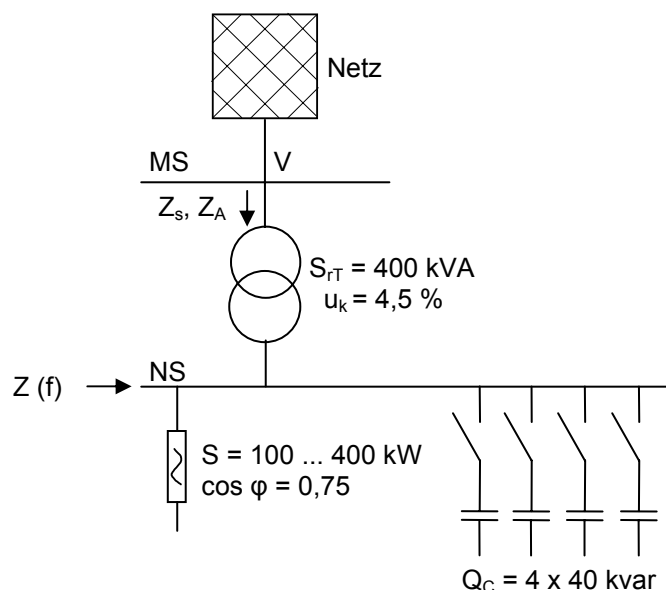
Bei Rundsteuerfrequenzen > 250 Hz ist im Regelfall eine *Verdrosselung* erforderlich. Lediglich Kompensationsleistungen ≤ 10 kvar pro *Anlage des Netzbenutzers* dürfen unverdrosselt angeschlossen werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei hohen Rundsteuerfrequenzen unzulässige Resonanzen auftreten können, die auch in diesen Fällen zusätzliche Maßnahmen wie z.B. eine Verdrosselung erfordern.

Anmerkungen:

- Die Begrenzung der Kompensationsleistung auf 35 % der Vertragsleistung kann ggf. auf 35 % der Bemessungsleistung des Transformators erweitert werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass am Transformator keine weiteren Kompensationsanlagen angeschlossen werden.
- Vom Netz aus gesehen bildet die Kapazität der Kompensationskondensatoren mit der Streuinduktivität des vorgeschalteten Transformators einen Reihenschwingkreis. Die Resonanzfrequenz dieses Kreises sinkt mit steigender Kompensationsleistung. Bei Anlagen, deren Kondensatoren in Stufen schaltbar sind, ergeben sich mehrere Resonanzfrequenzen.

In der Nähe der *Resonanzfrequenz* ist die Impedanz des Reihenschwingkreises sehr niedrig, d.h. es kann eine Senke für die Rundsteuerfrequenz bzw. für *Oberschwingungen* auftreten. Bei genügend großem Abstand zwischen *Resonanzfrequenz* und Rundsteuerfrequenz ist die *Tonfrequenzimpedanz* der *Anlage des Netzbenutzers* so groß, dass keine unzulässige Beeinträchtigung der Rundsteuerung auftritt.

Hinsichtlich der Impedanzen muss die Betrachtung sowohl vom *Netz* her (siehe **Bild 4-1 b**) als auch von den *Oberschwingungserzeugern der Anlage des Netzbenutzers* her (siehe **Bild 4-1 c**) erfolgen. Es können sich erhöhte Oberschwingungsströme und -spannungen ergeben, die zu Störungen bzw. Überlastungen von Kondensatoren und anderen *Betriebsmitteln der Anlage des Netzbenutzers* führen.

**Bild 4-1a:** Netzschema

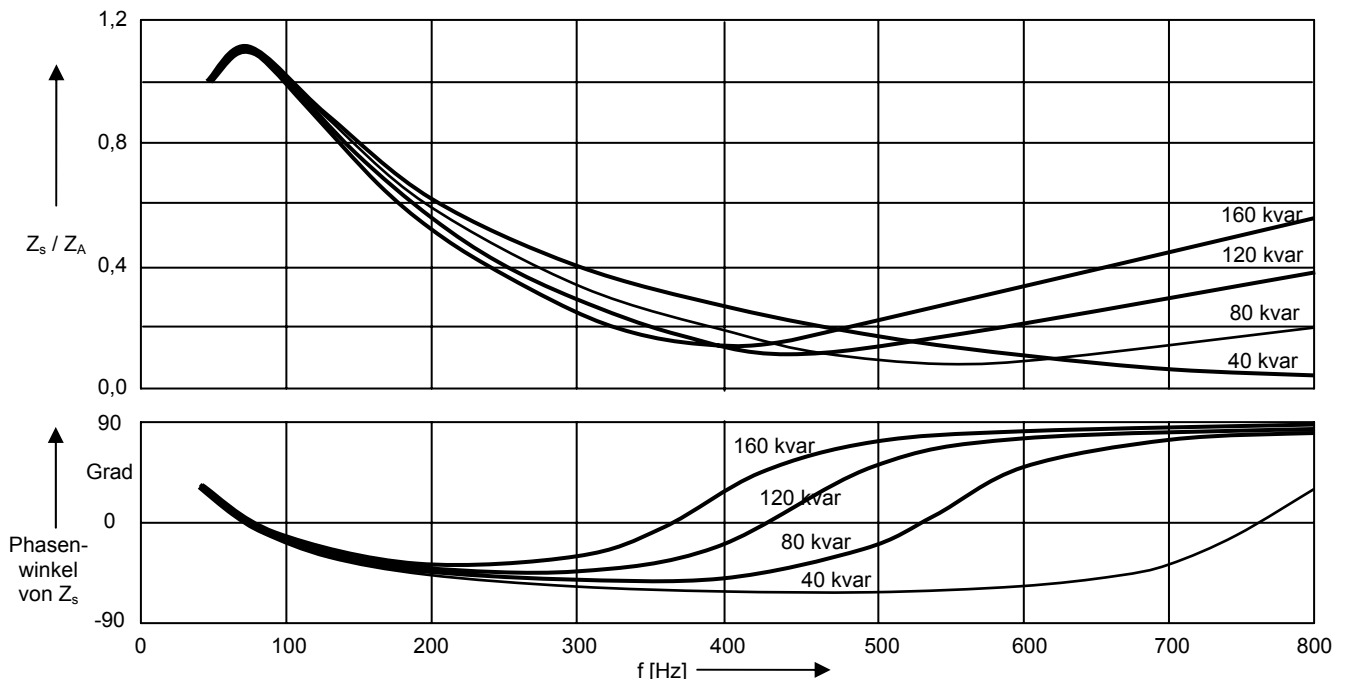


Bild 4-1b: Impedanzcharakteristik vom *Verknüpfungspunkt V* aus gesehen

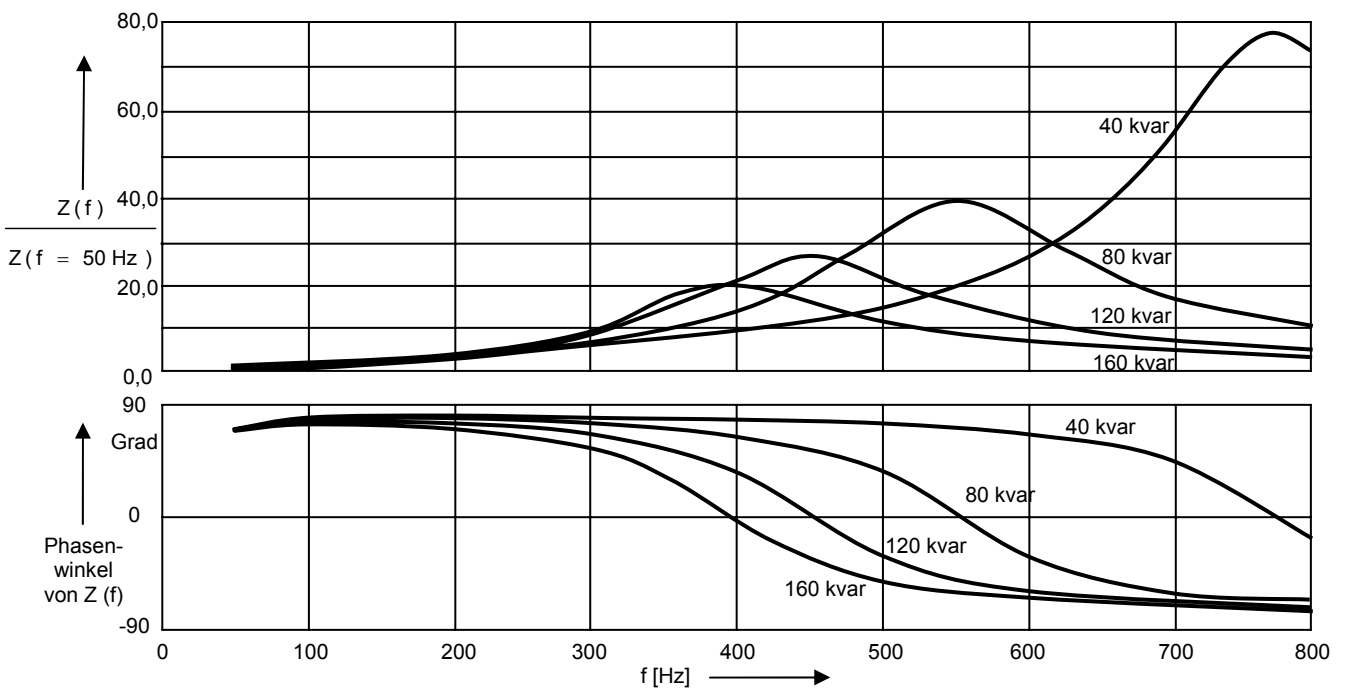


Bild 4-1c: Impedanzcharakteristik von der *Anlage des Netzbenutzers* aus gesehen

Bild 4-1: ***Anlage des Netzbenutzers*** mit direkt angeschlossenen Kompensationskondensatoren

4.2 Verdrosselte Kompensationskondensatoren

Eine *Verdrosselung* der Kompensationskondensatoren ist notwendig bei:

- Rundsteuerfrequenzen > 250 Hz
- hohem Oberschwingungspegel
- Kompensationsleistungen > 35 % der *Vertragsleistung*

Bei der *Verdrosselung* werden den Kondensatoren Drosseln vorgeschaltet. Dadurch erhält der Reihenschwingkreis „Transformator – Drossel – Kondensator“ eine definierte *Resonanzfrequenz*, die in der Regel unterhalb der ausgeprägten Oberschwingung von 250 Hz gelegt wird. Das Maß der *Verdrosselung* wird durch den *Verdrosselungsgrad* p (siehe **Anhang B** „Erforderlicher Verdrosselungsgrad von Kompensationsanlagen“) ausgedrückt. Eine mit p verdrosselte Kompensationsanlage ergibt eine Reihenresonanzfrequenz von

$$f_{\text{OR}} = \frac{f}{\sqrt{p}} = \frac{50 \text{ Hz}}{\sqrt{p}}$$

Beispiel: $p = 7 \%$

$$f_{\text{OR}} = \frac{50 \text{ Hz}}{\sqrt{0,07}} \approx 189 \text{ Hz}$$

Vom Mittelspannungsnetz aus gesehen liegt die Reihenresonanzfrequenz, durch die vorgeschaltete Transformatorreaktanz tiefer.

Im Allgemeinen sind *Verdrosselungen* mit $p < 5 \%$ unüblich.

Die Impedanz des Reihenschwingkreises vom *Netz* aus gesehen muss für die Rundsteuerfrequenz genügend hochohmig sein. Hierzu sind bestimmte Werte für die *Verdrosselung* einzuhalten.

Bild 4-2 zeigt, dass z.B. mit dem dort gewählten *Verdrosselungsgrad* $p = 7 \%$ in dieser *Anlage des Netzbenutzers* der erforderliche *Impedanzfaktor* $\varepsilon \geq 0,4$ bei der Rundsteuerfrequenz $f_s = 183 \text{ Hz}$ nicht in jedem Fall eingehalten werden kann.

Es ist zu beachten, dass die 50-Hz-Spannung am Kondensator durch die *Verdrosselung* um etwa $p \%$ erhöht wird, so dass eine Nachverdrosselung unter Beibehaltung der Kondensatoren oftmals nicht möglich ist.

Anmerkung: Ein hoher Oberschwingungspegel innerhalb der Anlage des Netzbenutzers ist dann anzunehmen, wenn die Leistung der Oberschwingungserzeuger mehr als 20 % der tatsächlich installierten Leistung der Anlage des Netzbenutzers beträgt.

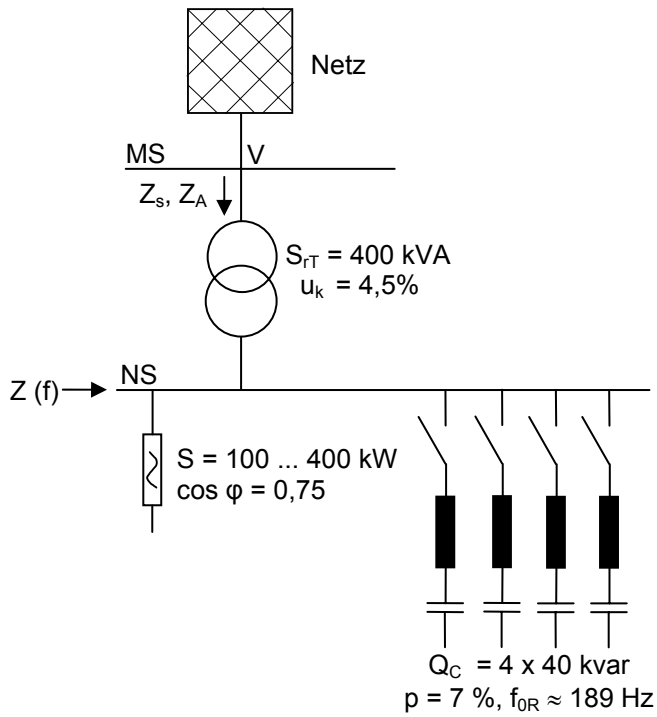


Bild 4-2a: Netzschema

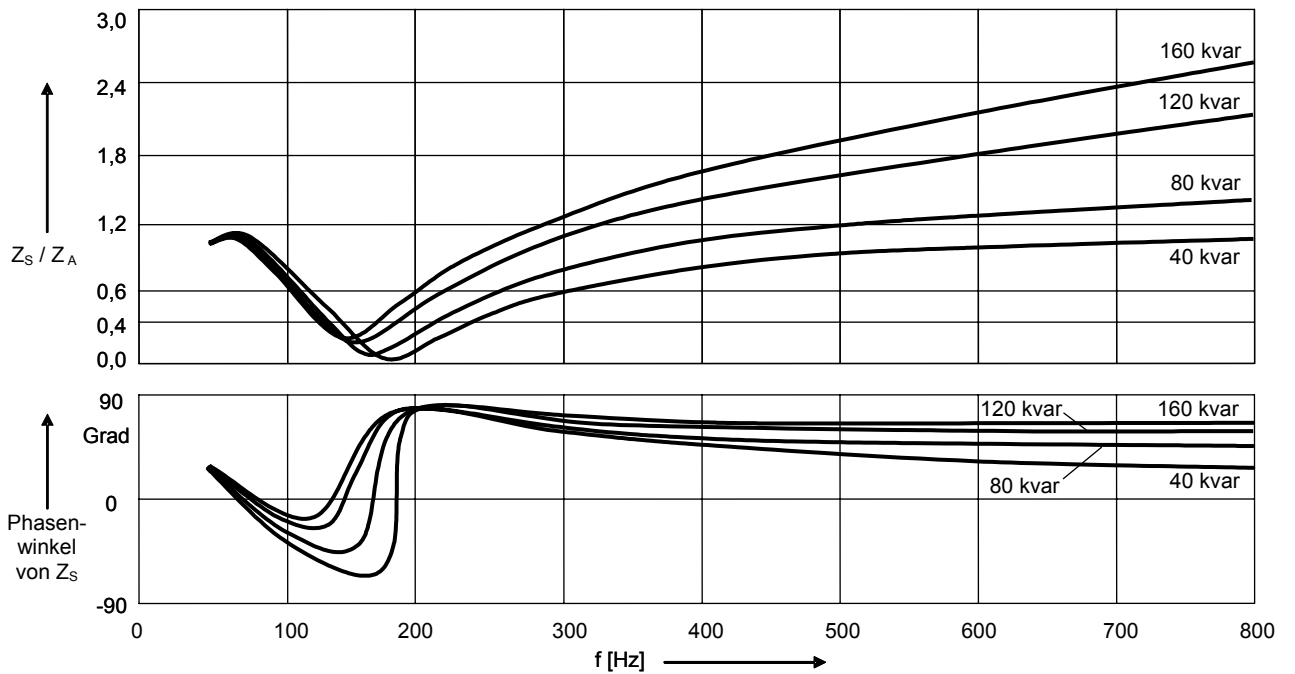


Bild 4-2b: Impedanzcharakteristik vom Verknüpfungspunkt V aus gesehen

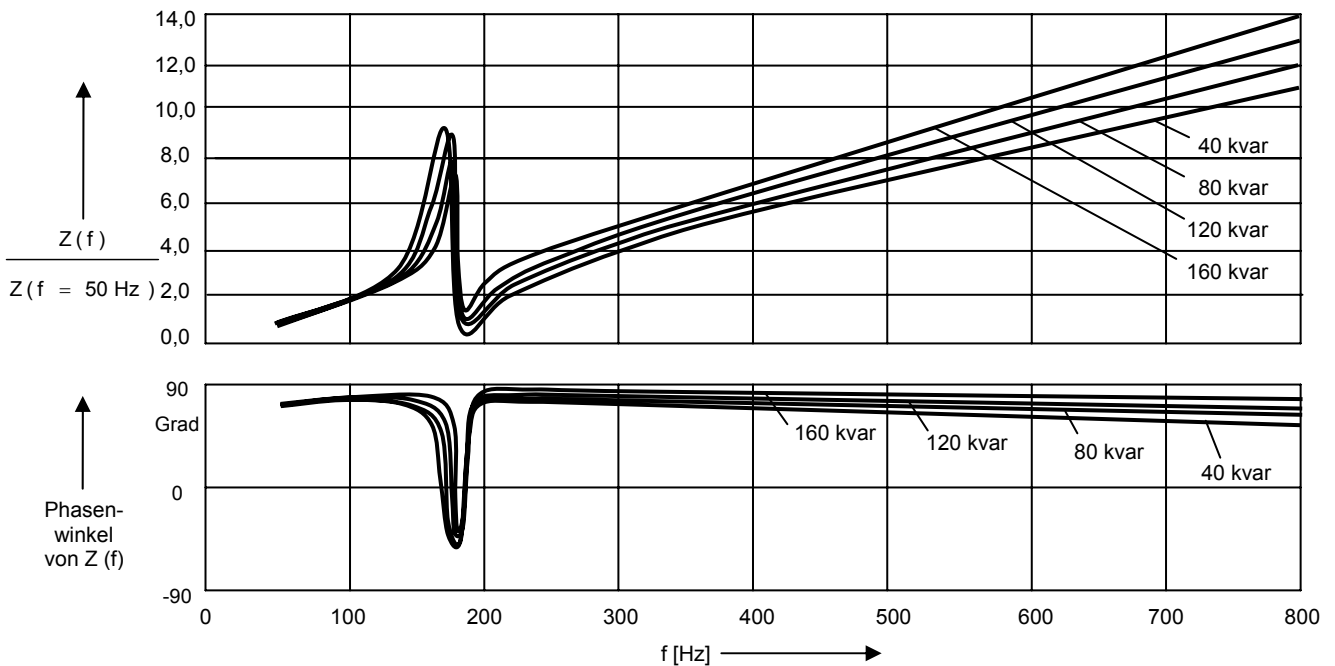


Bild 4-2c: Impedanzcharakteristik von der *Anlage des Netzbenutzers* aus gesehen
Bild 4-2: *Anlage des Netzbenutzers* mit verdrosselten Kompensationskondensatoren (hier 7 %)

4.2.1 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei Rundsteuerfrequenzen > 250 Hz

Bei Rundsteuerfrequenzen > 250 Hz ist die *Verdrosselung* gemäß Tabelle 4-1 auszuführen.

Rundsteuerfrequenz f_s	Verdrosselungsgrad p
250 ÷ 350 Hz	$\geq 7 \%$
> 350 Hz	$\geq 5 \%$

Tabelle 4-1: *Verdrosselungsgrade* bei Rundsteuerfrequenzen

Bei Kompensationsanlagen mit einer *Leistung* von ≤ 10 kvar pro *Anlage des Netzbenutzers* ist im Allgemeinen keine *Verdrosselung* erforderlich. Allerdings können bei hohen Rundsteuerfrequenzen unzulässige Beeinflussungen entstehen, die auch in diesen Fällen zusätzliche Maßnahmen wie z.B. eine *Verdrosselung* erfordern.

4.2.2 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz

Bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz ist eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Unter anderem ist die Art der *Last* des *Netzbenutzers*, der Kompensationsgrad, der Transformator und die Rundsteuerfrequenz.

4.2.2.1 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz, Verknüpfungspunkt im Mittelspannungsnetz

Das unter **Punkt 3.2** genannte vereinfachte Beurteilungskriterium (*Impedanzfaktor* $\varepsilon^* \geq 0,5$) wird bei folgendem *Verdrosselungsgrad* p erfüllt:

- a) *Verdrosselungsfrequenz* der Kompensationsanlage liegt unterhalb der verwendeten Tonfrequenz

$$p > \frac{1}{n^2}$$

$$p \geq \frac{\frac{1}{n^2} + k \left(\frac{1}{2n} - u_k \right)}{1 + k \left(\frac{1}{2n} - u_k \right)} \quad (4.1)$$

p *Verdrosselungsgrad*

n Verhältnis der Rundsteuerfrequenz f_s zur *Frequenz* f (50 Hz)

k *Kompensationsgrad*

u_k relative Kurzschlussspannung des Transformators

Bei hohem Anteil an drehenden Maschinen, bei Versorgung über mehrere Transformatoren, bei gering ausgenützter Transformatorleistung oder wenn mit einer späteren Erhöhung des *Kompensationsgrades* k zu rechnen ist, darf die Gleichung 4.1 nicht angewendet werden. Unter diesen Bedingungen ist eine Bemessung der Kompensationsanlage auf Basis des *Impedanzfaktors* $\varepsilon \geq 0,4$ (siehe **Punkt 3.2**) durchzuführen.

- b) Für sehr niedrige Rundsteuerfrequenzen (< 200 Hz) kann eine *Verdrosselungsfrequenz* oberhalb der Rundsteuerfrequenz ebenfalls zu einem ausreichenden *Impedanzfaktor* ε führen

$$p < \frac{1}{n^2}$$

$$p \leq \frac{\frac{1}{n^2} - k \left(\frac{1}{2n} + u_k \right)}{1 - k \left(\frac{1}{2n} + u_k \right)} \quad (4.2)$$

$$n = \frac{f_s}{f} = \frac{f_s}{50 \text{ Hz}}$$

p *Verdrosselungsgrad*

n Verhältnis der Rundsteuerfrequenz f_s zur *Frequenz* f (50 Hz)

k *Kompensationsgrad*

u_k relative Kurzschlussspannung des Transformators

f_s Rundsteuerfrequenz

f *Frequenz* (50 Hz)

Anmerkungen:

- Bei $k \leq 0,5$ kann zur Bestimmung von p auch das Diagramm in **Anhang B** „Erforderlicher Verdrosselungsgrad von Kompensationsanlagen“ angewandt werden.
- Bei der Wahl des Verdrosselungsgrades sollte der zukünftige Ausbau der Anlage des Netzbenutzers berücksichtigt werden. Eine spätere Erhöhung des Kompensationsgrades k würde einen höheren Verdrosselungsgrad p für die gesamte Kompensationsanlage erfordern.
- Eine Netzberechnung unter Berücksichtigung aller Lasten (Impedanzfaktor ε) kann zu anderen Werten für die Verdrosselung führen.
- Hohe Verdrosselungsgrade haben neben den Investitions- auch höhere Betriebskosten zur Folge. Außerdem ist zu beachten, dass mit steigendem Verdrosselungsgrad der gewünschte Effekt der Reduzierung der 5. Oberschwingung abnimmt.

4.2.2.2 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz, Verknüpfungspunkt im Niederspannungsnetz (mehrere Anlagen von Netzbenutzern über einen Transformator versorgt)

In diesen Fällen muss bei Anschluss von Kompensationsanlagen darauf geachtet werden, dass ein ausreichender *Steuerpegel* bei den Rundsteuerempfängern sichergestellt ist.

Eine *Verdrosselung* der Kompensationskondensatoren kann unter folgenden Voraussetzungen mit $p \geq 14\%$ erfolgen:

- Motorische Leistung > 35 % der *Vertragsleistung* und
- Leistung der Kompensationsanlage > 35 % der *Vertragsleistung*

Wenn keine weiteren Kondensatoren bzw. motorischen *Lasten* im *Netz* des Transformators angeschlossen sind bzw. werden, kann die motorische *Leistung* bzw. die *Leistung* der Kompensationsanlage auf die Bemessungsleistung des Transformators bezogen werden.

4.3 Sonstige Schaltungen von Kompensationsanlagen

Bei Ausführung der Schaltungsvarianten unter den **Punkten 4.3.1** und **4.3.2** sind die Beurteilungsgrundsätze laut **Kapitel 3** einzuhalten. Derartige Schaltungen können zu weiteren Resonanzstellen führen, so dass in allen Fällen eine sorgfältige Dimensionierung und Abstimmung erforderlich ist.

4.3.1 Verdrosselte Kondensatoren in Parallelschaltung

Kompensationsanlagen können so aufgebaut werden, dass die Kondensatoren aufgeteilt und die Teilanlagen auf unterschiedliche Reihenresonanzfrequenzen verdrosselt werden. Je zwei parallel geschaltete Reihenresonanzkreise bilden so einen Parallelschwingkreis. Die Reihenresonanzfrequenzen liegen dabei jeweils ober- und unterhalb der Rundsteuerfrequenz. Bei Rundsteuerfrequenzen ≤ 190 Hz kann mit dieser Schaltung eine hohe Sperrwirkung für die Rundsteuerfrequenz und eine gute Saugwirkung für die 5. *Oberschwingung* bei vertretbarem Aufwand erreicht werden.

Dabei besteht entweder jede Stufe für sich bereits aus zwei Reihenschwingkreisen mit unterschiedlicher *Verdrosselung* (siehe **Bild 4-3**) oder es werden unterschiedlich verdrosselte Reihenschwingkreise einzeln abwechselnd zu- bzw. abgeschaltet.

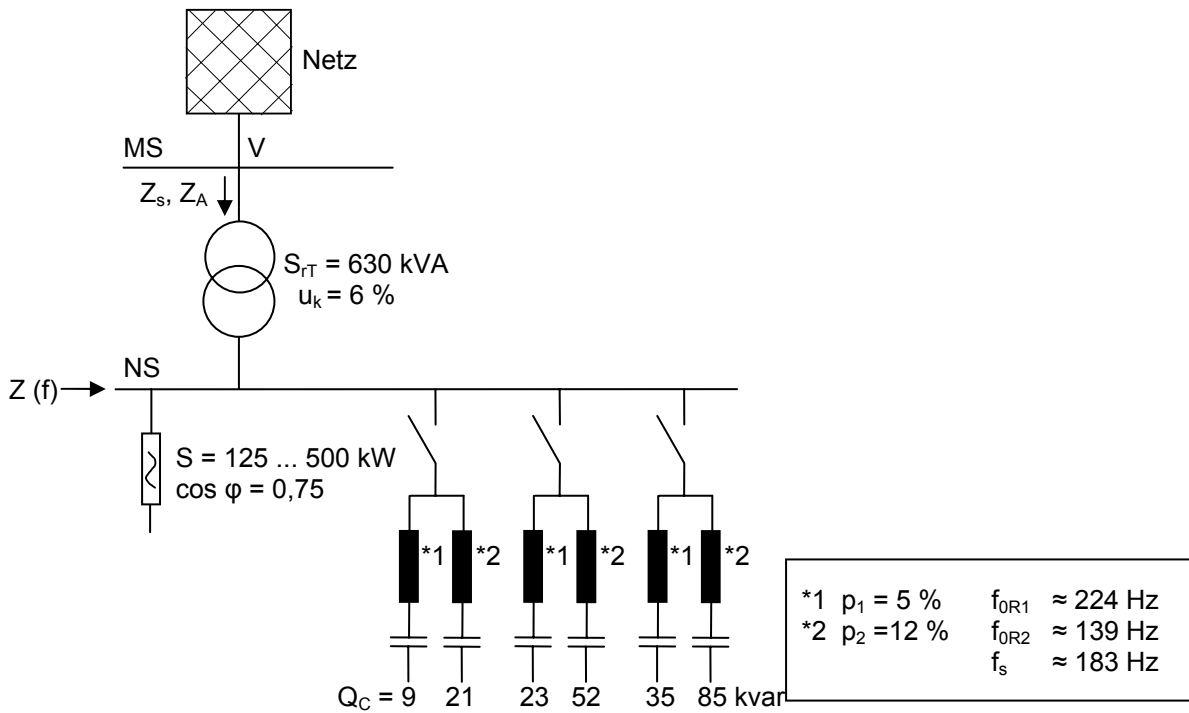


Bild 4-3a: Netzschema

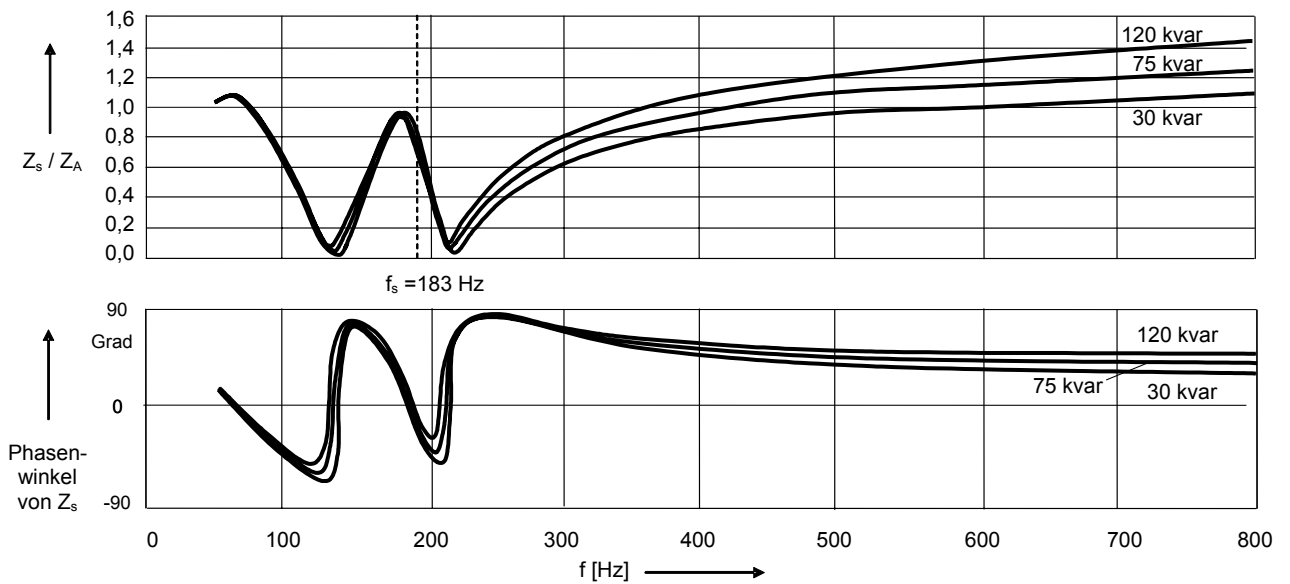


Bild 4-3b: Impedanzcharakteristik vom Verknüpfungspunkt V aus gesehen

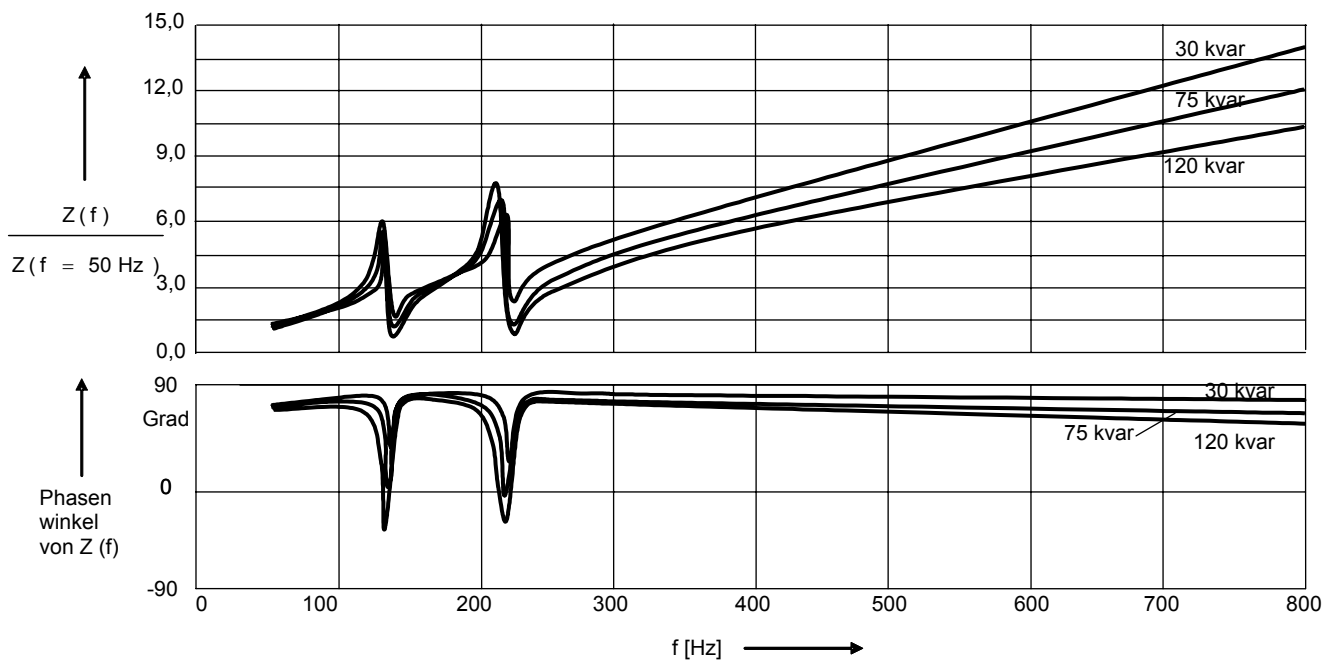


Bild 4-3c: Impedanzcharakteristik von der *Anlage des Netzbenutzers* (Niederspannungsseite) aus gesehen

Bild 4-3: Unterschiedlich verdrosselte Kondensatoren in Parallelschaltung

4.3.2 Gesperrte Kompensationsanlagen

Verdrosselte oder unverdrosselte Kompensationsanlagen können zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Rundsteuerung mit *Tonfrequenz-Sperrkreisen* (siehe **Kapitel 5**) versehen werden. Dabei sind für alle Belastungs- und Betriebsverhältnisse die grundsätzlichen Beurteilungskriterien aus **Kapitel 3** einzuhalten.

Es können Einzel- oder Blocksperrern eingesetzt werden.

4.3.2.1 Gesperrte, unverdrosselte Kompensationsanlagen

Werden regelbare Kompensationsanlagen mit nur einem gemeinsamen *Tonfrequenz-Sperrkreis* (Blocksperrre siehe **Bild 4-4** und **Kapitel 5**) versehen, so werden unterschiedliche *Resonanzfrequenzen* in Abhängigkeit von der Stufenstellung der Kompensationsanlage wirksam. Diese *Resonanzfrequenzen* sollten nicht im Bereich ausgeprägter *Oberschwingungen* liegen.

Durch Einsatz von Einzelsperren (siehe **Kapitel 5**) lässt sich diese Problematik teilweise entschärfen.

4.3.2.2 Gesperrte, verdrosselte Kompensationsanlagen

Werden verdrosselte Kompensationsanlagen zusätzlich gesperrt, stellen sich für die Gesamtanlage komplizierte Frequenzverläufe der Impedanz ein. Die gewünschte Sperrwirkung kann nicht immer erreicht werden.

Obwohl der *Tonfrequenzsperrkreis* in **Bild 4-5** auf die Rundsteuerfrequenz (hier 183 Hz) abgestimmt ist, wird der zulässige Mindestwert des *Impedanzfaktors* ε unterschritten. Weiterhin können sich für die *Anlage des Netzbenutzers* unerwünschte Resonanzen im Bereich ausgeprägter Oberschwingungen einstellen. Durch Einsatz von Einzelsperren (siehe **Kapitel 5**) lässt sich diese Problematik teilweise entschärfen.

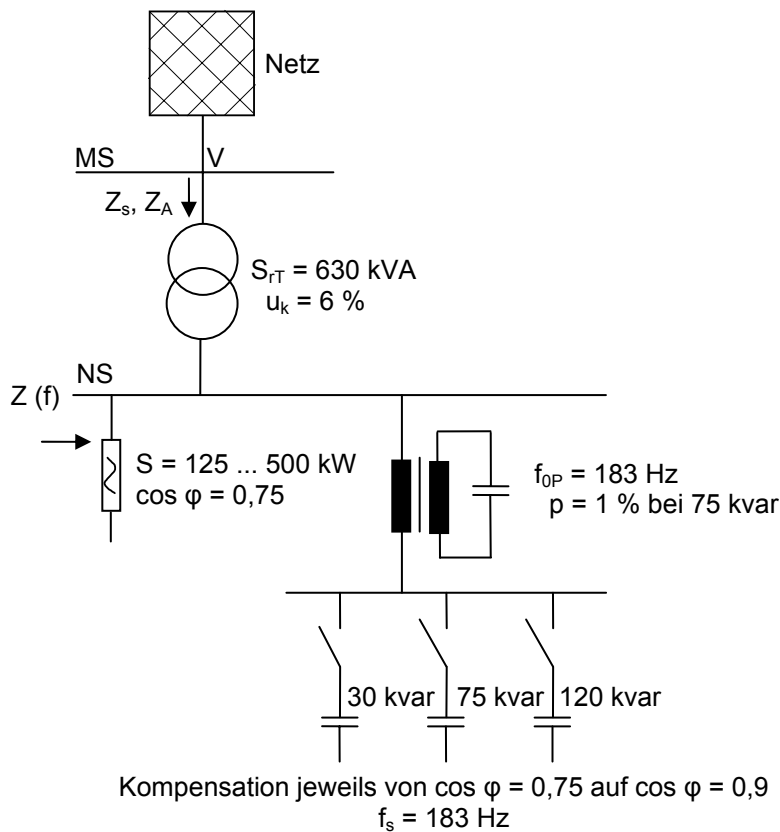


Bild 4-4a: Netzschema

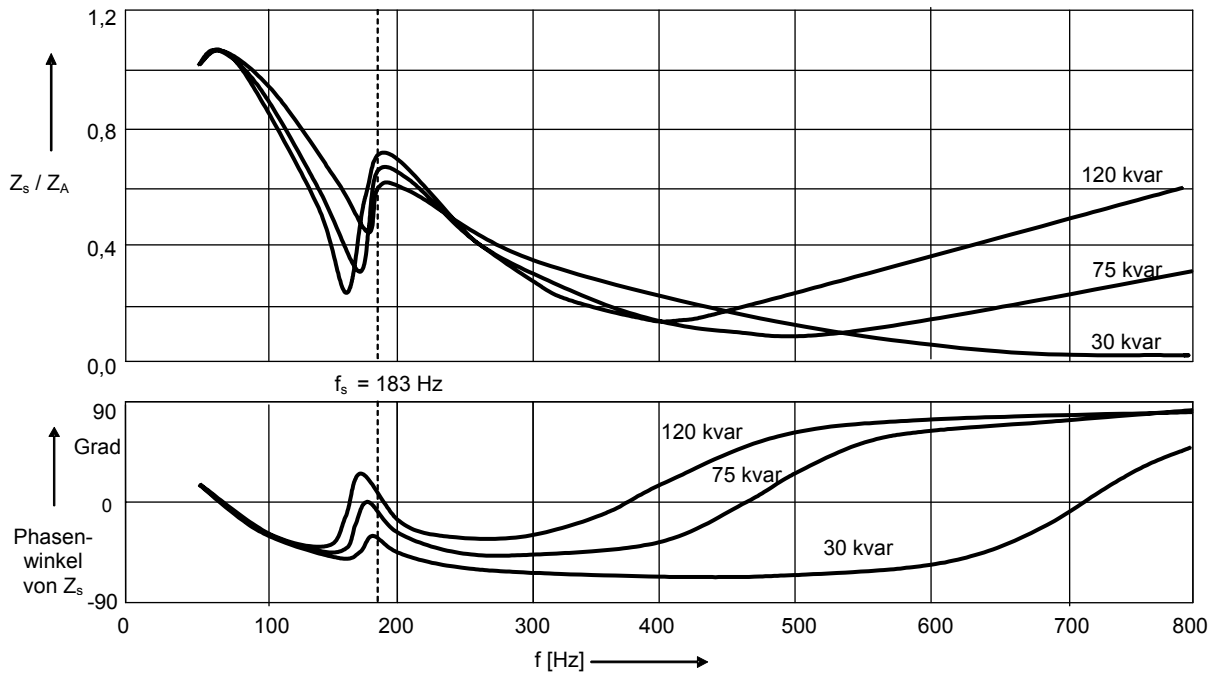


Bild 4-4b: Impedanzcharakteristik vom *Verknüpfungspunkt V* aus gesehen

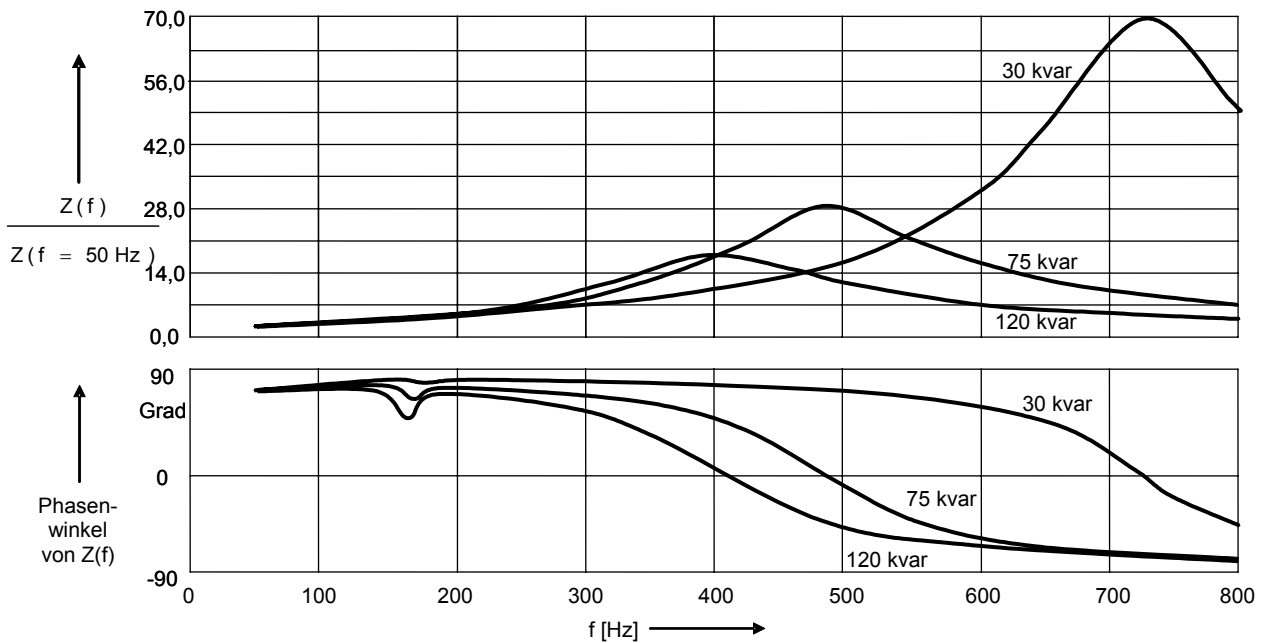


Bild 4-4c: Impedanzcharakteristik von der *Anlage des Netzbenutzers* (Niederspannungsseite) aus gesehen

Bild 4-4: Unverdrosselte Kompensation mit Blocksperr

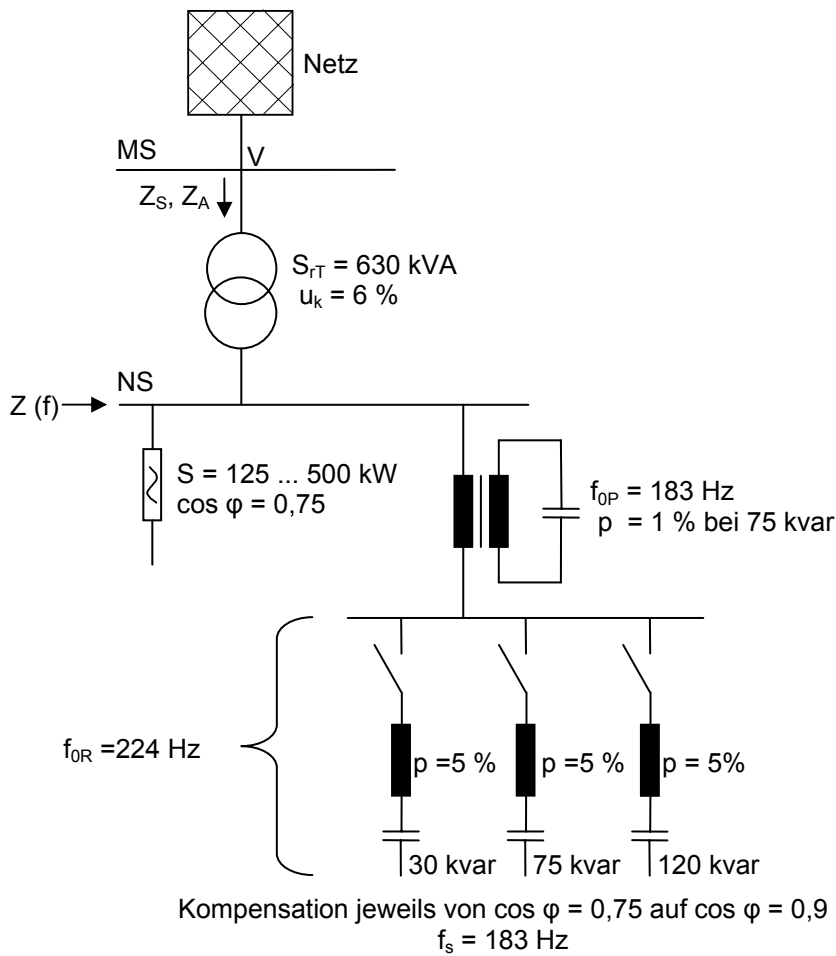


Bild 4-5a: Netzschema

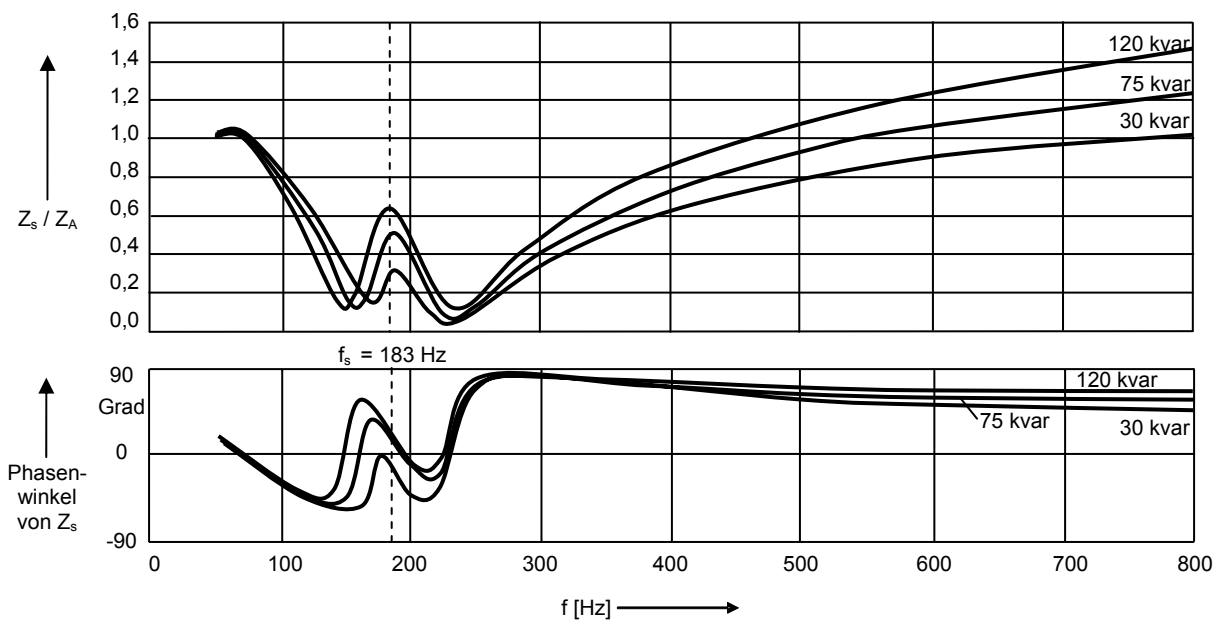


Bild 4-5b: Impedanzcharakteristik vom Verknüpfungspunkt V aus gesehen

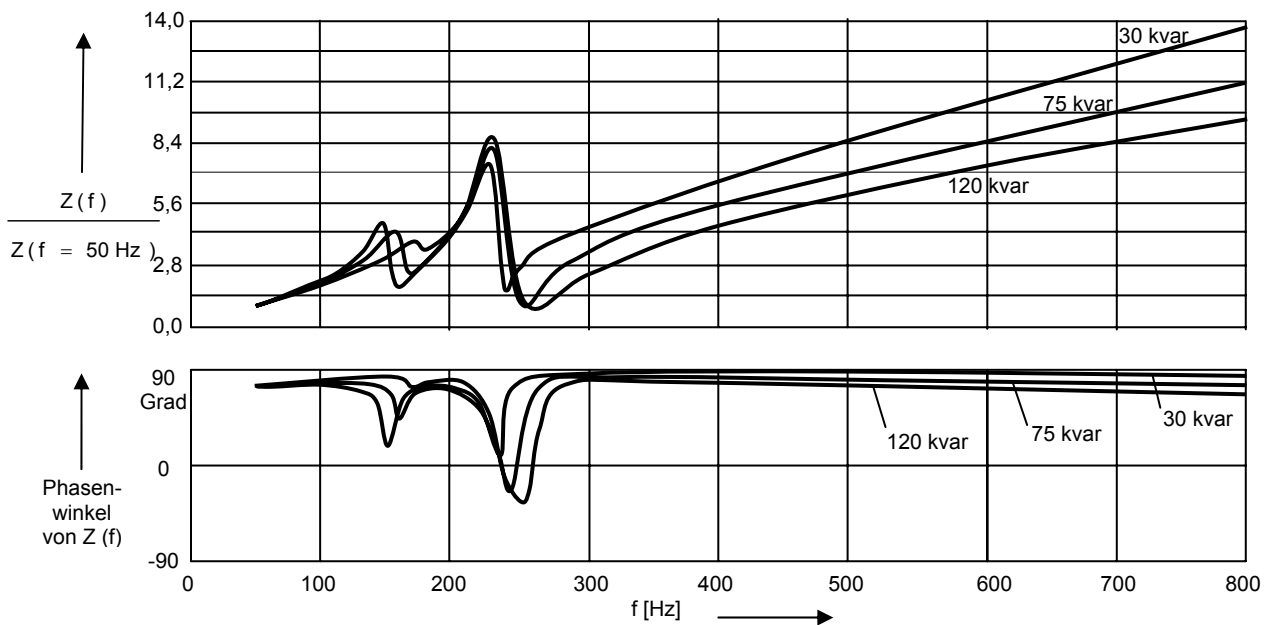


Bild 4-5c: Impedanzcharakteristik von der *Anlage des Netzbenutzers* (Niederspannungsseite) aus gesehen

Bild 4-5: **Kompensation mit Drossel-/Sperr-Kombination**

4.4 Kompensation von Leuchtstofflampen

Leuchtstofflampen benötigen zum ordnungsgemäßen Betrieb Vorschaltgeräte. Diese bewirken eine Vorheizung der Lampenelektroden, liefern die notwendige Zündspannung und begrenzen den Lampenstrom. In der Regel werden induktive Widerstände (Drosselspulen) als Vorschaltgeräte verwendet. Hierbei stellen sich induktive *Verschiebungsfaktor* im Bereich zwischen 0,3 und 0,6 ein.

Für Leuchtstofflampen mit induktiven Vorschaltgeräten finden in der Praxis zumeist die im **Bild 4-6** angegebenen Schaltungen Anwendung.

Hinsichtlich der Sicherstellung der EMV können je *Anlage des Netzbenutzers* Leuchtstofflampen einschließlich Kompaktleuchtstofflampen (Sparlampen) bis zu einem Leistungswert von 5 kW ohne Anfrage beim *Netzbetreiber* angeschlossen werden (siehe **TOR Hauptabschnitt D1, Kapitel 3**).

Bei Anschluss mehrerer Leuchtstofflampen mit induktiven Vorschaltgeräten innerhalb einer *Anlage des Netzbenutzers* sind ggf. Kompensationsmaßnahmen notwendig. Prinzipiell kann hierfür die Reihen-, aber auch die Parallelkompensation eingesetzt werden.

Leuchtstofflampen werden elektrisch für die Reihen- bzw. für die Parallelkompensation bemessen. Eine nachträgliche Umrüstung von z. B. Parallel- auf Reihenkompensation ist aufwendig. Bereits bei der Projektierung entsprechender Beleuchtungseinrichtungen muss die Kompensationsart im Hinblick auf die Rundsteuerfrequenz des zuständigen *Netzbetreibers* festgelegt werden. Um unzulässige Resonanzerscheinungen bei Oberschwingungsfrequenzen oder unzulässige Beeinflussungen der Tonfrequenzrundsteuerung (TRA) zu vermeiden, ist in Netzen mit einer TRA, welche mit einer Frequenz > 300 Hz betrieben wird, die Einzelkompensation von Entladungslampen durch Parallelschalten von Kondensatoren an eine Zustimmung des *Netzbetreibers* gebunden.

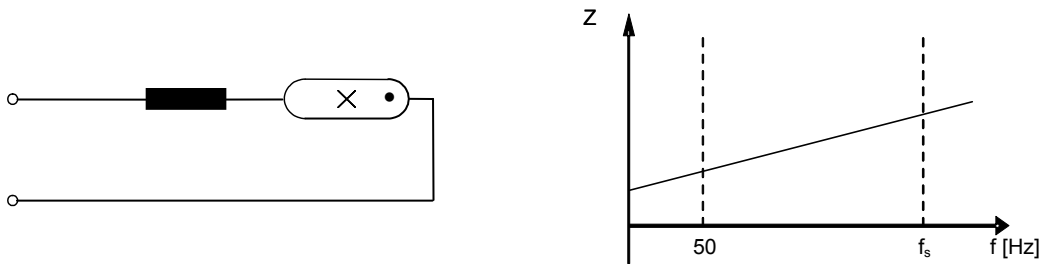


Bild 4-6a: Leuchtstofflampe mit induktivem Vorschaltgerät, Einzelschaltung, induktiv, unkompensiert

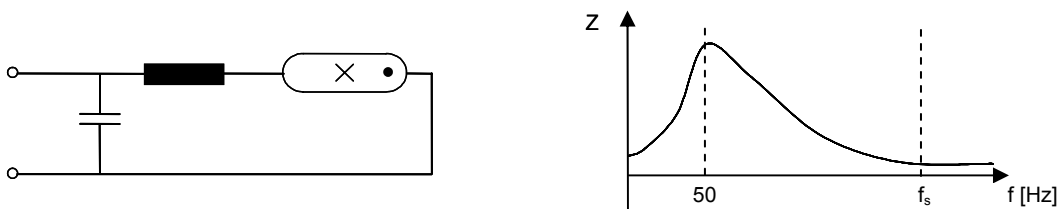


Bild 4-6b: Leuchtstofflampe mit induktivem Vorschaltgerät und Parallelkompensation, Einzelschaltung, induktiv, kompensiert

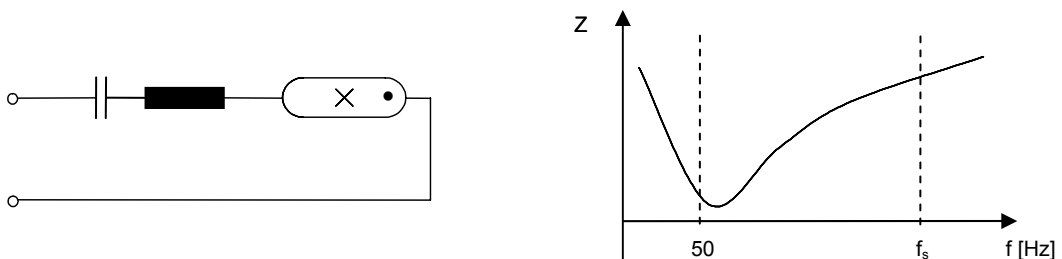


Bild 4-6c: Leuchtstofflampe mit induktivem Vorschaltgerät und Reihenkompensation, Einzelschaltung, kapazitiv, kompensiert

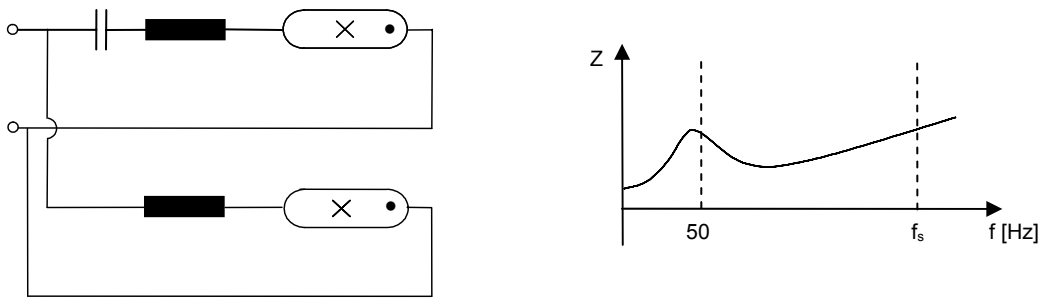


Bild 4-6d: Leuchtstofflampen mit induktivem Vorschaltgerät und Reihenkomensation, Duo-Schaltung, auf $\cos \varphi = 1$ kompensiert.

Bild 4-6: **Schaltungen von Leuchtstofflampen** (f_s ...Rundsteuerfrequenz)

Alternativ zu induktiven Vorschaltgeräten ist die Verwendung elektronischer Vorschaltgeräte möglich, so dass Kompensationsmaßnahmen entfallen können.

Wie die **Bilder 4-6 a bis d** deutlich machen, sind die Impedanzen der Lampenschaltungen frequenzabhängig. Durch die oftmals notwendigen Kompensationsmaßnahmen können sich, besonders bei der Parallelkomensation im Bereich der verwendeten Rundsteuerfrequenz, niederohmige Impedanzen einstellen. Hierdurch bedingt kann der *Steuerpegel* der Rundsteuerung unzulässig abgesenkt werden, so dass ein betriebssicheres Ansteuern der im öffentlichen Niederspannungsnetz eingebauten Rundsteuerempfänger unmöglich wird.

Reihenkomensation

Durch die Reihenschaltung von Kompensationskondensator und induktivem Vorschaltgerät werden im Allgemeinen für die Rundsteuerung ausreichende Impedanzen erreicht. Die Reihenkomensation ist aus Sicht der Rundsteuerung im Regelfall unproblematisch.

Parallelkomensation

Verbrauchernah und parallel zur Leuchtstofflampe geschaltete Kompensationskondensatoren können in ausgedehnten Beleuchtungsanlagen durch ihre Summenwirkung zu beträchtlichen Kapazitäten führen. Inwieweit sich hierdurch für die Rundsteuerung unzulässige Bedingungen ergeben, hängt von den Einflussgrößen des *Netzes*, der *Anlage des Netzbenutzers* bzw. *Anlagen der Netzbenutzer* sowie der Rundsteuerung ab.

Die Parallelkomensation von Leuchtstofflampen kann unter bestimmten Einflussgrößen zu unzulässig niedrigen *Steuerpegeln* führen. In ausgedehnten Beleuchtungsanlagen und bei Rundsteuerfrequenzen > 300 Hz können zusätzliche Maßnahmen zur Impedanzerhöhung, wie z.B. *Verdrosselung* oder *Tonfrequenz-Sperrkreise*, notwendig werden.

Anmerkung: Da in der Schweiz vorwiegend hohe Rundsteuerfrequenzen verwendet werden, ist die Parallelkompensation von Leuchtstofflampen unzulässig, sodass hier ggf. die Reihenkompensation oder elektronische Vorschaltgeräte eingesetzt werden müssen.

5. Tonfrequenz-Sperrkreis

Tonfrequenz-Sperrkreise dienen der Impedanzhöhung bei Rundsteuerfrequenz. Hierbei handelt es sich um Parallelschwingkreise, die aus einer Drosselspule und einem dazu parallel geschalteten Kondensator (Sperrkreiskondensator) aufgebaut sind. Die *Resonanzfrequenz* entspricht der Rundsteuerfrequenz. Oft wird die Drosselspule als Transformator ausgeführt und der Kondensator sekundärseitig angeschlossen (siehe **Bild 5-1**).



Bild 5-1: *Tonfrequenz-Sperrkreis* *Tonfrequenz-Sperrkreis* mit transformatorischer Kopplung

Nach der Zuordnung der *Tonfrequenz-Sperrkreise* unterscheidet man

- Sperren für die gesamte *Anlage des Netzbenutzers* (Gesamtsperrre),
- Sperren für Gruppen von *Betriebsmitteln* (Blocksperrre) und
- Sperren für einzelne *Betriebsmittel* (Einzelsperren).

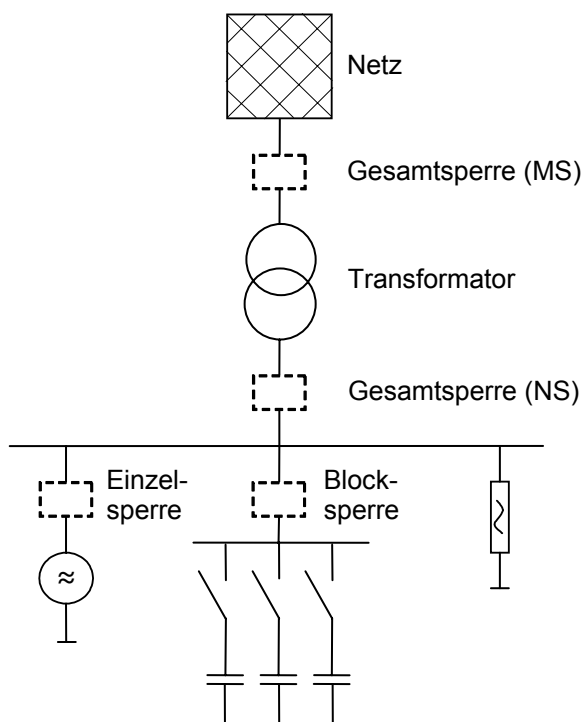


Bild 5-2: Beispiele möglicher Einbauorte von *Tonfrequenz-Sperrkreisen*

Bei der Auslegung von Sperren ist zu berücksichtigen:

- Es entstehen zusätzliche Resonanzstellen, so dass eine sorgfältige Dimensionierung und Abstimmung erforderlich ist.
- Der Betriebs- und Kurzschlussstrom am Einbauort (siehe **Bild 5-2**).
- Die Oberschwingungspegel am *Verknüpfungspunkt V*.

6. Saugkreisanlagen

Saugkreisanlagen reduzieren die Oberschwingungsspannungen. Sie werden aus parallel geschalteten Reihenresonanzkreisen aufgebaut, die jeweils auf die Frequenz einer ausgeprägten *Oberschwingung* oder wenig darunter abgestimmt werden.

Da Saugkreisanlagen die Rundsteueranlage unzulässig beeinträchtigen können, sind die Beurteilungsgrundsätze aus **Kapitel 3** dieser Empfehlung einzuhalten.

Durch das Zusammenwirken mit dem vorgeschalteten Transformator werden die *Resonanzfrequenzen* der Saugkreisanlage vom *Netz* aus gesehen erniedrigt. Damit kann der zulässige *Impedanzfaktor* ε unterschritten werden. Dies kann man durch die Installation eines weiteren *Saugkreises* mit tieferer Reihenresonanzfrequenz als der Rundsteuerfrequenz vermeiden.

Bei der Dimensionierung von Saugkreisanlagen ergeben sich folgende Probleme:

- Die Impedanz des vorgelagerten *Netzes* in Funktion der Frequenz am *Verknüpfungspunkt V* muss bekannt sein. Berechnungen dieser Impedanz liefern praktikable Werte; diese sind aber immer nur so genau, wie die Topologie des *Netzes* und die Daten der übrigen *Verbraucher* berücksichtigt wurden. Oftmals können entsprechende Messungen der Impedanz nützlich sein.
- Das Oberschwingungsstromspektrum der *Anlage des Netzbennutzers* muss bekannt sein. Hier liegt das größte Problem, denn man kann davon ausgehen, dass sich das Oberschwingungsstromspektrum in einem großen Bereich stetig ändert (z.B. Seilbahnantrieb).
- Da *Saugkreise* für die *Grundschiwingung* eine kapazitive Reaktanz darstellen, nehmen sie neben dem Oberschwingungsstrom auch kapazitiven Grundschiwingungsstrom auf, so dass sie zur *Blindleistungskompensation* beitragen. Auslegungskriterium für eine Saugkreisanlage ist jedoch die Saugwirkung bei den *Oberschwingungen*, nicht die Kompensationswirkung. Eine Überkompensation oder ein nicht ausreichender *Impedanzfaktor* ε erfordern im Einzelfall die Zustimmung des *Netzbetreibers*.

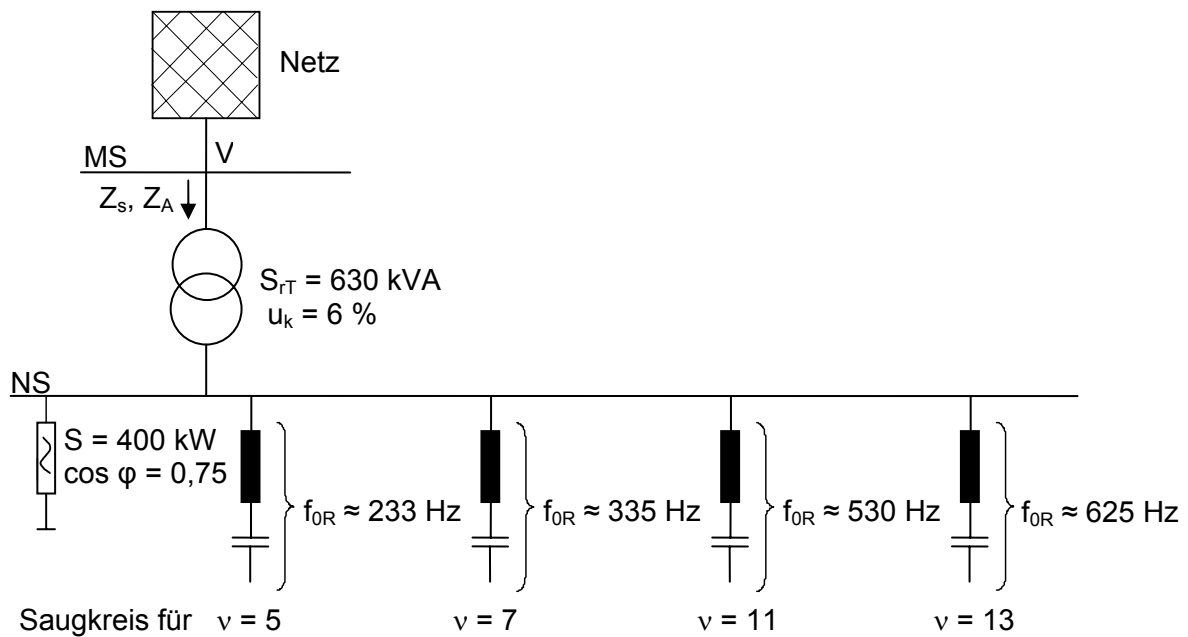


Bild 6-1a: Netzschema

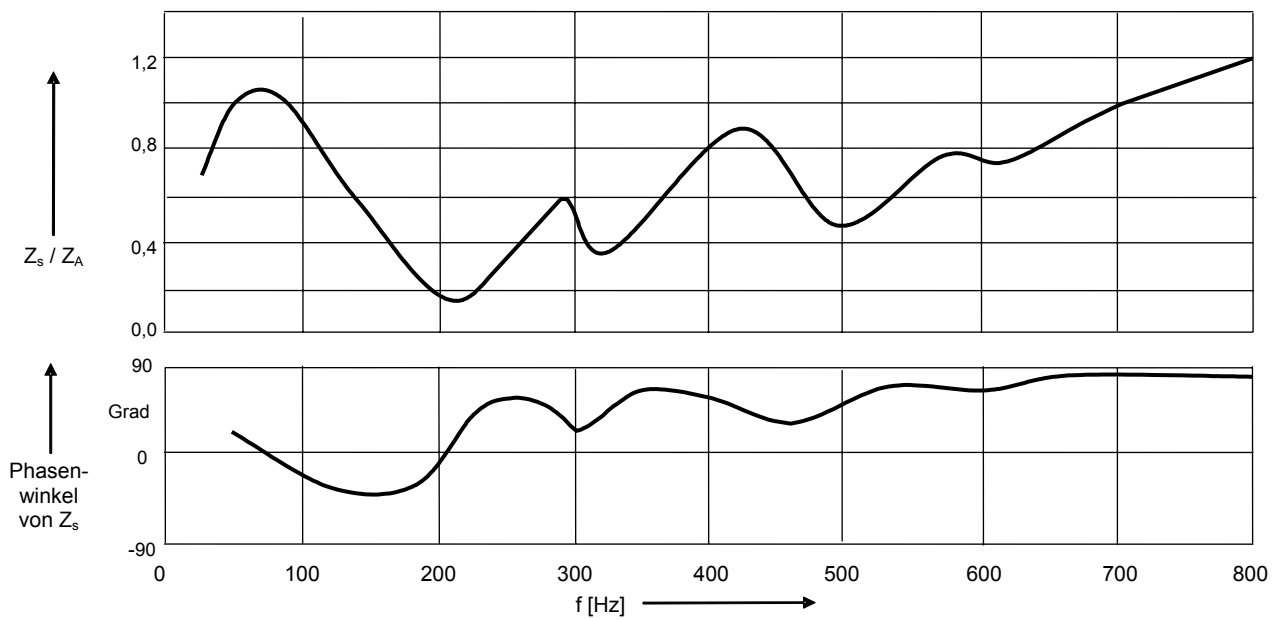


Bild 6-1b: Impedanzcharakteristik vom Verknüpfungspunkt V aus gesehen

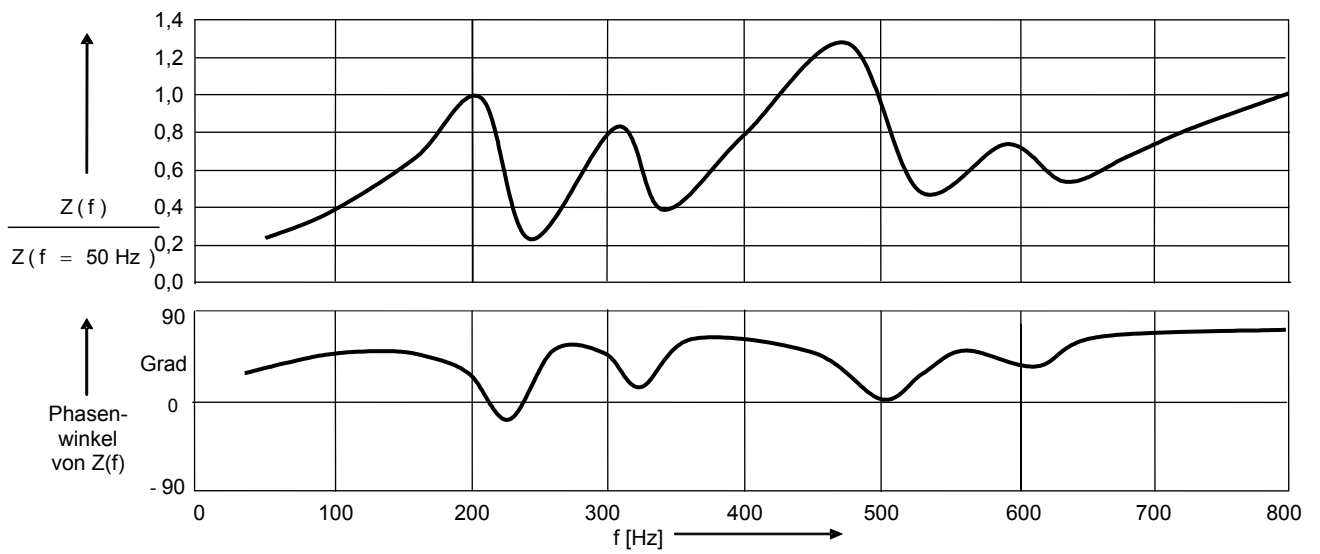


Bild 6-1c: Impedanzcharakteristik von der *Anlage des Netzbenutzers* (Niederspannungsseite) aus gesehen

Bild 6-1: Saugkreisanlagen

7. Aktive Oberschwingungskompensation

Neben den Saugkreisanlagen werden aktive Kompensatoren zur Reduzierung von Harmonischen und Zwischenharmonischen eingesetzt. Im Gegensatz zu den aus den passiven Elementen „Drossel“ und „Kondensator“ bestehenden Saugkreisanlagen analysieren die aktiven Kompensatoren kontinuierlich den zu „glättenden“ Laststrom und speisen einen entsprechend errechneten Korrekturstrom ein. Die harmonischen und gegebenenfalls zwischenharmonischen Anteile des Korrekturstromes werden dabei vom aktiven Kompensator in Phasenopposition zu denen des Laststromes eingespeist. Durch den Einsatz eines aktiven Kompensators kann erreicht werden, dass der vom *Netzbetreiber* bezogene Laststrom nahezu sinusförmig wird.

Solange ein aktiver Kompensator ausschließlich Korrekturstrome einspeist, deren Frequenzen ausreichende Abstände zur Rundsteuerfrequenz aufweisen, entstehen durch den aktiven Kompensator keine Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung. Sobald ein aktiver Kompensator jedoch auch Korrekturstrome mit Anteilen nahe oder gleich der Rundsteuerfrequenz einspeist, kann die Rundsteuerung unzulässig beeinflusst werden. Hier gilt, dass von den aktiven Kompensatoren kein Korrekturstrom im Bereich der verwendeten Rundsteuerfrequenz eingespeist werden darf. In jedem Fall sind die Beurteilungsgrundsätze gemäß **Punkt 3.4** einzuhalten.

8. Motoren und Generatoren

Direkt angeschlossene rotierende Maschinen, d.h. Motoren und Generatoren - ohne vorgeschaltete Leistungssteuerung - stellen für die Rundsteuerfrequenz eine induktive Belastung dar.

Diese Induktivität bewirkt besonders bei tiefen Rundsteuerfrequenzen eine nicht unwesentliche Belastung der Sendeanlage. Demzufolge dürfen bei tiefen Rundsteuerfrequenzen derartige Belastungen einer *Anlage des Netzbennutzers* nicht vernachlässigt werden.

Für die Impedanz bei der Rundsteuerfrequenz ist die Anfangsreaktanz x'' maßgebend, die nur einen Bruchteil der 50-Hz-Impedanz beträgt und auch zur Ermittlung des Anlauf- und Kurzschlussstromes eingesetzt wird. Die Anfangsreaktanz x'' der Motoren und Generatoren hängt stark von der Bauweise ab.

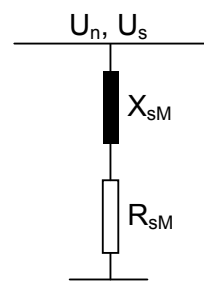
Für eine grobe Abschätzung der *Tonfrequenzimpedanz* genügen folgende Annahmen:

$$X_{sM} \approx \frac{U_n^2}{S_M} \cdot n \cdot x''$$

$$x'' \approx 0,1 \dots 0,3$$

$$\frac{R_{sM}}{X_{sM}} \approx 0,1 \dots 0,3$$

$$n = \frac{f_s}{f} = \frac{f_s}{50 \text{ Hz}}$$



Ersatzschaltbild

X_{sM}Reaktanz (induktiver Widerstand) des Motors bzw. Generators bei Rundsteuerfrequenz

U_n *Nennspannung des Netzes*

S_M Scheinleistung des Motors bzw. Generators

n Verhältnis der Rundsteuerfrequenz zur *Frequenz* (50 Hz)

x'' x_d'' der Synchronmaschine oder I_r / I_a der Asynchronmaschine

R_{sM} Resistanz (ohmscher Widerstand)des Motors bzw. Generators bei Rundsteuerfrequenz

f_s Steuerfrequenz der Rundsteuerung (Rundsteuerfrequenz)

f *Frequenz* (50 Hz)

U_s Steuerspannung

I_n Nennstrom (z.B. der Asynchronmaschine)

I_a Anlaufstrom der Asynchronmaschine

9. Eigenerzeugungsanlagen

Rundsteueranlagen werden für eine Belastung dimensioniert, die der 50-Hz-Last des *Netzes* entspricht, in das die Einspeisung der *Steuerspannung* erfolgt. *Eigenerzeugungsanlagen* wie z.B. Wasser-, Wind- und Photovoltaikanlagen oder durch Wärmekraftmaschinen angetriebene Generatoren beeinflussen die Rundsteuerung durch

- eine mögliche Erhöhung der im Versorgungsbereich des Transformators angeschlossenen Netzlasten
- eine hohe Belastung der Rundsteuersendeanlagen
- unzulässige Steuerpegeländerungen am *Verknüpfungspunkt V*

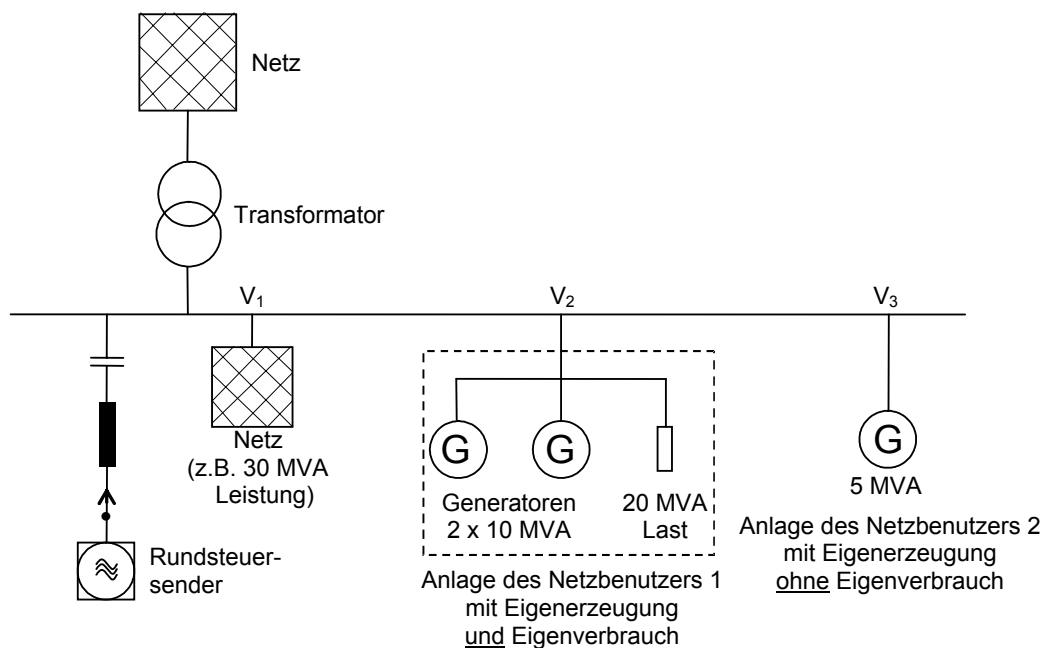


Bild 9-1: Versorgungsbereich mit *Eigenerzeugungsanlagen*

Der Rundsteuersender muss z.B. folgende *Lasten* speisen:

- 30 MVA *Last* im Netz, V₁
- 20 MVA *Last* in der *Anlage des Netzbenutzers 1*, V₂ (die 50-Hz-*Last* wird ganz oder teilweise aus der *Eigenerzeugungsanlage* gespeist)
- 20 MVA Generatoren in der *Anlage des Netzbenutzers 1*, V₂
- 5 MVA Generator in der *Anlage des Netzbenutzers 2*, V₃

9.1 Eigenerzeugungsanlagen, die über statische Umrichter an das Netz angeschlossen werden

Eigenerzeugungsanlagen, die über statische Umrichter ohne Filterkreise an das elektrische *Netz* angeschaltet werden, verursachen i.d.R. keine unzulässigen Rückwirkungen auf die Rundsteuerung.

Aus Sicht der Rundsteuerung sind daher im Allgemeinen auch keine Leistungsbegrenzungen für den Anschluss dieser *Eigenerzeugungsanlagen* erforderlich. Allerdings sind die zulässigen Grenzwerte hinsichtlich der *Störspannungen* von *Anlagen der Netzbenutzer* im Bereich der Rundsteuerfrequenz einzuhalten (siehe **Kapitel 3.4**).

Anmerkung: Auch wenn derartige *Eigenerzeugungsanlagen* im Allgemeinen aus Sicht der Rundsteuerung unkritisch sind, sollte mit dem Netzbetreiber eine Abstimmung erfolgen. So können z.B. durch zusätzliche Netzlasten, die durch *Eigenerzeugungsanlagen* gespeist werden, Beeinflussungen entstehen. Statische Umrichter mit Filterkreisen sind im Einzelfall zu prüfen.

9.2 Eigenerzeugungsanlagen, die direkt an das Netz angeschlossen werden

Eigenerzeugungsanlagen, die direkt (ohne statische Umrichter) an das elektrische *Netz* angeschaltet werden, können die Tonfrequenz-Rundsteuerung überproportional beeinflussen. Das Maß der Beeinflussung ist dabei abhängig von

- dem Typ der *Eigenerzeugungsanlage* und deren Bemessungsleistung
- der Blindstromkompensation, falls vorhanden
- dem *Netzanschluss* (z.B. Anschaltung des Generators über einen Maschinentransformator) und dem vorgelagerten *Netz*
- den *Betriebsmitteln* der *Anlage des Netzbenutzers*
- der Rundsteuerfrequenz.

Ein direkter Anschluss solcher *Eigenerzeugungsanlagen* ist aus Sicht der Tonfrequenz-Rundsteuerung bis zu den in der Tabelle 9-1 aufgeführten Bemessungsleistungen ohne besondere Maßnahmen (wie z.B. *Tonfrequenz-Sperrkreise*) zulässig.

Verknüpfungspunkt V	Summenleistung von <i>Eigenerzeugungsanlagen</i>	
	am jeweiligen <i>Verknüpfungspunkt</i>	im betrachteten Versorgungsbereich
HS-Netz	5 MVA	10 MVA
MS-Netz	500 kVA	1 MVA
NS-Netz	5 kVA	10 kVA

Tabelle 9-1: Grenzwerte für Bemessungsleistungen

Anmerkungen:

- *Die Summenleistung von Eigenerzeugungsanlagen am jeweiligen Verknüpfungspunkt umfasst die gesamte Eigenerzeugungsanlage (ggf. auch mehrere Generatoren) der Anlage des Netzbenutzers.*
- *Die Summenleistung von Eigenerzeugungsanlagen im betrachteten Versorgungsbereich umfasst alle Eigenerzeugungsanlagen im jeweiligen Netz, d.h. die Hochspannungs-Netzgruppe bzw. das Mittel- oder Niederspannungs-Netz.*
- *Bei Überschreitung der in **Tabelle 9.1** aufgeführten Grenzwerte können aus Sicht der Rundsteuerung besondere Maßnahmen erforderlich werden. Diese sind mit dem jeweiligen Netzbetreiber abzustimmen.*

10. Sonstige Betriebsmittel

10.1 Symmetrierung von unsymmetrischen Lasten mittels Kondensatoren

Bei der Verwendung von Symmetrierschaltungen können sich in einem oder zwei Leitern bei der Rundsteuerfrequenz Resonanzen ergeben, die zu unzulässigen Beeinträchtigungen führen. Es ist darauf zu achten, dass die Beurteilungsgrundsätze gemäß **Kapitel 3** in allen Betriebszuständen eingehalten werden.

10.2 Kapazitiv geglättete Netzteile

Netzteile mit kapazitiv geglätteten Gleichrichtern werden heute in vielen elektronischen Geräten von der Sparlampe über Computer bis zu Geräten der Unterhaltungselektronik in großer Stückzahl eingesetzt. Der Energiebezug dieser Geräte findet nur während einer kurzen Zeit, etwa in der Mitte jeder Halbperiode, statt. Zu dieser Zeit wird der Kondensator nachgeladen, d.h. wenn die Gleichrichterdiode leitend ist, sind alle Kapazitäten der Geräte gleichzeitig dem *Netz* zugeschaltet.

Insbesondere bei hohen Rundsteuerfrequenzen und einer besonderen Häufigkeit der Geräte können sich Probleme durch Steuerpegelabsenkungen während des kurzzeitigen Energiebezuges ergeben.

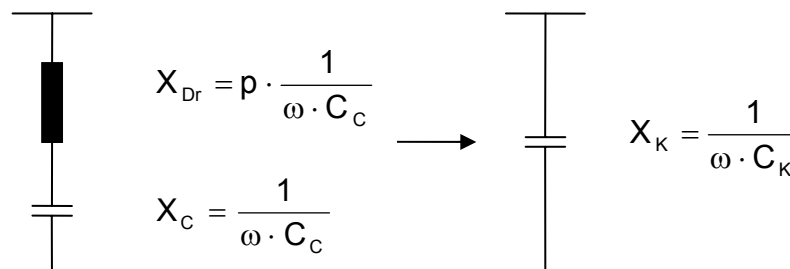
Anhang A

Literatur Die in diesem Hauptabschnitt D3 der technischen und organisatorischen Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) verwendeten Literaturquellen sind im Teil A „Allgemeines, Begriffserklärungen, Quellenverweise“ der TOR gesammelt enthalten.

Anhang B

Erforderlicher Verdrosselungsgrad von Kompensationsanlagen

Bei verdrosselten Kompensationsanlagen ist die installierte Kapazität (C_C) bzw. Kondensatorleistung der *Anlage des Netzbenutzers* (Q_C) nicht gleich der tatsächlich an der Sammelschiene wirksamen Kapazität (C_K) bzw. Kompensationsleistung (Q_K). Es gilt für die 50-Hz-Impedanzen:



$$Q_K = \frac{U_n^2}{X_K} = \frac{U_n^2 \cdot \omega \cdot C_C}{1-p}$$

X_C Reaktanz der Kondensatoren bei *Frequenz* (50 Hz)

X_{Dr} Reaktanz der Drossel bei *Frequenz* (50 Hz)

p *Verdrosselungsgrad*

ω Kreisfrequenz

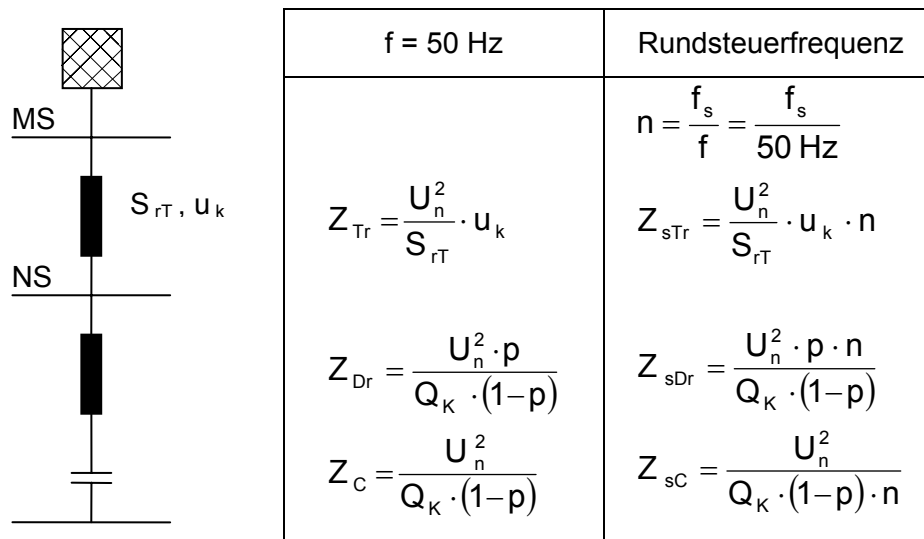
C_C installierte Kapazität der verdrosselten Kompensationsanlage

C_K wirksame Kapazität der Kompensationsanlage (z.B. an der Sammelschiene)

Q_K wirksame *Blindleistung* der Kompensationsanlage

U_n *Nennspannung eines Netzes*

X_K Reaktanz (induktiver Widerstand) der Kompensationsanlage



- Z_{Tr} Impedanz des Transformators bei *Frequenz* (50 Hz)
- Z_{Dr} Impedanz der Drossel bei *Frequenz* (50 Hz)
- Z_C Impedanz der Kondensatoren bei *Frequenz* (50 Hz)
- U_n *Nennspannung eines Netzes*
- S_{rT} Bemessungsscheinleistung des Transformators
- u_k relative Kurzschlussspannung des Transformators
- p *Verdrosselungsgrad*
- Q_K wirksame *Blindleistung* der Kompensationsanlage
- n Verhältnis der Rundsteuerfrequenz f_s zur *Frequenz* f
- f_s Steuerfrequenz der Rundsteuerung (Rundsteuerfrequenz)
- f *Frequenz* (50 Hz)
- Z_{sTr} Impedanz des Transformators bei Rundsteuerfrequenz
- Z_{sDr} Impedanz der Drossel bei Rundsteuerfrequenz
- Z_{sC} Impedanz der Kondensatoren bei Rundsteuerfrequenz

$$Z_s^* = \frac{U_n^2}{S_{rT}} \cdot u_k \cdot n + \frac{U_n^2 \cdot p \cdot n}{Q_K \cdot (1-p)} - \frac{U_n^2}{Q_K \cdot (1-p) \cdot n}$$

$$\epsilon^* = \frac{Z_s^*}{U_n^2/S_{rT}} = u_k \cdot n + \frac{S_{rT}}{Q_K \cdot (1-p)} \cdot \left(p \cdot n - \frac{1}{n} \right)$$

- ϵ^* *Impedanzfaktor der Anlage des Netzbenutzers* ohne Berücksichtigung der *Last*
- Z_s^* Impedanz von Transformator und Kompensationsanlage der *Anlage des Netzbenutzers* bei Rundsteuerfrequenz
- U_n^2/S_{rT} .. aus der Bemessungsleistung des Transformators ermittelte Impedanz (siehe **Bild 3-3**)

für den *Verdrosselungsgrad* p ergibt sich:

$$p \geq \frac{1 + \frac{Q_K}{S_{rT}} \cdot \left(\frac{\varepsilon^*}{n} - u_k \right)}{1 + \frac{Q_K}{S_{rT}} \cdot \left(\frac{\varepsilon^*}{n} - u_k \right)}$$

mit $k = \frac{Q_K}{S_{rT}}$ und $\varepsilon^* = 0,5$ ergibt sich:

$$p \geq \frac{1 + k \cdot \left(\frac{1}{2n} - u_k \right)}{1 + k \cdot \left(\frac{1}{2n} - u_k \right)}$$

- p *Verdrosselungsgrad*
- n Verhältnis der Rundsteuerfrequenz zur Frequenz
- Q_K wirksame *Blindleistung* der Kompensationsanlage
- S_{rT} Bemessungsleistung des Transformators
- ε^* *Impedanzfaktor* der *Anlage des Netzbenutzers* ohne Berücksichtigung der *Last*
- u_k relative Kurzschlussspannung des Transformators
- k *Kompensationsgrad*

Die bisher abgeleiteten Formeln gelten für den Fall, dass die Reihenresonanzfrequenz

der *Verdrosselung* $f_{0R} = \frac{f}{\sqrt{p}} = \frac{50 \text{ Hz}}{\sqrt{p}}$ **unterhalb** der Rundsteuerfrequenz liegt.

Auch für eine Reihenresonanzfrequenz der *Verdrosselung* **oberhalb** der Rundsteuerfrequenz, kann sich ein ausreichender *Impedanzfaktor* einstellen. In diesem Fall gilt die Formel:

$$\varepsilon^* = \frac{S_{rT}}{Q_k \cdot (1-p)} \cdot \left(\frac{1}{n} - p \cdot n \right) - u_k \cdot n$$

bzw. mit $k = \frac{Q_k}{S_{Tr}}$ und $\varepsilon^* \geq 0,5$:

$$p \leq \frac{\frac{1}{n^2} - k \cdot \left(\frac{1}{2n} + u_k \right)}{1 - k \cdot \left(\frac{1}{2n} + u_k \right)}$$

p..... *Verdrosselungsgrad*

n..... Verhältnis der Rundsteuerfrequenz zur Frequenz

Q_k wirksame *Blindleistung* der Kompensationsanlage

S_{rT} Bemessungsleistung des Transformators

ε^* *Impedanzfaktor* der *Anlage des Netzbenutzers* ohne Berücksichtigung der Last

u_k relative Kurzschlussspannung des Transformators

k..... *Kompensationsgrad*

Verdrosselungsfrequenz **oberhalb**
der Rundsteuerfrequenz

$$\left(p < \frac{1}{n^2}\right)$$

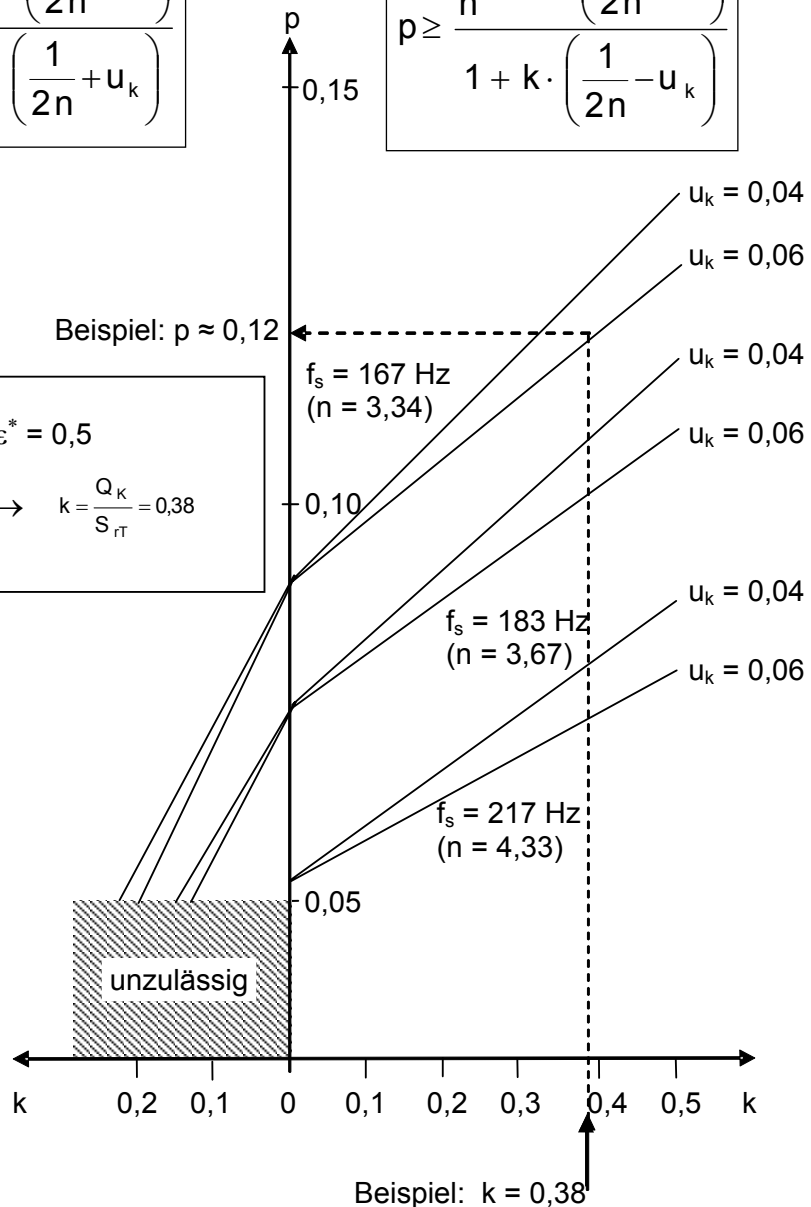
$$p \leq \frac{\frac{1}{n^2} - k \cdot \left(\frac{1}{2n} + u_k\right)}{1 - k \cdot \left(\frac{1}{2n} + u_k\right)}$$

Verdrosselungsfrequenz **unterhalb**
der Rundsteuerfrequenz

$$\left(p > \frac{1}{n^2}\right)$$

$$p \geq \frac{\frac{1}{n^2} + k \cdot \left(\frac{1}{2n} - u_k\right)}{1 + k \cdot \left(\frac{1}{2n} - u_k\right)}$$

Berechnungsbeispiel:
 $f_s = 167 \text{ Hz}$, $Q_K = 240 \text{ kvar}$, $\varepsilon^* = 0,5$
 $S_{rT} = 630 \text{ kVA}$, $u_k = 0,06 \rightarrow k = \frac{Q_K}{S_{rT}} = 0,38$
 $p \approx 0,12$



Hinweis: Bei hohem Anteil an drehenden Maschinen, bei Versorgung über mehrere Transformatoren, bei gering ausgenützter Transformatorleistung oder wenn mit einer späteren Erhöhung des Kompensationsgrades k zu rechnen ist, darf die Gleichung 4.1 nicht angewendet werden. Unter diesen Bedingungen ist eine Bemessung der Kompensationsanlage auf Basis des *Impedanzfaktors* $\varepsilon \geq 0,4$ (siehe **Punkt 3.2**) durchzuführen.

Anhang C

Maximal zulässige Steuerpegelabsenkung

Der *Steuerpegel* darf nur soweit abgesenkt werden, dass der zuverlässige Betrieb der Rundsteuerempfänger noch gewährleistet ist.

Die dafür wichtigen Einflussgrößen der Rundsteuerung

- Rundsteuerfrequenz
- *Steuerpegel* im Mittelspannungsnetz
- *Funktionspegel* der Rundsteuerempfänger

sind in den Versorgungsgebieten der einzelnen *Netzbetreiber* verschieden.

Für übliche Rundsteueranlagen kann eine näherungsweise Abschätzung dieser Spannungsabsenkung erfolgen:

Mindeststeuerpegel am Rundsteuerempfänger

(siehe VDEW-Empfehlungen „Netzsysteme in Elektrizitätsversorgungsunternehmen“, Kapitel 2 – Rundsteuersysteme, IEC 1037)

$$u_{sE} = 1,5 \cdot u_f$$

$$u_{sMS} = \sigma \cdot u_f$$

u_{sE} *Steuerpegel* am Rundsteuerempfänger

u_{sMS} *Steuerpegel* im Mittelspannungsnetz

σ Pegelfaktor (Verhältnis aus *Steuerpegel* zu *Funktionspegel* des Rundsteuerempfängers)

u_f *Funktionspegel* der Rundsteuerempfänger

u_s *Steuerpegel*

$$\sigma = \frac{u_s}{u_f}$$

Damit ergibt sich für die max. zulässige Absenkung des *Steuerpegels*:

$$\Delta u = \frac{u_{\text{sMS}} - u_{\text{sE}}}{u_{\text{sMS}}} = \frac{\sigma \cdot u_f - 1,5 \cdot u_f}{\sigma \cdot u_f} = 1 - \frac{1,5}{\sigma} \text{ bzw. } \Delta u = \left(1 - \frac{1,5}{\sigma}\right) \cdot 100\%$$

Δu maximal zulässige Absenkung des *Steuerpegels*

u_{sMS} *Steuerpegel* im Mittelspannungsnetz

u_{sE} *Steuerpegel* am Rundsteuerempfänger

u_f *Funktionspegel* der Rundsteuerempfänger

σ Pegelfaktor (Verhältnis aus *Steuerpegel* zu *Funktionspegel* des Rundsteuerempfängers)

Bei Rundsteuerfrequenzen < 250 Hz gilt $\sigma = 2$ und damit eine max. zulässige Spannungsabsenkung von 0,25.

Bei Rundsteuerfrequenzen > 250 Hz können schon bei ohmschen Belastungen größere Absenkungen auftreten; deswegen wird hier das Verhältnis $\sigma > 2$ gewählt. Damit ergibt sich eine zulässige Absenkung nach **Bild A-C**.

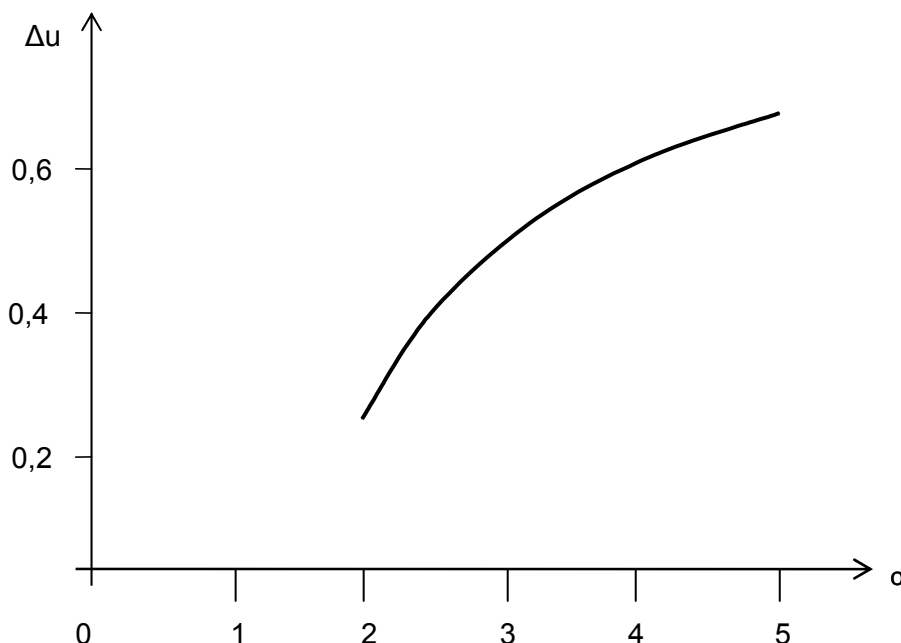


Bild A-C: Maximal zulässige Absenkung des *Steuerpegels* in Abhängigkeit von σ