



Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen

TOR Netzgebundene Steuersignal- und Datenübertragung

Version 1.0
gültig ab xx.xx.2026

Dokumenten-Historie

Version	Veröffentlichung	Inkrafttreten	verantwortlich	Anmerkungen
1.0	xx.xx.2026	xx.xx.2026	E-Control	Ersatz von TOR D3 V2.1

Die anzuwendenden technischen und organisatorischen Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) stehen auf der Website der E-Control (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 jedes Zitieren der TOR hat unter diesen Prämissen zu erfolgen. Die sich auf der Website der E-Control befindliche Version gilt als authentische Fassung der TOR.

Für den Inhalt verantwortlich:

Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control)

Rudolfplatz 13a

1010 Wien

Tel: +43 1 24724-0

E-Mail: tor@e-control.at

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	4
1 Begriffe und Abkürzungen	5
2 Anwendungsbereich	6
3 Bestimmungen, Vorschriften und Verweise	7
3.1 Bestimmungen und Vorschriften	7
3.2 Normative Verweise	7
4 Tonfrequenz-Rundsteuerung	8
4.1 Beurteilungsgrundsätze	9
4.1.1 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Hochspannungsnetz	10
4.1.2 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Mittelspannungsnetz	11
4.1.3 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Niederspannungsnetz	13
4.1.4 Störspannungen von Anlagen von Netzbenutzern	14
4.1.5 Zusätzliche Beurteilungskriterien bezüglich Netzzrückwirkungen	15
4.2 Kompensationsanlagen	16
4.2.1 Direkt angeschlossene Kompensationskondensatoren	17
4.2.2 Verdrosselte Kompensationskondensatoren	19
4.2.3 Sonstige Schaltungen von Kompensationsanlagen	23
4.2.4 Kompensation von Leuchtstofflampen	28
4.3 Tonfrequenz-Sperrkreis	31
4.4 Saugkreisanlagen	33
4.5 Aktive Oberschwingungskompensation	35
4.6 Motoren und Generatoren	36
4.7 Stromerzeugungsanlagen	37
4.7.1 Stromerzeugungsanlagen, statische Umrichter	37
4.7.2 Stromerzeugungsanlagen, direkt angeschlossen	38
4.8 Sonstige Betriebsmittel	39
4.8.1 Symmetrierung von unsymmetrischen Lasten mittels Kondensatoren	39
4.8.2 Kapazitiv geglättete Netzteile	39
5 Power Line Communication (PLC)	40
Anhang	41
A1. Erforderlicher Verdrosselungsgrad von Kompensationsanlagen	41
A2. Maximal zulässige Steuerpegelabsenkung	45

Einleitung

Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen ("TOR") werden gemäß § 22 Z 2 E-ControlG von E-Control in Zusammenarbeit mit den Betreibern von Stromnetzen erarbeitet, von E-Control veröffentlicht und als technisches Regelwerk im Netzanschlussvertrag im Rahmen von Allgemeinen Vertragsbedingungen für die Betreiber von Verteiler- oder Übertragungsnetzen zwischen Netzbetreiber und Netzbutzer vereinbart.

Die in [] angeführten Verweise beziehen sich auf die Originalquellen und sind in den Quellenangaben der TOR Begriffe angeführt.

1 Begriffe und Abkürzungen

Die in diesem Teil der TOR verwendeten Begriffsbestimmungen und -erklärungen sind in den TOR Begriffe gesammelt enthalten.

In diesem Teil der TOR werden folgende Abkürzungen verwendet:

HS	Hochspannung
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
PLC	Power Line Communication
TRA	Tonfrequenzrundsteueranlage
V	Verknüpfungspunkt

2 Anwendungsbereich

Dieser Teil der TOR beinhaltet die Mindestanforderungen an den Betrieb mit Tonfrequenz-Rundsteuerung und (zukünftig) Power Line Communication (PLC).

Zu Tonfrequenzrundsteueranlagen (TRA) zählen Rundsteuersendeanlagen und Rundsteuerempfänger. Dabei werden Steuersignale an ein entsprechendes Schaltgerät gesendet. Eine bidirektionale Kommunikation über das Stromnetz, sowie die Übertragung von Verbrauchsdaten von intelligenten Messgeräten, erfolgt mittels PLC.

Der Betrieb von TRA und PLC-Systemen darf durch Anlagen des Netzbenutzers nicht beeinträchtigt werden. Mögliche elektrische Betriebsmittel die Störungen im Bereich der jeweiligen Übertragungsfrequenz verursachen sind z.B.:

- Blindleistungskompensationsanlagen
- Filter zur Oberschwingungskompensation
- Frequenzumrichter
- Ladeeinrichtungen für Elektroautos
- Motoren
- Stromerzeugungsanlagen

Im Hinblick auf Netzzurückwirkungen sind außerdem die TOR Netzzurückwirkungsrelevante elektrische Betriebsmittel und TOR Netzzurückwirkungen einzuhalten. Für den Anschluss von Stromerzeugungs- und Verbrauchsanlagen sind weitere Bestimmungen, wie z.B. die TOR Stromerzeugungsanlagen und TOR Verteilernetzanschluss, zu beachten.

3 Bestimmungen, Vorschriften und Verweise

3.1 Bestimmungen und Vorschriften

Für den ordnungsmäßigen Betrieb von Tonfrequenzrundsteuer- und PLC-Systemen sind insbesondere einzuhalten (jeweils in der gültigen Fassung):

- Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010 (EIWOG 2010) **[N4]**;
- Elektrotechnikgesetz 1992 (ETG 1992) **[N6]**;
- Elektrotechnikverordnung 2020 mit allen darin enthaltenen Normen (ETV 2020) **[N11]**;
- Elektromagnetische Verträglichkeitsverordnung 2015 (EMV-V 2015) **[N12]**;
- Niederspannungs-Richtlinie **[E2]**;
- Produkthaftungs-Richtlinie 1999 **[E3]**;
- EMV-Richtlinie 2014 **[E6]**;

Weiters wird für eine Übersicht der anzuwendenden anerkannten Regeln der Technik auf die TAEV 2020 (Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 1000 Volt 2020, Ausgabe 2020) hingewiesen.

3.2 Normative Verweise

Die folgenden Normen, geltend zum Zeitpunkt des Inkrafttretens dieser TOR, sind für die Anwendung dieses Teils der TOR zu beachten:

- ÖVE/ÖNORM EN 50160 **[5]**;
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-2 **[9]**;
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-12;

4 Tonfrequenz-Rundsteuerung

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:

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

Einwandfreie Funktion der Sendeanlagen

Die Anlagen von Netzbenutzern dürfen die Sendeeinrichtungen nicht übermäßig belasten. Die Betriebsmittel stellen wegen der Frequenzabhängigkeit der Impedanzen bei Tonfrequenz eine andere Belastung als bei Netzfrequenz 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.

4.1 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 Stromerzeugungsanlage) sind unterschiedliche Beurteilungskriterien anzuwenden:

Anlagen von Netzbenutzern ohne Stromerzeugungsanlagen

Beziehen die elektrische Energie ausschließlich vom öffentlichen Netz. Für die Beurteilung der Rückwirkungen auf die Rundsteuerung ist Kapitel 4.1 anzuwenden.

Anlagen von Netzbenutzern mit Stromerzeugungsanlagen ohne Eigenverbrauch

Speisen elektrische Energie in das öffentliche Netz ein (Volleinspeisung, z.B. Windenergieanlagen). Für die Beurteilung der Rückwirkung auf die Rundsteuerung ist Kapitel 4.7 sowie aus Kapitel 4.1 die Kapitel 4.1.4 und 4.1.5 anzuwenden.

Anlagen von Netzbenutzern mit Stromerzeugungsanlagen und Eigenverbrauch

Können sowohl elektrische Energie aus dem öffentlichen Netz beziehen als auch in dieses einspeisen. Für die Beurteilung der Rückwirkungen auf die Rundsteuerung ist Kapitel 4.1 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. unkompensierte 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.

4.1.1 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.

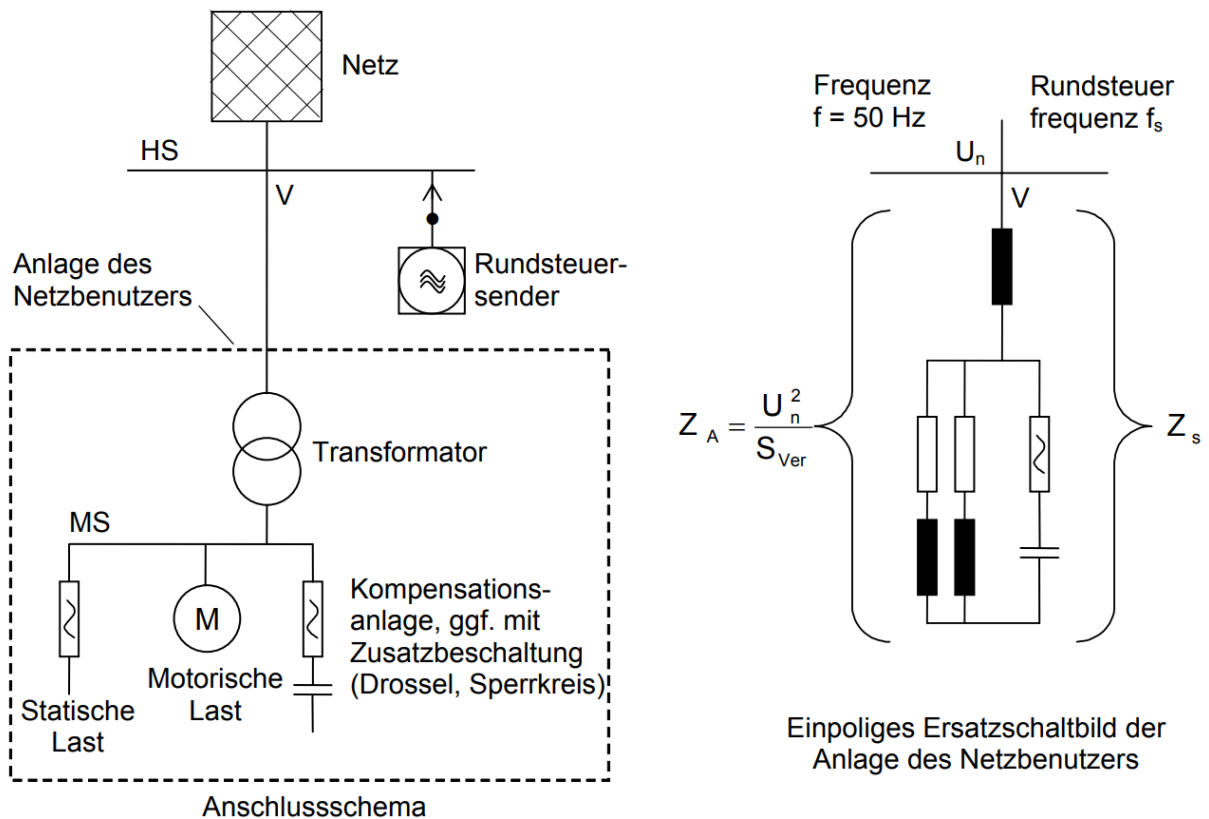


Abbildung 1: Tonfrequenzeinspeisung und Anlage des Netzbenutzers mit Verknüpfungspunkt V im Hochspannungsnetz

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 V muss mindestens gleich der Anschlussimpedanz Z_A sein.

$$\varepsilon = \frac{Z_s}{Z_A} \geq 1 \quad (1)$$

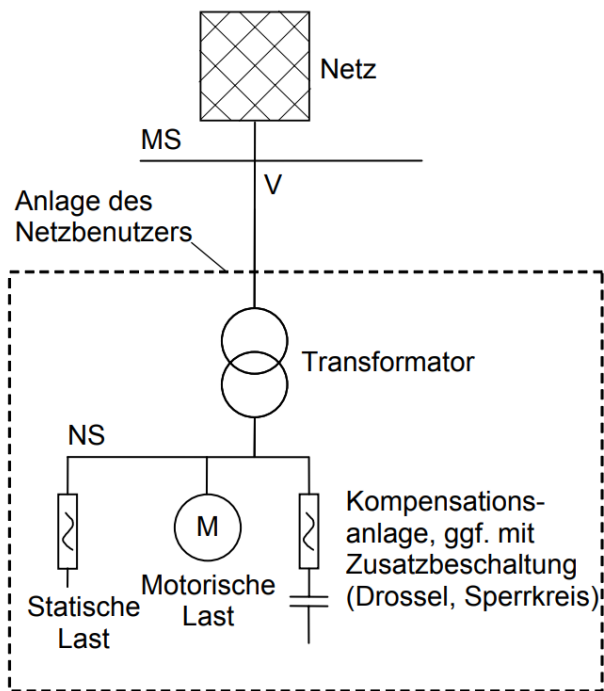
ε Impedanzfaktor der gesamten Anlage des Netzbenutzers

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

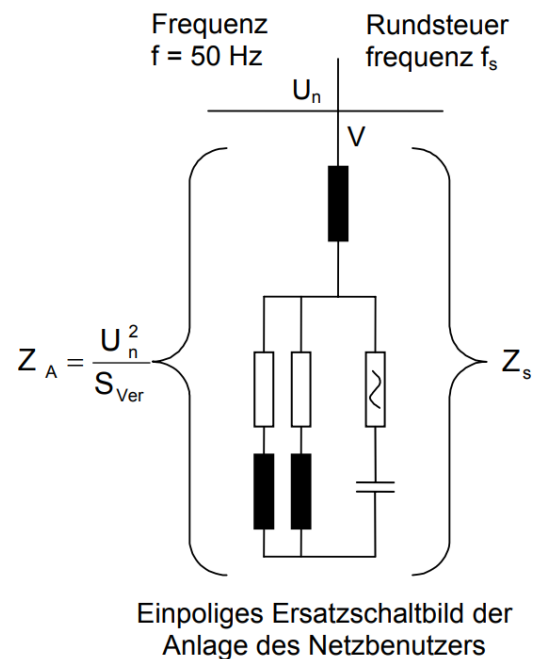
Z_A Anschlussimpedanz der Anlage des Netzbenutzers (bei 50 Hz)

4.1.2 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



Einpoliges Ersatzschaltbild der Anlage des Netzbenutzers

Abbildung 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.

$$\varepsilon = \frac{Z_s}{Z_A} \geq 0,4 \quad (2)$$

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.

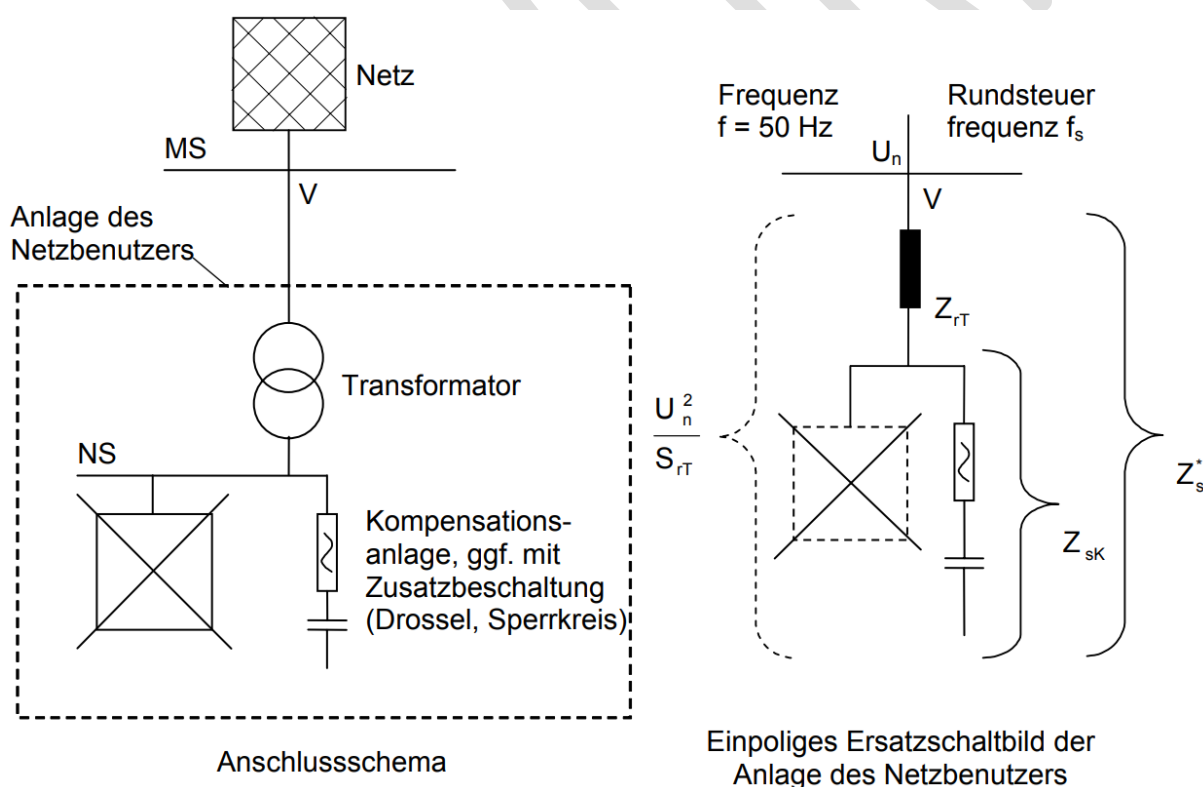


Abbildung 3: Anlage des Netzbetreibers mit Verknüpfungspunkt V im Mittelspannungsnetz (vereinfachte Betrachtung)

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).
- Mit Eigenerzeugung.

4.1.3 Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt im Niederspannungsnetz

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

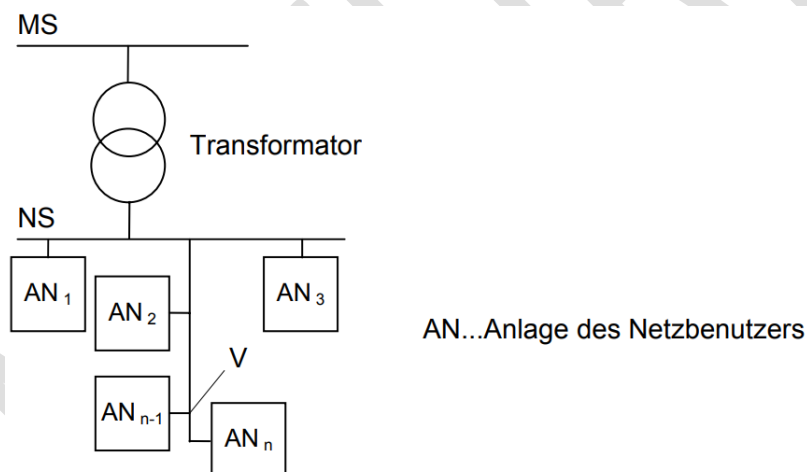


Abbildung 4: Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt V im Niederspannungsnetz

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 A2 „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 A2 „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.

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.

Einflussgrößen 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. Stromerzeugungsanlagen.

Einflussgrößen der Rundsteueranlage:

- Die verwendete Rundsteuerfrequenz.
- Der Steuerpegel im Mittelspannungsnetz.
- Der Funktionspegel der verwendeten Rundsteuerempfänger.
- Sonstige Einflussgrößen wie z.B. Art der Ankopplung.

4.1.4 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 öffentliche 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.

4.1.5 Zusätzliche Beurteilungskriterien bezüglich Netzzrückwirkungen

Bei der Auslegung und dem Betrieb von Anlagen von Netzbenutzern müssen neben den Rückwirkungen auf die Rundsteuerung vor allem die Anforderungen hinsichtlich Netzzrückwirkungen beachtet werden. Diese sind in den TOR Netzzrückwirkungen 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.

4.2 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 öffentliche 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.

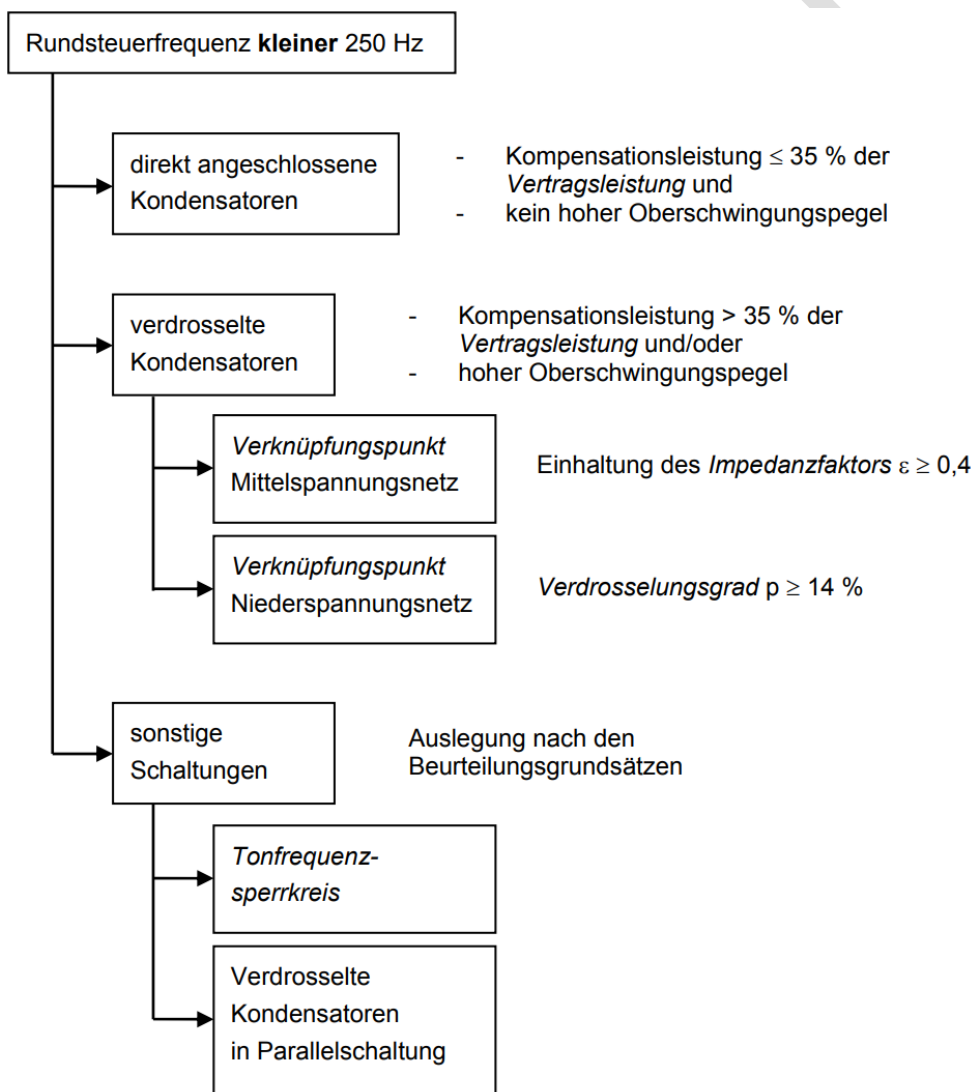
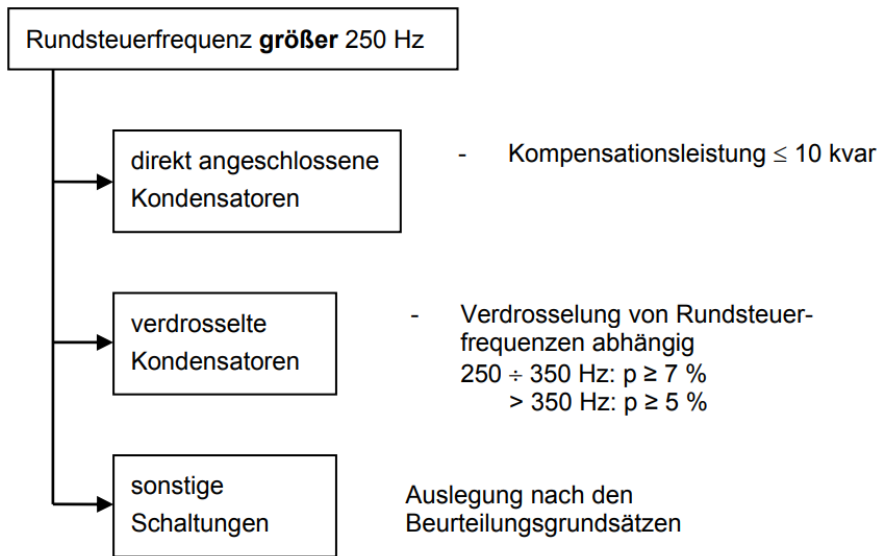


Abbildung 5: Kompensationsanlagen bei $f_s < 250$ Hz

Abbildung 6: Kompensationsanlagen bei $f_s > 250$ Hz**Anmerkungen:**

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

4.2.1 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 niederohmig, 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 Netzbewutzers so groß, dass keine unzulässige Beeinträchtigung der Rundsteuerung auftritt.

Hinsichtlich der Impedanzen muss die Betrachtung sowohl vom Netz her (siehe Abbildung 8) als auch von den Oberschwingungserzeugern der Anlage des Netzbewutzers her (siehe Abbildung 9) erfolgen. Es können sich erhöhte Oberschwingungsströme und -spannungen ergeben, die zu Störungen bzw. Überlastungen von Kondensatoren und anderen Betriebsmitteln der Anlage des Netzbewutzers führen.

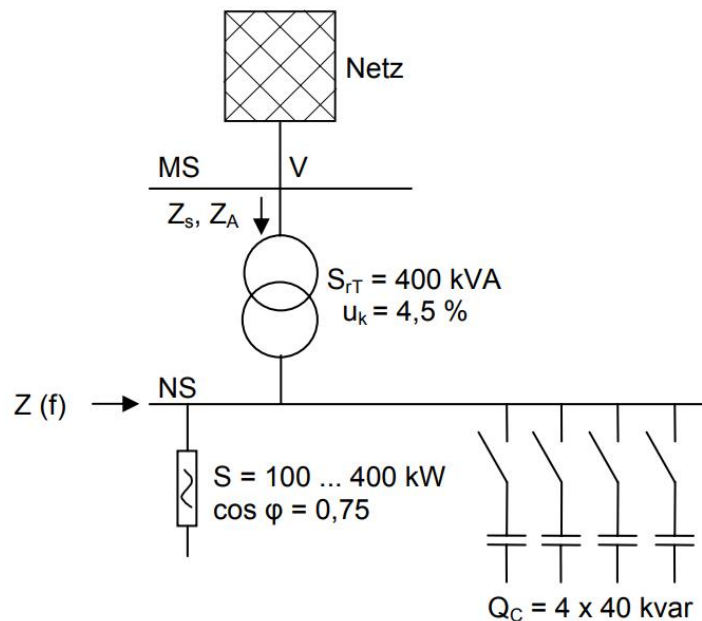


Abbildung 7: Netzschema 1

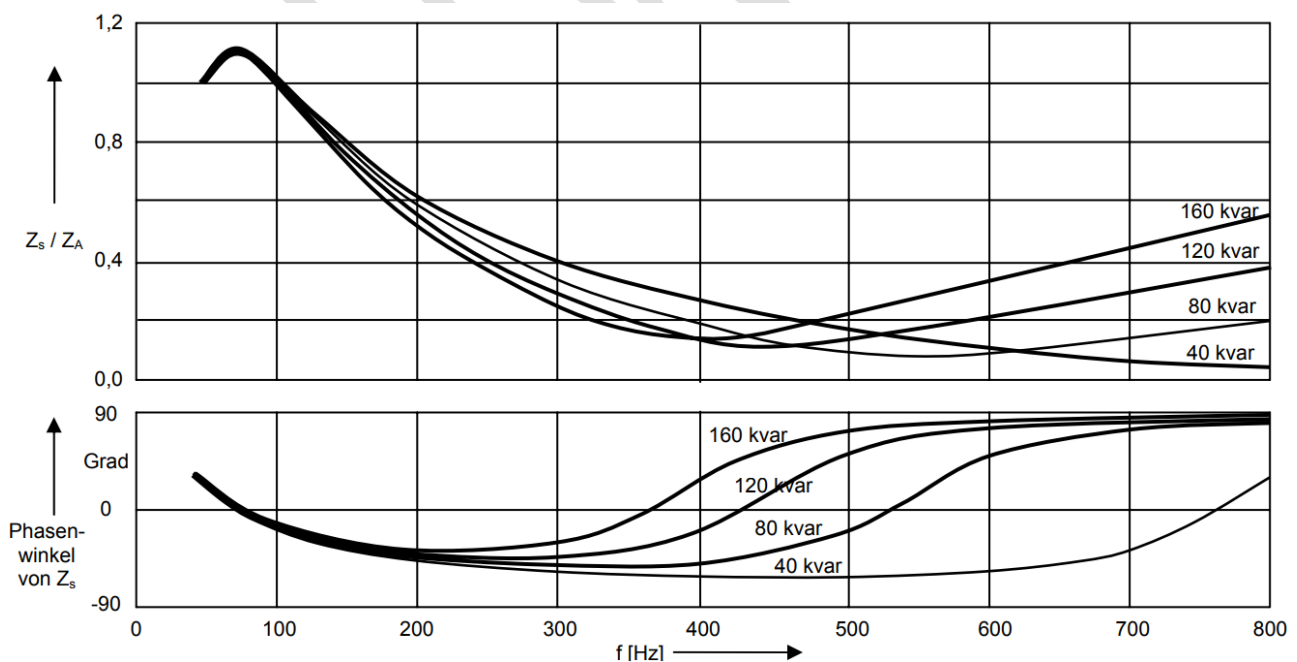


Abbildung 8: Impedanzcharakteristik aus der Sicht des Verknüpfungspunktes V

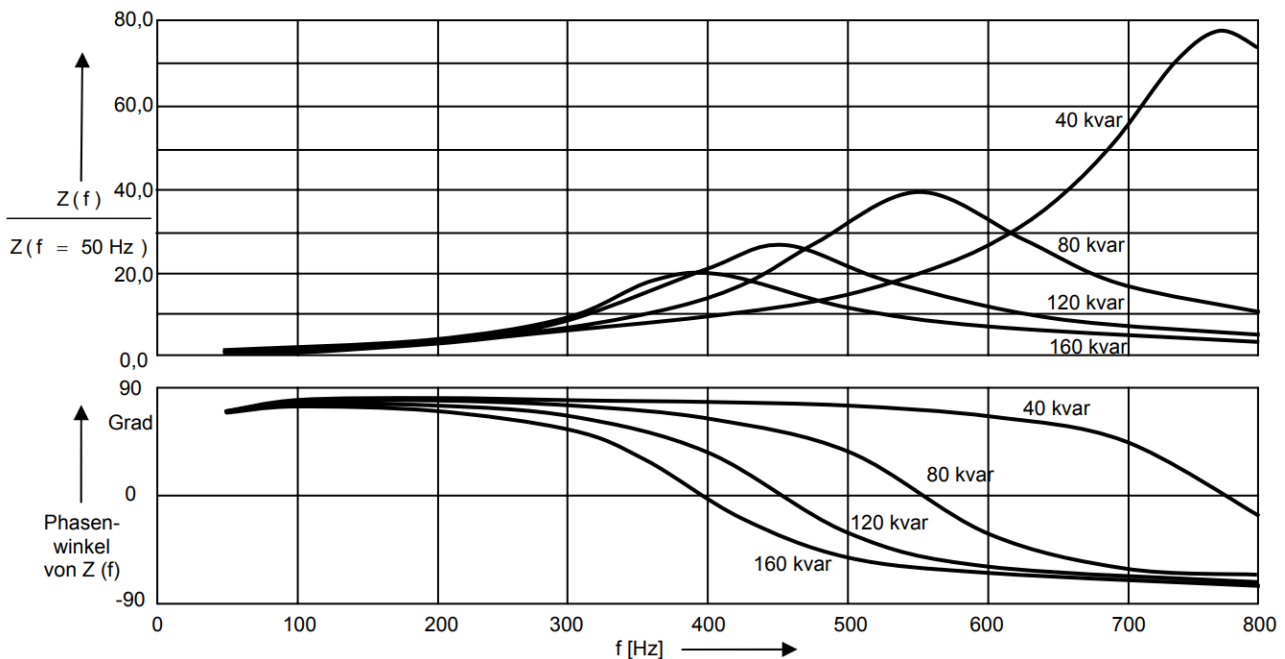


Abbildung 9: Impedanzcharakteristik aus der Sicht der Anlage des Netzbenutzers

4.2.2 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 A1 „Erforderlicher Verdrosselungsgrad von Kompensationsanlagen“) ausgedrückt. Eine mit p verdrosselte Kompensationsanlage ergibt eine Reihenresonanzfrequenz von

$$f_{0R} = \frac{f}{\sqrt{p}} = \frac{50}{\sqrt{p}} \quad (3)$$

f_{0R}	Reihenresonanzfrequenz
f	Frequenz (50 Hz)
p	Verdrosselungsgrad

Beispiel mit $p = 7\%$:

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

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.

Abbildung 10 bis Abbildung 12 zeigen, 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.

Anmerkungen:

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.

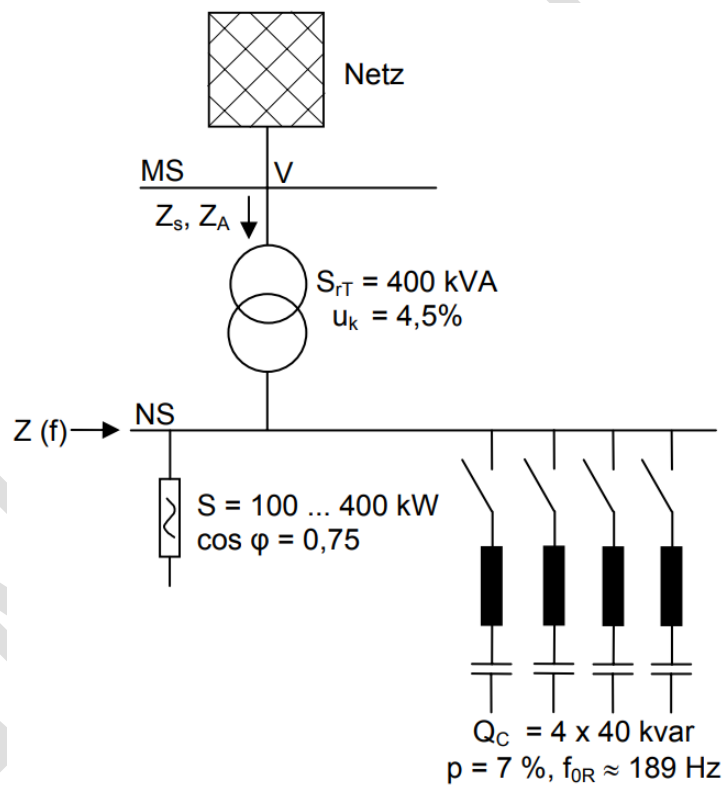


Abbildung 10: Netzschema 2

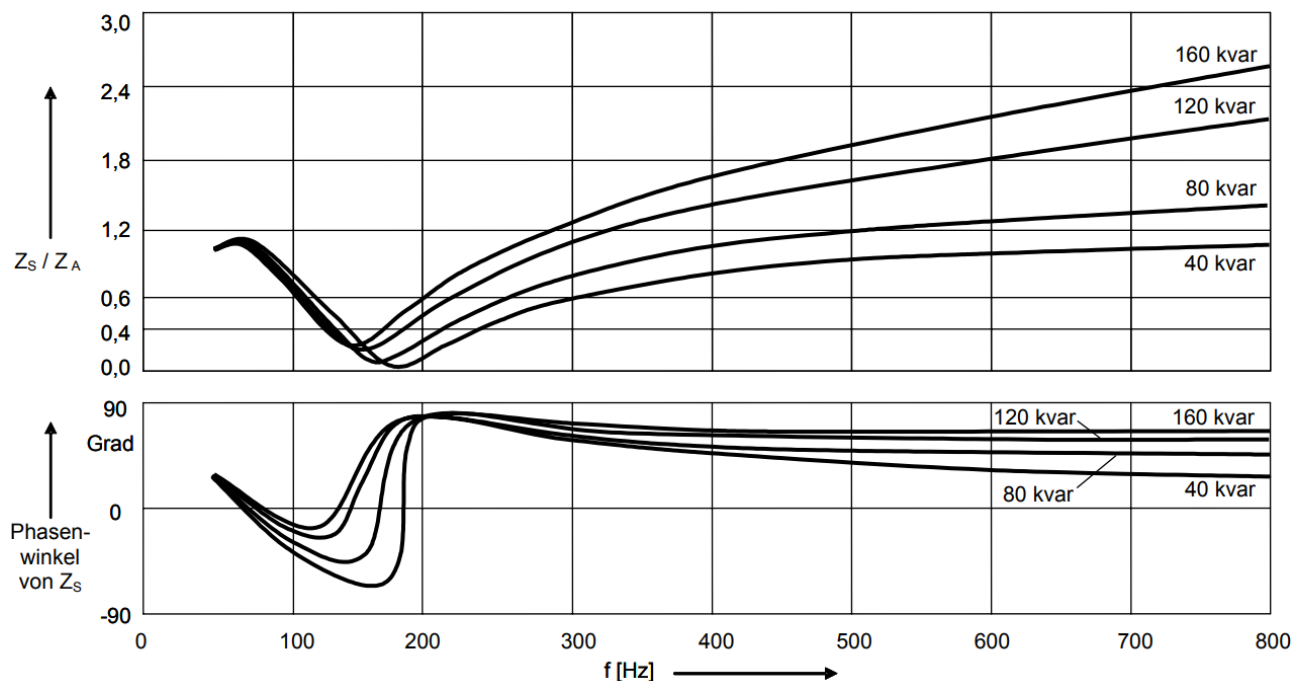


Abbildung 11: Impedanzcharakteristik aus der Sicht des Verknüpfungspunktes V

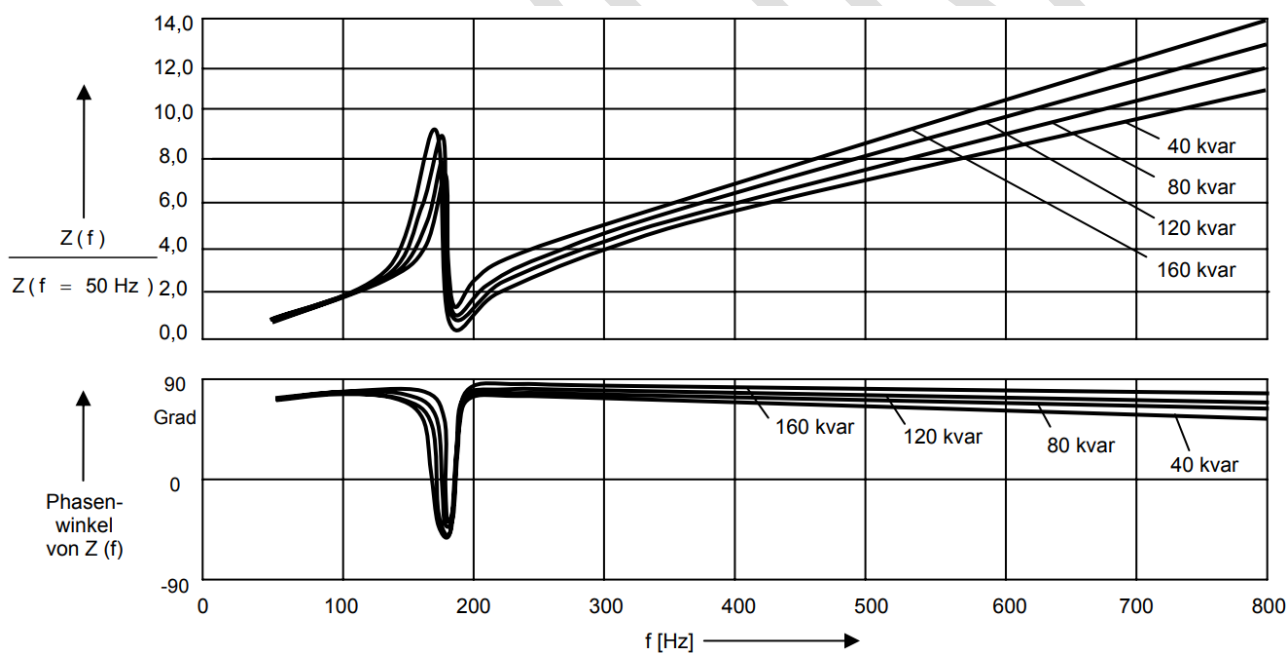


Abbildung 12: Impedanzcharakteristik aus der Sicht der Anlage des Netzbenutzers

4.2.2.1 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei $f_s > 250$ Hz

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

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

Tabelle 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.

4.2.2.2 Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei $f_s < 250$ 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.

Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei $f_s < 250$ Hz, im MS-Netz

Das unter Kapitel 4.1.2 genannte vereinfachte Beurteilungskriterium (Impedanzfaktor $\varepsilon^* \geq 0,5$) wird bei folgendem Verdrosselungsgrad p erfüllt:

- Verdrosselungsfrequenz der Kompensationsanlage liegt unterhalb der verwendeten Tonfrequenz:

$$p > \frac{1}{n^2} \quad p \geq \frac{\frac{1}{n^2} + k(\frac{1}{2n} - u_k)}{1 + k(\frac{1}{2n} - u_k)} \quad (4)$$

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 rotierenden 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) nicht angewendet werden. Unter diesen Bedingungen ist eine Bemessung der Kompensationsanlage auf Basis des Impedanzfaktors $\varepsilon \geq 0,4$ (siehe Kapitel 4.1.2) durchzuführen.

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

$$p < \frac{1}{n^2} \quad p \leq \frac{\frac{1}{n^2} - k(\frac{1}{2n} + u_k)}{1 - k(\frac{1}{2n} + u_k)} \quad (5)$$

$$n = \frac{f_s}{f} = \frac{f_s}{50 \text{ Hz}} \quad (6)$$

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 A1 „Erforderlicher Verdrosselungsgrad von Kompensationsanlagen“ angewandt werden.
- Bei der Wahl des Verdrosselungsgrades sollte der zukünftige Ausbau der Anlage des Netzbetreibers 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.

Verdrosselte Kompensationskondensatoren bei $f_s < 250$ Hz, im NS-Netz

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
- 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.

4.2.3 Sonstige Schaltungen von Kompensationsanlagen

Bei Ausführung der Schaltungsvarianten unter den Kapiteln 4.2.3.1 und 4.2.3.2 sind die Beurteilungsgrundsätze laut Kapitel 4.1 einzuhalten. Derartige Schaltungen können zu weiteren Resonanzstellen führen, so dass in allen Fällen eine sorgfältige Dimensionierung und Abstimmung erforderlich ist.

4.2.3.1 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 Abbildung 13 bis Abbildung 15) oder es werden unterschiedlich verdrosselte Reihenschwingkreise einzeln abwechselnd zu- bzw. abgeschaltet.

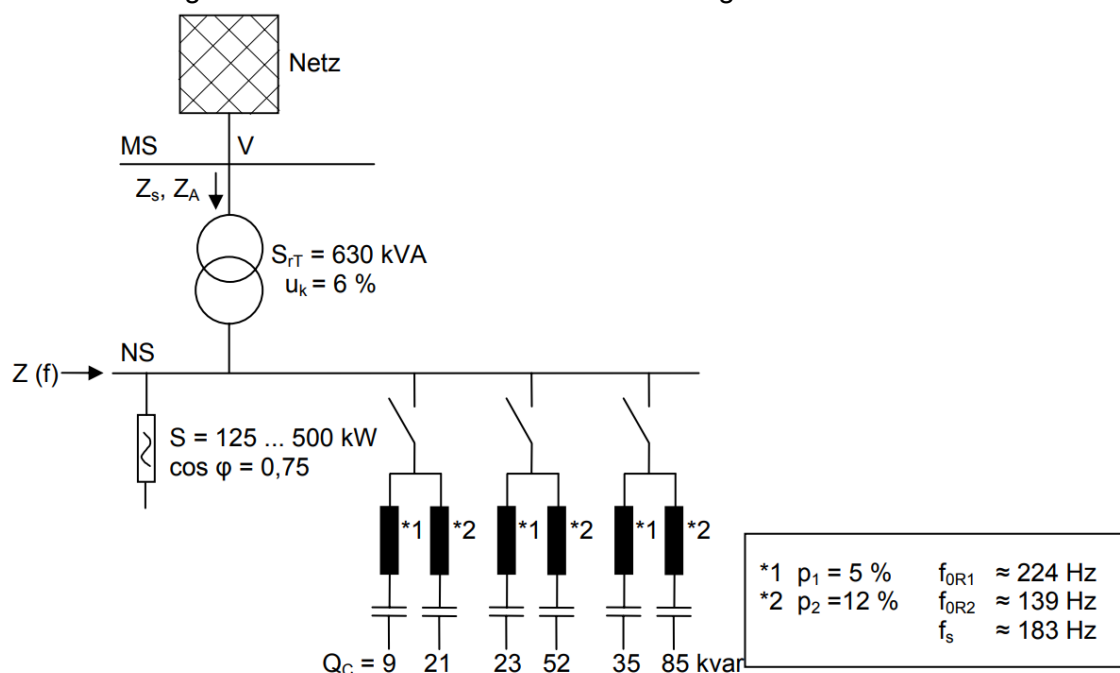


Abbildung 13: Netzschema 3

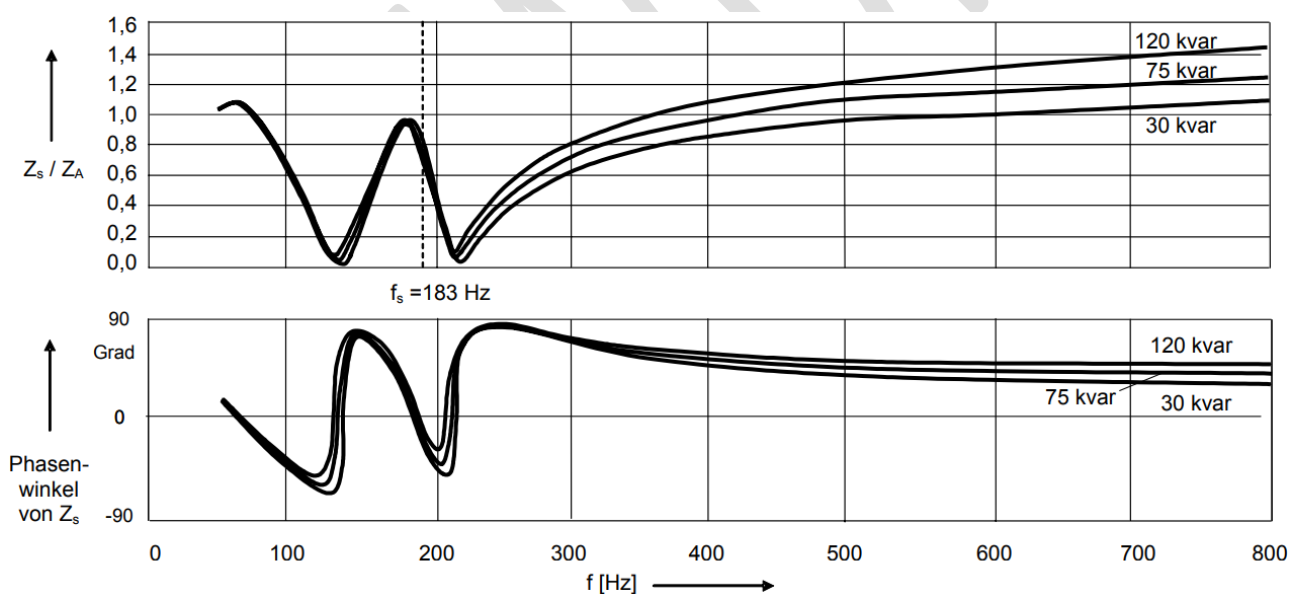


Abbildung 14: Impedanzcharakteristik aus der Sicht des Verknüpfungspunktes V

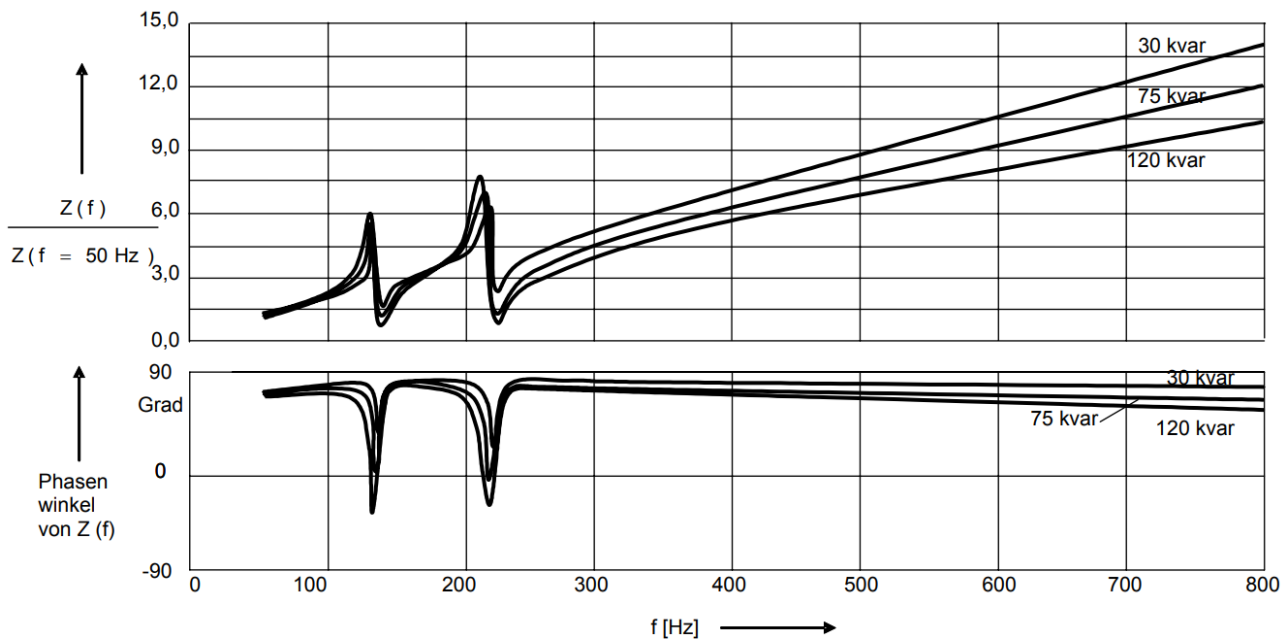


Abbildung 15: Impedanzcharakteristik aus der Sicht der Anlage des Netzbenutzers

4.2.3.2 Gesperrte Kompensationsanlagen

Verdrosselte oder unverdrosselte Kompensationsanlagen können zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Rundsteuerung mit Tonfrequenz-Sperrkreisen (siehe Kapitel 4.3) versehen werden. Dabei sind für alle Belastungs- und Betriebsverhältnisse die grundsätzlichen Beurteilungskriterien aus Kapitel 4.1 einzuhalten.

Es können Einzel- oder Blocksperrungen eingesetzt werden.

Gesperrte, unverdrosselte Kompensationsanlagen

Werden regelbare Kompensationsanlagen mit nur einem gemeinsamen Tonfrequenz-Sperrkreis (Blocksperrung siehe Abbildung 16 bis Abbildung 18 und Kapitel 4.3) 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 4.3) lässt sich diese Problematik teilweise entschärfen.

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 Abbildung 19 bis Abbildung 21 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 4.3) lässt sich diese Problematik teilweise entschärfen.

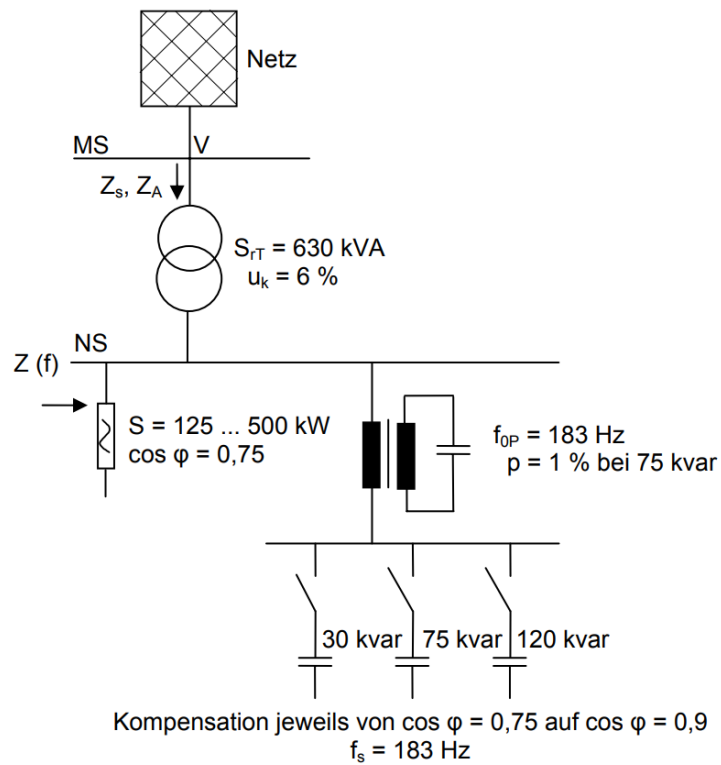


Abbildung 16: Netzschema 4

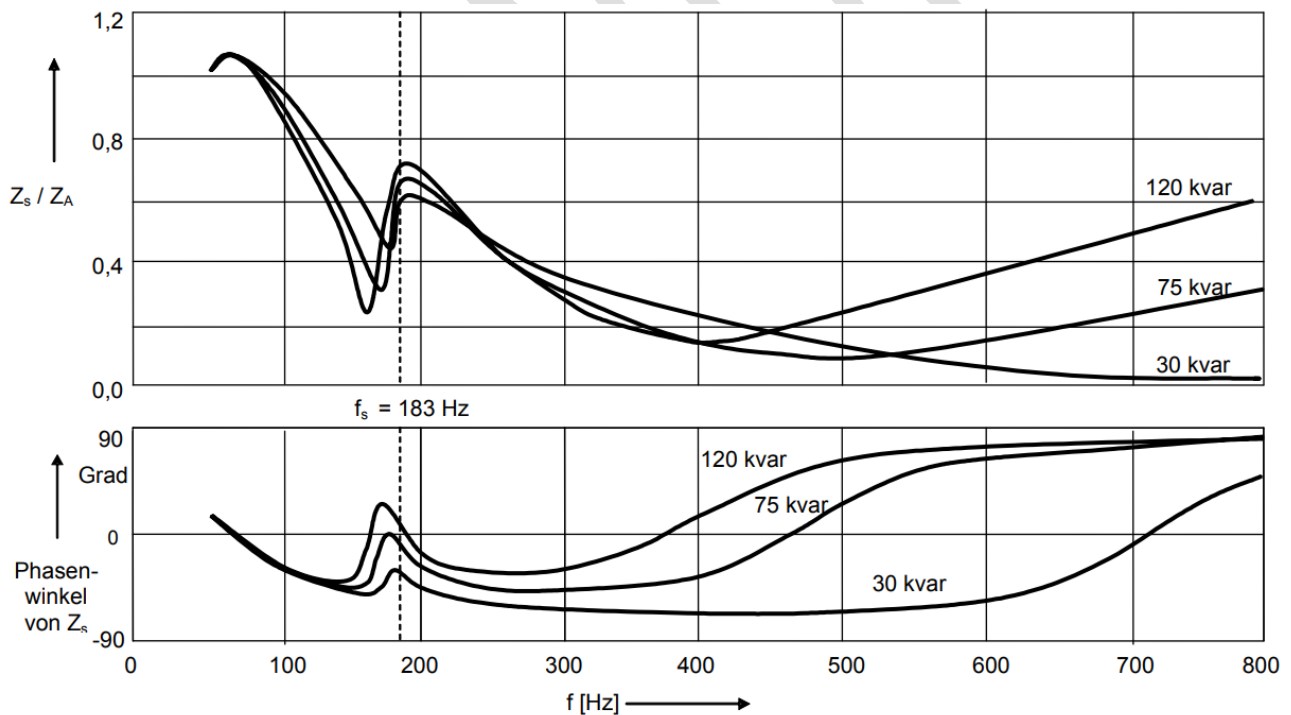


Abbildung 17: Impedanzcharakteristik aus der Sicht des Verknüpfungspunktes V

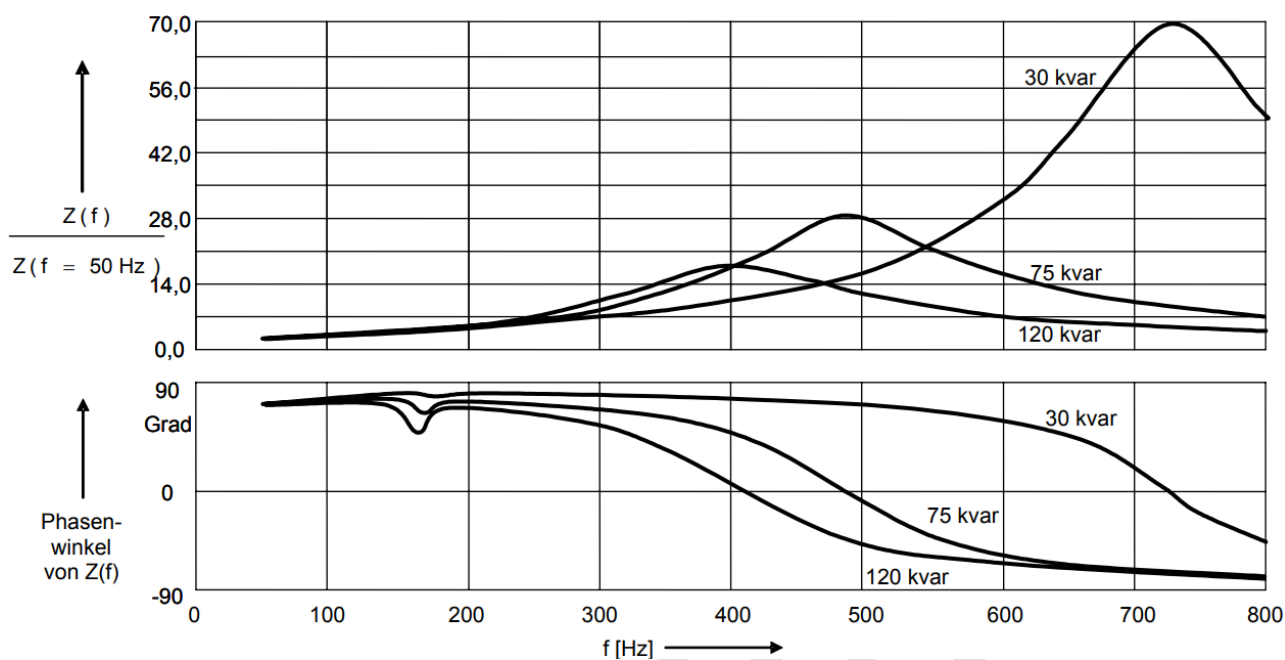


Abbildung 18: Impedanzcharakteristik aus der Sicht der Anlage des Netzbenutzers (Niederspannungsseite)

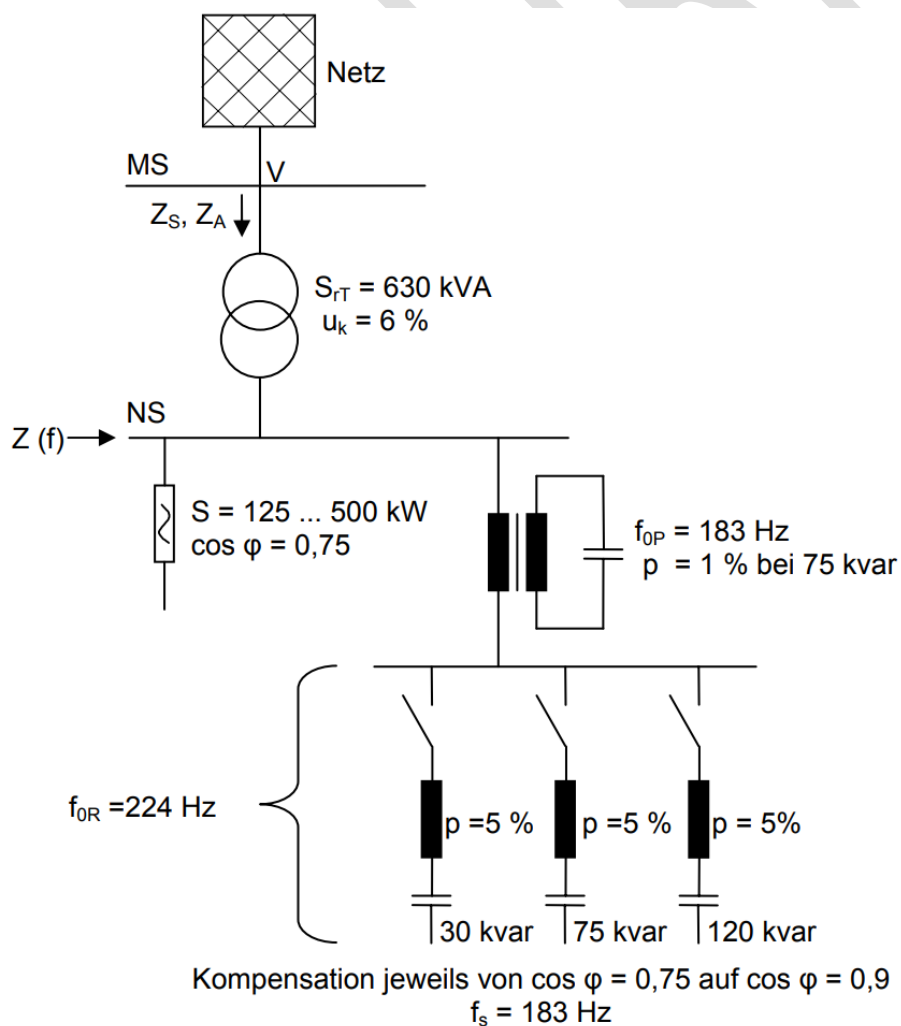


Abbildung 19: Netzschema 5

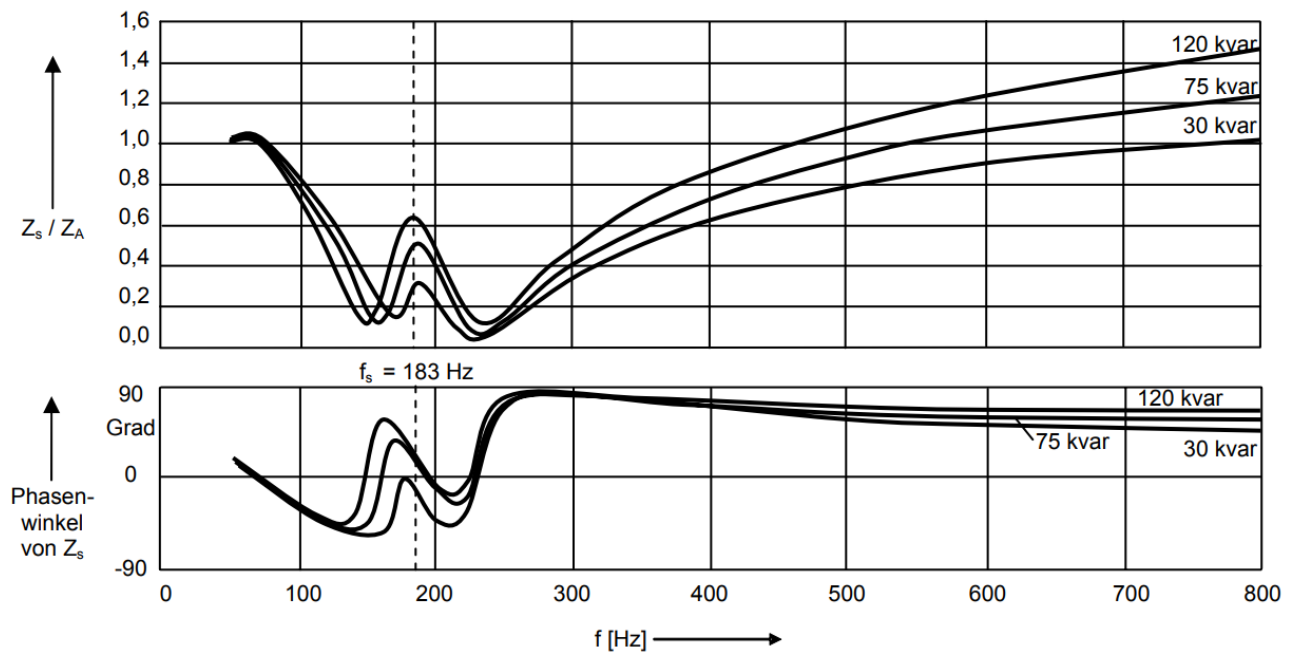


Abbildung 20: Impedanzcharakteristik aus der Sicht des Verknüpfungspunktes V

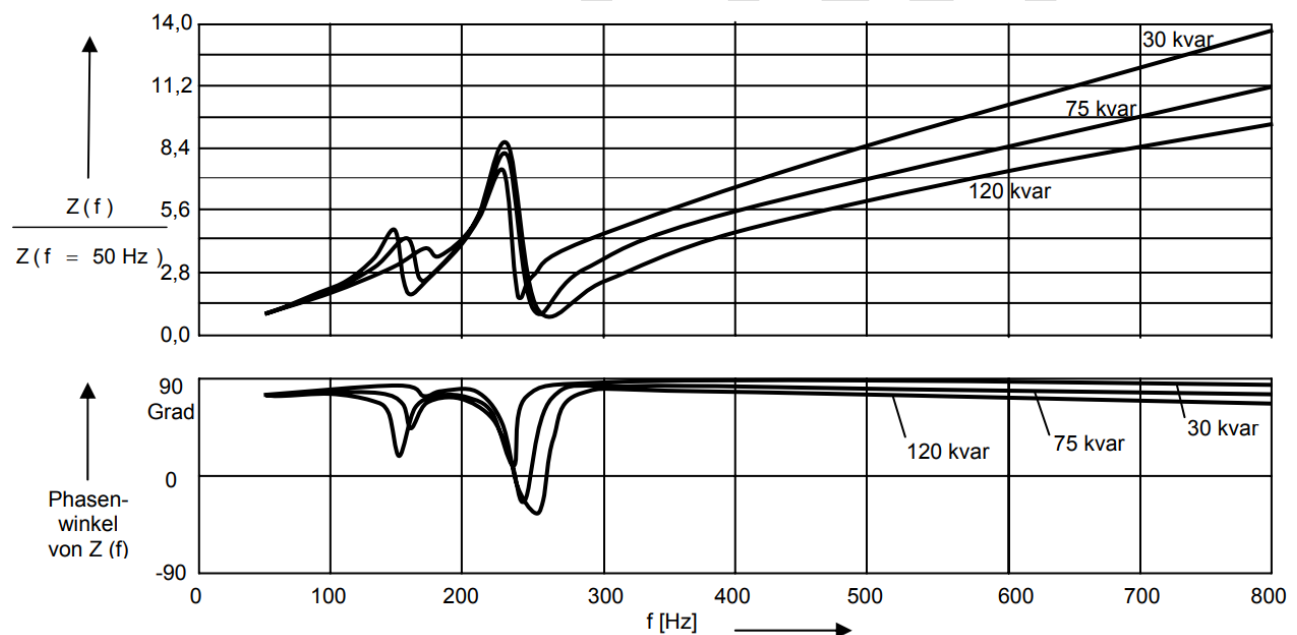


Abbildung 21: Impedanzcharakteristik aus der Sicht der Anlage des Netzbenutzers (Niederspannungsseite)

4.2.4 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 in Abbildung 22 bis Abbildung 25 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 Netzurückwirkungsrelevante elektrische Betriebsmittel, Kapitel 6).

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 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.

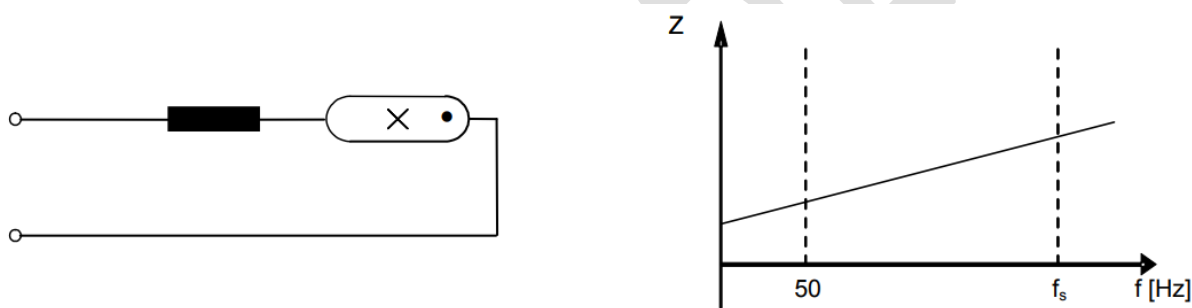


Abbildung 22: gasgefüllte? Leuchtstofflampe mit induktivem Vorschaltgerät, Einzelschaltung, induktiv, un-kompensiert

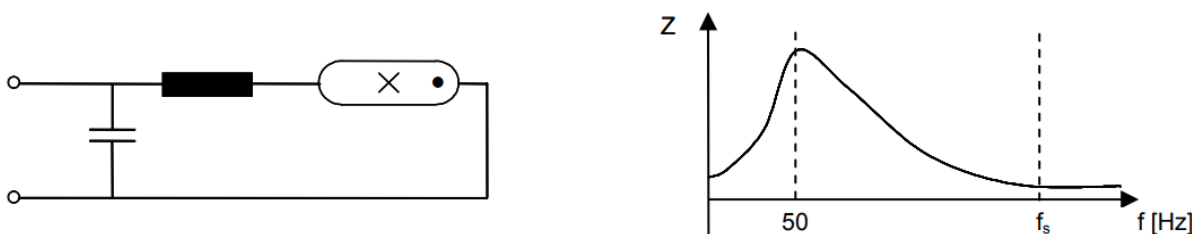


Abbildung 23: Leuchtstofflampe mit induktivem Vorschaltgerät und Parallelkompensation, Einzelschaltung, induktiv, kompensiert

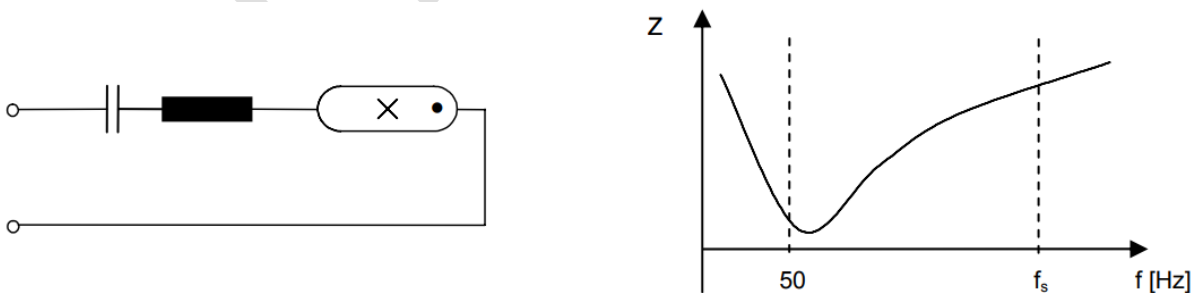


Abbildung 24: Leuchtstofflampe mit induktivem Vorschaltgerät und Reihenkompensation, Einzelschaltung, kapazitiv, kompensiert

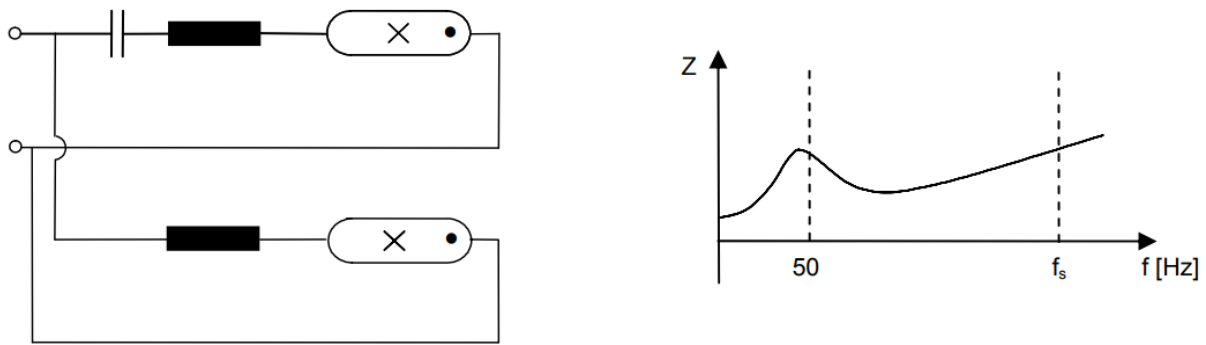


Abbildung 25: Leuchtstofflampen mit induktivem Vorschaltgerät und Reihenkomensation, Duo-Schaltung, auf $\cos \varphi = 1$ kompensiert

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

Wie Abbildung 22 bis Abbildung 25 deutlich machen, sind die Impedanzen der Lampenschaltungen frequenzabhängig. Durch die oftmals notwendigen Kompensationsmaßnahmen können sich, besonders bei der Parallelkompensation 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.

Parallelkompensation

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 Parallelkompensation 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.

Anmerkungen:

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

4.3 Tonfrequenz-Sperrkreis

Tonfrequenz-Sperrkreise dienen der Impedanzerhöhung 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 Abbildung 26).



Abbildung 26: Tonfrequenz-Sperrkreis, Tonfrequenz-Sperrkreis mit transformatorischer Kopplung

Nach der Zuordnung der Tonfrequenz-Sperrkreise unterscheidet man zwischen:

- Sperren für die gesamte Anlage des Netzbenutzers (Gesamtsperrung)
- Sperren für Gruppen von Betriebsmitteln (Blocksperrungen)
- Sperren für einzelne Betriebsmittel (Einzelsperren)

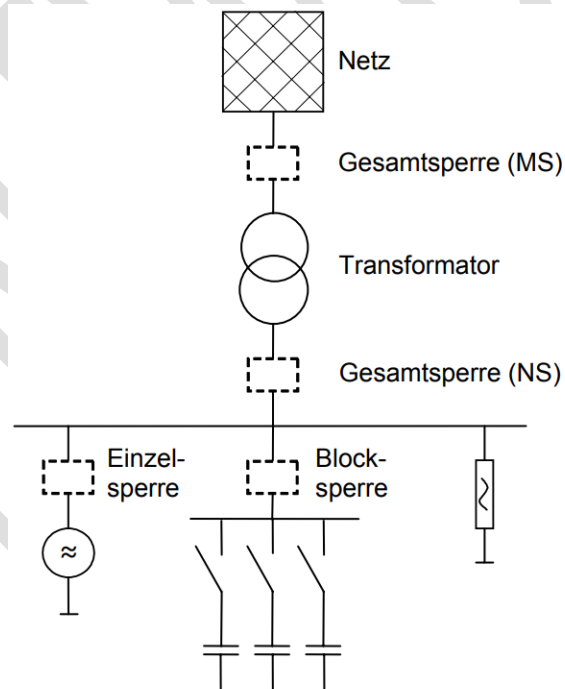


Abbildung 27: Beispiele möglicher Einbauorte von Tonfrequenz-Sperrkreisen

Bei der Auslegung von Sperren ist zu berücksichtigen:

- Es entstehen zusätzliche Resonanzstellen, sodass eine sorgfältige Dimensionierung und Abstimmung erforderlich sind.
- Der Betriebs- und Kurzschlussstrom am Einbauort (siehe Abbildung 27).
- Die Oberschwingungspegel am Verknüpfungspunkt V.

4.4 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 4.1 dieser Empfehlung einzuhalten.

Durch das Zusammenwirken mit dem vorgeschalteten Transformator werden die Resonanzfrequenzen der Saugkreisanlage aus der Sicht des Netzes 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. Oftmals können entsprechende Messungen der Impedanz nützlich sein.
- Das Oberschwingungsstromspektrum der Anlage des Netzbenutzers 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.

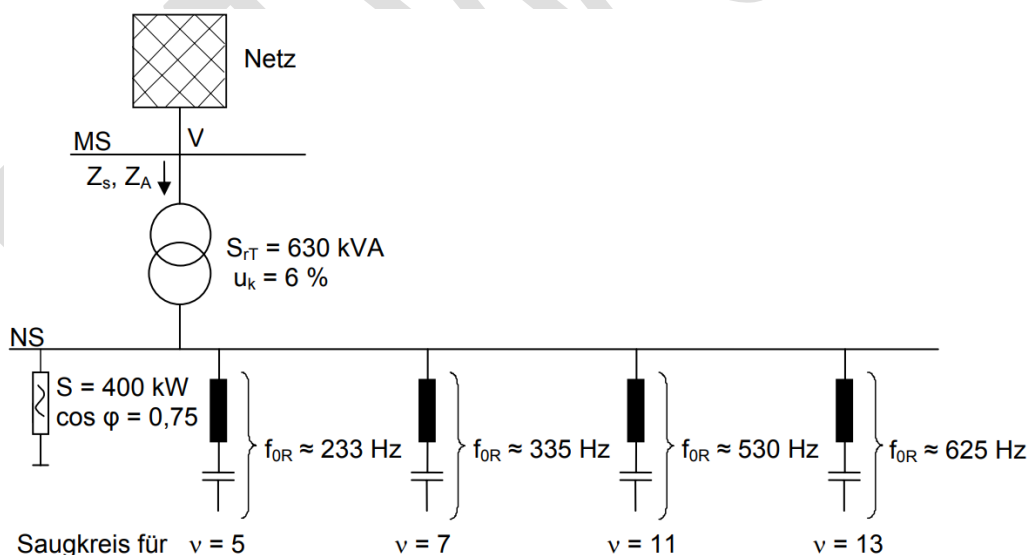


Abbildung 28: Netzschema 6

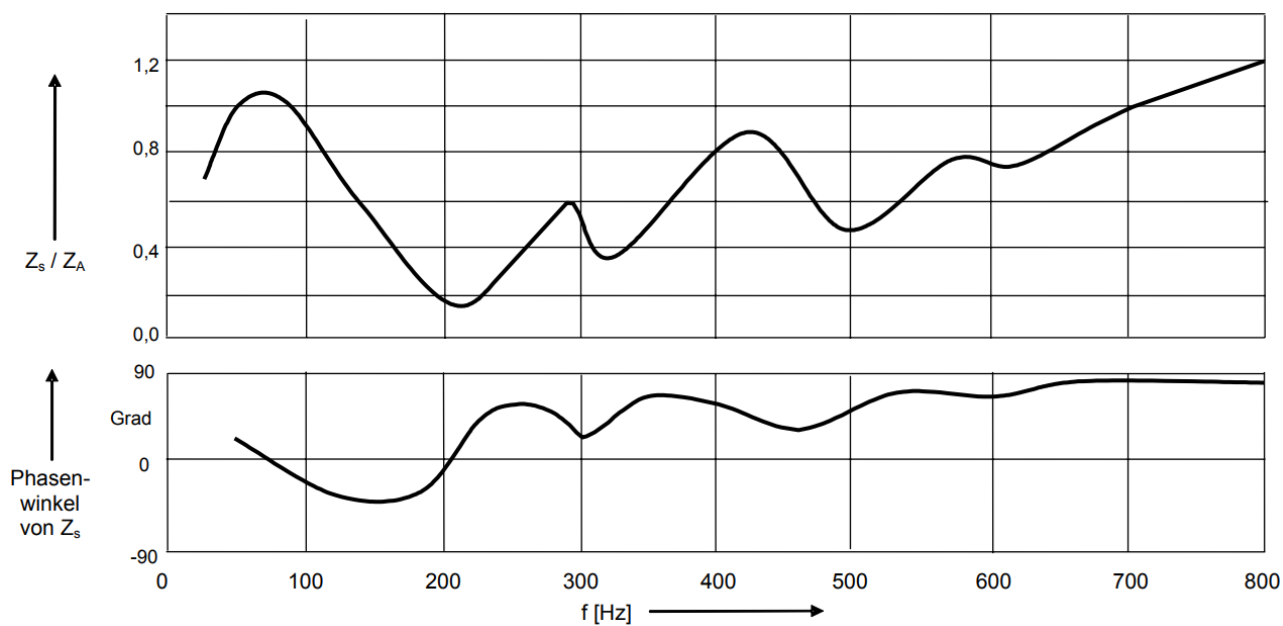


Abbildung 29: Impedanzcharakteristik aus der Sicht Verknüpfungspunktes V

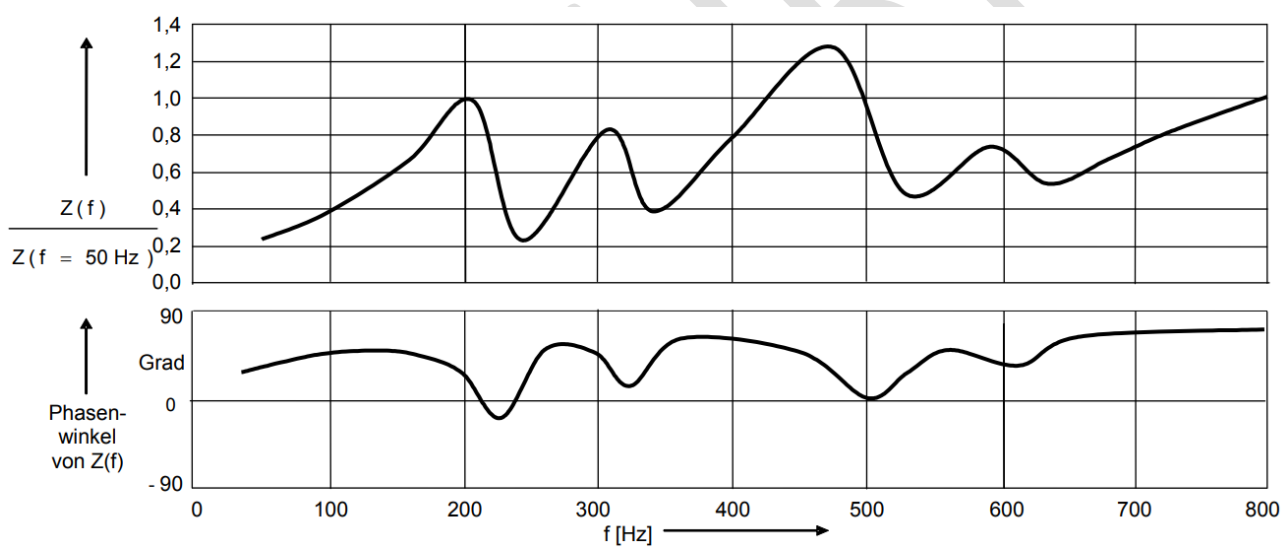


Abbildung 30: Impedanzcharakteristik aus der Sicht der Anlage des Netzbenutzers (Niederspannungsseite)

4.5 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 Kapitel 4.1.4 einzuhalten.

4.6 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 Netzbenutzers 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:

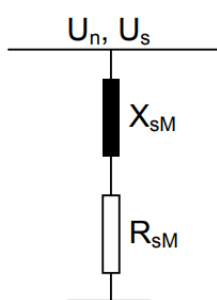


Abbildung 31: Ersatzschaltbild - Tonfrequenzimpedanz

$$X_{sM} \approx \frac{U_n^2}{S_M} \cdot n \cdot x'' \quad (7)$$

$$x'' \approx 0,1 \dots 0,3 \quad (8)$$

$$\frac{R_{sM}}{X_{sM}} \approx 0,1 \dots 0,3 \quad (9)$$

$$n = \frac{f_s}{f} = \frac{f_s}{50 \text{ Hz}} \quad (10)$$

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 f_s zur Frequenz f (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

4.7 Stromerzeugungsanlagen

Rundsteueranlagen werden für eine Belastung dimensioniert, die der 50-Hz-Last des Netzes entspricht, in das die Einspeisung der Steuerspannung erfolgt. Stromerzeugungsanlagen 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.

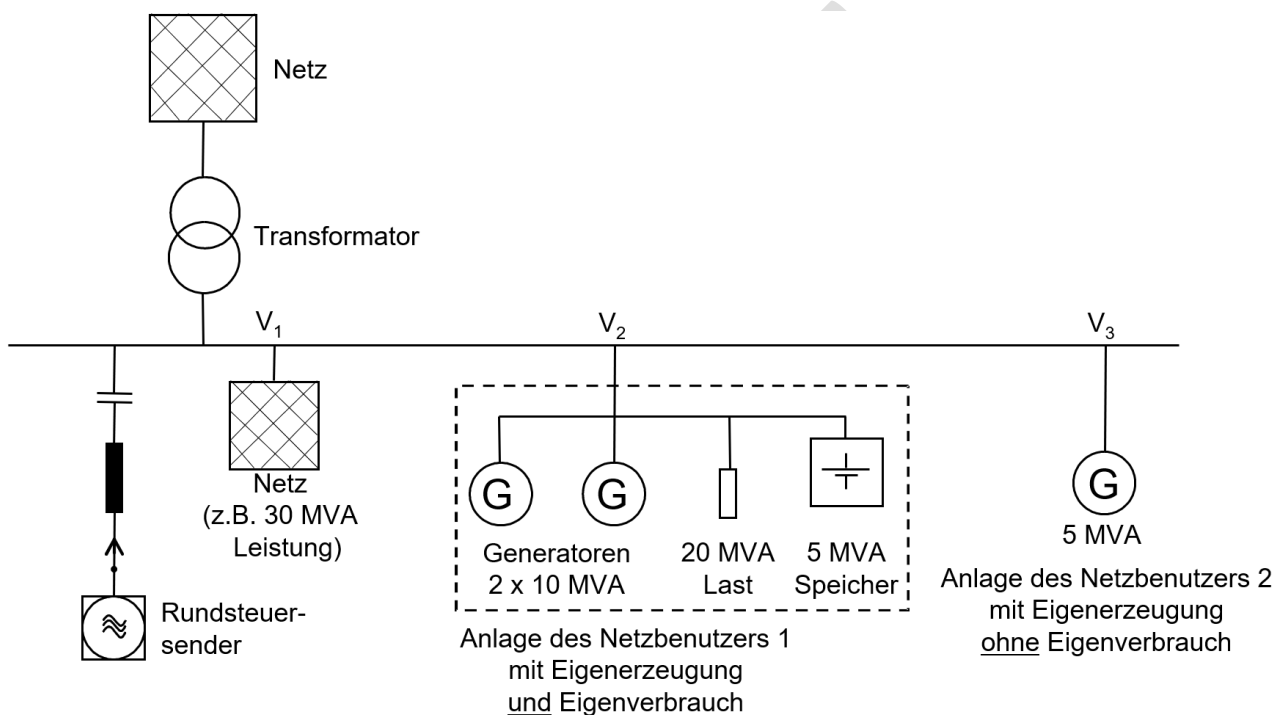


Abbildung 32: Versorgungsbereich mit Stromerzeugungsanlagen

Der Rundsteuersender muss z.B. folgende Lasten speisen:

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

4.7.1 Stromerzeugungsanlagen, statische Umrichter

Stromerzeugungsanlagen, die über statische Umrichter ohne Filterkreise an das elektrische Netz angeschlossen 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 Stromerzeugungsanlagen erforderlich. Allerdings sind die zulässigen Grenzwerte hinsichtlich der Störspannungen von Anlagen der Netzbetreiber im Bereich der Rundsteuerfrequenz einzuhalten (siehe Kapitel 4.1.4).

Anmerkungen:

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

4.7.2 Stromerzeugungsanlagen, direkt angeschlossen

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

- Dem Typ der Stromerzeugungsanlage 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 Stromerzeugungsanlagen ist aus Sicht der Tonfrequenz-Rundsteuerung bis zu den in der Tabelle 2 aufgeführten Bemessungsleistungen ohne besondere Maßnahmen (wie z.B. Tonfrequenz-Sperrkreise) zulässig.

Verknüpfungspunkt V	Summenleistung von Stromerzeugungsanlagen	
	am jeweiligen Verknüpfungspunkt	im betrachteten Versorgungsbereich
HS-Netz	5 MVA	10 MVA
MS-Netz	500 kVA	1 MVA
NS-Netz	5 kVA	10 kVA

Tabelle 2: Grenzwerte für Bemessungsleistungen

Anmerkungen:

- Die Summenleistung von Stromerzeugungsanlagen am jeweiligen Verknüpfungspunkt umfasst die gesamte Stromerzeugungsanlage (ggf. auch mehrere Generatoren) der Anlage des Netzbenutzers.
- Die Summenleistung von Stromerzeugungsanlagen im betrachteten Versorgungsbereich umfasst alle Stromerzeugungsanlagen im jeweiligen Netz, d.h. die Hochspannungs-Netzgruppe bzw. das Mittel- oder Niederspannungs-Netz.
- Bei Überschreitung der in Tabelle 2 aufgeführten Grenzwerte können aus Sicht der Rundsteuerung besondere Maßnahmen erforderlich werden. Diese sind mit dem jeweiligen Netzbetreiber abzustimmen.

4.8 Sonstige Betriebsmittel

4.8.1 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 4.1 in allen Betriebszuständen eingehalten werden.

4.8.2 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.

5 Power Line Communication (PLC)

Dieses Kapitel befindet sich in Bearbeitung und wird in einer späteren Version ergänzt.

ENTWURF

Anhang

A1. 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:

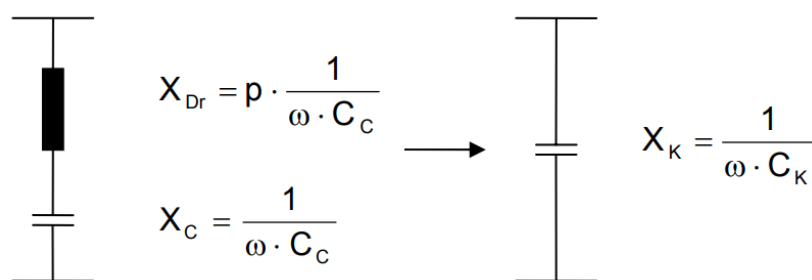


Abbildung 33: Ersatzschaltbild – Verdrosselung

$$Q_K = \frac{U_n^2}{X_K} = \frac{U_n^2 \cdot \omega \cdot C_C}{(1 - p)} \quad (11)$$

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 des Netzes
X_K	Reaktanz (induktiver Widerstand) der Kompensationsanlage

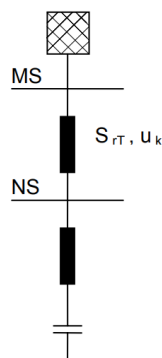


Abbildung 34: Netzschema - Verdrosselung

Frequenz (50 Hz)	Rundsteuerfrequenz
$Z_{Tr} = \frac{U_n^2}{S_{rT}} \cdot u_k$	$n = \frac{f_s}{f} = \frac{f_s}{50 \text{ Hz}}$
$Z_{Dr} = \frac{U_n^2 \cdot p}{Q_K \cdot (1 - p)}$	$Z_{sTr} = \frac{U_n^2}{S_{rT}} \cdot u_k \cdot n$
$Z_C = \frac{U_n^2}{Q_K \cdot (1 - p)}$	$Z_{sDr} = \frac{U_n^2 \cdot p \cdot n}{Q_K \cdot (1 - p)}$
	$Z_{sC} = \frac{U_n^2}{Q_K \cdot (1 - p) \cdot n}$

Tabelle 3: Formeln bei f und f_s

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 des Netzes

S_{rT} Bemessungsleistung 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)

U_n Nennspannung des Netzes

Z_{sTr} Impedanz des Transformators bei Rundsteuerfrequenz

Z_{sDr} Impedanz der Drossel bei Rundsteuerfrequenz

Z_{sC} Impedanz der Kondensatoren bei Rundsteuerfrequenz

$$Z_s^* = \frac{U_n^2}{S_{rT}} \cdot u_k \cdot n + \frac{U_n^2 \cdot p \cdot n}{Q_K \cdot (1 - p)} - \frac{U_n^2}{Q_K \cdot (1 - p) \cdot n} \quad (12)$$

$$\varepsilon^* = \frac{Z_s^*}{\frac{U_n^2}{S_{rT}}} = u_k \cdot n + \frac{S_{rT}}{Q_K \cdot (1 - p)} \cdot \left(p \cdot n - \frac{1}{n} \right) \quad (13)$$

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

Z_s^* Impedanz von Transformator und Kompensationsanlage der Anlage des Netzbenutzers bei Rundsteuerfrequenz

$\frac{U_n^2}{S_{rT}}$ aus der Bemessungsleistung des Transformators ermittelte Impedanz (siehe Abbildung 3)

Für den Verdrosselungsgrad p ergibt sich:

$$p \geq \frac{\frac{1}{n^2} + \frac{Q_k}{S_{rT}} \cdot \left(\frac{\varepsilon^*}{n} - u_k\right)}{1 + \frac{Q_k}{S_{rT}} \cdot \left(\frac{\varepsilon^*}{n} - u_k\right)} \quad (14)$$

Mit $k = \frac{Q_k}{S_{rT}}$ und $\varepsilon^* = 0,5$ folgt:

$$p \geq \frac{\frac{1}{n^2} + k \cdot \left(\frac{1}{2n} - u_k\right)}{1 + k \cdot \left(\frac{1}{2n} - u_k\right)} \quad (15)$$

p	Verdrosselungsgrad
n	Verhältnis der Rundsteuerfrequenz f_s zur Frequenz f (50 Hz)
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 $f_{0R} = \frac{f}{\sqrt{p}} = \frac{50}{\sqrt{p}}$ **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:

$$\varepsilon^* = \frac{S_{rT}}{Q_k \cdot (1 - p)} \cdot \left(\frac{1}{n} - p \cdot n\right) - u_k \cdot n \quad (16)$$

Mit $k = \frac{Q_k}{S_{rT}}$ und $\varepsilon^* \geq 0,5$ folgt:

$$p \leq \frac{\frac{1}{n^2} - k\left(\frac{1}{2n} + u_k\right)}{1 - k\left(\frac{1}{2n} + u_k\right)} \quad (17)$$

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

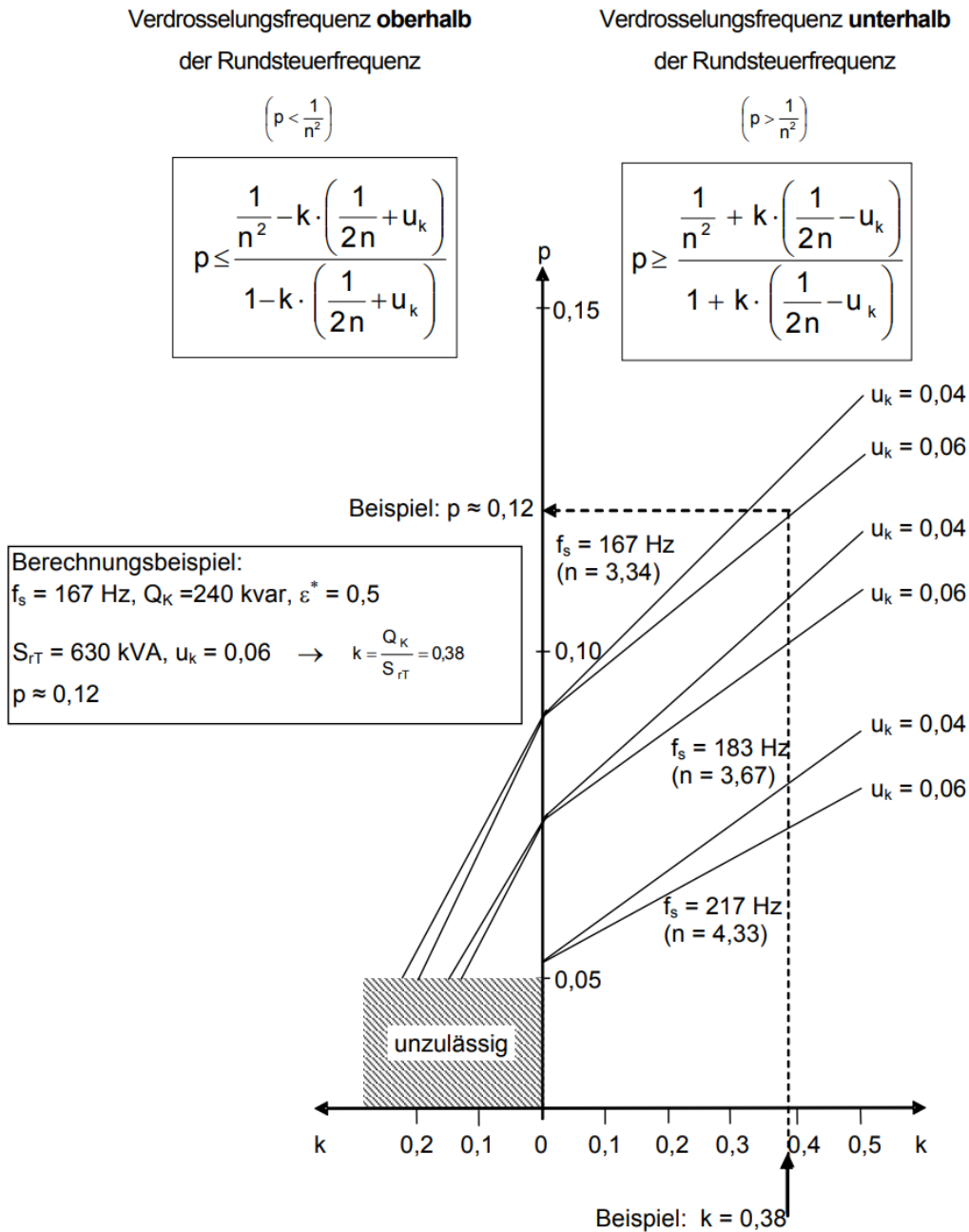


Abbildung 35: Verdrosselungsgrad - Rundsteuerfrequenz

Hinweis:

Bei hohem Anteil an rotierenden 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) nicht angewendet werden. Unter diesen Bedingungen ist eine Bemessung der Kompensationsanlage auf Basis des Impedanzfaktors $\varepsilon \geq 0,4$ (siehe Kapitel 4.1.2) durchzuführen.

A2. Maximal zulässige Steuerpegelabsenkung

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

Die dafür wichtigen Einflussgrößen der Rundsteuerung, wie z.B.:

- 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)

$$u_{sE} = 1,5 \cdot u_f \quad (18)$$

$$u_{sMS} = \sigma \cdot u_f \quad (19)$$

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

$$\sigma = \frac{u_s}{u_f} \quad (20)$$

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

$$\Delta u = \frac{u_{sMS} - u_{sE}}{u_{sMS}} = \frac{\sigma \cdot u_f - 1,5 \cdot u_f}{\sigma \cdot u_f} = 1 - \frac{1,5}{\sigma} \quad (21)$$

$$\Delta u = \left(1 - \frac{1,5}{\sigma}\right) \cdot 100\% \quad (22)$$

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 Abbildung 36.

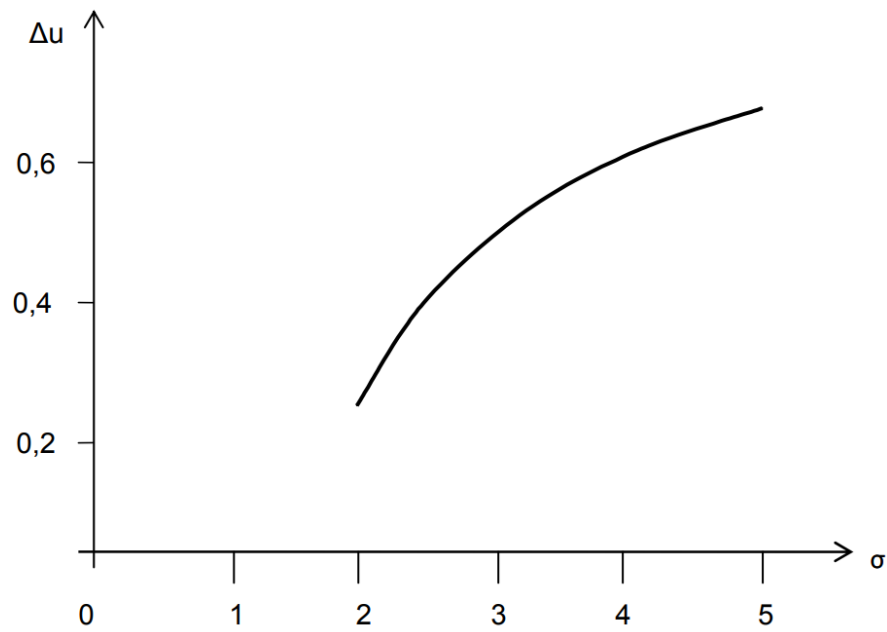


Abbildung 36: Maximal zulässige Absenkung des Steuerpegels in Abhängigkeit von σ