

Prüfung elektrischer Antriebe in Maschinen und Anlagen

Schutzmaßnahmen und Ableitströme bei Frequenzumrichtern und Servoreglern

1 Rechtsgrundlagen	1
1.1 Verantwortung und Pflichten des Betreibers elektrischer Anlagen und Betriebsmittel	1
1.2 Produktsicherheitsgesetz	14
1.3 Verordnungen.....	14
1.4 Bedeutung von CE-Kennzeichnung und GS-Zeichen auf Produkten	20
2 Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag	1
2.1 Allgemeines	1
2.2 Maßnahmen zum Schutz gegen elektrischen Schlag nach DIN VDE 0100-410	7
2.3 Berührungsspannung in fehlerbehafteten Netzsystemen	43
3 Prüfungen elektrischer Anlagen nach DIN VDE 0100-600 und DIN VDE 0105-100	1
3.1 Zweck und Umfang elektrischer Anlagenprüfungen	1
3.2 Prüfschritte	3
3.3 Besichtigen	3
3.4 Überstromschutzorgane	6
3.5 Kabel und Leitungen.....	15
3.6 Auswahl von Schalt- und Steuergeräten (Schutzeinrichtungen).....	46
3.7 Schutzzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene	47
3.8 Potentialausgleich und Erdungsanlagen	48
3.9 Unfallverhütung und Brandschutz	48
3.10 Elektrothermografie	48
3.11 Prüfungen durch Erproben und Messen	53
3.12 Technische Unterlagen und Kennzeichnungen	56
4 Prüfung der elektrischen Ausrüstung von Maschinen nach EN 60204-1 (VDE 0113-1).....	1
4.1 Normative Erläuterungen	1
4.2 Prüfung der elektrischen Ausrüstung	2
5 Frequenzumrichter	1
5.1 Frequenzumrichter und Oberschwingungen	1
5.2 Ableit- und Fehlerströme in Stromkreisen mit Frequenzumrichtern.....	11
6 Messungen an elektrischen Anlagen, Geräten u. elektrischen Ausrüstungen von Maschinen .	1
6.1 Schutzleiterwiderstand	1
6.2 Schleifenimpedanz	12
6.3 Messverfahren für das Isoliervermögen.....	17
6.4 Prüfung des Isolationswiderstandes.....	21
6.5 Ersatzableitstrommessverfahren.....	36
6.6 Ableitstrommessverfahren.....	37
6.7 Ableit- und Fehlerstrommessung bei Drehstromverbrauchern	46
6.8 Schutz durch sichere Trennung (Schutztrennung, Kleinspannung SELV/PELV)	48

6.9 Prüfung bei Verwendung von RCD-Schutzeinrichtungen	50
6.10 Spannungspolarität und Phasenfolge der Außenleiter.....	56
6.11 Spannungsfall.....	57
6.12 Erdungswiderstand.....	59
7 Ursachen und Auswirkungen von Oberschwingungen	1
7.1 Störungen in den Stromversorgungsnetzen.....	1
7.2 Analyse und Synthese von Oberschwingungen.....	7
7.3 Kennwerte im Zusammenhang mit Oberschwingungen	14
7.4 Auswirkungen von Oberschwingungen	20
7.5 Phasenanschnittsteuerung (Dimmer).....	30
7.6 Leuchtmittel	31
7.7 Netzteile.....	33
7.8 Elektronisch geregelte Bohrmaschine.....	34
7.9 Ladestationen von Elektrofahrzeugen.....	35
7.10 PV-Wechselrichter.....	35
7.11 Schutz des Netzesystems bei Oberschwingungen	39
7.12 Power Quality	42
7.13 Merksätze	48

5 Frequenzumrichter

5.1 Frequenzumrichter und Oberschwingungen

Frequenzumrichter verursachen Oberschwingungen, die auf das Netzsystem zurückwirken. Als nichtlinearer Verbraucher (nichtlineare Belastung) wird ein nichtlinearer Strom aus dem Netz entnommen, wenngleich der Frequenzumrichter von einer sinusförmigen Spannung gespeist wird.

Die Grenzwerte der Harmonischen und der THD (Total Harmonic Distortion) werden in der Norm EN61000-3-12 bzw. IEC61000-3-12 geregelt. THD_r-Werte können > 100 % sein.

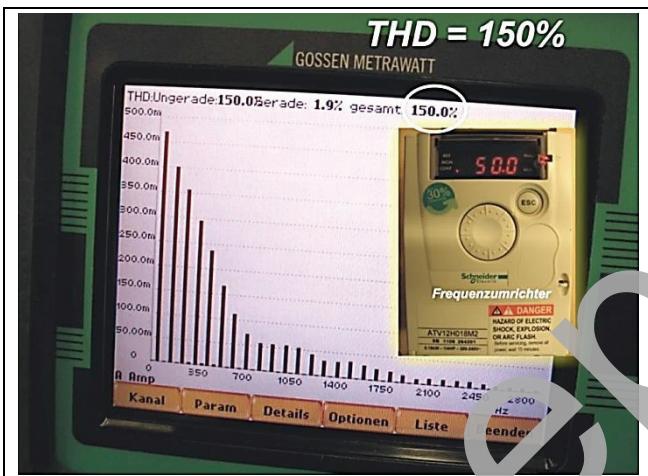


Bild 1: Frequenzumrichter und Oberschwingungspektrum

5.1.1 EMV bei Frequenzumrichtern

Die Produktnorm EN 61800-3

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) kennzeichnet den üblicherweise erwünschten Zustand, dass technische Geräte einander nicht durch ungewollte elektrische oder elektromagnetische Effekte störend beeinflussen. Sie behandelt technische und rechtliche Fragen der ungewollten wechselseitigen Beeinflussung in der Elektrotechnik. Bei der DIN EN 61800-3 „Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 3 EMV-Anforderungen einschließlich spezieller Prüfverfahren“ handelt es sich um eine Produktnorm, die die Hersteller für eine CE-Kennzeichnung von elektrischen Antrieben (also auch Frequenzumrichtern) einhalten müssen. Diese Produktnorm definiert die Klassen C1 bis C4 mit unterschiedlichen Grenzwerten für unterschiedliche Umgebungen.

Klasse	Umgebung	EMV-Sachverständ
C1	Wohnbereich	-
C2	Wohn- und Industriebereich	EMV-Kundiger
C2	Industriebereich	EMV-Kundiger
C4	Industriebereich	EMV-Plan

Geräte der Klasse C1 erzeugen die geringsten Störaussendungen, sind aber auch teuer und haben eine geringere Störfestigkeit.

a) Strom-Oberschwingungen durch Netzgleichrichter

Frequenzumrichter erzeugen Stromoberschwingungen am Netzeingang. Die Netzoberschwingungen des Stromes sind von der Netzimpedanz und von der Bauart des Netzgleichrichters abhängig.

Der Eingangsgleichrichter (Netzgleichrichter) ist ungeregelt und bewirkt die Aufnahme hoher Ströme aus dem Netz. Er besteht z.B. aus einer ungesteuerten dreiphasigen Brückenschaltung (B6-Variante).

Die Brückenschaltung wandelt die Wechselspannung des Stromnetzes in eine (pulsierende) Gleichspannung um, die durch den Zwischenkreiskondensator geglättet wird.

Der Gleichrichter wird an das Versorgungsnetz angeschlossen und erzeugt eine pulsierende Gleichspannung.

Die einphasige Brücke ist eine unsymmetrische Belastung für das Netz. Die Welligkeit der Gleichspannung ist wesentlich größer als bei einer dreiphasigen Brückenschaltung. Somit ist die Kapazität des Zwischenkreises bei einphasiger Brücke größer zu dimensionieren.

Der Gleichrichter des Frequenzumrichters besteht entweder aus Dioden oder Thyristoren. Ein aus Dioden aufgebauter Gleichrichter ist ungesteuert, ein aus Thyristoren aufgebauter Gleichrichter ist steuerbar. Die Brücke aus Dioden wird bis Motoren-Leistungen von ca. 2,2 kW eingesetzt.

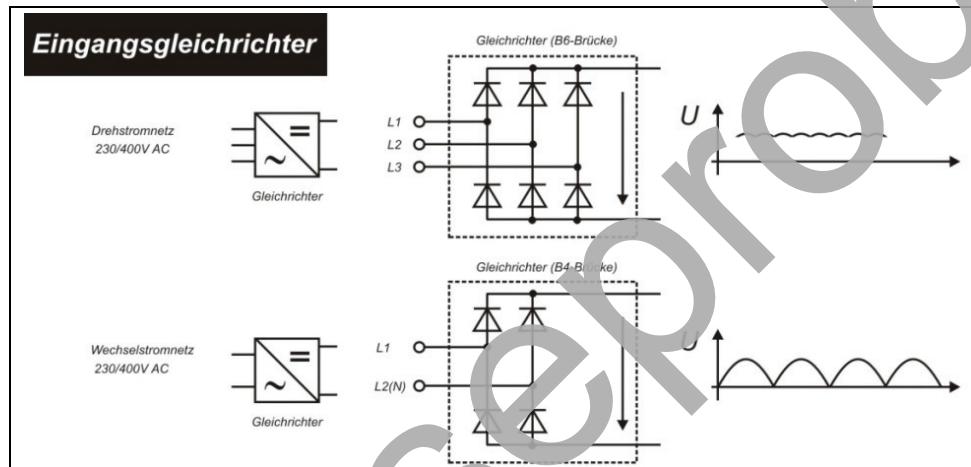


Bild 4: Aufbauvarianten von Eingangsgleichrichtern

b) Zwischenkreis

Der Zwischenkreis besteht im Wesentlichen aus einem Zwischenkreiskondensator, der die (pulsierende) Gleichspannung glättet. Der Spitzenwert beträgt am Beispiel der B6-Brücke:

$$\hat{U} = \sqrt{6} \cdot U_{\text{Strang}} = \sqrt{6} \cdot 230V = 563V$$

Die am Ausgang des Zwischenkreises anstehende gleichgerichtete Spannung beträgt bei einer B6-Brücke:

$$\overline{U} = 1,35 \cdot U_{\text{Netz}} = 1,35 \cdot 400V = 540V$$

Der Zwischenkreis speichert und glättet die pulsierende Gleichspannung. Hieraus wird der Motor gespeist. Der Zwischenkreiskondensator C puffert die netzseitige Energie, was eine hohe Kapazität erfordert. Der am Frequenzumrichter angeschlossene Motor entnimmt dem Zwischenkreis Energie. Der Kondensator wird dabei teilweise entladen. Die Aufladung des Kondensators kann nur dann erfolgen, wenn die Netzspannung höher als die Zwischenkreisspannung ist. Die Ladeenergie wird vom Versorgungsnetz zugeführt, wenn die Netzspannung nahe dem Maximum ist. Dadurch ergeben sich Stromspitzen, die sich bei mehreren parallelgeschalteten Frequenzumrichtern addieren.

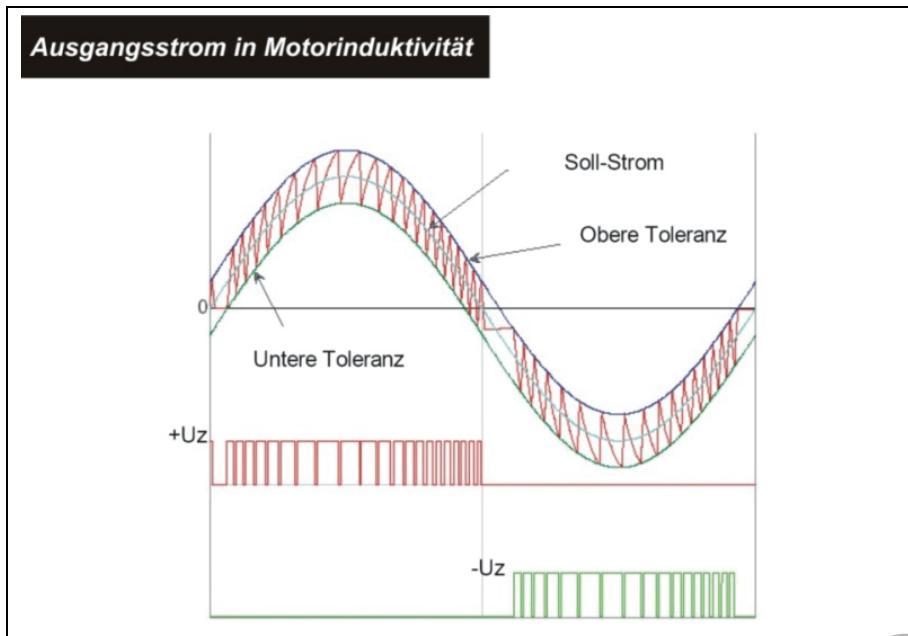


Bild 7: Verlauf des Stromes, der in den Motorinduktivitäten entsteht.

Beim direkten Anschluss des Motors an das Versorgungsnetz bestehen ideale Betriebsverhältnisse für den Motor. Der Frequenzumrichter ist so konzipiert, dass diese durch Verändern der Spannung eine gute Annäherung an diese Betriebsverhältnisse erreichen.

Standardmäßig gilt eine lineare U-f-Kennlinie von 0 bis 50Hz bzw. 400V. Wenn die Frequenz 50Hz übersteigt, wird die Spannung nicht mehr erhöht (Netzspannung). Der Motor kann nicht mehr die Nennleistung erbringen und somit nicht mehr voll belastet werden.

Damit die Eckfrequenz (normalerweise 50Hz) höher gesetzt werden kann, muss der Motor anders ausgelegt werden. Ein normiertes Verhältnis ist: 230V - 50Hz und 400 V - 87 (50*1,71) Hz. Der Motor kann so bis 87Hz mit Nennlast betrieben werden.

Die Gestaltung dieser getakteten Ausgangsspannung ist abhängig von der gewünschten Ausgangsfrequenz. Über die Fourier-Analyse konnte gezeigt werden, dass die getaktete Ausgangsspannung des Umrichters die gleiche Wirkung am Asynchronmotor zeigt, wie eine sinusförmige Spannung gleicher Amplitude und Frequenz.

d) Steuerkreis

Die Elektronik im Steuerkreis kann Signale an den Gleichrichter, den Zwischenkreis und an den Wechselrichter senden und empfangen. Die Signale werden im Mikroprozessor generiert und ausgewertet.

5.1.3 Netzrückwirkungen durch Oberschwingungen

Strom-Oberschwingungen auf der Netzanschlusseite des Frequenzumrichters

Unter der idealisierten Annahme eines Netzinnenwiderstandes von 0Ω und einer unendlich guten Glättung des Zwischenkreisstromes ($L = \infty$) fließt im Netz ein rechteckförmiger Wechselstrom I_{Netz} .

Der Effektivwert des Stromes I_1 (der Grundschwingung) am Motor berechnet sich:

$$I_1 = \frac{P_{\text{welle}}}{\eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{FU}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{Netz}}}$$

Der Wirkungsgrad von Motor und Frequenzumrichter sind jeweils zu berücksichtigen.

Wirkungsgrad des Motors: η_{Motor} (<1)

Wirkungsgrad des Frequenzumrichters: η_{FU} (<1)

Elektrische Wirkleistung des Motors: $P_{\text{wirk(Motor)}}$

Die mechanische Leistung an der Welle berechnet sich: $P_{\text{welle}} = P_{\text{mech}} = \frac{P_{\text{wirk(Motor)}}}{\cos \varphi_{\text{Netz}}} \cdot \eta_{\text{Motor}}$

Der Effektivwert des Stromes I_1 berechnet sich: $I_1 = \frac{P_{\text{wirk(Motor)}}}{\eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{FU}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{Netz}} \cdot \cos \varphi_{\text{Netz}}}$

Der Effektivwert des Netz-Gesamtstroms berechnet sich wie folgt:

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{eff(Netz)}} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}$$

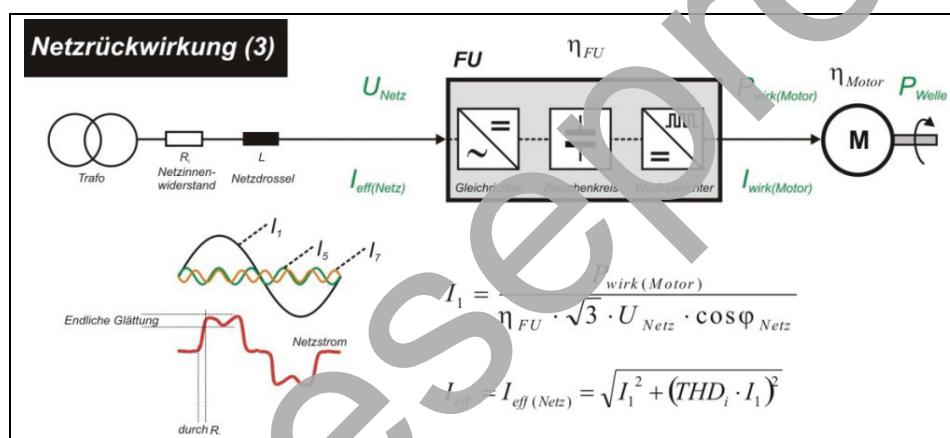


Bild 10: Netzrückwirkung beim Frequenzumrichter (3)

Fallbeispiel:

$U_{\text{Netz}} = 400V$, $THD_i = 60\%$, $\eta_{\text{FU}} = 97\%$, $P_{\text{wirk(Motor)}} = 45kW$, $\eta_{\text{Motor}} = 92\%$, $\cos \varphi_{\text{Netz}} = 0,98$

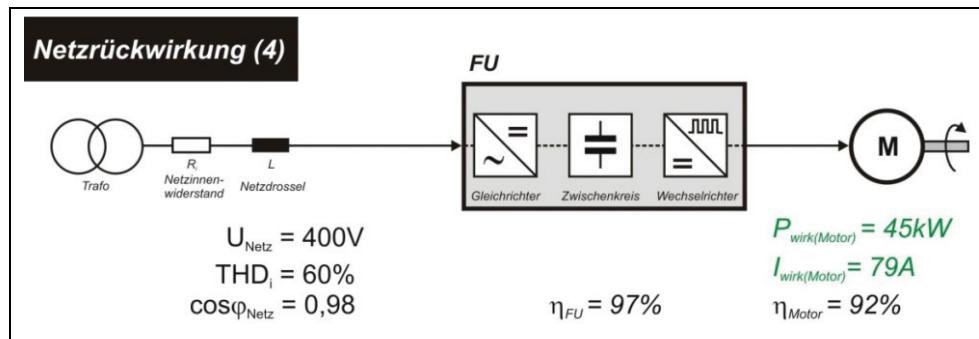


Bild 11: Netzrückwirkung beim Frequenzumrichter (4)

Technische Lösungen bei Geräten mit geringer Leistungsaufnahme sind Eingangsschaltungen - **PFC (Power Factor Correction)** bei Netzteilen oder **AFC (Active Front End)** bei Frequenzumrichtern. Dies sind elektronische Eingangsschaltungen, die mit schnell schaltenden Hableitern einen annähernd sinusförmigen Strom erzwingen.

Bei Geräten mit hoher Leistungsaufnahme werden aktive Filter mit einem erheblichen technischen Aufwand eingesetzt. Als Nachteil dieser aktiven Filter muss hier auf die Taktfrequenz hingewiesen werden, mit der die Korrektur des Eingangsstroms vorgenommen wird. Dies geschieht üblicherweise mit einer Frequenz von ca. 5 bis 20 kHz.

d) Passive Filter

Oberschwingungen, verursacht durch nichtlineare Verbraucher, können des Weiteren mit passiven Filtern reduziert werden. Technisch ist das durch vorgesetzte Induktivitäten zu realisieren, die auf der Drehstrom- (Netzdrossel) oder der Gleichstromseite (DC-Drossel) des Gleichrichters eingebaut werden. Da die Induktivität an jeder Stelle im Strompfad die gleiche Wirkung hervorruft, ist die Bedämpfung der Netzrückwirkungen von dem Einbauort unabhängig.

Beide Varianten bieten Vor- und Nachteile. Netzseitige Drosseln sind größer und erzeugen höhere Verluste als Gleichstromdrosseln, schützen allerdings den Gleichrichter gut vor Netztransienten. Gleichstromseitige Drosseln sind effektiver, können aber nachträglich meist nicht nachgerüstet werden.

Mit Drosseln kann der Oberschwingungsgehalt eines B6-Gleichrichters von einem THD_i-Wert von 80% auf einen THD_i-Wert von ca. 40% reduziert werden. Wird eine weitere Reduzierung notwendig, so muss ein angepasstes Filter eingesetzt werden.

5.1.4 Schutz durch Oberschwingungsfilter

In speziellen Fällen, wie z.B. schwachen (niedrige Kurzschlussleistung) Netzen und hohen Oberschwingungsbelastungen, oder in Fällen wo die Energieversorgungsunternehmen oder kritische Produktionsprozesse besonders hohe Anforderungen an niedrige THD_U-Werte stellen (z.B. Rechenzentren, Halbleiterindustrie, lange Prozesketten ...), kann es nötig sein, dass eine stärkere Oberschwingungsreduzierung benötigt wird als dies herkömmliche verdrosselte BLK-Anlagen leisten können.

Schutz durch passive und aktive Oberschwingungsfilter (OSF)

Passive Oberschwingungsfilter bestehen hauptsächlich aus Reihenschwingkreisen, die im Resonanzfall praktisch niederohmig werden (Saugkreise). Passive Filter bestehen aus der Anordnung parallel geschalteter Saugkreise, deren Resonanzfrequenzen mit den Frequenzen der Oberschwingungen (150Hz, 250Hz, ...) übereinstimmen.

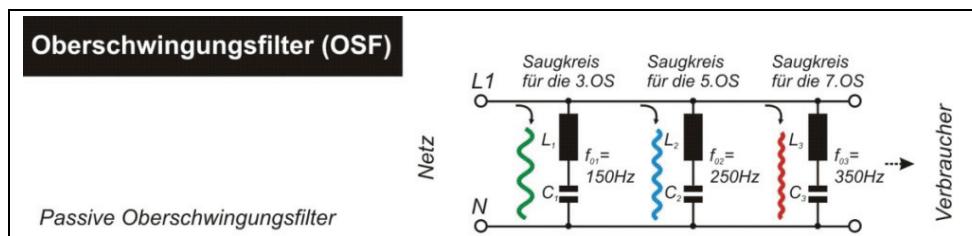


Bild 12: Schutz durch passive Oberschwingungsfilter