



Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

TÜVNORD

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades eines „Bachelor of Engineering“
im Studiengang Elektrotechnik

Thema: Netzqualitätsanalyse der
Ströme im Schutzleiter einer Anlage

Eingereicht von: Florian Lange

Matrikelnummer: 20192914

Angefertigt für: TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG

Ausgabetermin: 19.01.2023

Abgabetermin: 30.03.2023

Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Maik Koch

Zweitprüfer: Herr Dipl.-Phys., MBA Julian Gleitsmann

.....
Erstprüfer

.....
Zweitprüfer

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....

Ort, Datum

.....

Florian Lange

Inhaltsverzeichnis

Selbstständigkeitserklärung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einführung	1
1.1 TÜV NORD GROUP	1
1.2 Motivation und Zielstellung	1
2 Grundlagen zu Schutzleiterströmen	3
2.1 Das elektrische Netz	3
2.1.1 Allgemeiner Aufbau	3
2.1.2 Netzformen	3
2.1.3 Unterscheidung von PE- und PEN- Leitern	6
2.2 Schutzmaßnahmen in TN-S-Systemen	6
2.2.1 Schutz gegen elektrischen Schlag	6
2.2.2 Überstrom- und Kurzschlusschutz	8
2.2.3 Schutz gegen thermische Beanspruchung	9
2.3 Schutzleiter	10
2.3.1 Bedeutung und Funktion	10
2.3.2 Bemessung und Prüfung	10
2.4 Wechselrichter	11
2.4.1 Notwendigkeit und Funktion	11
2.4.2 Pulsweitenmodulation	12
2.5 Oberschwingungen	12
2.5.1 Entstehung	12
2.5.2 Auswirkungen und Gefahren	14
2.5.3 Maßnahmen	16
2.6 Elektromagnetische Verträglichkeit	18
2.6.1 Bedeutung	18
2.6.2 Maßnahmen	18
2.7 Ströme im Schutzleiter	18
2.7.1 Ursachen und Zusammensetzung	19
2.7.2 Gefahren und Auswirkungen	20
2.7.3 Gegenmaßnahmen	21
2.7.4 Messmethode	22
3 Messverfahren	25
3.1 Verwendetes Messgerät	25
3.2 Messvorgang	27
3.2.1 Vorbereitung	27
3.2.2 Durchführung einer Messung	29
4 Messung A - Einfamilienhaus	33
4.1 Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration	33
4.2 Messergebnisse und Auswertung	34

5	Messung B - Lüftungsanlage	41
5.1	B1 - Lüftungsanlage Krankenhaus	41
5.1.1	Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration	41
5.1.2	Messergebnisse und Auswertung	41
5.2	B2 - Lüftungsanlage Hotel	46
5.2.1	Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration	46
5.2.2	Messergebnisse und Auswertung	47
5.3	Vergleich und Fazit	50
6	Messung C - Industriebetrieb	51
6.1	C1 - Metallindustrie	51
6.1.1	Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration	51
6.1.2	Messergebnisse und Auswertung	51
6.2	C2 - Backmischungshersteller	56
6.2.1	Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration	56
6.2.2	Messergebnisse und Auswertung	57
6.3	Vergleich und Fazit	61
7	Schlussfolgerung und Ausblick	63
	Literaturverzeichnis	VI
	Abkürzungsverzeichnis	IX
	Abbildungsverzeichnis	X
	Tabellenverzeichnis	XI

1 Einführung

1.1 TÜV NORD GROUP

Die TÜV NORD Group ist ein weltweit agierender Konzern, welcher in über 100 Ländern niedergelassen ist. Dabei finden über 14000 Mitarbeiter eine Beschäftigung und es wurde 2021 ein Umsatz von 1,37 Mrd. € generiert [1].

Selbst steht die Group für „Sicherheit, Unabhängigkeit und Qualität“ [2]. Im Leitbild ist die Förderung von Fachkräften fest verankert und ebenso der Austausch von Wissen. Dabei spielt auch zunehmend die Nachhaltigkeit des Unternehmens eine Rolle, um möglichst bald den CO₂ Ausstoß konzernweit auf null zu reduzieren.

Die Bereiche der Tätigkeitsfelder erstrecken sich von unter der Erde, über auf der Erde, bis hin ins Weltall. Dabei sind unter den vier Kernmarken „TÜV NORD“, „DMT“, „ALTER TECHNOLOGY“ und „TÜVIT“ die Geschäftsbereiche Industrie Service, Mobilität, Bildung, Engineering und Rohstoffe, Aerospace und IT aufgeteilt.

Im Zuge dieser Arbeit liegt der Fokus im Geschäftsbereich Industrie Service, welcher sich ebenso nochmals unterteilt [3]. Dabei ist die Gesellschaft „TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG“ mit ihrem Sitz in Hamburg hervorzuheben. Diese bietet unter Anderem die Prüfung von elektrischen Anlagen nach VdS und DGUV V3, aber auch Prüfung nach Baurecht und weiterer Dienstleistungen im Immobiliensektor. Diesem Sektor obliegt auch die Netzqualitätsanalyse mit verschiedensten Kunden, vom Krankenhaus, über Bürogebäude, bis hin zu großen Industriebetrieben.

1.2 Motivation und Zielstellung

Ströme im Schutzleiter und deren Begrenzung sind ein rasant wachsendes Thema. Dabei hat die Induktion durch Oberschwingungen eine starke Bedeutung, aber auch Ableitströme verschiedenster Komponenten im Netz spielen eine Rolle. Hierbei wird die Topologie und die Verwendung spezifischer Geräte und Schutzmaßnahmen nicht außer Acht gelassen.

Treten Ströme im Schutzleiter auf, so können diese die Funktion von Betriebsmitteln negativ beeinflussen [4]. Um einen möglichst ordnungsgemäßen Betrieb der Anlagen und des Netzes zu gewährleisten, sind viele Maßnahmen und Handlungsvorschläge in den Normen niedergeschrieben, welche von verschiedenen Gremien ständig erarbeitet und aktualisiert werden.

Diese Arbeit betrachtet das Stromnetz in Deutschland sowie die dazu gehörenden Ausarbeitungen internationaler oder EU Normen. Die Vielseitigkeit der Netze anderer Länder erfordert eine separate Betrachtung, was in eigenständigen Arbeiten zu klären ist.

Ein wesentlicher Grund für vermehrt auftretende Ströme im Schutzleiter ist die Zunahme elektronischer Geräte, wie zum Beispiel Frequenzumrichter für Motoren, Wechselrichter bei Photovoltaikanlagen, Gleichrichter bei Ladestationen für Elektrofahrzeuge, aber auch jedes Netzteil, vom Handyladegerät, über den TV, bis hin zu Laptops und PCs [5]. Ob und wie weit diese Betriebsmittel das Netz im Hinblick auf den Schutzleiter und dessen durch ihn fließenden Ströme beeinflussen, soll im Zuge dieser Arbeit untersucht werden.

2 Grundlagen zu Schutzleiterströmen

2.1 Das elektrische Netz

2.1.1 Allgemeiner Aufbau

An das elektrische Netz werden große Anforderungen gestellt. Es muss zuverlässig, sicher und möglichst überall verfügbar sein [6]. Im europäischen Raum wird dies durch den Verbund „entso-e“ gewährleistet.

Mitglieder dieses Netzwerkes sind die jeweiligen Übertragungsnetzbetreiber (TSO) der Länder [7]. In Deutschland sind dies „50 Hertz Transmission GmbH“, „Amprion GmbH“, „TenneT TSO GmbH“ und „Transnet BW GmbH“ [6].

Die TSOs sind Betreiber von Großkraftwerken, welche andere Energieformen in elektrische Energie umwandeln, um die Leistung dann dem Netz zur Verfügung zu stellen. Dabei wird auf der Übertragungsebene eine Spannung von 380 kV genutzt. Im weiteren Verlauf wird die Spannung auf 110 kV heruntertransformiert, um es der nächst kleineren Ebene, dem Verteilnetz zur Verfügung zu stellen. Nach einer weiteren Heruntertransformierung der Spannung auf 10 oder 20 kV gelangt die elektrische Energie auf die kleinste Ebene des öffentlichen Netzes, zu den Ortsnetztransformatoren, welche für eine Spannung von Leiter gegen Erde von 230 V und Leiter gegen Leiter von 400 V sorgen [8].

2.1.2 Netzformen

Buchstabe		Bedeutung
erster Buchstabe (Beziehung der Erde zur Stromquelle)	T	direkte Verbindung eines Punktes zur Erde (starre Verbindung)
	I	alle aktiven Teile von Erde getrennt oder ein Punkt über eine hohe Impedanz mit Erde verbunden
zweiter Buchstabe (Beziehung der Körper zur Erde)	T	direkte elektrische Verbindung der Körper zur Erde
	N	direkte elektrische Verbindung der Körper zum geerdeten Punkt des Stromversorgungssystems
weiterer Buchstabe (falls vorhanden)	S	Schutzfunktion ist vom Neutralleiter oder dem geerdeten Außenleiter getrennt
	C	Neutralleiter- und Schutzfunktion sind in einem Leiter kombiniert

Tabelle 2.1: Kennbuchstaben der Netzformen [9]

In der Ebene der Niederspannung können verschiedene Netzformen betrachtet werden. Diese unterscheiden sich aufgrund ihrer Art und Weise, wie Quelle und Verbraucher mit der Erde verbunden sind [9].

Eine Bezeichnung der verschiedenen Netzformen erfolgt über zwei Kennbuchstaben. Es wird zwischen TN-, TT- und IT-Netzen unterschieden, dabei ist im TN-Netz noch ein weiterer Buchstabe vorhanden, der Auskunft darüber gibt, ob der Schutz- und Neutralleiter getrennt oder gemeinsam in einem Leiter integriert sind.

Eine von mehreren zu findenden Netzformen im öffentlichen Niederspannungsnetz ist TN-C. Dabei verfügt diese einen gemeinsamen Schutz- und Neutralleiter (PEN). Dieser ist nach Einführung in das Gebäude aufzutrennen und somit in die Netzform TN-C-S zu überführen. Diese Anforderung gilt für Anlagen mit direktem Anschluss an das Niederspannungsnetz [11].

Die Abbildung 2.1 zeigt das Beispiel des öffentlichen Netzes dieser Netzform in aktueller Ausführung. Dabei stellt die Stromquelle einen Ortsnetztransformator dar. Über das Verteilnetz in der Niederspannungsebene des örtlichen Energieversorgers erfolgt der Anschluss der Kunden über den Hausanschlusskasten. Ist der Verbraucher direkt über einen Transformator an das Mittelspannungsnetz angeschlossen, so erfolgt die Verteilung auf der Mittelspannungsebene. Die Energieverteilung bis zum Betriebsmittel findet nach dem Speisepunkt in der Niederspannungsebene fünfadrig statt, da hier die Aufspaltung des PEN vorgenommen wird. Hierbei wird auch eine örtliche Erdung realisiert.

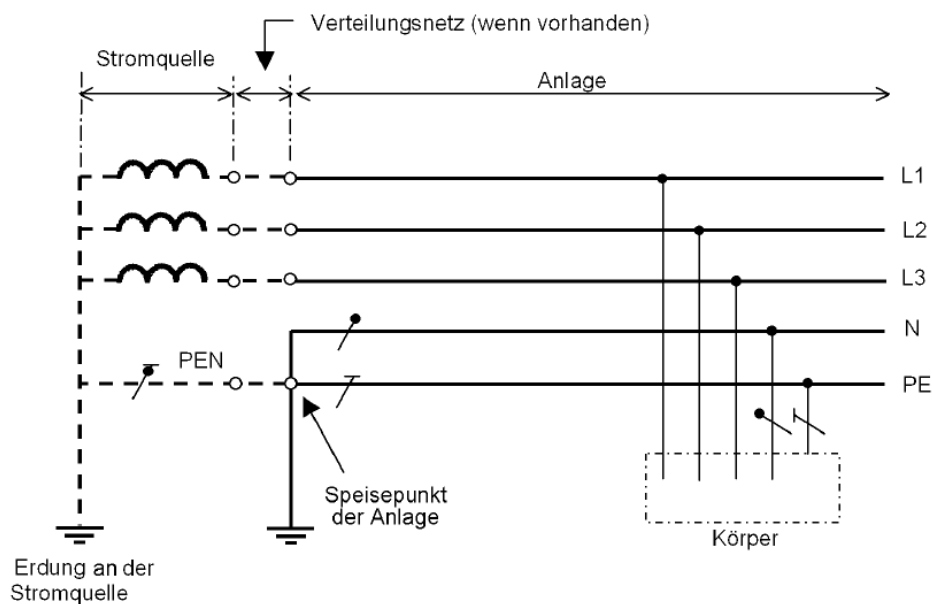


Abbildung 2.1: Darstellung eines TN-C-S-Netzes [10]

Unter Zuhilfenahme der Tabelle 2.1 lässt sich daraus ableiten, dass die Quelle eine starre und direkte Erdverbindung aufweist. Der zweite Buchstabe steht dafür, dass die Körper eine elektrische Verbindung zum geerdeten Punkt des Stromversorgungssystems aufweisen. Der dritte Buchstabe, das C, beschreibt somit den PEN-Leiter. Durch die Verwendung des vierten Buchstaben lässt sich erkennen, dass ein gemeinsamer Schutz- und Neutralleiter am Übergabepunkt zur Kundenanlage, oftmals der Hausanschlusskasten, aufgetrennt wird. Im weiteren Verlauf wird der Schutz-, als auch der Neutralleiter getrennt voneinander geführt und darf nicht wieder zusammengeführt werden [9].

Ein TT-System (Abbildung 2.2) ist dadurch erkennbar, dass die Schutzerdung am Ort der Anlage erfolgt und keine elektrisch leitende Verbindung zur Erdung der Stromquelle vorhanden ist. Die Erdung der Körper dieser Anlage erfolgt somit einzig über den Anlagenerder. Dabei schließt sich die Fehlerschleife über das Erdreich vom Erder der Anlage zum Erder der Stromquelle [10].

Die Besonderheit des IT-Systems (Abbildung 2.3) ist die fehlende Erdung an der Stromquelle. Eine hohe Impedanz zur Erdung wäre möglich, ist aber in Deutschland nur für Mess- und Prüfzwecke vorgesehen. Die Erdung der Körper einer Anlage erfolgt direkt am Betriebsmittel, in Gruppen oder einzeln. Der Vorteil ist die erhöhte Ausfallsicherheit bei einpoligen Fehlern, weshalb diese Netzform oft in Krankenhäusern eingesetzt wird. Dies erfordert jedoch erweiterte Schutztechnik, wie eine Isolationsüberwachung und die Differenzstrommessung [10].

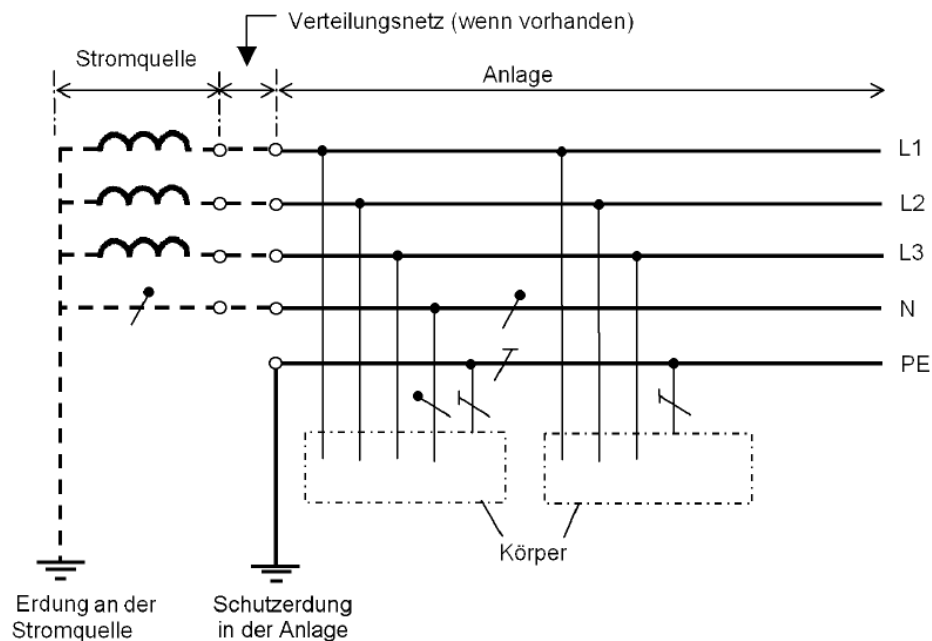


Abbildung 2.2: Darstellung eines TT-Netzes [10]

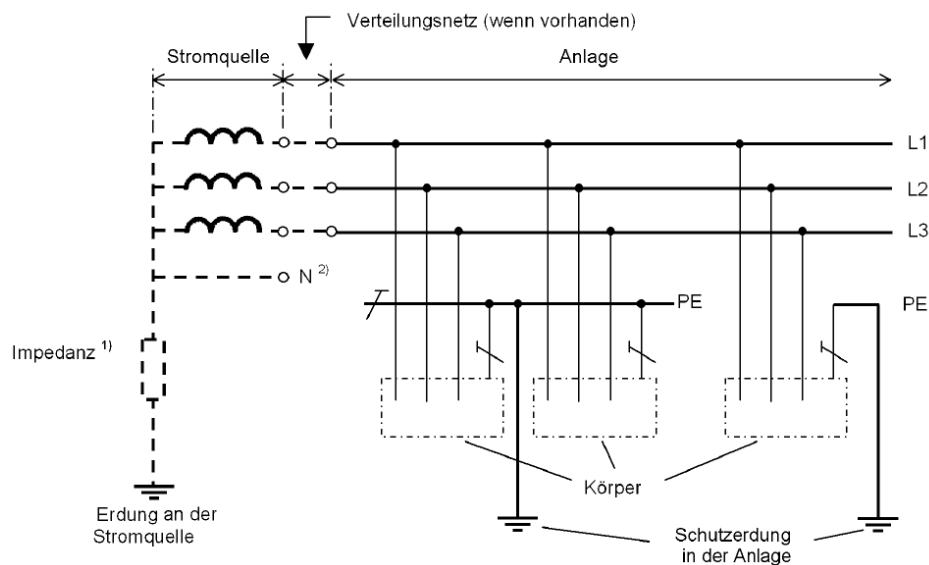


Abbildung 2.3: Darstellung eines IT-Netzes [10]

2.1.3 Unterscheidung von PE- und PEN- Leitern

Die grundlegende Unterscheidung des PE- und PEN- Leiters liegt in deren Funktion. Dabei steht PE für den Schutzleiter, welcher ein „Leiter zum Zweck der Sicherheit, zum Beispiel zum Schutz gegen den elektrischen Schlag“ ist. Dabei wird dieser in Anlagen auch als Schutzerdungsleiter betrachtet [12, S. 34]. Die Schutzerdung ist eine weitere Maßnahme, welche zur elektrischen Sicherheit beiträgt [12, S. 30]

Im Gegensatz dazu erfüllt der PEN-Leiter zwei Funktionen, dieser ist ein „Leiter, der zugleich die Funktionen eines Schutzerdungsleiters und eines Neutralleiters erfüllt“ [12, S. 35].

Ein Neutralleiter ist als Leiter definiert, welcher „mit dem Neutralpunkt elektrisch verbunden und in der Lage ist, zur Verteilung elektrischer Energie beizutragen“ [12, S. 39]. Als Neutralpunkt wird der Sternpunkt der Stromquelle bezeichnet. Zum besseren Verständnis kann der Neutralleiter in einphasigen, sowie unsymmetrischen dreiphasigen Netzen als Rückleiter angesehen werden.

Zur Unterscheidung beider Leiter in einer Anlage sieht die Norm eine farbliche Kennzeichnung vor. Der Schutzleiter ist auf seiner gesamten Länge grün-gelb und diese Farbkombination darf anderweitig nicht verwendet werden. Der PEN-Leiter ist, wenn mittels Aderisolierung umhüllt, auf der gesamten Länge grün-gelb zu kennzeichnen und mittels blauen Markern an den Enden hervorzuheben [13, S. 12].

2.2 Schutzmaßnahmen in TN-S-Systemen

2.2.1 Schutz gegen elektrischen Schlag

Der sichere Betrieb einer elektrischen Anlage bedeutet, dass Mensch und Tier davor geschützt werden müssen, in Kontakt mit spannungsführenden Teilen zu geraten. Um dies zu gewährleisten, finden verschiedene Schutzmaßnahmen Anwendung, zum einen der Basisschutz, ein Fehlerschutz und gegebenenfalls auch ein Zusatzschutz [14].

Unter dem Basisschutz versteht man die Isolierung aktiver Teile unter normalen Betriebsbedingungen, also ein Berührungsschutz der spannungsführenden Teile, wie Leitungen. Dabei sieht die Norm vor, dass diese Isolierung „nur durch Zerstörung entfernt werden kann“ [14, S. 30]. Ist eine direkte Isolierung nicht gegeben, zum Beispiel bei Stromschielen in der Niederspannungshauptverteilung (NSHV), so sind diese durch Abdeckungen oder Umhüllungen berührungssicher zu montieren. In nur durch elektrotechnisch geschultem Personal betretbaren Räumlichkeiten besteht auch die Möglichkeit den Basisschutz durch das Anbringen von Hindernissen oder Anordnung außerhalb des Handbereiches zu gewährleisten [14, S. 31].

Eine weitere Instanz stellt der Fehlerschutz dar, welcher durch den Schutz durch automatische Abschaltung umgesetzt wird. Dabei ist durch eine Schutzvorrichtung mindestens der spannungsführende Außenleiter zu trennen, der dies in geforderter Abschaltzeit realisieren kann [14, S. 14]. Dabei können Leitungsschutzschalter oder Schmelzsicherungen zum Einsatz kommen.

Die folgende Tabelle zeigt die Abschaltzeiten des Fehlerschutzes im TN-Netz bei Wechselspannung, dabei beziehen sich diese Zahlen auf Endstromkreise mit Steckdosen bis 63 A und bei fest angeschlossenen Geräten bis 32 A Nennstrom.

Nennwechselspannung in V Außenleiter gegen Erde	Zeit in s
50 - 120	0,8
120 - 230	0,4
230 - 400	0,2
> 400	0,1

Tabelle 2.2: Maximale Abschaltzeiten im TN-Netz bei Wechselspannung [14]

Es bestehen auch noch weitere Möglichkeiten, den Basisschutz und den Fehlerschutz zu realisieren. Hierzu können die Schutzmaßnahme doppelte oder verstärkte Isolierung oder auch die Schutztrennung mittels Trenntransformator genutzt werden. Ganz wichtig bei diesen Maßnahmen ist zu beachten, dass diese nur in Stromkreisen ohne Erdkontakt, also ohne Schutzerdungsleiter, angewendet werden dürfen. Des Weiteren ist es möglich, einen Schutz durch Kleinspannung zu realisieren [14].

Wird ein so genannter Fehlerstromschutzschalter (RCD) verwendet, handelt es sich in diesem Fall um einen zusätzlichen Schutz. Die Norm sieht dabei den Einsatz bei Wechselstrom in allen Steckdosenendstromkreisen bis einschließlich 32 A vor, bei fest angeschlossenen ortsveränderlichen Betriebsmitteln mit Wechselstromanschluss im Außenbereich bis einschließlich 32 A und in Wohnungen in Wechselendstromkreisen mit Lampen. Dabei darf der maximale Bemessungsdifferenzstrom von 30 mA nicht überschritten werden [14, S. 16].

Der maximale Differenzstrom bei dem Schutz gegen elektrischen Schlag ist auf die Physiologie des Menschen zurückzuführen. Folgendes Diagramm verdeutlicht die Gefahren, die in Abhängigkeit von Strom und Zeit entstehen.

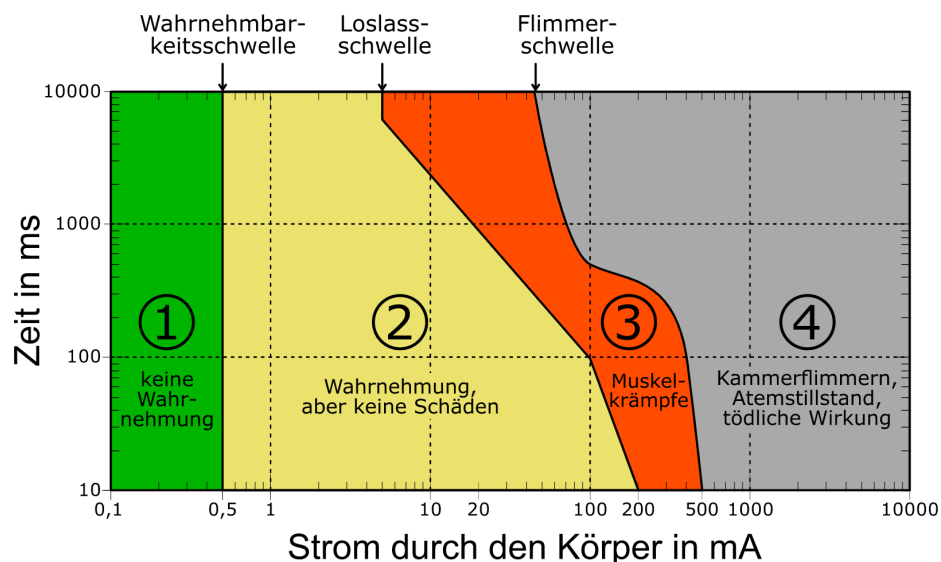


Abbildung 2.4: Gefahr Wechselstrom in Abhängigkeit von Strom und Zeit [15]

Im ersten Bereich bis etwa 0,5 mA findet keine Wahrnehmung statt. Keine Schäden, aber eine Wahrnehmung ist im zweiten Bereich zu erwarten, wobei bereits ab 5 mA

bei wenigen Sekunden Einwirkzeit Muskelkrämpfe entstehen können, die den dritten Bereich darstellen. Der vierte und letzte Bereich offenbart eine tödliche Wirkung des elektrischen Stromes auf den Menschen, die bei zunehmender Einwirkzeit einen immer kleiner werdenden Strom benötigt. Dabei dient das Diagramm nur als Richtwert, da auch die Physiologie eines jeden Menschen unterschiedlich ist, was zu einer Verschiebung der einzelnen Bereiche führen kann [15].

Im Bereich von 30 mA zeigt sich, dass unter Einhaltung der geforderten Abschaltzeiten keine Schäden am menschlichen Körper zu erwarten sind, was den Bemessungsdifferenzstrom, aber auch die geforderten Abschaltzeiten begründet.

Zu beachten ist, der RCD besitzt nicht die Fähigkeit einen Differenzstrom zu begrenzen. Seine Aufgabe ist es, eine Abschaltung der Außenleiter und des Neutralleiters im fehlerhaften Stromkreis vorzunehmen. Normativ sind dabei, wie in Tabelle 2.2 abzulesen, Abschaltzeiten von bis zu 400 ms erlaubt. Die Produktnorm eines RCDs (beispielhaft am Typ A mit einem Bemessungsdifferenzstrom von 30 mA) sieht hingegen Abschaltzeiten in Abhängigkeit des vorhandenen Fehlerstromes vor. Bei einem einfachen Fehlerstrom sind 300 ms gefordert, bei doppeltem Fehlerstrom 150 ms und darüber hinaus nur noch 40 ms [16]. Somit sorgt der RCD für noch geringere Abschaltzeiten, was die Gefahr für Verletzungen weiter verringert.

Der Schutzleiter wird hierbei weder überwacht, noch abgeschaltet. Die Durchgängigkeit spiegelt die Grundlage der automatischen Abschaltung wider.

2.2.2 Überstrom- und Kurzschlusschutz

Um eine elektrische Anlage vor Schäden zu bewahren, ist es notwendig, die aktiven Leiter im Falle einer Überlast zu schützen [17]. Für diesen Zweck sind Betriebsmittel vorzusehen, welche eine automatische Abschaltung vornehmen, sodass Leitungen und Klemmstellen, aber auch die Umgebung, keinen Schaden durch thermische oder mechanische Auswirkungen davontragen. Kurzschlüsse stellen sehr große Überströme dar.

Die Norm sieht grundlegend den Schutz aller aktiven Leiter vor. Dabei ist zu beachten, dass nur betroffene Stromkreise in die Abschaltung mit einbezogen sein sollten. Der Neutralleiter zählt als aktiver Leiter, da aber anzunehmen ist, dass dieser nicht die Werte der Außenleiter überschreitet, ist hierbei keine weitere Einrichtung zur automatischen Abschaltung vorzusehen. Im Falle einer planerischen Belastung durch Oberschwingungen gelten jedoch weitere Vorkehrungen, welche im Abschnitt 2.5 näher behandelt werden [17]. Eine Überwachung des Schutzleiters findet nicht statt.

Der Überstromschutz, also der Schutz bei Überlast, ist an zwei Bedingungen gekoppelt [19].

Zum Einen die Nennstromregel:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (2.1)$$

Und zum Anderen die Auslöseregel:

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \quad (2.2)$$

I_B	...	Betriebsstrom in A
I_n	...	Nennstrom in A
I_Z	...	zulässige Strombelastbarkeit in A
I_2	...	Auslösestrom in A

Aus beiden Regeln geht hervor, dass die Anlage den vorgesehenen Mindestbetriebsstrom standhalten muss. Dieser sollte im Vorfeld berechnet, beziehungsweise bestimmt werden, woraufhin die Mindestbelastung vorgesehen werden kann. Die zulässige Strombelastbarkeit geht aus den verwendeten Betriebsmitteln hervor, insbesondere Leitungen weisen in Abhängigkeit ihres Querschnittes entsprechende Grenzen auf. Somit sollte der zulässige Strom größer als der eigentlich vorgesehene Betriebsstrom gewählt werden. Die Auswahl der Schutzeinrichtungen erfolgt daraufhin bezogen auf den zu erwartenden Betriebsstrom, sodass im Normalbetrieb keine ungewollten Abschaltungen geschehen. Die Schutzeinrichtung ist so zu wählen, dass der Strom nicht größer als 145 % der zulässigen Strombelastbarkeit der verwendeten Betriebsmittel wird. Sind kurzzeitig erhöhte Anlaufströme, wie bei Elektromotoren, zu erwarten, ist eine geeignete Schutzeinrichtung zu wählen, dass dies nicht zur Abschaltung führt. Es ist weiterhin zu beachten, dass bei Auswahl der Betriebsmittel der zu erwartende Betriebsstrom unter dem Nennstrom der Betriebsmittel liegt [19].

Aus der Norm DIN VDE 0298-4:2013-06, aber auch Tabellenbüchern der Elektrotechnik, sowie Tabellen der Hersteller, lassen sich die maximal zulässigen Betriebsströme von Leitungen entnehmen, sowie Umrechnungsfaktoren, welche bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen die maximale Belastung positiv oder negativ verändern können. Einflussfaktoren stellen unter anderen die Umgebungstemperatur, die Anzahl der Leitungen und der darin befindlichen belasteten Adern dar. Aber auch die Verlegeart ist von Relevanz. Dabei spielt es eine Rolle, ob die Leitung unterputz, in Rohr, in wärmegeprägten Wänden oder auf einer Kabeltrasse verlegt ist [20].

2.2.3 Schutz gegen thermische Beanspruchung

Grundlegend ist festzuhalten, dass „Personen, Nutztiere und Sachen [...] vor Schädigungen oder Verletzungen durch Wärme oder Feuer, die von elektrischen Anlagen verursacht werden oder sich ausbreiten können, zu schützen [...]“ [18, S. 12] sind.

Ursachen für Wärme in elektrischen Anlagen können zum Beispiel Überströme, Isolationsfehler, Blitzeinschläge, ungeeignete Betriebsmittel, aber auch Oberschwingungsströme (Abschnitt 2.5) sein. Es ist darauf zu achten, dass die Bestandteile der elektrischen Anlage keine zu hohen Oberflächentemperaturen erreichen. Ist dies der Fall, so ist bei der Montage dafür zu sorgen, dass die entstehende Wärme abgeleitet werden kann und benachbarte Werkstoffe keinen Schaden nehmen [18].

Eine besondere Gefahr geht auch von Störlichtbögen aus, welche durch beschädigte Isolierung, gebrochene Leiter oder Kontaktstellen mit erhöhtem Übergangswiderstand entstehen können. Dabei können widerstandsfähige Materialien dort verbaut werden, wo ein Risiko für Lichtbögen zu erwarten ist oder es findet ein AFDD Verwendung. Umgangssprachlich als „Brandschutzschalter“ bekannt, hat dieser die Aufgabe einen Stromanstieg im Außenleiter zu detektieren. Somit soll in kurzer Zeit der Stromfluss unterbrochen werden und damit der Störlichtbogen gelöscht werden. Gerade solche Fehler in Reihe zum Verbraucher können eine Überstromschutzeinrichtung nicht zum Auslösen bringen [18].

2.3 Schutzleiter

2.3.1 Bedeutung und Funktion

Der Schutzleiter ist ein sehr wichtiger Bestandteil der elektrischen Installation einer Anlage. Seine Aufgabe ist es, im Fehlerfall einen Fehlerstrom abzuführen und damit eine schnelle Abschaltung der Schutzeinrichtungen zu bewirken [19, S. 228].

Hintergrund ist die Schutzmaßnahme „Schutz durch Abschaltung“, welche den Schutzleiter nötig werden lässt. So ist unter Verwendung des zusätzlichen Schutzes RCD ein Fehlerstrom zu detektieren, welcher gegen Erdpotential abfließen kann. Zum Beispiel im Fehlerfall ist es so möglich, ein unter Spannung stehendes metallisches Gehäuse freizuschalten. Ziel ist es, Berührungsströme zu vermeiden, um Lebewesen bei Berührung des fehlerhaften Betriebsmittels zu schützen [21].

Neben der Verwendung zum Schutz gegen elektrischen Schlag, kann der Schutzleiter auch die Aufgaben des Schutzpotentialausgleiches erfüllen [12]. Dies bedeutet, dass unterschiedliche leitfähige Bauteile, welche eine Potentialdifferenz aufweisen können, im Schutzpotential einzubinden sind, um zu verhindern, dass Ausgleichströme bei Berührung der Betriebsmittel über Lebewesen fließen [14]. In einem Gebäude ist eine Haupterdungsschiene zu finden, auf der die Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter angeklemmt sind. Dabei ist diese ein Teil der Erdungsanlage, um auch die Schutzerdung zu gewährleisten [12].

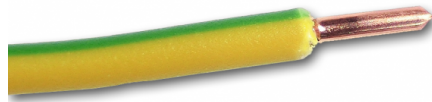


Abbildung 2.5: Beispiel eines Schutzleiters [22]

Die Besonderheiten des Schutzleiters und der Erdung im Bezug auf die drei Netzformen sind in Kapitel 2.1.2 erklärt und entsprechend in den Abbildungen dargestellt.

2.3.2 Bemessung und Prüfung

Um eine ordnungsgemäße Funktion des Schutzleiters zu gewährleisten, ist dessen Bemessung sehr von Bedeutung. Das heißt in diesem Fall, dass die Schutzleiter gewisse Mindestquerschnitte aufweisen müssen, um ihre Anforderungen ordnungsgemäß erfüllen zu können. Dabei ist die Erfüllung der automatischen Abschaltung, aber auch die Haltbarkeit bei mechanischen und thermischen Belastungen, ein wichtiges Kriterium. Maßgebend ist hierbei die Zeit, bis die entsprechende Schutzeinrichtung die Außenleiter abschaltet [23].

Um den Mindestquerschnitt zu bestimmen, sieht die Norm zwei Möglichkeiten vor, zum Einen gibt eine Tabelle darüber Auskunft, zum Anderen lässt sich der Querschnitt aber auch rechnerisch bestimmen. Folgende Tabelle zeigt, was unter Verwendung von Kupfer

als Leitermaterial für Außen- und Schutzleiter für eine Dimensionierung des Schutzleiters vorgesehen werden muss, in Abhängigkeit des Querschnittes des Außenleiters.

Querschnitt des Außenleiters q in mm^2	Querschnitt des Schutzleiters in mm^2
bis 16	q
16 - 35	16
ab 35	$\frac{q}{2}$

Tabelle 2.3: Mindestquerschnitt Schutzleiter aus Kupfer [23]

Ist ein genauere Wert gewünscht, ist der Mindestquerschnitt S des Schutzleiters über folgende Gleichung zu ermitteln, wobei zu beachten ist, dass diese nur bis Abschaltzeiten von 5 s anzuwenden ist [23].

$$S = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{k} \quad (2.3)$$

Der Wert $I^2 \cdot t$ steht hierbei für die Energie, welche laut Hersteller zum Auslösen der Schutzeinrichtung umgesetzt werden muss. Der Faktor k setzt sich hierbei aus den Werkstoffeigenschaften des Schutzleiters selbst, der Isolierung, aber auch der zu erwartenden Temperatur zusammen [23].

2.4 Wechselrichter

2.4.1 Notwendigkeit und Funktion

Die moderne Energiegewinnung verfolgt das Ziel, regenerativ gewandelt zu werden. Ein Standbein um elektrische Energie zu erhalten, ist die Wandlung der Strahlungsenergie von der Sonne zu elektrischer Energie. Für diesen Fall wird Photovoltaik eingesetzt, dessen Ausgangskennwerte Gleichspannung und Gleichstrom darstellen. Da die elektrischen Netze auf Wechselgrößen basieren, ist eine Wechselrichtung notwendig.

Diese Geräte sind leistungselektronische Betriebsmittel, welche dafür sorgen, dass die durch Photovoltaikanlagen bereitgestellte elektrische Energie in das elektrische Netz eingespeist und genutzt werden kann. Dabei beruht die Wandlung der Gleichstromgrößen in Wechselstromgrößen auf Pulsweitenmodulation [24].

Um die nachhaltige Energiegewinnung zu optimieren, sind Speichermedien für die elektrische Energie notwendig, als Beispiel genannt seien hier Batterien auf Basis von Lithium. In ihnen liegt die elektrische Energie ebenso in Gleichgrößen vor. Eine Nutzung erfordert eine Wandlung von Wechselgrößen in Gleichgrößen zum Laden und Gleichgrößen in Wechselgrößen zum entladen, also Einspeisen der Energie ins elektrische Netz [25].

2.4.2 Pulsweitenmodulation

Durch sehr hohe Schaltfrequenzen von mehreren 10 kHz wird durch Leistungstransistoren dafür gesorgt, dass unterschiedlich lange Spannungsimpulse entstehen. Im Ergebnis erhält man einen Effektivwert in der gewünschten Sinusform [24].

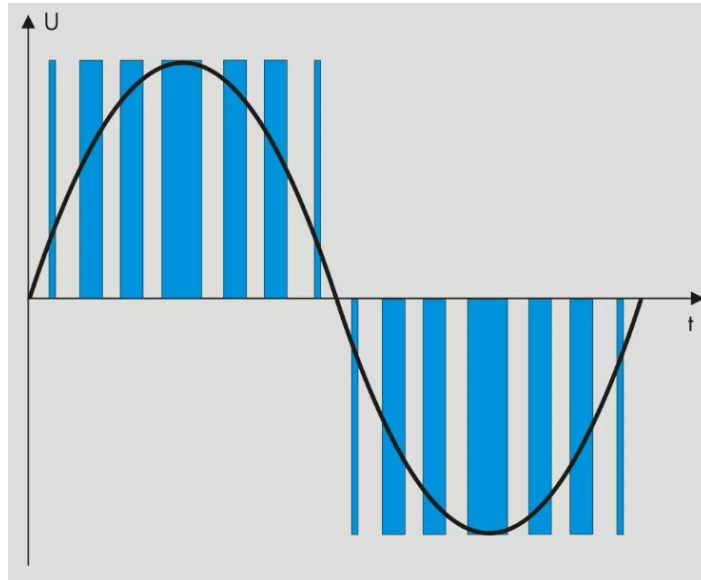


Abbildung 2.6: Darstellung der Pulsweitenmodulation [24]

In der Abbildung 2.6 sind in blau die Spannungsimpulse dargestellt, je breiter, desto länger ist dieser Impuls. Als Ergebnis des Effektivwertes dieser Impulse erhält man die schwarze Linie, die Sinusschwingung.

2.5 Oberschwingungen

Unter Oberschwingungen, auch unter Harmonischen bekannt, was aber in der Begrifflichkeit zu unterscheiden gilt, versteht man solche Frequenzen, welche ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz darstellen. Das bedeutet konkret, dass die erste Harmonische somit die Grundfrequenz von 50 Hz widerspiegelt, die zweite Harmonische für $f = 100 \text{ Hz}$ steht, was wiederum die erste Oberschwingung ist [26].

2.5.1 Entstehung

Grundlegend sind Oberschwingungen auf nichtlineare Bauteile und Lasten zurückzuführen, allen voran sei die Diode genannt. Dabei ist deren Impedanz als nicht konstant anzusehen, welche sich entsprechend der Frequenz des Wechsel- oder Gleichstromes ändert. Der Betrieb der entsprechenden Lasten führt zu Verzerrungen der Eingangsströme, welche zu Rückwirkungen auf das elektrische Netz führen, woran sie angeschlossen sind und sich dadurch entsprechend verteilen können [26].

Verzerrungen der Sinusschwingung, welche im Netz unerwünscht sind, führen zu Veränderungen des reinen Sinus. Diese Änderungen bedeuten, dass die saubere Sinuskurve, also

die Grundschiwingung (siehe Abbildung 2.7), abgeflacht wird. Eine solche Veränderung lässt sich mathematisch erläutern, denn nach Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768 - 1830) sind diese Abweichungen der Sinuskurve eine Zusammensetzung vieler Sinusschwingungen unterschiedlichster Frequenzen. Diese Analyse nennt sich Fourier-Analyse. Dabei lässt sich die Schwingung in besagte einzelne Sinusschwingungen jeweiliger Frequenzen zerlegen [26]. Folgende Abbildung verdeutlicht dies.

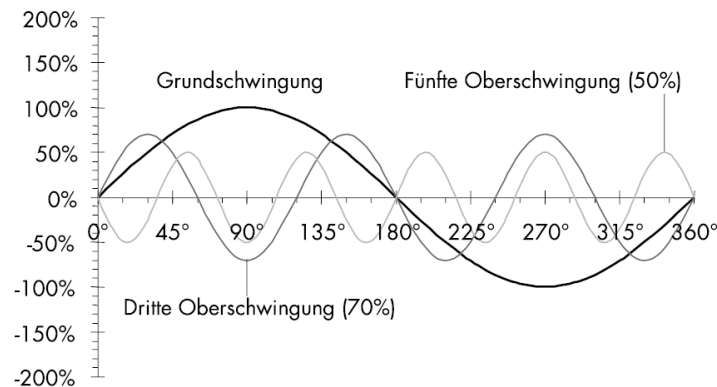


Abbildung 2.7: Diagramm Grundschiwingung und Oberschiwingung [29]

Die Fast Fourier Transformation (FFT) ist ein mathematisches Werkzeug, um mit geringen Rechenaufwand eine solche Spektralzerlegung eines gemessenen Signals durchzuführen. Das Signal kann sowohl Strom als auch Spannung sein [27].

Aber nicht nur Dioden allein sorgen für entsprechende Rückwirkungen auf das Netz. Einphasige Lasten wie Schaltnetzteile von Computern, Vorschaltgeräte von Leuchtstofflampen und kleine USV-Anlagen, dreiphasige Lasten wie drehzahlverstellbare Motoren und große USV-Anlagen können das Netz im Hinblick auf Oberschwingungen beeinflussen. Dabei handelt es sich um Schaltungen von Dioden, Kondensatoren, Spulen, sowie Transistoren. Eine durch diese Schaltungen bewirkte Wechsel- oder Gleichrichtung des Stromes verstärkt dieses Phänomen [29].

Ein Blick sollte auch auf LED Lampen gerichtet werden, welche immer mehr Einzug halten. Dabei stellen auch diese Lampen eine Quelle für Oberschwingungen dar, die sich aufgrund der Menge durchaus summieren können. Dabei greifen gerade in den kleinen Leistungsklassen unter 25 W keine Normen, was den Herstellern Freiheiten bietet, mit möglichst günstigsten Mitteln LED-Lampen zu bauen, was zur höheren Verunreinigung des Netzes führt. Neben kapazitiver Blindleistung befinden sich auch sehr hochfrequente Stromanteile im Eingangsstrom, was wiederum eine Vielzahl Harmonischer hervorruft. Im folgenden Bild lässt sich dies anhand einer LED-Straßenlaterne sehr gut im Stromverlauf erkennen, auf dem eine Periode des Momentanstromes i und der Momentanspannung u dargestellt ist [30].

Die Spannung ist gegenüber dem Strom verschoben. Im Fall der Straßenbeleuchtung ist der Strom gegenüber der Spannung nacheilend, was für eine kapazitive Belastung spricht und somit die kapazitive Blindleistung verdeutlicht.

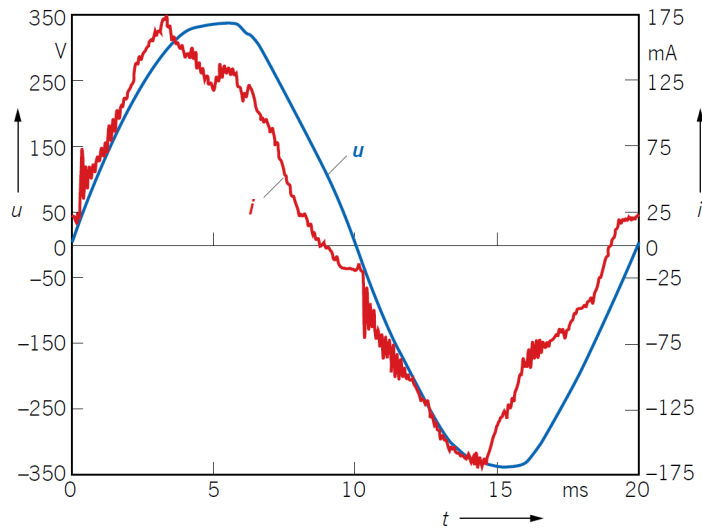


Abbildung 2.8: Strom- und Spannungsperiode LED-Straßenbeleuchtung [30]

2.5.2 Auswirkungen und Gefahren

Ob und wie sich Oberschwingungen auswirken, ist von Fall zu Fall unterschiedlich und hängt von einer Summe an Einflüssen ab. Größter Einflusssträger stellt das elektrische Netz dar, wie es am und um den Betriebsort der Anlage und Betriebsmittel geschaffen ist, welche dazu neigen Oberschwingungsströme in das Netz abzugeben. Für die Stabilität des Netzes spielen die großen Synchrongeneratoren in Kraftwerken eine entscheidende Rolle. Durch ihre konstante Drehzahl, ihrer trägen Masse und der synchronen Winkel der Magnetfelddrehzahl zwischen Hauptwicklung und Erregerwicklung ist dabei sehr komfortabel die Netzfrequenz von $f = 50 \text{ Hz}$ zu halten. Grenzwerte aus einschlägigen Normen bilden, sofern überhaupt benannt, nur Richtwerte ab, die keine Garantien für einen störungsfreien Betrieb liefern [26].

Ein sich durch Oberschwingungen herausbildendes Problem ist die zusätzlich durch diese verursachte Blindleistung. Sind Strom und Spannung nicht proportional zueinander, also gibt es dort eine Verschiebung, so entsteht Blindleistung, welche die Leitungen und das Netz belasten. Dies hat zur Folge, dass sich dadurch auch eine erhöhte thermische Belastung einstellen kann. Ein weiteres Problem stellen die Unsymmetrien in den Außenleitern dar, wodurch sich die Ströme nicht mehr ausgleichen können, was zu einer Be- und eventuellen Überlastung des Neutralleiters führen kann. Die Belastung des Neutralleiters im Dreiphasensystem lässt sich geometrisch begründen [26].

$$\sin\alpha + \sin(\alpha + 120^\circ) + \sin(\alpha - 120^\circ) = 0 \quad (2.4)$$

Symmetrische Belastungen der Außenleiter im Bezug auf die Grundschwingung sorgen dafür, dass kein Strom über den Neutralleiter fließt. Hingegen zeigt die Formel auf, dass Unsymmetrien bei der Grundschwingung von 50 Hz eine bis zu $\sqrt{3}$ -fache Strombelastung des Neutralleiters herbeiführen können. Oberschwingungen begünstigen eine Neutralleiterbelastung. Eine Besonderheit der dritten Harmonischen, also 150 Hz, ist es, dass sich diese Ströme arithmetisch addieren, was somit eine bis zu dreifache

Belastung des Neutralleiters bewirken kann. Da diese Oberschwingung auch besonders in Schaltnetzteilen gehäuft vorkommt, geht hierbei auch eine der größten Gefährdungen hervor [28].

Aber nicht nur das Netz, beziehungsweise die Leitungsanlage selbst kann negativ beeinflusst werden, ebenso weitere Betriebsmittel, wie Motoren oder Transformatoren können aufgrund der zusätzlichen Belastung ungewöhnlich warm werden.

Des Weiteren ist anzumerken, dass die Impedanz des Netzes niedrig und konstant im erwartungsgemäßen Zustand ist, damit die Kurzschlussleistung im gesamten Netz hoch und stabil bleibt. Wird eine Anlage aber über einen Notstrom-Diesel eingespeist, zum Beispiel im Falle eines Versorgungsausfalles im öffentlichen Netz, kann sich dies nachteilig auf den Betrieb der Anlage auswirken. Aktuell nicht beachtenswerte Oberschwingungen können plötzlich einen störungsfreien Betrieb gefährden. Hintergrund ist, im Vergleich zum öffentlichen Netz, die hohe innere Impedanz des Notstrom-Generators, was größere Verzerrungen hervorrufen kann [26].

Betrachtet man die Auswirkungen von Oberschwingungen in einem größeren Rahmen, können diese auch Folgen auf Mittelspannungsebene zeigen. Grundsätzlich dämpft ein Transformator Oberschwingungen, sodass sich diese darüber hinaus nicht weiter ausbreiten. Um auch bei einpoligen Fehlern gegen Erde einen ausfallfreien Betrieb des Mittelspannungsnetzes zu ermöglichen, wird bei der Sternpunktterdung am Transformator die so genannte Resonanzsternpunktterdung (RESPE) eingesetzt. Das heißt im technischen Sinne, dass eine Peterson-Spule in Reihe auf der Erdverbindung montiert ist, um im Fehlerfall die kapazitiven Erdfehlerströme durch ihre Induktivität zu kompensieren. Dabei ist zu bemerken, dass Spulen frequenzabhängige Bauteile sind, dass heißt, die Induktivität ist von der Frequenz des Netzes beeinflusst [26].

$$L = \frac{\underline{Z}}{j \cdot 2\pi f} \quad (2.5)$$

L	...	Induktivität
$\underline{Z}$	...	komplexe Impedanz
j	...	Operator komplexe Rechnung
f	...	Frequenz

Aus Formel 2.5 geht hervor, dass die Frequenz beeinflussend wirkt. Die Induktivität der Spule bleibt zwar nahezu unverändert, jedoch steigt die Reaktanz. Der Resonanzpunkt wird nicht erreicht, womöglich kann das Löschen eines Lichtbogens bei Erdschluss nicht stattfinden. Die Folgen daraus können Spannungsausfall, aber auch Brände sein, da der Fehler so schnell nicht bemerkt werden könnte. Ein Lichtbogen führt nur einen geringen kapazitiven Strom über die Erdkapazitäten. Die Löschung erfolgt dadurch, dass ein induktiver Strom über der Peterson-Spule kompensierend wirkt [26].

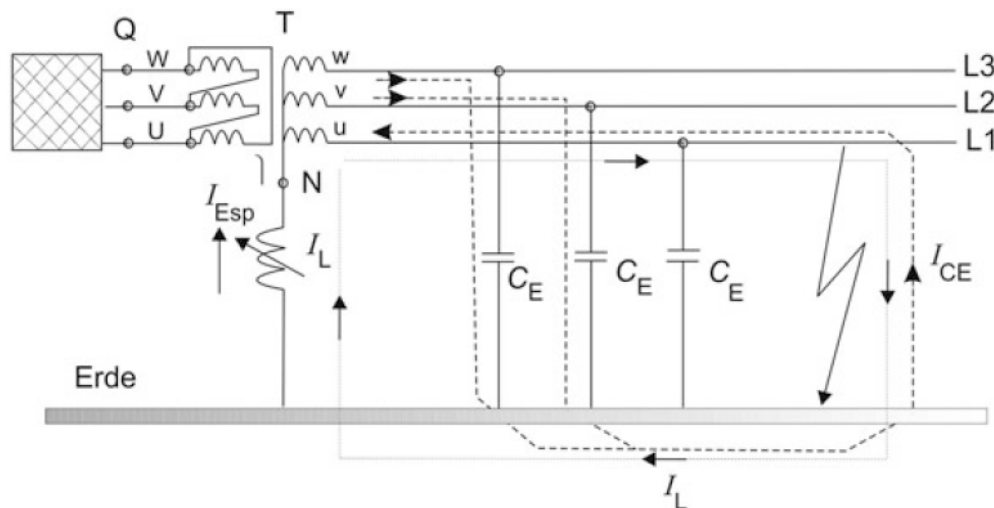


Abbildung 2.9: Darstellung kompensierte Sternpunktterdung [19]

Q	...	Netzanschluss Hochspannungsseite
T	...	Transformator
I_L	...	induktiver Strom
I_{CE}	...	kapazitiver Strom
N	...	Anschluss Erdung
C_E	...	Erdkapazitäten

Neben der RESPE sind noch drei weitere Sternpunktterdungen möglich. Da ist zum einen die isolierte Sternpunktterdung (ISPE), bei welcher der Sternpunkt keine leitende Verbindung zum Erdpotential aufweist. Diese findet in kleinen Mittelspannungsnetzen Anwendung, wie zum Beispiel Industriebetriebe. Die Erdschlussströme verlöschen von selbst, aber hohe transiente Spannungen sind möglich.

Als dritte Möglichkeit der Sternpunktterdung kann eine niederohmige Erdung (NOSPE) gewählt werden. Hierbei ist der Sternpunkt über eine direkte leitende Verbindung mit dem Erdpotential verbunden. Dabei führt ein Erdschluss unmittelbar zur selbstständigen Abschaltung.

Eine Mischung aus RESPE und NOSPE stellt die kurzzeitig niederohmige Sternpunktterdung (KNOSPE) dar. Hierbei ist die verwendete Induktivität kurzschließbar, sollte eine Erdschlusslöschung nicht möglich sein. Das Kurzschließen der Spule führt zur niederohmigen Erdung und damit zur sofortigen Abschaltung im anhaltenden Fehlerfall [19].

2.5.3 Maßnahmen

Um Oberschwingungen entgegenzuwirken oder wenn sie nicht zu verhindern sind, den Einfluss zu reduzieren, sind verschiedene Maßnahmen möglich, welche sich ergreifen lassen. Dabei ist es nicht immer die wirtschaftlichste Herangehensweise, jedes einzelne Gerät so zu konstruieren, dass es keine Oberschwingungen erzeugt. Es können auch Maßnahmen in der gesamten Anlage für Abhilfe sorgen. Die Beseitigung der Belastungen kann somit vielfältig geschehen, auf der Netzseite, als auch auf der Geräteseite. Es gibt keine allgemeine Lösung, diese ist grundsätzlich vor Ort zu erarbeiten.

Wird zunächst eine netzseitige Betrachtung durchgeführt, so lässt sich zum einen das

elektrische Netz so optimieren, dass Verzerrungen nicht mehr störend sind. Durch größere Querschnitte oder parallele Leitungen lässt sich der Wirkwiderstand reduzieren. Dabei gilt aber der Kurzschlussstrom zu beachten, da dieser hierbei stark ansteigt [26]. Beim Thema Netzausbau gehen die Netzbetreiber vom so genannten NOVA-Prinzip aus. Diese Abkürzung bedeutet Netz-Optimierung vor Verstärkung vor Ausbau. Es wird erst versucht zu optimieren, bevor neue Leitungen zur Verstärkung verlegt oder gar neue Stromtrassen vorgesehen werden [31].

Aber nicht nur der Wirkwiderstand ist möglichst gering im Netz zu halten, ebenso die Reaktanzen, also jener Widerstand, welcher bei Wechselstrom in induktiven und kapazitiven Bauelementen auftritt. Insbesondere die Reaktanz der Transformatoren spielt hierbei eine Rolle, leichtes Überdimensionieren hilft auch hier, die Gefahr der Überhitzung und des Ausfalls zu reduzieren. Dadurch entstehen höhere Investitionskosten, aber da ein Transformator bei halber Nennlast seinen wirtschaftlichsten Betriebspunkt aufweist, kann sich dies im Hinblick auf Betriebsverluste wieder amortisieren. Des Weiteren lassen sich Blindstromkompensationsanlagen verdrosseln, also durch die Reihenschaltung einer Drosselspule am Kondensator. Ebenso sollte darauf geachtet werden, die Peterson-Spule bei der RESPE entsprechend auch für höhere Frequenzen auszulegen, damit auch weiterhin die Fehlerlichtbögen zuverlässig erlöschen können [26].

Es lassen sich aber auch selbst an der Quelle der Oberschwingungen, am Betriebsmittel, Maßnahmen durchführen, die zur Verhinderung beitragen, dass die Oberschwingungen ins Netz gelangen. In der Praxis ist aktuell als aktive Methode die elektronische Leistungsfaktor-Korrektur (PFC) im Einsatz. Hierbei wird versucht, durch eine Ein- und Ausschaltreihenfolge, einer Pulsweitenmodulation, die Stromkurve wieder einem sauberen Sinus anzupassen, um die Rückwirkung aufs elektrische Netz so gering wie möglich zu halten. Die Glättung erfolgt dadurch, dass die PWM-Spannung auf eine Hochfrequenzspule geschaltet wird. Ist die Spannung null, fließt der Strom über eine Freilaufdiode weiter. Eine entsprechend bemessene Hochfrequenzkapazität glättet das Ausgangssignal so, dass die 50 Hz Schwingungen ungehindert passieren können. Der Prozess findet im nicht hörbaren Bereich zwischen 20 und 60 kHz statt. Dabei können sich diese Geräte durch ihre Elektronik dennoch gegenseitig stören, was einen reibungs-freien Betrieb gefährdet. Deshalb wird ein passiver Netzfilter in Form einer Drossel zusätzlich vorgesehen. Eine Drosselspule lässt sich als passive Methode auch alleinig einsetzen [26].

Um gänzlich allen Schwingungen und einhergehenden Störungen aus dem Weg zu gehen, werden bereits sogar Überlegungen geführt, die ein Gleichstromnetz in Betracht ziehen. Dies bringt Vorteile mit sich, welche mit der Zunahme der Elektronik zusammenhängen. Einen großen Anteil an Oberschwingungen hat seinen Ursprung in der Vielzahl kleiner Gleichrichter in elektronischen Betriebsmitteln, vom Haushalt bis zur Industrie. Wird Gleichstrom eingespeist entfallen diese „Störquellen“ [30]. Nicht zuletzt werden die Vorteile des Gleichstromes bei den Hochvoltgleichstromübertragungen in Zukunft zu Nutze gemacht, da es hierbei zu keiner Blindleistung und damit einhergehenden Verlusten und zusätzlichen Belastungen kommen kann [32].

Ein Gleichstromnetz wird dennoch auch von Nachteilen begleitet. So bleibt für die einzelnen Betriebsgeräte eine Vielzahl von verschiedenen Spannungsniveaus herzustellen. Eine Abweichung führt zu Störungen. Ebenso wären andere Schalt- und Schutzvorrichtungen vorzusehen, da der Strom nicht wie im Wechselspannungsnetz einen periodischen Nulldurchgang aufweist. Dadurch lassen sich Lichtbögen nicht selbstständig löschen. So ist neben den anfangs hohen Investitionskosten für eine Umstellung die Komplexibilität dieses Systems nicht außer Acht zu lassen [33].

2.6 Elektromagnetische Verträglichkeit

2.6.1 Bedeutung

Unter elektromagnetischer Verträglichkeit versteht man die Verhinderung der gegenseitigen Beeinflussung von Betriebsmitteln in ihrem Umfeld [34].

Hierbei sind besonders die von den Betriebsmitteln ausgehenden Frequenzen von Bedeutung. Sowohl leitungsgebundene, wie Oberschwingungen, welche in diesem Fall die größte Betrachtung finden, aber auch feldgebundene Störungen, können stattfinden. Sorgt nun ein Gerät am Eingangsstrom für Oberschwingungen, so können die enthaltenen Frequenzen, die durchaus bis in den dreistelligen Kilohertz-Bereich entstehen, Geräte in ihrer Umgebung stören und zu Fehlfunktionen führen (reversible Störungen), diese aber auch beschädigen (irreversible Störungen). Es können auch störende Nebeneffekte erzeugt werden, wie das Brummen einer modernen LED Lampe [34].

Die Normen sind versucht durch Setzen von Grenzwerten die Hersteller in die Pflicht zu nehmen, ihre Produkte elektromagnetisch verträglich zu produzieren. Aufgrund der möglichst großen Kosteneinsparung seitens der Hersteller kann dies zu Problemen führen. Anhand der derzeitigen Entwicklung ist eine weitere Zunahme an Oberschwingungsquellen zu erwarten, aber dämpfende Elemente, ohmsche Lasten, wie zum Beispiel elektrische Heizungen, nehmen ab. Aufgrund dieser Tatsachen wird das elektrische Netz und Anlagen zunehmend belastet [35].

Gesetzlich hat die Bundesnetzagentur das Recht, den Nachweis der Verträglichkeit einer ortsfesten Anlage vom Betreiber anzufordern. Diese Anlage darf keine schädlichen Einflüsse verursachen, so werden die Grenzwerte der Normen entsprechend gesetzlich eingebunden [13].

2.6.2 Maßnahmen

Um dafür zu sorgen, dass keine Störaussendung stattfindet, ein Schutz gegen Störungen vorhanden ist und die Umgebung, sowie das Netz nicht unzulässig belastet wird, sind verschiedene Maßnahmen möglich. So ist es am Gerät selbst umsetzbar, durch die konstruktive Beschaffenheit oder dem Schaltungslayout, die Emission der Störungen möglichst gering zu halten. Um dann von den doch entstehenden Störungen die Ausbreitung zu verhindern, sei es eine leitungsgebundene, aber auch feldgebundene Ausbreitung, ist die Zuhilfenahme von Filtern, Schirmen oder Abdichtungen möglich. Ebenso sind auch ESD-Maßnahmen vorzusehen. Auf der anderen Seite sollten Geräte entsprechend konstruiert werden, dass sie eine gewisse Störfestigkeit vorweisen, also gegenüber elektromagnetischen Einflüssen geschützt sind. In einigen Fällen ist auch eine Überwachung und Wartung der Schutzmaßnahmen als sinnvoll zu erachten [36].

2.7 Ströme im Schutzleiter

Allgemein betrachtet sind Schutzleiterströme jene Ströme, die in Summe unter normalen Betriebsbedingungen und im Fehlerfall über den Schutzleiter fließen [12].

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wurde, sollte der Schutzleiterstrom möglichst klein gehalten werden, um einen ordnungsgemäßen Betrieb zu gewährleisten und auch un-

gewolltes Auslösen von Schutzeinrichtungen, insbesondere des RCDs, zu verhindern [13]. Es ist ebenso sehr wichtig, den Schutzleiter selbst nicht als leitfähigen Pfad für Betriebsströme zu verwenden. So sollte zum Beispiel für EMV-Filter ein extra Ableiter vorgesehen werden, um den Schutzleiter nicht extra zu belasten, damit das Schutzziel nicht gefährdet wird [23].

2.7.1 Ursachen und Zusammensetzung

Treten Ströme im Schutzleiter auf, so können diese verschiedenste Ursprünge aufweisen. Diese werden dadurch negativ begünstigt, da oftmals keine stricte Trennung zwischen Schutzleiter und Potenzialausgleich besteht. Teilweise werden diese in einem Leiter bewusst kombiniert. Zum einen durch kapazitive Einprägungen, hervorgerufen von leistungselektronischen Verbrauchern, aber auch Kapazitäten gegen Erde durch die verwendeten Leitungen [37].

Ein Beispiel, welches in der Praxis oft anzutreffen ist, sind frequenzgeregelter Antriebe, welche mittels Frequenzumrichter angesteuert werden. Hervorzuheben sind in dieser Betrachtung die Kondensatoren, welche zur Filterung, zum Beispiel Oberschwingungen, eingesetzt werden. Diese benötigen Erdpotenzial, welche im Schutzerdungsleiter vorhanden sein sollte, wodurch die kapazitiven Ströme eingepreßt werden.

In der folgenden Abbildung sind zum einen die physisch vorhandenen Entstörkondensatoren in blau dargestellt. In rot sind die durch die Beschaffenheit von Leitungen und Gerät herausgebildeten parasitären, also ungewollte Kapazitäten, zu erkennen. Hervorgerufen werden sie durch die Frequenz des Stromes. Diese prägen ebenso gegenüber dem Schutzleiter einen Strom ein.

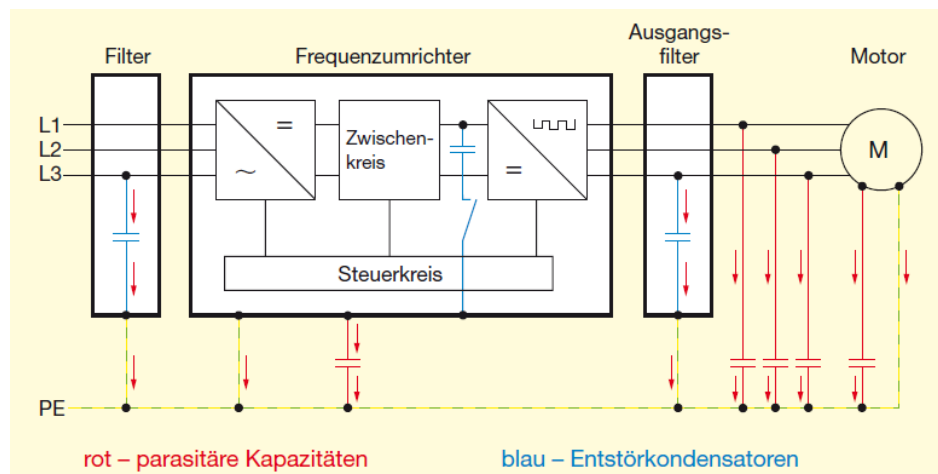


Abbildung 2.10: Kapazitive Ströme am Frequenzumrichter [41]

Ebenso induktive Einkopplung ist möglich, unter anderem durch überschwingungsbefahtene Ströme, was besonders bei mittleren und großen Leistungen in Verbindung mit Frequenzumrichtern auftritt. Wird die Motordrehzahl mit Hilfe eines Frequenzumrichters gesteuert und die Motorleitung ist falsch ausgelegt, zu lang oder unsymmetrisch verlaufender Schutzleiter, so heben sich die induzierten Ströme nicht gegenseitig auf und fließen durch den Schutzleiter. Aufgrund der von Oberschwingungen vorbelasteten Netze wird durch EMV-Filter mitgefiltert, was zur weiteren kapazitiven Schutzleiterbelastung führt. Die Installation kann selbst auch dafür sorgen, dass ungünstige Ausbreitungspfade

entstehen. Durch schlechte oder falsche EMV-Filterung in Antriebssystemen ist auch mit Kreisströmen zu rechnen, wenn Schutzleiter und Potentialausgleich vermascht sind, was folgendes Bild verdeutlicht. Dabei stellt I_{ind} den induzierten Strom dar [37].

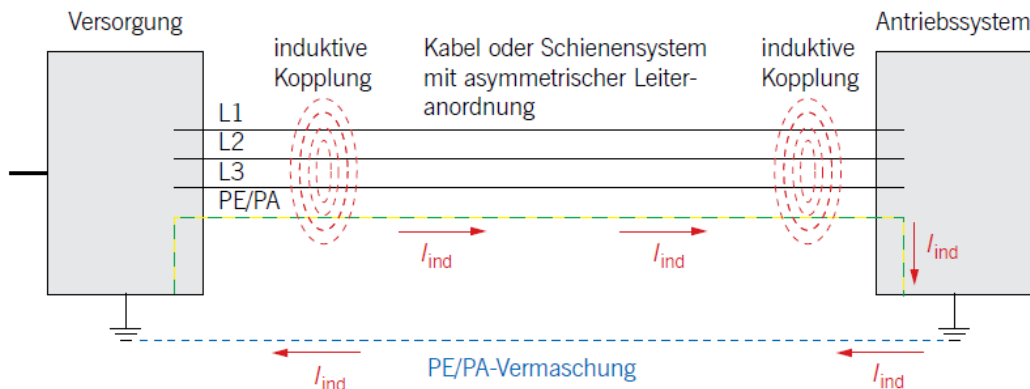


Abbildung 2.11: Induktiv gekoppelte Kreisströme im Antriebssystem [37]

Des Weiteren sorgen Ableitströme (Strom in einem unerwünschten Strompfad unter üblichen Betriebsbedingungen [12]), kapazitiven Ursprungs, von elektronischen Geräten, unter anderem durch Filter (welche irritativ in der Literatur auch als Leckströme zu finden sind) und Isolationsfehler für Ströme im Schutzleiter. Neben den Isolationsfehlern können auch weitere Fehlerströme über den Schutzleiter fließen, die dann zur Abschaltung führen, wenn die Ursache unter der Schutzmaßnahme „Schutz durch Abschaltung“ Abdeckung findet, was zum Beispiel Körperströme wären. Diese tragen überwiegend zu einem ohmschen Anteil bei, sodass der Gesamtstrom sich komplex zusammensetzt [37].

2.7.2 Gefahren und Auswirkungen

Ausgehend von der Gesamtheit aller möglichen Schutzleiterströme ist auch mit einer Gefährdung auf vielfältige Weise zu rechnen. Abhängig von der Wahl des Querschnittes des Leiters kann dieser je nach Strombelastung überanspruchert werden, was zur Erwärmung führen kann. Aber auch nicht fachgerecht ausgeführte Klemmstellen neigen zur Erhitzung, was nicht zuletzt Brände auslösen kann. An lockeren aber auch losen Kontaktstellen oder Klemmen ist ebenso erhöhte Gefahr von Funkenbildung vorhanden, was Erschrecken, Lichtbögen und daraus resultierende Entzündungen möglich werden lässt. Je nach Frequenz der Ströme besteht die Gefahr, dass sich elektromagnetische Felder ausbilden können, was weitere Störungen oder physiologische Einflüsse hervorrufen kann. Aber auch EDV-Systeme können beeinflusst werden. Verlangsamung der Netzwerkverbindung, Datenverluste, aber auch Erwärmung und Brand im Zuge von Strömen auf der Schirmung der Datenleitung sind eine Gefahr. Hintergrund ist der äquivalent betrachtbare Querschnitt des Schirmgeflechtes, welcher eine geringere Strombelastbarkeit gegenüber der Schutzleiterverkabelung aufweist. Sind dort Beschädigungen oder Brüche im Schirm vorhanden, steigt die Gefährdung.

Ebenso kann ein RCD Fehlauslösungen durchführen, was zu ungewollten Abschaltungen von Anlagenteilen oder der gesamten Anlage führen kann [38].

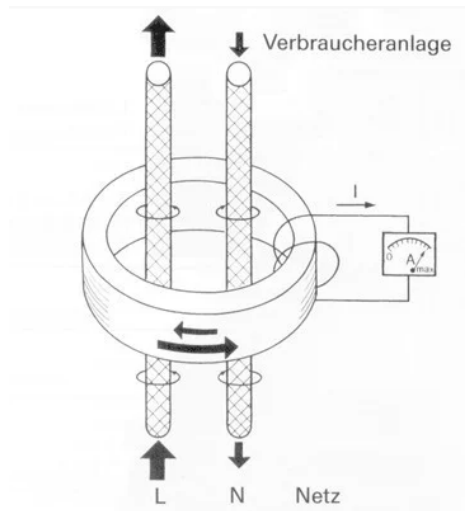


Abbildung 2.12: Funktionsweise RCD einfach [39]

Die Fehlauslösungen des RCDs sind mit seiner Funktionsweise zu begründen, in Abbildung 2.12 im Beispiel eines zweipoligen Schaltgerätes dargestellt. Außenleiter und Neutralleiter sind durch einen Eisenring geführt, die Primärspule. Im fehlerfreien Zustand ergänzen sich die Ströme im Hin- und Rückleiter zu null, somit wird keine Spannung in der Spule induziert. Die Sekundärspule ist um den Eisenkern gewickelt, an dieser befindet sich ein Strommesser. Tritt nun der Fehlerfall ein oder Ableitströme fließen über den Schutzleiter ab, ist der Summenstrom (Differenzstrom) in der Primärspule im Betrag größer null. Ein Magnetfeld wird aufgebaut und in Folge dessen wird über die Primärspule eine Spannung in der Sekundärspule induziert, ein Strom beginnt darin zu fließen. Das an der Sekundärspule angeschlossene Messgerät löst ein Schaltschloss aus, was wiederum die angeschlossenen Leiter am RCD trennt [39].

Der hier beschriebene Fall stellt den RCD Typ A dar. Durch seinen Aufbau ist dieser nur fähig Wechselströme und pulsierende Gleichfehlerströme rund um die Netzfrequenz zu erkennen, da nur durch die periodische Stromänderung die nötige Spannung induziert werden kann. Um glatte Gleichfehlerströme und höhere Frequenzen zu erkennen, ist ein allstromsensitiver RCD des Typ B erforderlich.

Die Schutzeinrichtung des Typ B besitzt einen zweiten Summenstromwandler, woran Elektronik angeschlossen ist, welche unter Zuhilfenahme einer Hilfsspannung die Differenzströme auswertet. Dadurch werden die Gleichfehlerströme zuverlässig erkannt und auch eine Auswertung höherer auftretender Frequenzen ist möglich [40].

2.7.3 Gegenmaßnahmen

Die folgende Betrachtung bezieht sich auf betriebsmäßig vorhandene Ströme im Schutzleiter, für die zu erwartenden Fehlerströme muss der Leiter ohnehin entsprechend ausgelegt werden.

Um möglichst Ströme im Schutzleiter zu verhindern, ist es bereits ab der Planungsphase notwendig diese zu bedenken. Werden in einer Anlage große leistungselektronische Betriebsmittel in Verbindung mit Steuer- und Messeinrichtungen verwendet, so ist es ratsam in diesem Fall für eine Trennung von Schutzleiter und Potentialausgleichsleiter zu sorgen. Antriebe mit Frequenzumrichter sollten so installiert werden, dass die Motorleitung möglichst kurz ausgeführt wird und eine entsprechende Symmetrierung des darin

enthaltenden Schutzleiters vorhanden ist. Ebenso kann ein symmetrischer Aufbau die kapazitive und induktive Einkopplung reduzieren. Bei der Schirmung des Motorkabels ist auch zwingend darauf zu achten, dass sie beidseitig und vollflächig kontaktiert wird. Um auch die unvermeidbaren taktfrequenten Ströme zwischen Motor und Umrichter nicht rückwirken zu lassen, kann ein zusätzlicher separater Potentialausgleich Abhilfe schaffen. Werden die Außenleiter symmetrisiert, ist die negative Belastung ausgehend von Filtern ebenso als geringer zu erwarten. Liegen die Oberschwingungen im Netz oberhalb der Grenzwerte, wird dies begünstigt. Um spätere Optimierungen leichter zu ermöglichen, sollten Errichter und Betreiber unbedingt auf eine vollständige Dokumentation der Schutzleiter und des Potentialausgleiches achten [37].

Um ungewollte Abschaltungen des RCDs zu vermeiden, hilft das Einsetzen eines schlaueren RCDs Typ B. Die Frequenzen der Ströme werden dabei unterschieden und es kann differenziert werden, ob es sich um einen wirklichen Fehlerstrom handelt. Die Auslöseschwelle wird mittels der Frequenz des Stromes bestimmt [41].

Bei erhöhtem Schutzleiterstromaufkommen ist der Schutzleiter zu verstärken, sodass dieser ausreichend stromtragfähig ist und im Fehlerfall funktionstüchtig bleibt. Aufgrund des zunehmenden Ableitstromanteils kann auch eine regelmäßige Messung oder gar eine ständige Überwachung des Schutzleiterstromes ratsam sein [42].

2.7.4 Messmethode

So ist es nun die Aufgabe, die Ströme im Schutzleiter messtechnisch zu bestimmen, dabei ist dies mindestens so vielfältig wie die Ströme im Schutzleiter selbst. Bevor eine Messung durchgeführt wird, sollte zunächst die Struktur der Anlage bekannt sein. Dabei steht der Schutzleiter, sowie der Potentialausgleich im Fokus, aber auch verwendete Betriebsmittel sollten nicht außer Acht gelassen werden. Mit dem Wissen, welche Geräte vorhanden sind, lässt sich entsprechend auf das zu erwartende Frequenzspektrum schließen. Durch die überall zu findende Elektronik ist es ratsam, Messgeräte zu verwenden, die eine Analyse von mindestens 20 kHz ermöglichen, besser mehr, optimal wären 200 kHz. Bei der Auflösung der Messgeräte ist aus kaufmännischer Sicht zu berücksichtigen, dass eine höhere Analysefrequenz auch stark steigende Investitionskosten bedeutet. Es ist eine vorherige Überlegung zu empfehlen, welcher Messbereich als sinnvoll zu erachten ist. Gewöhnliche Strommessgeräte, wie zum Beispiel Zangenamperemeter, sind für die Stromanalyse im Schutzleiter als nicht nutzbar zu betrachten, da der detektierbare Frequenzbereich oftmals viel zu gering ist. Bei einer Analyse ist auch nicht nur die Stromhöhe ausschlaggebend, vielmehr sollte eine Aufzeichnung über einen Intervall stattfinden. Eine Untersuchung des Frequenzspektrums, in Form einer FFT, im Strom hilft, auf die eventuellen Ursachen zu schließen [37].

Wenn die Topologie der elektrischen Anlage und das zu verwendende Messgerät bekannt sind, ist als Nächstes ein geeigneter Messpunkt zu wählen, in Abhängigkeit davon, welche Ströme zunächst für die Messung als relevant betrachtet werden sollen. Es ist deshalb die Überlegung zu treffen, da sich der geometrisch addierte Gesamtstrom nur schwer auf die Quelle beziehen lässt. Um den Ort einzugrenzen, ist die entsprechende Messstelle zu wählen. Interessiert der Gesamtstrom, so bietet sich die Stelle an, an der Schutzleiter und Neutralleiter getrennt werden. Ebenso ist ein Punkt in der Nähe der Haupterdungsschiene als geeignet zu betrachten. Die folgende Abbildung zeigt einen schematischen Überblick möglicher Messstellen.

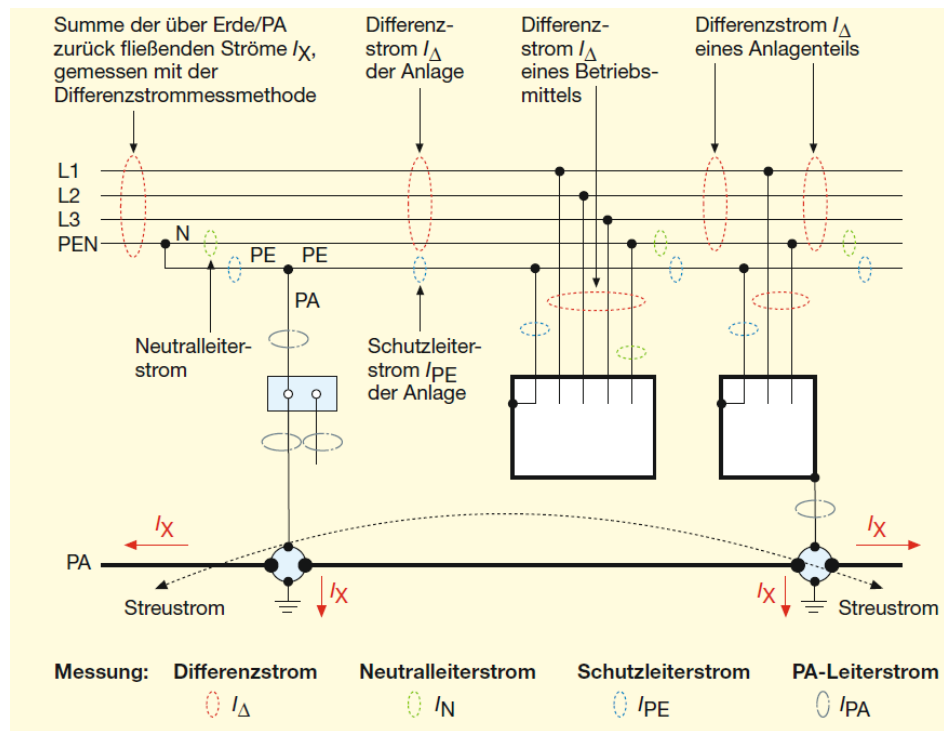


Abbildung 2.13: Messpunkte der Ströme einer Anlage [38]

Die unterschiedlichen Messpunkte führen auch zu unterschiedlichen Strömen. So ist der Schutzleiterstrom, Potentialausgleichsstrom und der Strom, welcher über Erde abfließt zu unterscheiden. Da auch hier eine messtechnische Differenzierung des Ursprungs nur schwer möglich ist, stellt das Frequenzspektrum eine Hilfe dar, aber lässt eine Messung an unterschiedlichen Stellen nicht unerlässlich werden.

Um die Gesamtheit aller Ströme besser beurteilen zu können, ist es zudem anzuraten, neben dem Schutzleiter ebenso die Ströme der Außenleiter und des Neutralleiters mit aufzunehmen. Für eine genauere Analyse kann es empfehlenswert sein, mehrere Messpunkte zu wählen. Mit Hilfe all dieser Informationen aus den Messwerten und deren Auswertung, lässt sich die Netzqualität, aber auch der Zustand der Anlage, bestimmen und analysieren [38].

3 Messverfahren

3.1 Verwendetes Messgerät

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird die PQ-Box 200 von der Firma A. Eberle verwendet. Die Bezeichnung PQ steht dabei für „Power Quality“, übersetzt bedeutet dies Netzqualität.

Bei diesem Messgerät handelt es sich um einen Netzanalysator, welcher zudem eine Leistungsmessung und Transientenaufzeichnung unterstützt. Dabei ist je nach Einstellung eine generelle Aufzeichnung der Messwerte möglich, ebenso ausgelöst durch frei konfigurierbare Triggerschwellen. Dabei steht eine FFT bis zu 20 kHz zur Verfügung, welche die Untersuchung der Oberschwingungen ermöglicht. Eine automatische Normauswertung nach EN50160 und IEC6100 zeigt so mittels Software direkt, in wie weit die Messwerte in den Grenzwerten liegen [43].

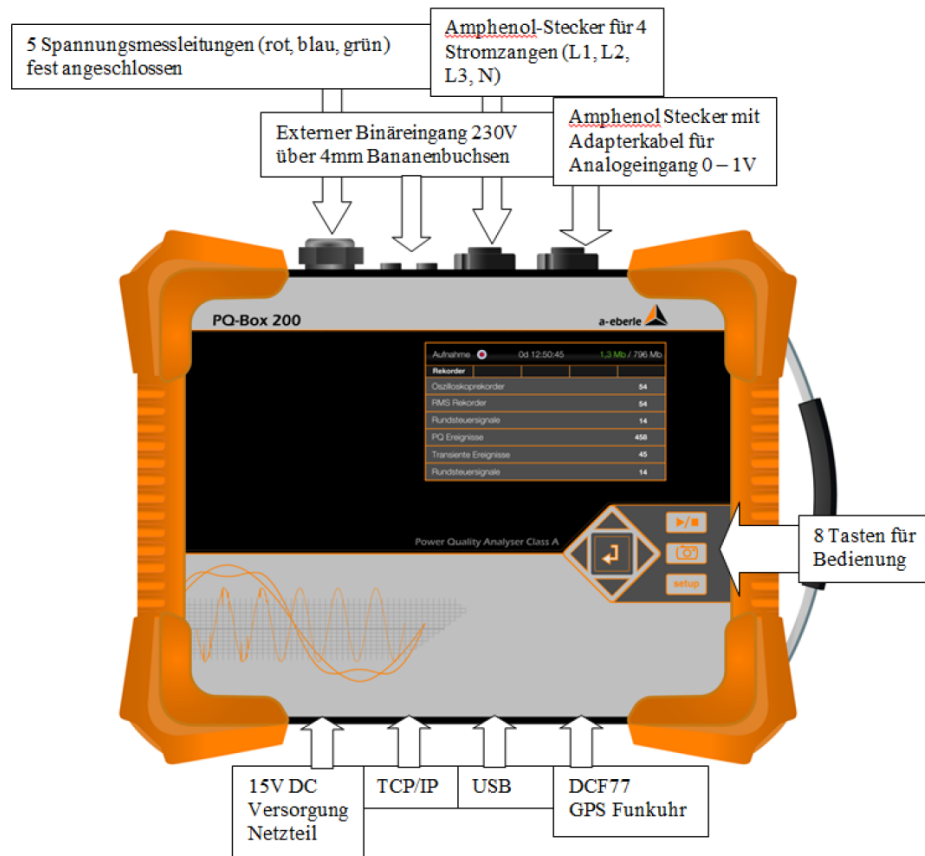


Abbildung 3.1: PQ-Box 200 mit Anschlussbeschriftung [43]

In Abbildung 3.1 ist das Messgerät mit Beschriftung der Anschlüsse dargestellt. Dabei werden an den Anschlüssen oben rechts, die Amphenol-Stecker, jeweils vier Rogowskispulen und am zweiten Anschluss eine weitere Strommesszange montiert.

Die Besonderheit der Rogowskispulen ist, dass sie direkt Ströme bis 3000 A messen können. Dabei kann ihre Verwendung in Niederspannungsanlagen, als auch bei Mittelspannung erfolgen. Jede einzelne Spule ist für je einen Außenleiter und den Neutralleiter gedacht und entsprechend beschriftet. Die Beschriftung dient dazu, Verwechslungen

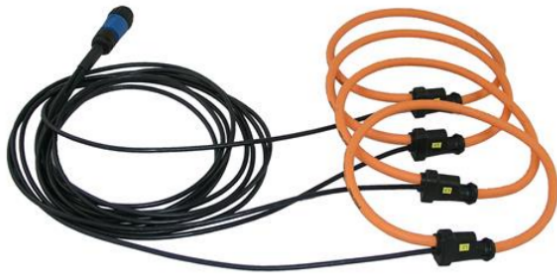


Abbildung 3.2: Rogowskispulen
1-3000 A [43]



Abbildung 3.3: Strommesszange
ab 0,5 mA [43]

der gemessenen Leiter zu vermeiden, um sie bei der Auswertung richtig zuordnen zu können. Aufgrund der flexiblen Ringspule und der einfachen Öffnungsmöglichkeit des Spulenringes, lassen sich die Messspulen leicht um die zu messenden spannungsführenden Leiter installieren, ohne dabei den Anlagenbetrieb zu behindern.

Auch die Strommesszange lässt sich ohne Störung des Anlagenbetriebs anbringen, indem sie einfach um die Leiter gelegt wird, in diesem Fall die Schutzleiter. Hervorzuheben ist hierbei, dass diese Messzange sehr geringes Eigenrauschen aufweist. Laut Hersteller können somit Ströme ab 0,5 mA gemessen werden. Die große Öffnung ermöglicht auch hier flexibles Arbeiten, um gewünschte Messaufgabe möglichst einfach zu erfüllen.



Abbildung 3.4: Mini-Stromzangen



Abbildung 3.5: Spannungsabgriff

Für Messaufgaben in kleineren Anlagen sind die Mini-Stromzangen geeignet. Mit Hilfe von einer Steckverbindung sind die Magnethalter, aber auch Delphinklemmen, an den fest angeschlossen Messleitungen für den Spannungsabgriff anzubringen.

Mittels eines Computerprogrammes lässt sich nicht nur das Messgerät für die geplante Messung konfigurieren, sondern ist es ebenso möglich die Messergebnisse aus dem Speicher des Messgerätes zu laden und diese nach Normvorgaben zu analysieren. Es ist auch ein Live-Oszilloskop integriert, was die aktuellen Daten visualisiert, wenn das Messgerät an einer Anlage montiert wurde, wodurch sich direkt der aktuelle Zustand ermitteln lässt. Das Messgerät selbst bietet auch über den Display die Möglichkeit, einige Werte abzulesen. Das Softwaretool stellt dies entsprechend auf einem Zeitdiagramm dar, was

die Wertung erleichtert.

Das Messgerät verfügt über einen Port für eine Micro SD-Card. Die verwendete SD-Card hat eine Größe von 8 GB. Der Hersteller gibt an, dass eine Kompatibilität bis 32 GB vorhanden ist. Je nach Größe dieser und der Anzahl der zu speichernden Ereignisse, sowie des eingestellten Messintervalls, können die maximalen zu speichernden Aufzeichnungslängen stark variieren.

3.2 Messvorgang

3.2.1 Vorbereitung

Bevor eine Messung durchgeführt werden kann, ist es notwendig sich mit der gegebenen Anlage vertraut zu machen. Dabei sind der Aufbau und die verwendeten Geräte von Bedeutung. Wenn Großverbraucher, Frequenzumrichter oder Wechselrichter vorhanden sind, so ist mit höheren Ableitströmen, beziehungsweise Oberschwingungen zu rechnen. Die Struktur von Schutzleiter, Erdung und Potenzialausgleich beeinflusst ebenfalls die Höhe des zu erwartenden Stromes. Dieses Wissen erleichtert die Entscheidung darüber, sofern alles in Erfahrung gebracht werden kann, an welcher Stelle das Messgerät montiert werden soll, um entsprechend die Messergebnisse der gesamten Anlage oder des gewünschten Anlagenteils zu erhalten. Es ist auch gegebenenfalls mit Testmessungen zu arbeiten, um den am besten geeigneten Messpunkt zu ermitteln.

Ist die Stelle an der gemessen werden soll definiert worden, ist zunächst das Messgerät entsprechend für diese Messung zu konfigurieren. Aufgrund der Vielseitigkeit an Funktionen ist dieser Schritt darüber entscheidend, wie detailliert die Ergebnisse aufgenommen und dargestellt werden.

Beginnend nach Öffnung von WinPQ mobil am Computer sind die Einstellungen für die Messung und das Gerät vorzunehmen. Zunächst öffnet sich die Hauptansicht (Abbildung 3.6).

Über dieses Interface gelangt man zu den benötigten Programmabschnitten. In der Messdatenverwaltung lässt sich auf bereits getätigte und gespeicherte Messungen zugreifen. Die Messgerätekonfiguration ermöglicht die Anpassung der Einstellungen des Messgerätes auf die Messaufgabe, welche als nächstes ausgeführt werden soll. Die Onlinedaten stellen alle Messungen in Echtzeit dar, ähnlich einem Oszilloskop.

In dem Abschnitt für die Übersicht der Messung sind die wichtigsten Informationen dargestellt, die zu einer gespeicherten und geöffneten Messung gehören. Die zuvor in der Konfiguration eingestellten Triggerschwellen führen zu Ereignissen, die sich entsprechend ihrer Kategorie im Abschnitt 5 einsehen und öffnen lassen, um den Kurvenverlauf analysieren zu können. Dieser ist in der freien großen Fläche des Programmfensters nach öffnen ersichtlich. Weiterführend dazu dient der Abschnitt 6, welche im Zeitverlauf der Messung selbst die Punkte farblich hervorhebt, an welchen zuvor konfigurierte Ereignisse eingetreten sind.

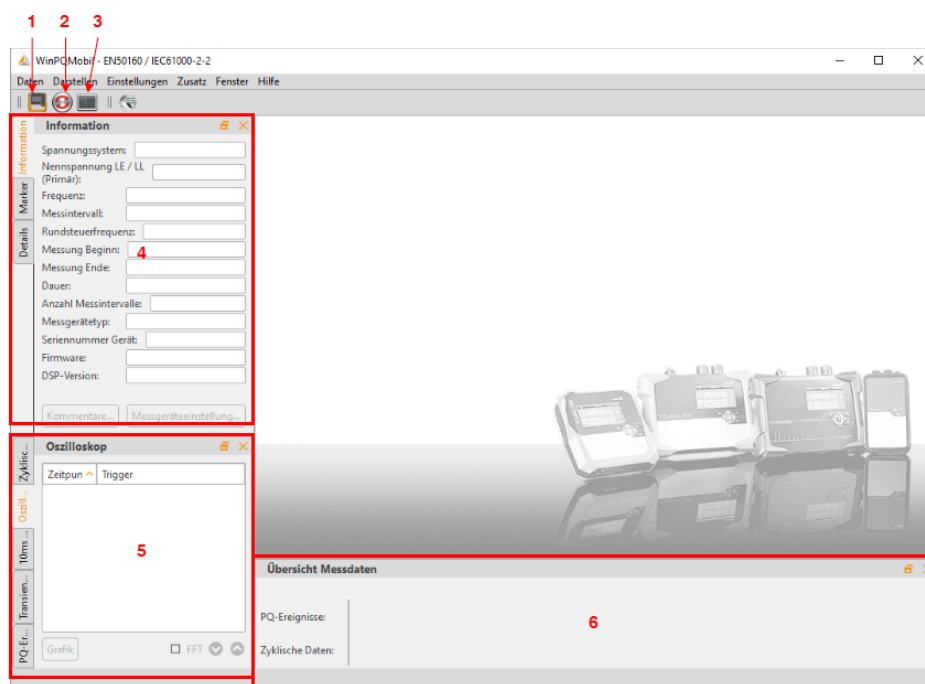


Abbildung 3.6: WinPQ mobil Hauptansicht

- | | | | |
|---|-------------------------|---|---------------------|
| 1 | Messdatenverwaltung | 4 | Übersicht Messung |
| 2 | Messgerätekonfiguration | 5 | Messereignisse |
| 3 | Onlinedaten | 6 | Übersicht Messdaten |

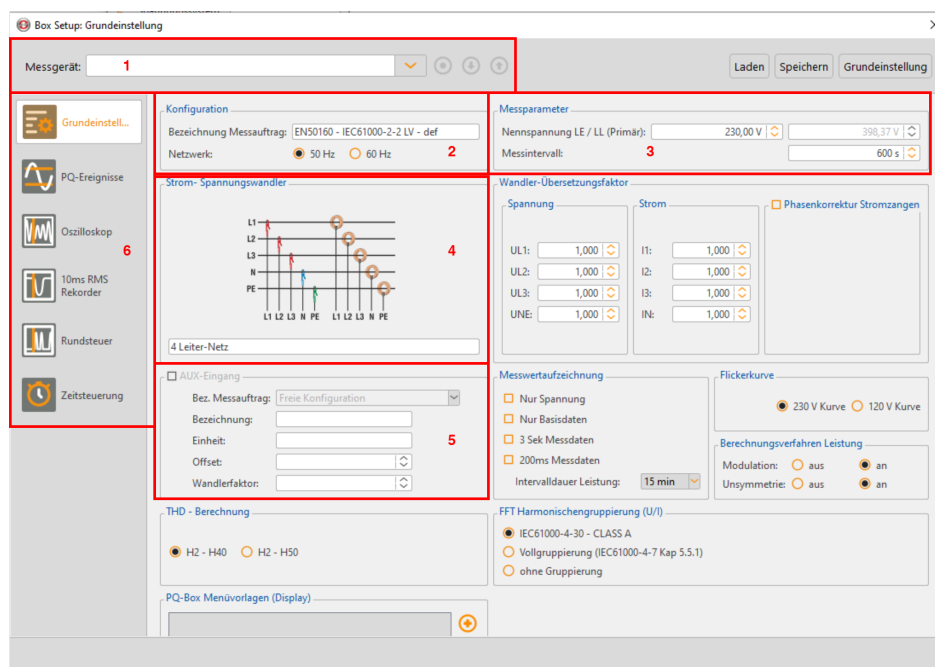


Abbildung 3.7: Grundeinstellung Messung und Messgerät

- | | | | |
|---|---------------|---|--------------------------|
| 1 | Messgerät | 4 | Anschlussform |
| 2 | Konfiguration | 5 | AUX-Eingang |
| 3 | Messparameter | 6 | Kategorien Konfiguration |

Die Abbildung 3.7 zeigt die Konfigurationsoberfläche für die Messung und das Messgerät.

In diesem Fenster lassen sich die Vielzahl an Konfigurationen vornehmen, die das Messgerät anbietet. Unter der Einstellung Messgerät (1) lässt sich das angeschlossene Gerät auswählen, welches dann erscheint, wenn die USB-Verbindung besteht. Ist das Messgerät erfolgreich von der Software erkannt, lässt sich über den Computer auch eine Messung starten, die Einstellungen des Gerätes auslesen oder die neue Konfiguration auf die PQ-Box laden.

Im Feld 2 ist die Bezeichnung des Messauftrages möglich. Dabei kann noch unterschieden werden, ob es sich um ein 50 Hz oder 60 Hz Netz handelt, da das Messgerät auch außerhalb Europas genutzt werden kann. Dem folgt die Parametrierung (3) der zu erwartenden Nennspannung und dem Intervall, in der eine automatische Messung bei Langzeitmessung ausgeführt werden soll, dabei ist als kleinster Wert 1 s möglich.

Um einzustellen, welche Netzform und welche Spannungsabgriffe, sowie Stromwandler verwendet werden, ist im Feld 4 das Netz zu bestimmen. Es lässt sich so zum Beispiel wählen, ob einphasig oder dreiphasig gemessen werden soll, aber auch ob noch andere Wandler am Spannungsabgriff Anwendung finden.

Eine weitere wesentliche Einstellung zur Bestimmung der Ströme im Schutzleiter stellt der AUX-Eingang (5) dar. Auch hier ist eine flexible Anschlussmöglichkeit gegeben, sodass, wenn das Messgerät angeschlossen ist, die Strommesszange (siehe Abbildung 3.3) ausgewählt werden muss. Die unterschiedlichen Konfigurationskategorien (6) ermöglichen eine detaillierte Einstellung, in welchen und zu welchen Grenzwerten (Triggerung) die PQ-Box 200 eine gesonderte Aufzeichnung starten soll. Es kann auch eine Hervorhebung eines bestimmten Messwertes (Ereignisses) stattfinden. Dabei ist unter PQ-Ereignisse die Spannungsschwankung, aber auch Frequenzschwankung zu finden. Im Bereich Oszilloskop lassen sich Triggerschwellen festlegen, welche eine separate, detaillierte Messwertaufzeichnung auslösen. Auslösekriterien können sowohl die Leiter-Erde-, Leiter-Leiter- und Neutralleiter-Erde-Spannungen sein, aber auch die jeweiligen Außenleiterströme, der Neutralleiterstrom, aber auch Kriterien ausgehend vom AUX-Eingang, in diesem Fall der Schutzleiterstrom. Der Effektivwertrekorder (10 ms RMS Rekorder) ist in ähnlicher Weise aufgebaut.

Setzt der Netzbetreiber Rundsteuersignale ab, so ist bei einer Messung die Möglichkeit gegeben, diese aufzuzeichnen. Unter Zeitsteuerung lässt sich abschließend parametrieren, wann eine Langzeitmessung starten und stoppen soll, sodass hierbei kein händisches Eingreifen erforderlich ist.

3.2.2 Durchführung einer Messung

Sind alle Vorbereitungen durchgeführt und das Messgerät anhand der Ansprüche der speziellen Messaufgabe konfiguriert, so ist es nun erforderlich, das Messgerät am Prüfort anzuschließen. Im Regelfall ist dies eine Verteilung oder andere Klemmstelle. Dabei sind nur die nötigen Abdeckungen zu entfernen, um den Spannungsabgriff durch den Magnetabgriff an den Schraubklemmen herzustellen und um die Adern die Strommessspulen zu legen. Ist ein Anschluss über die Magnetklemmen nicht möglich, so lassen sich auch die im Lieferumfang enthaltenden Delphinklemmen an den 4 mm Sicherheitssteckern der Anschlussleitungen nutzen. Dabei ist höchste Vorsicht geboten, keine Verletzungen durch elektrischen Schlag zu erhalten, was eventuell, je nach Anlage, erweiterte Sicherheitsvorkehrungen benötigt. Es ist bei der Wahl des Prüfortes aber

im Vorfeld schon darauf zu achten, dass die Gefahren für den Messenden so gering wie möglich zu halten sind.

Folgende Abbildung zeigt einen beispielhaften Messaufbau an einer Verteilung.



Abbildung 3.8: Beispielhafter Messaufbau

Nach erfolgreicher Montage kann mittels eingebauten Display der Ist-Messwert abgelesen werden.

0d00:00:00 5915MB/7712MB				
	L1	L2	L3	N
U [V]	232.4	231.4	232.3	0.117
I [A]	0.274	0.104	0.479	0.404
AUX [A]	+0.012			Σ
P [W]	+15.96	+8.744	+31.71	+56.41
Phi [°]	-74.54	-64.98	-71.45	
F [Hz]	50.00			

Abbildung 3.9: Display Messgerät

Über einen angeschlossenen Computer erhält man Einblick in die zahlreichen Online-messungen.

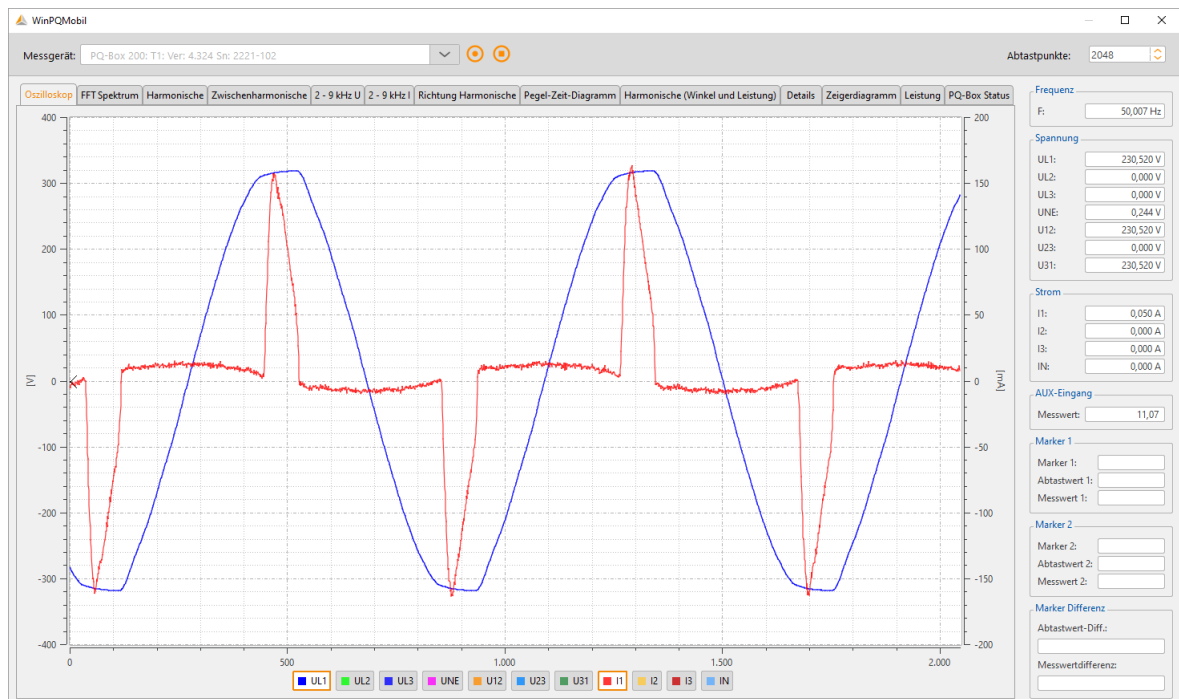


Abbildung 3.10: Darstellung Onlinemessung WinPQ mobil

Dabei lassen sich die einzelnen Kanäle für Spannung und Strom, sowie AUX anwählen, um je nach Wunsch der Betrachtung übersichtlich den jeweiligen Graphen über die Zeit anschauen zu können.

Aber nicht nur die Spannungs-Zeit Kennlinie, beziehungsweise die Strom-Zeit Kennlinie lässt sich darstellen. Möglich ist auch eine Live FFT, um direkt einen Einblick zu erhalten, in wie weit Oberschwingungen zum aktuellen Zeitpunkt in der Anlage vorhanden sind. Über ein Zeigerdiagramm ist der Phasenwinkel einsehbar, aber auch die aktuelle Bezugsleistung kann dargestellt werden.

Wenn alles angeschlossen und eingerichtet sowie den Anforderungen nach konfiguriert ist, kann die Messung und Aufzeichnung gestartet werden. Diese läuft bis sie händisch gestoppt wird oder eine vorher festgelegte Stoppzeit erreicht ist.

4 Messung A - Einfamilienhaus

4.1 Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration

Kleine, aber in einer großen Anzahl vorhandene Anlagen spiegeln Einfamilienhäuser wider. Neben Großverbrauchern, wie Backofen oder Waschmaschine, sind dort eine Vielzahl kleiner elektronischer Verbraucher zu finden. Einphasige Lasten charakterisieren diesen Anlagentyp.

Diese Messung in einem Einfamilienhaus fand an der Hauptverteilung statt, welche die Einzige direkt nach dem Hausanschlusskasten in diesem Objekt ist. Nach dem Zähler folgt die Hauptsicherung, welche zum einzig vorhandenen RCD übergeht, von welchem die einzelnen Stromkreise über Leitungsschutzschalter versorgt werden.

Die Grundlast stellen kleine elektronische Verbraucher, wie ein Internetrouter, Netzwerkschalt, Alarmanlage, Wetterstation, Klingel und Überwachungskameras dar. Gelegentlich schaltet sich der Kühlschrank ein, ebenso die Gasheizungsanlage. Die Beleuchtungsanlage ist modern mit LED Lampen ausgeführt. Ein Backofen mit Herd, ein Kaffeevollautomat und Waschmaschine, sowie Geschirrspüler ergänzen die Betriebsmittel im Haushalt. Unterhaltungselektronik wie Fernseher und Computer werden ebenso betrieben, dazu werden in unregelmäßigen Abständen Smartphones oder Tablets geladen.

Bei der Netzform handelt es sich um ein TN-C-S Netz, bereits im Hausanschlusskasten wird der PEN in Schutzleiter und Neutralleiter aufgetrennt, sodass in der Verteilung ausschließlich TN-S vorherrscht.

Das Messgerät wurde direkt nach dem Zähler angeschlossen, somit sind Eingangsspannung und Eingangsstrom erfasst worden. Die Strommesszange fand ihren Platz am Schutzleiter, welcher vom Klemmblock der Schutzleiter aus den einzelnen Stromkreisen zu einem Verbindungsblock führt. Von dort ist der Schutzleiter zur Haupterdungsschiene geführt und teilt sich in Erdung und Trennstelle PEN im Hausanschlusskasten auf. Messtechnisch sind somit die Ströme erfasst, welche von der Anlage gegen Erde über den örtlichen Erder oder dem PEN Leiter der Hausanschlussleitung abfließen.

Vor Beginn der Messung wurde das Messgerät so konfiguriert, dass der Messintervall 2s umfasst und eine Oszilloskopaufnahme automatisch alle 2 min stattfindet. Die vollständige Messung erstreckt sich über 24 h, um einen vollständigen Tagesablauf untersuchen zu können. Dabei wurde der Messzeitraum so gewählt, um innerhalb dieser Zeit alle Situationen in diesem Haushalt messtechnisch abdecken zu können.

4.2 Messergebnisse und Auswertung

Das folgende Diagramm zeigt den Stromverlauf über 24 h gemessen über dem Schutzleiter.

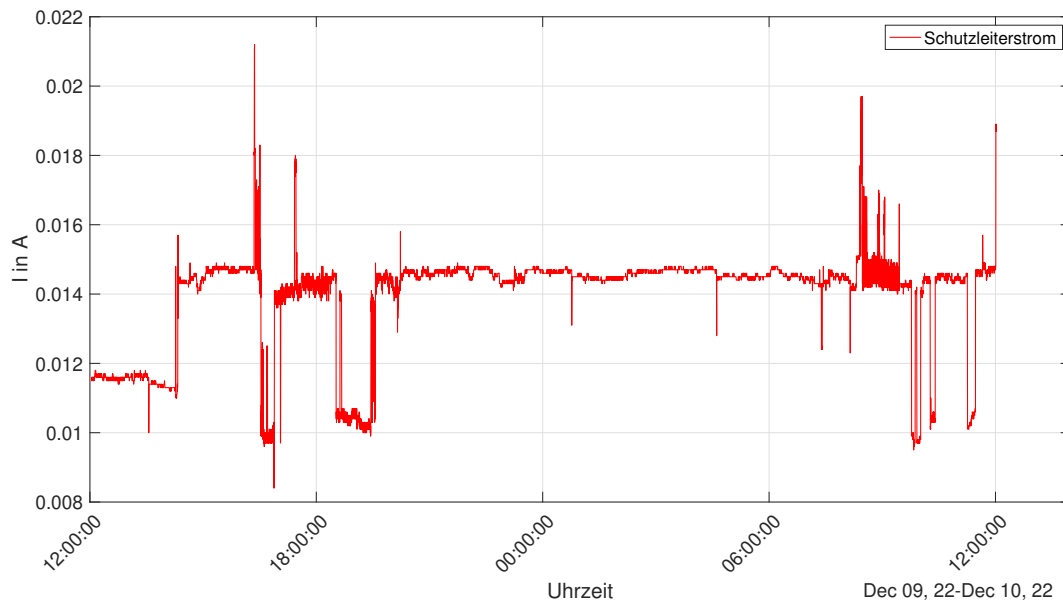


Abbildung 4.1: Messung A - Schutzleiterstrom über 24 h

Die Messung des Schutzleiterstromes über 24 h hat ergeben, dass im Prüfobjekt ein effektiver Strom von rund 15 mA im Schutzleiter fließt. Je nach Nutzung verschiedener Geräte, schwankt dieser zwischen 9 mA und 21 mA.

Zur besseren Einordnung des Schutzleiterstromes wird der Wirklastverlauf herangezogen.

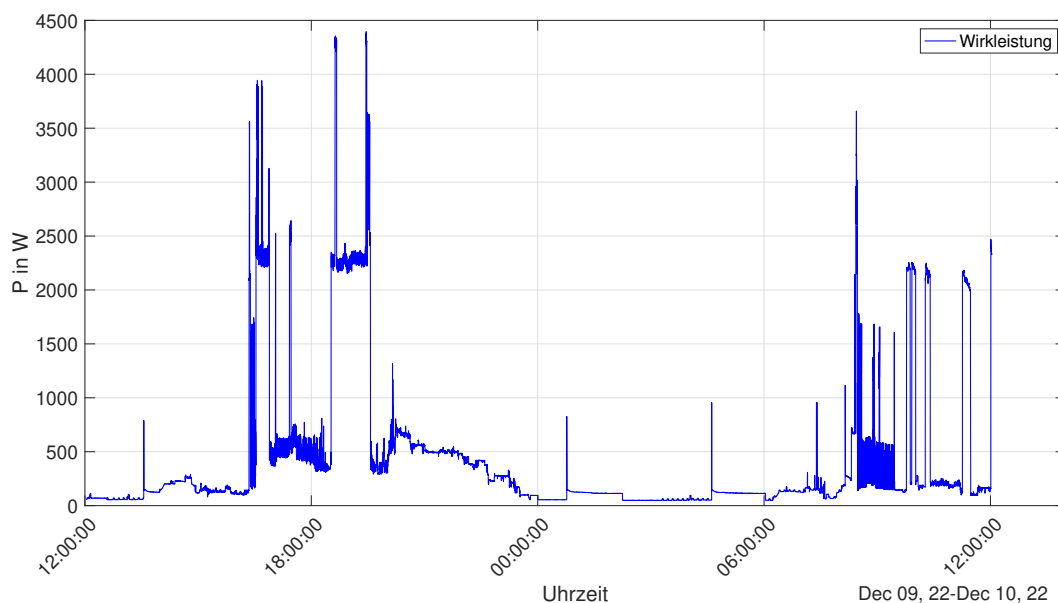


Abbildung 4.2: Messung A - Wirkleistung über 24 h

Bei der gegenüberstellenden Betrachtung des Wirklastprofils zum Schutzleiterstrom lässt sich feststellen, dass Stromspitzen, aber auch Einbrüche mit der aktuell bezogenen Leistung im Zusammenhang stehen. Diese sind in Verbindung mit den zuvor genannten Geräten verbunden, wodurch sich der genutzte Kaffeevollautomat als nachteilig für den Schutzleiterstrom herausstellt, Waschmaschine und Geschirrspüler jedoch einen positiven Beitrag leisten. Die in Betrieb befindlichen elektronischen Geräte, wie Router oder TV, führen zu einer ständigen Grundbelastung.

Die Messung des Schutzleiters in einem Einfamilienhaus zeigt einen eindeutigen Stromfluss. Dieser Strom am Messpunkt übersteigt dauerhaft den Bereich von 10 mA. Da aber der Messpunkt die Ströme der einzelnen Stromkreise vereint, sind somit die einzelnen Ströme summiert gemessen worden. Die Verdrahtung in der Verteilung ist mit 10 mm² als ausreichend zu betrachten.

Im Verlauf der Messung sind Stromspitzen zu erkennen, welche sich als Ableitströme vom Kaffeevollautomaten identifizieren lassen. Währenddessen sind Waschmaschine, Backofen und Geschirrspüler für ein Absinken des Schutzleiterstromes verantwortlich.

Zur näheren Betrachtung wurde eine Oszilloskopaufnahme aus dem 24 h Messzeitraum herausgegriffen. Diese Aufnahme spiegelt das durchschnittliche Messergebnis wider. Genauer wird die Betrachtung auf eine Periode der Stromschwingung gerichtet.

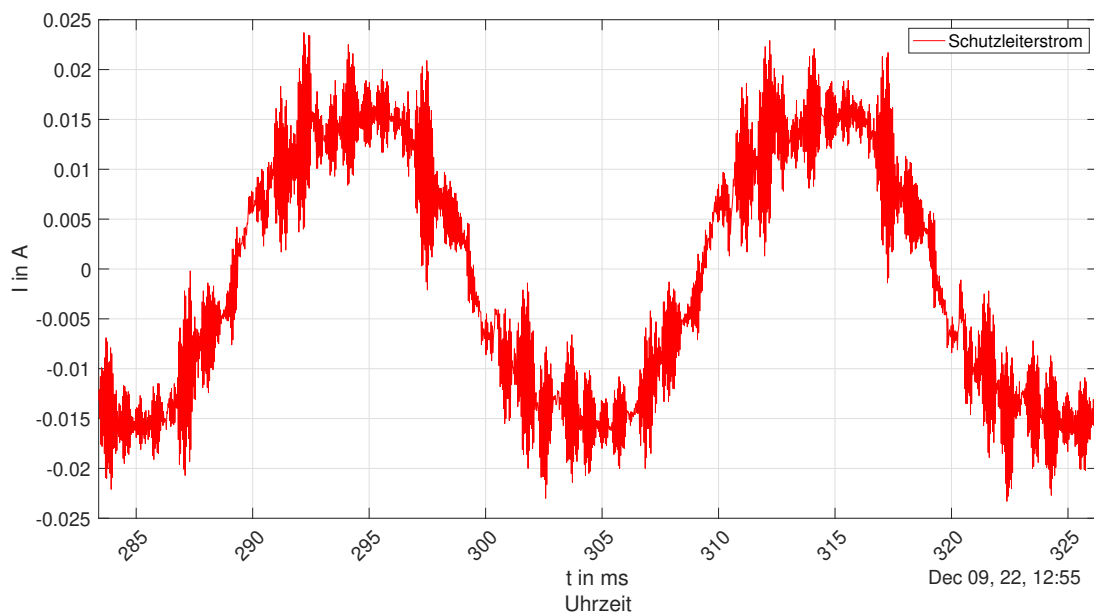


Abbildung 4.3: Messung A - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode

In der Oszilloskopaufnahme (Abbildung 4.3) lässt sich die 50 Hz Grundschiwingung aufgrund der Periodendauer von 20 ms gut erkennen. Dabei ist diese aber sehr verrauscht, was auf überlagerte höhere Frequenzen, Oberschwingungen, schließen lässt.

Die folgende Abbildung 4.4 zeigt die Ströme in den Außenleitern und Neutralleiter als Oszilloskopaufnahme zum selben Zeitpunkt wie dem Schutzleiterstrom in Abbildung 4.3.

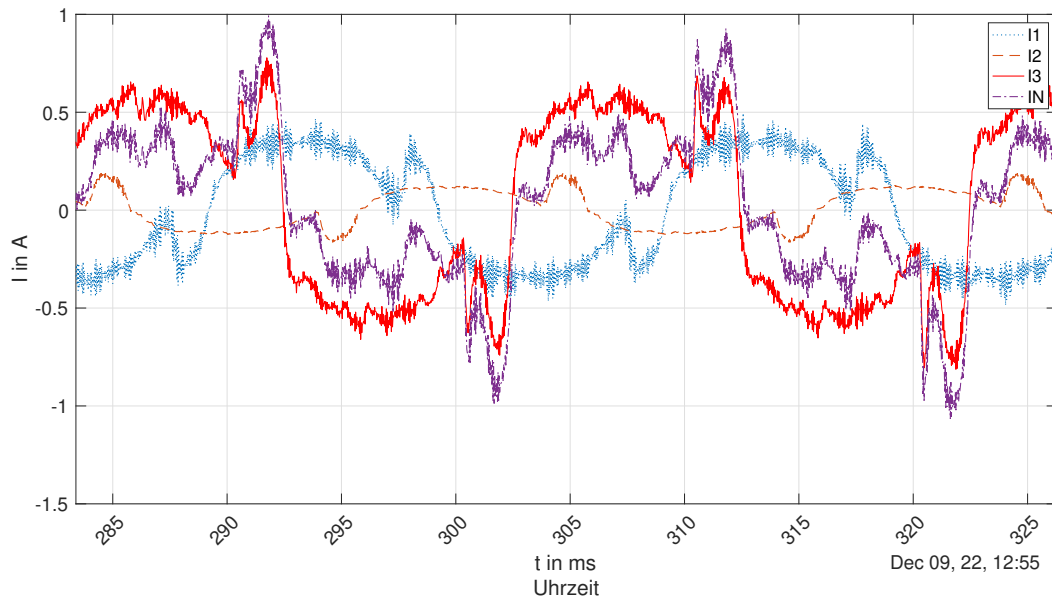


Abbildung 4.4: Messung A - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode

Im Stromverlauf des Oszilloskopbildes (Abbildung 4.4) zeigt sich ebenso eine Oberschwingungsbelastung der Ströme in den Außenleitern. Da viele einphasige Lasten, besonders auf I_3 , vorhanden sind, sind diese Belastungen auch auf dem Neutralleiter zu sehen. Aufgrund der hohen Frequenzen und unterschiedlichen Phasenlage sind diese nicht in der Lage, sich gegenseitig aufzuheben.

Zur Analyse des Frequenzspektrums werden die FFTs des Schutzleiterstromes und eines Außenleiterstromes betrachtet. Da die weiteren Außenleiter ein annähernd ähnliches Bild ergeben, wird zur Übersichtlichkeit der Darstellung nur die FFT im ersten Außenleiter dargestellt. Alle folgenden FFT Darstellungen beginnen ab 55 Hz, somit ohne Grundschwingungsanteil.

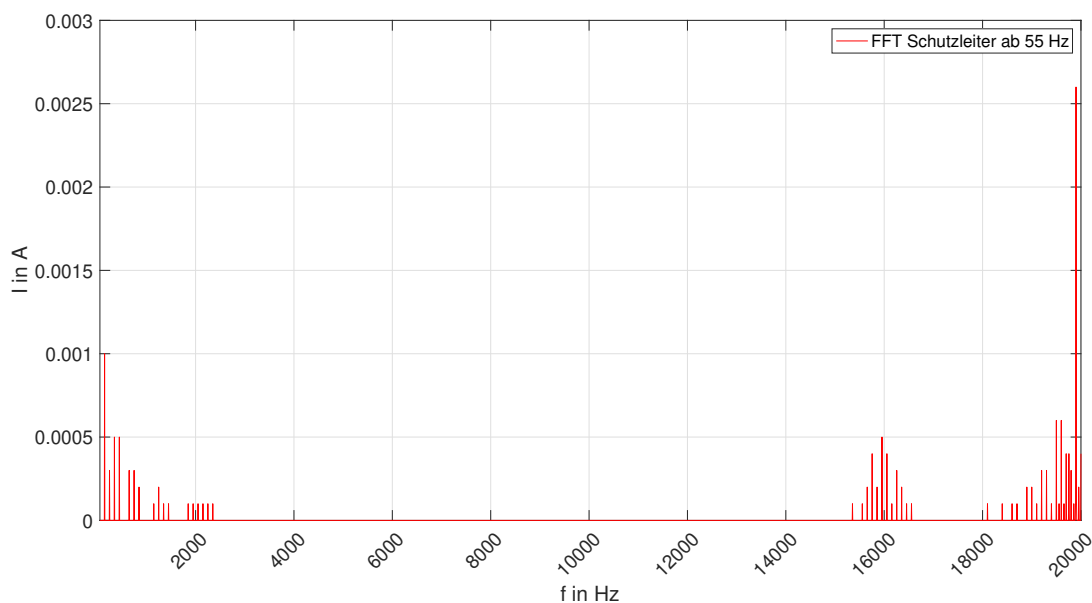


Abbildung 4.5: Messung A - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz

Aufgrund der nahezu übereinstimmenden Phasenlage von Schutzleiterstrom und dem Strom im ersten Außenleiter I_1 wird die nähere Betrachtung der Oberschwingungen im Vergleich Beider fortgeführt.

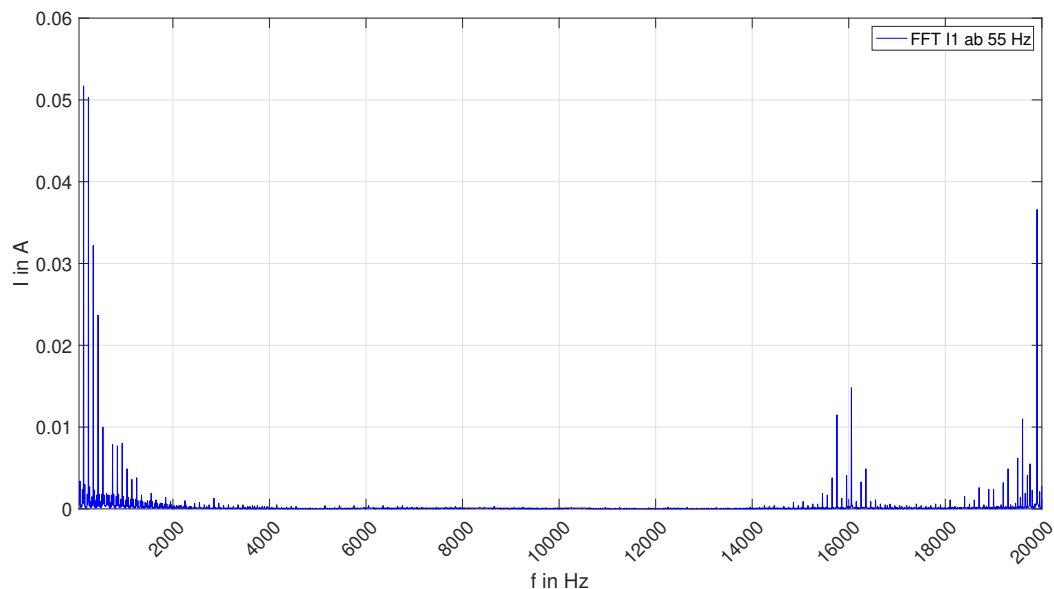


Abbildung 4.6: Messung A - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz

Bei genauer Betrachtung von I_1 ist festzustellen, dass eine Oberschwingungsbelastung vorliegt, was aus der nicht sinusförmigen Periode, aber auch des verwaschenen Oszilloskopbildes hervor geht.

Vergleicht man beide FFT Analysen, so bestätigt sich die Annahme, dass der Schutzleiterstrom durch die Ströme des Außenleiters beeinflusst werden. Das Frequenzspektrum beider betrachteten Ströme ist nahezu übereinstimmend.

Zur vollständigen Betrachtung ist auch der Spannungsverlauf heranzuziehen.

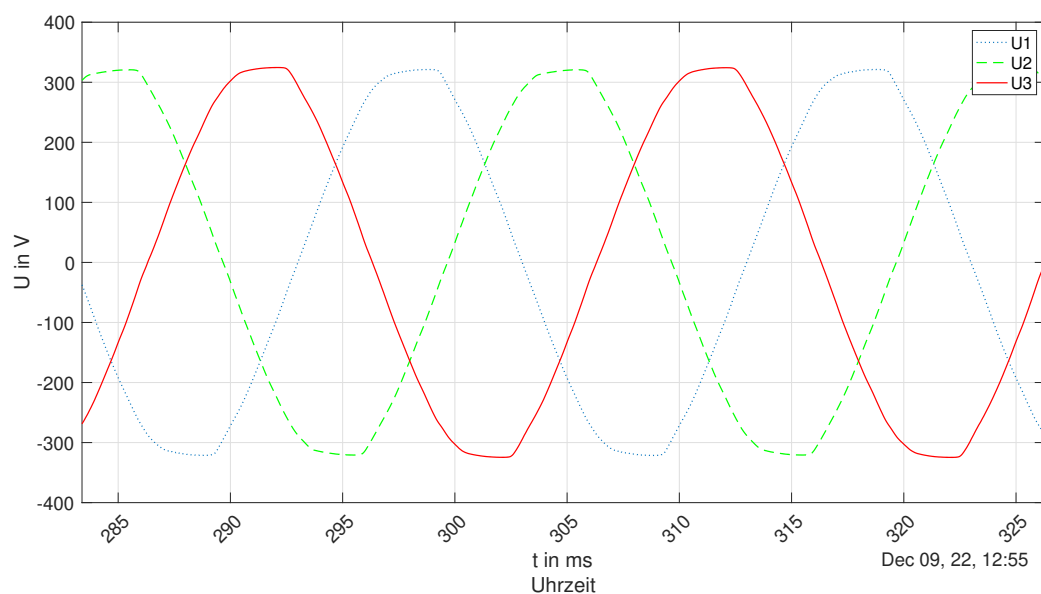


Abbildung 4.7: Messung A - Spannung der Außenleiter Oszilloskop

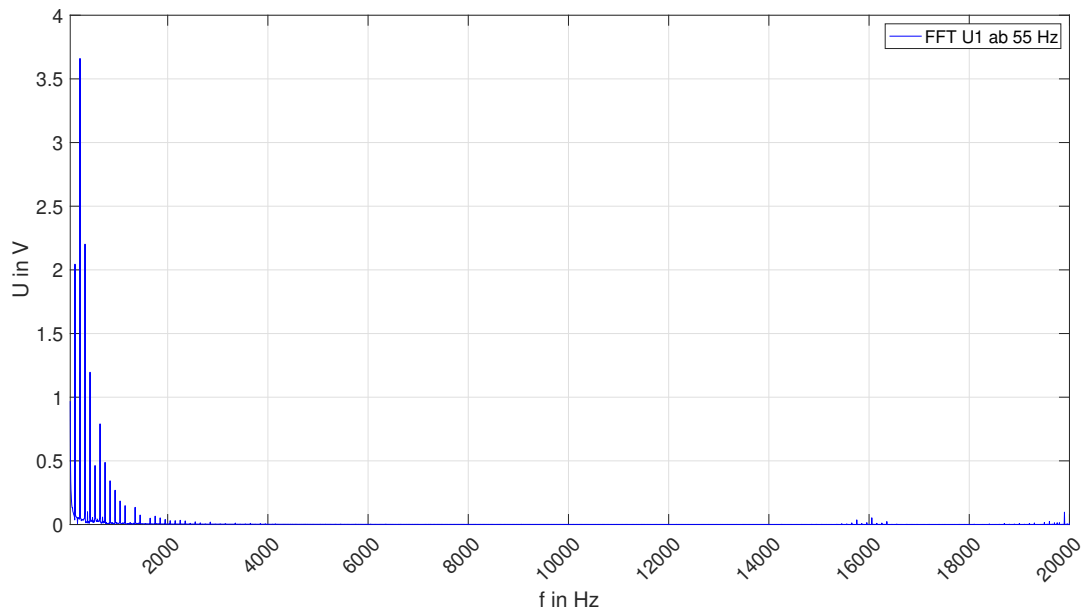


Abbildung 4.8: Messung A - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz

Bei einem Blick auf das Oszilloskopbild der Außenleiterspannungen (Abbildung 4.7) erkennt man eine abgeflachte Sinusschwingung, was auf eine Oberschwingungsbelastung hinweist. Die FFT Analyse (Abbildung 4.8) offenbart die Oberschwingungsbelastung, wie sie bereits im Strom erkennbar ist.

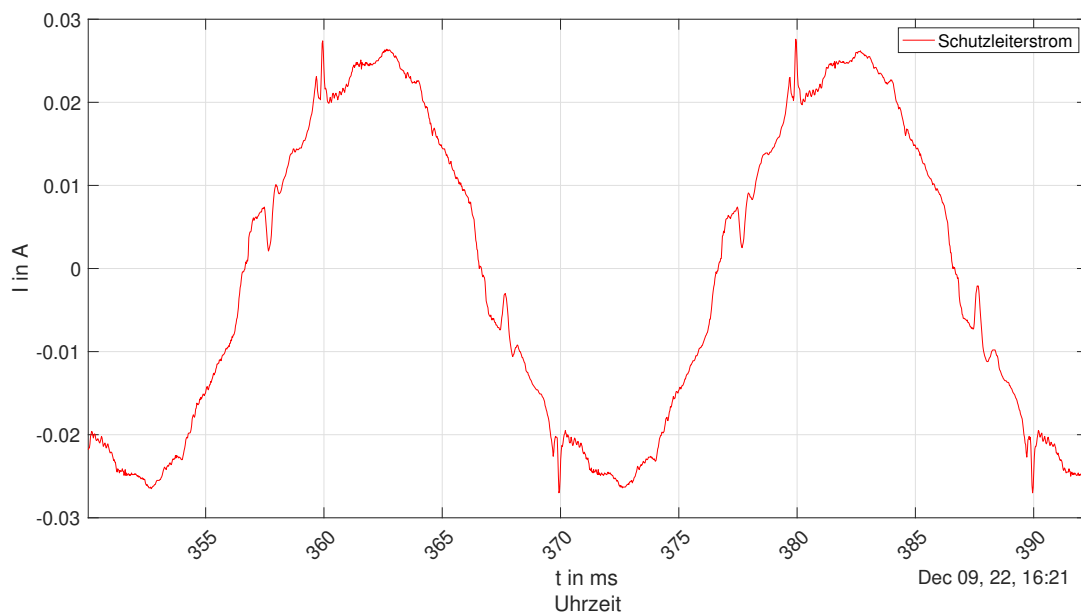


Abbildung 4.9: Messung A - Schutzleiterstrom bei Betrieb Kaffeevollautomat

Die zu den Zeitpunkten der Stromspitzen und Einbrüche betriebenen Geräte, Kaffeevollautomat, beziehungsweise Ofen, sorgen für eine Reduktion der Oberschwingungen. Aufgrund der im Verhältnis stehenden hohen Leistung ergibt sich so eine glattere Sinusschwingung des Stromes im Schutzleiter.

Nach Auswertung der Messergebnisse lässt sich feststellen, dass die in diesem Haushalt verwendete Technik großen Einfluss auf die Qualität des Stromes und der Spannung im Gebäude hat. Besonders die Belastung des Schutzleiters ist zu beobachten, um bei wachsendem Stromfluss Probleme und Gefahren zu vermeiden. Es ist als eine Maßnahme darauf zu achten, dass die Lasten in der Anlage auf den Außenleitern besser verteilt werden. Aber auch ein Tausch des verbauten RCD Typ A zu einem Typ B ist rechtzeitig zu überdenken. Die über den Schutzleiter hochfrequenten abfließenden Ströme haben einen Differenzstrom über Außenleiter und Neutralleiter zur Folge, die ein ungewolltes Auslösen des RCDs hervorrufen könnten. Ein RCD des Typ B kann aufgrund seiner elektronischen Steuerung die Ströme besser differenzieren und dadurch ungewollte Abschaltungen vermeiden. Des Weiteren kann die Nutzung des Typ B die zuverlässige Abschaltung im Fehlerfall erhöhen, da das breite Frequenzspektrum die Abschaltung des Typ A im Fehlerfall verhindern könnte.

Wird dies beachtet, ist ein weiterer sicherer und zuverlässiger Betrieb der Anlage unter Betrachtung der Schutzleiterströme zu gewährleisten.

5 Messung B - Lüftungsanlage

5.1 B1 - Lüftungsanlage Krankenhaus

5.1.1 Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration

Diese Messung betrachtet eine Lüftungsanlage eines Krankenhauses separat. Der Anschluss der Lüftungsanlage erfolgt von der NSHV ausgehend dreiphasig im Drehstromnetz in der TN-S Netzform. Über einen Anschlussklemmkasten ist ein Frequenzumrichter angeschlossen, welcher die Drehzahlregelung der Lüftungsmotoren ermöglicht.

Bei dieser Messung wurde der Messintervall auf 60s gestellt. Für die im Intervall automatisch ausgelösten Oszilloskopaufnahmen wurde eine Zeit von 10 min gewählt. Dabei lief die Messung über eine Woche. Die folgende Betrachtung bezieht sich auf 24 h an einem Wochentag, um eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen zu ermöglichen und einen Tagesintervall zu betrachten. Da jeder Tag ein gleiches Messergebnis zeigt, kommt es zu keinem Informationsverlust.

5.1.2 Messergebnisse und Auswertung

In dieser Anlage ist ein Schutzleiterstrom messbar, was die Abbildung 5.1 zeigt.

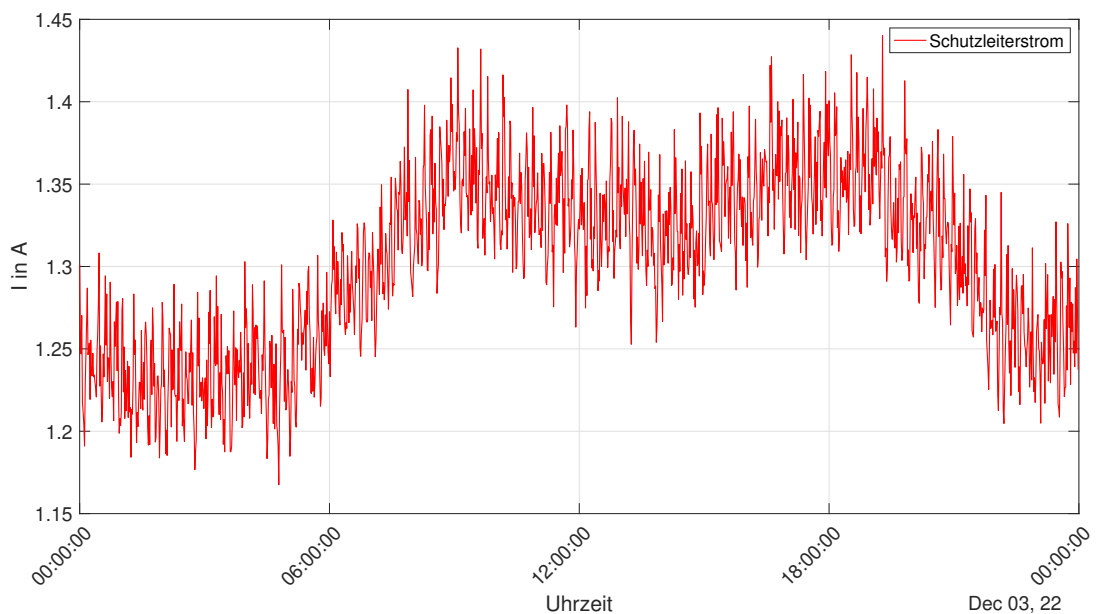


Abbildung 5.1: Messung B1 - Schutzleiterstrom über 24 h

Dieser erstreckt sich innerhalb der betrachteten 24 h von 1,2 A bis 1,4 A an einem gewöhnlichen Wochentag.

Die Auswertung der Messung zeigt eine dauerhafte Schutzleiterbelastung, welche weder am Tag noch in der Nacht unter 1,2 A sinkt, selbst im Nachtbetrieb des Krankenhauses

nicht. Erklären lässt sich dies anhand der hohen Leistungsaufnahme der Motoren und des verwendeten Frequenzumrichters. Beides hat grundsätzlich Ableitströme zur Folge, insbesondere die Filter des FUs. Aber auch die Auswirkungen der Oberschwingungen selbst können eine Rolle spielen, was sich aber aufgrund des Strommixes im Schutzleiter nicht klar unterschieden lässt.

Um einen Vergleich der Wirkleistung zum Schutzleiterstrom ziehen zu können, wird die Wirkleistung betrachtet.

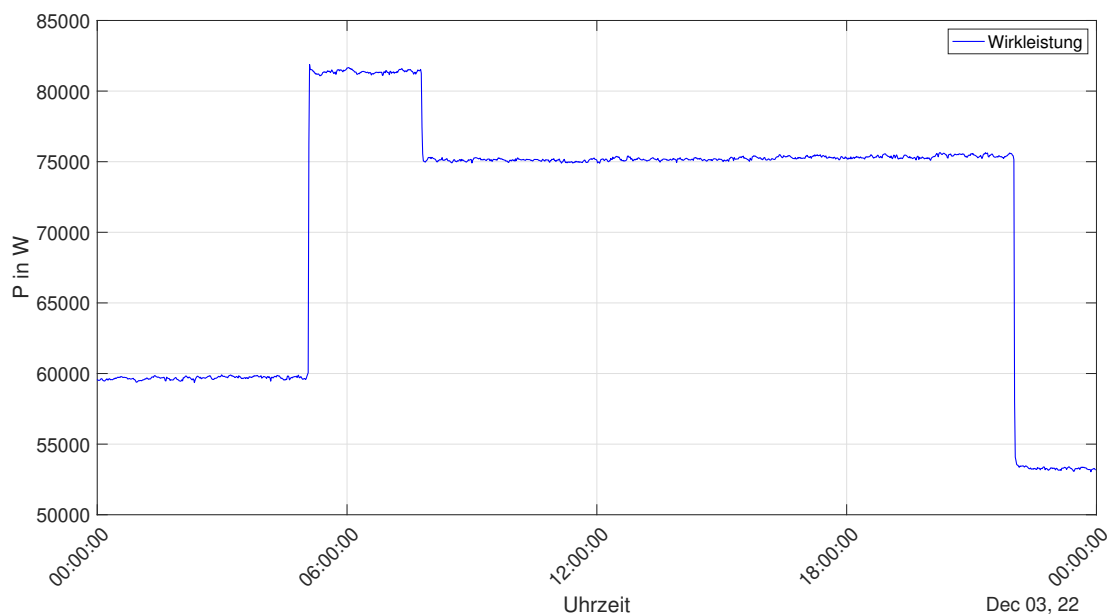


Abbildung 5.2: Messung B1 - Wirkleistung über 24 h

Das Lastprofil zeigt einen konstanten Leistungsbezug in Abhängigkeit der Tageszeit. In den Nachtstunden wird zwischen 55 und 60 kW benötigt, vormittags knapp über 80 kW und im weiteren Tagesverlauf beläuft sich der Leistungsbezug auf 75 kW.

Bei Vergleich des Schutzleiterstromes und der Leistungsaufnahme lässt sich feststellen, dass bei steigender Leistung ebenso der Schutzleiterstrom ansteigt, aber nicht sprunghaft, wie die Leistungsaufnahme selbst. Gleiches Verhalten zeigt sich bei sinkender Leistung, hierbei nimmt der Schutzleiterstrom ebenso nur langsam und nicht sprunghaft ab. Dies lässt eher auf Ableitströme schließen.

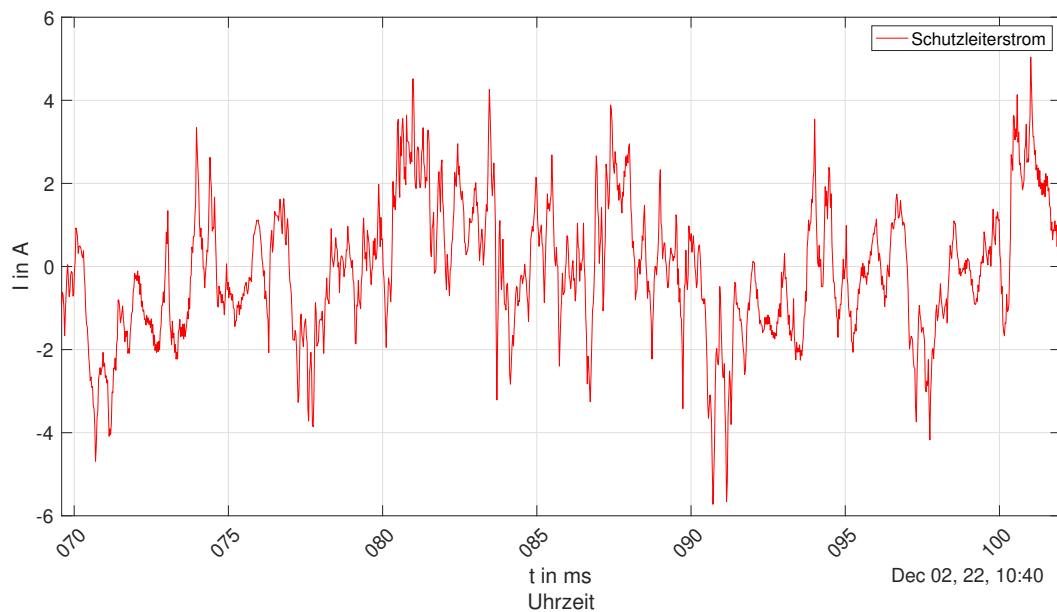


Abbildung 5.3: Messung B1 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode

Die Oszilloskopmessung des Schutzleiterstromes offenbart einen sehr unruhigen und nicht sinusförmigen Verlauf.

Mit Blick auf die Abbildung 5.3, die Oszilloskopmessung des Schutzleiterstromes, lässt sich kein Sinus erkennen. Dies lässt annehmen, dass alle drei Außenleiter gleichermaßen Einfluss auf den Strom nehmen, was abermals für die Ableitströme des Frequenzumrichters spricht. Die Aufnahme zeigt auch einen vorhandenen höherfrequenten Anteil, als die Grundschwingung von 50 Hz.

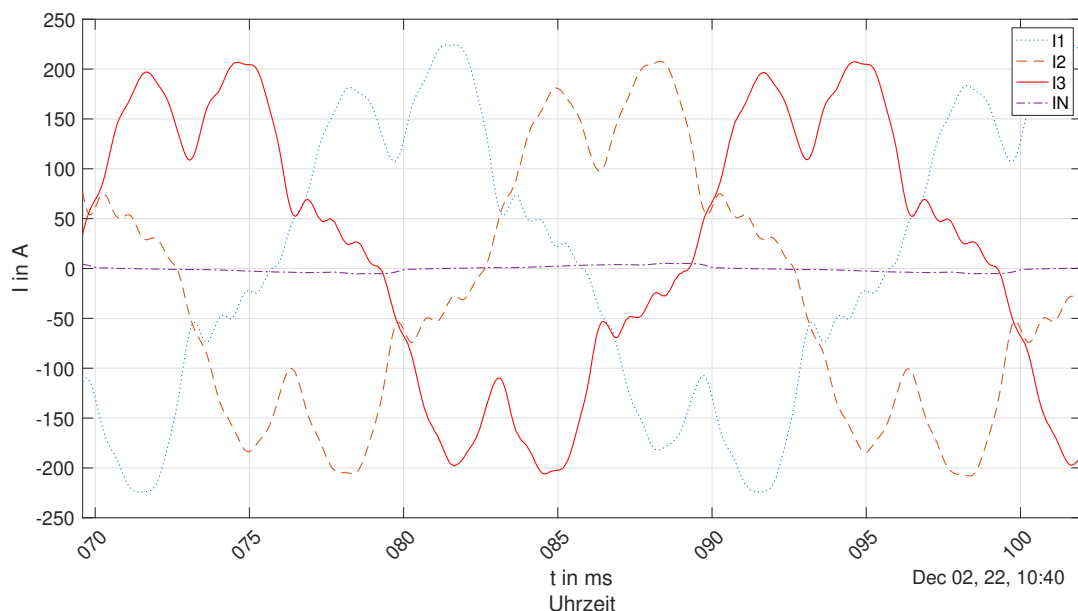


Abbildung 5.4: Messung B1 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode

Bei den Außenleiterströmen (Abbildung 5.4) lässt sich eine gleichmäßige Lastverteilung auf allen Außenleitern erkennen, der Neutraleiter ist kaum belastet. Ebenso periodisch

wiederkehrend in jedem Außenleiterstrom ist ein Stromeinbruch in der Spitze einer jenen Sinushalbwellen.

Bei der Betrachtung der Außenleiterströme ist der Sinus der Grundschwingung mit einer Periodendauer von 20 ms eindeutig zu erkennen. Ebenso ist eine symmetrische Belastung der drei Phasen vorhanden, weshalb auch der Neutralleiter nur gering belastet ist. Auffällig ist der Einbruch an jeder Sinusspitze des Stromverlaufes, was als Eigenschaft eines Frequenzumrichters aber nicht ungewöhnlich ist. Dies führt auf einen Teil der Oberschwingungsbelastung zurück, welche ihren Ursprung im Umrichter finden.

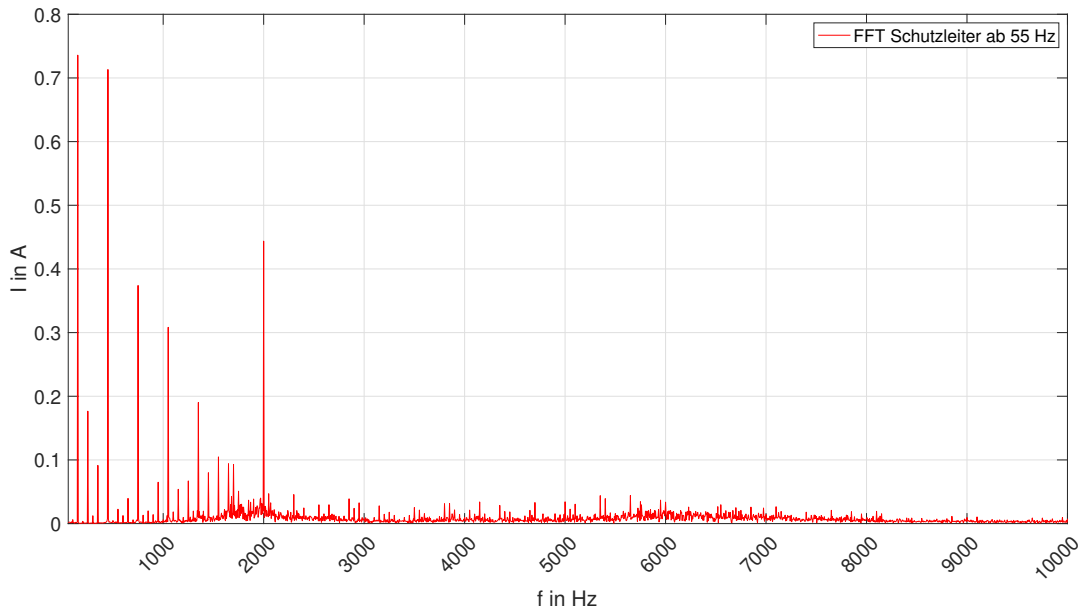


Abbildung 5.5: Messung B1 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz

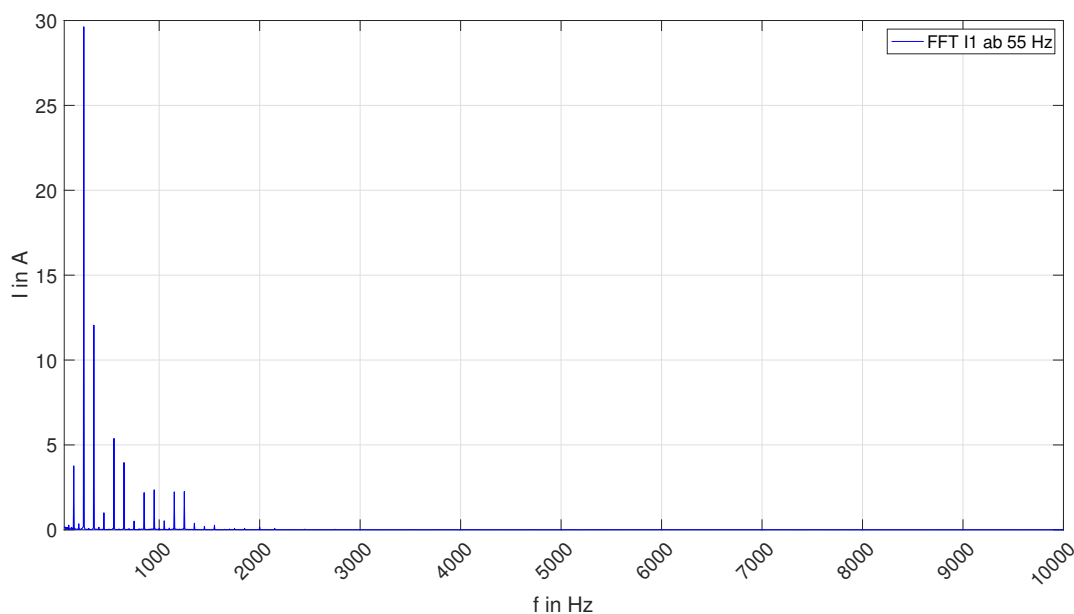


Abbildung 5.6: Messung B1 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz

Die FFT Analyse des Schutzleiterstromes bei der Betrachtung ab 55 Hz zeigt eine erhöhte Oberschwingungsbelastung bis 2 kHz und eine geringe, welche sich bis 8 kHz erstreckt.

Die beispielhafte Betrachtung der FFT im Strom des ersten Außenleiters zeigt auch hier eine eindeutige Oberschwingungsbelastung, die sich ähnlich des Schutzleiters bis annähernd 2 kHz messen lässt.

Bereits bei der Betrachtung der FFT Analyse der Außenleiterströme zeigt sich der Arbeitspunkt des FUs, was sich im Schutzleiter annähernd widerspiegelt. Bei 250 Hz ist im Außenleiter die höchste Oberschwingung gemessen worden. Diese lässt sich auch in den anderen Außenleitern zum Zeitpunkt der Messung finden. Sie tritt im Schutzleiter geringer auf, da die geometrische Addition zur Reduzierung führt.

Im Schutzleiter hingegen dominiert die dritte Harmonische bei 150 Hz. Diese spricht für die Ströme elektronischer Komponenten, welche zur Gleichrichtung, sowie Wechselrichtung zum Einsatz kommen, aber auch die Ableitkondensatoren sollten ihren Teil dazu beitragen.

Der Vollständigkeit halber ist hier abschließend der Blick auf die Spannungen gerichtet.

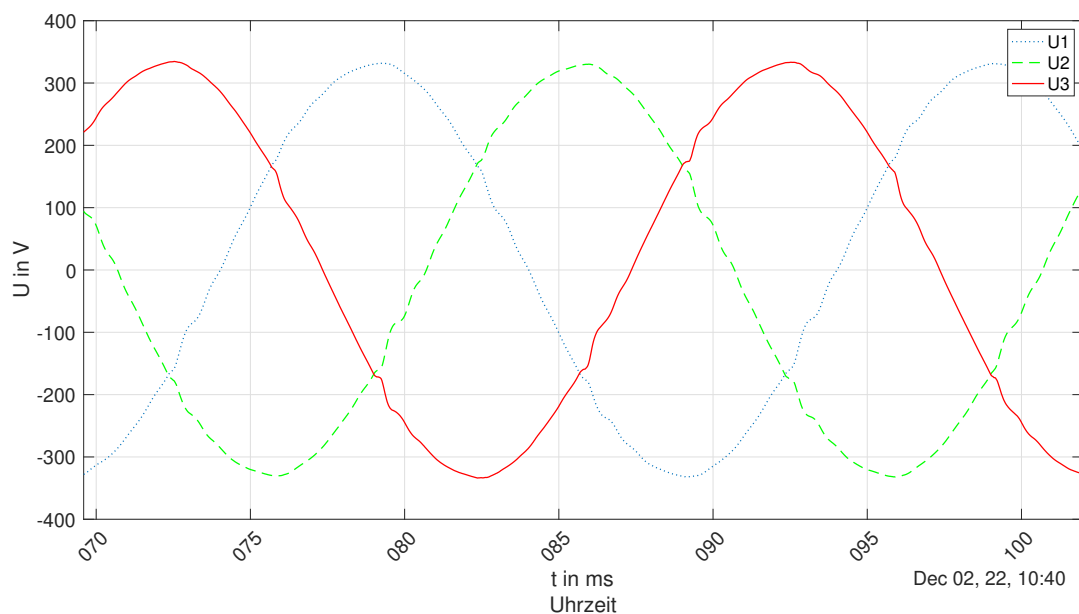


Abbildung 5.7: Messung B1 - Spannung der Außenleiter Oszilloskop

Auf dem ersten Blick ist die Oszilloskopaufnahme der Außenleiterspannung ein Sinus. Genau betrachtet sind kleine Wellen vorhanden.

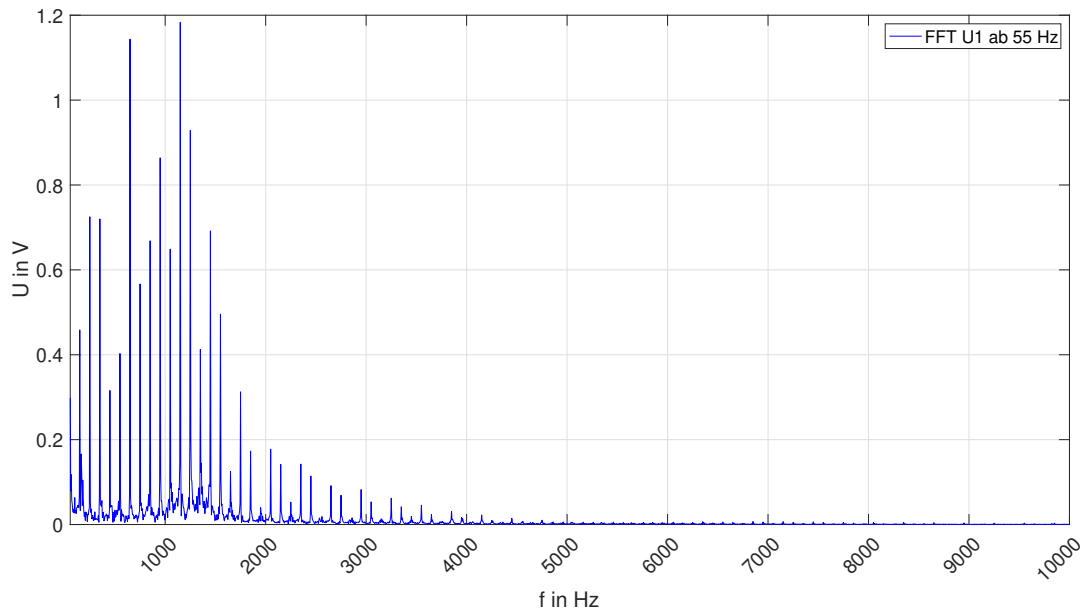


Abbildung 5.8: Messung B1 - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz

Die Wellen in der Spannung finden ihren Ursprung in der Oberwellenbelastung, welche nur einen geringen Anteil aufweist, sich aber bis 4 kHz bei der FFT Analyse erkennen lässt.

Die Analyse der Spannungen mittels Oszilloskop und FFT Darstellung zeigt auch hier einen Oberschwingungsanteil. Dieser ist gering gegenüber der Grundschwingung von 50 Hz, aber auch im Bereich bis 2000 Hz ausgeprägt. Das ist ebenso auf die Außenleiterströme zurückzuführen.

Zusammenfassend lässt sich bei dieser Messung feststellen, dass entsprechend der Gegebenheiten die Lüftungsmotoren und Frequenzumrichter ein zu erwartendes Bild gezeigt haben. Es tritt eine Belastung durch Oberschwingungen auf, welche sich auf dem Schutzleiter niederschlägt. Aufgrund der Vermischung mit den Ableitströmen lässt sich nicht sagen, welchen Anteil dabei die Oberschwingungen aufweisen. Allgemein ist der Schutzleiterstrom recht hoch, was sich aber nur schwer vermeiden lässt und den Betrieb der einzelnen Anlage nicht gefährdet.

5.2 B2 - Lüftungsanlage Hotel

5.2.1 Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration

Bei der hier gemessenen Anlage handelt es sich um eine Lüftungsanlage eines Hotels. Die Vorsicherung beläuft sich auf 100 A Schmelzsicherung. Der Anschluss des Steuer-schranks erfolgt über TN-C und wird nach Einführung direkt zu TN-C-S aufgetrennt. Direkt nach Auftrennung werden die Außenleiterströme sowie der Neutralleiter und der Schutzleiterstrom messtechnisch erfasst.

Auf die Messung der Spannung musste verzichtet werden, da ein Abgriff der Spannung an dieser Anlage nicht gefahrlos möglich ist. Dies hat zur Folge, dass die Wirkleistung

nicht ermittelt werden kann und ein Vergleich des Schutzleiterstromes mit den Außenleiterströmen genutzt wird.

Die Lüftungsmotoren werden mit Hilfe von Frequenzumrichter in ihrer Drehzahl gesteuert.

Zur Messung wurde ein Messintervall von 2 s gewählt. Für die Oszilloskopaufnahmen ist eine automatische Auslösung alle 2 min vorgesehen. Die gesamte Messung wurde über einen Zeitraum von 24 h durchgeführt.

5.2.2 Messergebnisse und Auswertung

Im Schaltschrank ist ein durchgängiger Schutzleiterstrom gemessen wurden.

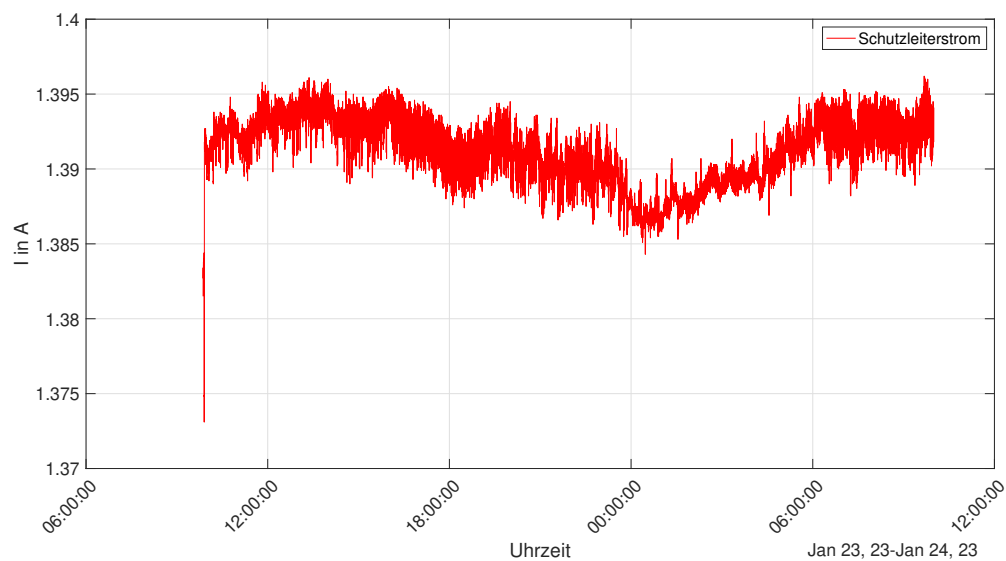


Abbildung 5.9: Messung B2 - Schutzleiterstrom über 24 h

Das Diagramm zeigt dabei einen Strom von um die 1,39 A. In der Nacht ist ein Absinken zu erkennen.

Zum Vergleich der Belastung wird der Strom im ersten Außenleiter herangezogen. Auf die Betrachtung der beiden weiteren Außenleiter kann hierbei verzichtet werden, da diese symmetrisch verlaufen.

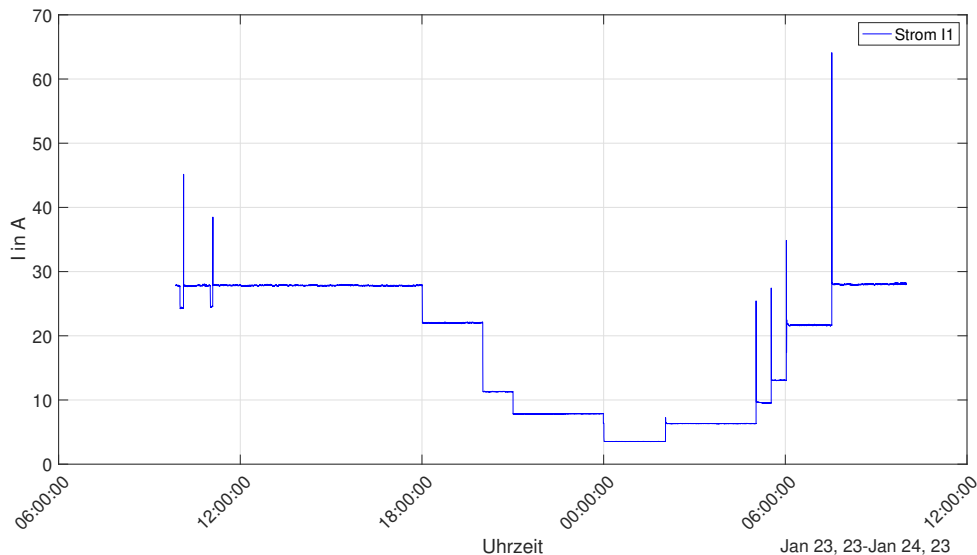


Abbildung 5.10: Messung B2 - Strom I1 über 24 h

Der in dieser Anlage gemessene Strom lässt auf Tag- und Nachtbetrieb schließen. Von 7 bis 18 Uhr ist ein konstanter Strom von 28 A abzulesen. Nach 18 Uhr werden die Lüfter stufenweise abgeschaltet, sodass eine Stromabnahme gegen Mitternacht nur noch von 4 A zu erkennen ist. In den frühen Morgenstunden werden die einzelnen Lüfter wieder stufenweise eingeschaltet. Die Peaks im Stromverlauf sind jeweilige Anlaufströme der Motoren.

Ebenso zeigt sich bei Abnahme des Laststromes eine Abnahme des Schutzleiterstromes, was auf mögliche im Betrieb entstehende Ableitströme zurückzuführen ist. Dennoch ist ein konstanter Verlauf des Schutzleiterstromes erkennbar.

Verlauf und Höhe des Schutzleiterstromes in Vergleich zum Laststrom bestätigen die Annahme, dass Ableitströme Ursache von einem Teil der Schutzleiterströme sind, da eine Abhängigkeit zum Lastbezug auffällt. Ebenso sind betriebsbedingte Ableitströme der Motoren selbst nicht auszuschließen.

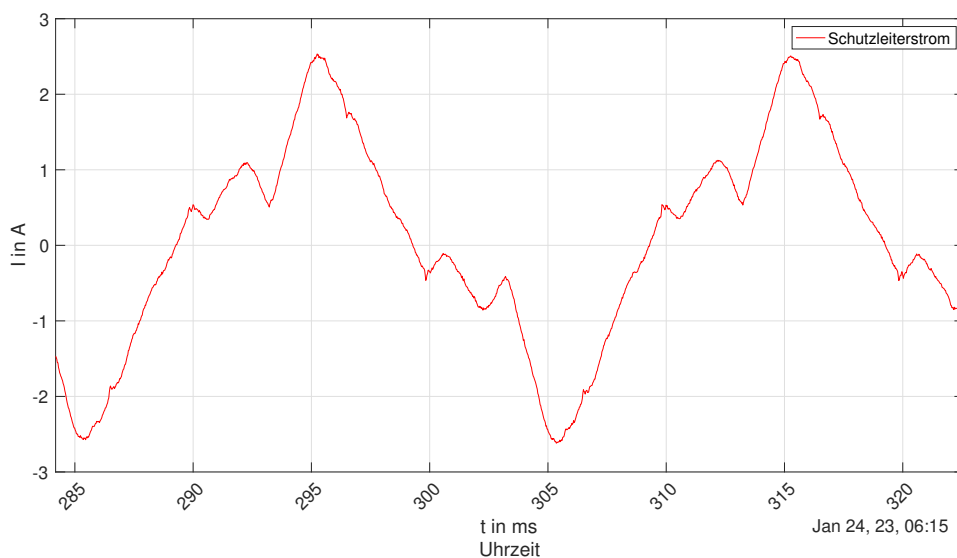


Abbildung 5.11: Messung B2 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode

Die Auswertung der Oszilloskopaufnahme lässt einen sinusförmigen Verlauf des Schutzleiterstromes erkennen. Abzulesen ist eine Periodendauer von 20 ms, was auf die 50 Hz Grundschwingung schließen lässt. Dabei sind vor dem Scheitelpunkt bei steigender Flanke mehrere Einbrüche erkennbar.

Ursprung sind die folgend dargestellten Eingangsströme der Außenleiter.

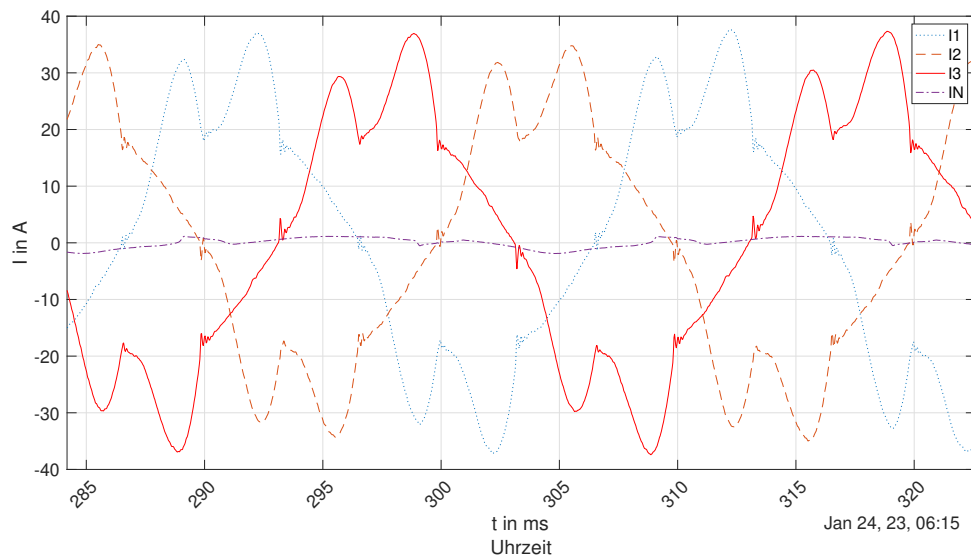


Abbildung 5.12: Messung B2 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode

Das Oszilloskopbild der Außenleiterströme zeigt die symmetrische Belastung. Dadurch ist der Neutraleiter nur wenig beansprucht. Auch hier, wie im Schutzleiter, ist im Scheitelpunkt der Sinusschwingung ein Knick vorhanden. Dies lässt sich auf die vorhandenen Frequenzumrichter zurückführen, was dort als typisches Bild auftritt.

Eine Übereinstimmung einzelner Außenleiterströme auf den Schutzleiter ist nicht festzustellen, sodass davon auszugehen ist, dass alle Außenleiter gleichermaßen Einfluss auf den Schutzleiter nehmen. Dies erklärt die mehreren Einbrüche in steigender Flanke im Schutzleiterstrom.

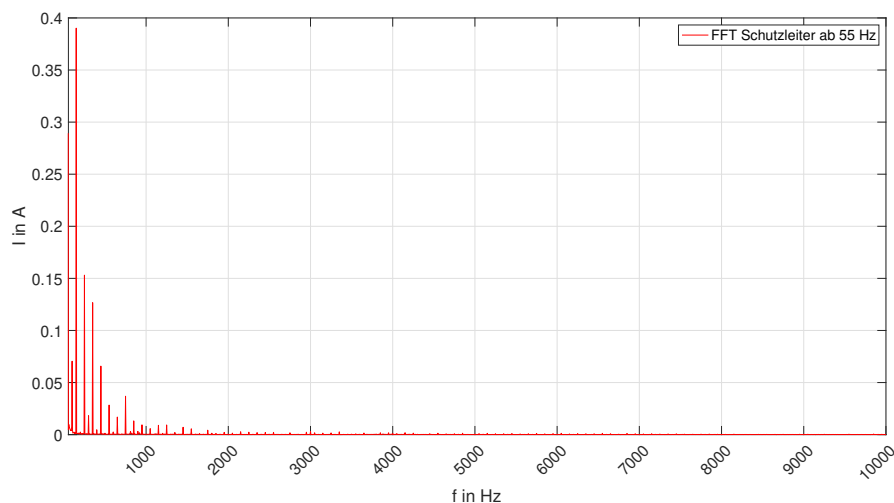


Abbildung 5.13: Messung B2 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz

Die FFT Analyse des Schutzleiters zeigt die größte Oberschwingungsbelastung in der dritten Harmonischen. Dabei erstreckt sich die Belastung bis ungefähr 1 kHz.

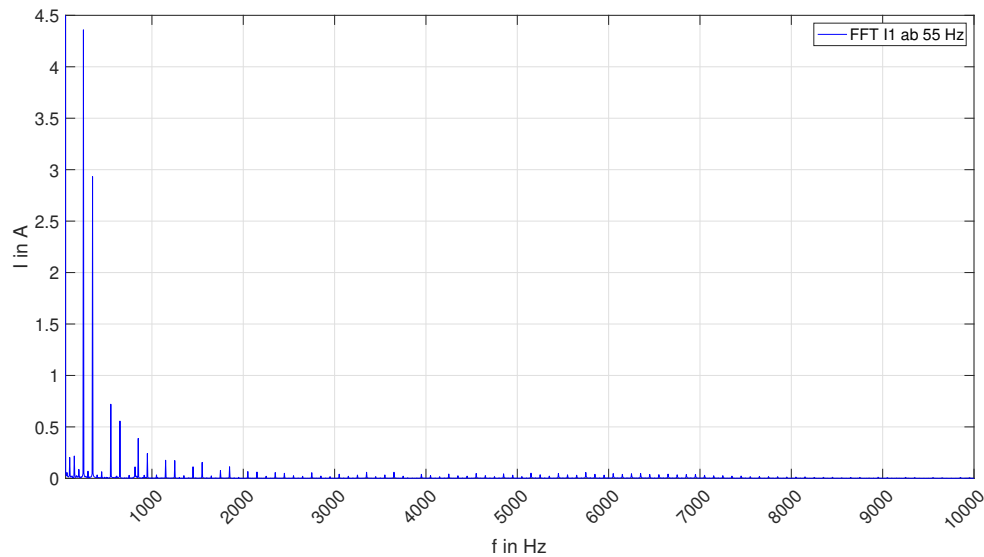


Abbildung 5.14: Messung B2 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz

Wie auch im Schutzleiter, ist ebenso im Außenleiter die dritte Harmonische am deutlichsten vorhanden. Wie zu erwarten, ist somit eindeutig eine Belastung von Oberschwingungen, ausgehend von den Motoren und Frequenzumrichtern, festzustellen.

Diese Messung hat gezeigt, dass Lüftungsanlagen einen Einfluss auf den Schutzleiterstrom nehmen. Da Frequenzumrichter verbaut sind, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Ableitstrom der Filter ein großer Teil der gemessenen Ströme im Schutzleiter. Die Messung hat das zu erwartende Ergebnis dieser Anlagenkonfiguration ergeben.

Die Belastung auf dem Schutzleiter ist als ungefährlich für den Betrieb der Anlage einzustufen. Da es sich um eine ältere Anlage handelt, ist bei Modernisierung dennoch darauf zu achten, dass der Schutzleiter entsprechend geplant wird.

5.3 Vergleich und Fazit

In beiden gemessenen Lüftungsanlagen sind in ähnlicher Höhe Schutzleiterströme nachgewiesen wurden. Dies zeigt, dass unter Nutzung von Motoren und Frequenzumrichtern mit Strömen zu rechnen ist, die mit über 1 A dauerhaft den Schutzleiter belasten.

Bei anzunehmender ordnungsgemäßer Installation der beiden ausgewählten Anlagen ist davon auszugehen, dass keine Gefahren drohen. Dennoch ist im Zuge regelmäßiger Kontrollen auch der Blick auf die Schutzleiterkontakte zwingend erforderlich, da aufgrund der Stromhöhe eine Gefahr von Bränden möglich ist. Dies können lockere oder unsachgemäße Kontaktstellen hervorrufen. Ein sachgemäß vorhandener Schutzleiter erhält bei älteren Anlagen auch den Personenschutz.

Ob und wie weit sich hierbei die Strombelastung des Schutzleiters in Zukunft verändert, werden künftige Messungen zeigen.

6 Messung C - Industriebetrieb

6.1 C1 - Metallindustrie

6.1.1 Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration

In einem Betrieb zur Herstellung von Stahlfässer wurde diese Messung über 24 h an einem Teil der Anlage durchgeführt, welche über TN-S angebunden ist. Dabei erfolgt der Anschluss über eine 63 A Vorsicherung auf einem Schienensystem. Die Unterverteilung wird über TN-C eingespeist und in der Anlage entsprechend zu PE und N aufgetrennt. Am gemessenen Stromkreis befinden sich im Wesentlichen Elektromotoren, welche über Schütze ein und aus geschaltet werden. Gelegentlich werden einphasig betriebene FUs zur Drehzahlsteuerung weiterer Elektromotoren genutzt. Aber auch ein dreiphasig versorgtes Heizgerät und ebenso ein Computer befinden sich am Stromkreis.

Die hauptsächlich im Betrieb befindliche Maschine, welche über die Elektromotoren angetrieben wird, hat die Aufgabe Bleche zu formen.

Bei dieser Messung ist zu berücksichtigen, dass sich das Unternehmen im reduzierten Urlaubsbetrieb befand und dadurch weniger Betriebsmittel genutzt wurden.

Die gemessene Unterverteilung befindet sich nachgeordnet am örtlichen Transformator des Unternehmens.

Der Messintervall des Messgerätes ist hier von 2 s gewählt wurden, eine Speicherung des Oszilloskopbildes fand alle 2 min statt. Die gesamte Messung verlief über 24 h, um einen gewöhnlichen Tagesablauf zu untersuchen.

6.1.2 Messergebnisse und Auswertung

Beginnend der Blick auf den Schutzleiterstrom des gesamten Messzeitraumes.

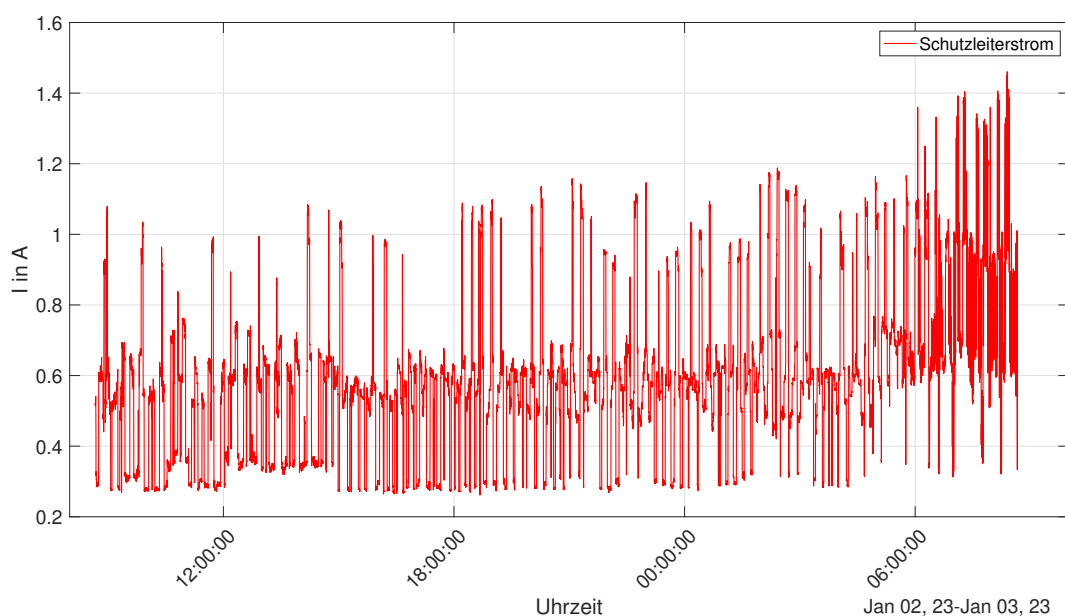


Abbildung 6.1: Messung C1 - Schutzleiterstrom über 24 h

Das Diagramm des Schutzleiterstromes zeigt einen sprunghaften Verlauf zwischen 0,3 A bis 1,4 A. Dabei fallen immer wieder Stromspitzen auf, aber auch Sprünge nach unten. Es ist festzustellen, dass bei Zunahme des Leistungsbezuges ab Stunde 21 auch der Schutzleiterstrom um 0,2 A ansteigt. Pausenzeiten und die arbeitsfreie Zeit ist nicht zu erkennen, da der Schutzleiterstrom eine im Mittel konstante Höhe aufweist.

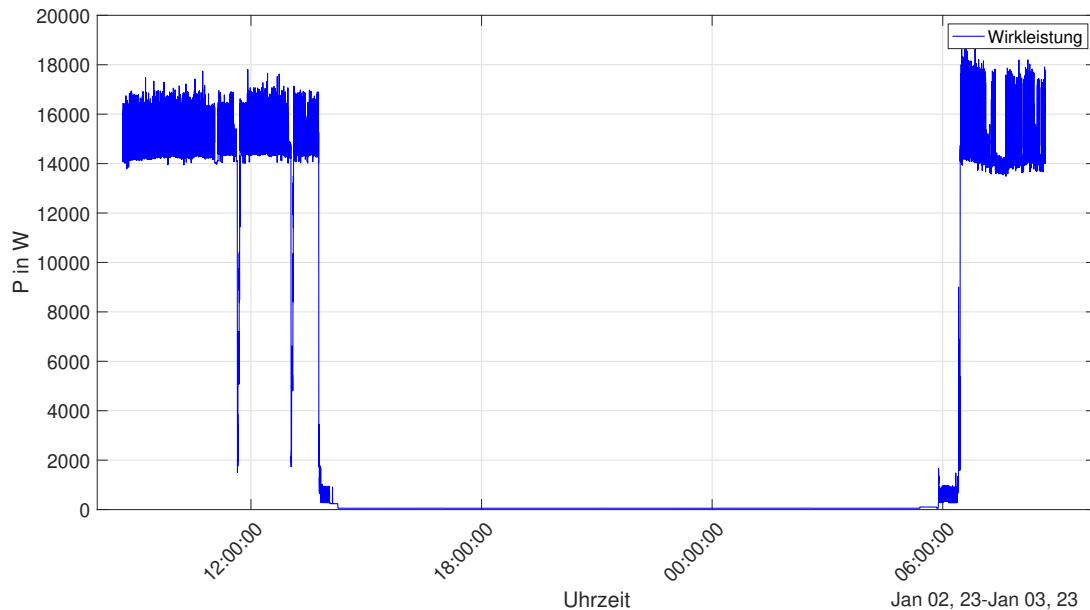


Abbildung 6.2: Messung C1 - Wirkleistung über 24 h

Die Darstellung der Wirkleistung lässt sehr gut die Arbeitszeit erkennen, sowohl den Antritt zum Feierabend, als auch den Beginn des neuen Arbeitstages. Während der Arbeitszeit ist ein Leistungsbedarf zwischen 14 kWh und 18 kWh zu verzeichnen. Über die arbeitsfreie Zeit hinweg sind nur wenige Watt nötig. Den kurzzeitigen Einbruch der Leistung stellen Pausen dar.

Die Messung in einem Industriebetrieb zeigt eine dauerhafte Schutzleiterbelastung, welche im Messzeitraum aufgezeichnet wurde. Überraschend ist festzustellen, dass die Stromhöhe im Schutzleiter unabhängig der Wirklast der Betriebsmittel erscheint. Jedoch hat eine leichte Erhöhung der Last gegen Stunde 21 auch zu einer leichten Erhöhung der Strombelastung im Schutzleiter geführt. Die Ursachen können vielfältig sein. Grundlegend sind die verwendeten Geräte, wie Elektromotoren, für Ableitströme verantwortlich. Die Frequenzumrichter tragen ihren Teil durch kapazitive Filter bei und die angeschlossenen Computer sorgen in Verbindung der Schaltnetzteile für Oberschwingungsbehaftete Ströme.

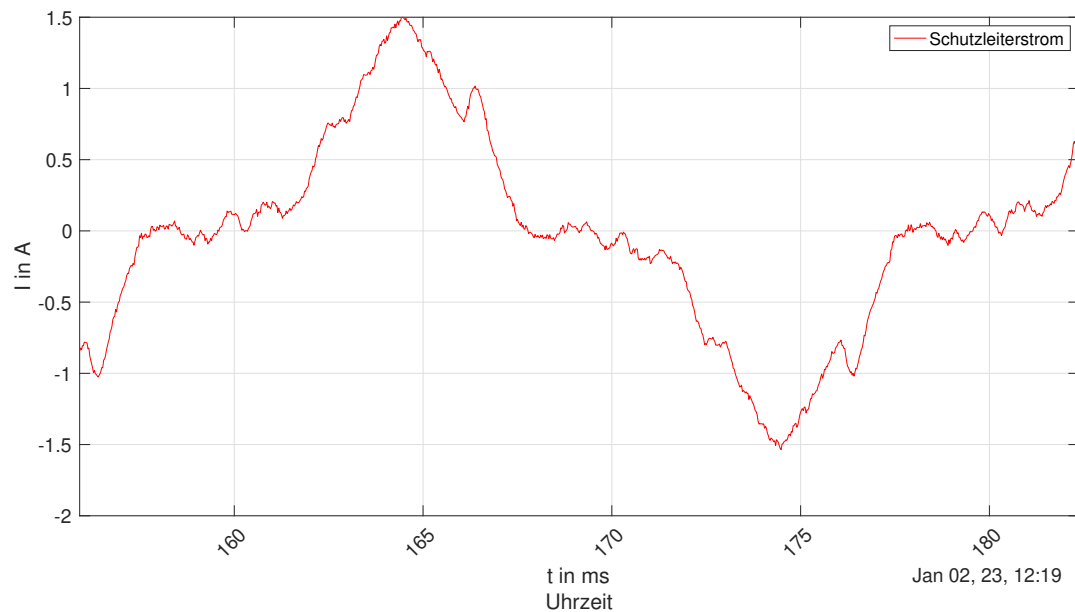


Abbildung 6.3: Messung C1 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode

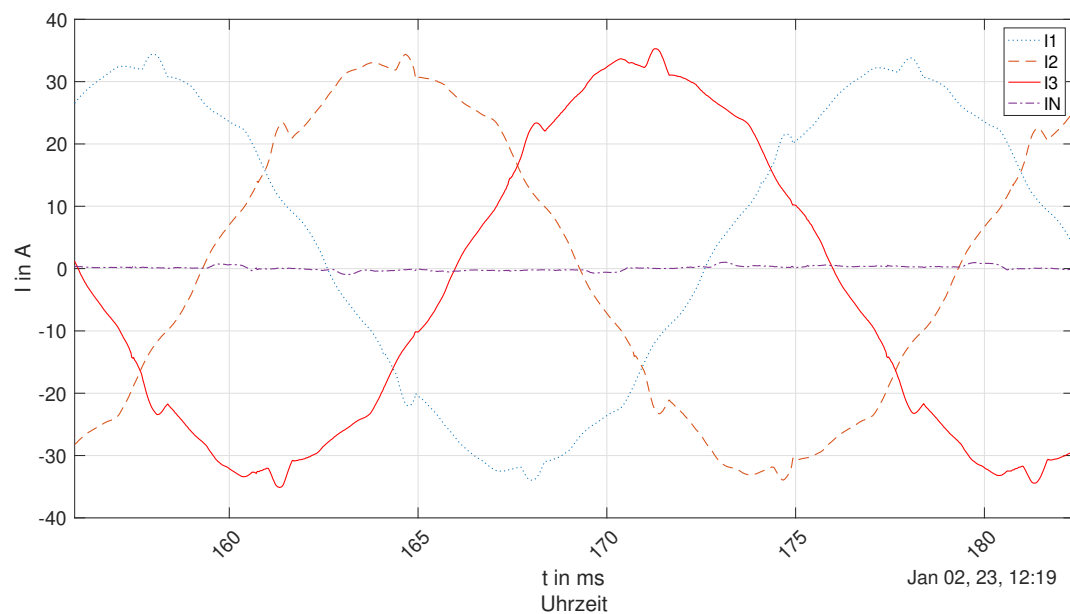


Abbildung 6.4: Messung C1 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode

Bei der Oszilloskopaufnahme des Schutzleiterstromes lässt sich ein verzerrter Sinus erkennen. In der Phasenlage gleicht dieser Strom dem des zweiten Außenleiters.

Die Betrachtung der Ströme im Außenleiter zeigt eine gleichmäßige Verteilung und Phasenlage. Aufgrund der Symmetrie ist der Neutralleiter nur wenig belastet. Die Welligkeit der Sinusschwingungen deutet auf Oberschwingungen hin.

Da als größte Last Elektromotoren eingebunden sind, ist zu schlussfolgern, dass Ableitströme den größten Teil des Strommixes im Schutzleiter ausmachen. Die Übereinstimmung der Phasenlage des Schutzleiterstromes mit dem Strom des zweiten Außenleiters

spricht dafür, dass die Ursache für den größten Anteil des Stromes im zweiten Außenleiter zu suchen ist. Dabei kann ein einzelnes Gerät selbst, aber auch die Leitungsinstallation verantwortlich sein. Die genaue Ursache ließ sich nicht abschließend klären.

Da der Schutzleiterstrom selbst auch keinen sauberen Sinus abbildet, überschwingungsbehaftet ist und um den Nullpunkt breiter ausläuft, sind auch Einflüsse aus den anderen Außenleitern mit beteiligt. Überschwingungen, die aus dem Eingangsstrom der Betriebsmittel hervorgehen, wirken sich im gleichen Spektrum im Schutzleiter aus. Da scheinbar Ableitströme vorhanden sind, ist darauf der größte Anteil zurückzuführen. Aber auch induktive Einflüsse aus den Motorleitungen sind anzunehmen.

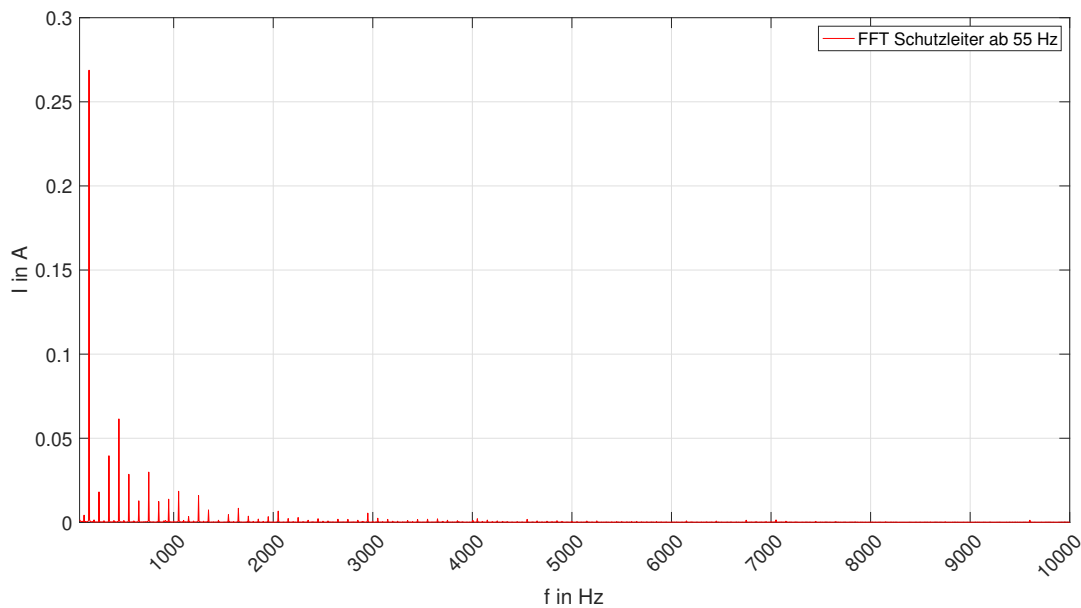


Abbildung 6.5: Messung C1 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz

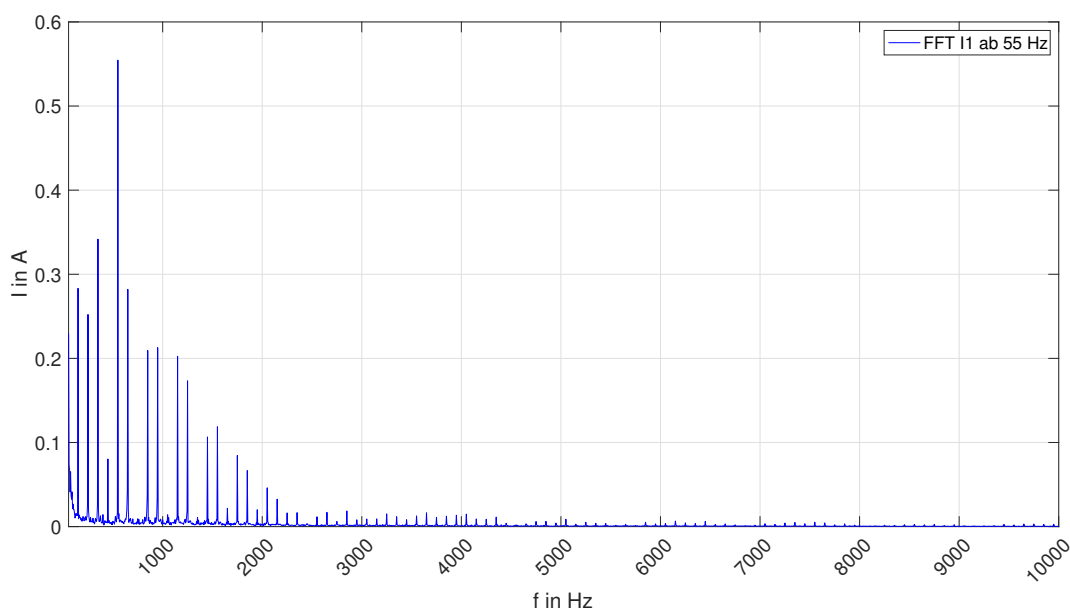


Abbildung 6.6: Messung C1 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz

Die FFT Analyse des Schutzleiters zeigt einen Einfluss höherer Frequenzen bis ungefähr 2 kHz.

Im Strom des Außenleiters zeigt sich ein ausgeprägteres Bild im Bezug auf die FFT Analyse. Wobei auch hier der elementare Anteil bis 2 kHz zu verzeichnen ist.

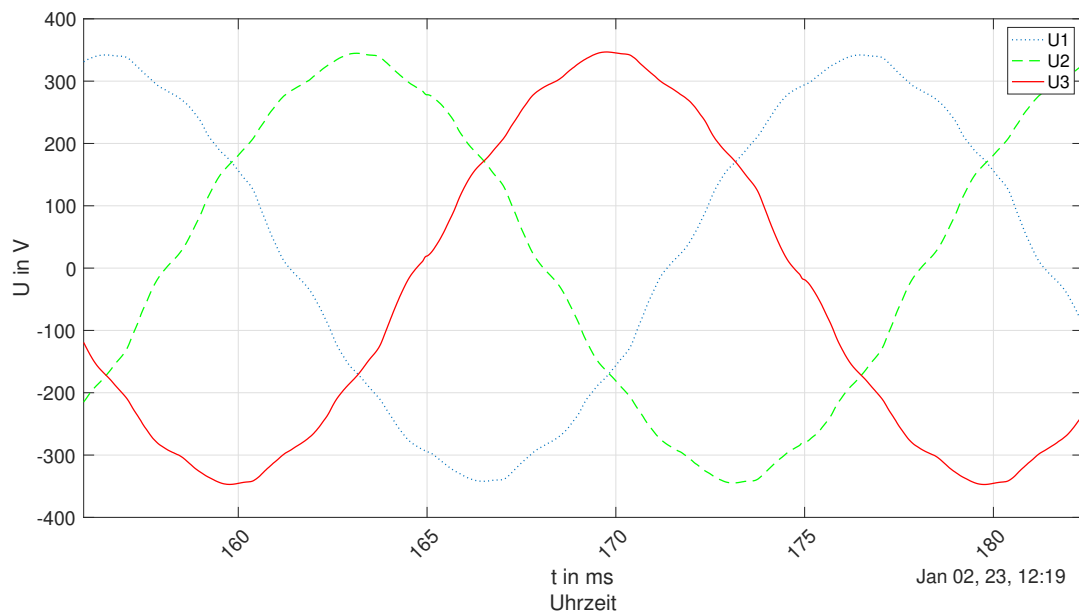


Abbildung 6.7: Messung C1 - Spannung der Außenleiter Oszilloskop

Bei der Spannungsbetrachtung ist zu erkennen, dass sich ein ähnliches Bild wie bei den Außenleiterströmen eingestellt hat. Die leichte Welligkeit deutet auf Oberschwingungen hin.

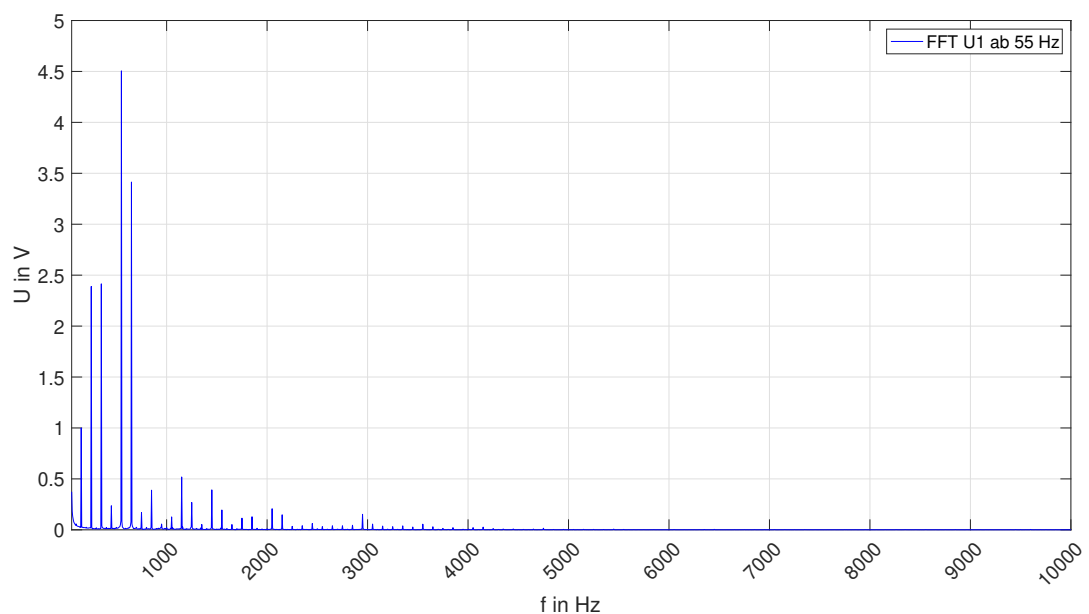


Abbildung 6.8: Messung C1 - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz

Ein einheitliches Bild offenbart die FFT Analyse, Oberschwingungen sind bis ungefähr 2 kHz auffällig.

In abschließender Betrachtung hat die Messung in einem Industriebetrieb gezeigt, dass mit erhöhtem Schutzleiterstrom zu jeder Zeit zu rechnen ist. Gerade leistungsstärkere Maschinen und Frequenzumrichter sorgen für hohe Ableitströme und Oberschwingungsbelastungen. Da aber eine solche Anlage allgemein auch für höhere Ströme ausgelegt ist, stellen die Schutzleiterbelastungen bei ordnungsgemäßer Installation keine Gefahr dar. Dennoch sollte sich der technische Betreuer einer solchen Anlage den Gefahren bewusst sein, um bei routinemäßigen Kontrollen auch einen Blick auf die Auswirkungen der Schutzleiterbelastung zu haben. Dabei sind Erscheinungen durch erhöhte Wärmeentwicklung oder lose Klemmstellen gemeint. Werden Probleme im Datennetz verzeichnet, kann ebenso eine Lösungsfindung bei der Betrachtung des Schutzleiterstromes positiv dazu beitragen.

6.2 C2 - Backmischungshersteller

6.2.1 Anlagenbeschreibung und Messgerätekonfiguration

In einem Industriebetrieb zur Herstellung von Backmischungen wurde eine Messung über 24 h an einem Schaltschrank durchgeführt. Dabei erfolgt die Einspeisung in einem TN-S Netz über zwei parallel verlaufende Anschlussleitungen. Der mitgeführte Schutzleiter wird im Schaltschrank wieder zusammengeführt, sodass der darüber fließende Gesamtstrom ermittelt werden kann.

Daran sind Motoren angeschlossen, welche über Schütze, aber auch über Frequenzumrichter gesteuert werden. Eine speicherprogrammierbare Steuerung übernimmt die Ansteuerung der jeweiligen Geräte.

Die Einstellungen des Messgerätes wurden so gewählt, das alle 2 s ein Messwert aufgenommen wird. Die automatische Auslösung des Oszilloskops wurde auf 2 min definiert. Die Ströme der Außenleiter werden mit den Rogowskispulen gemessen.

6.2.2 Messergebnisse und Auswertung

Zunächst die Betrachtung des Schutzleiterstromes über den Messzeitraum von 24 h.

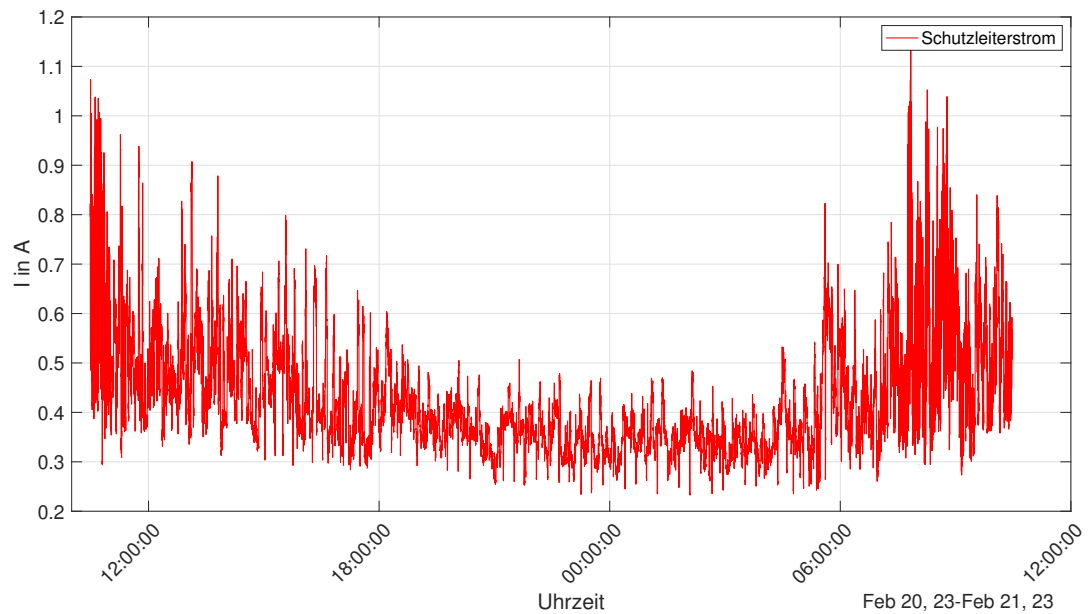


Abbildung 6.9: Messung C2 - Schutzleiterstrom über 24 h

Festzustellen ist ein durchgängiger Schutzleiterstrom zwischen 0,3 und 1,1 A. Dabei ist der gemessene Strom am Tage höher als in der Nacht.

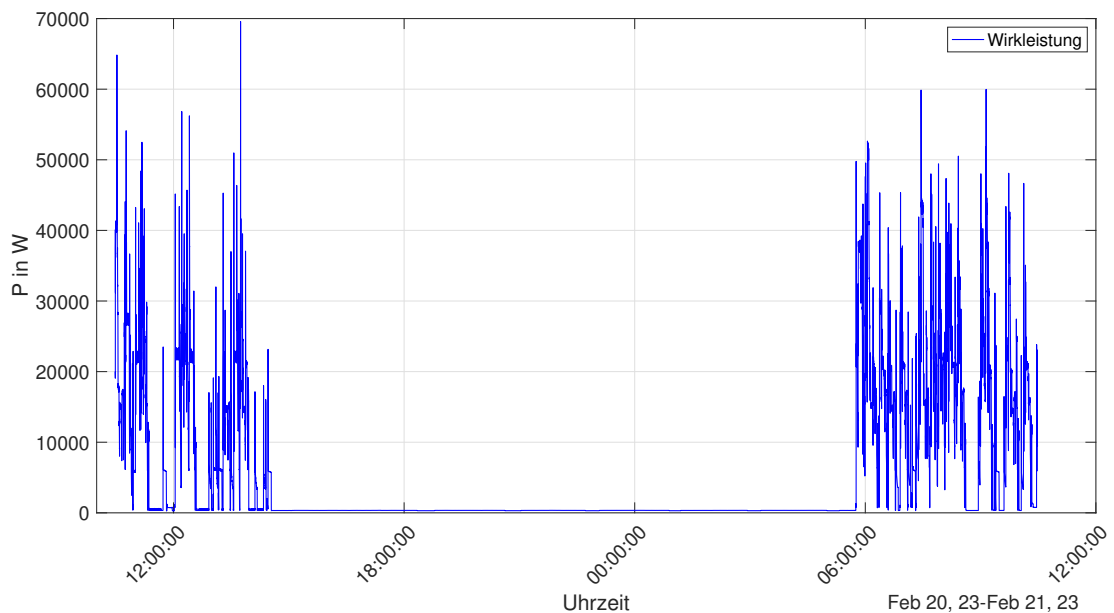


Abbildung 6.10: Messung C2 - Wirkleistung über 24 h

Das Wirkleistungsdiagramm offenbart eine Arbeitszeit ungefähr zwischen 6 und 15 Uhr. Dabei sind Leistungsspitzen zwischen 60 und 70 kW vorhanden. Im Zusammenhang

des Wirkleistungsbedarfes steht auch der Schutzleiterstrom. Pausenzeiten, wie sie in der Wirkleistung zu erkennen sind, schlagen sich auch im Schutzleiter nieder. Aus dieser Betrachtung heraus ist somit festzustellen, dass die Motoren aufgrund ihrer Ableitströme für die Belastung des Schutzleiters verantwortlich sind.

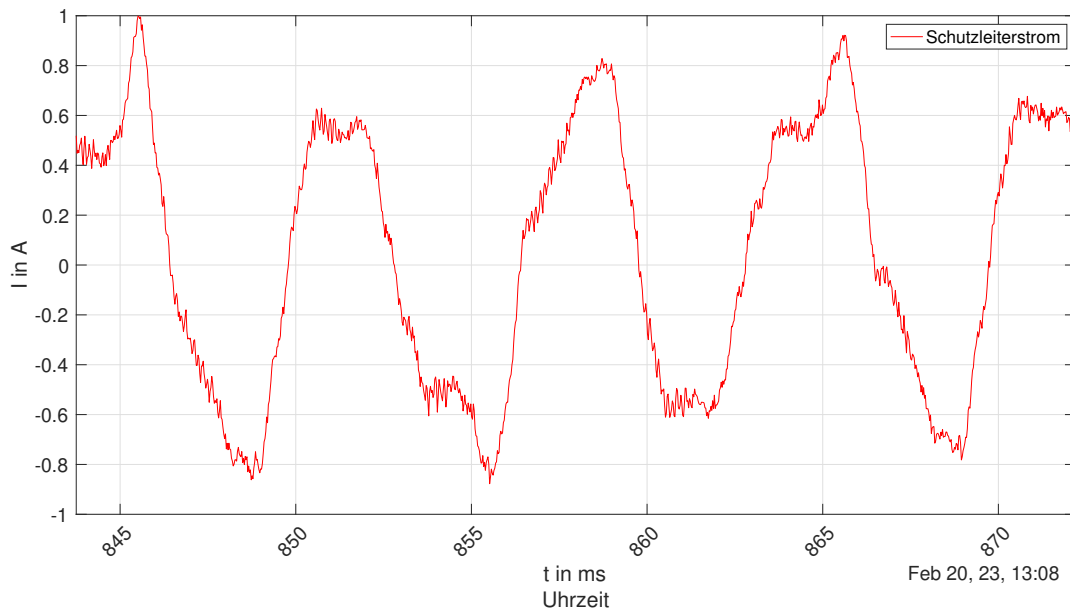


Abbildung 6.11: Messung C2 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode

Im Oszilloskopbild des Schutzleiters ist eine Sinusschwingung zu erkennen. Jedoch ist diese sehr ungleichmäßig, was auf Oberschwingungen hindeutet.

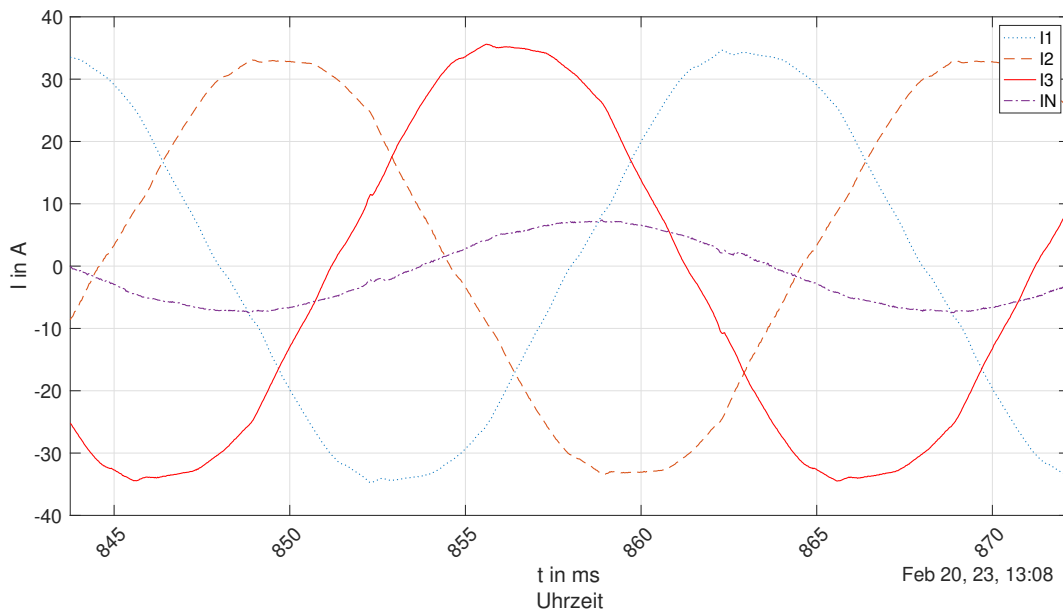


Abbildung 6.12: Messung C2 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode

Die Außenleiter jedoch zeigen einen nahezu perfekten Sinus, mit nur einer sehr geringen Welligkeit.

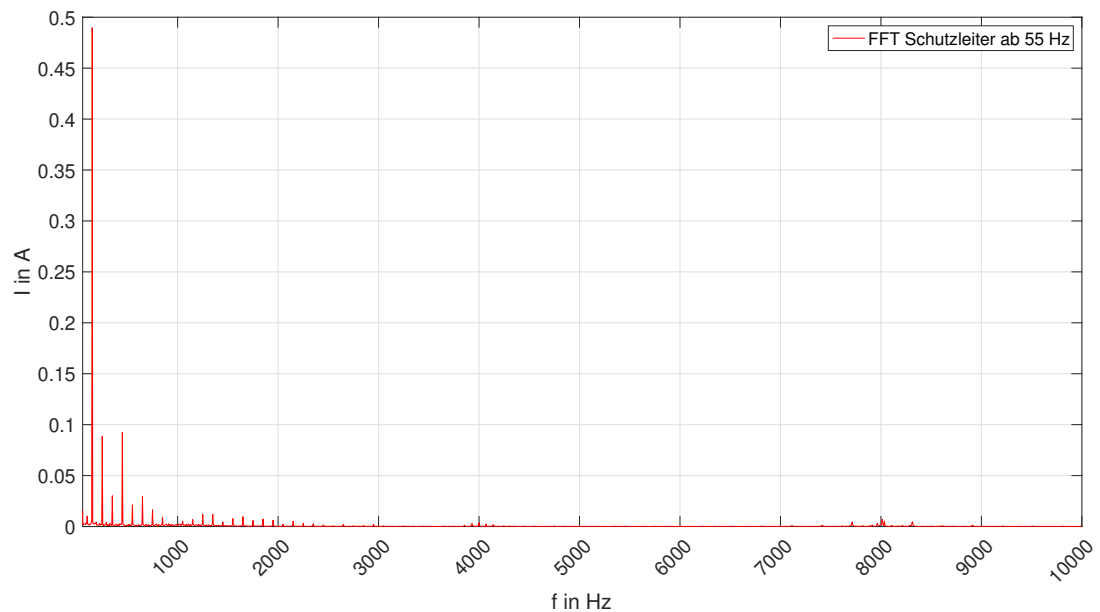


Abbildung 6.13: Messung C2 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz

Die FFT Analyse des Schutzleiters besitzt einen sehr ausgeprägten Anteil bei 150 Hz. Dies ist die dritte Oberschwingung, welche die ungünstige Eigenschaft aufweist, dass sich im dreiphasigen System die Ströme vollständig addieren. Das führt dazu, dass diese einen größeren Anteil als die Grundschwingung aufweist und den verzerrten Sinus im Schutzleiterstrom begründet. Als Ursache sind die höher frequenten Ableitströme der verwendeten Motoren zu nennen.

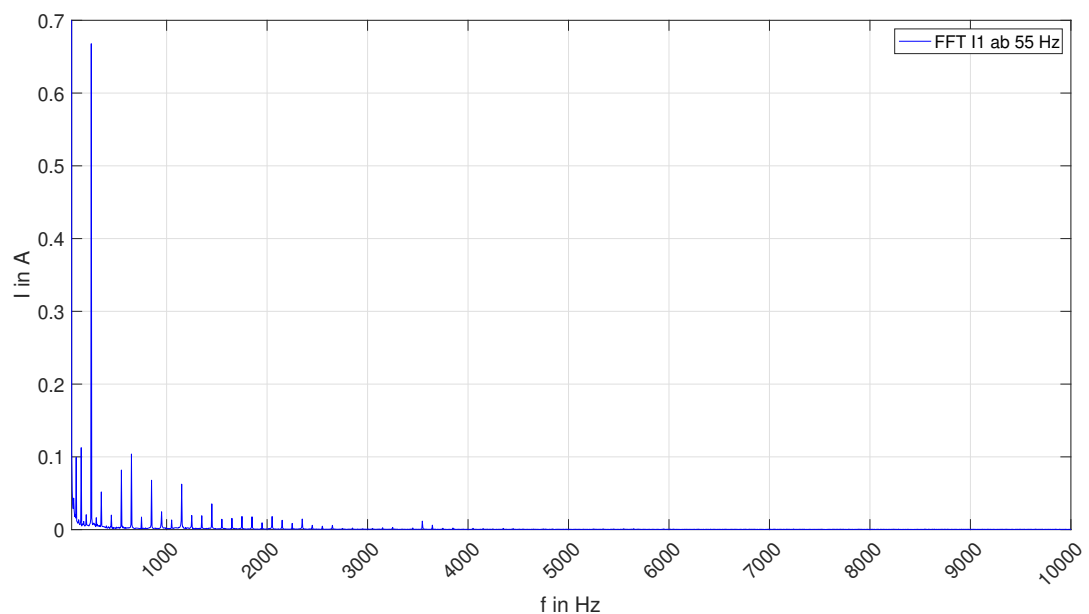


Abbildung 6.14: Messung C2 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz

Auch im Außenleiter zeigt der Strom bei der dritten Oberschwingung eine Ausprägung. Diese ist im Vergleich zur Grundschwingung vernachlässigbar klein, weshalb sich auch

im Oszilloskopbild ein guter Sinus zeigt. Daraus lässt sich erkennen, dass die Eingangsströme der verwendeten Betriebsmittel keine relevanten Oberschwingungen ins Netz einspeisen.

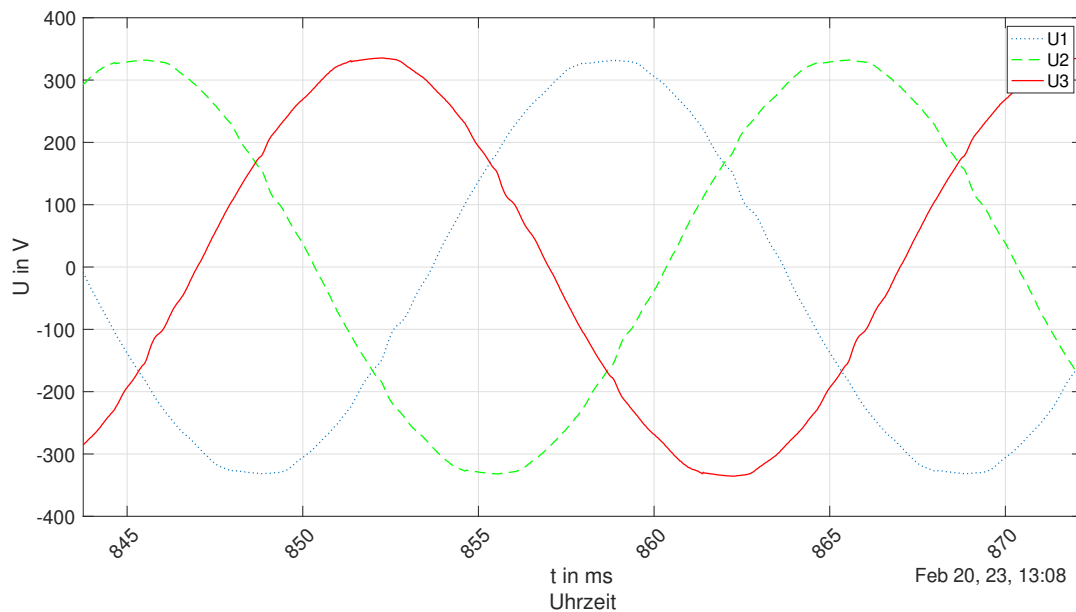


Abbildung 6.15: Messung C2 - Spannung der Außenleiter Oszilloskop

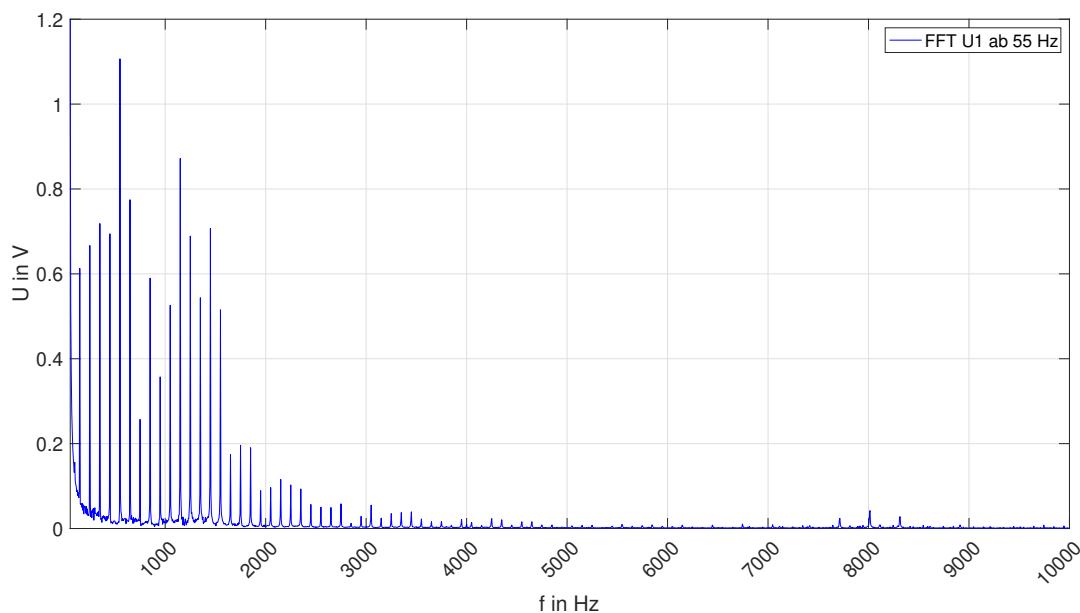


Abbildung 6.16: Messung C2 - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz

Da die Eingangsströme kaum Oberschwingungen aufweisen, schlägt sich dies auch nicht auf die Spannung nieder, welche ebenso im Verhältnis zur 230 V Grundschiwingung vernachlässigbar kleine höherfrequente Anteile zeigt.

Im Ergebnis zeigt die hier gemessene Anlage keine Auffälligkeiten im Hinblick auf Oberschwingungen. Hervorzuheben ist dabei dennoch der Schutzleiterstrom, der nicht

außer Acht gelassen werden sollte. Durch die Überlagerung der Ströme der dritten Oberschwingung ist eine ständige Belastung zu verzeichnen. Im Falle einer Erweiterung könnten die Ströme im Schutzleiter weiter zunehmen. Finden jedoch keine Veränderungen der Anlage statt, hat die Messung ein Ergebnis hervorgebracht, was einen zufriedenstellenden Betrieb der Anlage zeigt.

6.3 Vergleich und Fazit

Beide Vergleichsmessungen zeigen, dass in industriellen Anlagen immer mit einem erhöhten Schutzleiterstrom zu rechnen ist. Dabei ist dieser in beiden Fällen auf den Betrieb von Elektromotoren zurückzuführen. Werden vermehrt Frequenzumrichter zur Drehzahlsteuerung verwendet, steigt die Belastung durch Oberschwingungen. Dadurch wird nicht nur das Netz mehr belastet, sondern auch der Schutzleiter.

Werden leistungsstärkere Maschinen verwendet, steigt ebenso der Schutzleiterstrom. Aufgrund der höheren Auslegung von Querschnitten und der allgemeinen Strombelastung ist dabei eine Gefährdung des Betriebs jedoch auszuschließen, wenn die Anlage ordnungsgemäß konzipiert worden ist.

Um langfristig Gefährdungen auszuschließen, ist es anzuraten, bei Wartungen und Kontrollen den Schutzleiter nicht außer Acht zu lassen und nicht nur auf Durchgängigkeit zu überprüfen. Die gemessenen Ströme können bei lockeren Klemmstellen bereits zu gefährlichen Erwärmungen führen.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die wachsende Anzahl an Elektronik in Haushalt und Gewerbe den Schutzleiter zunehmend belasten. Der in ordnungsgemäßen Anlagen ausreichend belastbar ausgelegte Schutzleiter bietet jedoch aktuell noch genügend Reserven.

Die geringen Lasten in einem Haushalt fallen einzeln nicht ins Gewicht. Da sich an einem Ortsnetztransformator eine Vielzahl von Lasten befindet, ist durch die Summierung dieser Lasten eine Beobachtung der Entwicklungen zu empfehlen. Gerade der Einzug von immer mehr Elektronik und allem voran auch Ladepunkte für Elektrofahrzeuge und Wechselrichter bei Photovoltaikanlagen stellen eine wachsende Gefahr dar.

Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass auch das Risiko für Fehlfunktionen von Schutzeinrichtungen aktuell gering ist. Ebenso sind Auswirkungen auf vorhandene Schutzmaßnahmen aktuell als minimal zu bewerten. Mit Blick auf einen RCD zeigt sich aber auch, dass hier der richtige Typ zum Einsatz kommen muss, damit keine Probleme auftreten.

Im Bezug zum Schutzleiter ist im öffentlichen TN-C Netz eine geringe Gefahr vorhanden, da der PEN Leiter durch seine Funktion als Neutraleiter grundsätzlich ausreichend stromtragfähig ausgelegt ist. Dennoch ist es im Zuge des Netzausbaus zu hinterfragen, ob eine Verstärkung zu empfehlen ist, da selten mit einem konstanten und vorhersehbaren Lastprofil zu rechnen ist. Besonders durch die wachsende dezentrale Energieerzeugung können durch Einflüsse von Neutraleiter und Schutzleiter Summenströme erreicht werden, dessen Höhe nicht abzuschätzen ist.

Das industrielle Umfeld stellt ebenso wie private Haushalte eine steigende Tendenz im Schutzleiterstrom dar. Durch die höheren Lasten, welche auch durchaus schaltbar auftreten, sind die Ströme im Schutzleiter ein vielfaches höher als im Haushalt. Dies führt dazu, dass mit höheren Belastungen zu rechnen ist, welche es zu berücksichtigen gilt.

Konstante Lasten, wie zum Beispiel die Lüftungsanlage, haben in ihrer Anwendung den Vorteil, dass sie im Betrieb einen konstanten Strom im Schutzleiter der Anlage einprägen. Das lässt sie nach einmaliger Messung berechenbar werden.

Mit Blick in die Zukunft ist nach den Untersuchungen festzustellen, dass es immer wichtiger wird, auch den Schutzleiter zu betrachten, was seine Stromtragfähigkeit anbelangt. Dabei reicht es aufgrund der hohen Frequenzen und sich oft ändernden Stromhöhe nicht aus, einfach den Strom zu messen. Vielmehr ist eine Analyse über einen längeren Messzeitraum zu empfehlen, um Schäden zu vermeiden.

Werden dabei unerwartet hohe Werte festgestellt, welche von der Topologie der Anlage selbst abhängen, so sind rechtzeitig Handlungsmaßnahmen zu ergreifen, um den sicheren Betrieb nicht zu gefährden. Gerade der Einzug der dezentralen Energieerzeugung durch regenerative Erzeuger potenziert das wachsende Problem der Netzbelastung. In weiterführenden Untersuchungen kann eine Entwicklung dokumentiert werden. Durch Betrachtung einzelner Betriebsmittel kann sich eine Tendenz ermitteln lassen, die es ebenso ermöglicht, die zusätzlichen Schwierigkeiten bei den Schutzmaßnahmen zu beherrschen.

Diese Messungen und das Wissen darüber, dass der Schutzleiter auch mehr als nur ein Leiter im Fehlerfall ist, bereiten eine Anlage auf den zukunftsicheren Betrieb vor und senken das Gefahrenpotential erheblich, was auch Folgekosten reduziert.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.tuev-nord-group.com/de/startseite/> Abgerufen: 24.10.2022
- [2] <https://www.tuev-nord-group.com/de/unternehmen/ueber-tuev-nord-group/> Abgerufen: 24.10.2022
- [3] <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/tuev-nord-in-deutschland/industrieservice/> Abgerufen: 25.10.2022
- [4] https://www.hensel-electric.de/media/docs/docs_de/service/e-tipp/2008-1-elektrotipp.pdf Abgerufen: 13.01.2023
- [5] <https://www.voltus.de/blog/oberschwingungen-ursachen-und-auswirkungen/> Abgerufen: 01.02.2023
- [6] Karl Friedrich Schäfer. Netzberechnung. Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-658-26732-2. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26733-9>.
- [7] <https://www.entsoe.eu/about/> Abgerufen: 26.10.2022
- [8] <https://www.enbw.com/energie-entdecken/verteilung-und-transport/stromnetz/> Abgerufen: 26.10.2022
- [9] Marc Fengel. Begriffe der Elektroinstallation. ep LERNEN & KÖNNEN. HUSS-MEDIEN GmbH. März 2022. S. 1-3
- [10] DIN VDE 0100-100: Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe. Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2009
- [11] VDE-AR-N 4100: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Niederspannung), Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V., April 2019
- [12] DIN VDE 0100-200: Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 200: Begriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2006
- [13] DIN VDE 0100-510: Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-51: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Allgemeine Bestimmungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 2014
- [14] DIN VDE 0100-410: Errichtung von Niederspannungsanlagen - Teil 4-41: Schutzmaßnahmen - Schutz gegen elektrischen Schlag, Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 2018
- [15] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/widerstand-spez-widerstand/grundwissen/gefahr-durch-strom-und-koerperwiderstand> Abgerufen: 28.10.2022
- [16] DIN EN 61008-1: Fehlerstrom-/Differenzstrom-Schutzschalter ohne eingebauten Überstromschutz (RCCBs) für Hausinstallation und für ähnliche Anwendungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Deutsches Institut für Normung e.V., März 2018

- [17] DIN VDE 0100-430: Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 4-43: Schutzmaßnahmen - Schutz bei Überstrom, Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 2010
- [18] DIN VDE 0100-420: Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 4-42: Schutzmaßnahmen - Schutz gegen thermische Auswirkungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2022
- [19] Ismail Kasikci. Planung von Elektroanlagen. Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-56426-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56427-1>.
- [20] DIN VDE 0298-4: Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen - Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2013
- [21] <https://www.drivecon.de/de/lexikon/schutzleiter#:~:text=Der%20Schutzleiter%20stellt%20somit%20eine,Fehlerstromschutzschalter%20damit%20zum%20Ausl%C3%B6sen%20bringen.> Abgerufen: 31.10.2022
- [22] <https://diybook.de/bauen-renovieren/elektroarbeiten/elektroinstallation/erdleiter-allem-wen-schuetzt#articlegallery> Abgerufen: 01.11.2022
- [23] DIN VDE 0100-540: Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-54: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Erdungsanlagen und Schutzleiter, Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2012
- [24] <https://www.sma.de/partner/expertenwissen/wechselrichter-leistungselektronik-fuer-eine-saubere-energieversorgung> Abgerufen: 12.11.2022
- [25] Giuliano Fuchs. Batteriespeicher für Photovoltaik. <https://www.net4energy.com/> Abgerufen: 18.11.2022
- [26] Stefan Fassbinder. Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen. Elektropraktiker Thema. HUSS-MEDIEN GmbH. März 2014.
- [27] http://derschlaufuchs.de/schlaufuchs_web/mathematik/mathematik_lernmaterial/hoehere_mathematik/FFT/FFT.html Abgerufen: 22.01.2023
- [28] <https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectid=44a989ce%5F995f%5F4d48%5Facc6830258f3b47c#:~:text=Die%20dritte%20Oberschwingung%20mit%20der,dreifacher%20150%20Hz%20DStrom%20fließen.> Abgerufen: 26.11.22
- [29] David Chapman. Leitfaden Netzqualität, Oberschwingungen - Ursachen und Auswirkungen. Deutsches Kupferinstitut. Mai 2002.
- [30] Stefan Fassbinder. LED-Licht: Von der Innovation zum Stand der Technik. Elektropraktiker. HUSS-MEDIEN GmbH. April 2019.
- [31] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/Netzausbau/faq-netzausbau-03.html#:~:text=Die%20Abkürzung%20NOVA%20steht%20für,die%20vorhandenen%20Leitungen%20zu%20verstärken.> Abgerufen: 04.11.2022

- [32] [https://www.eltnetworks.pl/pl-de/blog/2022/vorteile-und-nachteile-der-hvdc-stromubertragung/#: :text=Die%20Vorteile%20des%20HVDC%2DSystems, Windparks%20\(Offshore\)%20zu%20übertragen](https://www.eltnetworks.pl/pl-de/blog/2022/vorteile-und-nachteile-der-hvdc-stromubertragung/#: :text=Die%20Vorteile%20des%20HVDC%2DSystems, Windparks%20(Offshore)%20zu%20übertragen). Abgerufen: 04.11.2022
- [33] Dr.Ing. Serafin von Roon. Niederspannungsgleichstromnetze, Vor- und Nachteile <https://www.ffe.de/> Abgerufen: 30.11.2022
- [34] Adolf J. Schwab, Wolfgang Kürner. Elektromagnetische Verträglichkeit. Springer, 2011. ISBN: 978-3-642-16609-9. DOI: 10.1007/978-3-642-16610-5
- [35] DIN EN 61000-2-2: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 2-2: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 2020
- [36] <https://www.weka.de/produktsicherheit/emv-massnahmen-2/#: :text=EMV%2D Ma%C3%9Fnahmen%20sind%20erforderliche%20Aktivitäten,in%20der%20anschie%C3%9Fenden%20Betriebsphase%20die> Abgerufen: 07.11.2022
- [37] Dipl. Ing. Christian Mieslinger. Ströme auf PE/PA-Leitern in Anlagen mit Antriebstechnik. Elektropraktiker. HUSS-MEDIEN GmbH. Mai 2017
- [38] Dipl. Ing. Klaus Bödecker, Dipl. Ing. Robert Kindermann. Ableit-/Fehler- und/oder Differenzströme. Elektropraktiker. HUSS-MEDIA GmbH. September 2007
- [39] <https://www.baunetzwissen.de/elektro/fachwissen/schutz/fehlerstrom-schutzeinrichtungen-rcds-oder-fi-schutz-153024> Abgerufen: 28.11.2022
- [40] https://www.uv-bund-bahn.de/fileadmin//Dokumente/Publicationen/BahnPraxis_E/BahnPraxisE-2018_02.pdf Abgerufen: 28.11.2022
- [41] Tobias Bozem, Dipl. Ing. Bruno Brand. Ableitströme in elektrischen Anlagen. Elektropraktiker. HUSS-MEDIEN GmbH. April 2009
- [42] Dipl. Ing. Klaus Bödecker, Dipl. Ing. Robert Kindermann. Ableit-/Fehler- und/oder Differenzströme. Elektropraktiker. HUSS-MEDIA GmbH. Oktober 2007
- [43] A.Eberle GmbH & Co. KG. PQ-Box 200. <https://www.a-eberle.de/produkte/werkzeug-fuer-den-pq-experten-pq-box-200/> Abgerufen: 10.11.2022

Abkürzungsverzeichnis

AFDD	Arc Fault Detection Device / Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESD	Electrostatic Discharge / elektrostatische Entladung
FFT	Fast Fourier Transformation / Schnelle Fourier Transformation
FU	Frequenzumrichter
ISPE	Isolierte Sternpunkterdung
KNOSPE	Kurzzeitig Niederohmige Sternpunkterdung
LED	Lichtemittierende Diode
NOSPE	Niederohmige Sternpunkterdung
NSHV	Niederspannungshauptverteilung
PE	Schutzleiter
PEN	Gemeinsamer Schutz- und Neutralleiter
PFC	power factor correktion / Leistungsfaktor-Korrektur
RCD	Residual Current Device / Fehlerstromschutzschalter
RESPE	Resonanzsternpunkterdung
TSO	Transmission System Operator / Übertragungsnetzbetreiber
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VdS	VdS Schadenverhütungs GmbH

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung eines TN-C-S-Netzes [10]	4
2.2	Darstellung eines TT-Netzes [10]	5
2.3	Darstellung eines IT-Netzes [10]	5
2.4	Gefahr Wechselstrom in Abhängigkeit von Strom und Zeit [15]	7
2.5	Beispiel eines Schutzleiters [22]	10
2.6	Darstellung der Pulsweitenmodulation [24]	12
2.7	Diagramm Grundschiwingung und Oberschwingung [29]	13
2.8	Strom- und Spannungsperiode LED-Straßenbeleuchtung [30]	14
2.9	Darstellung kompensierte Sternpunktterdung [19]	16
2.10	Kapazitive Ströme am Frequenzumrichter [41]	19
2.11	Induktiv gekoppelte Kreisströme im Antriebssystem [37]	20
2.12	Funktionsweise RCD einfach [39]	21
2.13	Messpunkte der Ströme einer Anlage [38]	23
3.1	PQ-Box 200 mit Anschlussbeschriftung [43]	25
3.2	Rogowskispulen 1-3000 A [43]	26
3.3	Strommesszange ab 0,5 mA [43]	26
3.4	Mini-Stromzangen	26
3.5	Spannungsabgriff	26
3.6	WinPQ mobil Hauptansicht	28
3.7	Grundeinstellung Messung und Messgerät	28
3.8	Beispielhafter Messaufbau	30
3.9	Display Messgerät	30
3.10	Darstellung Onlinemessung WinPQ mobil	31
4.1	Messung A - Schutzleiterstrom über 24 h	34
4.2	Messung A - Wirkleistung über 24 h	34
4.3	Messung A - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode	35
4.4	Messung A - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode	36
4.5	Messung A - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz	36
4.6	Messung A - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz	37
4.7	Messung A - Spannung der Außenleiter Oszilloskop	37
4.8	Messung A - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz	38
4.9	Messung A - Schutzleiterstrom bei Betrieb Kaffeevollautomat	38
5.1	Messung B1 - Schutzleiterstrom über 24 h	41
5.2	Messung B1 - Wirkleistung über 24 h	42
5.3	Messung B1 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode	43
5.4	Messung B1 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode	43
5.5	Messung B1 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz	44
5.6	Messung B1 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz	44
5.7	Messung B1 - Spannung der Außenleiter Oszilloskop	45
5.8	Messung B1 - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz	46
5.9	Messung B2 - Schutzleiterstrom über 24 h	47
5.10	Messung B2 - Strom I1 über 24 h	48
5.11	Messung B2 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode	48
5.12	Messung B2 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode	49
5.13	Messung B2 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz	49
5.14	Messung B2 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz	50
6.1	Messung C1 - Schutzleiterstrom über 24 h	51

6.2	Messung C1 - Wirkleistung über 24 h	52
6.3	Messung C1 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode	53
6.4	Messung C1 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode	53
6.5	Messung C1 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz	54
6.6	Messung C1 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz	54
6.7	Messung C1 - Spannung der Außenleiter Oszilloskop	55
6.8	Messung C1 - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz . . .	55
6.9	Messung C2 - Schutzleiterstrom über 24 h	57
6.10	Messung C2 - Wirkleistung über 24 h	57
6.11	Messung C2 - Schutzleiterstrom Oszilloskop über einer Periode	58
6.12	Messung C2 - Ströme Außenleiter und N Oszilloskop über einer Periode	58
6.13	Messung C2 - Schutzleiterstrom FFT Analyse, ab 55 Hz	59
6.14	Messung C2 - Strom erster Außenleiter FFT Analyse, ab 55 Hz	59
6.15	Messung C2 - Spannung der Außenleiter Oszilloskop	60
6.16	Messung C2 - FFT der Spannung im ersten Außenleiter, ab 55 Hz . . .	60

Tabellenverzeichnis

2.1	Kennbuchstaben der Netzformen [9]	3
2.2	Maximale Abschaltzeiten im TN-Netz bei Wechselspannung [14]	7
2.3	Mindestquerschnitt Schutzleiter aus Kupfer [23]	11