



**HTBLuVA St. Pölten**  
**Höhere Abteilung Elektrotechnik**  
3100 St. Pölten, Waldstrasse 3      Tel: 02742-75051-300  
Homepage: <http://et.htlstp.ac.at>      E-Mail: [et@htlstp.ac.at](mailto:et@htlstp.ac.at)



Projekt-Titel:

# NETZRÜCKWIRKUNGEN

Mitglieder:

LABENBACHER MICHAEL  
NEULINGER DAVID  
AUGUST LOIBL  
EDER DANIEL

Projektort: HTBL u. VA in St. Pölten

Projektdatum: 5. Oktober 2015

Projektnummer: 01

Projektgruppe: 1

Fach: Laboratorium

Jahrgang/Klasse: 2015/16 5AHET

Lehrer: Dipl.-Ing. Dr. Manfred Berger

<b>Protokollführer:</b> <i>Labenbacher Michael</i>	<b>Unterschriften:</b>	<b>Note:</b>
---	------------------------	--------------

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Verwendete Geräte &amp; Betriebsmittel</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Einstieg in die Fourier-Analyse</b>	<b>4</b>
3.1	Aufgabenstellungen . . . . .	4
3.2	Messschaltung . . . . .	4
3.3	Sinus-Signal . . . . .	5
3.3.1	Mathematische Beschreibung . . . . .	5
3.3.2	Messvorgang . . . . .	6
3.4	Dreieck-Signal . . . . .	8
3.4.1	Mathematische Beschreibung . . . . .	8
3.4.2	Messvorgang . . . . .	10
3.4.3	Gegenüberstellung . . . . .	12
3.5	Rechteck-Signal . . . . .	13
3.5.1	Mathematische Beschreibung . . . . .	13
3.5.2	Messvorgang . . . . .	15
3.6	Auswertung . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Netzurückwirkungen einzelner Verbraucher</b>	<b>17</b>
4.1	Aufgabenstellungen . . . . .	17
4.2	Messschaltung . . . . .	17
4.3	Einführung Fluke-Messgerät V1 . . . . .	18
4.4	ohne Verbraucher . . . . .	19
4.4.1	Messvorgang . . . . .	19
4.4.2	Auswertung . . . . .	21
4.5	mit Glühbirne . . . . .	22
4.5.1	Messvorgang . . . . .	22
4.5.2	Auswertung . . . . .	23
4.6	mit Energiesparlampe . . . . .	24
4.6.1	Messvorgang . . . . .	24
4.6.2	Auswertung . . . . .	25

4.7	mit LED . . . . .	26
4.7.1	Messvorgang . . . . .	26
4.7.2	Auswertung . . . . .	27
4.8	mit Netzteil . . . . .	28
4.8.1	Messvorgang . . . . .	28
4.8.2	Auswertung . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Netzurückwirkungen mehrerer Verbraucher</b>	<b>30</b>
5.1	Aufgabenstellungen . . . . .	30
5.2	Messschaltung . . . . .	30
5.3	mit Netzteil & Energiesparlampe . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Resümee</b>	<b>33</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>34</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>36</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>37</b>

# 1 Einleitung

In der heutigen Zeit existieren, weder in Betrieben, noch zu Hause, kaum noch Verbraucher, die eine „schöne“ sinusförmige Stromaufnahme haben. Die einzigen Verbleibenden dieser Art wären ohmsche Verbraucher, wie z. B. Heizgeräte, konventionelle Leuchtstofflampen, etc..

Bei diesen Übungen sehen wir uns nun die typischsten Verbraucher mit nicht-sinusförmiger Stromaufnahme an, sprich wir analysieren dessen Verhalten, Leistungsaufnahme und das Spektrum. Damit wollen wir zeigen, welche Auswirkungen, auf das Netz und andere Verbraucher, solche nicht-sinusförmigen Verbraucher haben.

In den nachfolgenden Kapiteln werden einige Grundkenntnisse der Elektrotechnik vorausgesetzt und vor allem ist es wichtig ein gutes Verständnis bezüglich der Fourier-Transformation mitzubringen. Eine kurze Wiederholung wird trotzdem angeführt:

Ist  $f(t)$  eine periodische Funktion mit der Schwingungsdauer  $T$ , dann gilt:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(k \cdot \omega t) + b_k \cdot \sin(k \cdot \omega t) \quad (1.1)$$

$$\text{mit } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f \quad \& \quad k \dots \text{ganzzahlig}$$

$T \dots \dots$  Schwingungsdauer

$\omega \dots \dots$  Kreisfrequenz

$f \dots \dots$  Frequenz

Für die Amplituden-Phasen-Form einer Fourier-Reihe gilt:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(k \cdot \omega t + \varphi_k) \quad (1.2)$$

$$\text{mit } A_0 = \frac{a_0}{2} \quad \& \quad A_K = \sqrt{a_K^2 + b_K^2} \quad \& \quad \varphi_K = \frac{a_K}{b_K}$$

Dabei lassen sich die Koeffizienten  $a_0$ ,  $a_K$ ,  $b_K$  folgendermaßen berechnen:

$$a_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) dt \tag{1.3}$$

$$a_K = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \cos(k \cdot \omega t) dt \tag{1.4}$$

$$b_K = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \sin(k \cdot \omega t) dt \tag{1.5}$$

Mit Hilfe der Fourier-Analyse können wir nun die auftretenden Oberschwingungen behandeln. Jede Oberschwingung hat also eine Amplitude und Phasenlage, wobei wir mit unserem Messgerät V1 (Fluke) nur die Amplitude messen können und nicht die Phasenlage, welche jedoch eine hohe Bedeutung hat, was wir im Kapitel 5 sehen werden, z. B. beim sogenannten Selbstregulierungseffekt. Wir werden in den nachfolgenden Kapiteln ebenfalls erkennen, dass hier nicht alle Frequenzen auftreten, sondern nur bestimmte Vielfache der Grundschiwingung.

## 2 Verwendete Geräte & Betriebsmittel

Bez.	Betriebsmittel	Beschreibung/Typ	Geräte-Nr.
<i>O1</i>	Oszilloskop	Tektronix TDS 2004C - Four Channel Oszilloscope	GA - 05/04
<i>FG1</i>	Funktionsgenerator	Voltcraft 7202 Sweep Function Generator	EA - 01/03
<i>V1</i>	Messgerät	Fluke 434 Power Quality Analyzer	-
<i>LA1</i>	Lampenfassung	-	G1 - 1/6
<i>E1</i>	Glühbirne	Philips 200 W 220 – 235 V	-
<i>E2</i>	Energiesparlampe	18 W 230 V	-
<i>E3</i>	LED-Lampe	6 W 230 V 50 Hz	-
<i>N1</i>	Netzteil	belastet mit 6,2 Ω 13,7 A max.	-

Tabelle 2.1: Verwendete Geräte & Betriebsmittel

# 3 Einstieg in die Fourier-Analyse

## 3.1 Aufgabenstellungen

Der erste Abschnitt dieser Laborübung soll zeigen, wie man mit Hilfe eines Oszilloskops eine Fourier-Analyse durchführt und welche Spektren verschiedenen Signalformen aufweisen.

Die Aufgabe ist es nun, das Spektrum von einem Sinus-, Dreieck- und Rechteck-Signal aufzunehmen und mit Rechenwerten zu vergleichen. Als Computeralgebrasystem wird dabei Maxima verwendet.

## 3.2 Messschaltung

Die Schaltung zur „einfachen“ Untersuchung von Signalen besteht aus einem Funktionsgenerator, Oszilloskop und Bayonet Neill–Concelman (BNC)-Strippe.

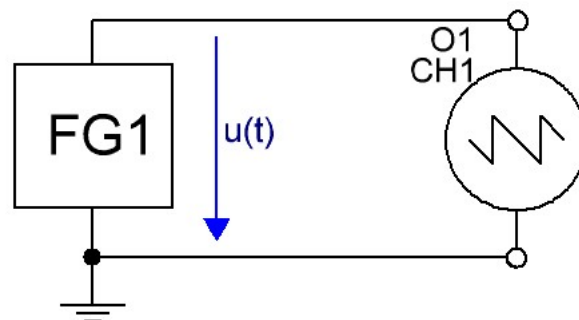


Abbildung 3.1: Messschaltung zur Analyse einzelner Signale

## 3.3 Sinus-Signal

### 3.3.1 Mathematische Beschreibung

Bei einem Sinus-Signal  $u(t) = \hat{u} \sin(\omega t)$  erhält man natürlich sinngemäß ein Spektrum mit der Grundschwingung und der dazugehörigen Amplitude, welches bei  $\hat{u} = 5\text{ V}$  folgende Form aufweist:

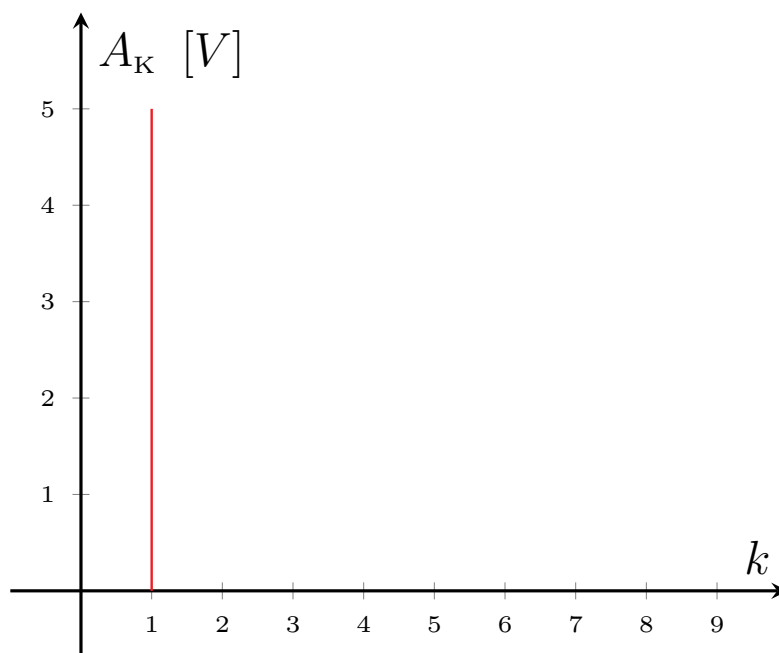
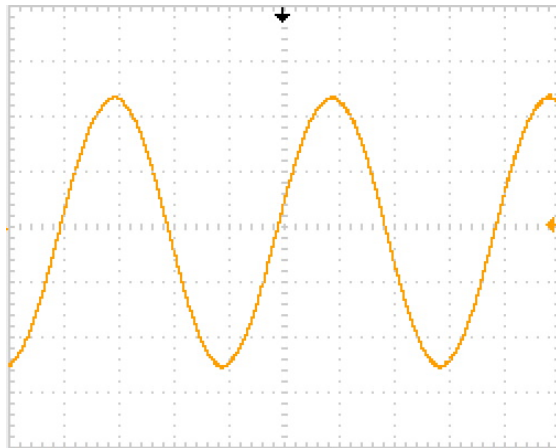


Abbildung 3.2: Amplitudenspektrum eines Sinus-Signals



### 3.3.2 Messvorgang

Es wurde nun ein Sinus-Signal mit einer Frequenz  $f = 50 \text{ Hz}$  und einer Amplitude von  $5 \text{ V}$  mit dem Funktionsgenerator erzeugt. Dies ergab folgende Oszilloskopaufnahme:



$y$ -Achse .....  $u(t)$   
 $x$ -Achse .....  $t$   
 $u(t) \dots [2 \text{ V/Div.}]$  (gelb)  
 $M \dots [5 \text{ ms/Div.}]$   
 horiz. Skalenteilung

Abbildung 3.3: Oszilloskopaufnahme des Sinus-Signals

Als nächstes wird nun die interne Referenzspannung vom Oszilloskop gemessen, indem die Amplitude des Signales  $u(t)$  und die Amplitude der Grundschiwingung in  $\text{dB}$  gemessen wird und dann kann nach folgender allgemeinen Formel vorgegangen werden:

$$u_{\text{dB}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_e} \right) = 20 \cdot \lg \left( \frac{U_a}{U_e} \right) \quad (3.1)$$

, wobei  $u_a$  das Sinus-Signal und  $u_e$  die interne Referenzspannung  $u_{\text{ref}}$  darstellt.

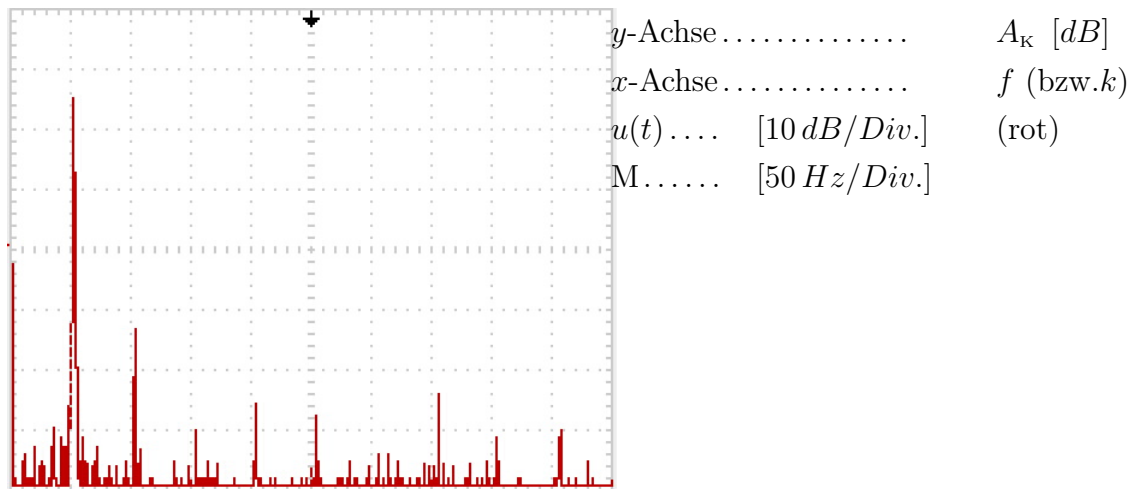


Abbildung 3.4: Oszilloskopaufnahme der  
FFT-Analyse des Sinus-  
Signals

Durch die Fast Fourier-Transformation (FFT) erhielten wir die Amplitudenwerte der beteiligten Frequenzen, wobei die Samplerate  $1\text{ kS/s}$  (1000 Abtastungen pro Sekunde) betrug und die Fensterfunktion war Hanning.

Auf der Oszilloskopaufnahme 3.4 ist erkennbar, dass durch den Funktionsgenerator ein gewisser Gleichanteil, sowie kleine Anteile von Oberschwingungen vorhanden sind. Die Messung von der Grundswingungsamplitude ergab:

$$A_K = 66\text{ dB}$$

Somit kann die interne Referenzspannung mit der Formel 3.1 berechnet werden:

$$\hat{u}_{\text{ref}} = \frac{\hat{u}}{\frac{u_{\text{dB}}}{10 \cdot 20}} = \frac{5\text{ V}}{\frac{66\text{ dB}}{10 \cdot 20}} = 2,5\text{ mV}$$

Mit Hilfe dieser gemessenen Referenzspannung können nun in den nachfolgenden Abschnitten die Amplitudenwerte der einzelnen Harmonischen berechnet werden.

## 3.4 Dreieck-Signal

### 3.4.1 Mathematische Beschreibung

Ein Dreieck-Signal  $u(t)$  lässt sich folgendermaßen mit Hilfe von Fourier nach den Formeln zerlegen:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) dt = \frac{2}{T} \cdot \left[ \int_0^{T/2} \frac{4\hat{u}}{T} \cdot t - \hat{u} dt + \int_{T/2}^T \frac{-4\hat{u}}{T} \cdot t + 3\hat{u} dt \right] = \\
 &= \frac{2}{T} \cdot \left[ \left[ \frac{2\hat{u}}{T} \cdot t^2 \right]_0^{T/2} + \left[ -\hat{u} \cdot t \right]_0^{T/2} + \left[ -\frac{2\hat{u}}{T} \cdot t^2 \right]_{T/2}^T + \left[ 3\hat{u} \cdot t \right]_{T/2}^T \right] = \\
 &= \frac{2}{T} \cdot \left[ \frac{\hat{u}T}{2} - \frac{\hat{u}T}{2} - 2\hat{u}T + \frac{\hat{u}T}{2} + 3\hat{u}T - \frac{3\hat{u}T}{2} \right] = 0
 \end{aligned}$$

$$a_k = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \cos(k \cdot \omega t) dt = \frac{4\hat{u} \cdot ((-1)^k - 1)}{k^2 \pi^2} \quad \text{zur Nachrechnung empfohlen}$$

$$b_k = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \sin(k \cdot \omega t) dt = 0 \quad \text{zur Nachrechnung bzw. „Denken“ empfohlen}$$

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4\hat{u} \cdot ((-1)^k - 1)}{k^2 \pi^2} \cdot \cos(k \cdot \omega t)$$

Dreieck

Bei einem Dreieck-Signal mit  $\hat{u} = 5\text{ V}$  erhält man folgendes Amplitudenspektrum:

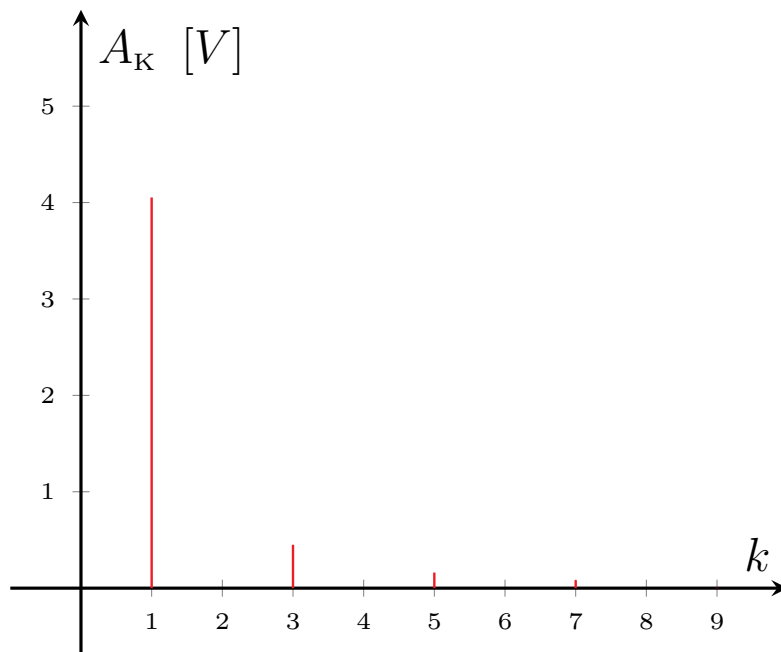


Abbildung 3.5: Amplitudenspektrum eines Dreieck-Signals

### 3.4.2 Messvorgang

Nun wird ein Dreieck-Signal mit einer Frequenz  $f = 50 \text{ Hz}$  und einer Amplitude von  $5 \text{ V}$  erzeugt und am Oszilloskop angezeigt:

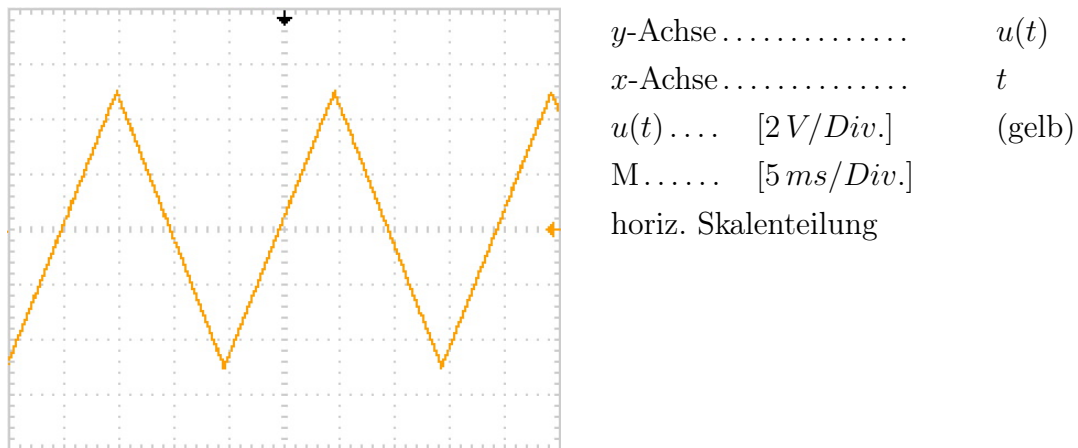
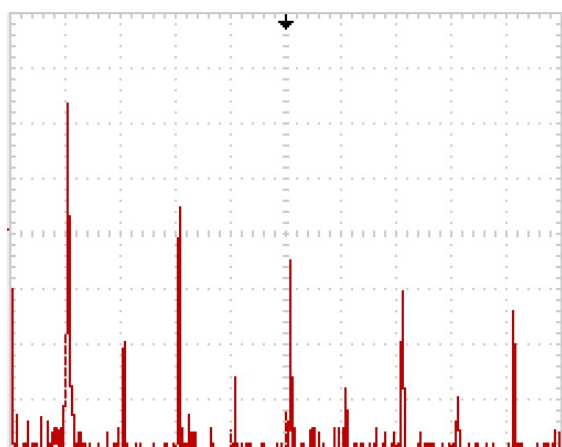


Abbildung 3.6: Oszilloskopaufnahme des Dreieck-Signals

Man kann schon erkennen, dass ein solches Signal, Oberschwingungsanteile beinhaltet und um dies zu analysieren, wurde eine FFT durchgeführt.



$y$ -Achse .....	$A_K$ [dB]
$x$ -Achse .....	$f$ (bzw. $k$ )
$u(t)$ ....	[10 dB/Div.] (rot) CH1
$M$ .....	[50 Hz/Div.]

Abbildung 3.7: Oszilloskopaufnahme  
der FFT-Analyse des  
Dreieck-Signals

Das Bild 3.7 zeigt, dass neben der Grundschwingung mit  $f_1 = 50 \text{ Hz}$  noch weitere Anteile vorhanden sind, dessen Amplituden mit steigender Frequenz abnehmen. Es treten dabei nur bestimmte Vielfache der Grundschwingung auf, nämlich die ungeradzahligen (3, 5, 7, 9, 11, 13, ...)

Nun wurden die einzelnen Amplituden in dB der Grundschwingung und der 3., 5., 7. und 9. Harmonischen gemessen und umgerechnet in  $V$ .

### 3.4.3 Gegenüberstellung

Gegenüberstellung zwischen Mess- und Rechenwerten:

	$\hat{u}_1$	$\hat{u}_3$	$\hat{u}_5$	$\hat{u}_7$	$\hat{u}_9$
Gemessen:	4,00 V	0,44 V	0,16 V	0,08 V	0,05 V
Berechnet:	4,05 V	0,45 V	0,16 V	0,08 V	0,05 V

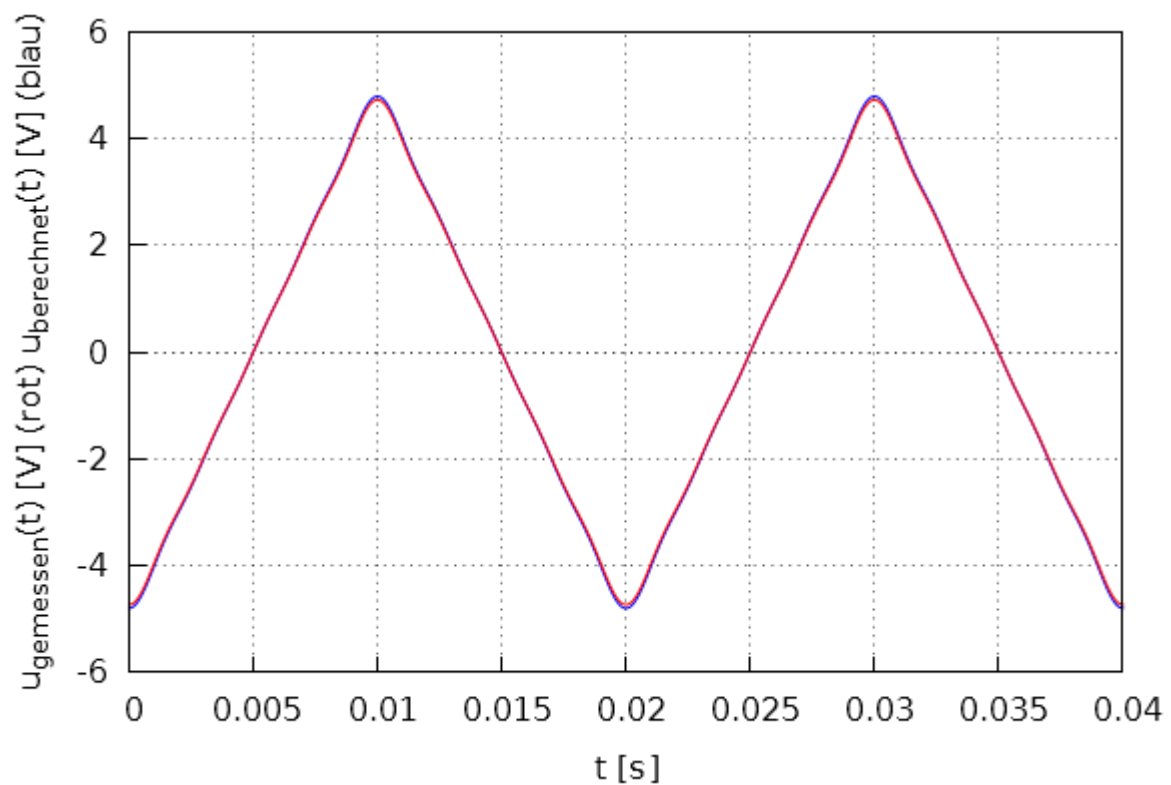


Abbildung 3.8: Gegenüberstellung von Mess- und Rechenwerten: Dreieck-Signal bis zur 9. Harmonischen

## 3.5 Rechteck-Signal

### 3.5.1 Mathematische Beschreibung

Ein rechteckförmiges, periodisches Signal lässt sich mit Hilfe von Fourier folgendermaßen in Sinusschwingungen zerlegen:

$a_0 = 0$       zur Nachrechnung bzw. „Denken“ empfohlen

$a_k = 0$       zur Nachrechnung bzw. „Denken“ empfohlen

$$b_k = \frac{2\hat{u}}{k\pi} \cdot ((-1)^k - 1)$$

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\hat{u}}{k\pi} \cdot ((-1)^k - 1) \cdot \sin(k \cdot \omega t)$$

---

Rechteck



Bei einem Rechteck-Signal mit  $\hat{u} = 1\text{ V}$  erhält man folgendes Amplitudenspektrum:

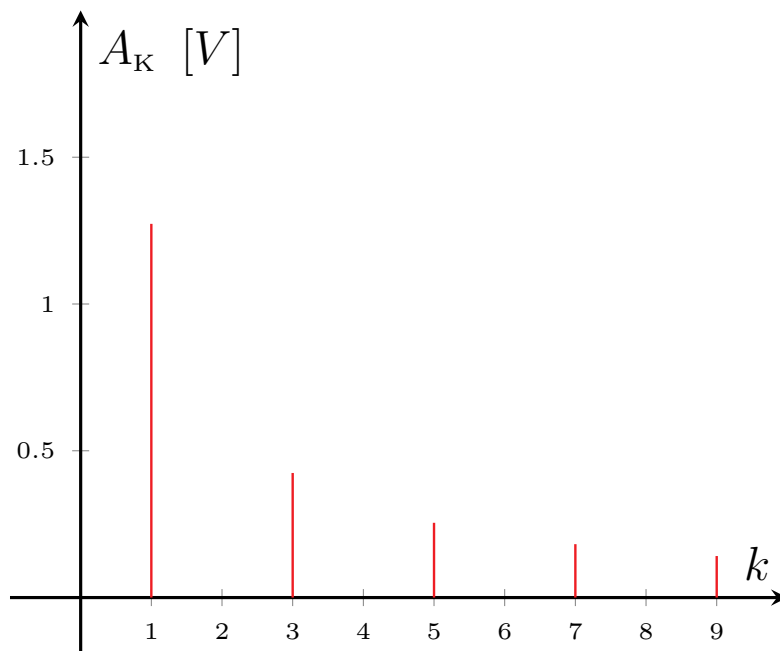
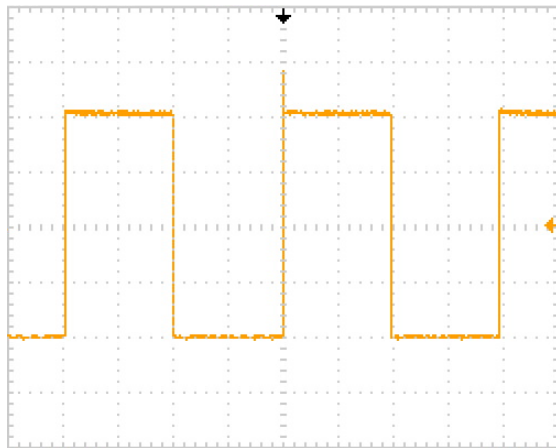


Abbildung 3.9: Amplitudenspektrum eines Rechteck-Signals

### 3.5.2 Messvorgang

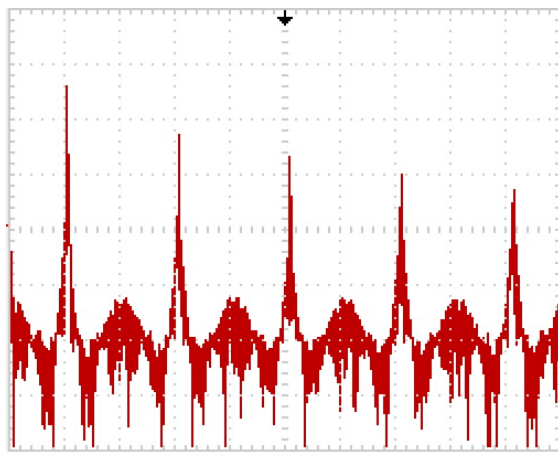
Am Funktionsgenerator wird nun ein Rechteck-Signal mit  $f = 50\text{ Hz}$  und einer Amplitude von  $1\text{ V}$  erzeugt, was am Oszilloskop folgendes anzeigen sollte:



$y$ -Achse.....	$u(t)$	
$x$ -Achse.....	$t$	
$u(t) \dots$	$[500\text{ mV/Div.}]$	(gelb) CH1
M.....	$[5\text{ ms/Div.}]$	horiz. Skalenteilung

Abbildung 3.10: Oszilloskopaufnahme  
des Rechteck-Signals

Die steilen Flanken, welche in der Abb. 3.10 ersichtlich sind, weisen auf starke Oberschwingen hin, was in der nachfolgenden FFT Abb. 3.11 analysiert werden.



$y$ -Achse .....	$A_K$ [dB]
$x$ -Achse .....	$f$ (bzw. $k$ )
$u(t)$ ....	[10 dB/Div.] (rot)
M .....	[50 Hz/Div.]

Abbildung 3.11: Oszilloskopaufnahme  
der FFT-Analyse des  
Rechteck-Signals

Die FFT liefert eine große Anzahl an Oberschwingungen, dessen Amplituden relativ zur Grundschwingung groß sind, was auf die steilen Flanken rückzuführen ist.

### 3.6 Auswertung

Durch diesen Versuch fanden wir heraus, dass mit Hilfe eines Oszilloskops relativ einfach ist, ein Signal in die Grundschwingung und den Harmonischen zu zerlegen. Es diene somit zur Einleitung in das nächste Kap. 4

# 4 Netzurückwirkungen einzelner Verbraucher

## 4.1 Aufgabenstellungen

Die Aufgabe, in diesem Abschnitt des Projektes, besteht darin, einzelne Verbraucher am Netz zu betreiben und mit Hilfe des Messgerätes V1 die Stromaufnahme sichtbar zu machen, sprich das Spektrum des Stromes zu analysieren.

Dabei wird also der Stromverlauf und das Frequenzspektrum gemessen und mit den anderen Verbrauchern verglichen. Wir werden dadurch feststellen, dass einzelne Verbraucher starke Oberschwingungen erzeugen, was auf das Netz und andere Verbraucher Einfluss nehmen kann.

## 4.2 Messschaltung

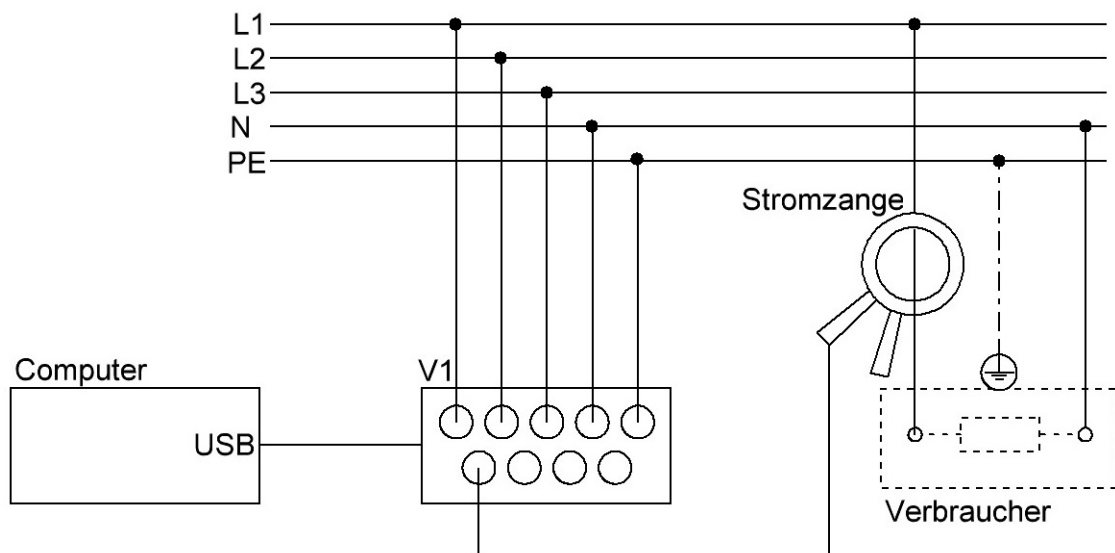


Abbildung 4.1: Allgemeines Blockschaftbild zur Messung

### 4.3 Einführung Fluke-Messgerät V1

Um das verwendete Messgerät zu bedienen, muss eine Software, welche entweder im Internet zu finden ist (nicht kontrolliert) oder auf einer CD vorhanden ist, was wir gemacht haben, installiert werden. Nach der erfolgreichen Installation per CD kann das Programm FlukeView (Power Quality Analyser 3.2) geöffnet werden, und sofort wird nach dem COM-Port, wo das Messgerät angesteckt ist, abgefragt.

Nun wird dieser ausgewählt und man kann das Messgerät mit Hilfe des Computers bedienen oder den Bildschirm des Messgerätes anzeigen lassen und als Bild abspeichern, um sich die Messergebnisse zu sichern.



## 4.4 ohne Verbraucher

### 4.4.1 Messvorgang

Am Beginn wird nun versucht das Netz ohne angeschlossener Verbraucher zu untersuchen, um feststellen zu können, wie „gut“ die Versorgung ist. Dafür wurden am Fluke-Messgerät die Spannungsverläufe zur Anzeige gebracht, was folgendes Bild ergab:

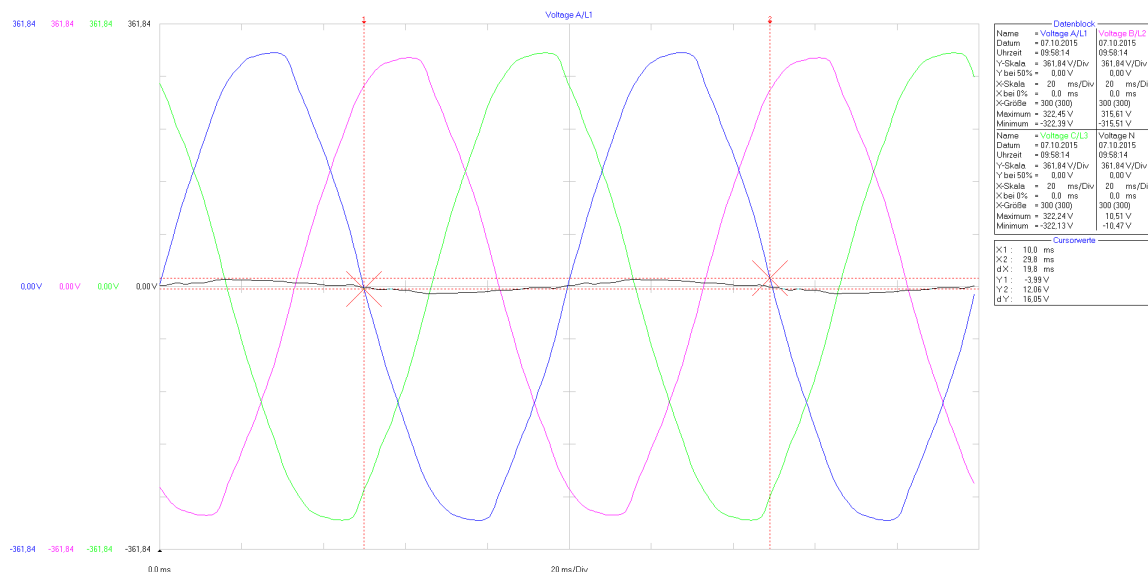


Abbildung 4.2: Signalverläufe der Spannungen des Netzes

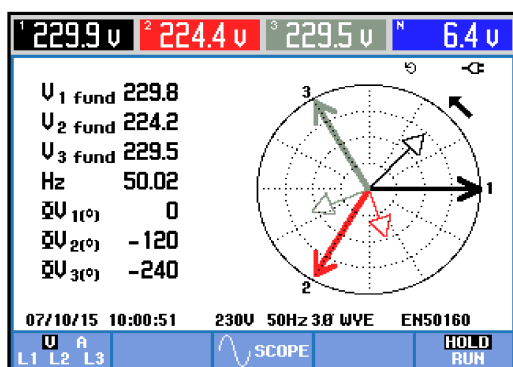


Abbildung 4.3: Zeigerdiagramm der Spannungen des Netzes

Es ist in der Abb. 4.2 deutlich erkennbar, dass schon das Netz selbst Oberschwingungen beinhaltet. Das dazugehörige Zeigerdiagramm zeigt, dass wir ein rechtsdrehendes System haben und die einzelnen Effektivwerte der Spannungen ca. 230 V mit  $f = 50 \text{ Hz}$  betragen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Spannungen der einzelnen Phasen des Netzes in  $\wedge$  und  $\triangle$ :

Spannung/Strom/Frequenz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	229.7	224.3	229.5	6.4
Vpk	322.0	315.1	321.9	10.4
CF	1.40	1.40	1.40	1.62
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	0.1	0.1	0.0	0.0
Apk	0.1	0.2	0.1	0.0
CF	OL	OL	OL	OL
07/10/15 10:07:35 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE				TREND
$\wedge$				HOLD
				RUN

Abbildung 4.4: Spannung / Strom / Frequenz  $\wedge$  des Netzes

Spannung/Strom/Frequenz				
	L12	L23	L31	N
Vrms	392.2	392.7	398.1	6.4
Vpk	565.7	566.8	573.4	10.5
CF	1.44	1.44	1.44	1.63
Hz	50.00			
	L1	L2	L3	N
Arms	0.1	0.1	0.0	0.0
Apk	0.1	0.2	0.1	0.0
CF	OL	OL	OL	OL
07/10/15 10:08:03 398V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE				TREND
$\triangle$				HOLD
				RUN

Abbildung 4.5: Spannung / Strom / Frequenz  $\triangle$  des Netzes

Es lässt sich erkennen, dass der Crest-Faktor (Scheitelfaktor) (CF), wie in den Abbildungen ungefähr ersichtlich, bei einem Sinussignal den Wert  $\sqrt{2}$  aufweist.

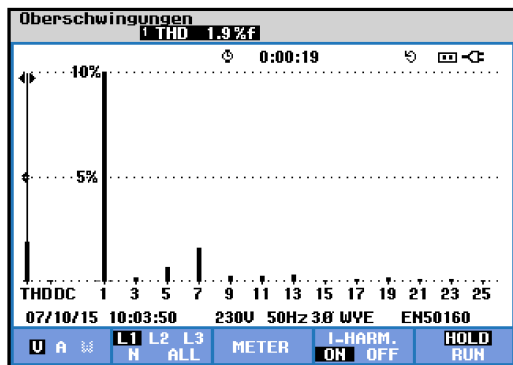


Abbildung 4.6: Oberschwingungen  
des Netzes der Phase  
L1

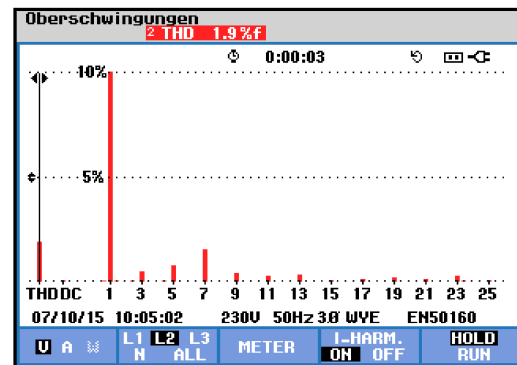


Abbildung 4.7: Oberschwingungen  
des Netzes der Phase  
L2

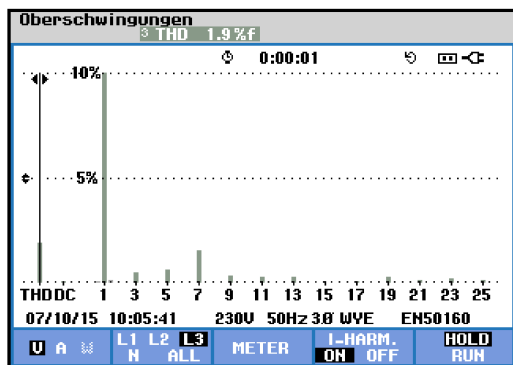


Abbildung 4.8: Oberschwingungen  
des Netzes der Phase  
L3

In diesen drei Abb. sind die Oberschwingungen der einzelnen Phasen sehr gut erkennbar, wobei sich die 7. Harmonische am stärksten hervorhebt. Der erkennbare Total Harmonic Distortion (Klirrfaktor) (THD) von 1,9% gibt an, wie stark die Oberschwingungen, die sinusförmige Grundschwingung überlagern.

#### 4.4.2 Auswertung

Wir stellten durch diese Messungen fest, dass das Versorgungsnetz durch andere Verbraucher schon diverse Oberschwingungen aufweist. Durch die nachfolgenden Test soll nun festgestellt werden, wie sich das Netz bei verschiedenen Belastungen verhält.



## 4.5 mit Glühbirne

### 4.5.1 Messvorgang

Als Belastung wird hier eine Glühbirne mit  $200\text{ W}$  an die Phase L1 angeschlossen, was folgendes Zeigerdiagramm ergab:

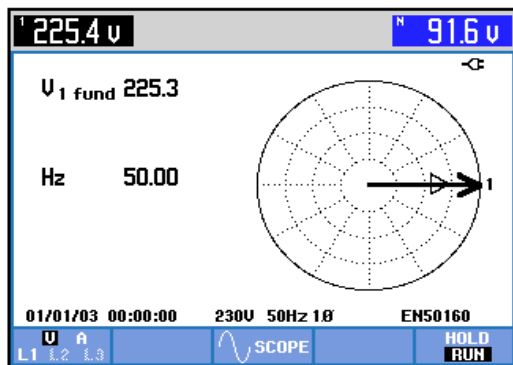


Abbildung 4.9: Zeigerdiagramm bei Belastung (Glühbirne)

Das Bild zeigt, dass Spannung und Strom, wie bei einem ohmschen Verbraucher üblich, in Phase zueinander liegen und sich somit ein  $\cos(\varphi) = 1$  ergibt.

Die Phasenspannung an L1 ist ebenfalls durch die Belastung um ca.  $4\text{ V}$  abgesunken.

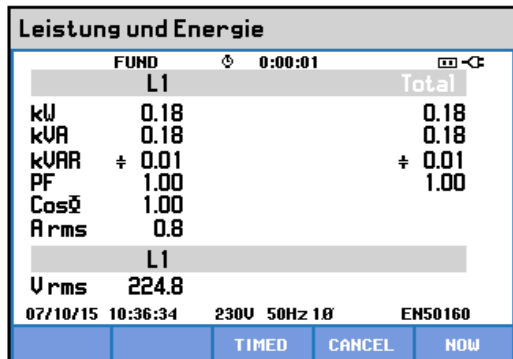


Abbildung 4.10: Leistung / Energie bei Belastung (Glühbirne)

Die Leistungsaufnahme der Glühbirne betrug, laut der Abb. 4.10,  $180\text{ W}$

Des Weiteren wurde versucht die Oberschwingungen des Stromes, bei dieser Belastung zu analysieren:

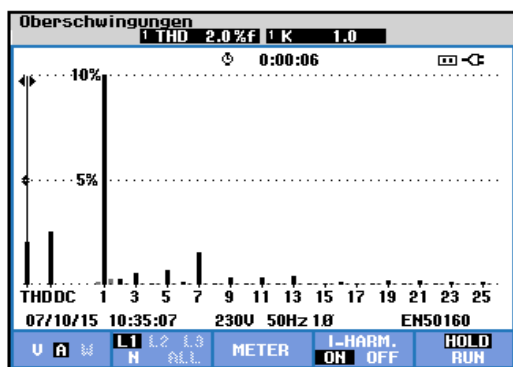


Abbildung 4.11: Oberschwingungen bei Belastung (Glühbirne) 1

Amp	L1	
THD%f	2.1	59.7
H3%f	0.5	5.8
H5%f	0.8	6.0
H7%f	1.6	4.7
H9%f	0.4	5.5
H11%f	0.3	5.3
H13%f	0.4	5.4
H15%f	0.1	5.1

Abbildung 4.12: Oberschwingungen bei Belastung (Glühbirne) 2

Der CF des Stromes beträgt hier 2,1 % und die resultierenden Oberschwingungen bei der Belastung mit der Glühbirne sind wegen der Harmonischen der Netzspannung vorhanden, was im Kap. 4.4 ersichtlich ist.

## 4.5.2 Auswertung

Wie erwartet verursachte der ohmsche Verbraucher keine zusätzlichen Harmonischen. Im Vergleich dazu werden wir in den darauffolgenden Kapiteln feststellen, dass dies selten bei Verbrauchern der Fall ist.

## 4.6 mit Energiesparlampe

### 4.6.1 Messvorgang

Der vorherige Versuch wurde nun mit einer Energiesparlampe mit  $18\text{ W}$  wiederholt, was folgende Verläufe ergab:

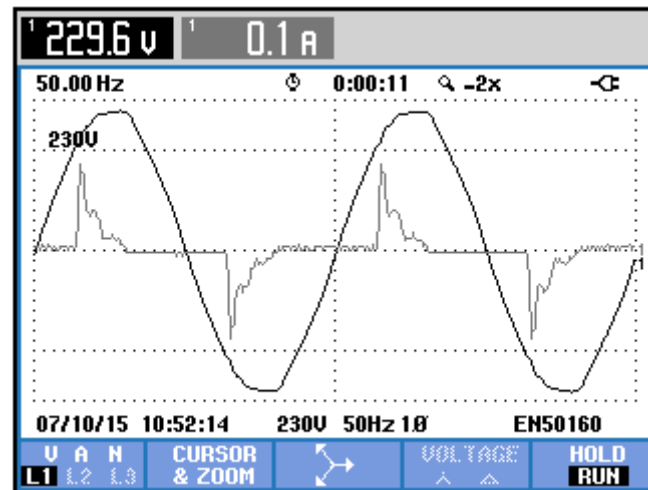


Abbildung 4.13: Signalverläufe bei Belastung (Energiesparlampe)

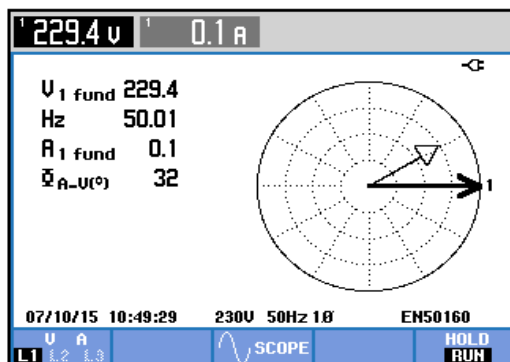


Abbildung 4.14: Zeigerdiagramm bei Belastung (Energiesparlampe)

Bei den Signalverläufen ist die typische Stromaufnahme einer Energiesparlampe erkennbar, welcher viele Oberschwingungen verursacht. Der Strom eilt der Spannung um  $32^\circ$  vor, was einen Leistungsfaktor von 0.84 verursacht.

Der nächste Schritt besteht nun in der Erfassung des Frequenzspektrums des Stromes.

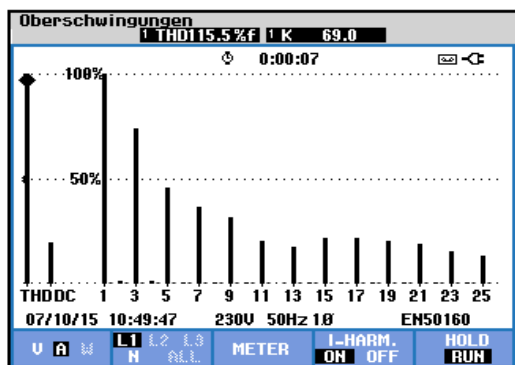


Abbildung 4.15: Oberschwingungen bei Belastung (Energiesparlampe)  
1

Abbildung 4.16 shows a table titled 'Oberschwingungen TABELLE' (Harmonics Table). The table lists the following data:

Amp	L1	
THD%f	115.7	60.2
H3%f	74.3	5.2
H5%f	46.2	5.8
H7%f	36.6	5.0
H9%f	31.9	5.7
H11%f	20.4	5.9
H13%f	17.5	5.9
H15%f	22.0	5.2

Abbildung 4.16: Oberschwingungen bei Belastung (Energiesparlampe)  
2

Es ist in beiden Abbildungen deutlich erkennbar, dass eine Energiesparlampe starke Harmonische verursacht. Der THD beträgt stolze 115,7% und die 3. Harmonische weist noch einen Spitzenwert von 74,3% bezogen auf die Grundschiwingung auf.

## 4.6.2 Auswertung

Es lässt sich daraus schließen, dass ein reiner Betrieb mit einer großen Anzahl an Energiesparlampen problematisch werden kann. Unerwünschte Netzurückwirkungen wären dann nicht auszuschließen, da die erlaubten Grenzwerte für Oberschwingungen fast „ausgereizt“ würden.

## 4.7 mit LED

### 4.7.1 Messvorgang

Der vorherige Versuch wurde nun mit einer LED-Lampe mit 6 W wiederholt, was nun folgende Verläufe ergab:

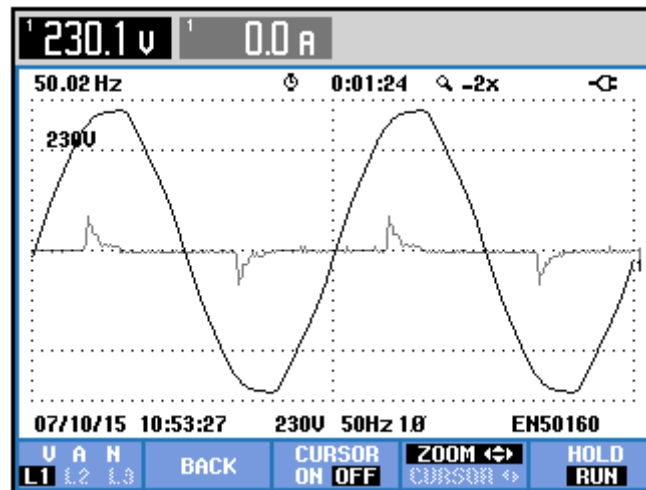


Abbildung 4.17: Signalverläufe bei Belastung (LED)

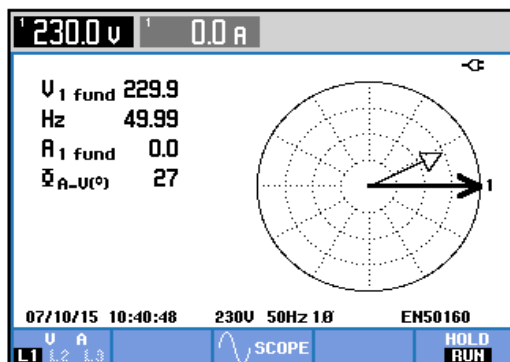


Abbildung 4.18: Zeigerdiagramm bei Belastung (LED)

In der Abb. 4.17 ist die Stromaufnahme einer LED gut zu erkennen und lässt darauf schließen, dass der nicht-sinusförmige Strom etliche Oberschwingungen verursacht. Der Strom eilt der Spannung um  $27^\circ$ , was einem  $\cos(\varphi) = 0.89$  entspricht, nach.

Der nächste Schritt ist nun erneut die Erfassung des Frequenzspektrums des Stromes.

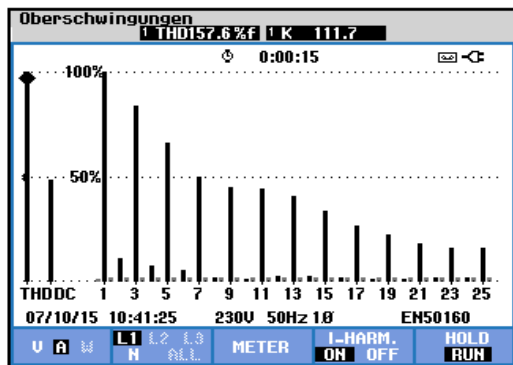


Abbildung 4.19: Oberschwingungen  
bei Belastung (LED)  
1

Harmonic	Value (%f)	Value (Amp)
THD	157.2	58.1
H3	83.8	5.5
H5	66.3	5.9
H7	50.4	4.8
H9	44.8	4.6
H11	43.8	5.3
H13	40.0	4.8
H15	33.1	4.4

Abbildung 4.20: Oberschwingungen  
bei Belastung (LED)  
2

Der THD, welcher im Prinzip die gesamte harmonische Verzerrung beschreibt, liegt bei 157 %, also über dem Wert wie bei der Energiesparlampe. Es ist erkennbar, dass sogar die 15. Oberschwingung noch rund 33 % der Grundschwingung aufweist.

## 4.7.2 Auswertung

Durch diese Messungen stellten wir also fest, dass durch das Vorschaltgerät stärkere Oberschwingungen, als bei der Energiesparlampe, auftreten.

## 4.8 mit Netzteil

### 4.8.1 Messvorgang

Als letzten Verbraucher wird ein belastetes Netzteil verwendet, dessen Stromverlauf sich deutlich von dem der LED und Energiesparlampe unterscheidet:

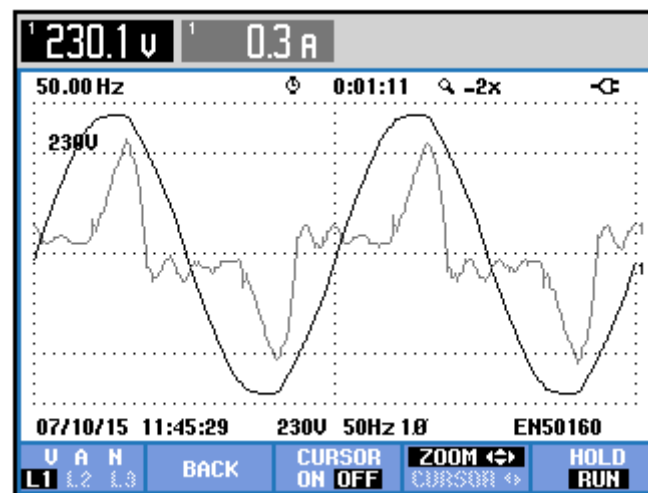


Abbildung 4.21: Signalverläufe bei Belastung (Netzteil)

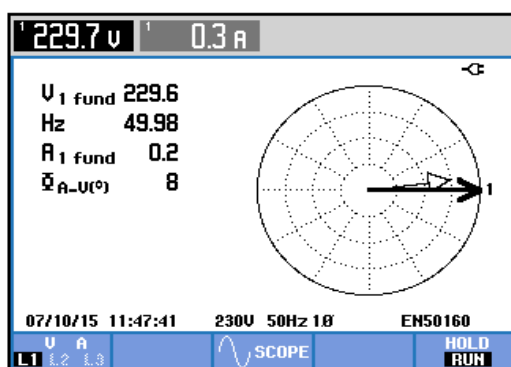


Abbildung 4.22: Zeigerdiagramm bei Belastung (Netzteil)

Bei den Signalverläufen ist ersichtlich, dass das Netzteil erst nach dem Spannungsmaximum Strom aufnimmt, was diesen Verbrauch unterscheidet zur LED und der Energiesparlampe. Der Strom eilt der Spannung um  $8^\circ$ , was einem  $\cos(\varphi) = 0.99$  entspricht, nach und es lässt sich sagen, dass ein solches Netzteil weniger prozentuelle Oberschwingungen verursacht, als die vorherigen gemessenen Verbraucher, LED und Energiesparlampe.

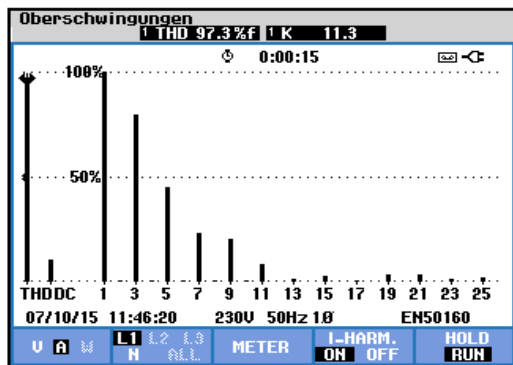


Abbildung 4.23: Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil) 1

Abbildung 4.24 shows a table titled 'Oberschwingungen TABELLE' (Harmonics Table). The table lists harmonic distortion levels for various orders. The y-axis is labeled with 50% and 100%. The x-axis is labeled with 'THDDC' and harmonic orders 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25. The 3rd harmonic is the highest, followed by the 5th, 7th, and 9th. The THD value is 97.2%.

Harmonic Order	Percentage (%)
1	~10
3	~95
5	~75
7	~55
9	~45
11	~35
13	~25
15	~20
17	~15
19	~10
21	~8
23	~5
25	~3

Abbildung 4.24: Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil) 2

Es ist erkennbar, dass sich vor allem die 3. Harmonische bemerkbar macht und der THD weist einen Wert von 97,2 % auf.

## 4.8.2 Auswertung

Durch diesen Versuch konnten wir feststellen, dass ein Netzteil zwar auch Harmonische verursacht, sich jedoch deutlich von der LED bzw. Energiesparlampe unterscheidet.



# **5 Netzurückwirkungen mehrerer Verbraucher**

## **5.1 Aufgabenstellungen**

Das letzte Kapitel behandelt nun die Auswirkungen von mehreren, verschiedenen Verbraucher auf das Netz. Es sind verschiedene Verbraucher parallel an das Netz zu hängen und die Auswirkung hierbei zu analysieren.

Dabei sind der Stromverlauf und das Frequenzspektrum des Stromes zu messen und mit denen der einzelnen Verbrauchern zu vergleichen.

## **5.2 Messschaltung**

Die hier verwendete Messschaltung ist im Kap. 4.2 ersichtlich.

## 5.3 mit Netzteil & Energiesparlampe

Im letzten Versuch wurde das belastete Netzteil und die Energiesparlampe ans Netz angeschlossen und die Messungen wurden wiederholt:

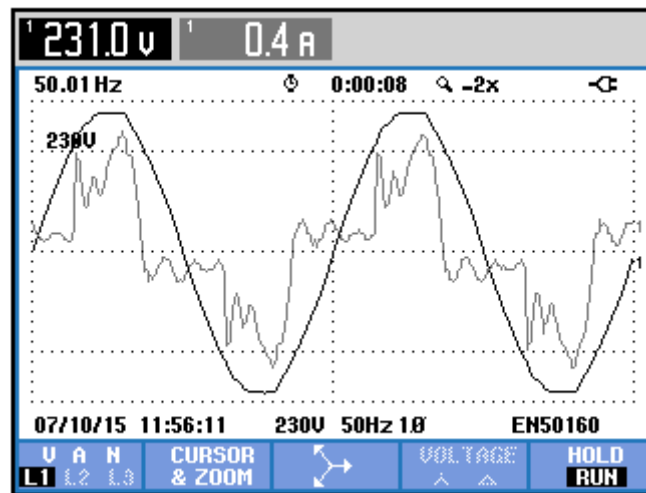


Abbildung 5.1: Signalverläufe bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe)

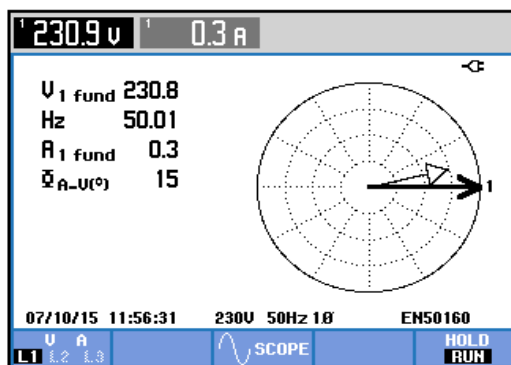


Abbildung 5.2: Zeigerdiagramm bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe)

Es ist im Stromverlauf erkennbar, dass er schon vielmehr einem Sinus ähnelt, als bei den einzelnen Messungen, was sich dann bei den Oberschwingungen bemerkbar macht.

Der  $\cos(\varphi)$  ist im Gegensatz zum Betrieb der Energiesparlampe alleine von 0.84 auf 0.97 gesunken.

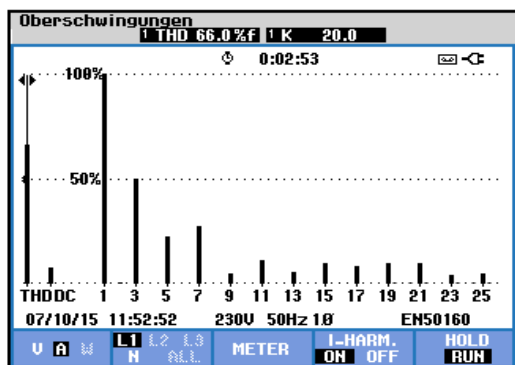


Abbildung 5.3: Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe) 1

	L1	
THD%f	68.2	61.2
H3%f	53.1	7.4
H5%f	21.5	6.7
H7%f	27.3	12.7
H9%f	7.6	15.3
H11%f	12.1	21.9
H13%f	4.3	11.4
H15%f	7.8	4.9

Abbildung 5.4: Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe) 2

In beiden Abbildungen 5.3 & 5.4 ist ein THD von 69,2% zu erkennen und die einzelnen Harmonischen sind deutlich, im Gegensatz zur Abb. 4.15 gesunken.

Auffallend ist, dass die Amplitude der 5. Harmonischen relativ gesehen am stärksten beeinflusst, was darauf zurückzuführen ist, dass die Energiesparlampe und das Netzteil alleine eine starke 5. Harmonische haben, deren Phasenlagen sich rund 2ms unterscheiden.

## 6 Resümee

Durch diese Übung konnten wir feststellen, dass ein Mischbetrieb von Leuchtstofflampen und Netzteilen keine negativen Auswirkungen auf das Netz hat, sondern die unerwünschten Oberschwingungen dadurch teilweise kompensiert werden. Man spricht hierbei vom sogenannten *Selbstregulierungseffekt*.

Allgemein ist es somit besser, mehrere unterschiedliche nicht-sinusförmige Verbraucher, deren Stromaufnahme eine Phasenverschiebung aufweisen, zu verwenden anstatt nur eine Art, da je mehr verschiedene angeschlossen sind, die Auswirkungen eines einzelnen Verbrauchers verringert werden.

Wie erwartet, konnten wir messen, dass nur Harmonische mit einer bestimmten Vielfachen der Grundschwingung vorhanden sind. (3.-, 5.-, 7.-, ...)

Dabei gilt: Je höher die Frequenz, desto kleiner die Amplitude.

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Messschaltung zur Analyse einzelner Signale . . . . .	4
3.2	Amplitudenspektrum eines Sinus-Signals . . . . .	5
3.3	Oszilloskopaufnahme des Sinus-Signals . . . . .	6
3.4	Oszilloskopaufnahme der FFT-Analyse des Sinus-Signals . . . . .	7
3.5	Amplitudenspektrum eines Dreieck-Signals . . . . .	9
3.6	Oszilloskopaufnahme des Dreieck-Signals . . . . .	10
3.7	Oszilloskopaufnahme der FFT-Analyse des Dreieck-Signals . . . . .	11
3.8	Gegenüberstellung von Mess- und Rechenwerten: Dreieck-Signal bis zur 9. Harmonischen . . . . .	12
3.9	Amplitudenspektrum eines Rechteck-Signals . . . . .	14
3.10	Oszilloskopaufnahme des Rechteck-Signals . . . . .	15
3.11	Oszilloskopaufnahme der FFT-Analyse des Rechteck-Signals . . . . .	16
4.1	Allgemeines Blockschaltbild zur Messung . . . . .	17
4.2	Signalverläufe der Spannungen des Netzes . . . . .	19
4.3	Zeigerdiagramm der Spannungen des Netzes . . . . .	19
4.4	Spannung / Strom / Frequenz $\wedge$ des Netzes . . . . .	20
4.5	Spannung / Strom / Frequenz $\triangle$ des Netzes . . . . .	20
4.6	Oberschwingungen des Netzes der Phase L1 . . . . .	21
4.7	Oberschwingungen des Netzes der Phase L2 . . . . .	21
4.8	Oberschwingungen des Netzes der Phase L3 . . . . .	21
4.9	Zeigerdiagramm bei Belastung (Glühbirne) . . . . .	22
4.10	Leistung / Energie bei Belastung (Glühbirne) . . . . .	22
4.11	Oberschwingungen bei Belastung (Glühbirne) 1 . . . . .	23
4.12	Oberschwingungen bei Belastung (Glühbirne) 2 . . . . .	23
4.13	Signalverläufe bei Belastung (Energiesparlampe) . . . . .	24
4.14	Zeigerdiagramm bei Belastung (Energiesparlampe) . . . . .	24
4.15	Oberschwingungen bei Belastung (Energiesparlampe) 1 . . . . .	25
4.16	Oberschwingungen bei Belastung (Energiesparlampe) 2 . . . . .	25
4.17	Signalverläufe bei Belastung (LED) . . . . .	26
4.18	Zeigerdiagramm bei Belastung (LED) . . . . .	26
4.19	Oberschwingungen bei Belastung (LED) 1 . . . . .	27

---

4.20	Oberschwingungen bei Belastung (LED) 2 . . . . .	27
4.21	Signalverläufe bei Belastung (Netzteil) . . . . .	28
4.22	Zeigerdiagramm bei Belastung (Netzteil) . . . . .	28
4.23	Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil) 1 . . . . .	29
4.24	Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil) 2 . . . . .	29
5.1	Signalverläufe bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe) . . . . .	31
5.2	Zeigerdiagramm bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe) . . . . .	31
5.3	Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe) 1 . . . . .	32
5.4	Oberschwingungen bei Belastung (Netzteil & Energiesparlampe) 2 . . . . .	32

# Tabellenverzeichnis

2.1	Verwendete Geräte & Betriebsmittel . . . . .	3
-----	--	---

# Abkürzungsverzeichnis

<b>Abb.</b>	Abbildung
<b>Bez.</b>	Bezeichnung
<b>BNC</b>	Bayonet Neill–Concelman
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>ca.</b>	circa
<b>CF</b>	Crest-Faktor (Scheitelfaktor)
<b>Dipl.-Ing.</b>	Diplom-Ingenieur
<b>Dr.</b>	Doktor
<b>etc.</b>	et cetera
<b>FFT</b>	Fast Fourier-Transformation
<b>horiz.</b>	horizontal
<b>HTBL u. VA</b>	höhere technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt
<b>Kap.</b>	Kapitel
<b>LED</b>	light-emitting diode
<b>Nr.</b>	Nummer
<b>THD</b>	Total Harmonic Distortion (Klirrfaktor)
<b>z. B.</b>	zum Beispiel