

Belastung des Neutralleiters durch Elektro-Mobilität

Timo Thomas, M.Eng.

Prof. Dr.-Ing. Peter A. Plumhoff

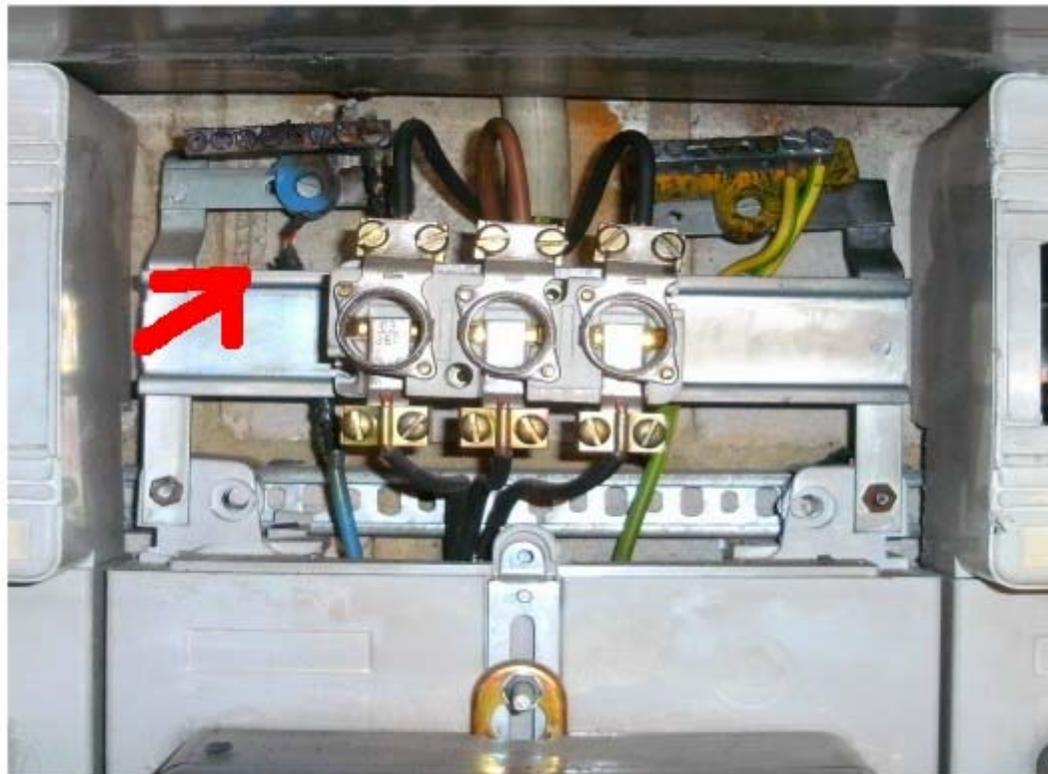
Fachhochschule Bingen
Fachbereich Elektrotechnik
Berlinstraße 109

55411 Bingen am Rhein

E-Mail: timo-thomas@web.de
peter@plumhoff.eu



Motivation



Quelle: west-elektrik



Überblick

- Kabeldimensionierung
- Sinusförmige Ströme
- Grundschiwingung und Oberschwingungen
- Cos Phi vs. Leistungsfaktor
- Ein paar E-Autos
- Theoretische Gleichungen
- Anwendung - Lampen 2-phasig
- Dezentrale Speicher am Netz
- Zusammenfassung





Kabeldimensionierung

Strom im Neutralleiter

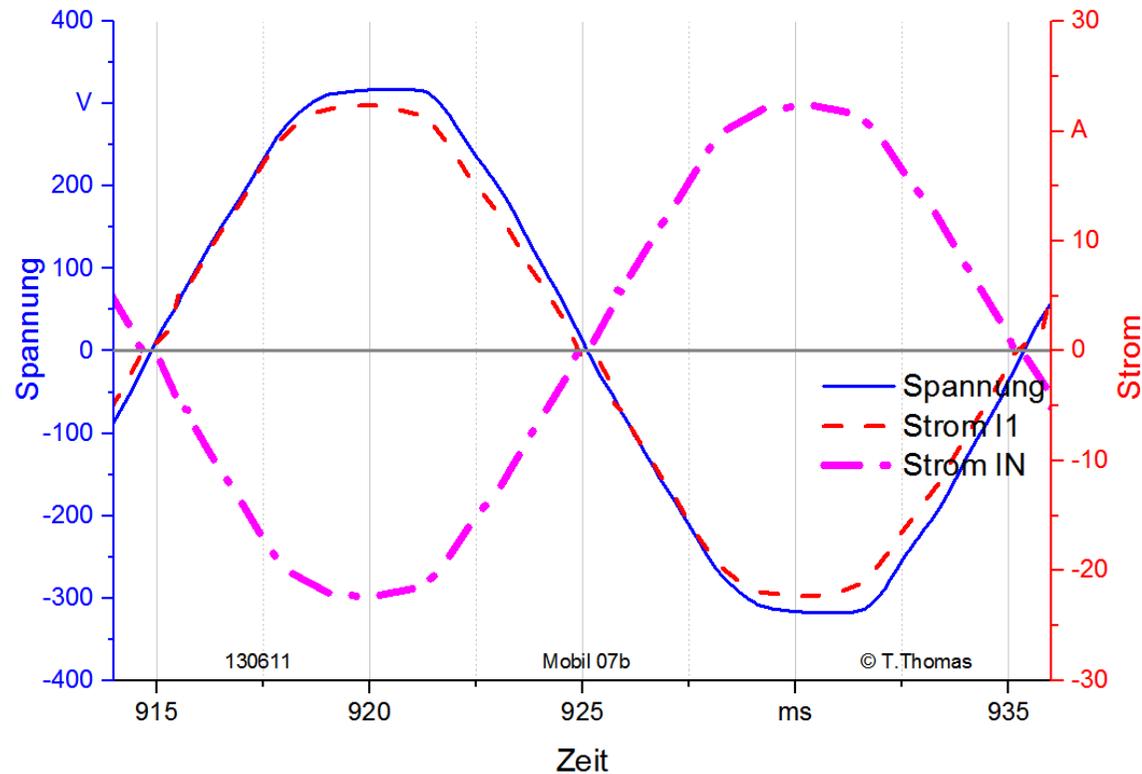
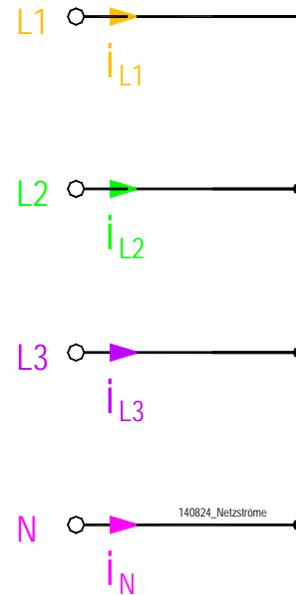
- Niederspannungsleiter 3 ½
- Symmetrische Belastung
 - I_N gleich null bzw. gering
- NYFGY-J 3 x 240 SM/120 RM 0,6/1 kV
- Heute 3 2/1 (doppelter Querschnitt)
- Symmetrische Belastung besagt nicht alles
- Oberschwingungen
 - I_N größer als I_L



Sinusförmige Ströme

Wechselstrom einphasig – Strom im Außenleiter und Neutralleiter

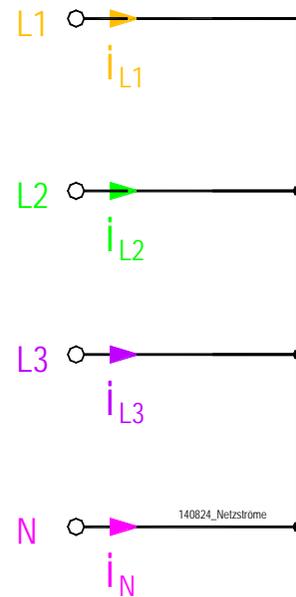
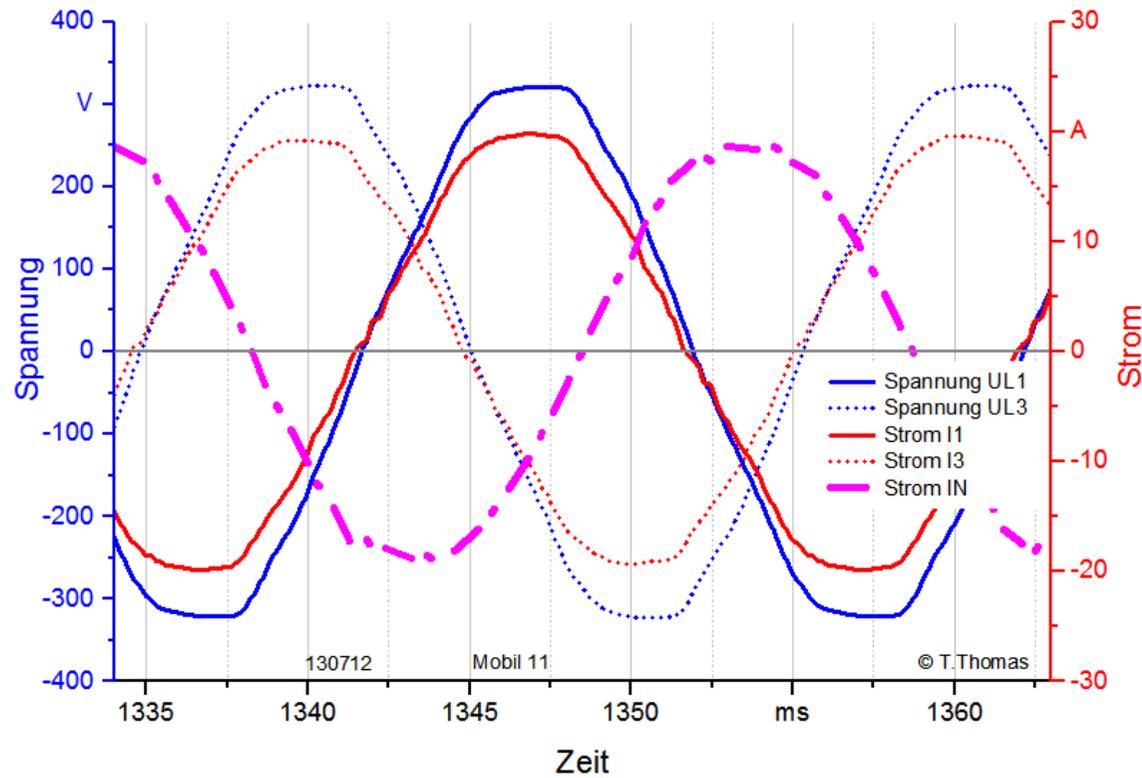
▪ $I_N = I_L$



Sinusförmige Ströme

Wechselstrom zweiphasig

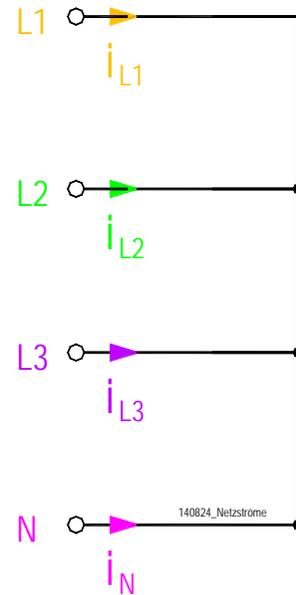
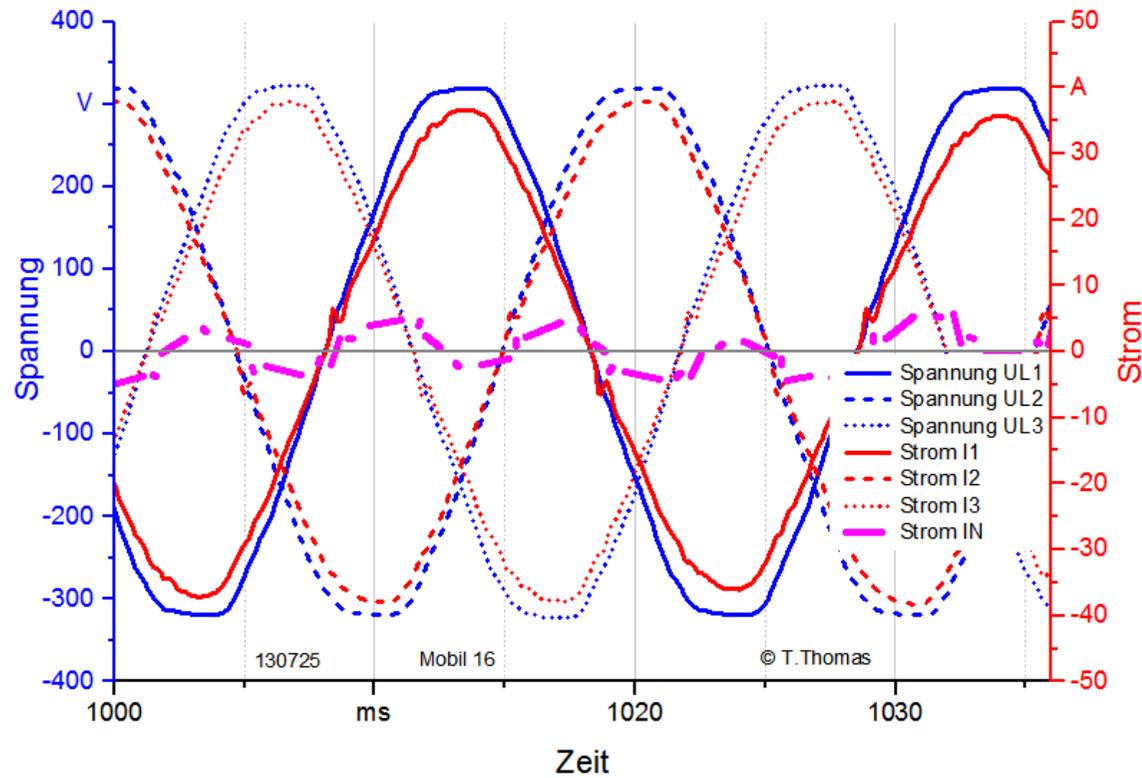
- $I_{L1} = I_{L3}$
- $I_{L2} = 0$
- $I_N = I_{L1} = I_{L3}$



Sinusförmige Ströme

Drehstrom dreiphasig

- $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$
- annähernd sinusförmig
- $I_N \approx 0$



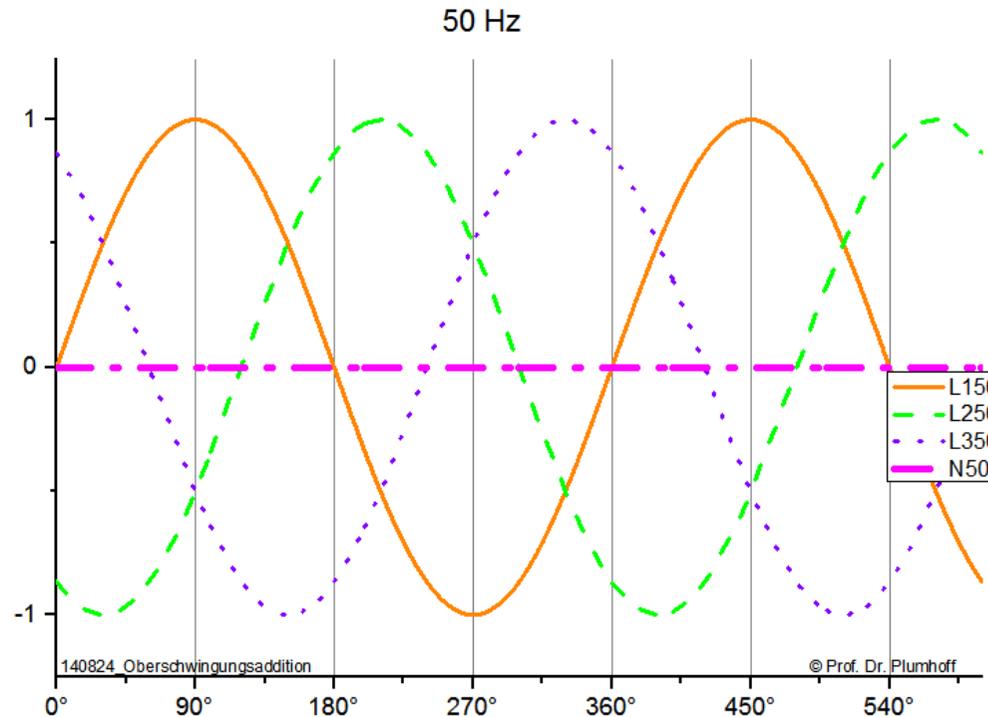
Grundschiwingung und Oberschwingungen

Grundschiwingung einzeln betrachten => I_N

- 50 Hz
- Mitsystem
- 3-phasig symmetrisch

- $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$
- sinusförmig

- $I_N = 0$

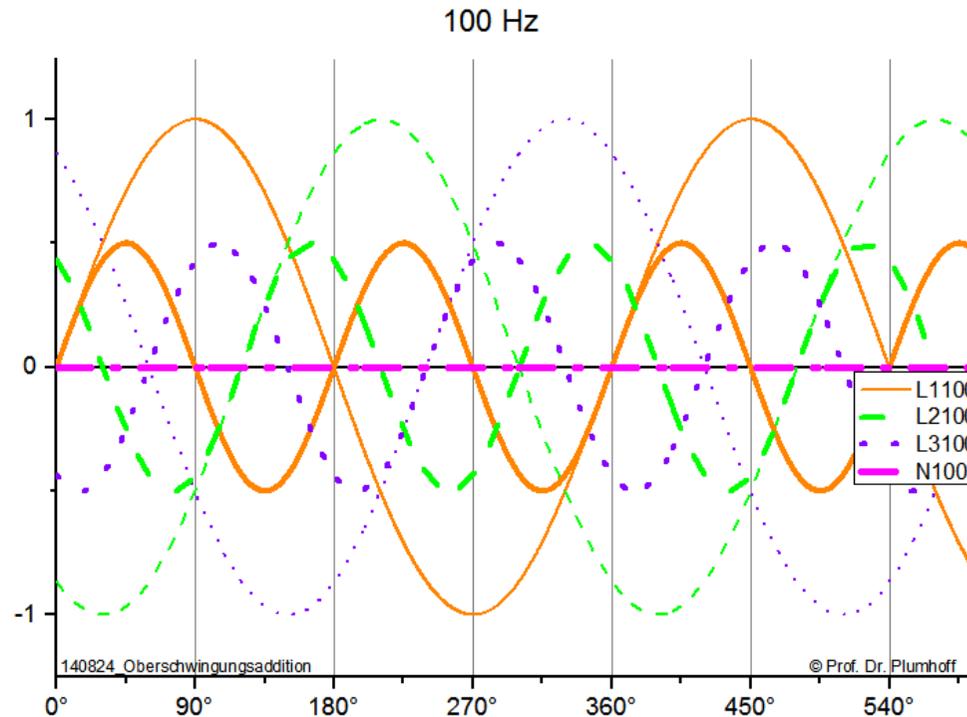


Grundschiwingung und Oberschwingungen

Oberschwingungen einzeln betrachten => I_N

- 100 Hz
- Gegensystem
- 3-phasig symmetrisch

- $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$
- Sinusförmig
- $I_N = 0$



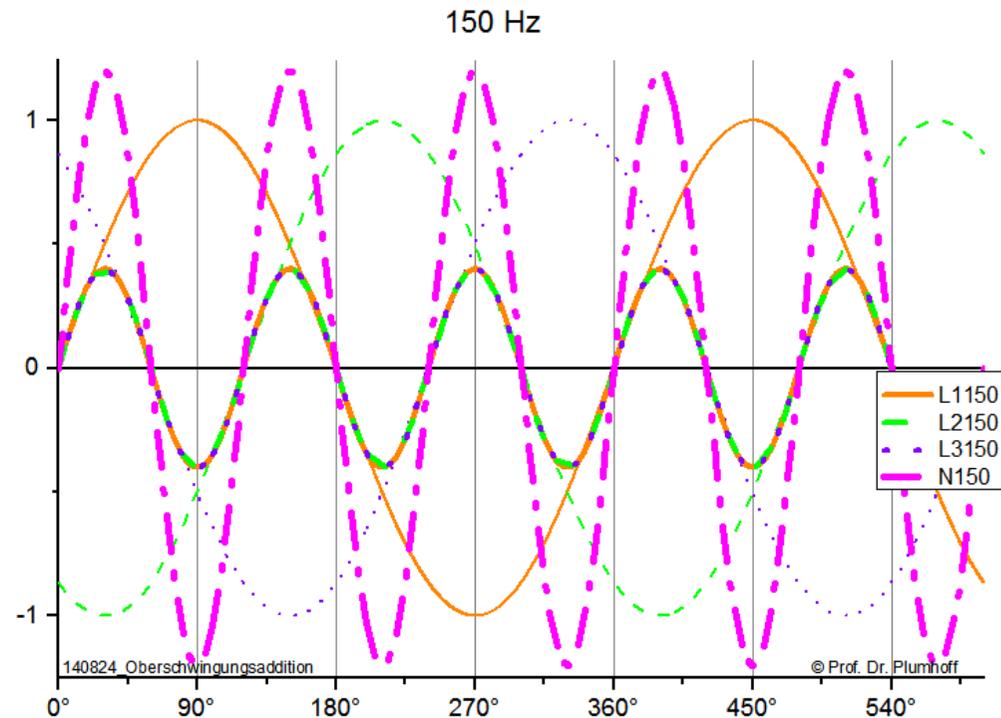
Grundschiwingung und Oberschwingungen

Oberschwingungen einzeln betrachten => I_N

- 150 Hz
- Nullsystem
- 3-phasig symmetrisch

- $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$
- Sinusförmig

- $I_N = 3 \cdot I_L$

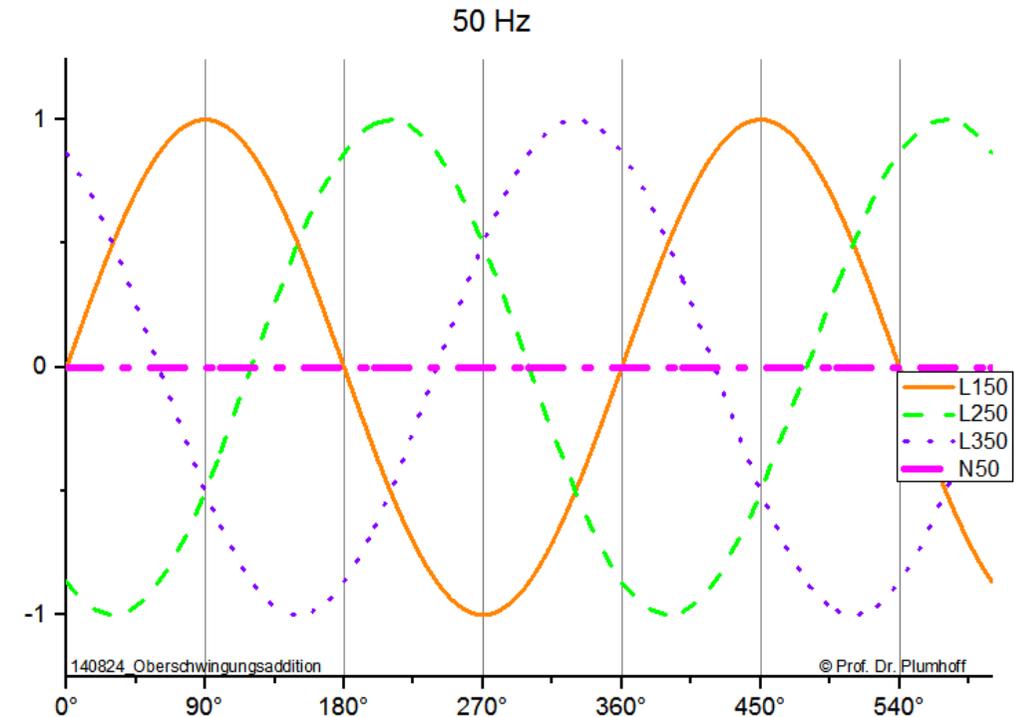


Grundschiwingung und Oberschwingungen

Oberschwingungen einzeln betrachten => I_N

- 50 Hz - 200 Hz – 350 Hz – $N = 0, 1, 2, 3, \dots$
... jede $(1+3N)$ -Harmonische
1., 4., 7., 10., 13. Harmonische
- Mitsystem mit Phasenfolge L1, L2, L3
- 3-phasig symmetrisch
 - $I_{L1,1} = I_{L2,1} = I_{L3,1}$
 - sinusförmig

➤ $I_N = 0$

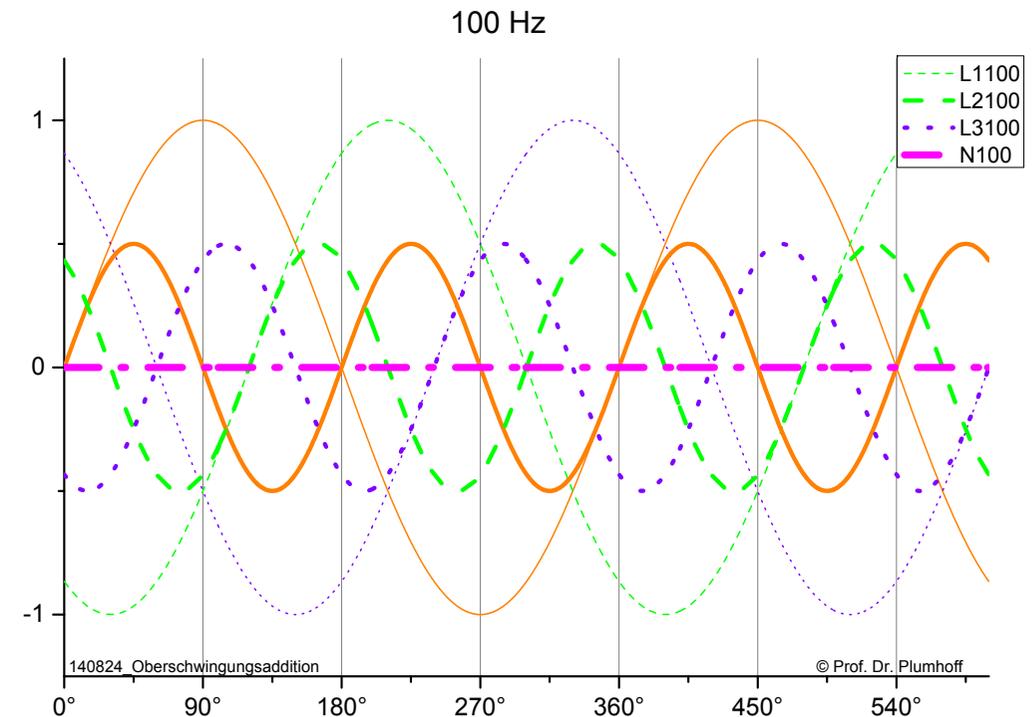


Grundschiwingung und Oberschwingungen

Oberschwingungen einzeln betrachten => I_N

- 100 Hz - 250 Hz – 400 Hz – $N = 0, 1, 2, 3, \dots$
... jede $(2+3N)$ -Harmonische
2., 5., 8., 11. Harmonische
- Gegensystem mit Phasenfolge L1, L3, L2
- 3-phasig symmetrisch
 - $I_{L1,2} = I_{L2,2} = I_{L3,2}$
 - sinusförmig

➤ $I_N = 0$

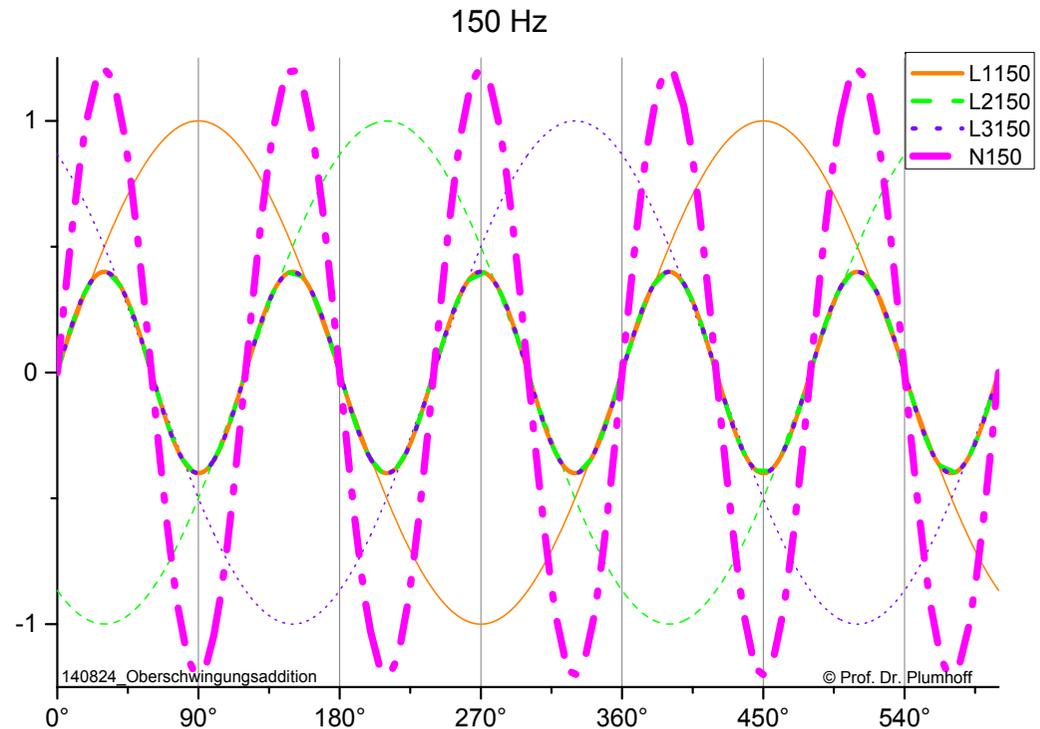


Grundschiwingung und Oberschwingungen

Oberschwingungen einzeln betrachten => I_N

- 150 Hz - 300 Hz – 450 Hz – $N = 0, 1, 2, 3, \dots$
... jede $(3+3N)$ -Harmonische
3., 6., 9., 12. Harmonische
- Nullsystem mit Phasenfolge L1, L2, L3
- 3-phasig symmetrisch
 - $I_{L1,3} = I_{L2,3} = I_{L3,3}$
 - sinusförmig

➤ $I_N = 3 I_{L,3}$





Cos Phi vs. Leistungsfaktor

Cos phi – Lambda

$\cos \varphi - \lambda$

➤ Sinusförmiger Verlauf von Strom und Spannung

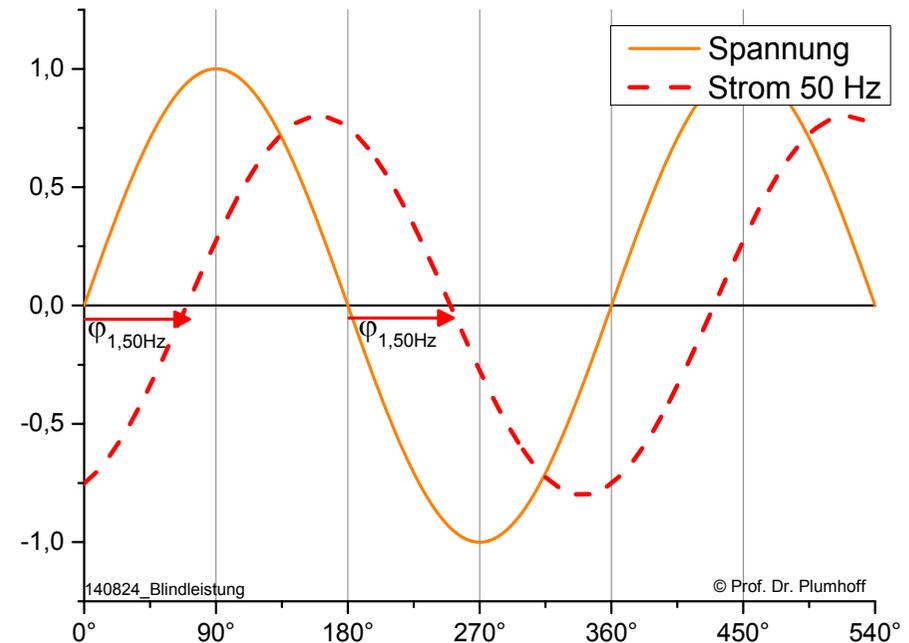
➤ keine Oberschwingungen

➤ $\cos \varphi$ $\cos \varphi = \frac{P}{S}$

➤ P_{gesamt} bezogen auf S_{gesamt}

➤ φ Phasenverschiebungswinkel

■ Induktive Blindleistung





Cos Phi vs. Leistungsfaktor

Cos phi – Lambda

$\cos \varphi - \lambda$

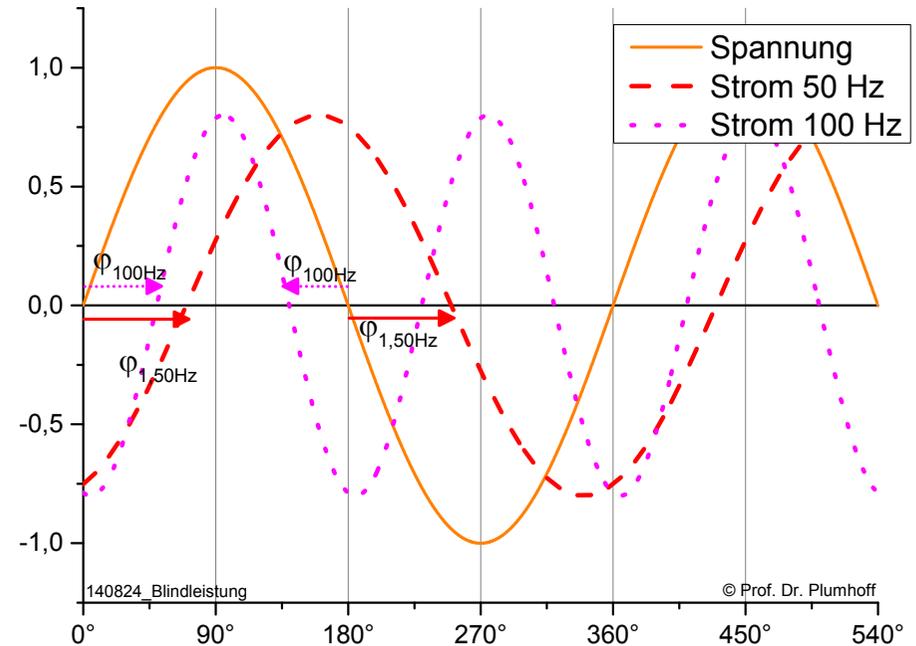
$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

Verschiebungsfaktor

$$\lambda = \frac{P_{ges}}{S_{ges}}$$

Leistungsfaktor

- Sinusförmiger Verlauf von Strom und Spannung
 - mit Oberschwingungen
- $\cos \varphi$ nicht möglich
 - Spannung 50 Hz
 - Strom 100 Hz
 - keine Phasenverschiebung möglich
 - nur zwischen Strom und Spannung gleicher Frequenz
 - Wirkleistung nur bei Strom und Spannung gleicher Frequenz
 - Blindleistung





Cos Phi vs. Leistungsfaktor

Cos phi – Lambda

$\cos \varphi - \lambda$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

Verschiebungsfaktor

$$\lambda = \frac{P_{ges}}{S_{ges}}$$

Leistungsfaktor

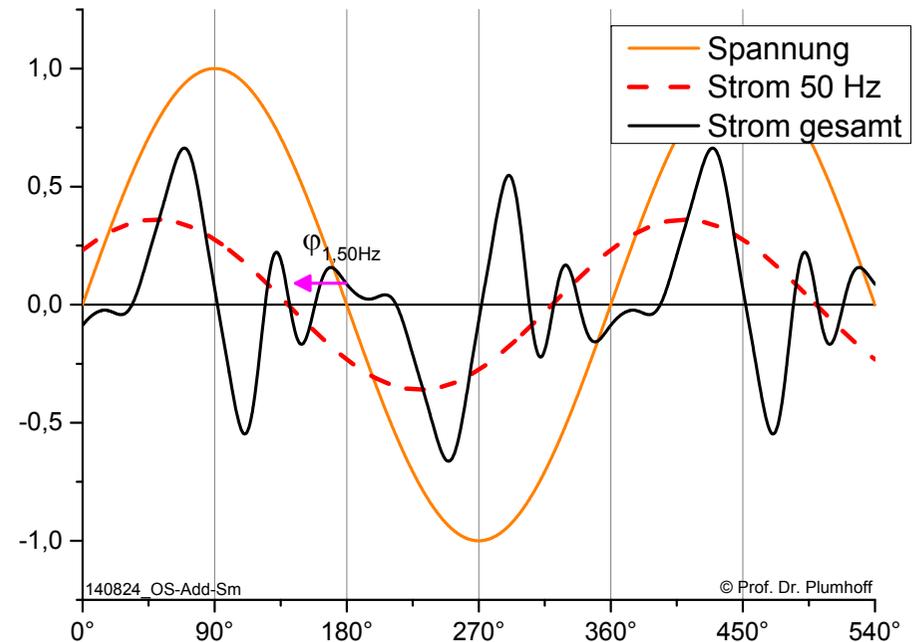
➤ Periodischer Verlauf von Strom und Spannung
Sinusförmiger Verlauf mit Oberschwingungen

➤ Verschiebungsfaktor

➤ $\cos \varphi_1$ für Grundschiwingung

➤ Leistungsfaktor

➤ Gesamter Verlauf $\lambda = \frac{P_{ges}}{S_{ges}}$





Cos Phi vs. Leistungsfaktor

Cos phi – Lambda

$\cos \varphi - \lambda$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

Verschiebungsfaktor

$$\lambda = \frac{P_{ges}}{S_{ges}}$$

Leistungsfaktor

➤ Stromverlauf eines E-Fahrzeugs

➤ $\cos \varphi_1 = 1$

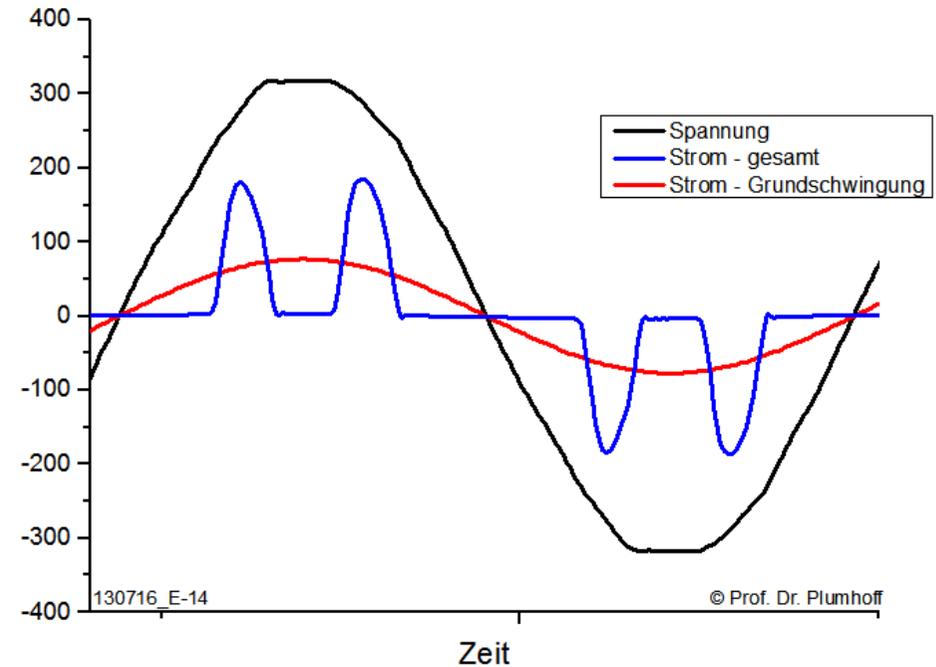
➤ $\lambda = 0,66$

➤ $\hat{i} = 37 \text{ A}$

➤ $I = 16 \text{ A}$

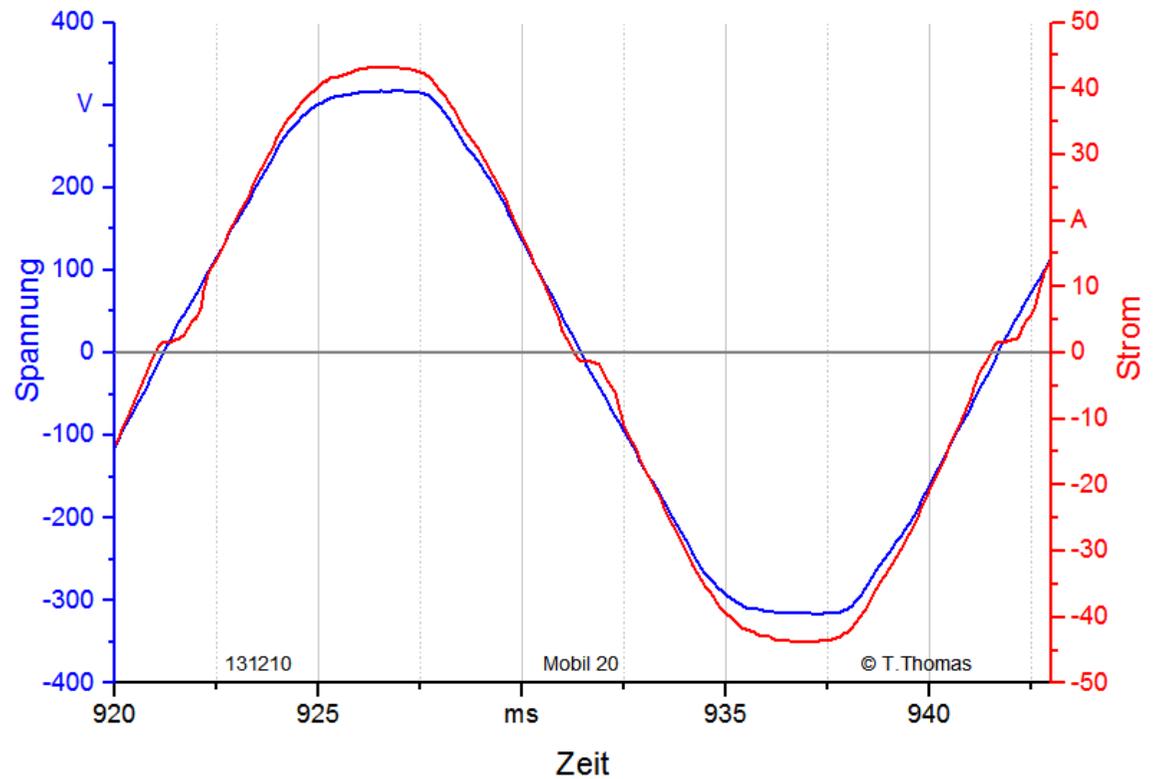
➤ $I_1 = 10,86 \text{ A}$

➤ THD = 115 %
zulässig sind maximal 47 %



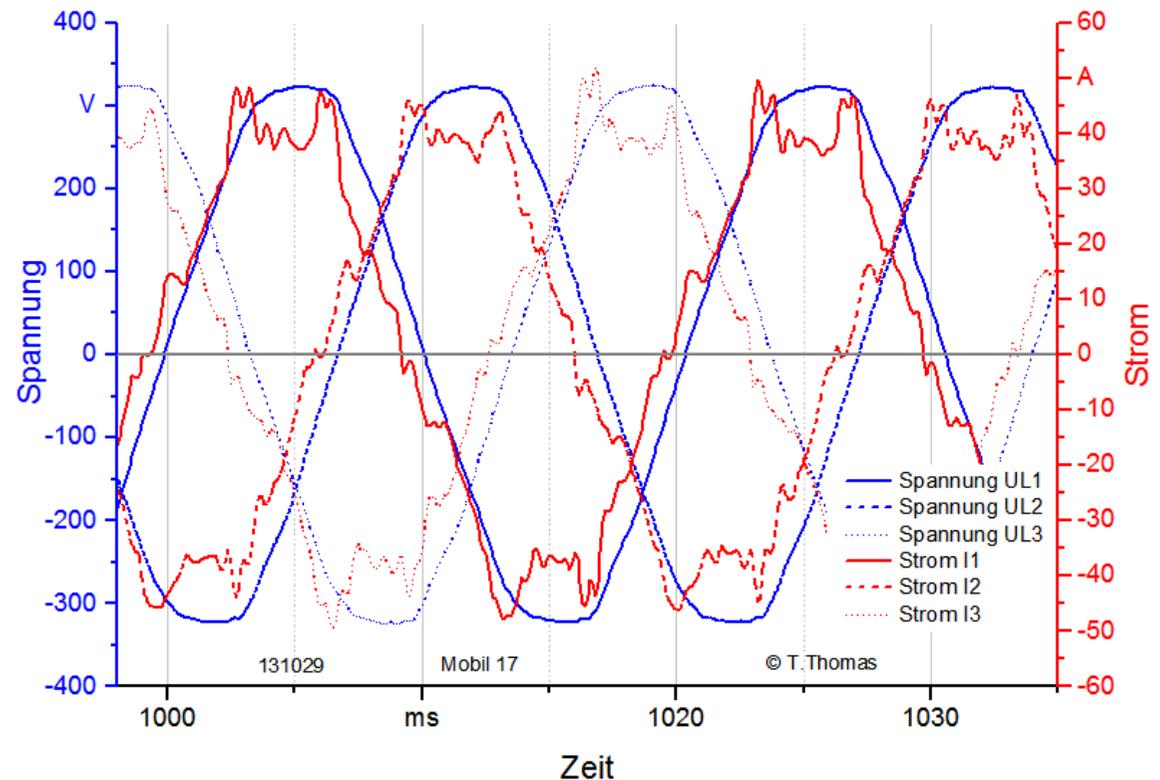
Ein paar E-Autos

- Sinusförmiger Strom
- THD = 5,5 %
- $I = 31 \text{ A}$ - einphasig
 - Neutraleiter!



Ein paar E-Autos

- Kein sinusförmiger Strom
- THD = 14 % < 16 %
- $I = 31 \text{ A}$ - dreiphasig
 - Neutralleiter!
 - Kein I_N
- Oberschwingungsgehalt höher
- Aber kein Strom im Neutralleiter

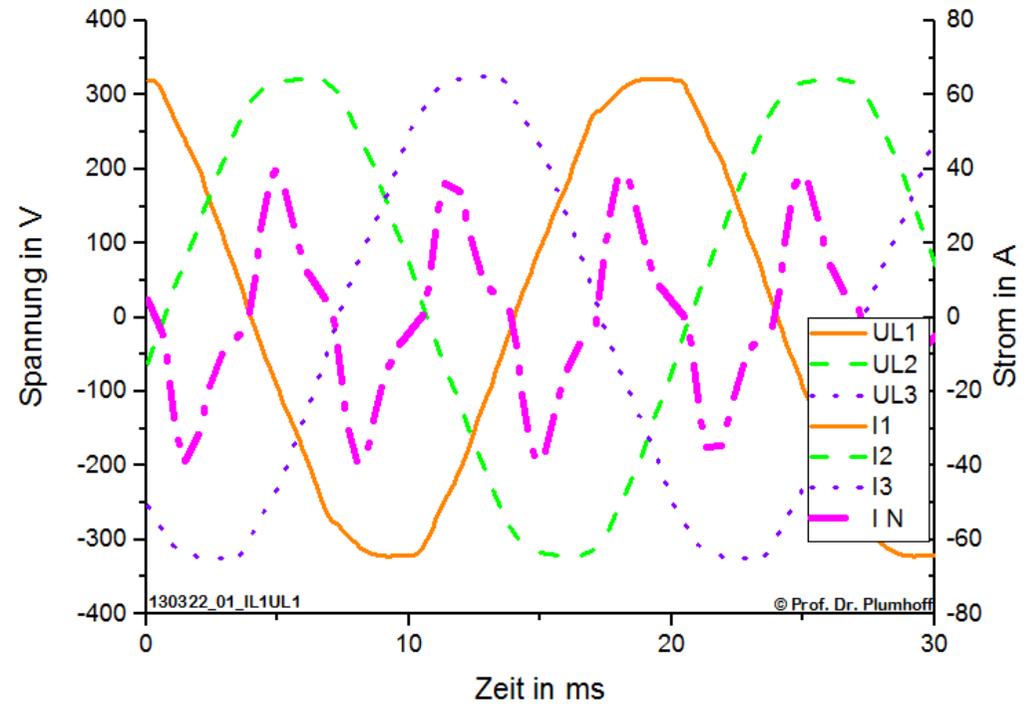


Ein paar E-Autos

➤ Drei e-Mobile

- Schuko-Steckdose
- E-Mobil 1 an L1
- E-Mobil 2 an L2
- E-Mobil 3 an L3

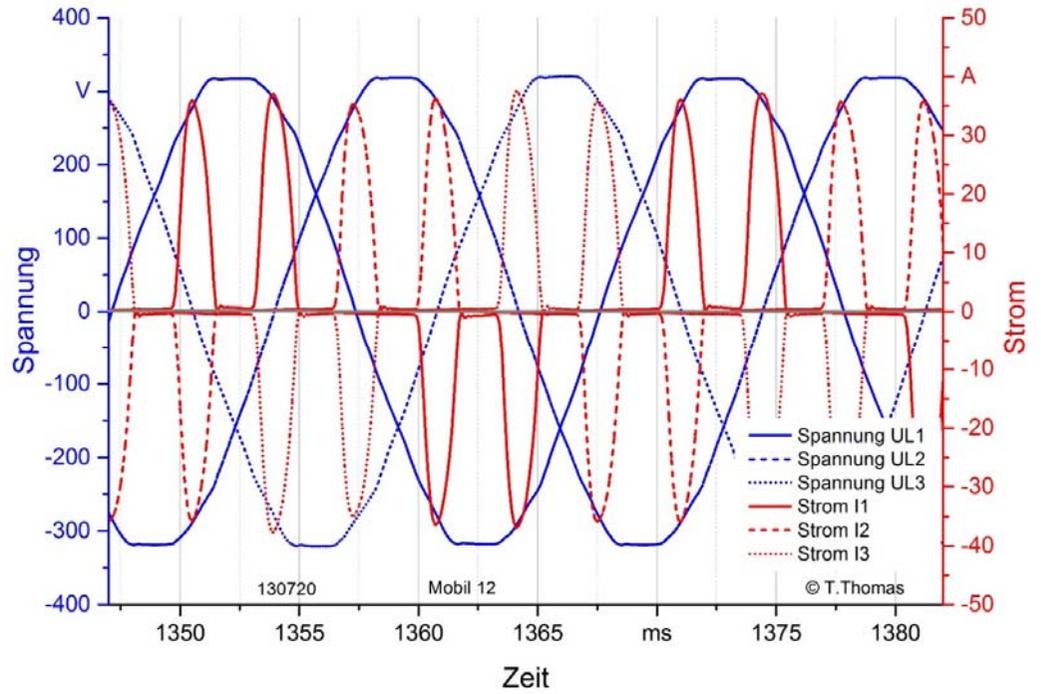
	IEFF	50 Hz	150Hz	250Hz	350 Hz	450 Hz	550 Hz	650 Hz
$I_{L1}; I_{L2}; I_{L3}$	13,5 A	9 A	7,27 A	5,13 A	3,29 A	2,21 A	1,48 A	0,77
I_N	23,2 A	0	21,9 A	0	0	6,7	0	0



Ein paar E-Autos

➤ ein e-Mobil am Typ-2-Stecker

	I_{EFF}	50 Hz	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz	550 Hz	650 Hz
$I_{L1}; I_{L2}; I_{L3}$	16,2 A	10,9 A	0	8,9 A	7,4 A	0	4 A	2,4 A
I_N	0	0	0	0	0	0	0	0



Theoretische Gleichungen

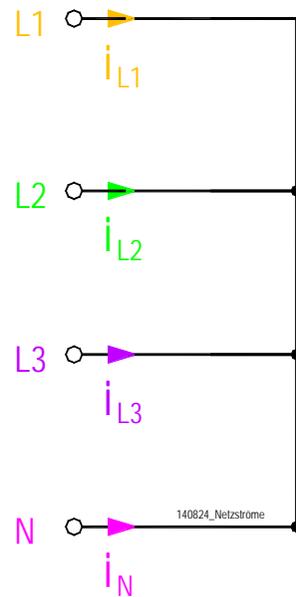
➤ Gleichungen 3. und 5. Harmonische - 120° Phasenverschiebung

$$\underline{I}_{N,v} = -\{I_{L1,v} \cdot e^{jv(\omega t + 0^\circ)} + I_{L2,v} \cdot e^{jv(\omega t + 120^\circ)} + I_{L3,v} \cdot e^{jv(\omega t + 240^\circ)}\}$$

$$\underline{I}_{N,v} = -\left\{ \begin{array}{l} I_{L1,v} \cdot (\cos v(\omega t + 0^\circ) + j \sin v(\omega t + 0^\circ)) \\ + I_{L2,v} \cdot (\cos v(\omega t + 120^\circ) + j \sin v(\omega t + 120^\circ)) \\ + I_{L3,v} \cdot (\cos v(\omega t + 240^\circ) + j \sin v(\omega t + 240^\circ)) \end{array} \right\}$$

$$\underline{I}_{N,3} = I_{L1,3} \cdot e^{j3(\omega t + 0^\circ)} + I_{L2,3} \cdot e^{j3(\omega t + 120^\circ)} + I_{L3,3} \cdot e^{j3(\omega t + 240^\circ)} \quad |\underline{I}_{N,3}| = 3 \cdot I_{L,3}$$

$$\underline{I}_{N,5} = I_{L1,5} \cdot e^{j5(\omega t + 0^\circ)} + I_{L2,5} \cdot e^{j5(\omega t + 120^\circ)} + I_{L3,5} \cdot e^{j5(\omega t + 240^\circ)} \quad |\underline{I}_{N,5}| = 0 \cdot I_{L,5}$$



Theoretische Gleichungen

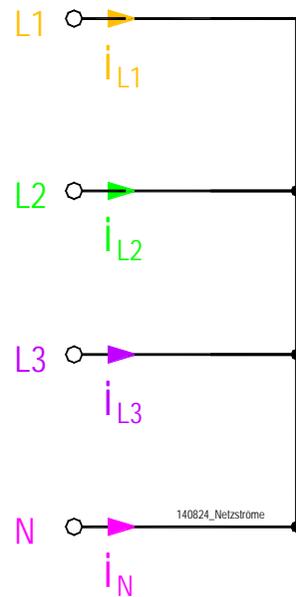
➤ Gleichungen 3. und 5. Harmonische - keine 120° Phasenverschiebung

$$\underline{I}_{N,3} = I_{L1,3} \cdot e^{j3(\omega t + 20^\circ)} + I_{L2,3} \cdot e^{j3(\omega t + 130^\circ)} + I_{L3,3} \cdot e^{j3(\omega t + 270^\circ)}$$

$$|\underline{I}_{N,3}| = |e^{j3 \cdot (20^\circ)} + e^{j3 \cdot (130^\circ)} + e^{j3 \cdot (270^\circ)}| \cdot I_{L,3} = 2,73 \cdot I_{L,3}$$

$$\underline{I}_{N,5} = I_{L1,5} \cdot e^{j5(\omega t + 20^\circ)} + I_{L2,5} \cdot e^{j5(\omega t + 130^\circ)} + I_{L3,5} \cdot e^{j5(\omega t + 270^\circ)}$$

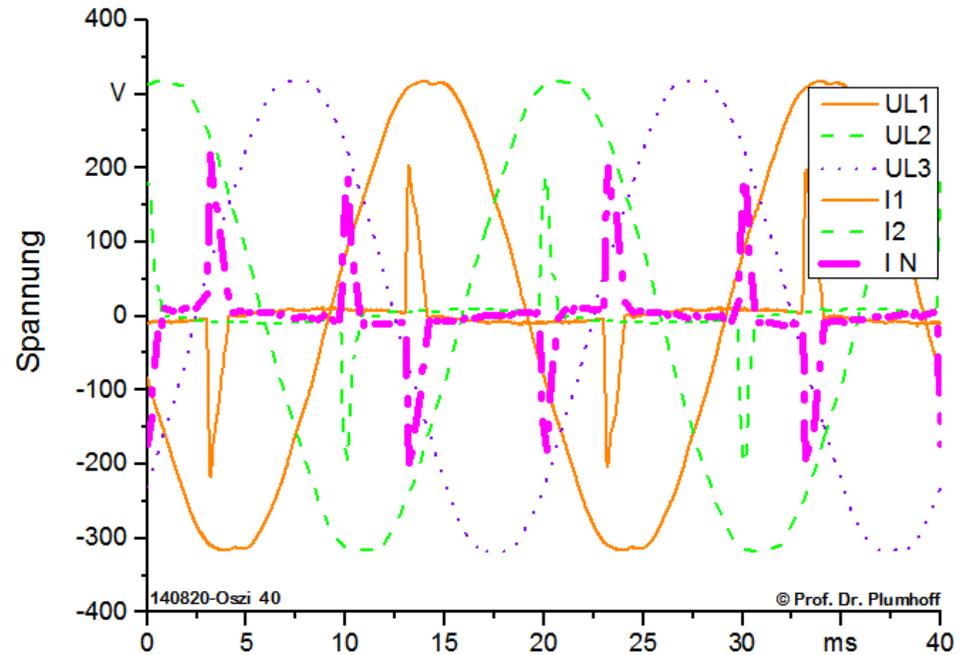
$$|\underline{I}_{N,5}| = |e^{j5 \cdot (20^\circ)} + e^{j5 \cdot (130^\circ)} + e^{j5 \cdot (270^\circ)}| \cdot I_{L,3} = 0,97 \cdot I_{L,5}$$



Anwendung - Lampen 2-phasig

- $I_1 = 1,08 \text{ A}$ THD-I1 = 193 %
- $I_2 = 0,98 \text{ A}$ THD-I2 = 211 %
- $I_N = 1,45 \text{ A}$ THD-IN = 285 %

- | | | |
|-------------|-----------|-----------|
| ▪ $I_{1,1}$ | $I_{1,3}$ | $I_{1,5}$ |
| ▪ 0,49 A | 0,42 A | 0,39 A |
| ▪ $I_{2,1}$ | $I_{2,3}$ | $I_{2,5}$ |
| ▪ 0,42 A | 0,34 A | 0,33 A |
| ▪ $I_{N,1}$ | $I_{N,3}$ | $I_{N,5}$ |
| ▪ 0,48 A | 0,77 A | 0,37 A |





Dezentrale Speicher am Netz

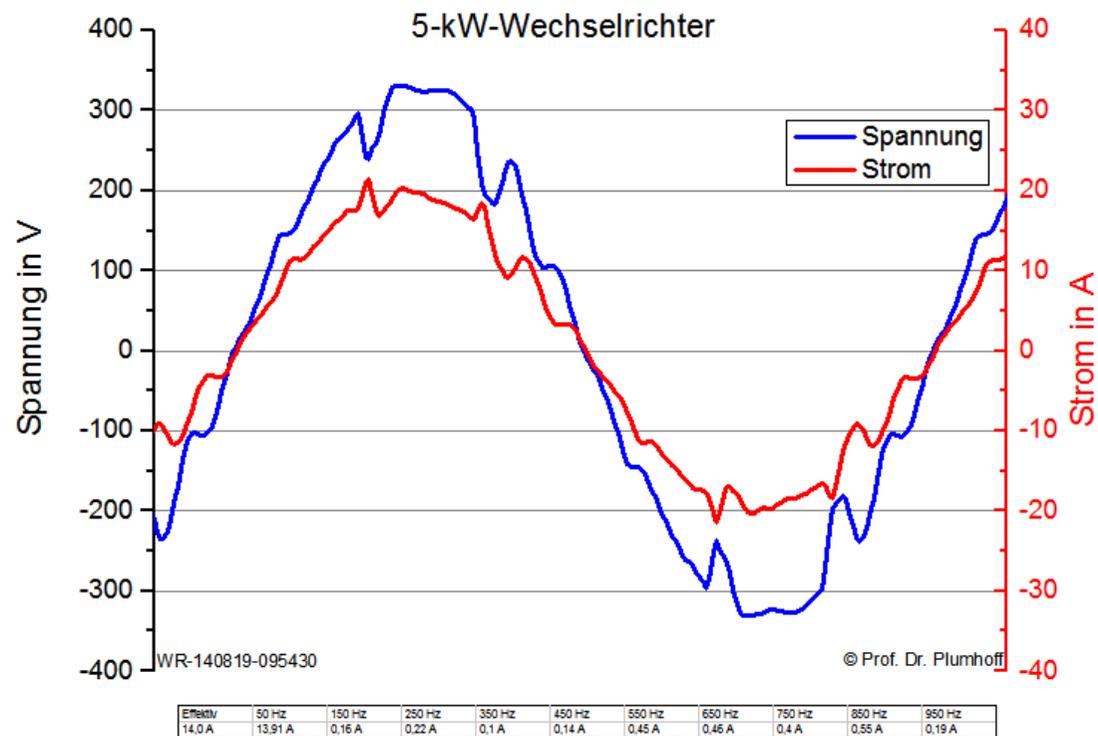
- Dezentrale Speicher am Netz?
 - E-Mobile – in Planung
 - viele weitere

- Womit werden dezentrale Speicher ans Netz angeschlossen?
 - Wechselrichter
 - mit denselben Oberschwingungen wie die Gleichrichter?
 - Pulsweitenmoduliert – Grundswingungsstrom fast ohne Oberschwingungen
 - keine zusätzliche Belastung in Außen- und Neutralleiter

Dezentrale Speicher am Netz

➤ Beispiel 5-kW-PV-Anlage

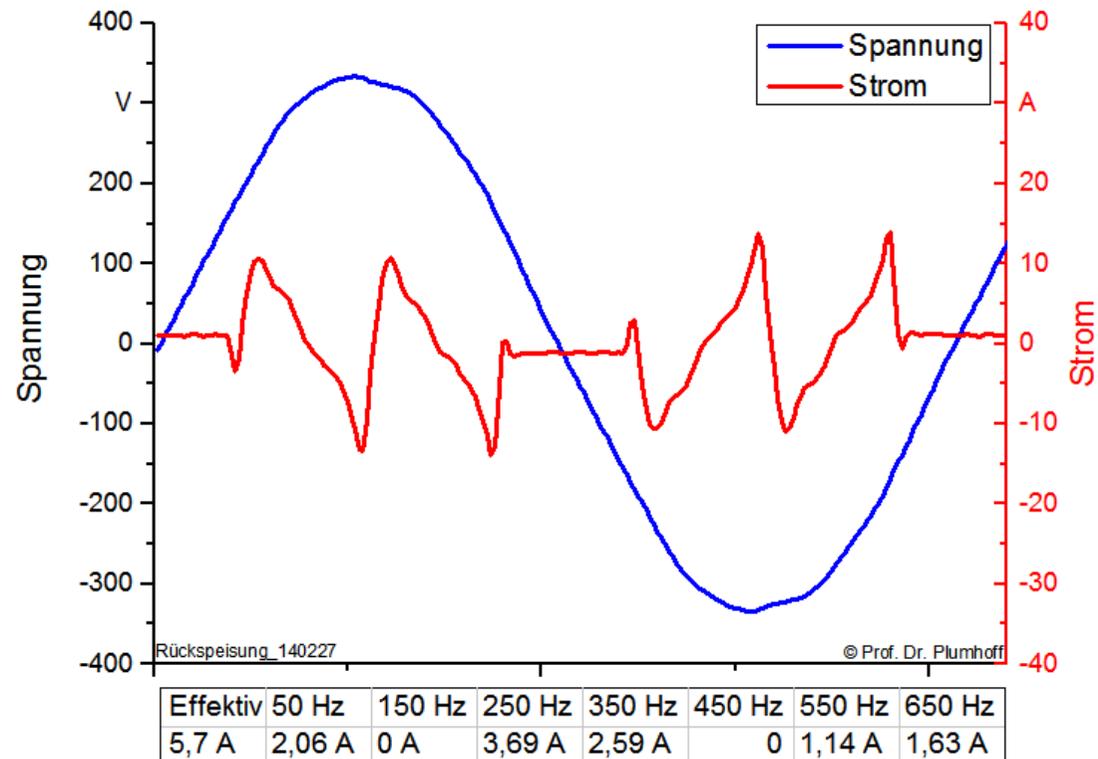
- $I_{11} = 0,45 \text{ A}; 550 \text{ Hz}$
- $I_{13} = 0,46 \text{ A}; 650 \text{ Hz}$
- $I_{15} = 0,4 \text{ A}; 750 \text{ Hz}$
- $I_{17} = 0,55 \text{ A}; 850 \text{ Hz}$



Dezentrale Speicher am Netz

➤ Beispiel 7,5-kW-Rückspeiseeinheit

- $I_1 = 2,06 \text{ A}$
- $I_3 = 0 \text{ A}$
- $I_5 = 3,69 \text{ A}$
- $I_7 = 2,59 \text{ A}$





Zusammenfassung

- Keine symmetrische Belastung im Drehstromnetz - sinusförmig
 - Folgen für Neutralleiter bekannt
- Immer mehr Oberschwingungen – Ströme
 - Überwachung des Neutralleiters notwendig
 - EMV-Probleme durch Neutralleiterströme
 - Vagabundierende Ströme in Potentialausgleichssystemen
 - Oberschwingungen – Spannungsänderungen
 - Dimensionierung der Querschnitte
 - Verluste
 - 4-polige Schalter
- Filter
 - passiv
 - aktiv

