

Einphasentransformator

Weier Andreas
weierand@zhwin.ch
Klasse: ME04a

5. Februar 2006

Zusammenfassung

Das Verhalten eines Transformators wurde durch Messungen untersucht. Die Werte für eine Primärseite transformierte Transformatorersatzschaltung wurde durch vier Messungen bestimmt (Nennbetrieb mit Last, Leerlaufmessung, Kurzschlussmessung, Wickungswiderstandmessung). Diese Ersatzschaltung wurde mittels *Matlab/Simulink* simuliert. Es zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen Simulation und Messungen vernachlässigbar sind. Das Modell des realen Transformator wurde durch diese Messungen validiert.

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung	3
2. Messschaltungen	4
2.1. Bemerkung zu den Schaltungen	5
2.2. Vorgehen	5
3. Ergebnisse	6
3.1. Primärseite transformierte Transformatorersatzschaltung	6
3.2. Simulation des realen Transformator	7
4. Schlusswort	8
A. Anhang	9
A.1. Fehlerbetrachtung	9
A.2. Simulink Model	10
A.3. Matlabcode	11
A.4. Matlabergebnisse	14
A.5. Matlab Plots	15
A.6. Inventar	16

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Aufnahme der Nennwerte eines Transformators und tabellarische Darstellung der Werte. Bestimmung der Betriebsdaten des realen Transformators mit rein ohmscher Last ($\cos(\varphi) \cong 0$) bei der Nennspannung $U_{1n} = 48V$. Bestimmung der auf Primärseite transformierte Transformatorersatzschaltung mittels vier Messeinrichtungen: Wicklungswiderstandmessung, Nennbetriebsmessungen, Leerlaufversuch, Kurzschlussversuch.

Darstellung der Hysterese des Transformators durch messen von Spannung und Strom mit dem Kathoden-Oszilloskop(KO).

Durch Messung der Eingangsspannung und Ausgangsspannung mit dem KO soll das Simulationsmodell des realen Transformator validiert werden. Dabei werden für die Simulation die Daten der Transformatorersatzschaltung gebrauch.

2. Messschaltungen

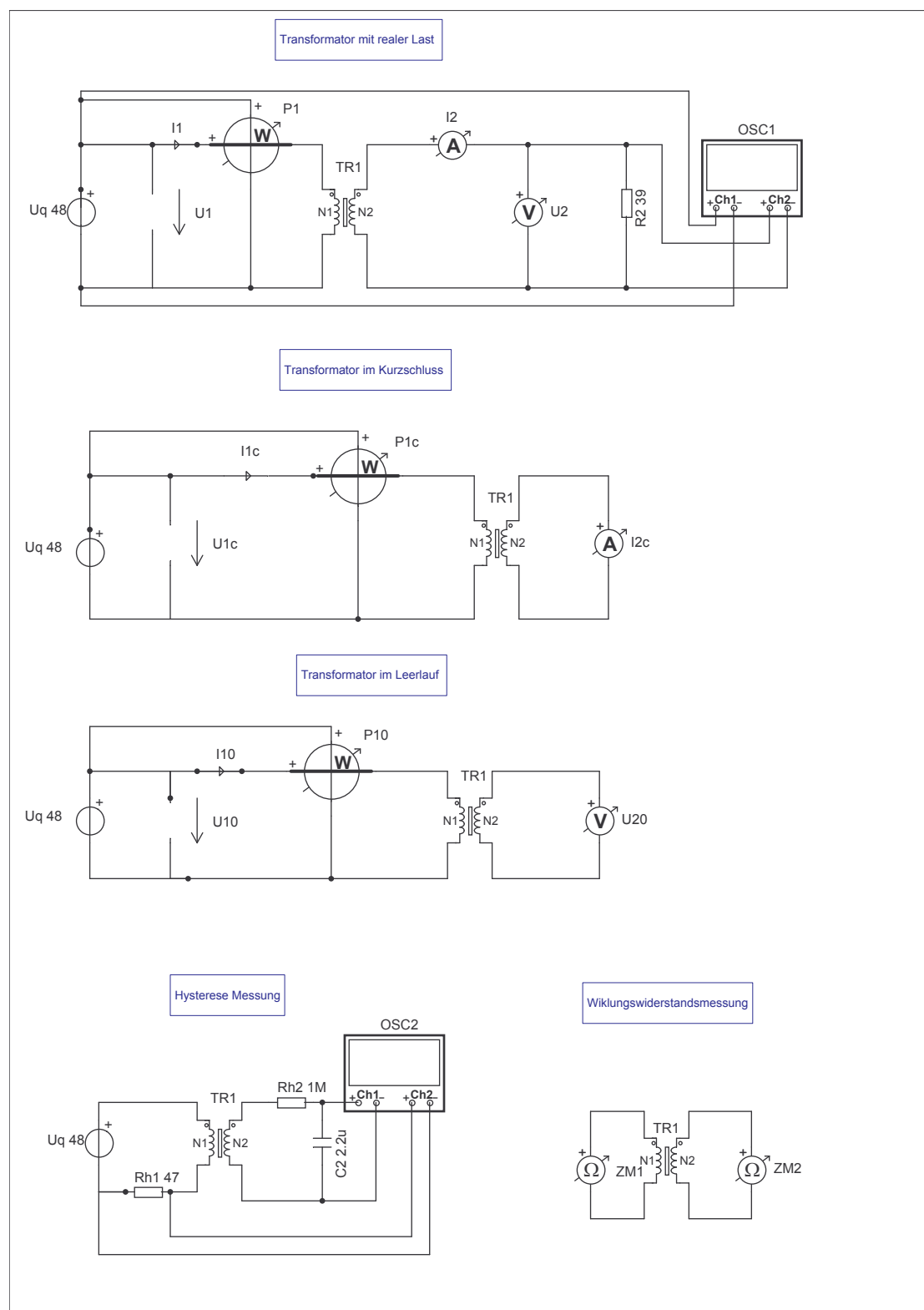


Abbildung 1: Messschaltungen

2.1. Bemerkung zu den Schaltungen

Die Spannung wird durch den Stelltransformator (siehe Anhang: A.6) eingestellt. U_q ist keine ideale Spannungsquelle und kann auch nicht als solche betrachtet werden, da das Ausgangssignal nicht ein «reiner» sinus ist.

2.2. Vorgehen

Transformator mit realer Last

- Aufbau der Schaltung
- Einstellen der Spannung am Stelltransformator ($U_q = U_{1n}$)
- Am Voltmeter wird die Ausgangsspannung gemessen, am Ampèremeter der Sekundärstrom. Am Wattmeter werden die Primärleistung, Eingangsspannung und den Primärstrom gemessen. Am KO werden zusätzlich der Verlauf der Eingangsspannung(CH I) und Ausgangsspannung(CH II) gemessen.

Transformator im Kurzschluss

- Aufbau der Schaltung
- Spannung auf Primärseite vorsichtig erhöhen bis auf der Sekundärseite Nennstrom I_{2n} fließt.
- Am Ampèremeter wird der Kurzschlussstrom gemessen. Am Wattmeter werden die Kurzschlusseingangsspannung, der Kurzschlusseingangsstrom und die Kurzschlusseingangsleistung gemessen.

Transformator im Leerlauf

- Aufbau der Schaltung
- Einstellen der Spannung am Stelltransformator ($U_q = U_{1n}$).
- Am Voltmeter wird die Leerlaufspannung gemessen. Am Wattmeter werden die Leerlaufeingangsspannung, der Leerlaufeingangsstrom und die Leerlaufeingangsleistung gemessen.

Wicklungswiderstandsmessung

- Aufbau der Schaltung
- Mit dem Ohmmeter werden die zwei Spulenwiderstände gemessen.

Hysteresemessung

- Aufbau der Schaltung
- Einstellen der Spannung am Stelltransformator ($U_q = U_{1n}$).
- Am Funktionsgenerator wird die Spannung über den Kondensator (CH I) in Funktion des Stroms auf der Primärseite (CH II) dargestellt. Die Hysteresemessung wird hier nicht weiter betrachtet da sie zur Erfüllung der Zielsetzung nichts bringt.

3. Ergebnisse

3.1. Primärseite transformierte Transformatorersatzschaltung

primärseite Kupferverlustwiderstand	$R_1 = 7.61 \pm 0.04\Omega$
transf. sek. Kupferverlustwiderstand	$R'_2 = 8.08 \pm 0.04\Omega$
Eisenverlustwiderstand	$R_{Fe} = 1589 \pm 24\Omega$
Hauptinduktivität	$L_{h1} = 365 \pm 7mH$
primärseite Streuinduktivität	$L_{sigma1} = 10.78 \pm 1.18mH$
transf. sek. Streuinduktivität	$L'_{sigma2} = 10.78 \pm 1.18mH$
Übertragungsfaktor	$\ddot{u} = 1.7$

Tabelle 1: Primärseite transformierte Transformatorersatzschemawerte

Die Transformatorersatzschemawerte konnten durch die verschiedenen Messungen berechnet werden. Es zeigt sich, dass die Streuinduktivitätsverluste etwa 6% der Hauptinduktivität ausmachen. Für genaue Messungen soll deswegen der Transformator als real (mit Verluste) betrachtet und das Ersatzschema gebraucht werden. Für viele technische Anwendungen sind diese Verluste trotzdem vernachlässigbar und man kann den Transformator als idealer Übertrager betrachten.

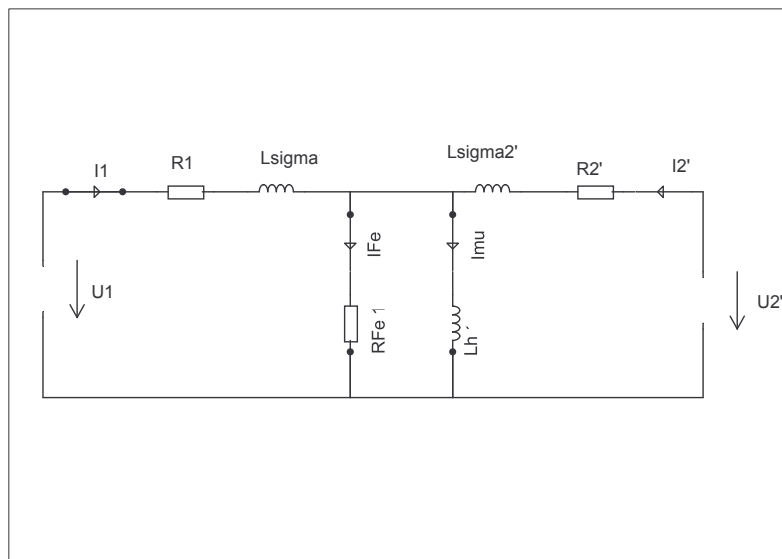


Abbildung 2: Ersatzschaltbild des realen Primärseite transformierter Transformator

3.2. Simulation des realen Transformator

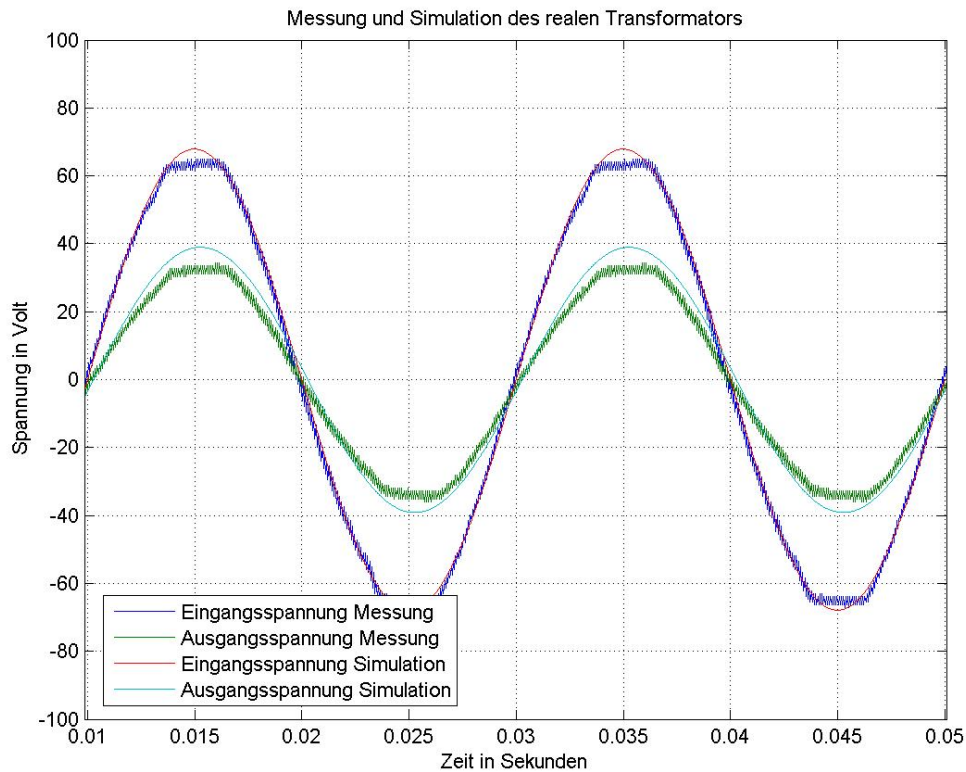


Abbildung 3: Vergleich zwischen Transformatorsimulation und Nennbetriebsmessung

Die Abbildung 3 zeigt, dass das Verhalten des Transformators durch das Simulationsmodell gut angenähert werden kann. Wir können eine deutliche Abweichung (Abbildung 4) zwischen der Simulation und der Messung im Bereich der Spannungsspitzenwerte sehen. Da diese Abweichung bei der Eingang wie auch bei der Ausgangsspannung bemerkbar ist, kann auf einen systematischen Fehler der Spannungsquelle zurückgeführt werden. Diese Sättigung des Eingangssignals wurde wahrscheinlich durch induktive Verluste der Quelle verursacht. Die restlichen Abweichungen können nach Messfehlerbetrachtungen vernachlässigt werden (siehe Tabelle 2 im Anhang). Das Simulationsmodell ist dadurch validiert. Die Simulation kann deshalb als Ersatz von Messungen dienen.

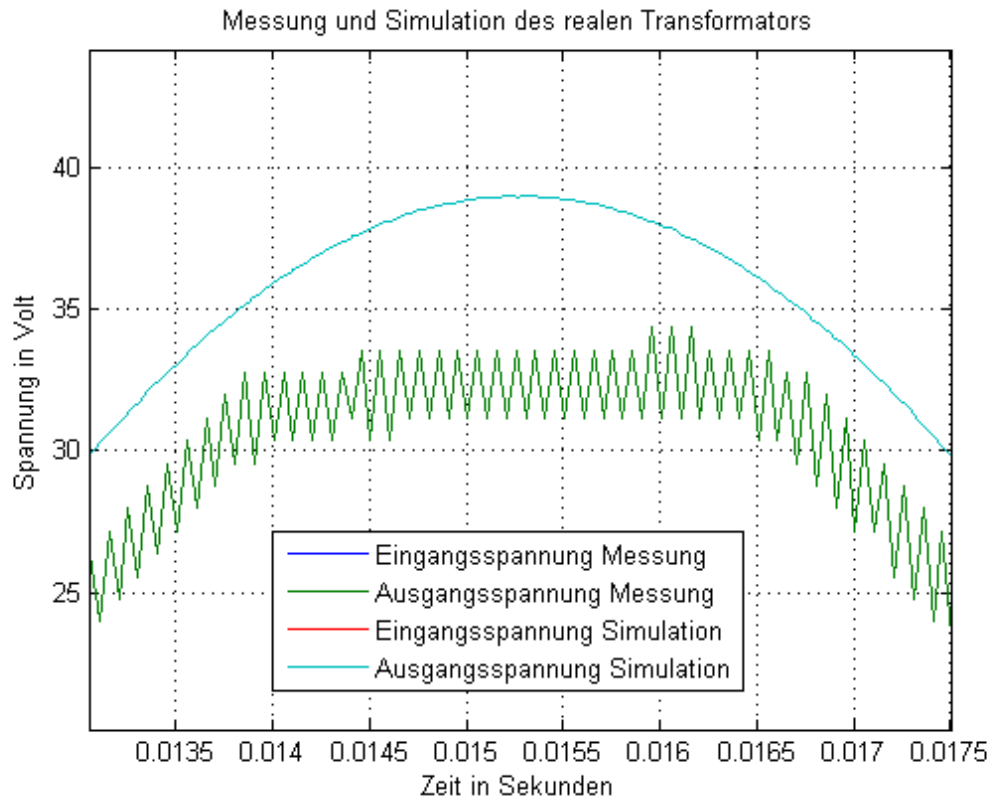


Abbildung 4: Zoom bei Fehler aus Abbildung 3

4. Schlusswort

Es wäre im Weiterem interessant den Einfluss der Frequenz zu untersuchen und einen Vergleich zwischen Messung und Simulation darzustellen. Dafür könnte das Simulationsmodell ohne Änderung übernommen werden. Es wäre auch von Interesse den Sättigungsfehler zu untersuchen um die genaue Ursache zu ermitteln.

Winterthur, den 5. Februar 2006

Weier Andreas

A. Anhang

A.1. Fehlerbetrachtung

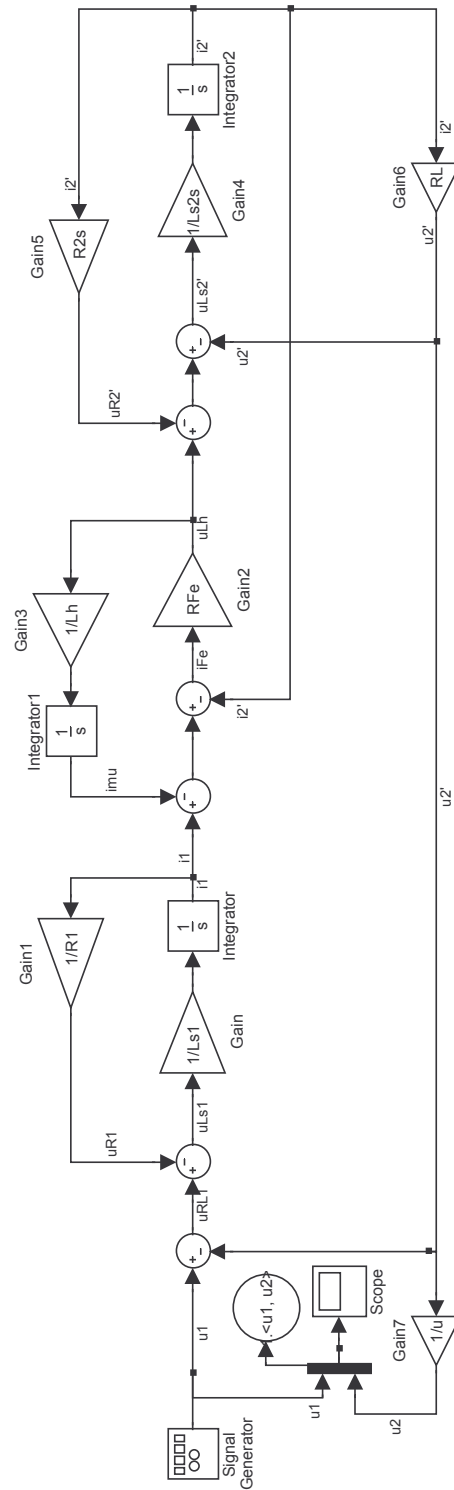
Relativer Messfehler bei Oszilloskopmessung =	17%
Relativer Messfehler bei Spannungsmessung =	1%
Relativer Messfehler bei Strommessung =	1%
Relativer Messfehler bei Leistungsmessung =	1%
Relativer Messfehler bei Widerstandsmessung =	1%

Tabelle 2: Relative Messfehler

Die Fehlerbetrachtung wurde direkt mit Matlab berechnet. (siehe Listing: 1). Bei der Fehlerberechnung von Funktionen mit mehr als 2 Variablen wurde der Fehler bei der maximalen Abweichung berechnet. Der Fehler in diesem Punkt wird durch Formel 1 bestimmt.

$$\frac{f_{(max)} - f_{(min)}}{2} \quad (1)$$

A.2. Simulink Model



Simulation von einem realen Transformator
Weier, Andreas
22.01.2006

Abbildung 5: Simulationsmodell des Realen Transformator

A.3. Matlabcode

```

1 %Weier Andreas
2 %19. Januar 2006
3 %Versuch 3 Einphasentransformator
4 %Fach: EL-3
5 %*****
6 clear all, clc
7 %*****
8 %*****%
9 % Aufnahme der Nennwerte: %
10 %*****%
11 U1n=48;          %primäre Nennspannung in Volts
12 U2n=24;          %sekundäre Nennspannung in Volts
13 S2n=15;          %Nennleistung (sekundär) in VA
14 fn=50;           %Nennbetriebsfrequenz in Hz
15 N1=445;          %Windungszahl der Eingangsspule
16 N2=267;          %Windungszahl der Ausgangsspule
17 u1n=N1/N2;       %Windungsübersetzungsverhältnis
18 I2n=S2n/U2n;     %sekundärer Nennstrom in A
19 Z2n=U2n^2/S2n;   %sekundäre Nennlast in Ohm
20
21 %String definition für Tabelle Nennwerte:
22 fid = fopen('Nennwerte.txt','w');
23 fprintf(fid,'Transformator Nennwerte \n\n');
24 fprintf(fid,'U1n= \t %0.0f V \n',U1n);
25 fprintf(fid,'U2n= \t %0.0f V \n',U2n);
26 fprintf(fid,'S2n= \t %0.0f VA \n',S2n);
27 fprintf(fid,'fn= \t %0.0f Hz \n',fn);
28 fprintf(fid,'N1= \t %0.0f \n',N1);
29 fprintf(fid,'N2= \t %0.0f \n',N2);
30 fprintf(fid,'ü= \t\t %0.1f \n',u1n);
31 fprintf(fid,'I2n= \t %0.0f \t A \n',I2n);
32 fprintf(fid,'Z2n= \t %0.0f Ohm \n',Z2n);
33 fclose(fid);
34
35 %*****%
36 % Messungen: %
37 %*****%
38 f=50;           % Messfrequenz in Hz
39
40 %Messung 1: Nennbetriebsdaten
41 %*****
42 U1=48.0;        %primäre Spannung in Volt
43 I1=0.42;        %primär Strom in Ampère
44 P1=19.6;        %primäre Wirkleistung in Watt
45 cosphi=P1/(U1*I1); %primärseitige Leistungsfaktor
46 Z1=U1/I1;       %primäre Impedanz in Ohm
47 U2=24.1;        %sekundär Spannung in Volt
48 I2=0.64;        %sekundär Strom in Ampère
49 Z2=39.0;        %Lastwiderstand in Ohm
50 nu=U2*I2/P1;    %Transformatorwirkungsgrad
51
52 %Import und Plot von Messung 1 mit Ko:
53 load 'Scope_Last'
54 figure(1)
55 subplot(2,1,1)
56 plot(Scope_Last(:,1),[Scope_Last(:,2),Scope_Last(:,3)])
57 axis([min(Scope_Last(:,1)) max(Scope_Last(:,1)) -100 100])
58 legend('Eingangsspannung','Ausgangsspannung','Location','SouthEast')
59 title('Messung realer Transformator mit RL')
60 grid()
61 ylabel('Spannung in Volt')
62 xlabel('Zeit in Sekunden')
63
64 %Messung 2: Wicklungswiderstände
65 %*****
66 R1=7.61;        %Wicklungswiderstand primärseite in Ohm

```

```

67 R2=2.91;      %Winklungswiderstand sekundärseite in Ohm
68
69 %Messung 2: Leerlauf
70 %*****
71 U10=48.0;      %primäre Spannung in Volt
72 I10=0.14;      %primär Strom in Ampère
73 P10=1.45;      %primäre Wirkleistung in Watt
74 RFe=U10^2/P10; %Eisenverlustwiderstand in Ohm
75 Lh=U10^2/sqrt((U10*I1)^2-P10^2)*1/(2*pi*f); %Hauptinduktivität in Henry
76 Z10=U10/I10;   %komplexer eingangswiderstand in Ohm
77 U20=28.2;      %sekundär Spannung in Volt
78 u10=U10/U20;    %Spannungsübertragsverhältniss
79 cosphi0=P10/(U10*I10); %primärseitige Leistungsfaktor
80
81 %Messung 3: Kurzschluss
82 %*****
83 I1c=0.376;      %primärer Strom in Ampère
84 U1c=6.7;        %primäre Kurzschlussspannung in Volt
85 epsilonc=U1c/U1n; %relative primäre Kurzschlussspannung
86 I2c=0.620;      %sekundäre Kurzschlussstrom in Ampère
87 u1c=I2c/I1c;    %Stromübertragsverhältnis
88 Z1c=U1c/I1c;    %Komplexer Eingangswiderstand in Ohm
89 P1c=2.33;       %primäre Leistung in Watt
90 R1_R2strich=P1c/I1c^2; %Kupferwiderstand in Ohm
91 Lsigm1_Lsigma2strich=sqrt((U1c*I1c)^2-P1c^2)/I1c^2/(2*pi*f); %Streuinduktivität
    in Henry
92 R2strich=R1_R2strich-R1; %Sekundäre Winklunswiderstand für
    Ersatzschema in Ohm
93 Lsigma1=Lsigm1_Lsigma2strich/2; %primäre Streuinduktivität in Henry
94 Lsigma2strich=Lsigma1; %sekundäre Streuinduktivität für
    Ersatzschema in Henry
95
96 %Messung 4: Hysteresis Messung:
97 %*****
98 Rh1=47.0;      %in Ohm
99 Rh2=1*1e6;     %in Ohm
100 C2=2.2*1e-6;  %in Farad
101 load 'Scope_Hysteresis.mat'
102
103 %*****%
104 % Simulation: %
105 % %*****%
106
107 %Nennwerte
108 U1=U1n*sqrt(2); %Eingangsspannung in Volt
109 u=u1n;          %Übertragsverhältniss
110 f=50.0;         %Frequenz in Hz
111 R1=R1;          %Winklungswiderstand primärseite in Ohm
112 R2=R2;          %Winklungswiderstand sekundärseite in Ohm
113 Lh=Lh;          %Hauptinduktivität in Henry
114 Ls1=Lsigma1;    %Streuinduktivität primärseite in Henry
115 Ls2=Ls1/u^2;    %Streuinduktivität sekundärseite in Henry
116 RFe=RFe;        %Eisenverlustwiderstand in Ohm
117 RL=Z2;          %Lastwiderstand in Ohm
118 tend=3/f;       %Zeit der simulation
119 %Werte für ersatzschema:
120 Ls2s=Ls1;
121 R2s=R2*u^2;
122
123 %Simulation laden und Ploten:
124 sim('Trafo_simulation.mdl');
125 subplot(2,1,2)
126 plot(tout,[yout(:,1),yout(:,2)]);
127 axis([0 2/f -100 100])%über 2 Perioden
128 legend('Eingangsspannung','Ausgangsspannung','Location','SouthEast')
129 title('Simulation realer Transformator mit RL')
130 grid()
131 ylabel('Spannung in Volt')

```

```

132 xlabel('Zeit in Sekunden')
133 print -djpeg Trafo_plot;
134
135 %Plot von Messung 1 mit KO und Werte Zusammen:
136 figure(2)
137 plot(Scope_Last(:,1),[Scope_Last(:,2),Scope_Last(:,3)],tout-(1/(f*2)),[yout
    (:,1),yout(:,2)])
138 axis([min(Scope_Last(:,1)) max(Scope_Last(:,1)) -100 100])
139 legend('Eingangsspannung Messung','Ausgangsspannung Messung',...
140     'Eingangsspannung Simulation','Ausgangsspannung Simulation','Location','
        SouthWest')
141 title('Messung und Simulation des realen Transformators')
142 grid()
143 ylabel('Spannung in Volt')
144 xlabel('Zeit in Sekunden')
145 print -djpeg Trafo_simul_mess_plot;
146
147 %Plot Hysteresse Messungen:
148 load 'Scope_Hysteresse.mat'
149 figure(3)
150 plot(Hysteresse_data(:,2),Hysteresse_data(:,3));
151 legend('Gemessene Hysteresse','Location','SouthWest')
152 title('Hysteresse eines Transformators')
153 grid()
154 ylabel('B ~ Spannung in Volt')
155 xlabel('H ~ Strom in Ampère')
156 print -djpeg Hysteresse_plot;
157
158 %*****%
159 % Fehlerbetrachtung:      %
160 % %*****%
161
162 %relative Messgerät toleranzen:
163 d0=5/30; %relativer Fehler bei Oszilloskopmessung
164 dV=0.5/100; %relativer Fehler bei Spannungsmessung
165 dA=0.5/100; %relativer Fehler bei Strommessung
166 dP=0.5/100; %relativer Fehler bei Leistungsmessung
167 dR=0.5/100; %relativer Fehler bei Widerstandsmessung
168
169 %Fehlerberechnung bei Maximaler Abweichung:
170 Umax=max(Scope_Last(:,3))*(1+d0);
171 Umin=max(Scope_Last(:,3))*(1-d0);
172 deltaU=(Umax-Umin)/2;
173
174 %Fehlerbetrachtung für das Ersatzschema;
175 deltaR1=R1*dR;
176 deltaR2=R2*dR;
177 deltaRL=RL*dR;
178 deltaU1=U1*dV;
179 Lhmax=((U10*(1+dV))^2/sqrt(((U10*(1-dV))*(I1*(1-dA)))^2-(P10*(1+dP))^2)
    /(2*pi*f));
180 Lhmin=((U10*(1-dV))^2/sqrt(((U10*(1+dV))*(I1*(1+dA)))^2-(P10*(1-dP))^2)
    /(2*pi*f));
181 deltaLh=(Lhmax-Lhmin)/2;
182 Ls1max=(sqrt(((U1c*(1+dV))*(I1c*(1+dA)))^2-(P1c*(1-dP))^2)/(I1c*(1-dA))
    ^2/(2*pi*f))/2;
183 Ls1min=(sqrt(((U1c*(1-dV))*(I1c*(1-dA)))^2-(P1c*(1+dP))^2)/(I1c*(1+dA))
    ^2/(2*pi*f))/2;
184 deltaLs1=(Ls1max-Ls1min)/2;
185 deltaLs2s=deltaLs1;
186 deltaRFe=U10^2/P10*(dV*2+dP);
187 deltaR2s=deltaR2*u^2;
188
189 %String definition für Tabelle Ersatzschema und Fehler Toleranzen:
190 fid = fopen('Ersatzschema_Toleranzen.txt','w');
191 fprintf(fid,'Transformatorersatzschemawerte und Fehlertoleranzen \n\n');
192 fprintf(fid,'Relativer Fehler bei Oszilloskopmessung =\t %0.0f %%\n',d0*100);
193 fprintf(fid,'Relativer Fehler bei Spannungsmessung = \t\t %0.0f %%\n',dV*100);

```

```

194 fprintf(fid,'Relativer Fehler bei Stromkopmessung = \t\t %0.0f %%\n',dA*100);
195 fprintf(fid,'Relativer Fehler bei Leistungpmessung = \t %0.0f %%\n',dP*100);
196 fprintf(fid,'Relativer Fehler bei Widerstandpmessung =\t %0.0f %%\n\n',dR*100)
    ;
197 fprintf(fid,'R1= \t %0.2f ',R1);
198 fprintf(fid,'+- %0.2f \t Ohm \n',deltaR1);
199 fprintf(fid,'RL= \t %0.1f ',RL);
200 fprintf(fid,'+- %0.1f \t Ohm \n',deltaRL);
201 fprintf(fid,'RFe= \t %0.0f ',RFe);
202 fprintf(fid,'+- %0.0f \t Ohm \n',deltaRFe);
203 fprintf(fid,'R2''= \t %0.2f ',R2s);
204 fprintf(fid,'+- %0.2f \t Ohm \n',deltaR2s);
205 fprintf(fid,'U1= \t %0.1f ',U1/sqrt(2));
206 fprintf(fid,'+- %0.1f \t V \n',deltaU1);
207 fprintf(fid,'Lh= \t %0.0f ',Lh*1e3);
208 fprintf(fid,'+- %0.0f \t\t mH \n',deltaLh*1e3);
209 fprintf(fid,'Ls1= \t %0.2f ',Ls1*1e3);
210 fprintf(fid,'+- %0.2f \t mH \n',deltaLs1*1e3);
211 fprintf(fid,'Ls2''= \t %0.2f ',Ls2s*1e3);
212 fprintf(fid,'+- %0.2f \t mH \n',deltaLs2s*1e3);
213 fprintf(fid,'ü= \t \t %0.1f \n',u);
214 fclose(fid),

```

Listing 1: Matlab-Sourcecode

A.4. Matlabergebnisse

```

1 Transformator Nennwerte
2
3 U1n= 48 V
4 U2n= 24 V
5 S2n= 15 VA
6 fn= 50 Hz
7 N1= 445
8 N2= 267
9 ü= 1.7
10 I2n= 1 A
11 Z2n= 38 Ohm

```

Listing 2: Transformator Nennwerte

```

1 Transformatorersatzschemawerte und Fehlertoleranzen
2
3 Relativer Fehler bei Oszilloskopmessung = 17 %
4 Relativer Fehler bei Spannungmessung = 1 %
5 Relativer Fehler bei Stromkopmessung = 1 %
6 Relativer Fehler bei Leistungpmessung = 1 %
7 Relativer Fehler bei Widerstandpmessung = 1 %
8
9 R1= 7.61 +- 0.04 Ohm
10 RL= 39.0 +- 0.2 Ohm
11 RFe= 1589 +- 24 Ohm
12 R2''= 8.08 +- 0.04 Ohm
13 U1= 48.0 +- 0.3 V
14 Lh= 365 +- 7 mH
15 Ls1= 10.78 +- 1.18 mH
16 Ls2''= 10.78 +- 1.18 mH
17 ü= 1.7

```

Listing 3: Transformator Ersatzschemawerte und Toleranzen

A.5. Matlab Plots

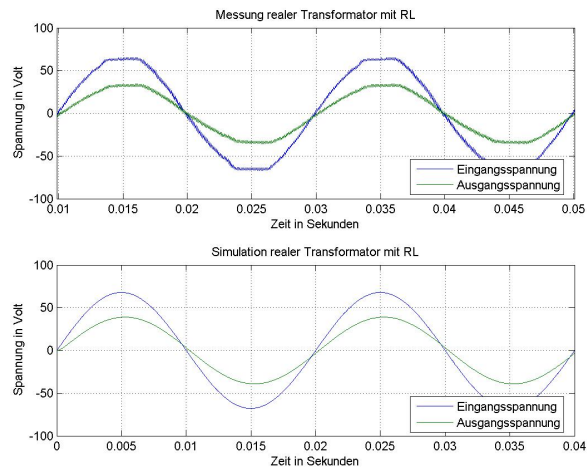


Abbildung 6: Simulation und Messung des Realen Transformators

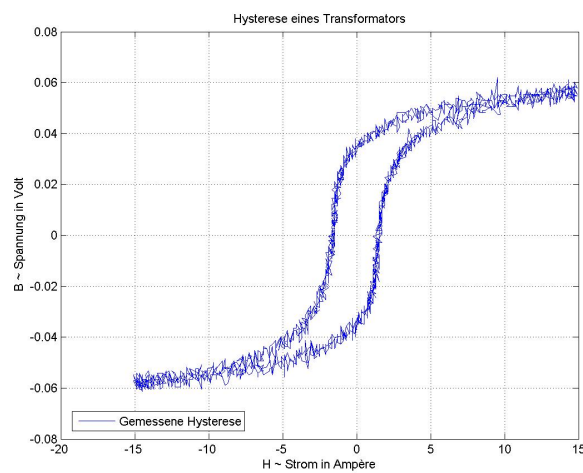
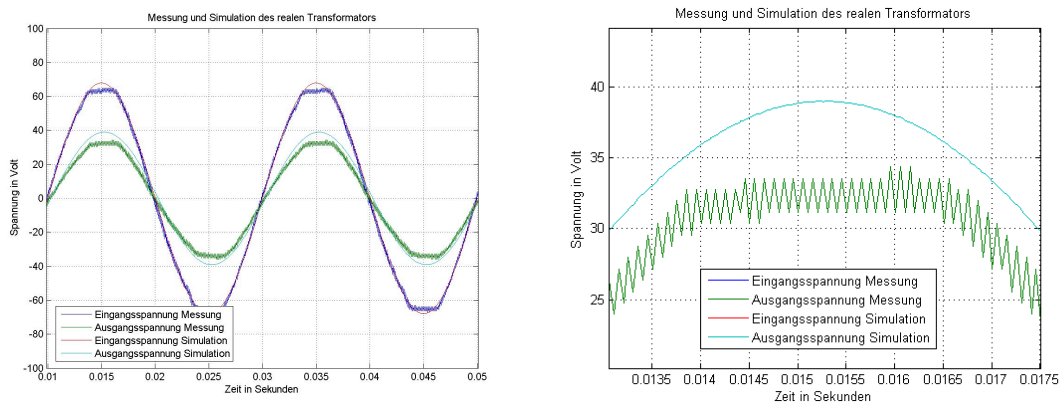


Abbildung 7: Hysterese des Transformators bei Nennbetrieb



A.6. Inventar

- Grundausrüstung (2 x HM 8011, 2 x HM 8142, HM 5030, HM 8032)
- 1 zusätzliches Multimeter (Hameg 8011)
- 1 Leistungsmessgerät (HM 8115)
- 1 Ohmmeter (Tettex)
- 1 Stelltransformator LTS 230/48/630(230 V / 0...50 V, 630 mA) mit integriertem Trenntrafo 5:1
- 1 Leistungswiderstand ARCOL HS50, 39 Ω (50 W, 50%)
- Box mit Polyester-Folienkondensatoren(..., 470, 1000, 2200 nF)
- 2 Widerstandsdekaden (1 W, $\pm 1\%$)

Messobjekte

- 1 Transformator mit Eisenkern (48/24 V, 50 Hz, 15 VA, Windungszahlen 445/267)