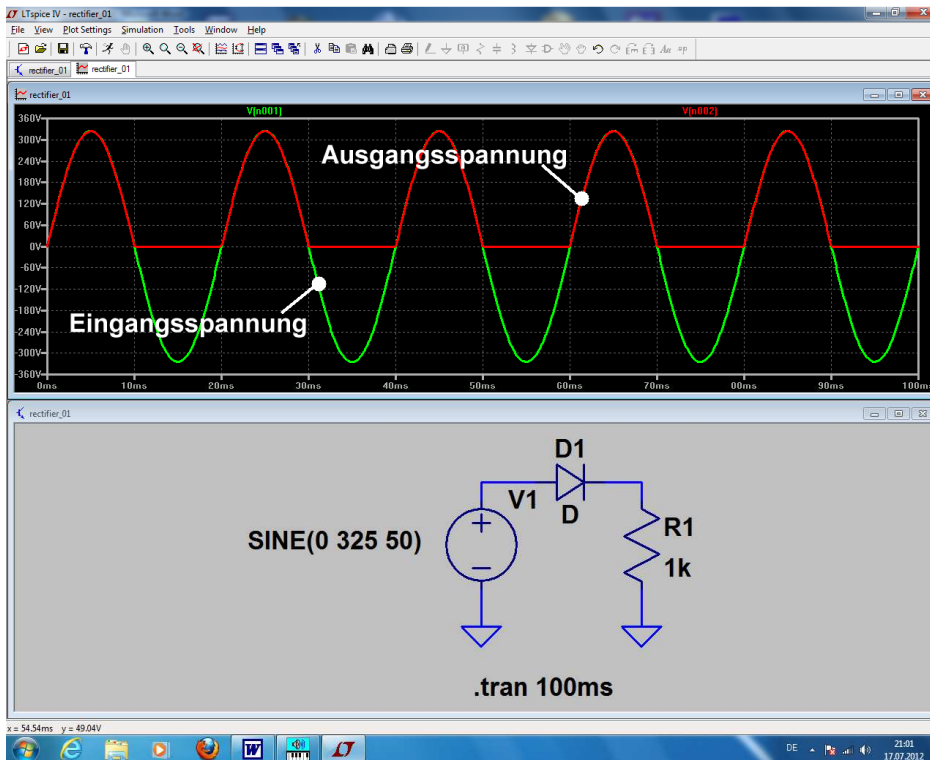


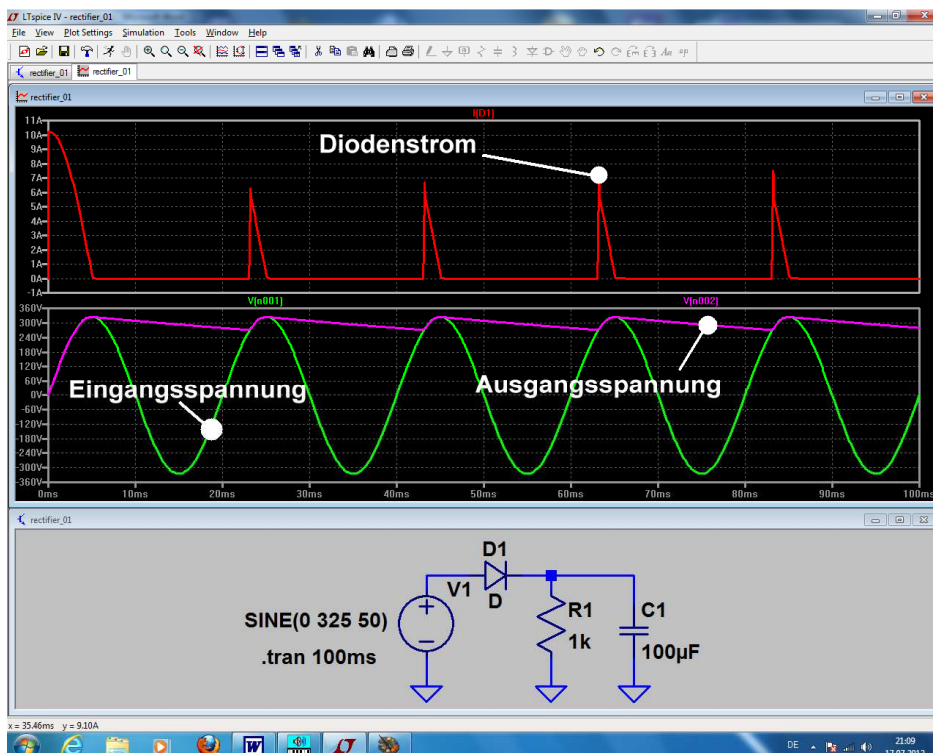
8. Zweites Projekt: Gleichrichtung

8.1. Einpuls-Gleichrichter ohne Trafo



Das darf nun kein Problem mehr sein: erst die Schaltung aus Spannungsquelle, Diode und Widerstand (1k) zusammenstellen, dann eine sinusförmige Eingangsspannung (50 Hz / Spitzenwert = 325 V) programmieren und eine Simulationszeit von 0 bis 100 Millisekunden vorsehen. Nach der Simulation sollte dieser Bildschirm zu sehen sein.

Aufgabe: Schalten Sie am Ausgang noch einen Ladekondensator von 100 Mikروفarad parallel und simulieren Sie zusätzlich **den Strom in der Diode** (= fahren Sie dazu mit dem Cursor auf den linken Anschluss der Diode, bis sich der Cursor zur Stromzange verändert). Stellen Sie den Strom in einem eigenen Diagramm dar.

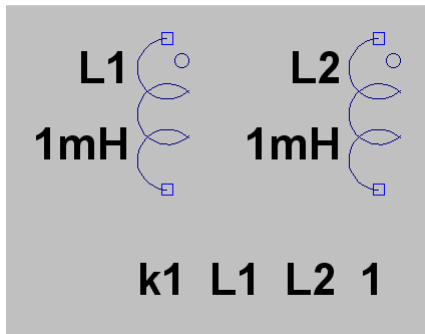


8.2. Einpuls-Gleichrichter mit Transformator

8.2.1. Ein idealer Trafo muss her!

Leider enthält die LTSpice-Bibliothek keine speziellen Transformatormodelle, sondern nur die aus dem originalen SPICE-Manual stammende, einfache (= aber deshalb sehr gut verständliche) Lösung für **den idealen Transformator**. Sie sieht so aus:

Man trägt die vorgesehene Anzahl an Wicklungen mit ihren Induktivitätswerten in die Schaltung ein und schreibt zusätzliche Spice-Direktiven für die magnetischen Kopplungsfaktoren „kn“ zwischen den einzelnen Wicklungen.



Beispiel für einen idealen Übertrager mit 2 Wicklungen und dem Übersetzungsverhältnis 1:1

a) Als Schaltzeichen wird „ind2“ aus der Symbolbibliothek geholt und platziert. Es enthält außer der Induktivität (= Wicklung) noch die bekannte und bei Trafos übliche **Kennzeichnung des Wicklungsanfangs**.

b) Die Zeile „`k1 L1 L2 1`“ sagt: „die magnetische Kopplung zwischen der Wicklung L1 und der Wicklung L2 beträgt „1“ = „100%“.

c) **Achtung:**

Eine direkte Eingabe des Übersetzungsverhältnisses ist bei SPICE nicht möglich, da immer nur mit den Bauteil-Eigenschaften (hier: Induktivitätswerte und magnetische Kopplung) simuliert wird. Also müssen wir das anders lösen und gehen auf die Induktivitäten los.

Dabei gilt folgendes:

$$\frac{L_{\text{Primär}}}{L_{\text{Sekundär}}} = (\dot{u})^2 = \left(\frac{U_{\text{Primär}}}{U_{\text{Sekundär}}} \right)^2$$

und diese Formel stellen wir (wenn wir L1 vorgegeben haben und das Übersetzungsverhältnis kennen) einfach nach $L_{\text{Sekundär}}$ um. Ist also sehr einfach!

Die Frage ist nun: wie geht man in der Praxis vor, wenn die Eigenheiten eines echten gewickelten Übertragers berücksichtigt werden müssen? Das ist z. B. bei Schaltnetzteilen unerhört wichtig, denn dort wird sonst der Unterschied zwischen Simulation und wirklicher Schaltung so groß, dass die Simulation keinen Sinn mehr macht.

Das folgt im Kapitel

(Da soll gezeigt werden, wie man sich hilft, wenn man einen **echten, gewickelten Übertrager** vor sich hat und das ist z. B. bei Schaltnetzteilen unerhört wichtig. Dort wird nämlich sonst der Unterschied zwischen Simulation und wirklicher Schaltung so groß, dass die Simulation keinen Sinn mehr macht. Die Ausgangsbasis war das SPICE-Modell für den Ausgangsübertrager eines röhrenbestückten HiFi-Verstärkers. Es wurde im Internet entdeckt und entsprechend umfunktioniert).

8.2.2. Einpuls-Gleichrichter mit idealem Trafo

Aufgabe:

Untersuchen Sie ein Netzteil mit idealem Netztransformator, Gleichrichterdiode, Lastwiderstand $R_L = 1\text{k}\Omega$ und Ladekondensator $C = 100\mu\text{F}$. Der Trafo-Eingang liegt an der Netzspannung mit $230\text{V} / 50\text{Hz}$, das Übersetzungsverhältnis sei $20:1$. Simulieren Sie die Zeit von Null bis 100 Millisekunden.

Lösung:

Die meisten Bauteile (Spannungsquelle, Kondensator, Widerstand, Diode, Ground-Symbol) kennen wir ja schon vom letzten Beispiel her. Dazu kommt nun der ideale Übertrager aus dem vorigen Kapitel. Bitte gleich alles platzieren sowie die Werte der Bauteile, der Spannungsquelle und die Simulationsanweisung eintragen.

Jetzt müssen wir uns noch um den Transformator kümmern und die Sache mit dem Übersetzungsverhältnis unterbringen. Dabei gilt folgendes:

$$\frac{L_{\text{Primär}}}{L_{\text{Sekundär}}} = (\dot{u})^2$$

Wenn wir (wie in den meisten Fällen für einen fast idealen Trafo zulässig) mal von einer **Primär-Induktivität mit 1 Henry** ausgehen, dann müssen wir eine Sekundär-Induktivität von

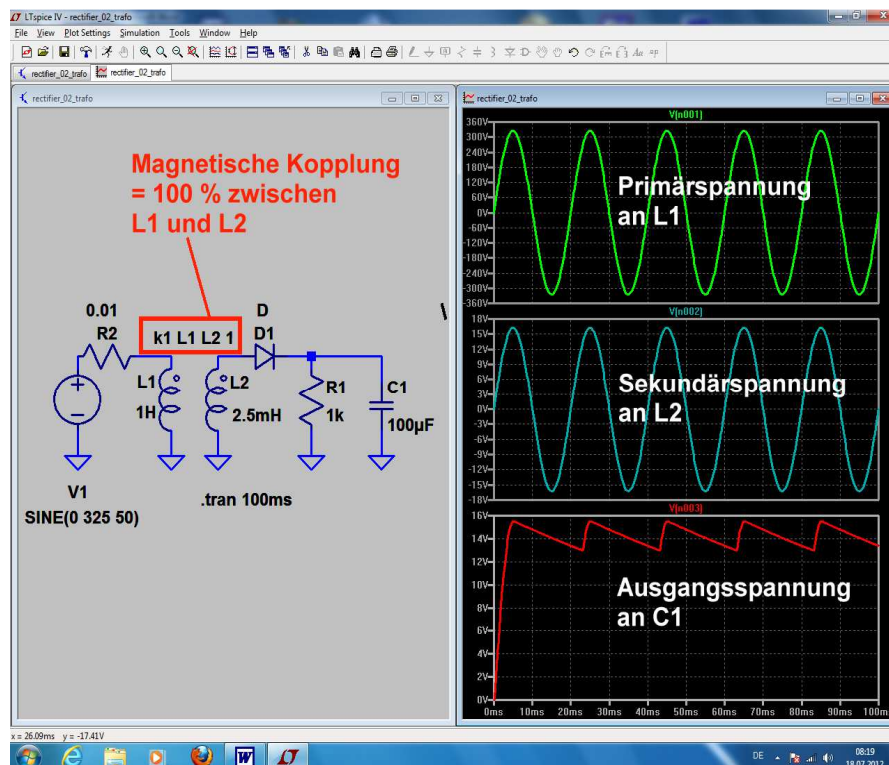
$$L_{\text{Sekundär}} = \frac{L_{\text{Primär}}}{(20)^2} = \frac{1\text{H}}{400} = 2,5\text{mH}$$

benützen. Für einen idealen Trafo kann man dann die Wicklungs-Widerstände, die Streu-Induktivitäten und die Wicklungs-Kapazitäten weglassen.

Aber Vorsicht: der Wicklungswiderstand darf NIEMALS = Null sein!

Einen fehlenden Wirkwiderstand in Reihe zu einer Induktivität beantwortet das originale SPICE sofort mit einem Abbruch und einer Fehlermeldung!

(Grund: legt man eine solche ideale Induktivität an eine Gleichspannung an, so muss diese Spannung durch Induktion erzeugt werden. Das bedeutet, dass der Strom sich wegen der Beziehung

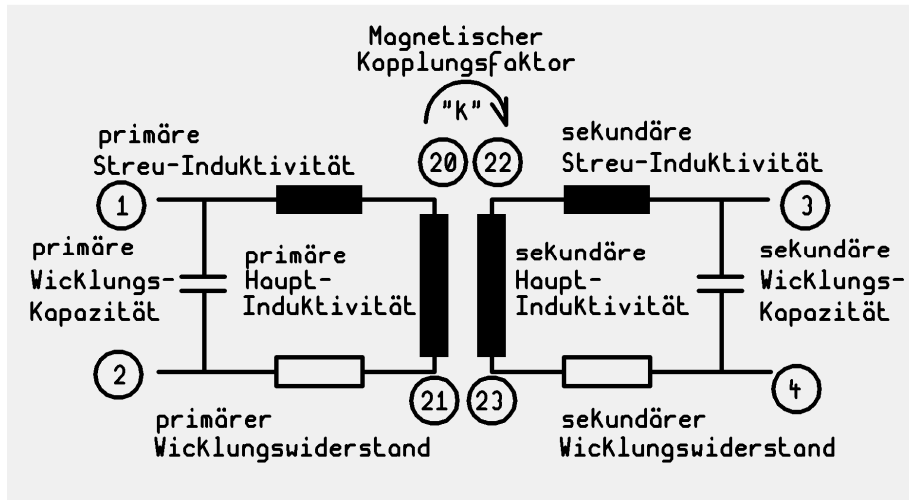


$$U_{\text{ind}} = L \cdot \frac{di}{dt}$$

pausenlos ändern muss und theoretisch bis Unendlich ansteigt. Deshalb ist diese Vorschrift mit einem „**Strombegrenzungswiderstand**“ bereits in SPICE eingebaut).

Im nebenstehenden Schaltbild findet sich deshalb der Widerstand $R_2 = 0,01\Omega$ zwischen der Spannungsquelle und dem Anschluss der Primärwicklung.

8.2.3. Erstellung des SPICE-Modells für einen realistischen Transformator mit zwei Wicklungen



Grundlage ist das übliche Standard-Ersatzschaltbild, in dem sowohl die Streuung wie auch die „Kopplung“ (= Anteil des primären Magnetfeldes im Sekundärkreis) berücksichtigt werden. Ebenso werden die Wicklungswiderstände und die Wicklungskapazitäten einbezogen.

Die Knoten 1 und 2 stellen die Anschlüsse der Primärwicklung, die Knoten 3 und 4 dagegen die der Sekundärwicklung dar. Für die „inneren Knoten“ dieses „Subcircuits“ wählt man höhere Knotennummern, um bei Erweiterungen irgendwelche Kollisionen zu vermeiden.

Nun zum untenstehenden SPICE-Modell mit dem **Subcircuit „xformer_01“** samt den Anschlüssen **1 / 2 / 3 / 4**, das wir mit einem Texteditor erstellen.

Leak bilden die Streu-Induktivitäten. Sie repräsentieren diejenigen Magnetfeldanteile, die nicht im Kern und damit von der Primär- zur Sekundärwicklung verlaufen. Der Rest der Bauteilbezeichnungen ist (bei einem Blick auf das obige Ersatzschaltbild) selbsterklärend.

Ein **Sternchen** („Asterisk“) kennzeichnet eine Kommentarzeile. Und so würde z. B. das Ergebnis aussehen:

```
*
* [1] --- ||
*      ) || .--- [3]
*      ) || (
*      ) || (
* [2] --- || .--- [4]
*
*.SUBCKT xformer_01 1 2 3 4
*
** Primary
Lleak1 1 20 1mH
Lpri1 20 21 1H
Rpri1 21 2 1
Cpri1 1 2 20pF
*
**Secondary
Lleak3 3 22 1mH
Lsec1 22 23 1H
Rsec1 23 4 1
Csec1 3 4 20pF
*
K Lpri1 Lsec1 0.999
.ENDS
```

Jede Bauteilzeile beginnt mit der Bezeichnung des Teils. Dann folgen die Schaltungsknoten, zwischen denen es hängt. Und den Schluss bildet der Bauteilwert.

Die Kopplung erreicht in der Praxis nie ganz den Wert „1“ und so sollte man sie auch eingeben (hier: k = 0,999). Manche SPICE-Versionen protestieren sogar, wenn das nicht so gemacht wird.

Bei der Primär- und Sekundärwicklung wurden gleiche Werte eingetragen, deshalb handelt es sich hier um einen 1:1 – Übertrager.

Die eigentliche Schaltungsbeschreibung beginnt mit `.SUBCKT` und endet mit `.ENDS`

=====

Sehr wichtig:

a) Dieses fertige Modell wird nun mit der Bezeichnung **xformer_01.sub** im Ordner

Programme / LTC / LTSpiceIV / lib / sub

bei den schon vorhandenen übrigen SPICE-sub-Modellen gespeichert. Bitte sorgfältig auf den Pfad UND die korrekte Endung achten...**und natürlich geht das nur, wenn wir vorher den Texteditor mit Administrator-Berechtigung starten....**

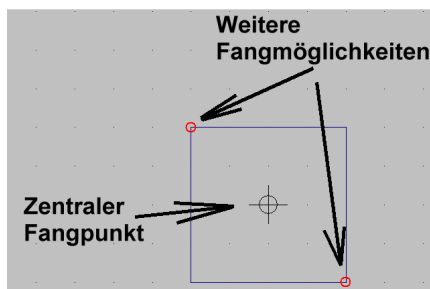
b) Es gibt keine **Möglichkeit, das Übersetzungsverhältnis direkt einzugeben**. Das läuft ausschließlich über eine Veränderung der Sekundären Hauptinduktivität und das werden wir im nächsten Projekt sehen.

=====

8.2.4. Erzeugung eines passenden Symbols für diesen Transformator

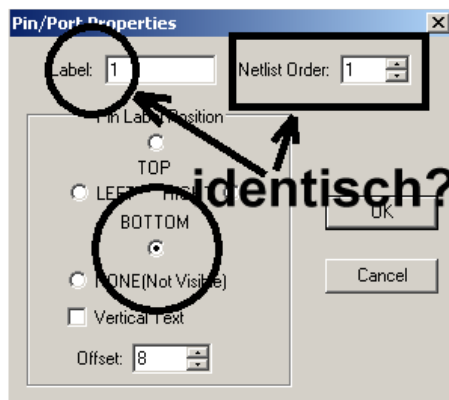
1. Schritt:

Im Menü „File“ findet sich die Option „New Symbol“ -- sie wird angeklickt. Dadurch erscheint ein neuer Bildschirm mit einem „Fadenkreuz“ im Zentrum (es bildet später den „Fangpunkt“ des Symbols beim Anklicken).



2. Schritt:

Unter „DRAW“ wählen wir das Rechteck („Rect“) und zeichnen es in der Größe **20mm x 20mm** um den Fangpunkt herum (...über dem Bildschirm liegt ein feines 5mm – Punktraster). Die roten Kreise an den Ecken des Rechtecks müssen sein, denn sie bilden später weitere Fangmöglichkeiten.



3. Schritt:

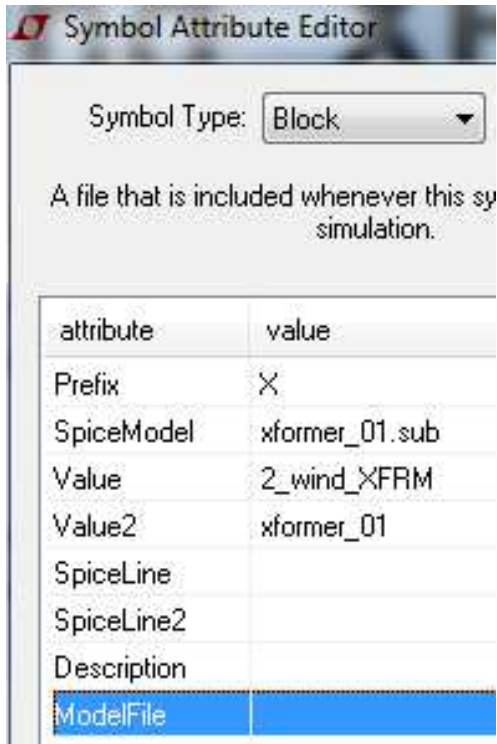
Unter „Edit“ findet sich „Add Pin / Port“. Damit können wir die erforderlichen vier Anschlüsse erzeugen. Im zugehörigen Menü müssen wir jedoch jedes Mal **die Pin-Nummer UND die Position des Anschlusses gegenüber der Pinbezeichnung („Label“)** eintragen.

Die nebenstehenden Einträge gelten für Pin 1.

Bitte darauf achten, dass auch der Pin-Label und die Netlist-Order übereinstimmen!

Nach dem Klick auf OK hängt der Pin am Cursor und kann dann auf der Kante des Symbols abgesetzt werden. Dann folgen die drei weiteren Pins (Siehe Bild auf der nächsten

Seite).



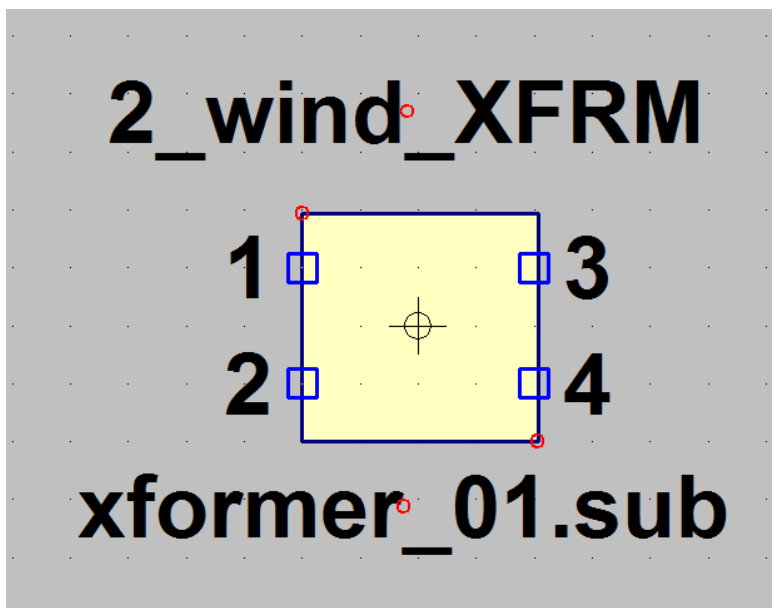
4. Schritt:

Jetzt wird es ernst, denn nun soll aus dem hübschen Bildchen unser echter Transformator werden. Also heißt es, über „**EDIT / Attributes / Edit Attributes**“ an das nebenstehende Menü heranzukommen.

Dann übernehmen wir nacheinander diese Vorgaben, wobei wir auf die betroffene Zeile in der Liste klicken und im so markierten Feld eingeben (**Hier bedeutet z. B. Prefix „X“ einen Subcircuit**).

Warnung:

In der Zeile für Value2 MUSS IMMER ein Eintrag stehen (...am besten dieselbe Bezeichnung wie das Spice-Modell). Wenn der fehlt, kann es eine völlig unerklärliche Fehlermeldung geben....



6. Schritt:

Jetzt gilt es noch, wichtige Informationen beim Aufruf des Symbols für den Anwender sichtbar zu machen. Dazu geht es nochmals in „**Edit**“ und „**Attributes**“, jetzt aber zu „**Attribut Window**“. Wenn wir nun auf „**value**“ klicken, dann hängt die Bezeichnung „**2_wind_XFRM**“ am Cursor und kann oberhalb des Symbols platziert werden. Dann wiederholt man das Spiel und wählt dieses Mal „**SpiceModel**“. Ganz korrekt erscheint das Modell-File „**xformer_01.sub**“ am Cursor und kann unterhalb des Symbols angeordnet werden. Fertig!

7. Schritt:

Den Abschluss bildet das korrekte Abspeichern des Symbols. Wir wählen „**File**“ und „**Save as**“, müssen uns aber dann über „**LTC / LTSpiceIV**“ und „**lib**“ bis zum Ordner „**sym**“ (= Symbols) durchhangeln.

Darin sollte man sich einen neuen Ordner „Xformers“ anlegen und das fertige Bauteil als „xformer_01.asy“ endgültig speichern....und das klappt natürlich nur mit Administrator-Berechtigung, die man bereits beim Programmaufruf einschalten muss (= über einen rechten Mausklick auf den Icon beim Programmstart zugänglich).

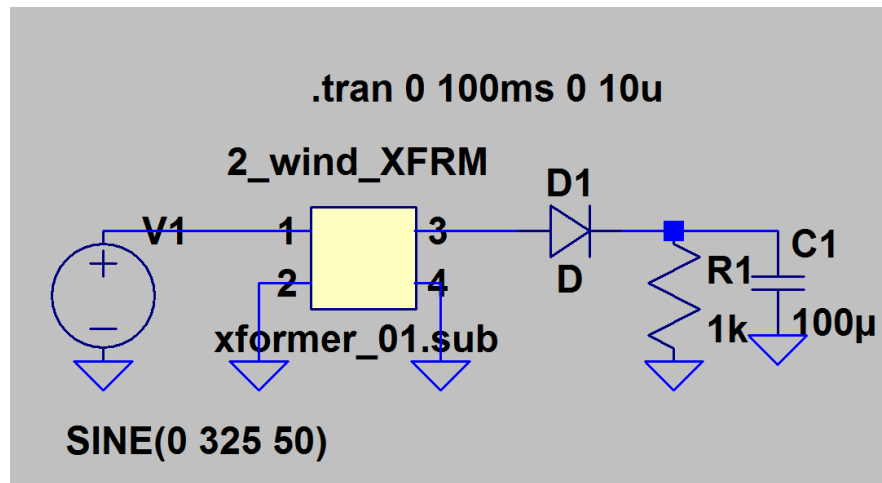
Tatsächlich: nun ist wirklich alles geschafft!

8.2.5. Einpuls-Gleichrichter mit realistischem Trafo

Nun wollen wir die Ansprüche etwas höher schrauben und uns eine Schaltung mit einem realen Netztransformator samt Einpuls-Gleichrichter und Ladekondensator vornehmen.

Aufgabe:

Untersuchen Sie ein Netzteil mit realem Netztrafo, Gleichrichterdiode, Lastwiderstand $R_L = 1k\Omega$ und Ladekondensator $C = 100\mu F$. Der Trafo-Eingang liegt an der Netzspannung mit 230V / 50 Hz, das Übersetzungsverhältnis sei 20:1. Simulieren Sie die Zeit von Null bis 200 Millisekunden.



Lösung:

Die meisten Bauteile (Spannungsquelle, Kondensator, Widerstand, Diode, Ground-Symbol) kennen wir ja schon. Dazu kommt nun der realistische Übertrager aus dem vorigen Kapitel. Bitte gleich alles platzieren sowie die Werte der Bauteile, der Spannungsquelle und die Simulationsanweisung eintragen.

Jetzt müssen wir uns noch um den Transformator kümmern und die Sache mit dem Übersetzungsverhältnis unterbringen. Dabei gilt folgendes:

$$\frac{L_{\text{Primär}}}{L_{\text{Sekundär}}} = (\dot{u})^2$$

Wenn wir (wie in den meisten Fällen für einen fast idealen Trafo zulässig) mal von einer Primär-Induktivität von 1Henry ausgehen, dann müssen wir in unserem SPICE-File „xformer_01.lib“ eine Sekundär-Induktivität von

$$L_{\text{Sekundär}} = \frac{L_{\text{Primär}}}{(20)^2} = \frac{1H}{400} = 2,5mH$$

benützen.

```
*
* [1] ---. ) || { --- [3]
*          ) || { --- [4]
* [2] ---. ) || {
*
*turn ratio = 20:1
*
**
.SUBCKT xformer_01 1 2 3 4
*
** Primary
Lleak1 1 20 1mH
Lpri1 20 21 1H
Rpri1 21 2 100
Cpri1 1 2 500pF
*
**secondary
Lleak3 3 22 50µH
Lsec1 22 23 2.5mH
Rsec1 23 4 5
Csec1 3 4 2.5pF

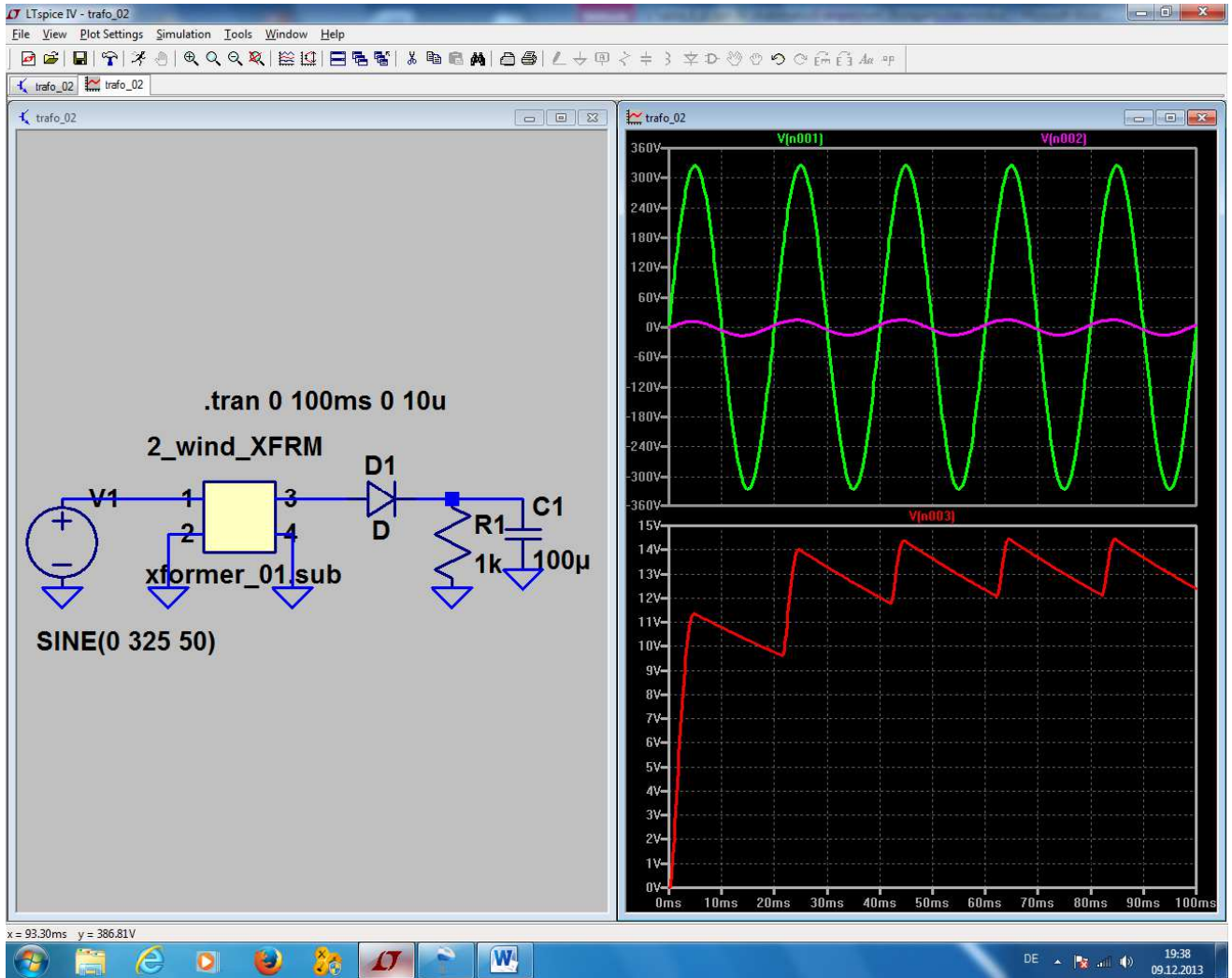
K Lpri1 Lsec1 0.999
.ENDS
```

Für einen fast idealen Trafo kann man dann sowohl die Wicklungs-Widerstände, die Streu-Induktivitäten und die Wicklungs-Kapazitäten verkleinern. Aber man darf sie nie komplett auf null setzen!

Speziell einen Widerstand von Null Ohm in Reihe zu einer Induktivität beantwortet das originale SPICE sofort mit einem Abbruch und einer Fehlermeldung!

So sieht dann ein **realistisches Trafo-Modell für ein Übersetzungsverhältnis von 20:1** aus. Also öffnen wir das File „xformer_01.sub“ **mit Administrator-Rechten**, ändern es und speichern es wieder am korrekten Ort (= **Ordner „sub“ im „lib“-Verzeichnis von LTSpiceIV**).

Der Rest, also die eigentliche Simulation, ist eine Kleinigkeit und bekannt. Deshalb folgt gleich das Ergebnis für die alle Spannungen (am Eingang sowie vor und nach der Diode):



8.3. Verwendung einer anderen Diode in der Gleichrichterschaltung

Da gibt es zwei Möglichkeiten:

- a) Wir benutzen **eine der mitgelieferten Diodenmodelle** anstelle der Universaldiode „D“ oder
- b) Wir **holen das** SPICE-Modell der gewünschten Diode aus dem Internet.

Wir wollen an dieser Stelle nur die Umstellung auf eine Diode aus der Vorschlagsliste ansehen. Die Prozedur zur Umstellung auf ein Diodenmodell aus dem Internet ist aufwendiger und erhält deshalb ein eigenes Kapitel.

8.3.1. Einsatz einer Diode aus dem mitgelieferten Vorrat von LTspice

Sehen wir uns diese **erste Methode** an, wenn wir uns für die „1N4148“ entscheiden:

The screenshot shows the LTspice IV interface with a circuit diagram and two dialog boxes. The circuit includes a voltage source V1 (SINE(0 325 50)), a resistor R2 (0.01), an inductor L1 (1H), a transformer k1 with primary inductor L1 and secondary inductor L2, a diode D1, a resistor R1 (1k), and a capacitor C1 (100µF). Red text annotations provide instructions: 'Erst mit der rechten Maustaste auf das Diodensymbol klicken...' (pointing to the diode symbol), '...und dann im Menü "Pick New Diode" wählen.' (pointing to the 'Pick New Diode' button in the 'Diode - D1' dialog), and 'Schließlich den Typ "1N4148" auswählen und mit OK abschließen' (pointing to the '1N4148' entry in the 'Select Diode' dialog).

Diode - D1 dialog box:

Diode Properties:

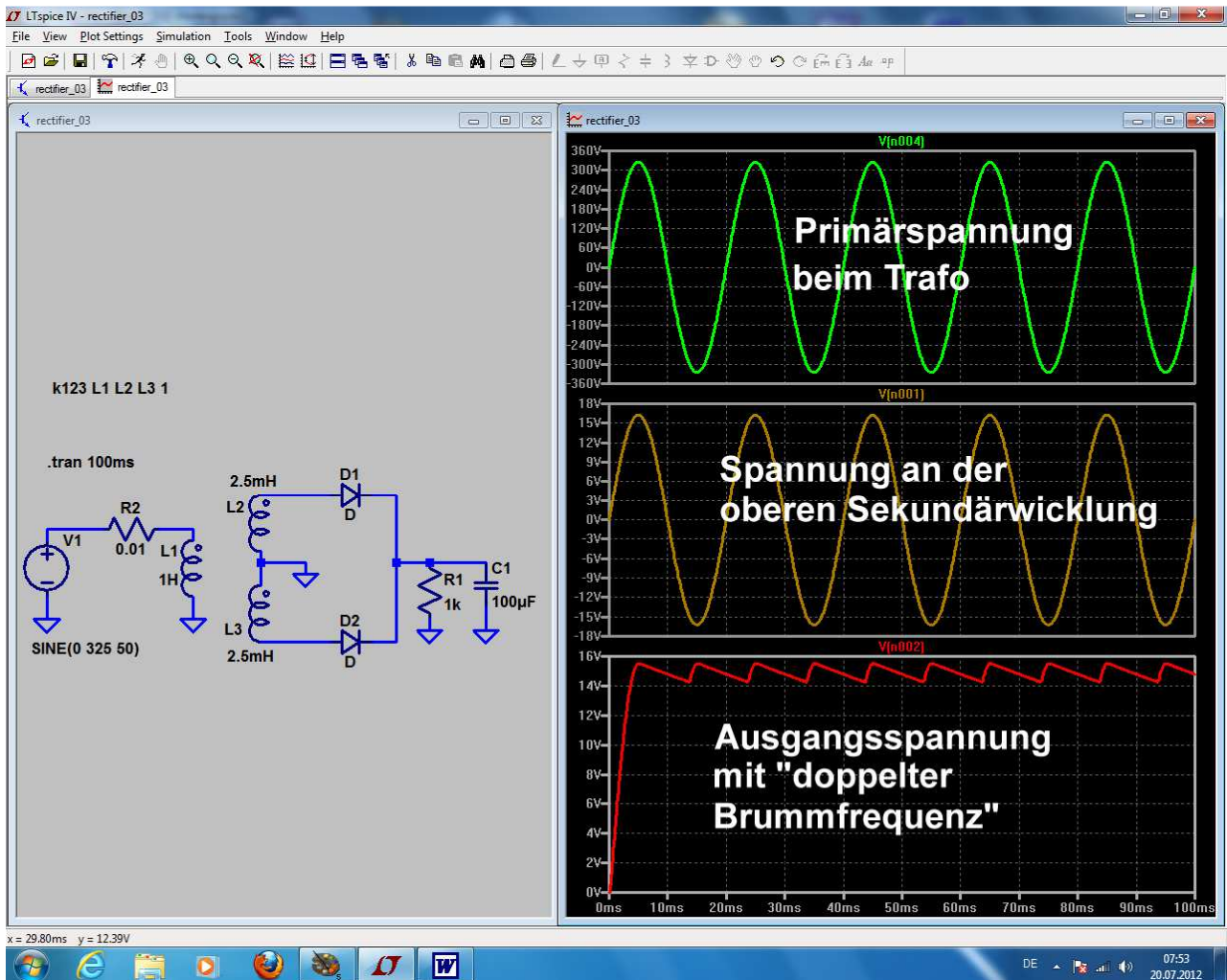
Diode: D
Manufacturer:
Type:
Average Forward Current[A]: --
Breakdown Voltage[V]: 0

Select Diode dialog box:

Part No.	Mfg.	type	Vbkd[V]	Iave[A]	SPICE Model
1N914	OnSemi	silicon	75.0	0.20	..model 1N914 D[s
1N4148	OnSemi	silicon	75.0	0.20	..model 1N4148 D[s
MMSD4148	Onsemi	silicon	100.0	0.20	..model MMSD4148
1N5817	OnSemi	Schottky	20.0	1.00	..model 1N5817 D[s
1N5818	OnSemi	Schottky	30.0	1.00	..model 1N5818 D[s
1N5819	OnSemi	Schottky	40.0	1.00	..model 1N5819 D[s
BAT54	OnSemi	Schottky	30.0	0.30	..model BAT54 D[s

8.4. Zweipuls-Gleichrichter mit idealem Trafo

Dazu ist eine weitere Sekundärwicklung erforderlich, die zur ersten in Reihe geschaltet wird. Aber dabei bitte das Bauteile „ind2“ verwenden und auf die richtige Polung achten....



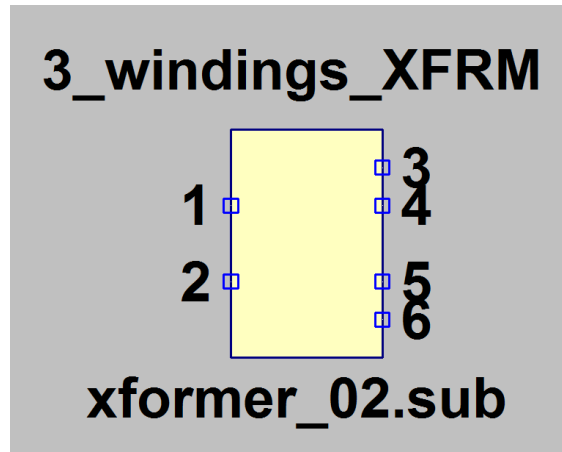
Nun werden beide Halbwellen der Sekundärspannung für die Gleichrichtung genutzt und deshalb beobachten wir bei der Ausgangs-Spannung die doppelte Eingangs-Frequenz

(unter Fachleuten = „doppelte Brumm-Frequenz“)

2. Schritt:

Auch ein neues Symbol ist nötig. Die Erstellungs-Prozedur läuft exakt so ab wie im **Kapitel**

7.2.4. und am Ende muss der Übertrager so aussehen.



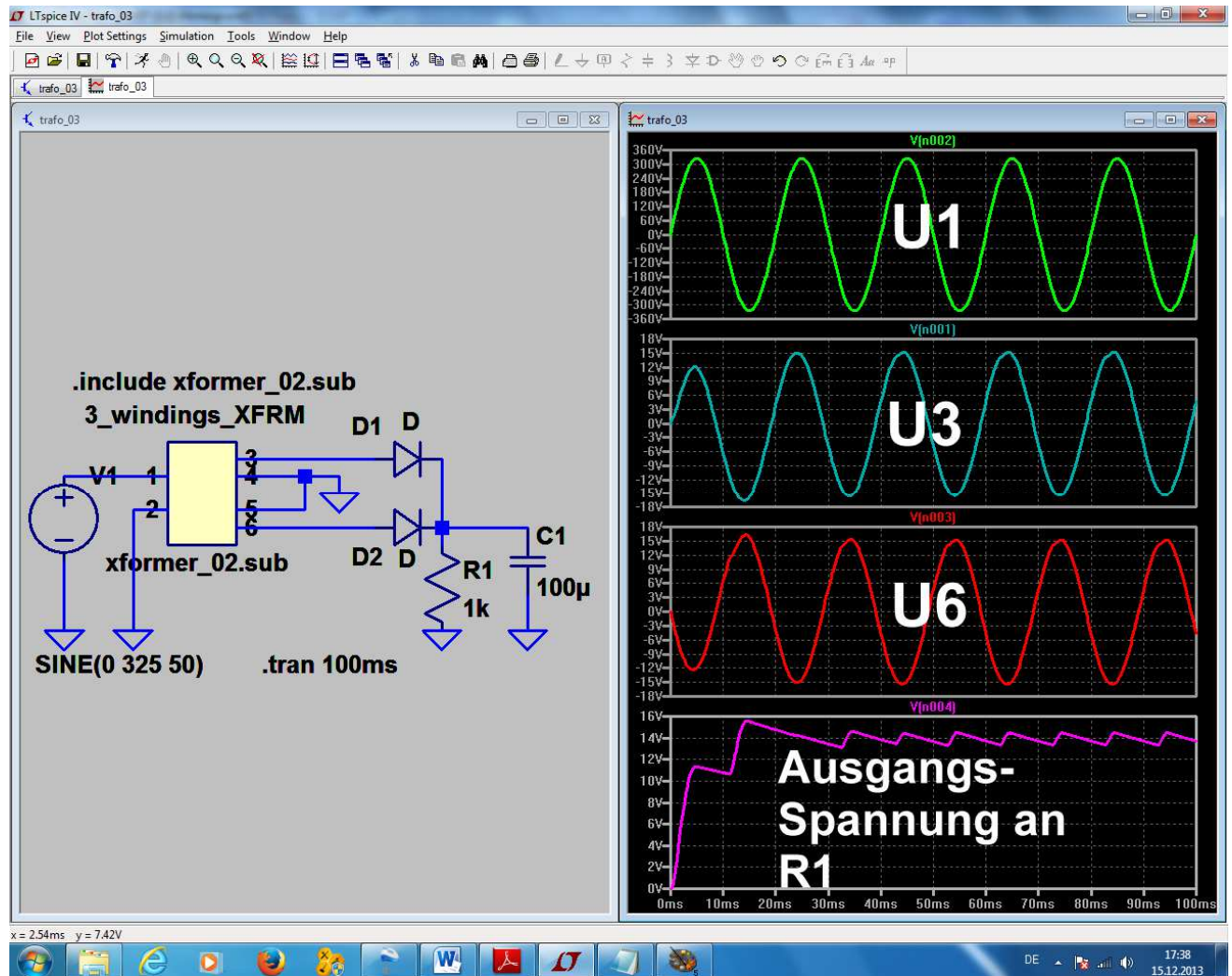
Bitte aber bei der Erstellung der **Attributliste** wieder dran denken:

In der Zeile für Value2 MUSS IMMER ein Eintrag stehen (...am besten dieselbe Bezeichnung wie das Spice-Modell). Wenn der fehlt, kann es manchmal eine völlig unerklärliche Fehlermeldung geben....

3. Schritt:

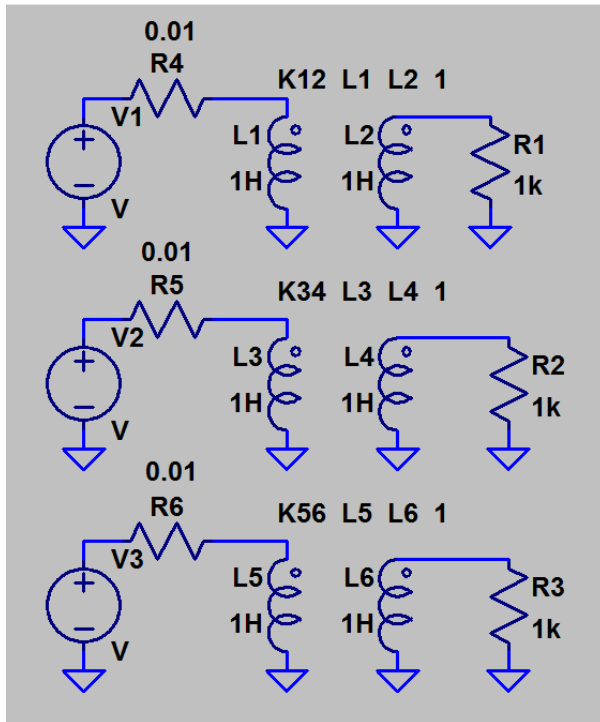
Nun wird die „Zweipuls-“ (= Mittelpunkts-) Schaltung unter Verwendung dieses Übertragers sowie 2 Dioden vom Typ 1N4007 gezeichnet und alles simuliert.

Schaltung und Ergebnis für die beiden Sekundärspannungen des Trafos sowie für die Ausgangsspannung: Siehe nächstes Blatt.



9. Drittes Projekt: Drehstrom

9.1. Programmierung eines Drehstromsystems



Wir wollen uns mit drei Spannungsquellen, drei idealen Trenntrafos und drei Lastwiderständen die Sache mit dem Drehstrom etwas näher ansehen. **Aber bei den Übertragern machen wir beide Hauptinduktivitäten gleich (...jeweils 1H) und erzielen so ein Übersetzungsverhältnis von $\dot{u} = 1:1$.**

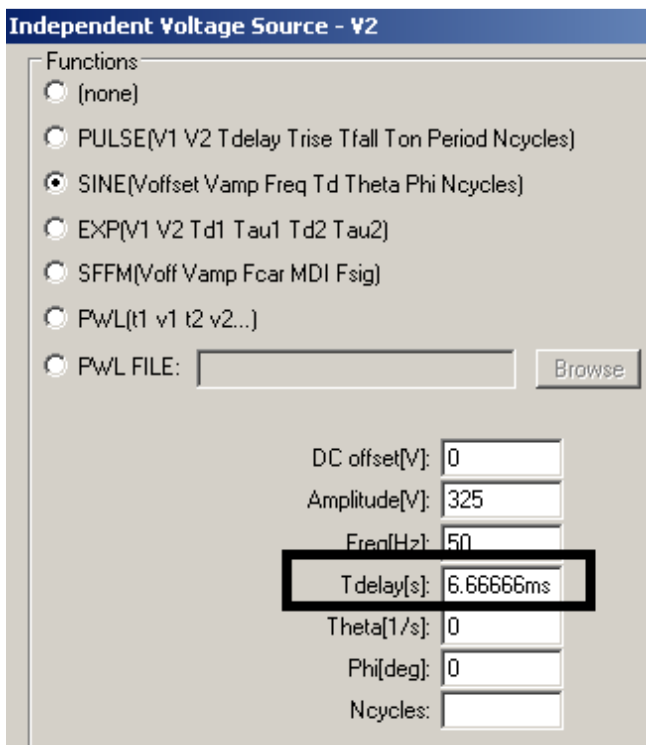
Diese Bauteile werden geholt und in der nebenstehenden Form verdrahtet.

Hinweis:

Man kann sich die Zeichenarbeit sehr erleichtern, wenn man zuerst den obersten Schaltungsteil komplett erstellt und anschließend die Kopierfunktion

(Taste F6)

nutzt. Anschließend braucht man nur noch die Induktivitätsbezeichnungen sowie die Kopplungsangaben anzupassen!



Anschließend fahren wir bei jeder Spannungsquelle mit dem Cursor auf das Symbol und klicken rechts. Bei allen drei Quellen sind folgende Einträge identisch:

DC offset = 0 Volt

Amplitude = 325 V (= Spitzenwert für einen Effektivwert von 230 V)

Frequenz = 50 Hz

Phi = 0 degrees (= Phasenlage beim Kurvenstart)

Wichtig:

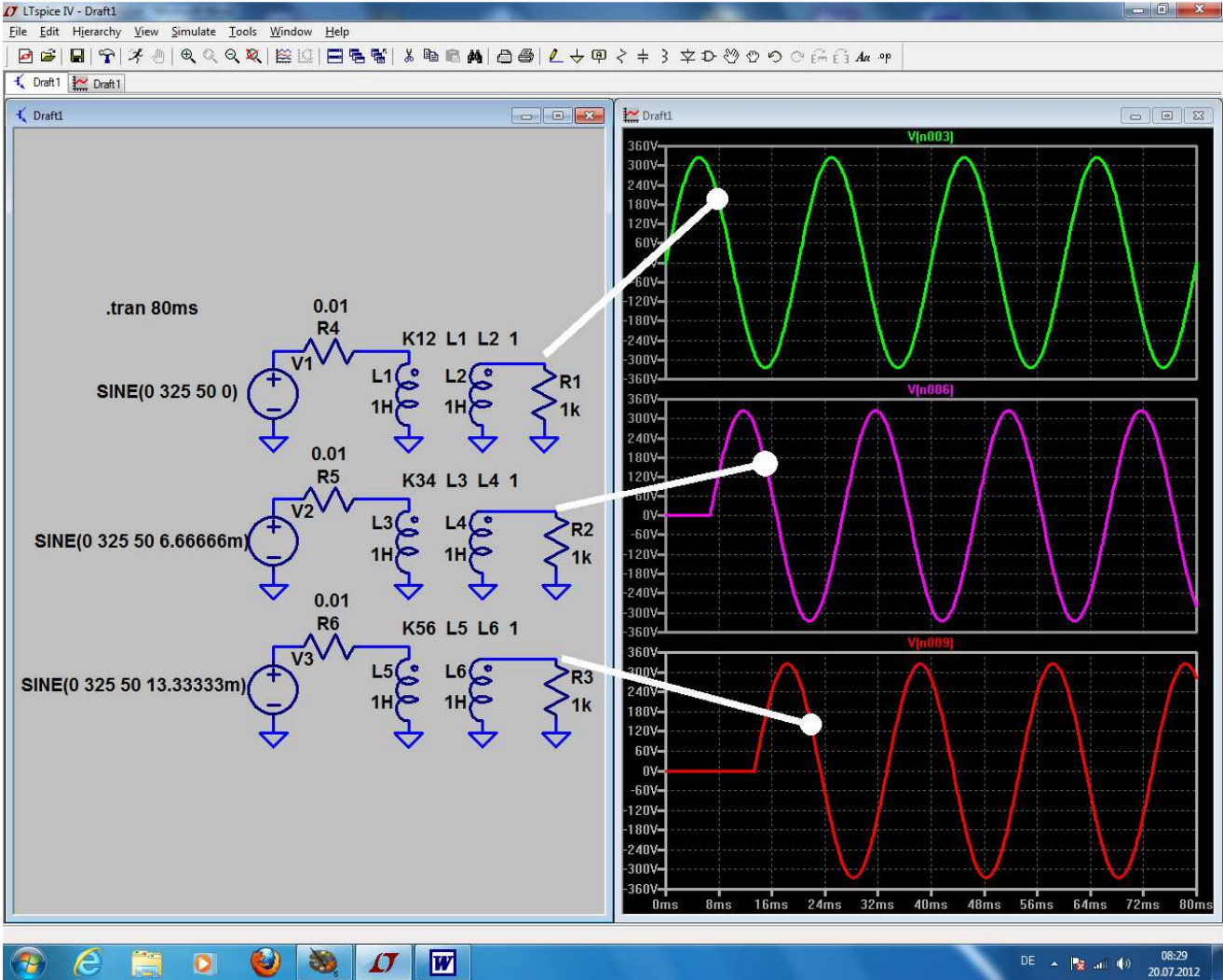
Die beim Drehstrom erforderliche Phasenverschiebung von 120 Grad zwischen den einzelnen Kurven erreichen wir durch drei unterschiedliche Startverzögerungen (= Tdelay)!

Bei V1 beträgt sie Null Millisekunden

Bei V2 beträgt sie 6,66666 ms

Bei V3 beträgt sie 13,33333ms

Programmieren wir nun noch eine Simulationsdauer von 80 ms, dann sieht das Simulationsergebnis so aus:



9.2. Prinzip der Drehstrom-Lichtmaschine

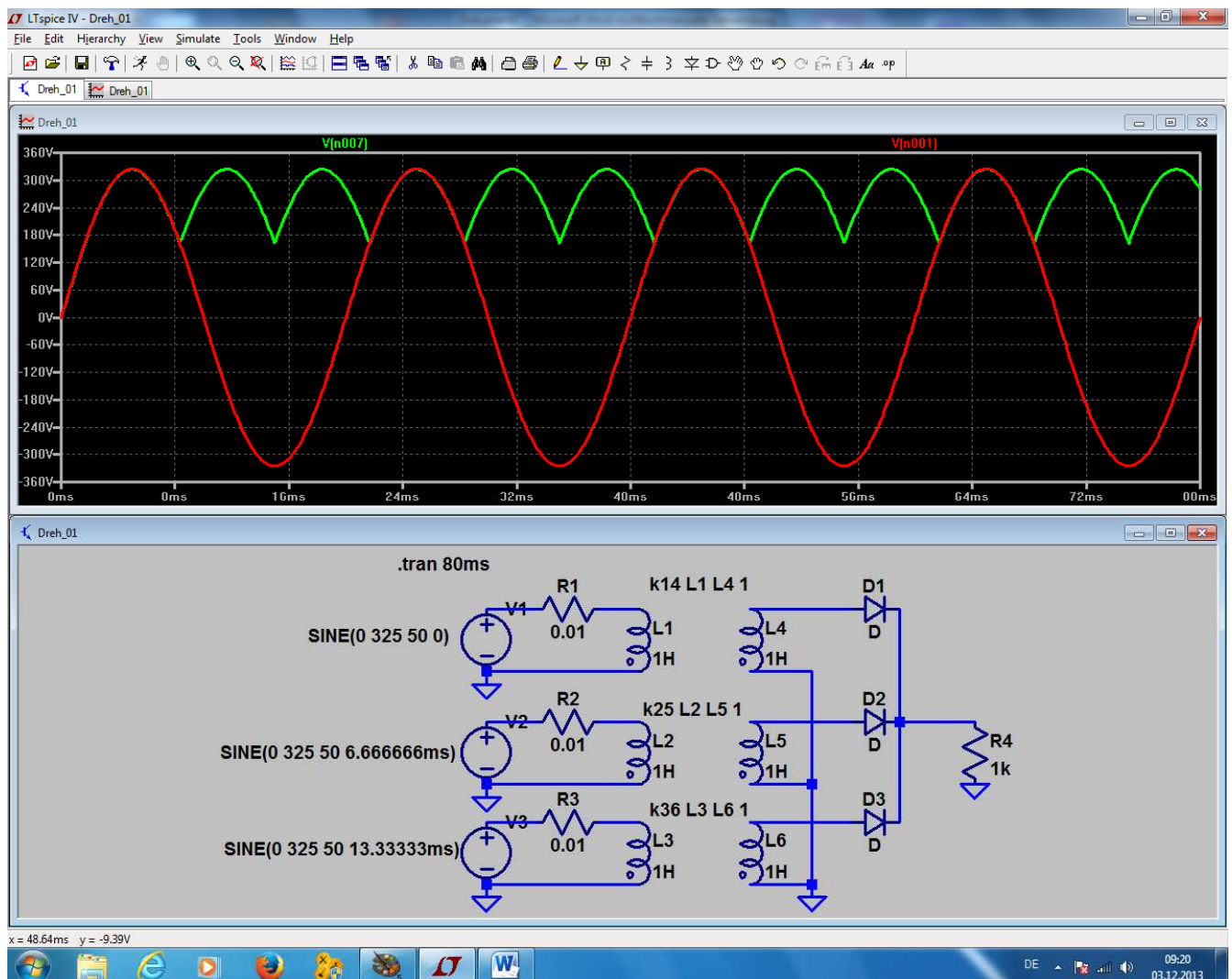
Dazu speichern wir die vorige Schaltung als neues Projekt und geben ihr einen anderen Namen. Dann wollen wir die beiden wichtigsten Schaltungen untersuchen, die hier zum Einsatz kommen.

9.2.1. Die M3-Schaltung

Man erkennt sie daran, dass hier

a) nur **drei Dioden** nötig sind und

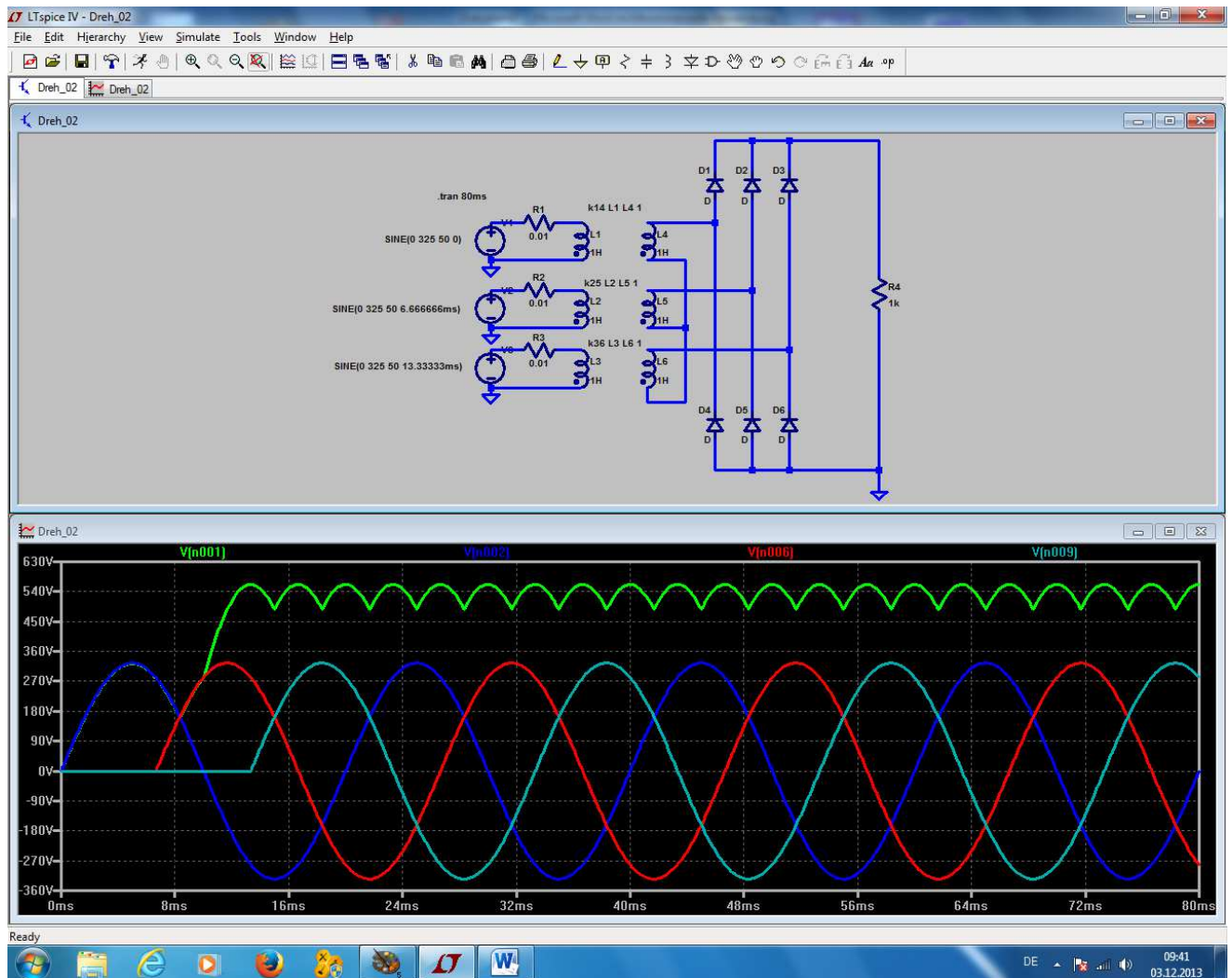
b) die **drei Sekundärwicklungen „im Stern“ zusammengeschaltet** sind (= untere Wicklungsenden miteinander verbunden und an Masse gelegt). Ebenso ist das untere Ende des Lastwiderstandes geerdet.



Sehr schön ist die Gleichrichtung der drei beteiligten und gegeneinander phasenverschobenen Spannungen zu sehen. Die „**Brummfrequenz**“ hat den **dreifachen Wert der Speisefrequenz**.

9.2.2. Die B6-Schaltung

Bei ihr werden **6 Dioden** eingesetzt und der „**Sternpunkt**“ darf nicht geerdet werden. Damit erhält man ein Verhalten wie beim Brückengleichrichter:



Bitte genau hinsehen:

**die Brummfrequenz am Ausgang ist nun 6x höher als die Eingangsfrequenz
UND die Ausgangsspannung ist größer!**