

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik

Aus OptiYummy

↑

← →

## 2. Etappe im Übungskomplex "Nadelantrieb" Aktor-Dynamik ("ohne" Wandlergeometrie) Autor: Dr.-Ing. Alfred Kamusella

*Fehler sind nützlich,  
aber nur,  
wenn man sie schnell findet.  
- John Maynard Keynes -*

### (0) Zielstellung

- Anforderungen an das Modell
- Idealisierter Magnetkreis mit Spule und Beschaltung

### (A) Berücksichtigung der BH-Neukurve als $\mu(\mathbf{B})$

#### 1. Modellbildung

1. Grundlage der Modellbildung
2. Magnetkreis mit Spule
3. Elektronische Schaltung
4. Bewertungsgrößen für die Optimierung
5. Optimale Simulationssteuerung

#### 2. Optimierungsexperiment

1. Versuchsstand-Konfiguration
2. Nennwert-Optimierung
3. Experiment-Auswertung (Ergebnisse)

### (B) Berücksichtigung von Wirbelstrom und Hysterese

#### 1. Modell-Erweiterung um Wirbelstrom-Effekte

1. Wirbelstrom-Modell
2. Nennwert-Optimierung mit Wirbelstrom
3. Experiment-Auswertung (Ergebnisse)

#### 2. Modell-Erweiterung um Magnet-Hysterese

1. Hysterese-Modell (nach Jiles-Atherton)
2. Nennwert-Optimierung mit Wirbelstrom und Hysterese
3. Experiment-Auswertung (Ergebnisse)

### Einzusendende Ergebnisse:

- Teilnehmer der Lehrveranstaltung "Konstruktionstechnik" schicken ihre Ergebnisse per Mail an **a.kamusella@ifte.de**
- Als Anhang dieser Mail sind mit (xx=Teilnehmer-Nummer 01...99) folgende konfigurierte Modelldateien möglichst in einem Archiv-File zu senden:
  - Etappe2a\_xx.ism und Etappe2a\_xx.opy für (A)
  - Etappe2b\_xx.ism und Etappe2b\_xx.opy für (B)
- Einsendeschluss ist die Nacht vor der nächsten Übungsetappe.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Anforderungen

Aus OptiYummy

↑

← →

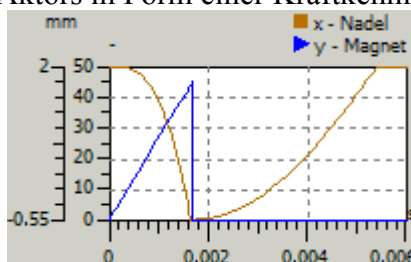
## Anforderungen an das Modell

In der vorherigen Bearbeitungsetappe wurde die grundsätzliche Eignung des Antriebprinzips für die geforderte Funktion geklärt. Jedoch basieren unsere Erkenntnisse bisher nur auf einem sehr vereinfachtem Modell des Elektromagneten. In diesem wurden folgende vereinfachte Annahmen implementiert:

- Die maximal mögliche Magnetkraft im Luftspalt wird nur von der maximal möglichen Flussdichte und der Querschnittsfläche des beweglichen Magnetankers bestimmt:

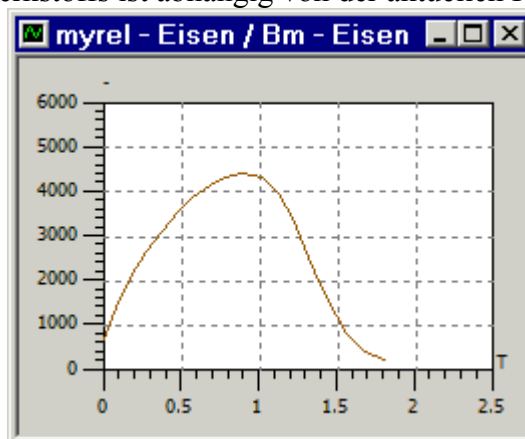
$$F_{\max} = \frac{B_{\max}^2 \cdot A_{\text{Anker}}}{2 \cdot \mu_0}$$

- Nach dem Einschalten des Magneten beginnt die Magnetkraft bei Null und sie kann vor dem Abschalten  $F_{\max}$  erreichen.
- Die Magnetkraft steigt linear an.
- Es wurde ein Verhaltensmodell des Aktors in Form einer Kraftennlinie (Dreiecksimpuls) realisiert:

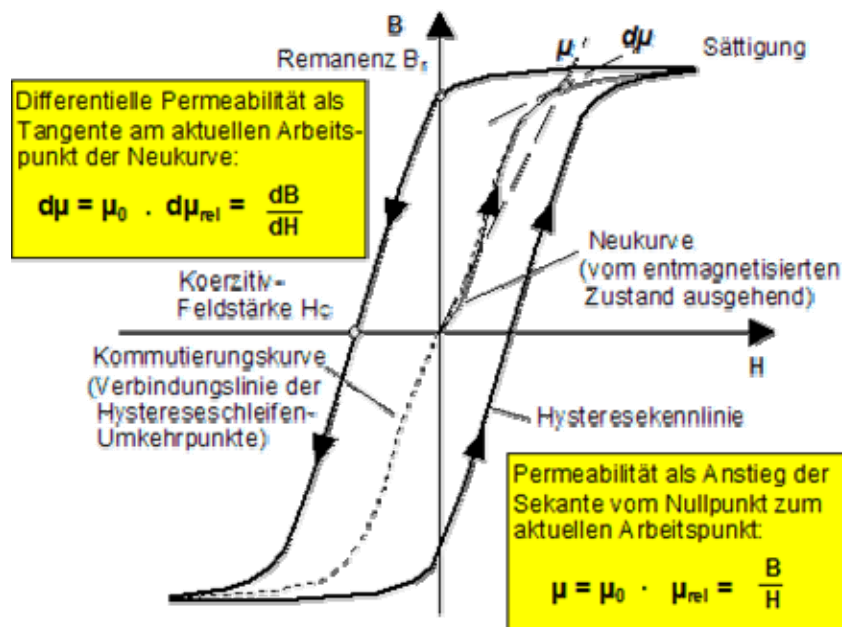


Wir wissen, dass in einem Elektromagneten vielfältige physikalische Effekte wirken, die wichtigsten davon sind:

- Das Magnetfeld und damit der magnetische Fluss wird durch eine stromdurchflossene Spule erzeugt.
- Die Permeabilität  $\mu$  des Eisenwerkstoffs ist abhängig von der aktuellen Flussdichte  $B$ :



- Obiges Bild zeigt  $\mu(B)$  für die sogenannte Neukurve, wenn das Eisen ausgehend vom entmagnetisierten Zustand das erste Mal aufmagnetisiert wird. In der Realität ist der Eisenwerkstoff mit einer Hysterese behaftet, so dass das Verhalten des Magnetkreises von der Vorgeschichte abhängig wird:



- Die Bewegung des Ankers bewirkt eine Induktionsspannung in der Spule. Der elektro-mechanische Wandler ist somit nicht rückwirkungsfrei!
- Die Spule erwärmt sich infolge des elektrischen Stroms. Der ohmsche Widerstand des Spulendrahtes erhöht sich mit steigender Temperatur.
- Infolge von magnetischen Flussänderungen werden Wirbelströme in den Eisenabschnitten des Elektromagneten induziert. Diese Wirbelströme wirken den Flussänderungen entgegen und erzeugen thermische Verluste im Eisen.

Wir können davon ausgehen, dass sich der reale Elektromagnet durch die "wirkende Physik" anders verhält als unser vereinfachtes Verhaltensmodell:

- Die Kraft wird sicher nicht zeitlich linear ansteigen. Daraus resultiert eine veränderte Anzugszeit für den Magneten.
- Da sich die Magnetkraft nach dem Abschalten nicht schlagartig abbaut und auch nicht den Wert Null erreicht, verzögert sich der Abfallvorgang.
- Die Erwärmung der Spule könnte zu thermischen Problemen führen, welche die angestrebte Zykluszeit verhindern.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Anforderungen](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Anforderungen)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Idealisierungen

Aus OptiYummy

↑

← →

## Idealisierter Magnetkreis mit Spule und Beschaltung

Um die Entscheidung für das Antriebsprinzip abzusichern, muss das Modell des Aktors hinreichend viel von unserem "physikalisch-technischen" Wissen über den Elektro-Magneten enthalten. Das Modell werden wir schrittweise umbauen und in Betrieb nehmen:

- Im E-Magneten soll die Spule vorläufig nur in Form ihrer Windungszahl  $w$  und ihres ohmschen Widerstands  $R_{el}$  berücksichtigt werden (keine Spulen-Geometrie!).
- Die Erwärmung der Spule wird noch nicht berücksichtigt.

### Zielstellung:

Existiert für den Topfmagneten eine optimale Kombination von

- Windungszahl  $w$ ,
- Spulenwiderstand  $R_{el}$ ,
- Schutzbeschaltung-Widerstand  $R$ ,
- Ankerdurchmesser  $d_{Anker}$ ,
- Rückholfeder-Federsteifigkeit  $k$  und
- Vorspannweg der Feder  $s_0$ ?

Wie groß ist die damit minimal mögliche Zeit für einen kompletten Prägezyklus?

### Forderungen:

- Kompletter Prägezyklus  $< 3,4 \text{ ms}$
- Betriebsspannung  $24 \text{ V}$
- Max. zulässiger Spulenstrom  $1,5 \text{ A}$
- Max. zulässige Spannung an der Spule  $200 \text{ V}$

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Idealisierungen](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Idealisierungen)“

---

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Modellbildung

## Aus OptiYummy

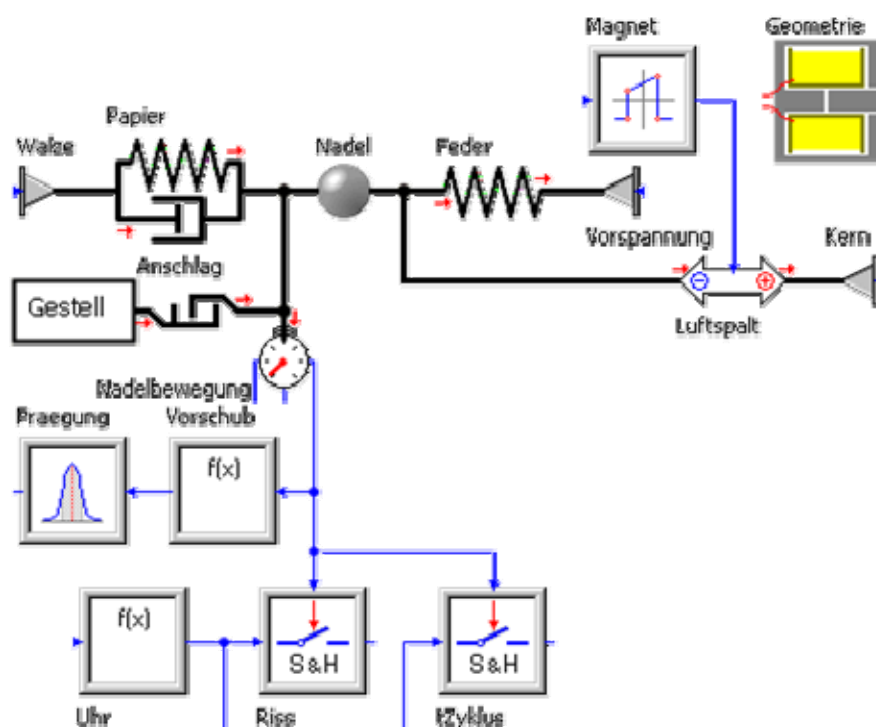
↑

← →  
Modellbildung

### Hinweis:

Den Bearbeitungszustand der einzelnen Lösungsetappen sollte man unbedingt archivieren. Nur so ist gewährleistet, dass man nach Irrwegen wieder zu definierten Bearbeitungszuständen zurückkehren kann!

- Wir laden dazu im SimulationX das Modell aus der Etappe1:



- Das Modell konfigurieren wir mit den ermittelten Bestwerten.
- Wir überprüfen, ob das Modell damit das erwartete Verhalten zeigt!
- Danach speichern wir das Modell unter dem Dateinamen **Etappe2a\_xx**.

Dieses Modell soll in den folgenden Schritten "behutsam" um die physikalischen Effekte des Elektromagneten und seiner elektrischen Beschaltung ergänzt werden:

- Wir berücksichtigen in der **Etappe2a\_xx** vorläufig nur  $\mu(B)$  für die Neukurve der BH-Kennlinie.
- Erst in der **Etappe2b\_xx** ergänzen wir noch die Wirbelströme und die Hysterese der BH-Kennlinie in den Eisen-Elementen.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Modellbildung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Modellbildung)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Magnetkreis

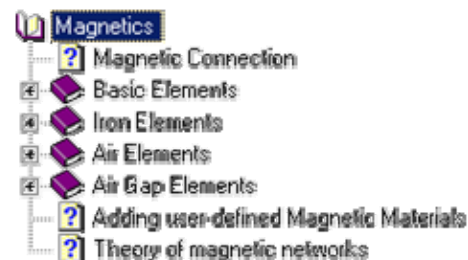
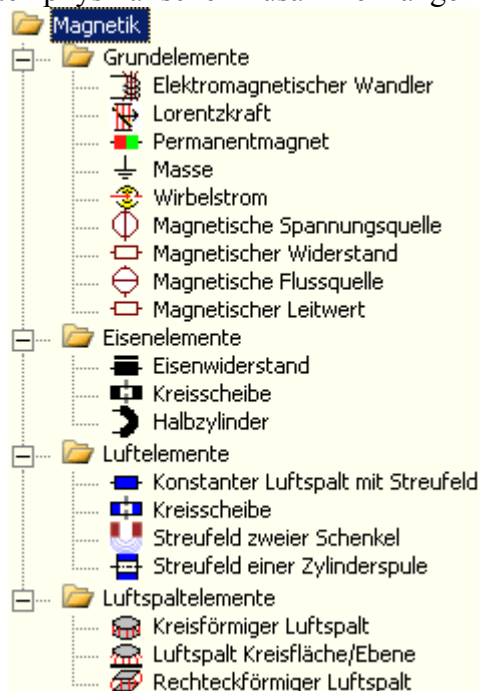
Aus OptiYummy

↑

← →

## Magnetkreis mit Spule

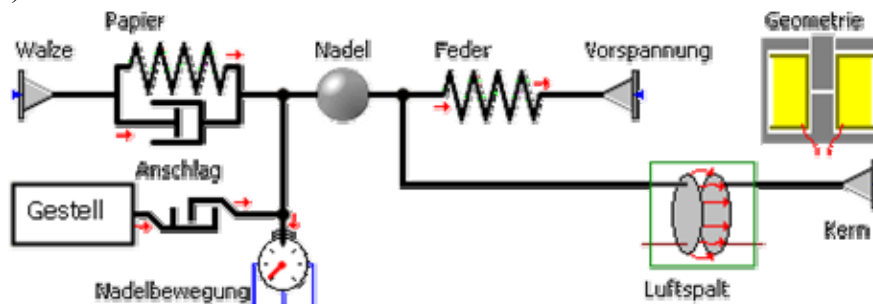
Die Magnetik-Bibliothek enthält alle Element-Typen, um damit das Dynamik-Modell unseres Elektro-Magneten aufzubauen. Für jeden Element-Typ steht über die Taste <F1> eine ausführliche Beschreibung der implementierten physikalischen Zusammenhänge zur Verfügung:



## Inhaltsverzeichnis

## Arbeitsluftspalt

- Luftspalt zwischen beweglichem Anker und festem Kern.
- In diesem Luftspalt entsteht die Kraft an den Trennflächen im magnetischen Feld.
- Er repräsentiert den magneto-mechanischen Wandler.
- Wir löschen im Modell das bisherige Kraftelement mit dem zugehörigen Impulsgenerator.
- An diese Stelle fügen wir den "Kreisförmigen Luftspalt" in den Mechanikteil unseres Modells ein (die mechanische Seite):



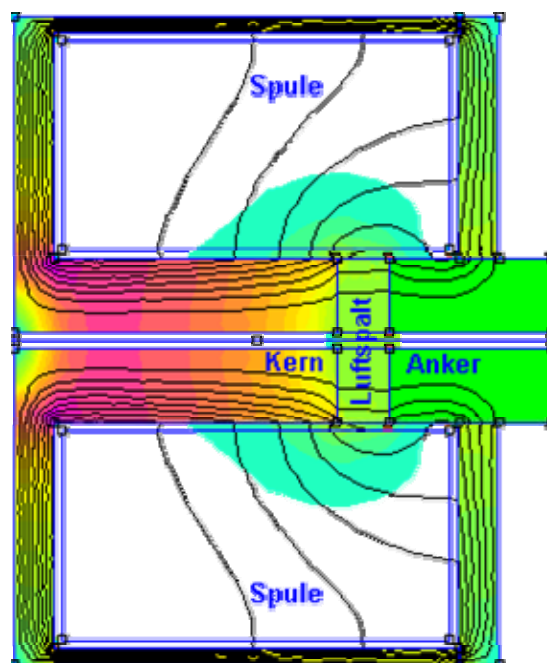
- Als Durchmesser der Luftspaltfläche verwenden wir  $d = \text{Geometrie.d\_Anker}$ .
- Den Anfangswert des magnetischen Flusses lassen wir auf  $\Phi_0 = 0 \text{ Wb}$ .
- Man sollte Modelländerungen möglichst sofort verifizieren, um eine Anhäufung von Fehlern im Modell zu vermeiden.

- In unserem Fall starten wir einen Simulationslauf und überprüfen das richtige Verhalten:
  - Da kein Magnetfeld vorhanden ist, darf sich der Anker mit der Nadel nicht bewegen.
  - **Wichtig:** Man sollte überprüfen, ob **Luftspalt.dx** den richtigen Wert besitzt! Ist dies nicht der Fall, müssen wir die Position der feststehenden Kern-Fläche korrigieren

## Magnetkreis

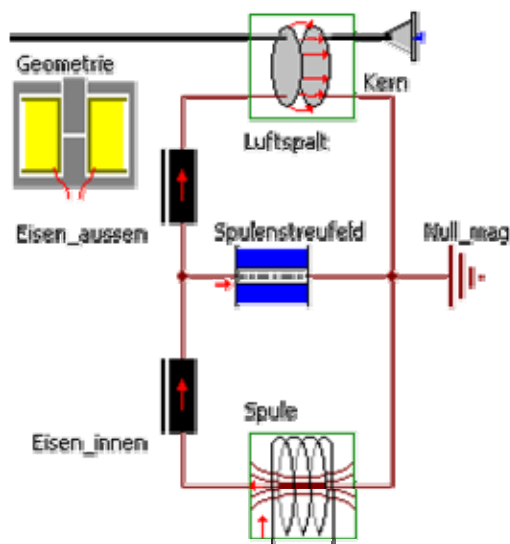
### Netzwerkstruktur eines Elektromagneten

- Die Elemente der Magnetik-Domäne bilden das magnetische Feld des Elektro-Magneten als magnetisches Netzwerk ab. Grundlage für die Wahl einer geeigneten Netzwerk-Struktur sind die "Wege" des magnetischen Flusses im realen Magnetkreis. Als Ersatz für den realen Magnetkreis (der häufig noch nicht existiert!), kann man die Finite-Element-Simulation benutzen. Diese berechnet die räumliche Struktur des Magnetfeldes. Im folgenden Bild ist die räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte in einem Topfmagneten als Farbverlauf abgebildet (violett:  $B \geq 1$  T / weiß: fast feldfrei):



- Man erkennt deutlich, dass nur der dem Arbeitsluftspalt abgewandte Teil des Magnetkerns (*Eisen\_Innen*) vom kompletten Spulenfluss durchflossen wird. Dort sollte man die magnetische Durchflutung (MMK) der Spule als konzentriertes Netzwerk-Element platzieren.
- Nur ein Teil des Flusses geht durch den äußeren Eisenkreis (Kernabschnitt2, Anker, Topf) mit dem Arbeitsluftspalt, der andere Teil des Flusses erstreckt sich durch den Luftraum der Spule (Streufeld der Spule).
- Infolge der unterschiedlichen Flussdichten "bewegen" sich die Eisenabschnitte auf unterschiedlichen Punkten ihrer  $\mu(B)$ -Kennlinie. Das Eisen besitzt an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt individuelle Permeabilitäten.

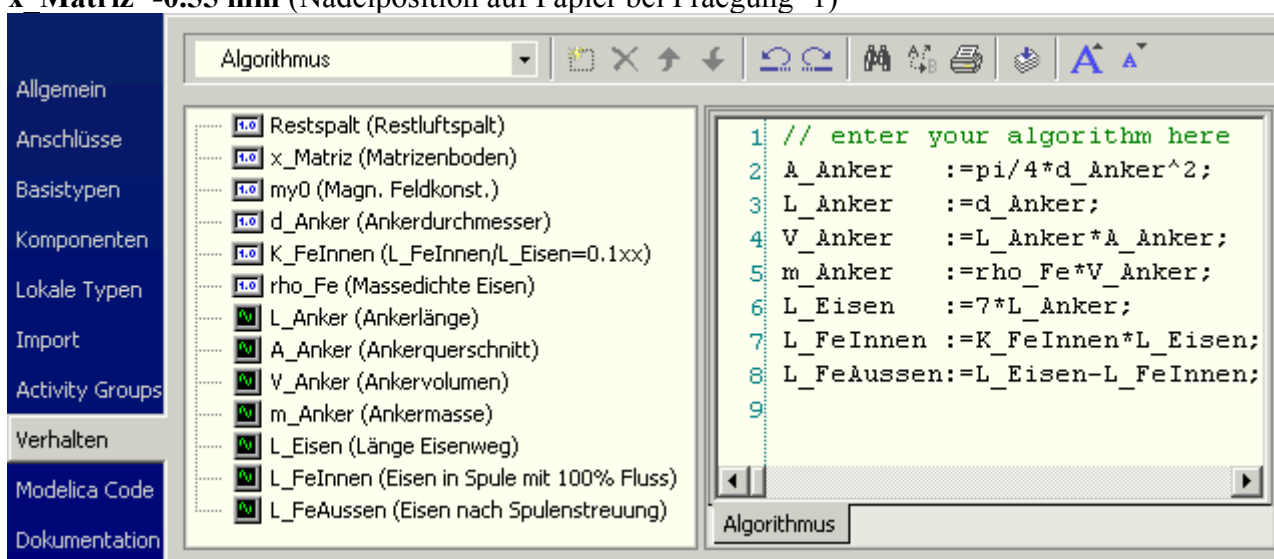
Die soeben beschriebenen Flusswege lassen sich nicht scharf abgrenzen. Trotzdem kommt man über diese Vereinfachung zu einer sehr einfachen Netzwerk-Struktur für Elektromagnete:



Diese Struktur ist mit der *SimulationX Student Edition* nicht direkt realisierbar, da nur ein Eisenwiderstand zur Verfügung steht! Es wird noch erläutert, wie man trotzdem mit zwei Eisen-Elementen arbeiten kann.

## Geometrie-Element

- Vom Geometrie-Element sollen möglichst alle von der Geometrie abhängigen Parameter für die idealisierten Netzwerk-Elemente des Modells bereitgestellt werden.
- Damit können Abmessungen des Magnetantriebes an dieser zentralen Stelle geändert werden und die Auswirkungen werden automatisch im gesamten Modell berücksichtigt.
- Wir nehmen an, dass  $L_{Anker}$  dem Wert von  $d_{Anker}$  entspricht. Der in Etappe1 verwendete  $L_{Faktor}$  kann also entfallen.
- Der Kern soll doppelt so lang sein, wie der Anker. Das ergibt sich aus dem Vorwissen zur günstigen Lage des Arbeitsluftspalts innerhalb der Spule.
- Wir löschen die nicht mehr benötigten Parameter und Variablen ergänzen die folgenden Größen im Geometrie-Elementtyp:
  - $L_{Eisen} = 7 * L_{Anker}$  (näherungsweise Länge des Eisenweges)
  - $K_{FeInnen} = 0.1xx$  (Verhältnis der Eisenwiderstände)
  - $L_{FeInnen} = K_{FeInnen} * L_{Eisen}$  (Eisenabschnitt mit 100% Fluss)
  - $L_{FeAussen} = L_{Eisen} - L_{FeInnen}$  (restlicher Eisenabschnitt)
  - $Restspalt = 50 \mu m$  (Restluftspalt im angezogenen Zustand)
  - $x_{Matriz} = -0.55 mm$  (Nadelposition auf Papier bei  $Prægung = 1$ )

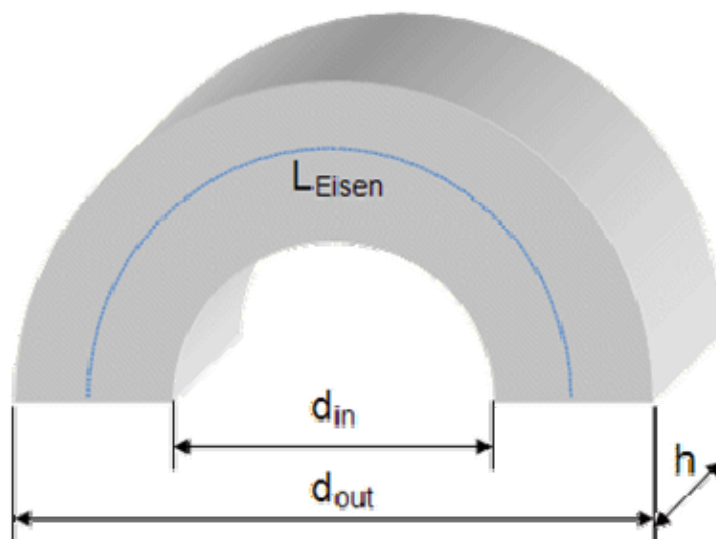


- Mit den Geometrie-Werten können wir im Modell folgende Parameter belegen:
  - $Nadel.m = 0.001 + Geometrie.m\_Anker$  (bereits in Etappe1 erfolgt!)
  - $Kern.x = Geometrie.x\_Matriz - Geometrie.Restspalt$  (zur Realisierung eines Restluftspalts)
  - $Luftspalt.d = Geometrie.d\_Anker$
  - $Eisen\_innen.l = Geometrie.L\_FeInnen$
  - $Eisen\_innen.A = Geometrie.A\_Anker$

- **Anschlag.I1=-Geometrie.x\_Matriz**

## Eisen-Element (Aussen)

In der *Student Edition* benutzen wir für *Eisen\_aussen* das Eisen-Element eines entsprechend parametrisierten Halbzylinders:



- Die Geometrie des Halbzylinders wird über die Parameter *d<sub>in</sub>*, *d<sub>out</sub>* und *h* bestimmt.
- Es gilt bei gleichem wirksamen Eisenquerschnitt im gesamten Magnetkreis:

$$\text{Geometrie.A\_Anker} = h \cdot (d_{\text{out}} - d_{\text{in}}) / 2$$

- Um bei vorgegebenen Werten für *d<sub>out</sub>* und *d<sub>in</sub>* die richtige Querschnittsfläche des Halbzylinders zu gewährleisten, muss man für den Parameter *h* folgenden Eintrag vornehmen:

$$h = 2 \cdot \text{Geometrie.A\_Anker} / (d_{\text{out}} - d_{\text{in}})$$

- Für den mittleren Durchmesser *dm* berechnet sich die gepunktet eingezeichnete Eisenweglänge zu:

$$\text{Geometrie.L\_FeAussen} = \pi \cdot d_m / 2$$

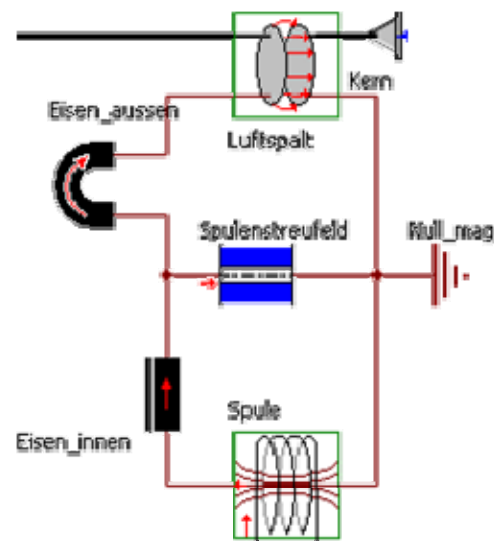
- D.h., die gewünschte Eisenweglänge erhält man für folgenden mittleren Durchmesser:

$$d_m = 2 \cdot \text{Geometrie.L\_FeAussen} / \pi$$

- Der Halbzylinder muss sehr dünnwandig sein, damit exakt das gleiche Verhalten entsteht, wie bei einem geraden Zylinder-Element. Wir setzen deshalb *d<sub>in</sub>* etwas kleiner als *dm* und *d<sub>out</sub>* um den gleichen Betrag größer:

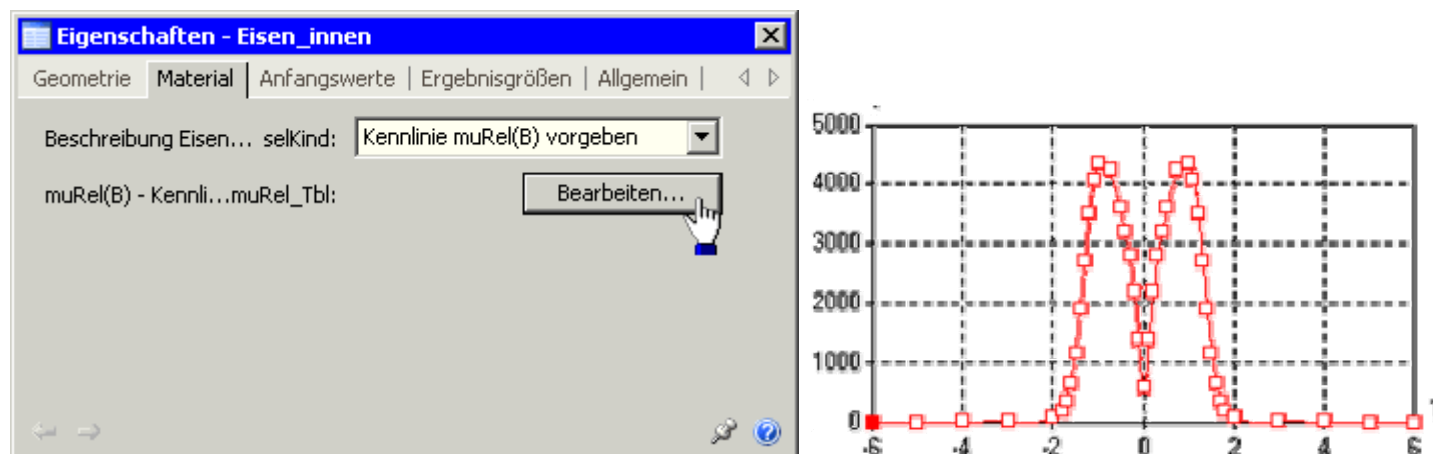
$$\begin{aligned} d_{\text{in}} &= 1.99 \cdot \text{Geometrie.L\_FeAussen} / \pi \\ d_{\text{out}} &= 2.01 \cdot \text{Geometrie.L\_FeAussen} / \pi \end{aligned}$$

- Das "normale" Eisen-Element *Eisen\_innen* besitzt die gleiche Querschnittsfläche *Geometrie.A\_Anker* und die Länge *Geometrie.L\_FeInnen*.



## Eisenmaterial

- Mit den Eisen-Elementen werden standardmäßig die Materialkennwerte für **Trafoblech 530-50 A** mitgeliefert.
- Dieses wollen wir in Ermangelung eigener Kennwerte für unseren Magnetkreis verwenden.
- Der Zugriff auf diese Werte kann über verschiedene Methoden erfolgen. Der Anschaulichkeit halber wählen wir den Zugang über die Kennlinie  $\mu_{\text{Rel}}(B)$ . Auf diese kann man dann in der Material-Registerkarte mittels "Bearbeiten" zugreifen:



## Spule

- Der magnetische Kreis benötigt eine Quelle (MMK=Magneto-Motorische Kraft).
- Wir benutzen einen elektro-magnetischen Wandler in Form einer Spule.
- Den Vorgabewert von 500 Windungen bei 1 Ohm Drahtwiderstand können wir vorläufig beibehalten.
- Eine Zielstellung der Optimierungsexperimente ist die Ermittlung von optimaler Windungszahl und Drahtwiderstand.

## Spulenstreufeld

- Das Element "Streufeld einer Zylinderspule" berechnet den konstanten magnetischen Ersatzwiderstand, der nur von der Geometrie des Wicklungsraums der Spule abhängt:

$$R_{m\text{Str}} = 4 \cdot l / (\mu_0 \cdot \pi \cdot (d_{\text{out}}^2 - d_{\text{in}}^2))$$

- Näherungsweise können wir in Bezug auf Geometrie.d\_Anker den Wickelraum vorläufig wie folgt beschreiben (dabei vernachlässigen wir die Wandstärken des Eisen-Topfes):

$$\begin{aligned} d_{\text{in}} &= \text{Geometrie.d\_Anker} \\ d_{\text{out}} &= 2 \cdot \text{Geometrie.d\_Anker} \\ l &= 3 \cdot \text{Geometrie.d\_Anker} \end{aligned}$$

## Arbeitsluftspalt

- Als magneto-mechanischer Wandler ist die eine Seite des Wandlers Bestandteil der Magnetik-Domäne.
- Der magnetische Widerstand  $R_{m\text{Air}}(dx)$  des Luftspalts ist eine Funktion der Luftspalt-Größe  $dx$ .

## Magnetisches Null-Potential

- Jede physikalische Domäne in einem Netzwerk-Modell benötigt ein "Masse"-Element, welches den Knoten mit dem Potentialwert Null festlegt.
- Die feststehende Kernfläche des Luftspalts soll die magnetische Spannung  $V_m = 0$  A erhalten.

## Validierung des Magnetkreis-Modells

Nachdem der Elektro-Magnet nun komplett als Netzwerk-Struktur im Modell berücksichtigt wird, muss man unbedingt überprüfen, ob das Modell damit glaubwürdig funktioniert. Dabei sollte man in mehreren Schritten vorgehen:

### 1. Spule ohne Betriebsspannung

- Die Spule wurde auf der elektrischen Seite noch nicht angeschlossen.
- Nach Start des Simulationslaufes darf keine Magnetkraft erzeugt werden.
- Die Nadel darf sich deshalb nicht bewegen.

### 2. Spule mit Betriebsspannung

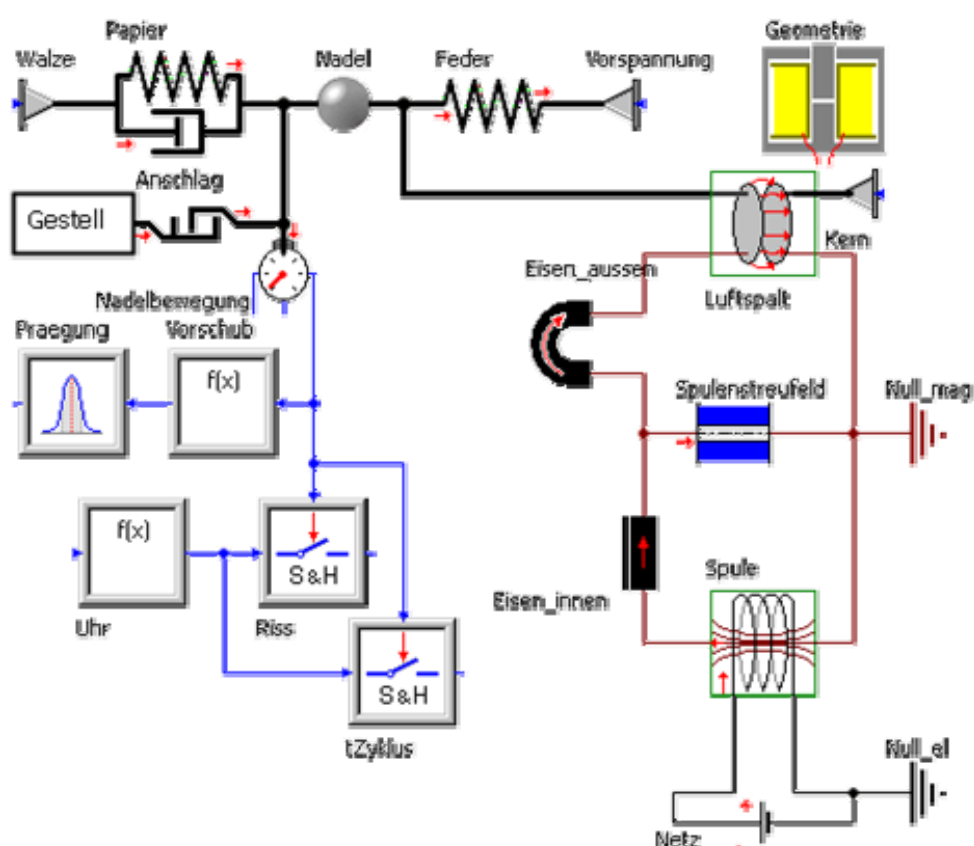
Wir verbinden eine Konstantspannungsquelle von 10 V mit der Spule.

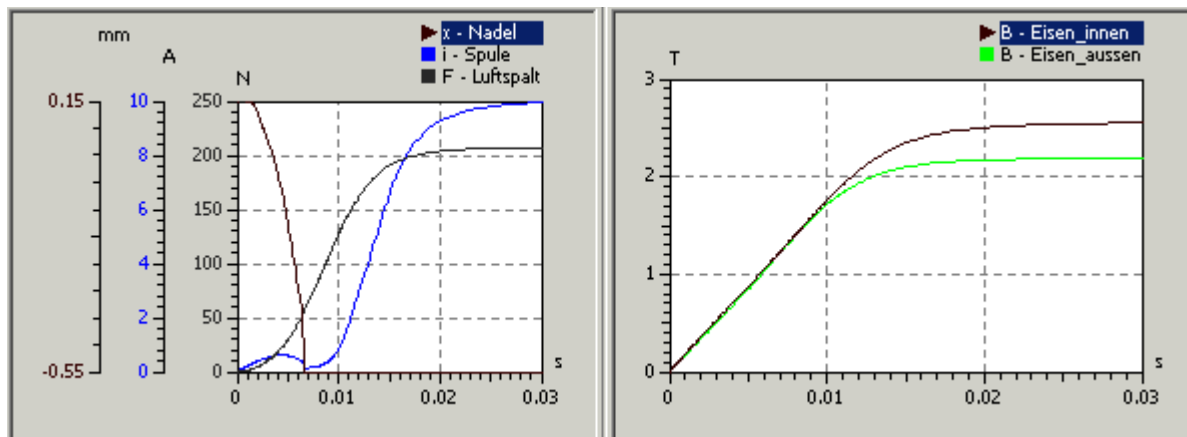


**Achtung:** Auch die elektrische Domäne benötigt ein Nullpotential. Ansonsten liegen die Anschlüsse der Spule auf einem undefinierten Potential. Das kann zu numerischen Instabilitäten des Solvers führen, falls diese Potentialwerte gegen unendlich streben!

Wir wählen den Zeitbereich für die Simulation so groß, dass Spulenstrom und Flussdichte ihren Endwert erreichen:

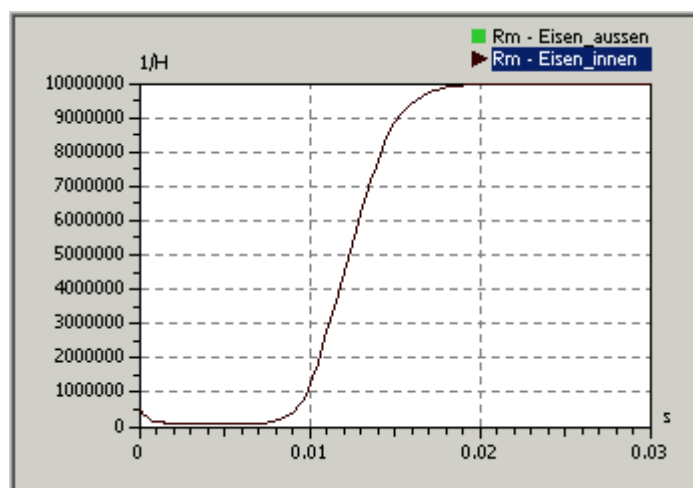
- Die Nadelspitze drückt das Papier soweit es geht in die Matrize und bleibt dann an dieser Position.
- Der Spulenstrom bricht durch die Bewegungsinduktion infolge der Anker-Bewegung nach anfänglichem Anstieg ein.
- Nach dem Anzugsvorgang steigt der Strom wieder an.
- Die magnetische Flussdichte steigt näherungsweise linear in der Zeit.
- Der Kraftanstieg ist deshalb nicht linear, sondern eher quadratisch.
- Der Stromanstieg wird durch den ohmschen Widerstand der Spule begrenzt.
- Die Flussdichte wird infolge der magnetischen Sättigung des Eisens begrenzt.
- Die Abzweigung des Gesamtflusses durch das Spulenstreu Feld macht sich mit steigender Sättigung des Eisens stärker bemerkbar. Allerdings werden die in der Simulation erreichten Flussdichten von über 2 T in der Praxis kaum erreicht:





### 3. Eisen-Validierung

- Ob in der *Student Edition* für die Eisen-Elemente der Trick mit dem Umkonfigurieren des Halbzylinders zu einem Zylinder funktioniert, sollte man unbedingt überprüfen.
- Wenn beide Eisen-Elemente die gleichen wirksamen Abmessungen besitzen und vom gleichen Fluss durchströmt werden, so müssen sie zu jedem Zeitpunkt exakt den gleichen Widerstandswert besitzen!
- Dazu speichern wir (falls noch nicht geschehen) unser Modell.
- Wir löschen für den Test das Element *Spulenstreufeld* und setzen **Geometrie.K\_FeInnen=0.5**.
- Der Magnet zieht durch diese Änderung etwas schneller an. Die Flussdichten in beiden Eisen-Elementen verlaufen exakt gleich.
- Stellt man die Verläufe der magnetischen Widerstände **Rm** dar, so müssen diese ebenfalls deckungsgleich sein:



- Wenn das Verhalten stimmt, kann man die Änderungen rückgängig machen (**Modell schließen - ohne Speichern!** Danach gesichertes Modell wieder öffnen.)

← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php/Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Magnetkreis>“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Elektronik

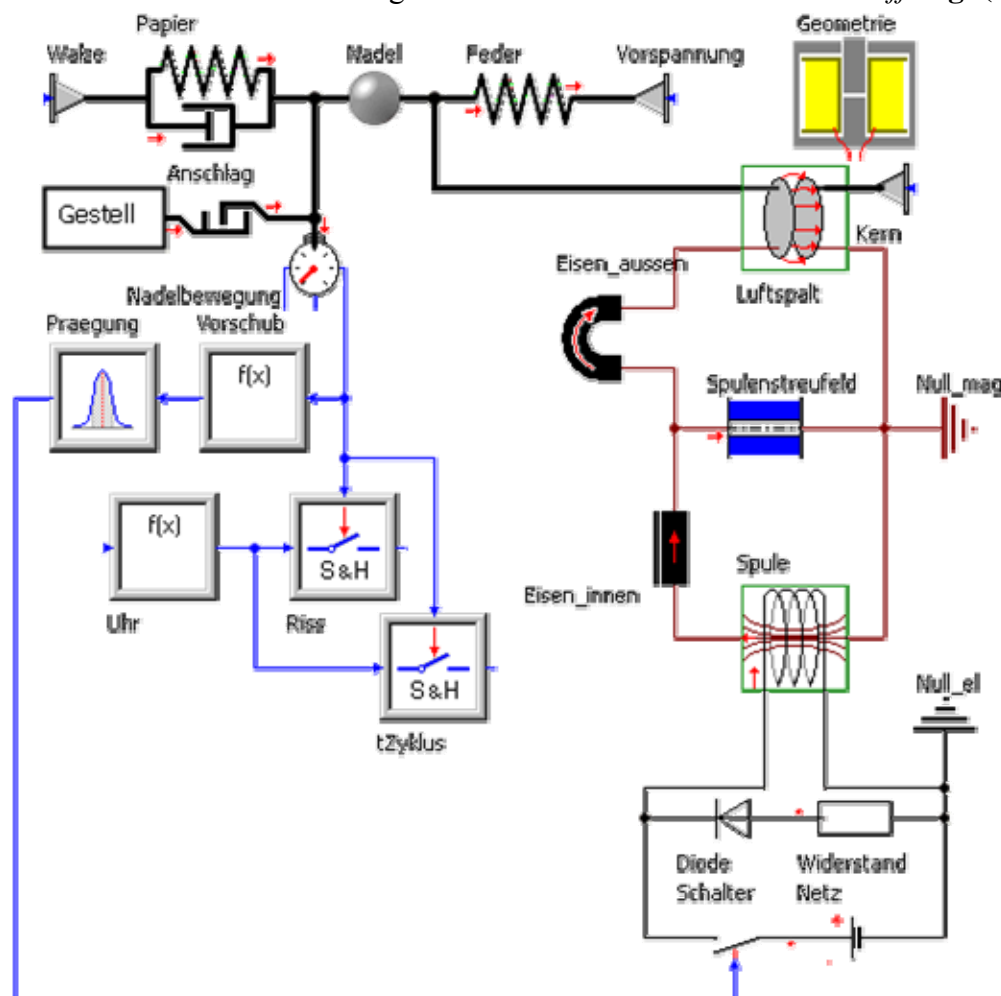
## Aus OptiYummy

↑

← →

### Elektronische Schaltung

- Die Betriebsspannung beträgt **+24 V**.
- Der E-Magnet muss zur Vermeidung hoher Abschaltspannungen mit einer Schutzschaltung betrieben werden:
  - Üblich sind z.B. Schutz-Dioden mit einem Reihenwiderstand.
  - Der Widerstand begrenzt die Abschaltspannung auf einen zulässigen Wert und gewährleistet gleichzeitig eine schnelle Umwandlung der Magnetfeld-Energie in Wärme.
  - Die Diode verhindert den Stromfluss durch diesen Widerstand bei eingeschaltetem Magneten.
- Ereignisgesteuerte Abschaltung:
  - Es soll unter unterschiedlichsten Betriebsbedingungen ein sicheres Prägen gewährleistet sein.
  - Eine konstante Einschaltzeit ist dafür ungünstig.
  - Deshalb soll erst nach vollständigem Prägen (**Praegung=1**) die Spule samt Schutzbeschaltung von der Betriebsspannung getrennt werden.
  - Wir nutzen einen "Idealen Schalter".
- **Hinweise:**
  - **Praegung.y** ändert sich stetig von Null zum Wert=1.
  - **Schalter.onoff** benötigt 0=geöffnet / 1=geschlossen.
  - Die Funktion **sign(x)** liefert -1 / 0 / +1 ("Vorzeichen" von x).
  - Damit kann man den Schalter zum richtigen Schalten veranlassen: *Schalter.onoff*: **sign(1-in1)**



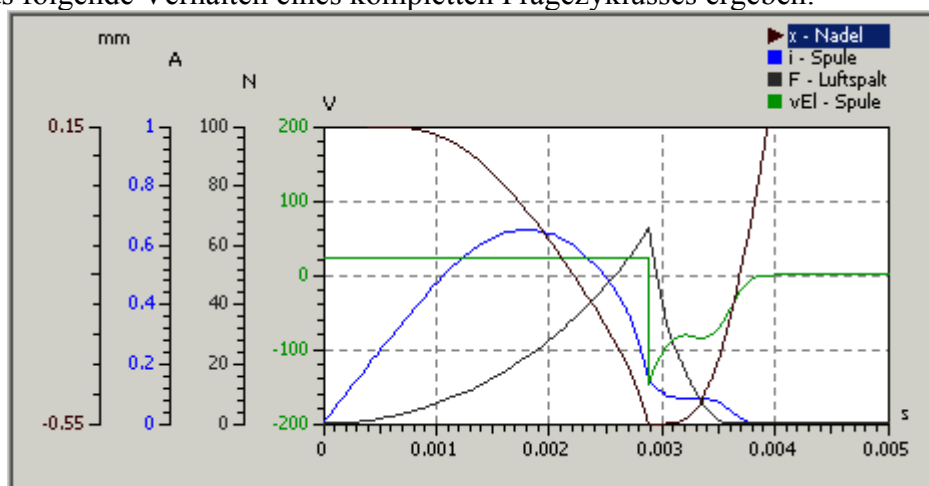
- Wir konfigurieren die Diode als "**Reale Diode**" mit den Vorgabewerten.
- Der Schutz-Widerstand sollte wegen der numerischen Stabilität des Modell möglichst "klein" sein. Wir

wählen einen hinreichend großen Widerstandswert, welcher nach dem Abschalten des Magneten eine "schnelle" Konvergenz des Spulenstromes gegen Null bewirkt (Größenordnung 1 k $\Omega$ ).

### Achtung:

Wahrscheinlich ergeben sich trotzdem numerische Probleme beim Abschaltvorgang, die durch eine Verringerung von  $dt_{Min}$  nicht behoben werden können. Dann sollte man die Diode als "**Widerstandsdiode**" oder auch als "**Ideale Diode**" konfigurieren. Sollte dies wider Erwarten nicht zum Erfolg führen, kann man die Diode entfernen und durch eine direkte "Draht"-Verbindung ersetzen. Der dadurch resultierende kleine Strom durch den Schutz-Widerstand stört im Modell nicht.

- Es muss sich das folgende Verhalten eines kompletten Prägezyklusses ergeben:



- Bei näherem Hinschauen wird man bemerken, dass der Prägezyklus von den in der ersten Etappe erreichten Optimalwerten noch ziemlich weit entfernt ist:
  - Das es überhaupt mit den Standardwerten der Spule zu einem sinnvollen Anzugsvorgang kommt, ist Zufall!
  - Mit etwas Mühe könnte man die Parameter des Antriebs so ändern, dass wir uns besseren Werten nähern.
  - Das geht jedoch mit der Optimierung, die wir im Folgenden durchführen werden, viel einfacher!

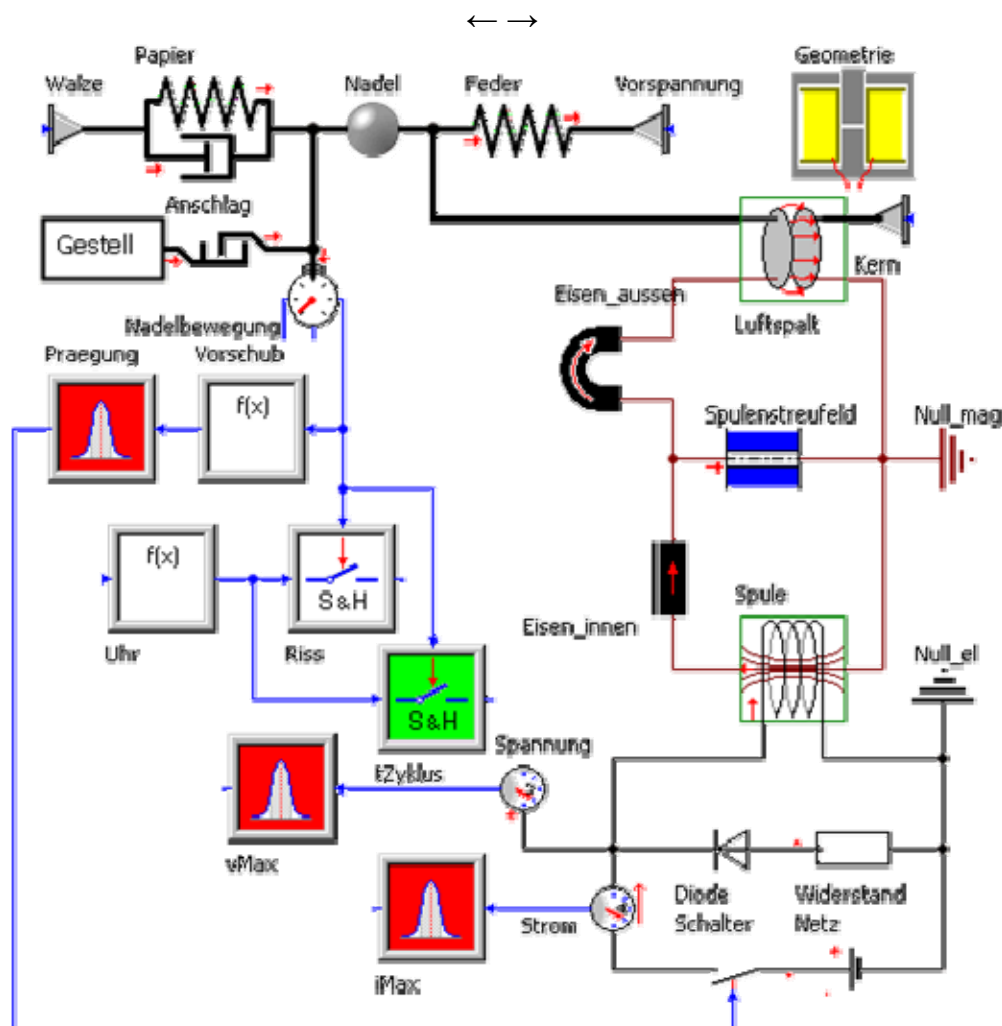


Von „<http://www.optiyummy.de/index.php/Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Elektronik>“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Bewertung

Aus OptiYummy

↑



## Bewertungsgrößen für die Optimierung

Ob das Optimierungstool wirklich die gewünschte optimale Lösung findet, hängt wesentlich davon ab, ob man alle Forderungen in Form von Restriktionen berücksichtigt:

- Optimierungsverfahren nutzen "gnadenlos" jede "Lücke" aus, um unsere Wünsche zu erfüllen, z.B.:
  - Verletzung der Physik (negative Massen werden beim Bremsen schneller!)
  - Ignorierung technischer Möglichkeiten (1000 A bewirken viel Kraft!)
- Meist bemerkt man erst an sinnlosen Ergebnissen, dass man wieder eine Restriktion nicht beschrieben hat:
  - Die Lösungssuche mittels Optimierung kann zum iterativen Prozess werden.
  - Schrittweise muss man die noch fehlenden Nebenbedingungen ergänzen.



Um die Einhaltung der Forderungen in Form von Restriktionsgrößen definieren zu können, müssen entsprechende Bewertungsgrößen durch das Modell bereitgestellt werden. Die zugehörigen Signalverarbeitungselemente wurde im obigen Bild der Modellstruktur rot hervorgehoben:

- **Prägung des Papiers:**

- "Sensor" wurde bereits implementiert.
- **Maximum des Betriebsstroms  $i_{Max}$ :**
  - Voraussetzung ist ein Stromsensor in der Zuleitung der Betriebsspannung.
  - Der "gemessene" Stromwert wird einem Signalanalyse-Element zugeführt, welches den Extremwert ermittelt.
- **Abschaltspannung der Spule  $v_{Max}$ :**
  - Benötigt wird ein Spannungssensor gegen Masse, da ein Spulenanschluss auf Masse-Potential liegt.
  - Man beachte bei der Extremwert-Ermittlung das Vorzeichen der Abschaltspannung!

Um in Hinblick auf die Wünsche eine optimale Lösung zu finden, müssen dafür ebenfalls entsprechende Bewertungsgrößen bereitgestellt werden (grün markiert):

- **Zeit für einen Prägezyklus  $t_{Zyklus}$ :**
  - "Sensor wurde bereits implementiert.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Bewertung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Bewertung)“

---

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Simulationssteuerung

## Aus OptiYummy

↑

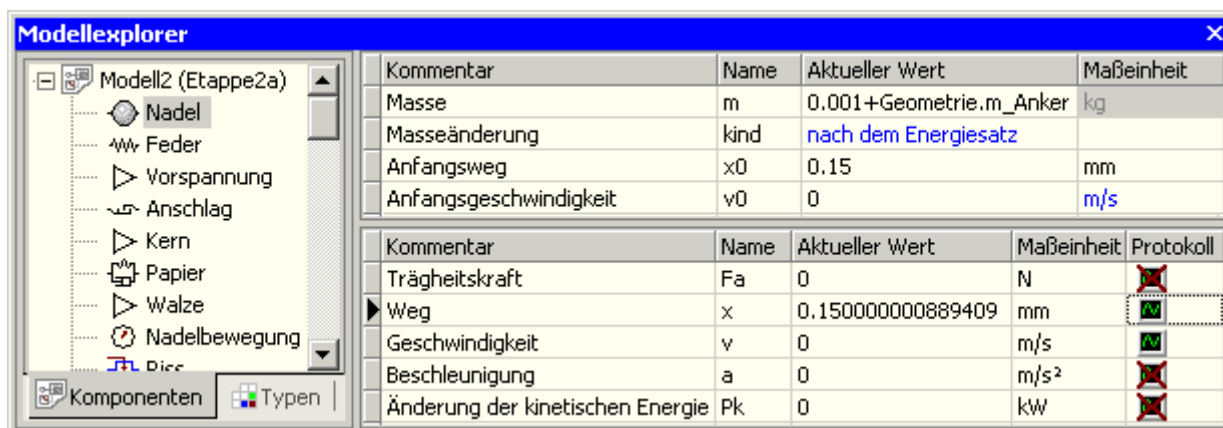
← →

### Optimale Simulationssteuerung

Während eines Optimierungsexperiments werden tausende Modell-Läufe mit unterschiedlichsten Entwurfparametern durchgeführt. Das benötigt Zeit und Speicherplatz. Im folgenden werden einige Empfehlungen gegeben, was man in Hinblick auf Rechengeschwindigkeit und Speichereffizienz beachten sollte:

#### 1. Signalprotokoll

- Während eines Modell-Laufes werden alle Variablen (=Ergebnisgrößen) als Signalverläufe im Zeitbereich protokolliert, welche dafür freigeschaltet sind.
- Das Signal-Protokoll einer Variablen wird auch angelegt, wenn momentan keine Ausgabe in einem Ergebnisfenster erfolgt.
- Protokollierte Signalverläufe werden Bestandteil des Modells und können die ism.-Datei enorm vergrößern!
- Spätestens vor Optimierungsexperimenten sollte man das Protokoll für alle Variablen ausschalten, welche man aktuell nicht in einem Ergebnisfenster darstellt.
- Am übersichtlichsten funktioniert das über den Modell-Explorer:

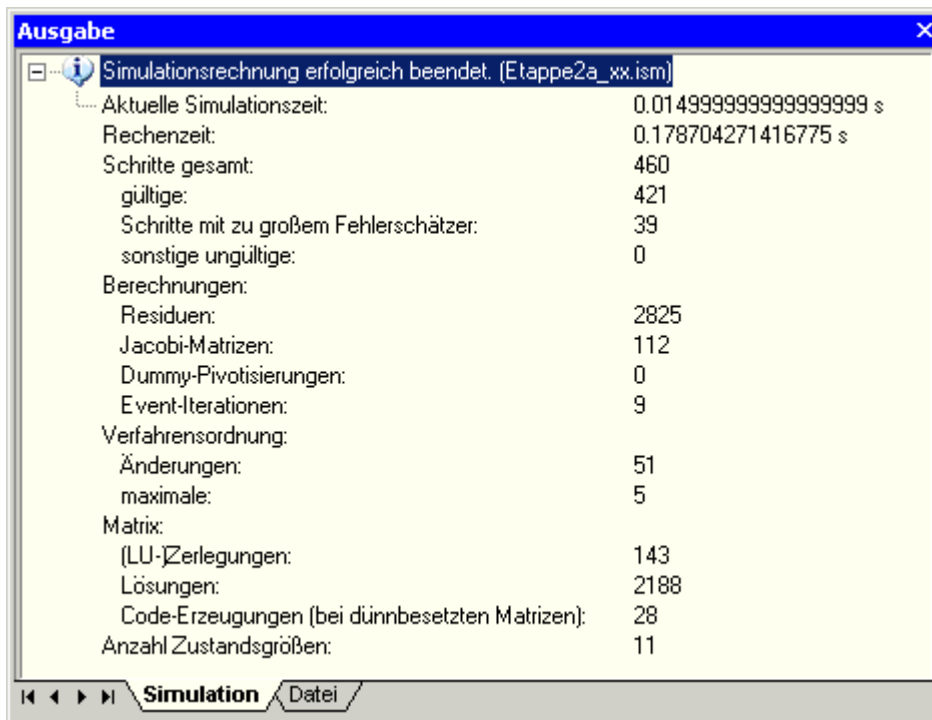


#### 2. Signalfenster

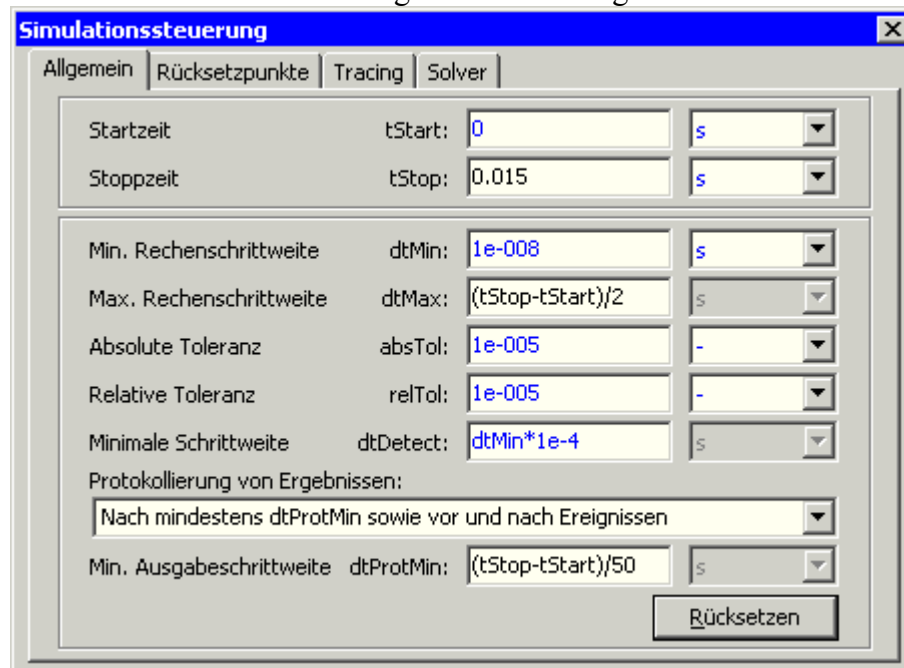
- Während eines Optimierungsexperiments sollte man nur Signal-Verläufe darstellen, welche prägnante Aussagen zur Güte des Modellverhaltens liefern.
- Da die Signal-Darstellung während der Optimierung im Sekundentakt wechselt, muss man die gewünschte Information mit einem Blick erfassen können.
- Wichtig in Hinblick auf eine hohe Rechengeschwindigkeit ist das Abschalten der automatischen Anpassung der Achsen in den Signalfenstern! Eine feste Achsen-Skalierung verbessert auch die Erkennbarkeit!

#### 3. Simulationssteuerung

- Mit einem 3GHz-Prozessor sollten sich mit den Standard-Einstellungen der Simulationssteuerung Rechenzeiten von unter 0,2 s pro Modell-Lauf erreichen lassen.
- Den "exakten" Wert kann man unterhalb des Modellexplorers im Ausgabe-Fenster ablesen:



- Geringfügige Änderungen der Modellparameter können zu einer größeren Änderung der Rechenzeit führen, weil die zeitkritische Behandlung der Unstetigkeiten unter veränderten Bedingungen stattfindet.
- In Hinblick auf die Optimierung darf man den Simulationszeitbereich nicht zu kurz wählen, damit ein Prägezyklus auch bei unterschiedlichsten Parameter-Belegungen abgeschlossen werden kann. Im Beispiel wurde **tStop=15 ms** gesetzt.
- Im Ergebnisfenster sollte man jedoch einen kürzeren Zeitbereich darstellen, damit man etwas von dem Prägezyklus erkennt.
- Die maximale Rechenschrittweite kann man z.B. auf **dtMax=(tStop-tStart)/2** vergrößern. Damit wird der Bereich nach vollendetem Prägezyklus mit wenigen Schritten durchfahren.
- Die minimale Ausgabeschrittweite sollte man auf **dtProtMin=(tStop-tStart)/50** stellen. Zusammen mit der Protokollierung aller Unstetigkeiten ergibt dies hinreichend stetige Signalverläufe.
- Die übrigen Parameter der Simulationssteuerung sollten vorläufig die Standardwerte behalten:



← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Simulationssteuerung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Simulationssteuerung)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Versuchsstand

## Aus OptiYummy

↑

← →

### Versuchsstand-Konfiguration

Nach den Erfahrungen aus der vorherigen Etappe, sollte es keine Probleme bereiten, nach dem Start von OptiY einen numerischen Versuchsstand als Projekt zu konfigurieren:

1. Neues Versuchsstand-Projekt anlegen
2. Simulationsmodell einfügen
3. Entwurfparameter (Nennwerte)
4. Forderungen (Restriktionen)
5. Wünsche (Gütekriterien)
6. Optimierungsverfahren
7. Visualisierung vorbereiten

Dazu im Folgenden einige Hinweise:

### 1. Neuen Versuchsstand anlegen

- Nach dem Start von OptiY ist bereits ein neues Versuchsstand-Projekt mit einem (leeren) Experiment geöffnet.
- Dieses sollte man gleich Speichern und dabei den gleichen Namen verwenden, wie für das Simulationsmodell der aktuellen Etappe (**Etappe2a\_xx.opy**).

### 2. Simulationsmodell einfügen

- Die aktuellen Parameter des Simulationsmodells werden als Startwerte für die noch zu wählenden Entwurfsgrößen genutzt.
- Das Simulationsmodell sollte deshalb vor dem Einfügen in den Experiment-Workflow unbedingt mit einer sinnvollen Ausgangslösung konfiguriert sein (vollständiger Prägezyklus!).

### 3. Entwurfparameter (Nennwerte)

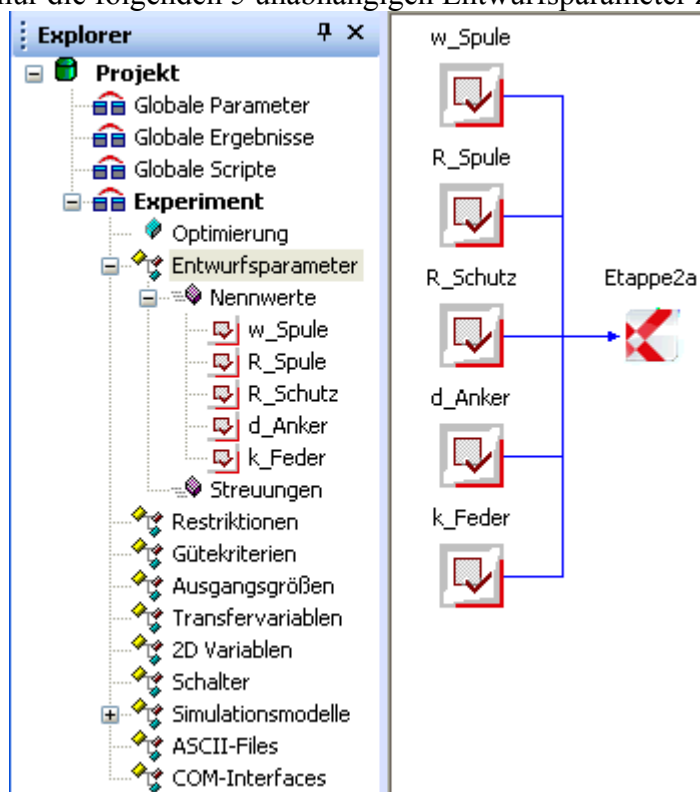
Gesucht werden innerhalb dieser Etappe die optimalen Nennwerte für folgende Entwurfparameter:

- Windungszahl **w**
- Spulenwiderstand **R<sub>el</sub>**
- Schutzbeschaltungswiderstand **R**
- Ankerdurchmesser **d<sub>Anker</sub>**
- Rückholfeder-Federsteifigkeit **k**
- Vorspannweg der Feder **s<sub>0</sub>**

Der Zeitbedarf für die Lösungssuche steigt zumindest proportional mit der Anzahl der berücksichtigten Entwurfparameter:

- Entwurfparameter, welche man anderweitig einfach bestimmen kann, sollte man nicht durch numerische Optimierung suchen lassen.

- Im Beispiel ist das offensichtlich der Vorspannweg  $s_0$ , der über Abhängigkeiten aus der aktuellen Nadel-Masse und der Federkonstante berechnet wird (Siehe Etappe1).
- Es sind in dieser Etappe nur die folgenden 5 unabhängigen Entwurfparameter zu berücksichtigen:



- *Startwerte:*

In den Eigenschaften der einzelnen Entwurfparameter müsste der aktuelle Wert aus dem Simulationsmodell als Startwert eingetragen sein.

- *Grenzwerte:*

Die standardmäßig eingetragenen Grenzen muss man meist noch im Sinne möglicher Lösungen anpassen.

1. Man sollte die Hinweise aus der 1.Etappe beachten.
2. Grenzwerte sollte man "hinreichend" weit entfernt von physikalisch sinnlosen Werten setzen:
  - z.B. sind negative Spulenwiderstände (meist) sinnlos.
  - Während der Optimierung können Lösungen außerhalb der vorgegebenen Grenzen entstehen, die infolge schlechter Bewertung jedoch wieder verworfen werden.
  - Physikalisch sinnlose Parameterbelegungen führen im Modell oft zu numerischen Instabilitäten (Absturz) und können durch Wahl geeigneter Grenzwerte vermieden werden.

- *Typen:*

In einem SimulationX-Modell kann man ausschließlich Nennwerte vom Typ "Variable" oder "Konstante" verwenden. Dabei handelt es sich im Zahlenwerte im REAL-Format. "Variable" Entwurfparameter sind freigegeben für die Veränderung durch das Optimierungsverfahren. Durch Angabe einer "Genauigkeit" beschreibt man die kleinste Abstufung zwischen zwei Werten:

- Ankerdurchmesser und Federkonstante sind weitestgehend frei fertigbar (Genauigkeit=0).
- Durch die Wahl von geeigneter Spulengeometrie und Drahtdurchmesser lässt sich ein ermittelter Spulenwiderstand hinreichend genau realisieren (Genauigkeit=0).
- Der Abschaltwiderstand sollte einer Norm-Reihe entstammen. Da der Wert selbst wahrscheinlich ziemlich unkritisch ist, kann man den erhaltenen Optimalwert einfach auf den nächst möglichen

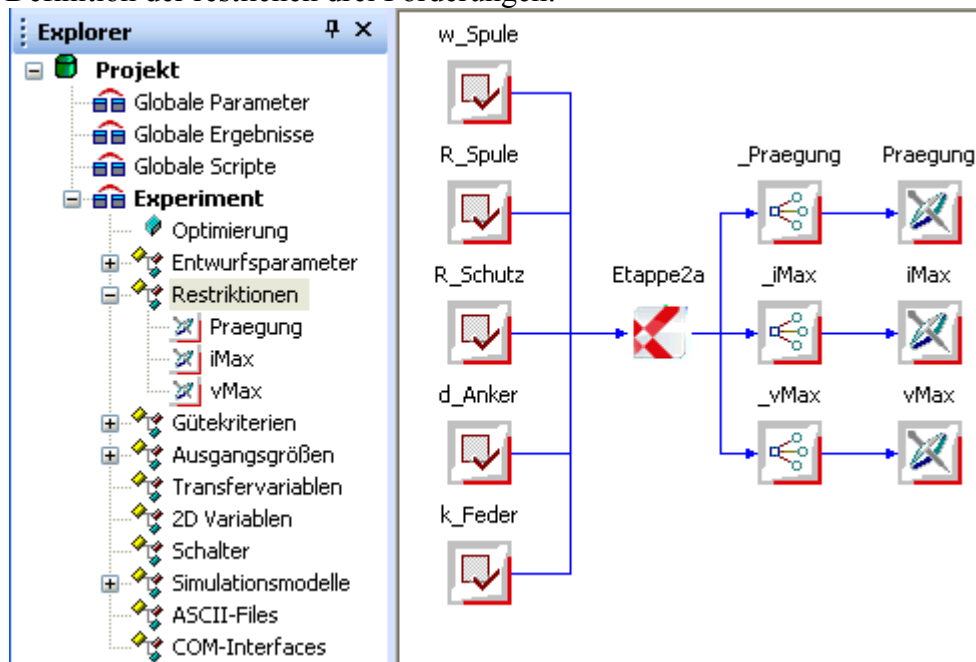
Eigenschaft	
Nennwert Daten	
Name	w_Spule
Einheit	-
Kommentar	Windungszahl
Werte	
Startwert	500
Untergrenze	100
Obergrenze	2000
Genauigkeit	1
Typ	Variable

abrunden (Genauigkeit=0).

- Eine Besonderheit weist die Windungszahl auf:
  - Es gibt technisch nur ganze Windungszahlen.
  - Prinzipiell könnte man als Optimum auch eine gebrochene Windungszahl ermitteln und diesen Wert nachträglich runden.
  - Über "Genauigkeit=1" kann man jedoch die Optimierung zwingen, nur ganze Werte für die Windungszahl zu verwenden.

#### 4. Forderungen (Restriktionen)

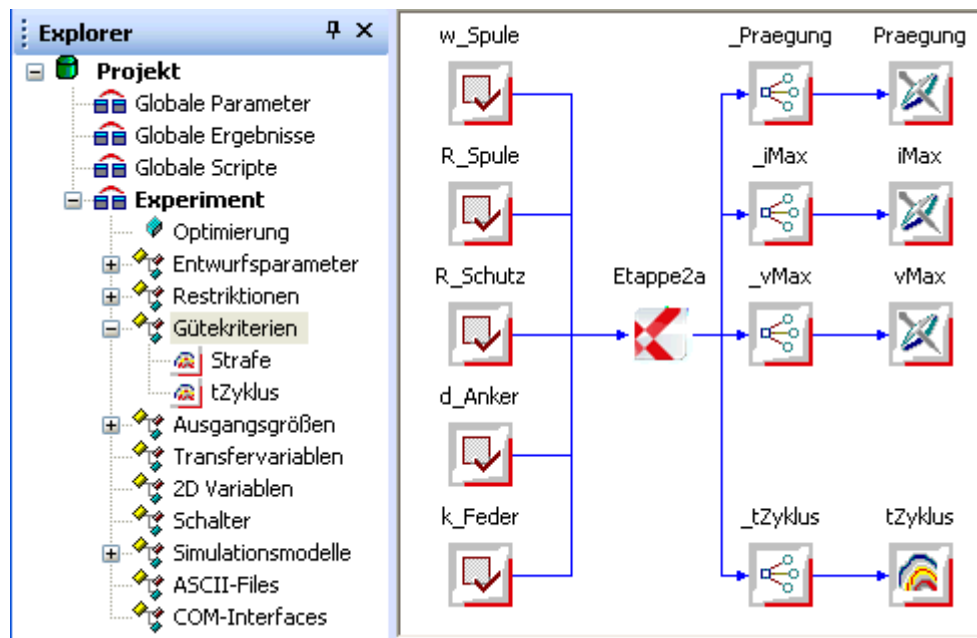
- Die Forderung nach einer maximal zulässigen Zykluszeit von 3,4 ms muss nicht als Restriktion formuliert werden, da die minimal mögliche Zykluszeit bereits als Gütekriterien formuliert wird.
- So genügt die Definition der restlichen drei Forderungen:



- In den Eigenschaften der Restriktionsgrößen definiert man den zulässigen Bereich über die Grenzwerte:
  - **Praegung=1.0 ... 1.1**
  - **iMax=0 A ... 1,5 A**
  - **vMax=-200 V ... 200 V**
- Alle Restriktionsgrößen sollten vorläufig mit dem gleichen Gewichtungsfaktor=1 berücksichtigt werden.

#### 5. Wünsche (Gütekriterien)

- Die Auflistung der Wünsche bereitet erfahrungsgemäß die geringsten Probleme.
- Im Beispiel verfolgen wir vorläufig den Wunsch aus der 1.Etappe weiter:



*Wir wünschen uns einen möglichst kurzen Prägezyklus!*

## 6. Optimierungsverfahren

- Wir wählen das Hooke-Jeeves-Verfahren.

**Achtung:** Speichern nicht vergessen!

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Versuchsstand](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Versuchsstand)“

---

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Nennwertoptimierung

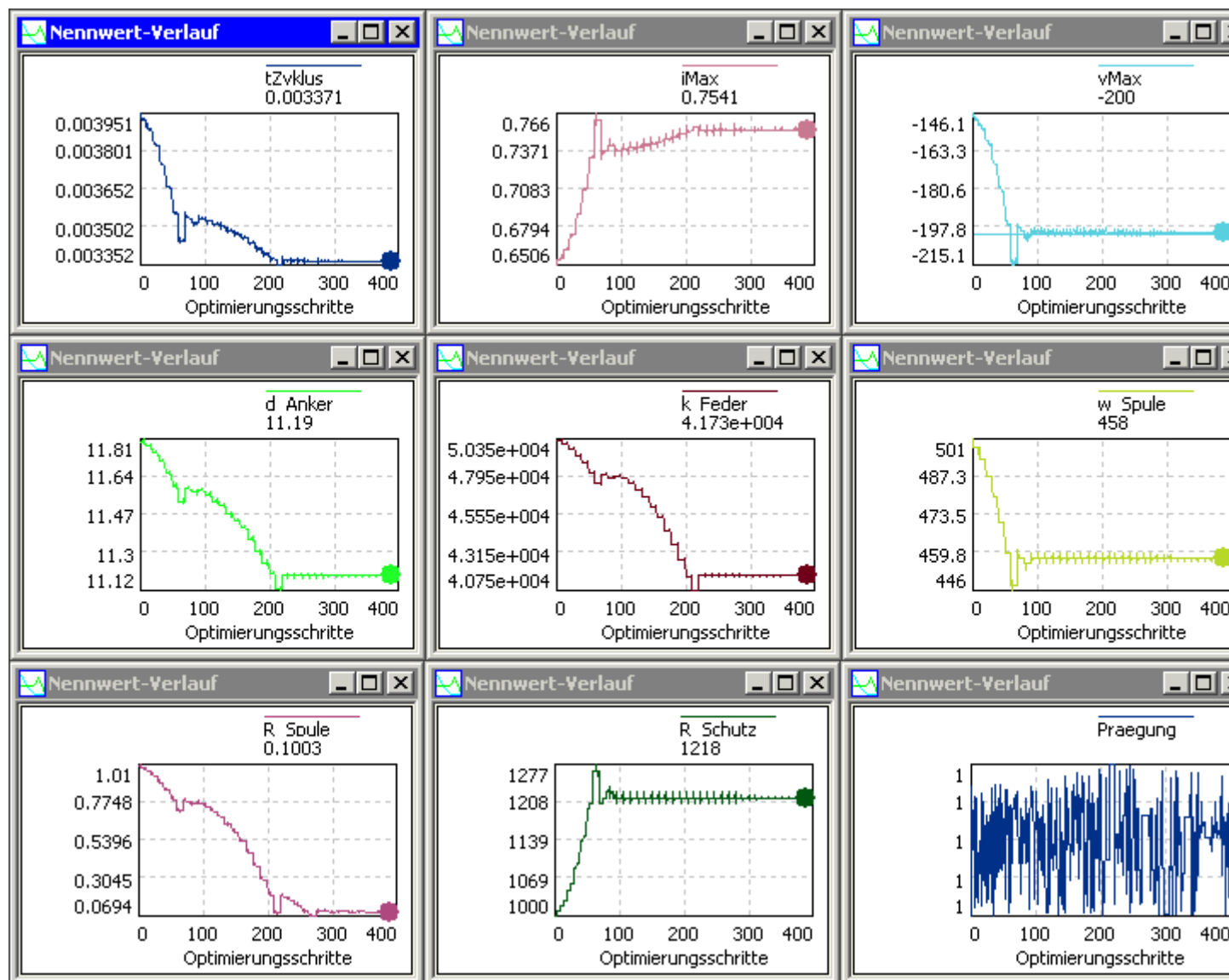
Aus OptiYummy

↑

← →

## Nennwert-Optimierung

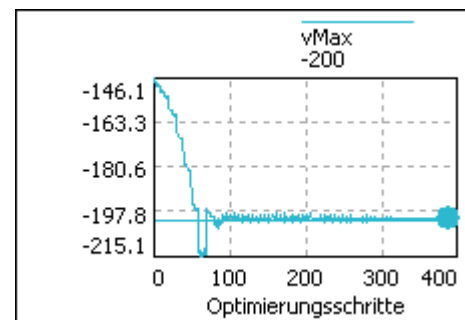
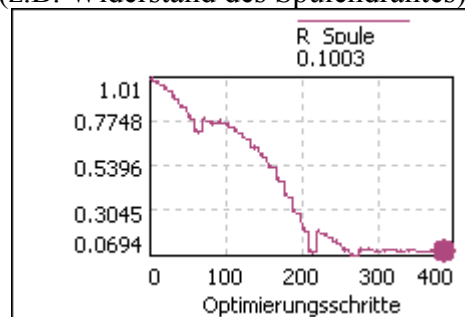
Nach dem Start des Experiments entwickeln sich die Nennwerte der Entwurfparameter erst einmal recht optimistisch:



- Mit größter Wahrscheinlichkeit konvergiert die Verringerung der Zykluszeit jedoch bald bei einem viel zu großem Wert. Auch die im obigen Bild erreichte Zykluszeit von ca. 3,4 ms entspricht noch nicht vollständig unseren Zielvorstellungen!
- Bevor wir dieses Problem lösen, einige Erläuterungen zu den Nennwert-Verläufen:
  - **Restriktionsgrößen:**
    - Grenzwerte werden als waagerechte Linie eingeblendet, wenn sie sich im Darstellbereich der Y-Achse befinden.
    - Man erkennt dies an der Linie für -200 V für die Abschaltspannung vMax.
    - Während der Optimierung wird dieser Grenzwert -200 V angestrebt, da die max. zulässige Schaltspannung zum schnellstmöglichen Abfallvorgang führt!
  - **Grenzen der Entwurfsgrößen:**
    - Bei der Konfiguration des Versuchsstandes hat man sich bereits Gedanken zu sinnvollen

Grenzwerten der Entwurfsgrößen gemacht.

- Dabei hat man auch einen gewissen Sicherheitszuschlag in Hinblick auf den Optimierungsprozess berücksichtigt.
- Wenn es im Optimierungsprozess zur Konvergenz von Entwurfsgrößen an ihre Grenzwerte kommt, muss man überlegen, welche Maßnahmen man ergreift (z.B. Widerstand des Spulendrahtes):



### 1. Grenzwert ändern:

- Wenn Werte außerhalb der bisherigen Grenzen auch technisch realisierbar sind.
- Wenn man vermutet, dass die Verletzung der bisherigen Grenzwerte nur temporär während des Optimierungsprozesses auftritt.
- Nach Änderung des Grenzwertes kann man eine angehaltene Optimierung fortsetzen.

### 2. Entwurfsgröße fixieren:

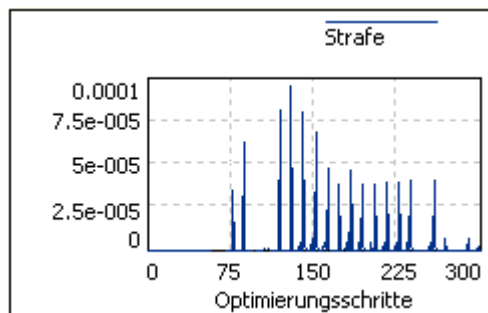
- Im Beispiel scheint ein Spulenwiderstand von 0 Ohm (und weniger) im Sinne des Optimums am Besten zu sein. Das stößt auf Probleme bei der technischen Umsetzung!
- Deshalb könnte man diese Entwurfsgröße auf einen technisch sinnvollen Wert setzen und konstant lassen (z.B. auf den Startwert=1 Ohm).

**Hinweis:** Im Unterschied zur optimalen Anfangsposition der Nadelspitze (möglichst dicht an der Papieroberfläche), ist hier die Sachlage nicht so eindeutig! Im Zweifelsfall sollte man eine Entwurfsgröße nicht fixieren, sondern für die Lösungssuche noch variabel lassen. Wir warten erst noch die Ergebnisse der weiteren Optimierung ab!

## Problem der Randoptima

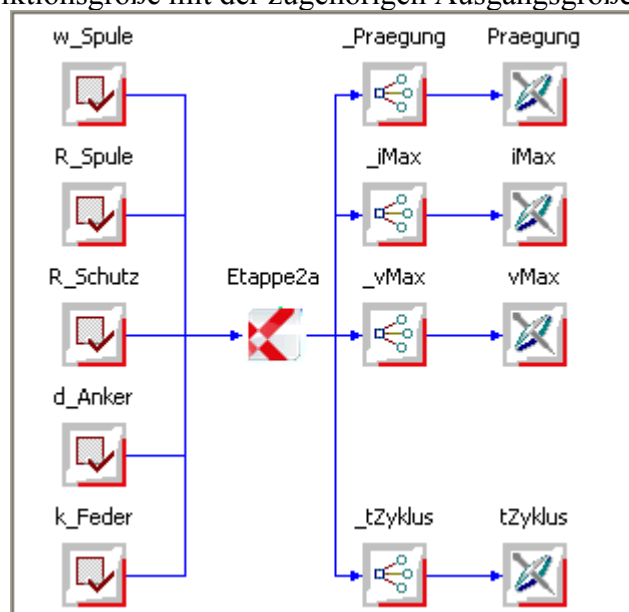
Bei technischen Problemstellungen wird die optimale Lösung meist an Restriktionsgrenzen liegen. Das wird mit großer Wahrscheinlichkeit zu Problemen mit der Konvergenz in Richtung einer optimalen Lösung führen:

- Bei der in OptiY verwendeten hierarchischen Optimierungsstrategie wird aus den aktuellen Restriktionsverletzungen der Wert einer Straf-Funktion berechnet.
- Um zuerst alle Forderungen zu erfüllen, hat die Minimierung des Straf-Funktionswertes die höchste Priorität.
- Erst wenn alle Forderungen erfüllt sind (Straf-Funktionswert=0), widmet sich die Optimierungsstrategie der Verfolgung unserer Wünsche (Minimierung der Gütekriterien).
- Eine bessere Erfüllung unserer Wünsche (tZyklus kleiner) führt zwangsläufig wieder zu einer Verletzung von Restriktionen.
- Damit schaltet der Optimierungsprozess an dieser Stelle ständig zwischen zwei Zielfunktionen hin und her (Forderungen und Wünsche).
- Die Konvergenz zur optimalen Lösung wird damit meist verhindert!
- Beispielhaft tritt dies hier für an der kritischen Grenze von "vMax" auf. Nachdem diese Grenze erreicht wurde, tritt das Pendeln zwischen den beiden Zielfunktionen auf:

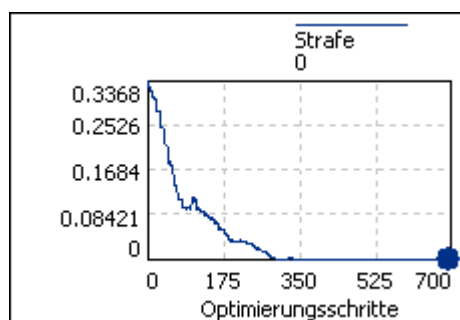


Dieses Problem lässt sich zum Glück einfach lösen, indem man alle Wünsche als Forderungen formuliert:

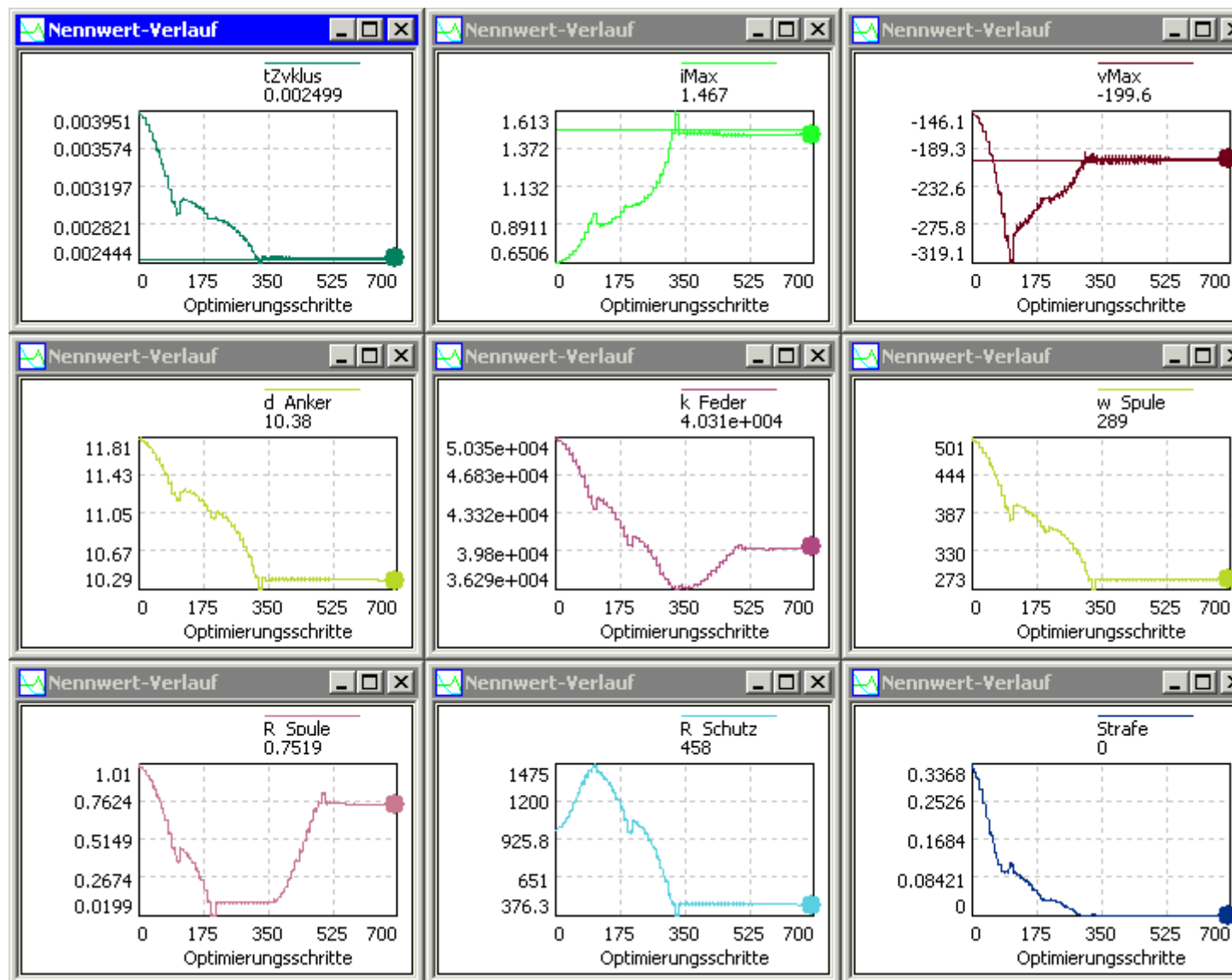
- Diese Änderung führen wir über den Workflow-Editor durch.
- Wir löschen das Gütekriterium "tZyklus".
- Ergänzen eine neue Restriktionsgröße, die wir ebenfalls "tZyklus" nennen.
- Wir verknüpfen diese Restriktionsgröße mit der zugehörigen Ausgangsgröße des Modells:



- Als oberen Grenzwert geben wir eine anzustrebende Zykluszeit ein (unter Beachtung der Maßeinheit!).
- Unser Gütekriterium "Zykluszeit" ist nun selbst Bestandteil der Straf-Funktion und es existieren keine separaten Gütekriterien.
- Damit entfällt das Umschalten zwischen den Zielfunktionen an den Restriktionsgrenzen und das Verfahren sollte numerisch stabil auf der Straffunktion zum Optimum konvergieren:



**Hinweis zu R\_Spule:** Im konkreten Beispiel entfernte sich der Spulenwiderstand wieder von seiner unteren Grenze von 0,1 Ohm. Der zum Schluss erreichte Wert ist technisch wahrscheinlich realisierbar. Allerdings kann abhängig von der gewählten Ausgangslösung auch eine Konvergenz des Spulenwiderstands gegen einen technisch unsinnigen Wert stattfinden. Dann muss man eine technisch sinnvolle Grenze vorgeben. Wahrscheinlich ist der Einfluss des Spulenwiderstandes in einem weitem Bereich praktisch kaum wahrnehmbar!



- Erfüllt die Optimierung alle Forderungen (Strafe=0), so halten wir sie an.
- Wir verschärfen unsere Forderung für die Zykluszeit in sinnvollem Maße. Und hoffen erneut, dass die Zielstellung erreicht wird.
- **Hinweis:** Eine Fortsetzung der Optimierung vom bisher erreichten Bestwert führt meist nicht zur gewünschten Verbesserung! Man sollte die Optimierung zurücksetzen und erneut von der originalen Ausgangslösung starten.
- Diese iterative Taktik führen wir solange fort, bis die Optimierung die gewünschte Zykluszeit nicht mehr erreicht.
- Den "exakt" möglichen Wert des Optimum kann man dann recht schnell eingrenzen.
- Das Nennwert-Optimum für die minimal mögliche Zykluszeit muss immer die Grenzwerte für die Abschaltspannung und den Spulenstrom ausschöpfen!

**Achtung:** Speichern nicht vergessen!

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Nennwertoptimierung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Nennwertoptimierung)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Experimentauswertung

## Aus OptiYummy

↑

← →

### Experiment-Auswertung (Ergebnisse)

Mit dem erreichten Bestwert sollte man eine Simulation durchführen:

- Es muss kritisch überprüft werden, inwiefern das erreichte Optimum wirklich der Zielstellung entspricht.
- Wenn man keine Fehler im Modell oder in der Versuchsstand-Konfiguration hat, müsste ein korrektes Modellverhalten entstehen!

Die Ergebnisse der optimalen Lösung sind unter Berücksichtigung der individuellen **Teilnehmernummer xx**= [01..99] mittels des Eisenteilungsfaktors **K\_FeInnen=0.1xx** zu ermitteln!

### Forderungen:

- Betriebsspannung **24 V**
- Max. zulässiger Spulenstrom **1,5 A**
- Max. zulässige Induktionsspannung an der Spule **200 V**

### Beachtung der Annahme:

- Anfangsposition **Nadel.x0=0.15 mm**

### Gesucht sind die optimalen Werte für:

- Windungszahl **w**,
- Spulenwiderstand **R\_Spule**,
- Schutzbeschaltung-Widerstand **R\_Schutz**,
- Ankerdurchmesser **d\_Anker**,
- Rückholfeder-Federsteifigkeit **k\_Feder**
- Vorspannweg **s0**?
- Erreichte Zykluszeit **tZyklus**

### Hinweise für die Ergebnis-Aufbereitung:

1. Die Bestwerte sind als Text der E-Mail zu notieren
2. Das Simulationsmodell (Etappe2a\_xx.ism) ist mit den gefundenen Optimalwerten zu konfigurieren. Die Zeitverläufe wesentlicher Modellgrößen sind im Modell in anschaulicher Form in Signalfenstern darzustellen.
3. Der OptiY-Versuchsstand (.opy-Datei) muss aussagekräftige Nennwert-Verläufe zum Optimierungsverlauf enthalten. Diese müssen ohne erneute Experiment-Durchführung betrachtbar sein.
4. Es ist zu überprüfen, dass die als Anhang der E-Mail einzusendenden Dateien **Etappe2a\_xx.ism** und **Etappe2a\_xx.opy** portabel sind (lauffähig auf einem anderen PC in einem beliebigem Ordner).
5. **Achtung:** Beide Dateien sind in ein Archiv (z.B. .zip) zu packen, da es manchmal Probleme beim Öffnen von versendeten Text-Dateien gibt ("unsichtbare" Steuerzeichen?).

*Damit haben wir den ersten Abschnitt (A) der Etappe2 beendet*

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Experimentauswertung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Experimentauswertung)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Wirbelstrom-Modell

Aus OptiYummy

↑

← →

## Wirbelstrom-Modell

Wir erzeugen aus dem Modell *Etappe2a\_xx.ism* eine **Kopie** *Etappe2b\_xx.ism*, mit der wir weiterarbeiten:

- Das Modell soll die Bestwerte aus der Nennwert-Optimierung von Etappe2a erhalten.
- Wir überprüfen, ob das konfigurierte Modell das gewünschte Verhalten zeigt!

### Inhaltsverzeichnis

- 1 Vorbetrachtung
- 2 Globaler Wirbelstrom-Ersatzwiderstand
- 3 Lokaler Wirbelstrom in jedem Eisen-Element
- 4 Modell-Erweiterung (Wirbelstrom)
  - 4.1 Geometrie-Element
  - 4.2 Wirbelstrom-Element
  - 4.3 Modell-Struktur
  - 4.4 Wirkung des Wirbelstroms

### Vorbetrachtung

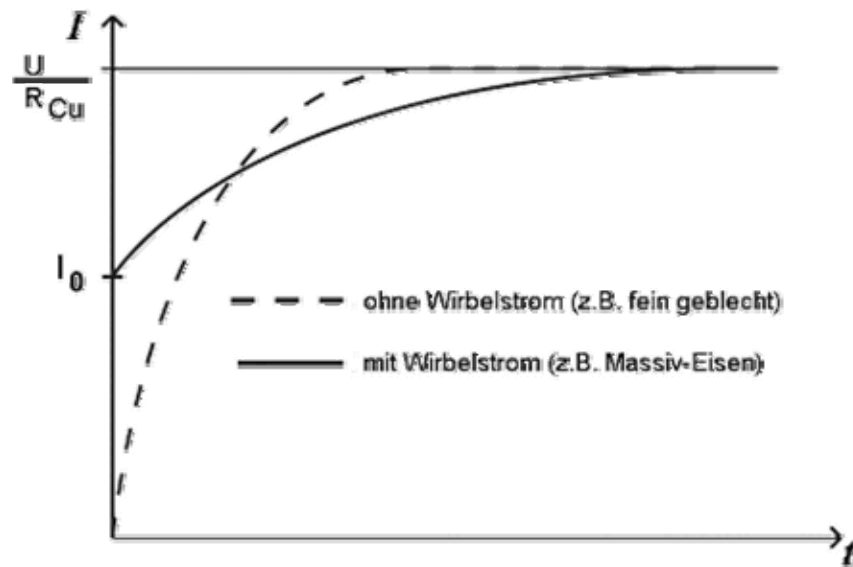
**Wirbelströme** entstehen durch Induktionsspannungen in elektrisch leitfähigen Materialien bei zeitlicher Änderung des sie durchdringenden magnetischen Flusses. Aus den Wirbelströmen resultiert entsprechend der **Lenzchen Regel** ein magnetisches Gegenfeld, welches das erzeugende Feld abschwächt:

- Infolge dieser Gegenwirkung wird die Feldänderung im Magnetkreis verzögert. Damit bewirken die Wirbelströme eine Ein- und Ausschaltverzögerung bei elektro-magnetischen Aktoren.
- Insbesondere bei schnellen Feldänderungen kommt zu einer Feldverdrängung im Eisen. Dadurch verringert sich die effektiv durchströmte Fläche, was den magnetischen Widerstand der Eisen-Elemente in Abhängigkeit von der Feldänderungsgeschwindigkeit erhöht.
- Die Wirbelströme bewirken über die ohmschen Verluste entlang ihrer Bahn eine Erwärmung des Eisenmaterials. Insbesondere beim Einschaltvorgang bilden sie wesentliche Komponente der **Eisenverluste**.

Mit sehr großem Berechnungsaufwand kann man mit Finite-Element-Simulationen die Wirkung der Wirbelströme innerhalb eines Magnetkreises detailliert untersuchen. Das ist innerhalb der System-Simulation mit Netzwerk-Modellen nur sehr eingeschränkt möglich!

Wir beschränken uns deshalb im Folgenden auf eine qualitative Nachbildung der Verzögerung der Feldänderung im Magnetkreis und die Auswirkung der Wirbelströme auf den Spulenstrom:

- Eine Messung des zeitlichen Verlaufs des Einschaltstroms an einem unbeweglichem Elektromagneten ergibt ohne Berücksichtigung der austuerabhängigen Permeabilität qualitativ folgende Stromverläufe:



- Der Enstrom  $I_{\text{end}}$  wird bestimmt durch die verwendete Betriebsspannung  $U$  und dem ohmschen Widerstand  $R_{\text{Cu}}$  des Spulendrahtes.
- Der Stromsprung  $I_0$  resultiert aus dem praktisch sofort fließenden Wirbelstrom mit seinen ohmschen Verlusten in den Eisen-Elementen. Diese Verlustenergie  $E_W = U \cdot I_0$  wird von der Spannungsquelle sofort bereitgestellt.
- Der Wert von  $I_0$  liegt bei realen Magneten bezogen auf  $I_{\text{end}}$  bei maximal 5 bis 10%, wenn der Magnetkreis massive Eisenabschnitte enthält. Verwendet man geblechte Eisenkreise, so liegt dieser Sprung unter 1% und ist im Mess-Signal häufig kaum erkennbar.

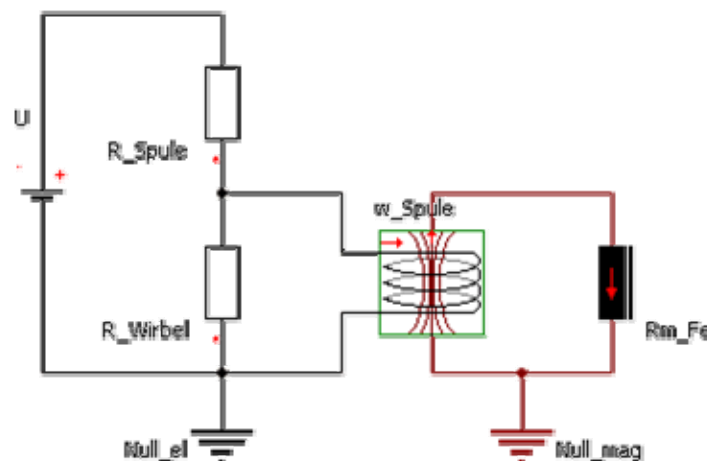
Wir werden unser Modell nun so umgestalten, dass wir den Wirbelstrom zumindest in einer ersten Näherung berücksichtigen.

### Wichtig:

Um unseren bisherigen Bearbeitungszustand nicht zu zerstören, erzeugen wir aus *Etappe2a\_xx.ism* eine Kopie *Etappe2b\_xx.ism*, mit der wir jetzt arbeiten. Wir können dann auch jederzeit die Auswirkung der zusätzlich berücksichtigten Effekte vergleichend analysieren!

### Globaler Wirbelstrom-Ersatzwiderstand

Die einfachste Methode (welche wir **nicht anwenden!**), ist die Berücksichtigung des Wirbelstroms durch einen ohmschen Widerstand auf der elektrischen Seite des elektro-magnetischen Wandlers (Spule):



- Dieser ohmsche Widerstand  $R_{\text{Wirbel}}$  muss direkt parallel zu den widerstandslosen Windungen der Spule angeordnet werden. Dazu muss man im SimX-Spulenelement  $R_{\text{el}}=0$  setzen!
- Der ohmsche Widerstand  $R_{\text{Spule}}$  des Windungsdrahtes liegt dann als separates Element in Reihe zur Spannungsquelle.

- Besitzt man infolge von Messungen (oder aus Erfahrung) den Wert  $I_0$  für den Stromsprung und kennt den Endwert  $I_{\text{end}}$ , so kann man daraus  $R_{\text{Wirbel}}$  berechnen:

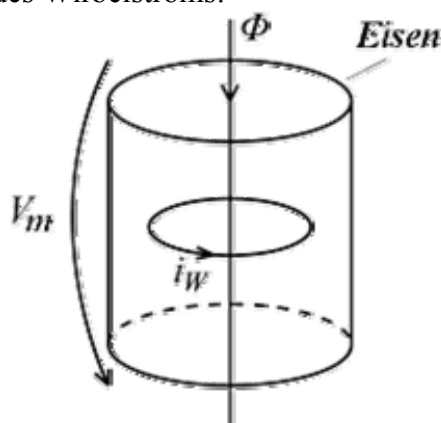
$$R_{\text{Wirbel}} = R_{\text{Spule}} \cdot (I_{\text{end}}/I_0 - 1)$$

- Beim Einschalten des Magneten kommt es mit diesem Modell zum Stromsprung  $I_0$  und zu einer geringfügigen Verzögerung des Anzugsvorgangs, da an den Windungen der Spule weniger von der Betriebsspannung ankommt.
- Beim Abschalten ergibt sich die größte Auswirkung, indem der Abfallvorgang verzögert stattfindet. Der Wirbelstromwiderstand wirkt wie ein relativ kleiner Schutzwiderstand zur Begrenzung der Abschaltspannung. Dadurch benötigt der Abbau des Stromes eine längere Zeit und die Haltekraft bleibt länger erhalten!

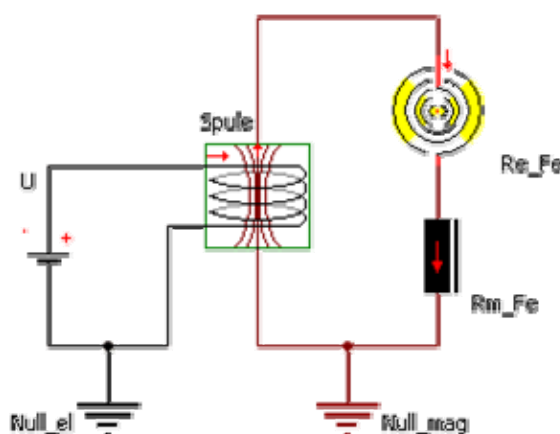
Die Wirkung dieses globalen elektrischen Ersatzwiderstandes kann man auch auf die magnetische Seite des elektro-magnetischen Wandlers transformieren:

$$R_{\text{el\_Fe}} = R_{\text{Wirbel}}/w_{\text{Spule}}^2$$

- Dieses Wirbelstrom-Element in der magnetischen Domäne entspricht einer Kurzschlusswindung um das zugehörige Eisen-Element  $R_{\text{m\_Fe}}$ . Infolge der Flussänderungen im Eisen wird eine Spannung in dieser kurzgeschlossenen Windung induziert. Der ohmsche Widerstand entlang des sich ergebenden Strompfades bestimmt den Betrag des Wirbelstroms:



- Verwendet man obige Umrechnungsformel zwischen  $R_{\text{Wirbel}}$  und  $R_{\text{el\_Fe}}$ , so ist das Verhalten beider Modelle identisch:

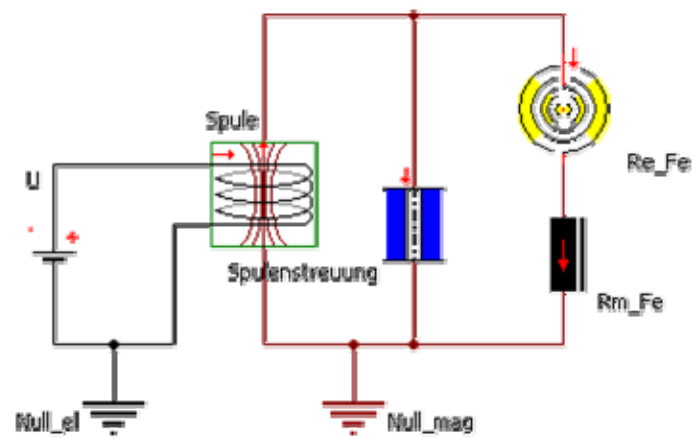


- Das SimX-Spulenelement enthält nun wieder Windungszahl und ohmschen Widerstand des Drahtes.

## Lokaler Wirbelstrom in jedem Eisen-Element

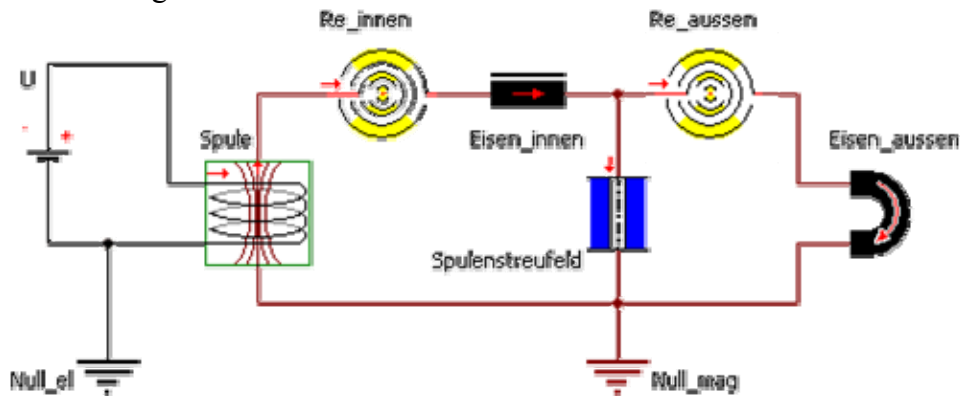
Auch die folgenden Betrachtungen führen wir noch ohne Veränderung unseres Modells durch:

- Enthält die Netzwerk-Struktur der magnetischen Domäne Verzweigungen des magnetischen Flusses, so beeinflussen die Wirbelströme entscheidend die Aufteilung des magnetischen Flusses. Das kann man sich sehr einfach bei Berücksichtigung des Spulenstreufeldes verdeutlichen:

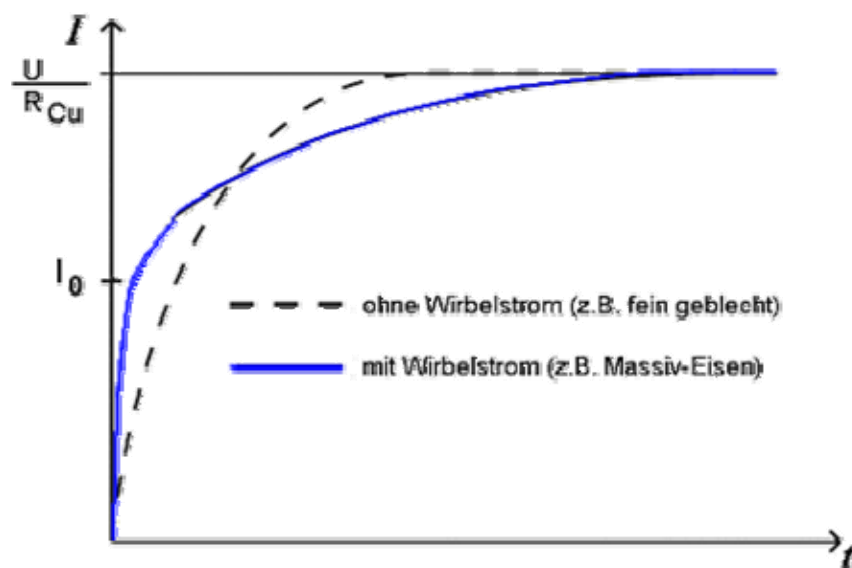


- Das Streufeld der Spule ist ein Luftelement und besitzt unabhängig vom aktuellen Magnetfeld einen konstanten magnetischen Widerstand.
- Der Eisenabschnitt liegt in der Modellstruktur parallel. Bei schnellen Flussänderungen bewirkt das Wirbelstrom-Element ein Vergrößern des magnetischen Widerstandes dieses Flusszweiges. Der magnetische Fluss wird damit durch das Streufeld der Spule "gedrückt" und geht damit dem eigentlichen Arbeitskreis für diese Zeitspanne verloren.

Wir betrachten nun unsere Netzwerk-Struktur. Infolge der Teilung des Eisenkreises in ein "inneres" und ein "äußeres" Eisen-Element kommt es zu weiteren Auswirkungen des Wirbelstroms, wenn wir diesen in beiden Eisen-Elementen berücksichtigen:



- Der Einschaltstromsprung wird nun verschliffen, so das der Wert  $I_0$  nicht eindeutig ablesbar ist:



- Es kommt zu den bereits beschriebenen Verdrängungseffekten des Flusses vom äußeren Eisenabschnitt in die Spulenstreuung.

## Modell-Erweiterung (Wirbelstrom)

### Geometrie-Element

- Wir konzentrieren alle Dimensionierungsberechnungen im Geometrie-Element, wie wir es bereits für einige Aspekte begonnen haben:
1. Alle für die Dimensionierung benötigten Größen werden als Parameter bzw. Variable des Geometrie-Elements definiert.
  2. Die im Geometrie-Element definierten Größen stehen dann anderen Modell-Elementen als Parameter zu Verfügung.
- Die Spulen-Parameter für die Windungszahl und den elektrischen Widerstand definieren wir als Parameter **w\_Spule** und **R\_Spule**. Beide sind mit den richtigen Einheiten und als **Typ Real** zu definieren, obwohl die Windungszahl technisch nur ganzzahlige Werte annehmen kann!
  - Windungszahl und Spulenwiderstand bleiben im weiteren Prozess der Magnet-Dimensionierung konstruktive Basis-Parameter, die nicht aus anderen Parametern berechnet werden.
  - Im Spulen-Element nehmen wir dann Bezug auf *Geometrie.w\_Spule* bzw. *Geometrie.R\_Spule*.

Der Wert des elektrischen Widerstands der Wirbelstrom-Bahn eines jeden Eisen-Abschnitts wird durch Geometrie und Material-Eigenschaften des Eisenkreises bestimmt. Prinzipiell könnte man die Parameter für Wirbelstrom-Elemente aus den Abmessungen und den Material-Kennwerten berechnen. Bisher wurden in der Literatur jedoch noch keine praktikablen Berechnungen zum Erreichen dieses Ziels gefunden. Deshalb wird hier ein sehr einfacher Ansatz gewählt:

- Wir gehen von der konstruktiven Randbedingung aus, dass der gesamte Eisenkreis aus gleichem Material besteht.
- Der Querschnitt entlang des magnetischen Flusses soll im gesamten Eisenkreis näherungsweise gleich groß bleiben. Wir nehmen vorläufig an, dass auch die geometrische Form des Querschnitts gleich bleibt, da die konkrete Geometrie des Magnetkreises noch unbekannt ist.
- Mit diesen Annahmen ist der elektrische Leitwert der effektiven Wirbelstrombahn eines Eisenelements nur noch proportional zu seiner Länge.
- Wir geben für die gesamte Eisenlänge einen Wirbelstromwiderstand **Re\_Eisen** als Parameter vor. Den Wert dieses gesamten Wirbelstromwiderstandes legen wir so fest, dass der Stromsprung beim Einschalten vorhandene Messungen oder Erfahrungswerte widerspiegelt.
- Für einen Eisenabschnitt  $Fe_i$  des Magnetkreises kann man den zugehörigen Wirbelstromwiderstand auf Grundlage seines Anteils an der Gesamtlänge berechnen:

$$Re_{Fe_i} = Re_{Eisen} \cdot L_{Eisen} / L_{Fe_i}$$

- Im Geometrie-Element werden die Zusammenhänge wie folgt berücksichtigt:

The screenshot shows the 'Gleichungen' (Equations) window in Simulink. The left sidebar lists parameters and variables, and the main window displays a list of equations for calculating magnetic properties.

Parameters and Variables (from top to bottom):

- d\_Anker (Ankerdurchmesser)
- w\_Spule (Windungszahl)
- R\_Spule (Drahtwiderstand)
- Restspalt (Restluftspalt)
- x\_Matriz (Matrizenboden)
- Re\_Eisen (Wirbelstromwiderstand)
- K\_FeInnen (L\_FeInnen/L\_Eisen=0,1xx)
- my0 (Magn. Feldkonst.)
- rho\_Fe (Massedichte Eisen)
- L\_Anker (Ankerlänge)
- A\_Anker (Ankerquerschnitt)
- V\_Anker (Ankervolumen)
- m\_Anker (Ankermasse)
- L\_Eisen (Länge Eisenweg)
- L\_FeInnen (Eisen in Spule mit 100% Fluss)
- Re\_FeInnen (Wirbelstromwiderstand)
- L\_FeAussen (Eisen nach Spulenstreuung)
- Re\_FeAussen (Wirbelstromwiderstand)

Equations (from top to bottom):

```

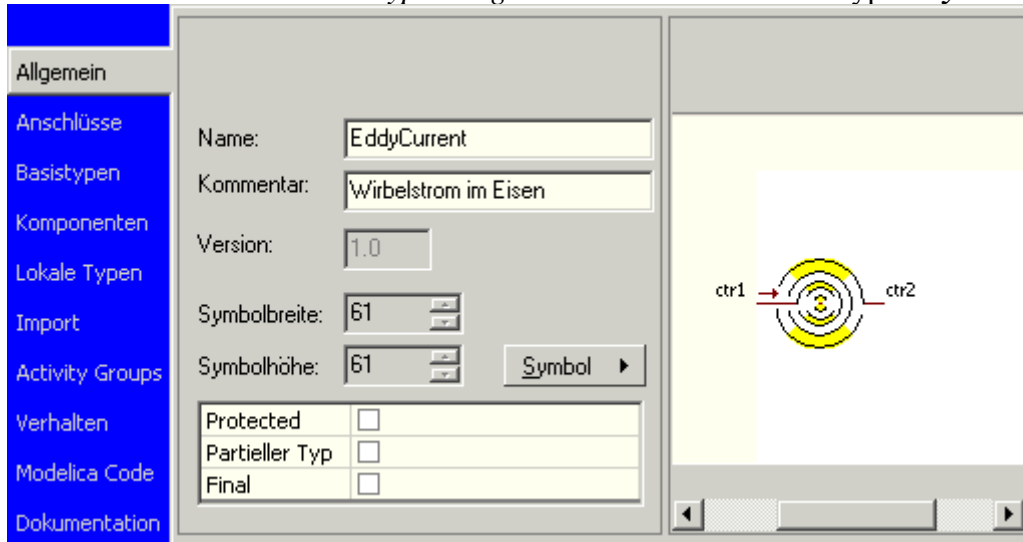
1 // enter your algorithm here
2 A_Anker :=pi/4*d_Anker^2;
3 L_Anker :=d_Anker;
4 V_Anker :=L_Anker*A_Anker;
5 m_Anker :=rho_Fe*V_Anker;
6 L_Eisen :=7*L_Anker;
7 L_FeInnen :=K_FeInnen*L_Eisen;
8 L_FeAussen :=L_Eisen-L_FeInnen;
9 Re_FeInnen :=Re_Eisen*L_Eisen/L_FeInnen;
10 Re_FeAussen:=Re_Eisen*L_Eisen/L_FeAussen;

```

## Wirbelstrom-Element

In der *SimulationX Student Edition* kann nur ein Wirbelstrom-Element verwendet werden. In unserer

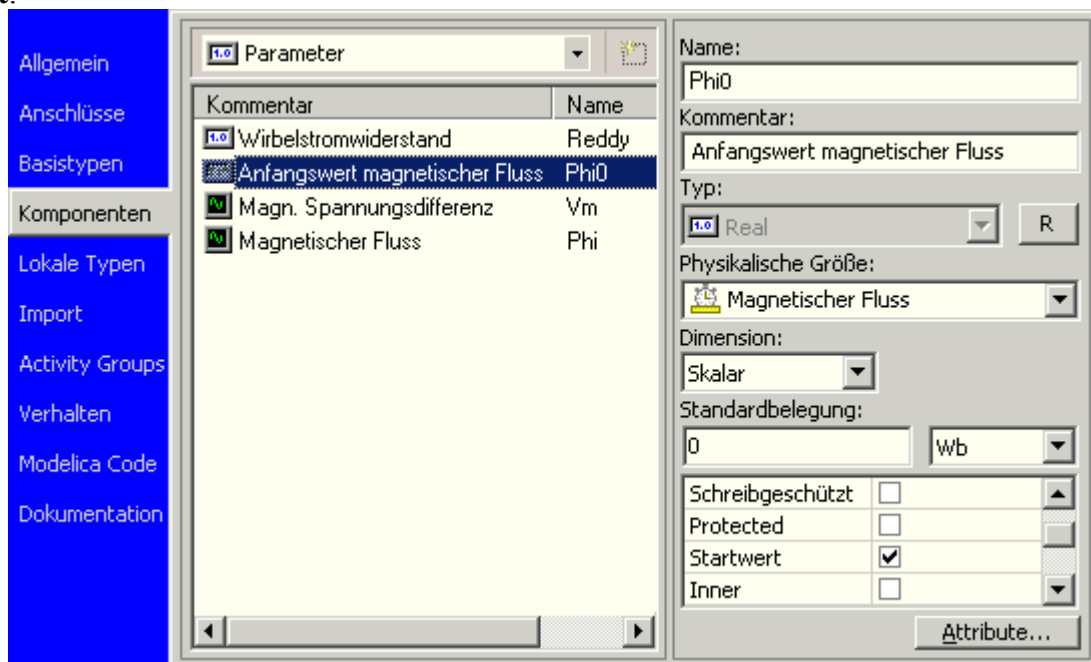
Modellstruktur des Magnetkreises benötigen wir jedoch zwei Wirbelstrom-Elemente. Deshalb erzeugen wir uns im Modell mit dem *TypeDesigner* den lokalen Element-Typ *EddyCurrent*:



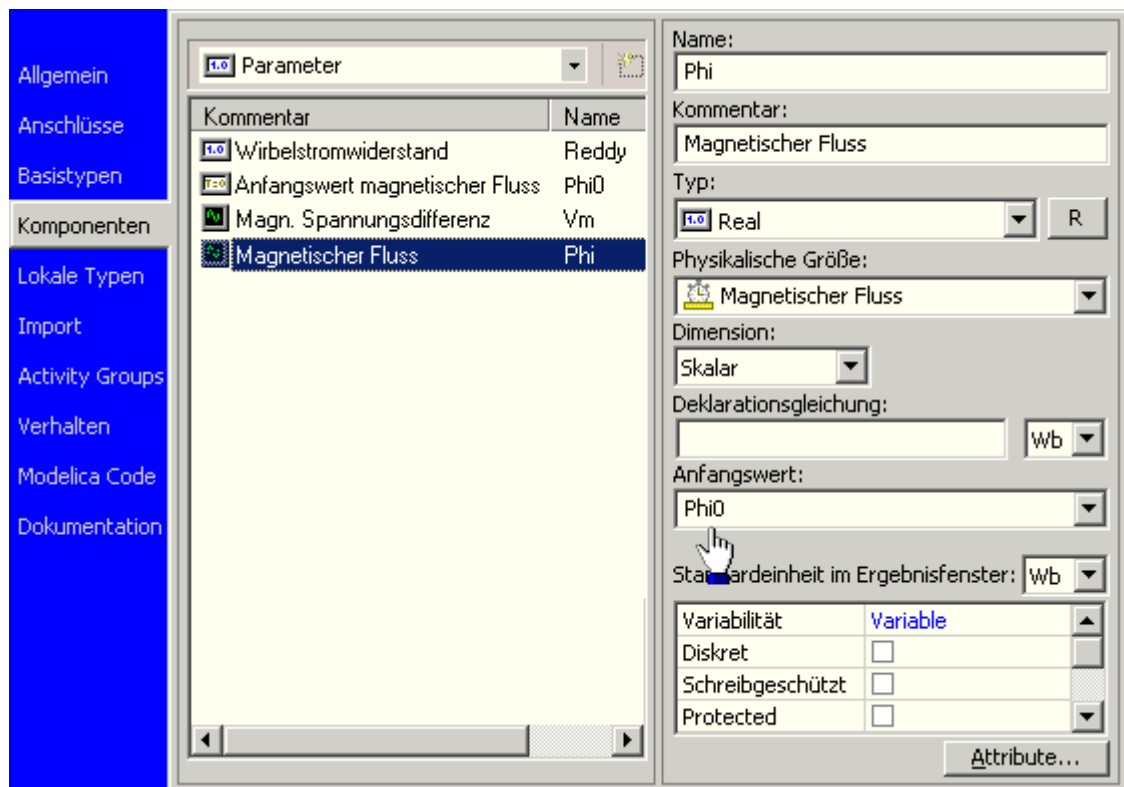
Als Symbol der Größe 61x61 kann man obiges Bild verwenden, welches dem Symbol des SimulationX-Bibliothekselements entspricht.

Auch inhaltlich gestalten wir den lokalen Element -Typ dem Bibliothekselement nach:

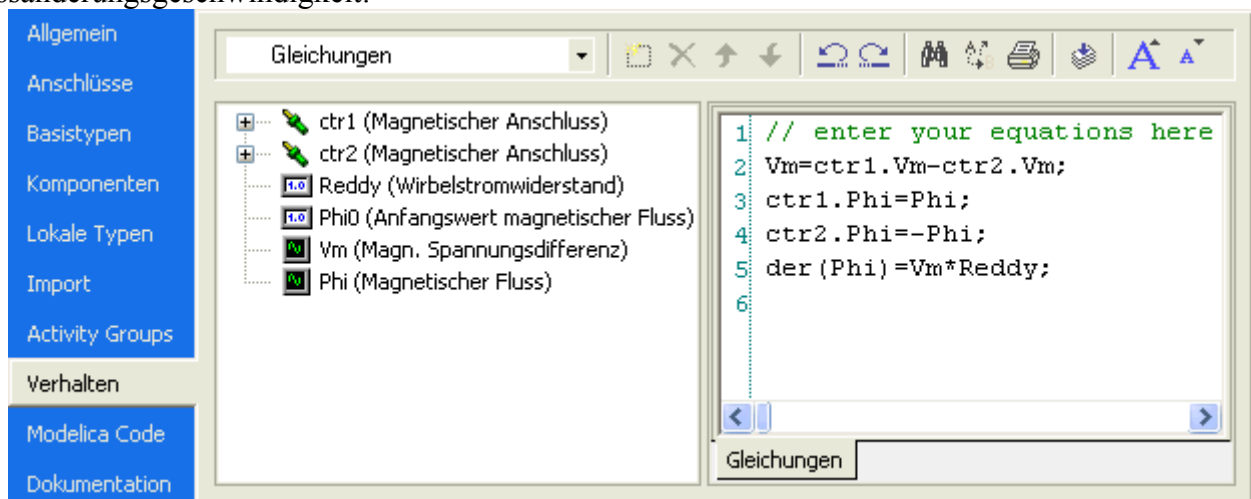
- Er besitzt zwei magnetische Anschlüsse.
- Der magnetische Fluss **Phi** ist die Zustandsgröße des Elements. Diese benötigt einen Anfangswert **Phi0** für den Zeitpunkt  $t_{Start}$ .
- Ein Anfangswert wird als "normaler" Parameter definiert, erhält dann jedoch die Kennzeichnung **Startwert**:



- Die Zustandsgröße wird als "normale" Variable definiert, erhält dann jedoch den zuvor definierten Anfangswert zugewiesen:



- Das Verhalten des Wirbelstrom-Elements ist sehr einfach im Gleichungsabschnitt zu definieren. Die sich entgegen der Flussänderung aufbauende magnetische Spannung ist proportional zur Flussänderungsgeschwindigkeit:

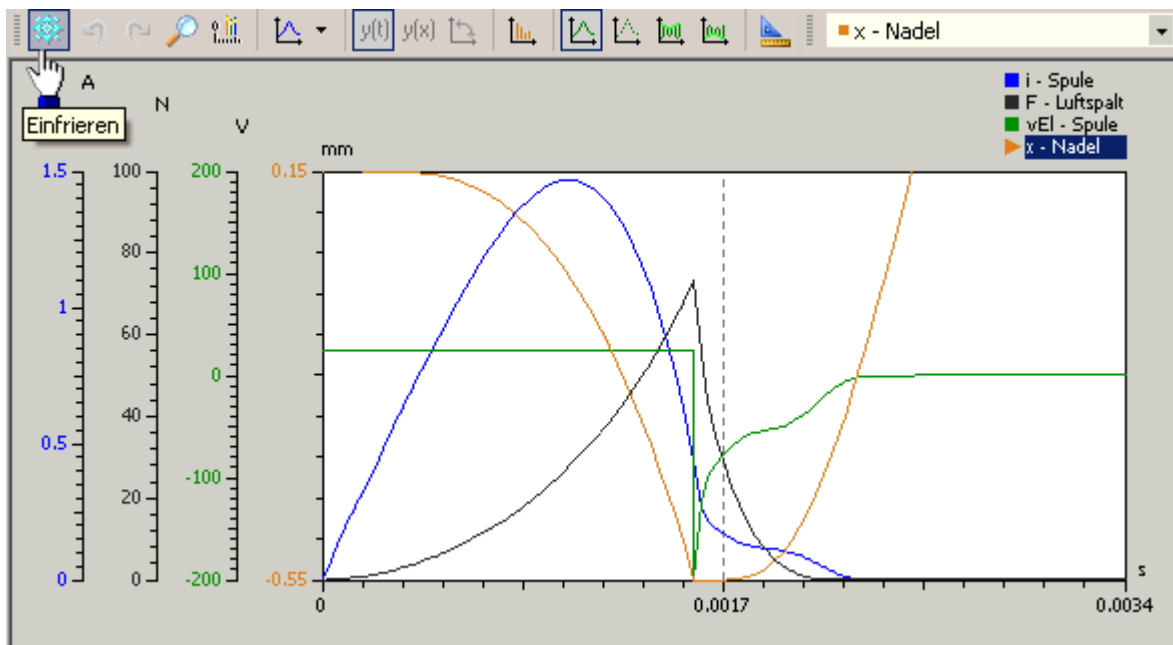


- Die Wirkung des Wirbelstrom-Elements ist umso größer, je kleiner der elektrische Widerstand *Reddy* der Wirbelstrombahn ist.

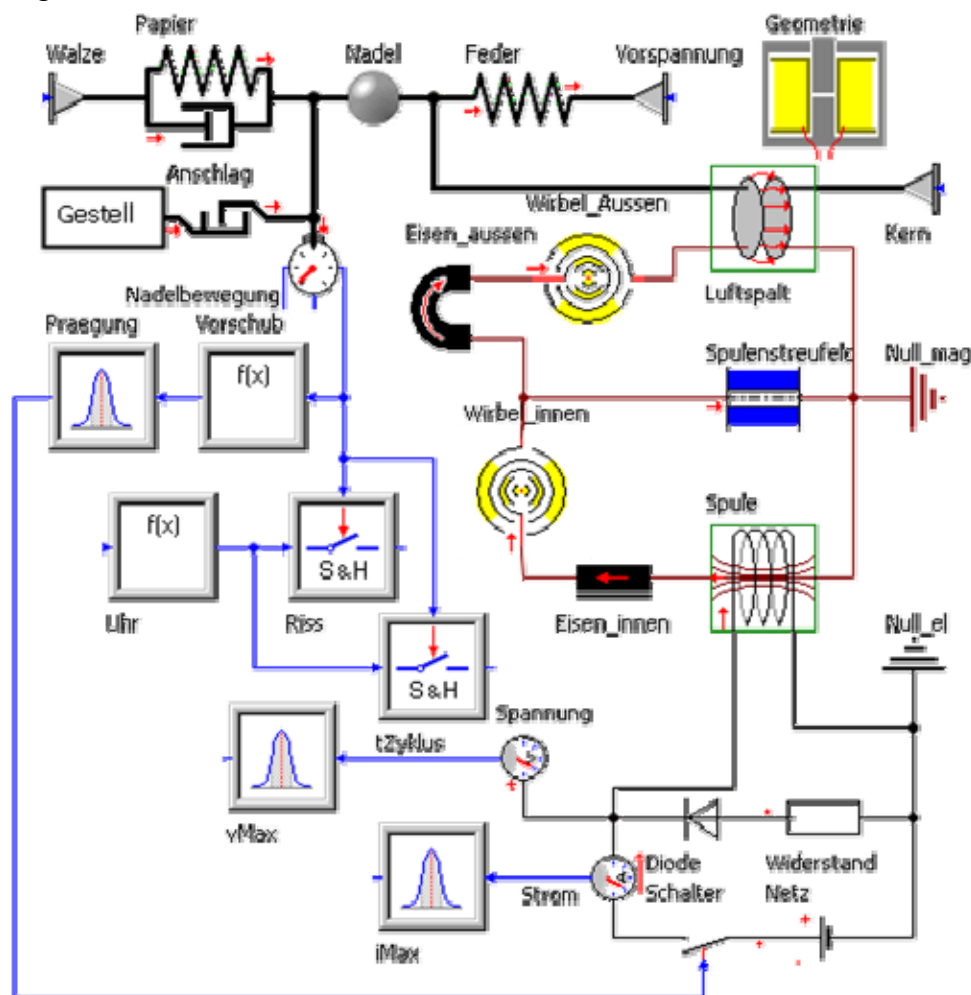
## Modell-Struktur

### Achtung:

Bevor wir die Modell-Struktur um die Wirbelstrom-Elemente erweitern, frieren wir die simulierten Kurvenverläufe der bisherigen Optimal-Lösung im Signalfenster ein. Damit können wir sehr einfach überprüfen, ob die Wirbelstrom-Elemente nach dem Einbau richtig funktionieren:



Wir benutzen in der *Student Edition* das verfügbare Wirbelstrom-Element aus der Bibliothek für den äußeren Eisenabschnitt, da es effektiver rechnet als unsere eigene Definition. Nur für das noch fehlende innere Element nehmen wir unser eigenes:

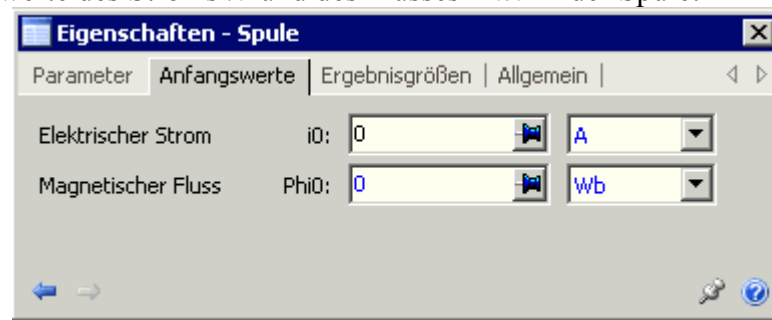


### Modell-Konfiguration:

- Der Wirbelstromwiderstand **Reddy** jedes Eisenabschnitts erhält seinen zugehörigen Wert aus dem Geometrie-Element.
- Der Anfangswert des magnetischen Flusses **Phi0** ist in den Wirbelstrom-Elementen Null.
- Wir setzen zur Validierung des Modells vorläufig den Gesamt-Wirbelstromwiderstand **Geometrie.Re\_Eisen** auf einen großen Wert, z.B. 1 MΩ. Damit fließt praktisch kein Wirbelstrom und der Antrieb müsste sich so verhalten, wie wir es in den eingefrorenen Signalverläufen archiviert haben.
- Leider ist der Solver nicht in der Lage, ohne weitere Maßnahmen diese neue Modellstruktur zu

berechnen:

1. In der Simulationssteuerung setzen wir die min. Rechenschrittweite auf **dtMin=1e-14 s**. Damit können auch sehr schnelle Änderungen von Zustandsgrößen (Fluss und Strom) noch hinreichend genau berechnet werden.
2. Freigabe der Anfangswerte des Stroms  $i_0$  und des Flusses  $\Phi_0$  in der Spule:



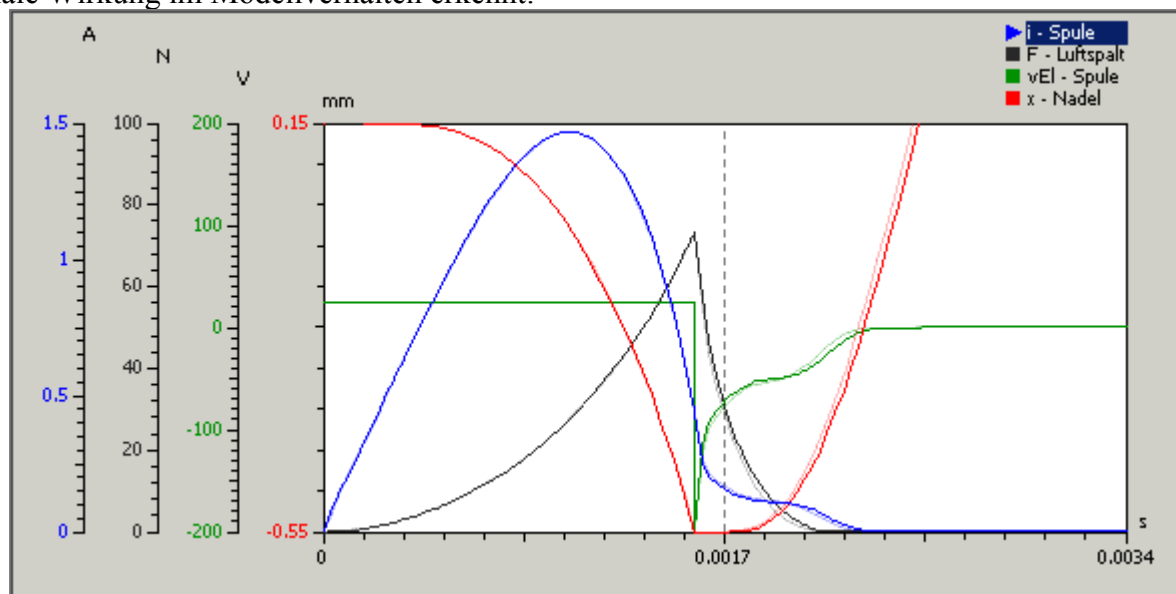
Damit kann der Solver für den Zeitpunkt  $t_{Start}$  die korrekten Anfangswerte berechnen, denn der Strom in der Spule beginnt infolge des Wirbelstromes nicht mehr bei Null!

- Die Signalverläufe müssen mit diesen Einstellungen exakt deckungsgleich zur Simulation ohne Wirbelstrom-Elemente sein.

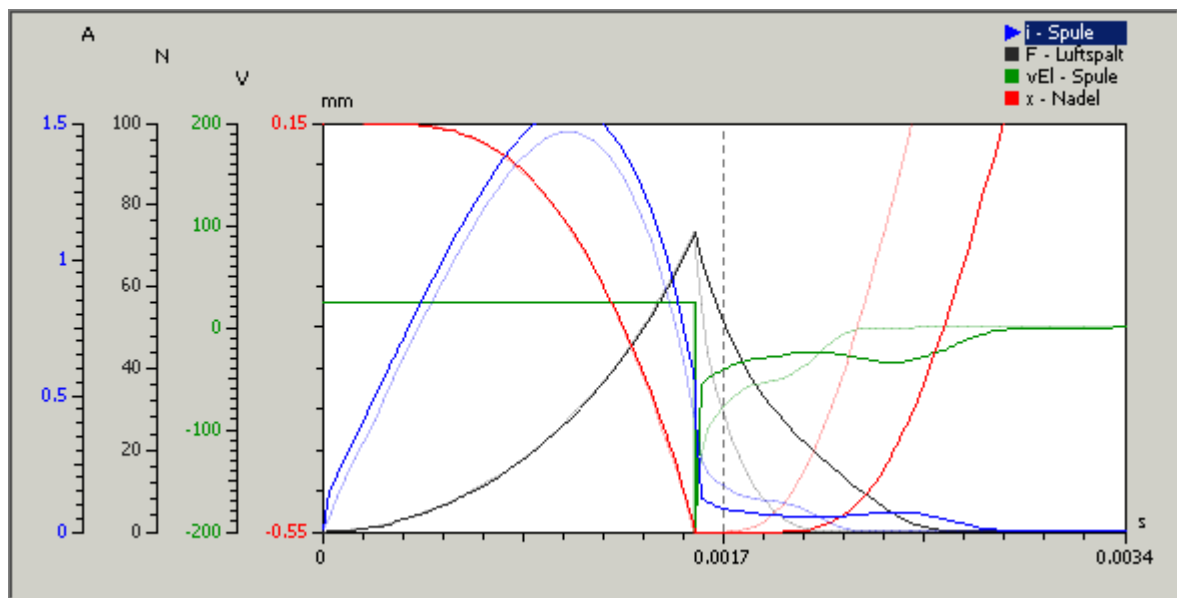
## Wirkung des Wirbelstroms

Nachdem unser Modell mit "unwirksamen" Wirbelstrom-Elementen funktioniert, wollen wir untersuchen, in welcher Größenordnung der Wirbelstromwiderstand praktisch liegen wird:

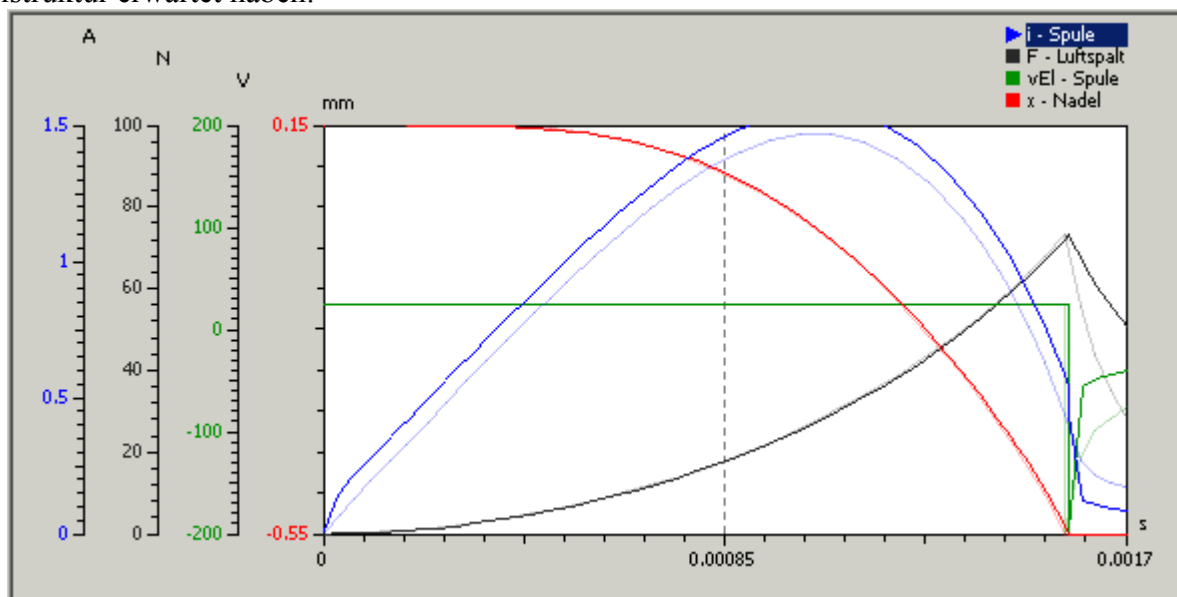
- Wir verringern den Wirbelstromwiderstand soweit, bis man "mit gesundem Menschenverstand" eine minimale Wirkung im Modellverhalten erkennt:



- Die Wirkung des implementierten Wirbelstromeffekts äußert sich hierbei in einer leichten Verzögerung des Abfallvorgangs. Der Stromsprung beim Einschalten liegt unter 1 mA und ist praktisch nicht erkennbar.
- **Hinweis:** Wir merken uns die Größenordnung des Wirbelstromwiderstands, der zu einem merklichen Effekt führt.
- Als nächstes wollen wir den unteren Grenzwert für den Wirbelstromwiderstand abschätzen. Dazu verringern wir ihn soweit, bis der Stromsprung nach dem Einschalten ungefähr 10% vom maximal zulässigen Spulenstrom beträgt. Das sind 0.15 A bei einem zulässigen Strom von 1.5 A:



- Trotz der Änderung des Stromverlaufs beim Einschalten, ist die Auswirkung auf den Anzugsvorgang kaum erkennbar. Die Ursache liegt in der vereinfachten Modellierung des Wirbelstroms. Die Feldverdrängung innerhalb des Eisenquerschnitts wird damit nicht nachgebildet. Somit wirkt im Modell jetzt ein größerer effektiver Eisenquerschnitt als in der Realität.
- Nicht zu übersehen ist hingegen die Auswirkung auf den Abschaltvorgang. Der Kraftabbau verläuft verzögert und es dauert relativ lange, bevor die Rückholfeder den Anker zurückbewegen kann. Die optimale Dimensionierung des Antriebs wird unter Berücksichtigung dieses Wirbelstromeffekts zu veränderten Parametern führen.
- Im Zoom erkennt man deutlich, dass der Stromsprung "abgerundet" ist, wie wir es auf Grund der Modellstruktur erwartet haben:



Ausgehend von den optimalen Parametern der *Etappe2a* werden wir im nächsten Schritt unter Berücksichtigung des Wirbelstroms eine erneute Nennwert-Optimierung vornehmen.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Wirbelstrom-Modell](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Wirbelstrom-Modell)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Wirbelstrom-Nennwertoptimierung

Aus OptiYummy

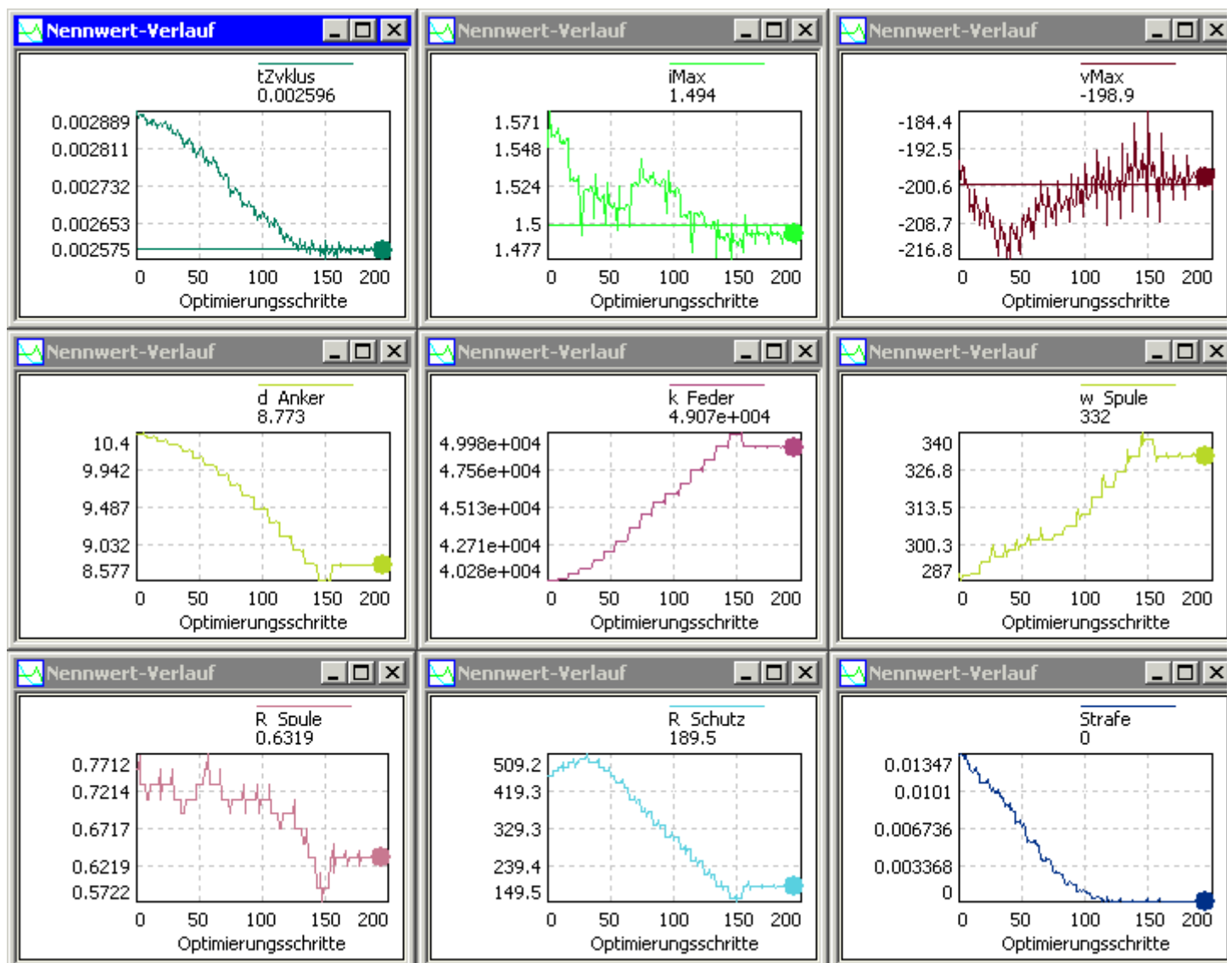
↑

← →

## Nennwert-Optimierung mit Wirbelstrom

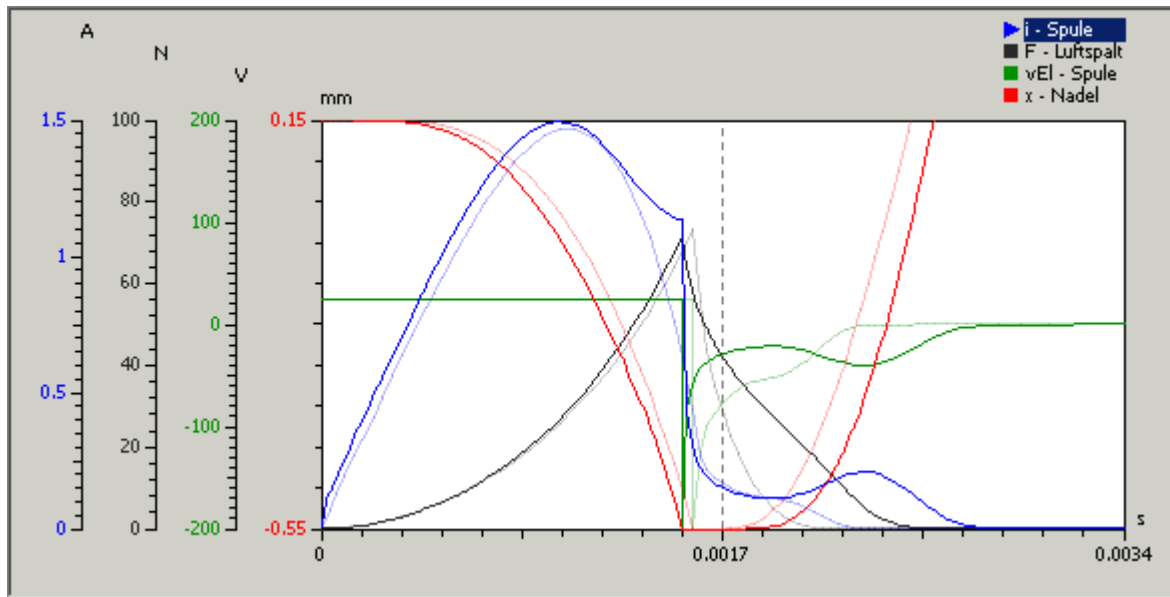
Mit Hilfe der numerischen Optimierung soll nun versucht werden, insbesondere die aus dem Wirbelstrom resultierende Abfallverzögerung durch eine veränderte Dimensionierung des Antriebs zu kompensieren:

- Wir benutzen dazu einen neuen OptiY-Versuchsstand *Etappe2b\_xx.opy*.
- Dieser ist praktisch identisch zum Versuchsstand *Etappe2a\_xx*. Die Unterschiede sind
  1. Benutzung des Modells *Etappe2b\_xx.ism* (mit Wirbelstrom)
  2. Windungszahl und Spulenwiderstand sind jetzt dem Geometrie-Element zugeordnet.
- Ausgehend von der vorherigen Optimal-Lösung als Startpunkt, wird man sich schnell dem neuen globalen Optimum nähern:



- In Hinblick auf die Grenzen der Entwurfsparameter gelten die gleichen Prinzipien, wie bei der vorherigen Nennwert-Optimierung.

- Die optimale Lösung unter Berücksichtigung des Wirbelstroms muss etwas langsamer sein, als das Optimum ohne Berücksichtigung dieses Effekts:



**Achtung:** Die Signalverläufe dieser neuen optimalen Lösung frieren wir ebenfalls ein, um nach Berücksichtigung des Hysterese-Effekts der BH-Magnetisierungskurve die Wirkung der einzelnen Effekte besser vergleichen zu können.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Wirbelstrom-Nennwertoptimierung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Wirbelstrom-Nennwertoptimierung)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Wirbelstrom-Experimentalauswertung

Aus OptiYummy

↑

← →

## Experiment-Auswertung (Ergebnisse)

Die Ergebnisse der präzisierten optimalen Lösung waren unter Berücksichtigung der individuellen **Teilnehmernummer**  $xx=[01..99]$  mittels des Eisenteilungsfaktors  $\mathbf{K\_FeInnen=0.1xx}$  zu ermitteln!

### Forderungen:

- Betriebsspannung **24 V**
- Max. zulässiger Spulenstrom **1,5 A**
- Max. zulässige Induktionsspannung an der Spule **200 V**

### Beachtung der Annahmen:

- Anfangsposition **Nadel.x0=0.15 mm**
- Wirbelstromwiderstand soll zu einem (verrundeten) Stromsprung von ca. 0.15 A beim Einschalten führen.

### Gesucht sind die Werte für:

- Wirbelstromwiderstand **Geometrie.Re\_Eisen** für gerade erkennbaren Wirbelstrom-Effekt
- Wirbelstromwiderstand **Geometrie.Re\_Eisen** für Stromsprung von ca. 0.15 A

### Gesucht sind die optimalen Werte für:

- Windungszahl **w**,
- Spulenwiderstand **R\_Spule**,
- Schutzbeschaltung-Widerstand **R\_Schutz**,
- Ankerdurchmesser **d\_Anker**,
- Rückholfeder-Federsteifigkeit **k\_Feder**
- Erreichte Zykluszeit **tZyklus**

Diese Werte sind in einer Tabelle vergleichend mit den Werten der vorherigen Optimal-Lösung aufzulisten.

### Wichtig:

Mit den optimalen Lösungen muss in dieser Übung im Sinne der "Benotung" **Strafe=0** erreicht werden! In der Praxis würde man sich mit geringfügigen Restriktionsverletzungen von wenigen Prozent zufrieden geben, da die Modelle sowieso nicht so genau sind.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Wirbelstrom-Experimentalauswertung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Wirbelstrom-Experimentalauswertung)“

---

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Hysterese-Modell

Aus OptiYummy

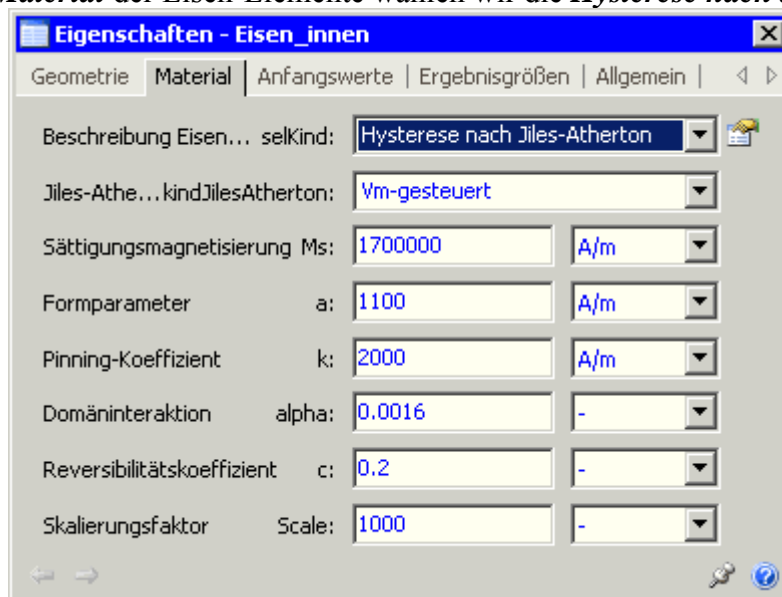
↑

← →

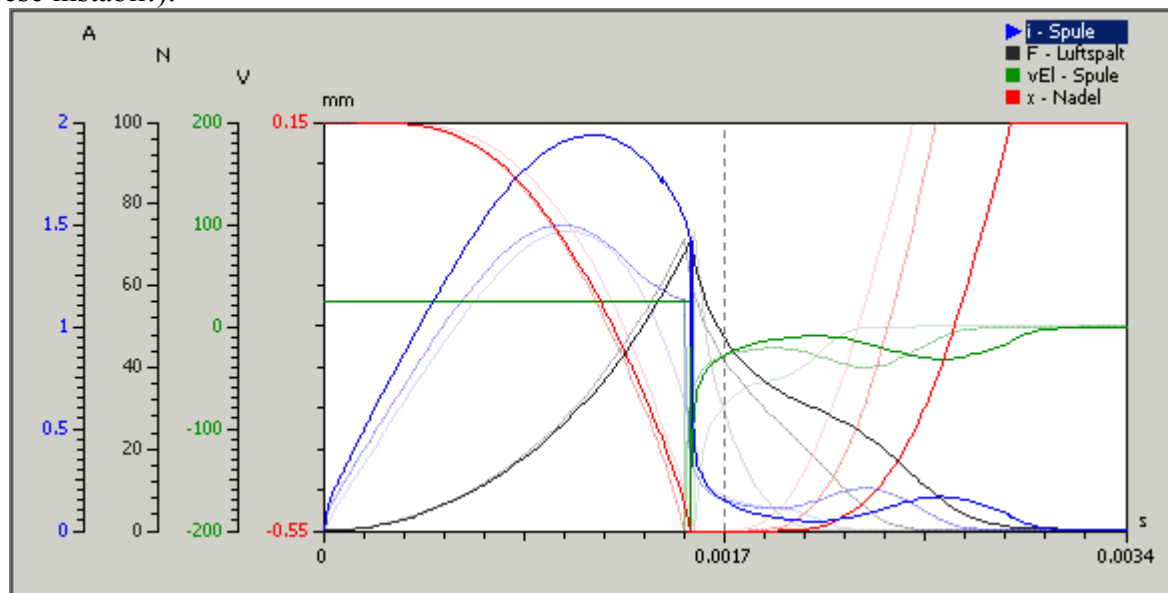
## Hysterese-Modell (nach Jiles-Atherton)

Die Aktivierung des Hysterese-Effektes im Modell erfordert nur wenige Mausklicks:

- In der **Registerkarte Material** der Eisen-Elemente wählen wir die **Hysterese nach Jiles-Atherton**:



- Mit den Standard-Vorgaben führen wir einen Simulationslauf durch. Dazu müssen wir jedoch zuvor in der **Simulationssteuerung** für den **Solver** das **MEBDF-Verfahren** wählen (BDF-Verfahren bei Hysterese instabil!):



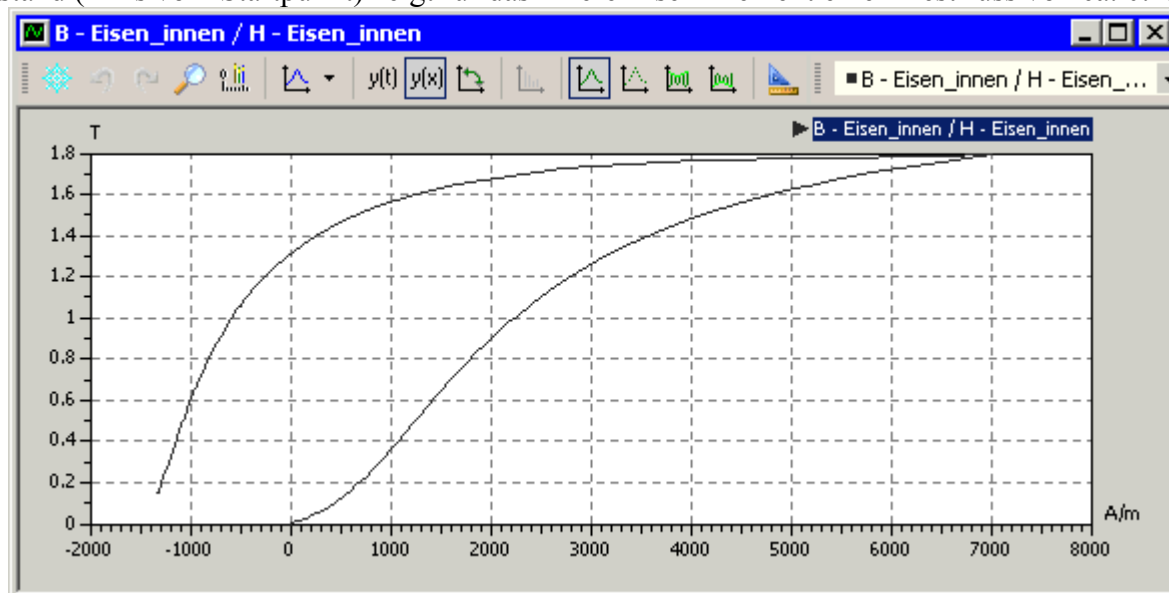
### Hinweise:

- Falls es nun mit der "Realen Diode" beim Abschalten Probleme gibt, kann man versuchen, den Wert des Parallel-Widerstands auf **Diode.R=10 kΩ** zu reduzieren, um den Abschaltvorgang numerisch zu "entschärfen". Gibt es trotzdem Probleme beim Abschaltvorgang, so sollte man die Diode als "Widerstandsdiode" oder als "Ideale Diode" konfigurieren bzw. durch eine Leiterverbindung ersetzen.
- Ein weiteres numerisches Problem ist der schleichende Abkling-Prozess im Magnetkreis nach Vollendung des Prägezyklusses. Dort kann es zu "unendlichem" Rechnen mit kleinsten Schrittweiten

kommen. Deshalb ist es günstig, den Simulationslauf kurz nach dem Prägezyklus abzubrechen (Modelleigenschaft über Kontext-Menü der rechten Maustaste auf Modellhintergrund):

```
termCond = (Praegung.y>=1)and(tZyklus.y>1e-3)and((t-tZyklus.y)>1e-4)
```

- Infolge der BH-Hysterese verbleibt nach dem Abschalten eine Restflussdichte im Eisen. Damit wird der Abfallvorgang zusätzlich zu den Wirbelstrom-Effekten weiter verzögert.
- Durchfahren wird ohne weitere Vorgaben die Neukurve beginnend im entmagnetisierten Zustand. Der Endzustand (links vom Startpunkt) zeigt für das innere Eisen-Element einen Restfluss von ca. 0.15 T:

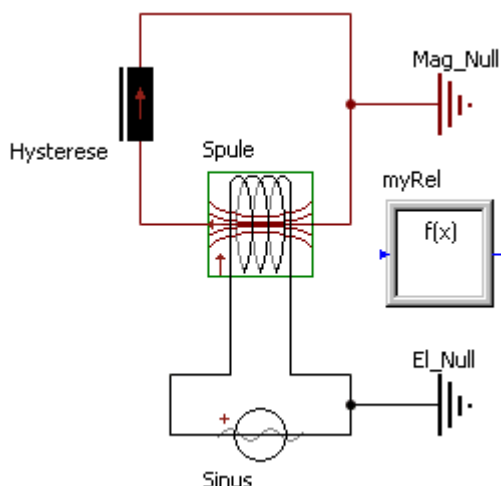


Schwieriger als die Implementierung des Hysterese-Effektes ist das Finden hinreichend genauer Parameter für die Hysterese. Wir werden im Rahmen der Übung pragmatisch herangehen und eine Vorgehensweise zur manuellen Einstellung der Hysterese-Parameter wählen:

1. die Neukurve der BH-Hysterese muss mit der BH-Kurve der vorgegebenen  $\mu_{rel}(B)$ -Kennlinie einigermaßen übereinstimmen,
2. die Koerzitivfeldstärke und Remanenzflussdichte sollen ungefähr diesem Eisentyp entsprechen.

Wir benutzen dafür das einfache SimulationX-Modell **Hysterese\_Parameter.ism**, welches sich in der herunterladbaren ZIP-Datei befindet:

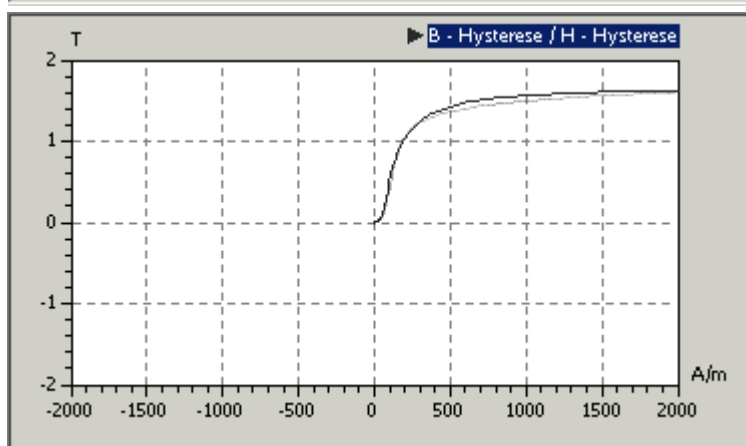
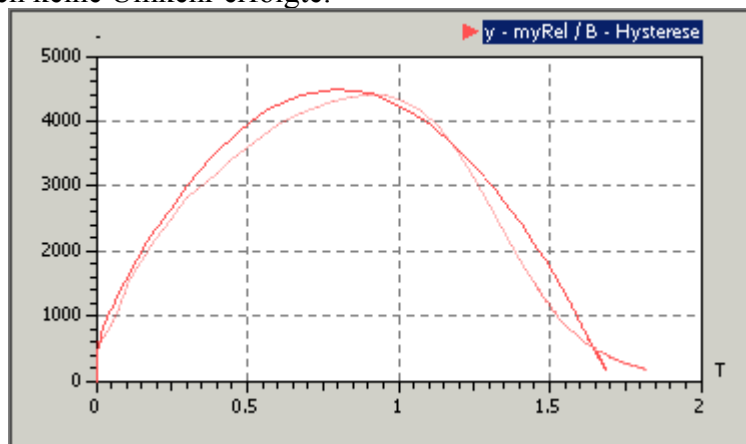
- Ein geschlossener Eisenkreis mit Spule wird von einer Sinus-Spannung ( $f=2$  Hz) gespeist.
- Die relative Permeabilität **myRel** wird aus **H** und **B** des Eisen-Elements berechnet, da bei Verwendung der Hysterese das **myRel** im Eisen-Element nicht als Ergebnis-Größe zur Verfügung steht:



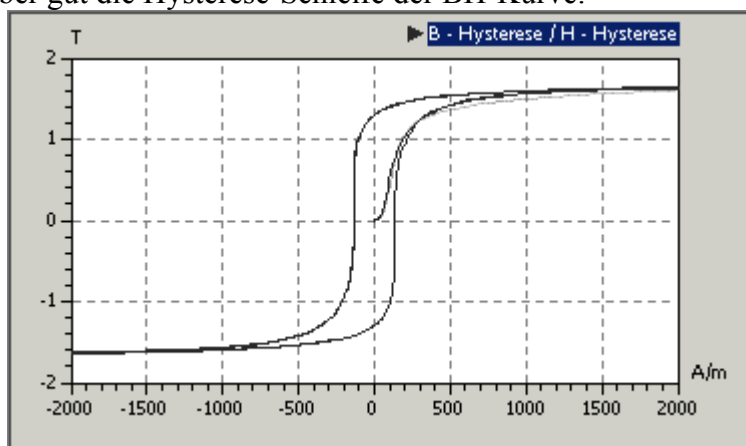
- In den Signal-Fenstern sind die BH-Neukurve und die  $\mu_{rel}(B)$ -Kurve (Eisen ohne Hysterese) als

eingefrorene Verläufe hinterlegt.

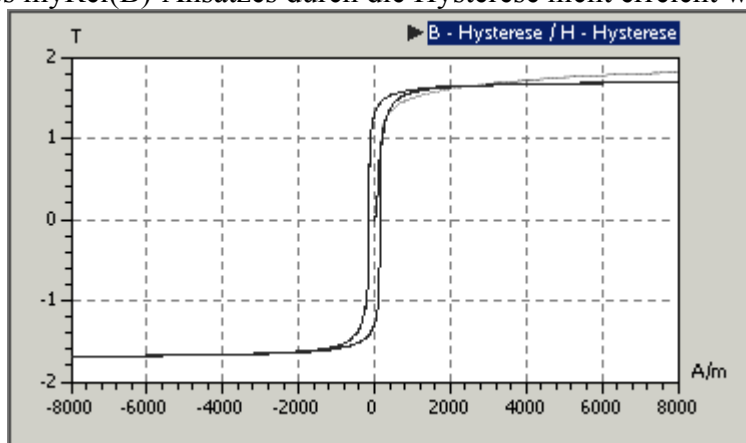
- Für das hysteresebehaftete Eisen wurden darüber die zugehörigen Verläufe gelegt, welche beim Magnetisieren entlang der Neukurve entstehen. Der Zeitbereich wurde dafür so kurz gewählt, dass auf der Hysteresekurve noch keine Umkehr erfolgte:



- Vergrößert man den Zeitbereich auf 1 s, so wird die Hysterese-Schleife komplett durchfahren. Die Darstellung der  $\text{myRel(B)}$ -Kurve wird dadurch unübersichtlich und ist physikalisch nicht ganz sinnvoll. Dafür sieht man jetzt aber gut die Hysterese-Schleife der BH-Kurve:



- Vergrößert man den Darstellbereich der H-Achse, so erkennt man, dass für größere Aussteuerungen die Sättigungsinduktion des  $\text{myRel(B)}$ -Ansatzes durch die Hysterese nicht erreicht wird:



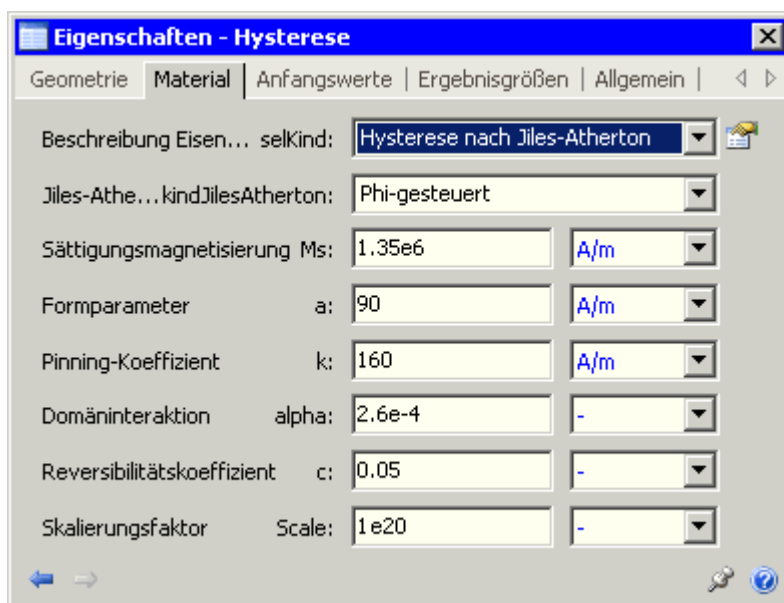
- Das bedeutet, dass unser Modell bei diesen Hysterese-Parametern eher die Eisen-Sättigung erreicht, als mit dem  $myRel(B)$ -Ansatz.

**Achtung:** Im Rahmen der Lehrveranstaltung benutzen wir aus Zeitgründen die bereits eingestellten, manuell optimierten Hysterese-Parameter für unser Antriebsmodell:

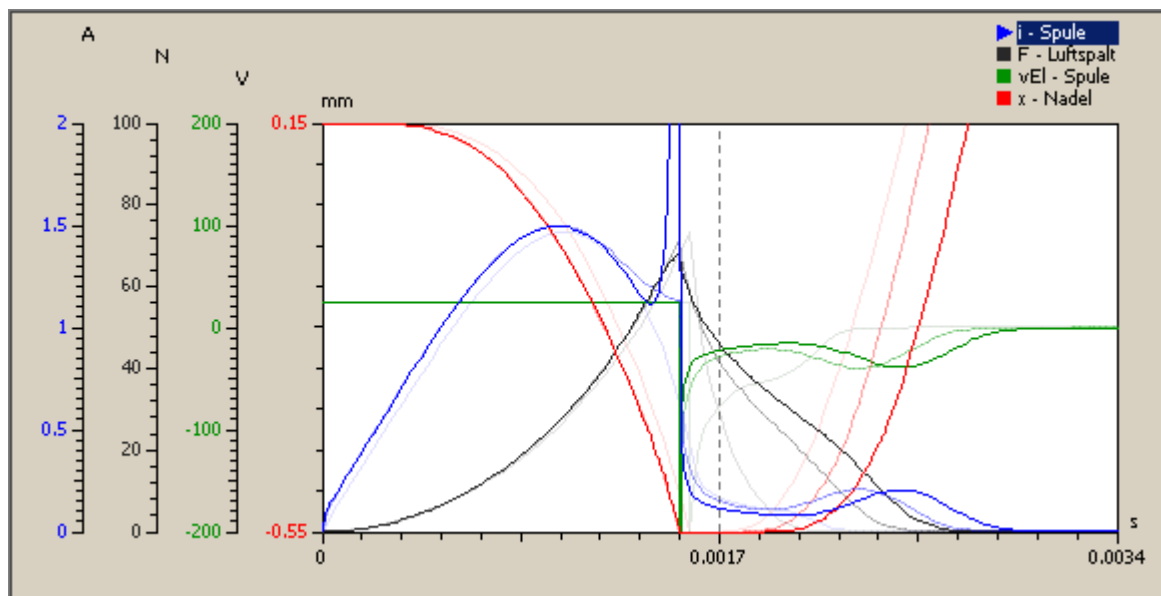
- Insbesondere der abfallende Verlauf der  $myRel(B)$ -Kennlinie konnte für die Neukurve der Hysterese nicht besser nachgebildet werden. Die Krümmung zum sanften Übergang in die Sättigung ist mit dem Hysterese-Ansatz nicht realisierbar.
- Die geringere Sättigungsinduktion wurde als Kompromiss gewählt, um die Neukurve besser nachbilden zu können. Hier müssten praktische Untersuchungen stattfinden, welcher Effekt für das Antriebsverhalten von größerer Bedeutung ist.
- Die Breite der Hystereskurve wurde so gewählt, dass eine Koerzitiv-Feldstärke von etwas über 100 A/m entsteht.
- Zur Neigung der Hysterese-Kurve müssten eigentlich noch exakte Vergleiche zu realen Eisenwerkstoffen durchgeführt werden. Die Neigung der Kurve hängt auch zusammen mit der Remanenzflussdichte. Wir benutzen in der Übung die eingestellten Werte.

Folgende Parameter sind im Antriebsmodell zu benutzen (mit Beschreibung des Einflusses der einzelnen Parameter):

- kindJilesAtherton = Phi-gesteuert** (numerisch stabiler als Vm-gesteuert)
- Ms = 1.35e6 A/m** (Sättigungsmagnetisierung)
- a = 90 A/m** (bestimmt  $myRel(B)$ -Maximum)
- k = 160 A/m** (Hysterese-Breite: bestimmt Koerzitiv-Feldstärke)
- alpha = 2.6e-4** (Neigung der Hysterese: bestimmt Remanenz-Flussdichte)
- c = 0.05** (Für Neukurve Anfangswert  $myRel(B_0)$  und Maximum von  $myRel$ )
- Scale = 1e20** (Günstig für numerische Stabilität, kein Einfluss auf Kurven)



Das Einsetzen dieser Hysterese-Parameter in beide Eisen-Elemente unseres Antriebsmodells führt zum folgenden Verhalten:



### Einschaltvorgang:

- Am Ende des Einschaltens kommt es zu einem steilen Strom-Anstieg, weil das Eisen in die Sättigung gelangt. Das ist kein Hysterese-Effekt, sondern die Wirkung der geringeren Sättigungsinduktion, zu der unsere Parameter im Modell führen!
- Für das zuvor entmagnetisierte Eisen (Neukurve) kann man die Wirkung der Hysterese auf den Zeitbedarf für den Einschaltvorgang vernachlässigen. Praktisch sollte ja die zuvor genutzte  $\mu(B)$ -Kurve durchfahren werden, so dass für diesen Teilprozess die Hysterese noch garnicht existiert!
- Schaltet man unseren bereits benutzten Magneten ein, so ist dieser vormagnetisiert. Die Magnetisierung unterstützt den Anzugsvorgang etwas, so dass er um einige Prozent schneller erfolgen wird. .

### Ausschaltvorgang:

- Der Abfallvorgang verläuft verzögert. Jedoch ist die Verzögerung geringer, als zuvor mit den Standard-Vorgaben der Hysterese, denn nun besitzt die Hysterese eine geringere Breite.
- Da unser Magnet beim Einschalten das Eisen fast bis zur Sättigung aussteuert, wird sich der Ausschaltvorgang des bereits benutzten Magneten kaum von dem zuvor entmagnetisierten Magneten unterscheiden.

Wir besitzen nun ein Antriebsmodell, welches einen kompletten Prägezyklus ausführt. Die Effekte von Wirbelstrom und Hysterese des Eisenkreises werden dabei berücksichtigt.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Hysterese-Modell](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Hysterese-Modell)“

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Hysterese-Nennwertoptimierung

Aus OptiYummy

↑

← →

## Nennwert-Optimierung mit Wirbelstrom und Hysterese

Wir benutzen den *OptiY*-Versuchsstand **Etappe2b-xx.opy**, um mit dem bereits definierten Experiment-Workflow eine optimale Parameter-Konfiguration unter Berücksichtigung von Wirbelstrom und Magnet-Hysterese zu finden:

- Von dem unter Berücksichtigung des Wirbelstroms ermittelten **Bestwert** werden wir die **Parameter übernehmen** als Startwert für die erneute Präzisierung der optimalen Lösung.
- Wir können die Optimierung mit dem Hooke-Jeeves-Verfahren starten, werden aber wahrscheinlich an unterschiedlichsten numerischen Problemen scheitern. Diese numerischen Probleme sollen deshalb im Folgenden näher betrachtet werden. Dazu schließen wir vorläufig *OptiY* und auch das Modell in *SimulationX*.

Danach öffnen wir nur das *SimulationX*-Modell, um dieses in Hinblick auf die Optimierung günstiger zu konfigurieren.

Auch wenn ein Modell im *SimulationX* bereits berechnet werden konnte, ist die Chance sehr groß, dass es infolge der unterschiedlichsten Parameter-Kombinationen während der Optimierung zu numerischen Problemen kommt. Es gibt hierbei mehrere Klassen von Fehlern, die vom *OptiY* unterschiedlich behandelt werden:

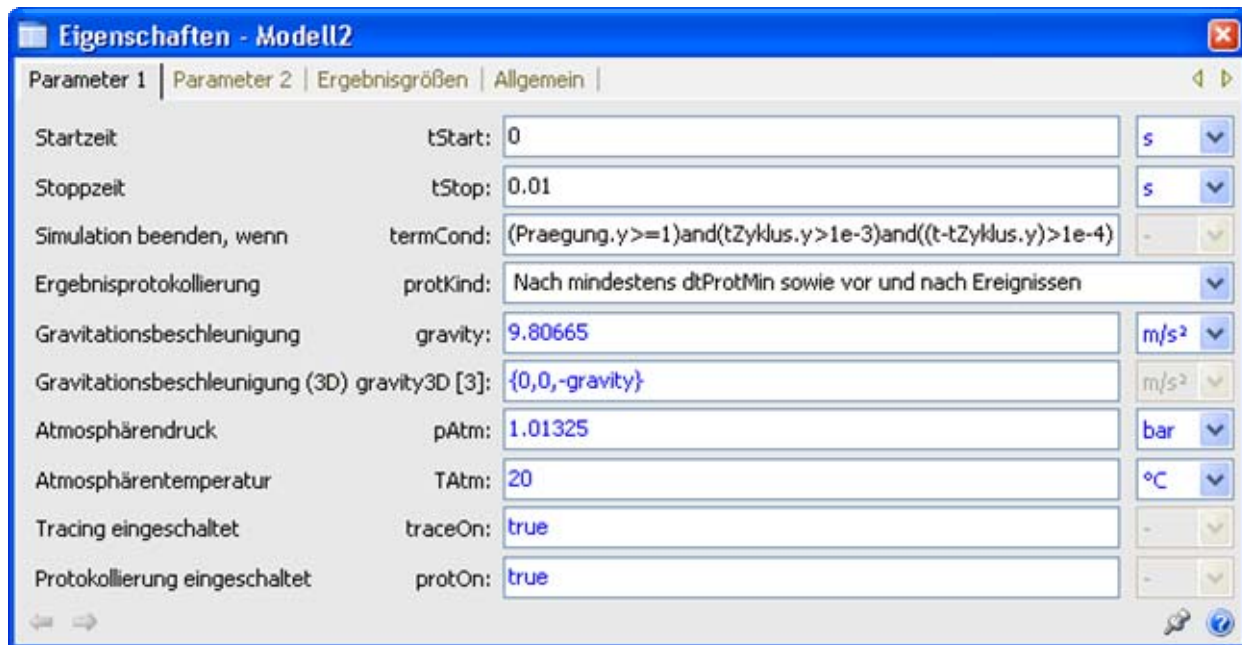
### 1. Simulationsabbruch mit Fehlermeldung:

- *OptiY* markiert den betroffenen Optimierungsschritt in der Nennwert-Tabelle als "Failed".
- Die Bewertungsgrößen besitzen den Wert zum Zeitpunkt des Simulationsabbruchs.
- Diese Werte fließen zwar nicht in die Optimierung ein, stören aber in den Verläufen der Nennwert-Diagramme als Extremwert-Spitzen.
- Im Beispiel sollte man **tZyklus.y0** ungefähr auf den Wert der maximal zulässigen Zykluszeit setzen (z.B. **3.4 ms**). Damit erhält man hier keinen "Ausreißer" bei einer abnormalen Beendigung von Simulationsläufen.
- In dieser Fehler-Klasse sind zwei Fehler-Arten besonders typisch:

#### 1. "Die geforderte Genauigkeit kann nicht erreicht werden"

Es erfolgt die Aufforderung *dtMin* zu verkleinern. Im Beispiel hat sich **dtMin=1e-14 s** als günstig erwiesen. Bei Bedarf kann man diesen Wert noch etwas verkleinern. Wird *dtMin* zu klein (z.B. 1e-20 s), dann führt das wieder zu anderen Fehlern (z.B. endloses Rechnen an kritischen Stellen).

Im Beispiel trat dieser "Genauigkeitsfehler" gehäuft nach Vollendung des Prägezyklus auf, wenn die Nadel in der Ruhelage an den starren Anschlag gedrückt wird. Man löst dieses Problem, indem man den Simulationslauf mit **termCond=(Praegung.y>=1)and(tZyklus.y>1e-3)and((t-tZyklus.y)>1e-4)** vorzeitig beendet (*Kontext-Menü von Modell*):



## 2. "Fehler in der Ereignisbehandlung"

Als sehr günstig hat sich in der Simulationssteuerung das Erhöhen der zulässigen **Absoluten Toleranz** auf **1e-4** erwiesen. Die zulässige **Relative Toleranz** kann man auf **1e-6** verringern.

Im Beispiel half auch das Verringern des Parallelwiderstands in der **Diode** auf **R=10000 Ohm**, wenn davon der Abschaltvorgang betroffen war.

Führen diese Maßnahmen für das Abschalt-Ereignis nicht zum Erfolg, so hilft mit Sicherheit das Entfernen der Diode aus dem Modell. Die Auswirkung dieser Diode auf das Modellverhalten ist gering, der Abschaltwiderstand wirkt weiterhin.

## 2. "Ewiges Rechnen" ohne Fehlermeldung:

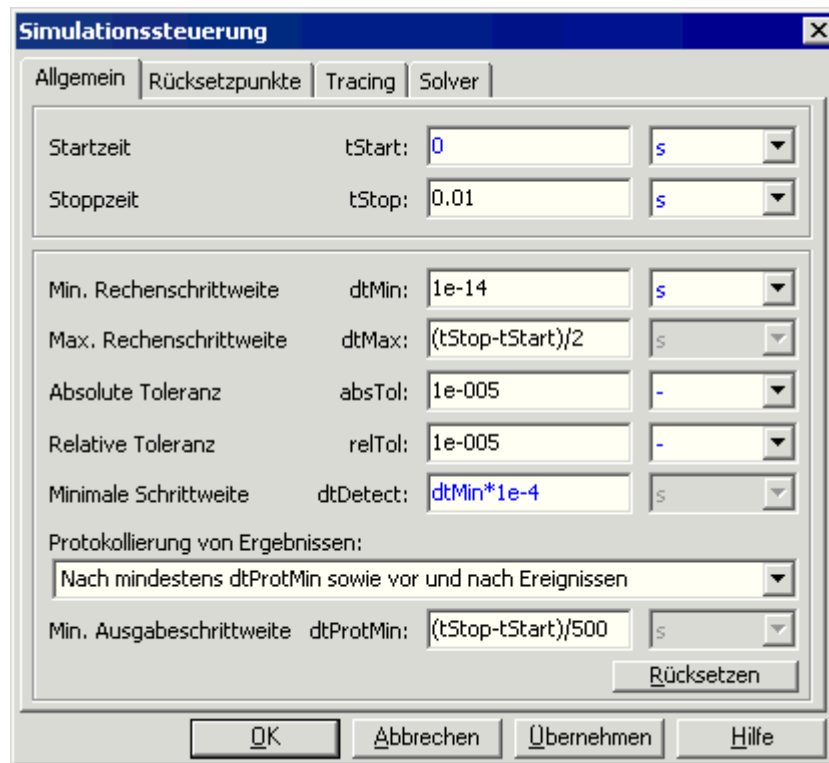
- *OptiY* wartet "ewig" auf das Ende des Simulationslaufs, weil der Solver mit extrem kleinen Schrittweiten versucht, eine kritische Stelle zu überwinden.
- Hier hilft nur der manuelle Eingriff:

1. Optimierungslauf im *OptiY* stoppen. Im *SimulationX* wird damit der aktuelle Lauf ebenfalls gestoppt, das Modell enthält die Parameter dieses kritischen Laufes.
2. Zurücksetzen des Simulationslaufes im *SimulationX* und erneuter Start der Simulation führt zu erneutem "ewigen" Rechnen. Hiervon wird meist der Ausschaltvorgang für den Magneten betroffen sein. Man sollte sich über die konkrete Stelle in jedem Fall informieren, damit man weiß, wo solche kritischen Stellen im Modell sind.
3. Damit man über das Abschalten mit den jeweiligen kritischen Parametern hinweg kommt, genügt das Ändern des Parallelwiderstands der Diode auf einen kleineren oder größeren Wert.
4. Wenn die Simulation im *SimulationX* für den Lauf funktioniert, kann man im *OptiY* die Optimierung fortsetzen.
5. Diesen manuellen Eingriff muss man für alle Optimierungsschritte durchführen, bei denen sich das Modell "verklemmt". Wahrscheinlich wird es dafür in nächster Zeit Abhilfe durch das *OptiY* bzw. das *SimulationX* geben.

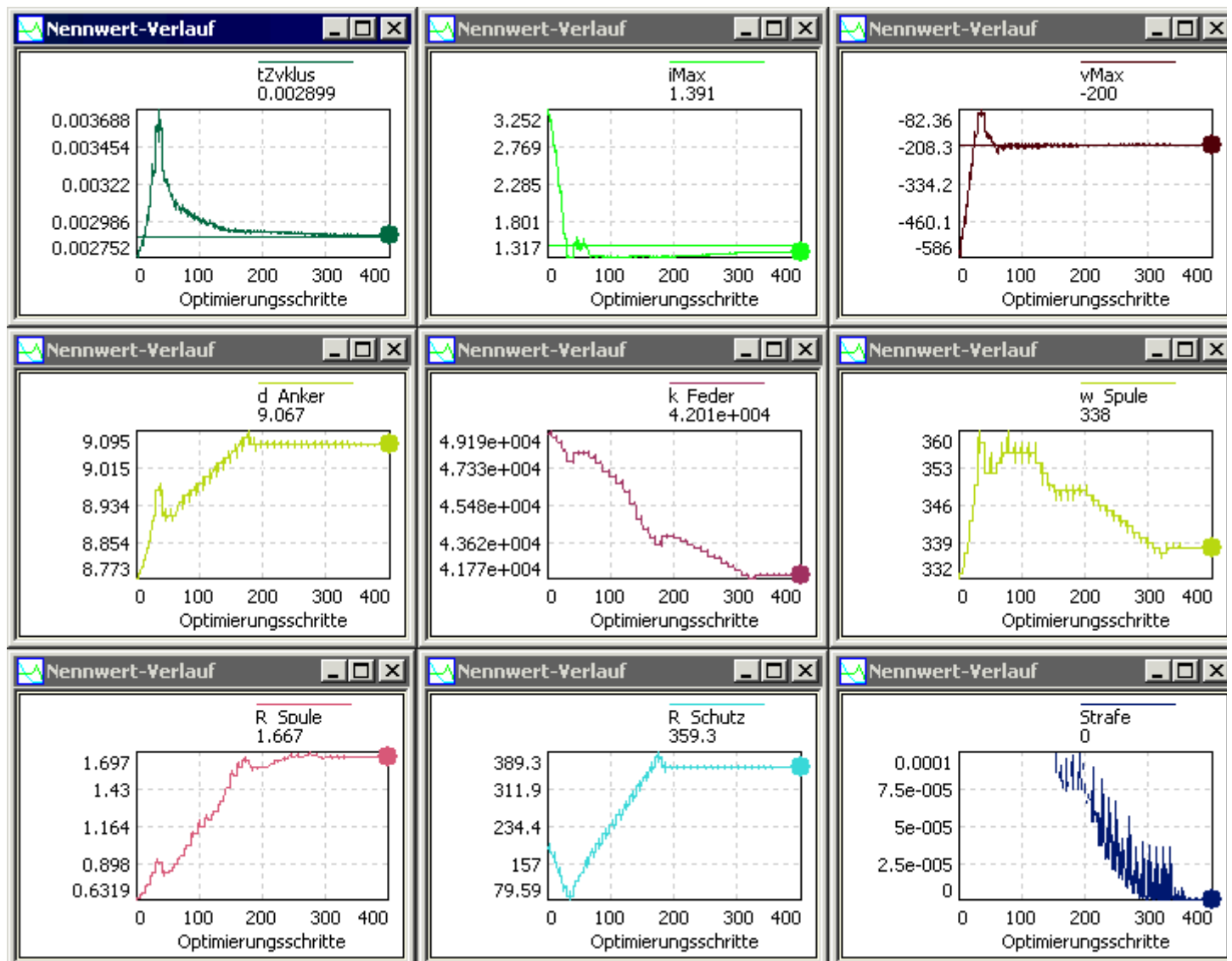
## 3. "Falsches Rechnen" ohne Fehlermeldung:

- Im Beispiel trat bei der Benutzung der Eisen-Hysterese sporadisch der Effekt auf, dass der Solver "Irrwege" beschreitet.
- Der Strom geht dabei sofort auf seinen ohmschen Grenzwert von ca. 20 A. Die wirksame Kraft ist jedoch zu gering, um den Anzugsvorgang auszuführen.
- Vom *OptiY* wird solch ein Simulationslauf als sinnvoll behandelt. Da hierbei zum Glück die Restriktion *Praegung* verletzt ist und der Fehler nur sporadisch auftritt, gibt es keine Auswirkung dieses Fehlers auf die erreichte optimale Lösung.

Im Beispiel erwiesen sich die folgenden Einstellungen für die transiente Simulation als robust. Im Einzelfall kann eine leichte Verringerung von *dtMin* zu besserem Verhalten führen:



Falls das Modell erst einmal stabil rechnet, ist die Nennwert-Optimierung kein großes Problem:



**Merke:**

Das globale Nennwert-Optimum eines technischen Systems schöpft im Normalfall alle Restriktionsgrenzen aus.



Im Beispiel wurde der Grenzwert des Stromes nicht ganz ausgeschöpft, so dass noch geringfügige Verbesserungen der Zykluszeit zu erwarten sind:

- Der Pfad zum "absoluten" Optimum führt entlang der Restriktionsgrenze für die Abschaltspannung.
- Dieser Pfad ist extrem schmal und fast ohne Gefälle. Eine Erhöhung des Stromwertes führt in einem höheren Maße zur Überschreitung der Abschaltspannung, als zu einer Verkürzung der Zykluszeit.
- Die noch mögliche Verbesserung der Zykluszeit ist anscheinend nur akademischer Natur.
- Eine Abschätzung, in welchem Maße noch Verbesserungen der optimalen Lösung zu erwarten sind, gelingt nur nach intensiven Analysen.

**Achtung:**

Die geschilderten Probleme sind normal bei der numerischen Optimierung komplexer und stark nichtlinearer Systeme. Die wachsende "Intelligenz" der Software hält einen immer größeren Teil dieser Probleme vom Anwender fern. Trotzdem ist für absehbare Zeit der Eingriff des Menschen in solche Optimierungsprozesse noch erforderlich.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Hysterese-Nennwertoptimierung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Hysterese-Nennwertoptimierung)“

---

# Software: SimX - Nadelantrieb - Aktordynamik - Hysterese-Experimentalauswertung

## Aus OptiYummy

↑

← →

### Experiment-Auswertung (Ergebnisse)

Mit dem erreichten Bestwert sollte man eine Simulation durchführen:

- Es muss kritisch überprüft werden, inwiefern das erreichte Optimum wirklich der Zielstellung entspricht.
- Wenn man keine Fehler im Modell oder in der Versuchsstand-Konfiguration hat, müsste ein korrektes Modellverhalten entstehen!

Die Ergebnisse der optimalen Lösung sind unter Berücksichtigung der individuellen **Teilnehmernummer xx**= [01..99] mittels des Eisenteilungsfaktors **K\_FeInnen=0.1xx** für **Strafe=0** zu ermitteln!

### Forderungen:

- Betriebsspannung **24 V**
- Max. zulässiger Spulenstrom **1,5 A**
- Max. zulässige Induktionsspannung an der Spule **200 V**

### Beachtung der Annahmen:

- Anfangsposition **Nadel.x0=0.15 mm**
- Wirbelstromwiderstand soll zu einem (verrundeten) Stromsprung von ca. 0.15 A beim Einschalten führen.
- Es sind die im Modell *Hysterese-Parameter* vorgegebenen Parameter für die Eisen-Hysterese nach Jiles-Atherton zu benutzen.

### Gesucht sind die optimalen Werte für:

- Windungszahl **w**,
- Spulenwiderstand **R\_Spule**,
- Schutzbeschaltung-Widerstand **R\_Schutz**,
- Ankerdurchmesser **d\_Anker**,
- Rückholfeder-Federsteifigkeit **k\_Feder**
- Erreichte Zykluszeit **tZyklus**

### Hinweise für die Ergebnis-Aufbereitung:

1. Die Bestwerte sind als Text der E-Mail zu notieren
2. Das Simulationsmodell (.ism-Datei) ist mit den gefundenen Optimalwerten zu konfigurieren. Die Zeitverläufe wesentlicher Modellgrößen sind im Modell in anschaulicher Form in Signalfenstern darzustellen.
3. Der OptiY-Versuchsstand (.opy-Datei) muss aussagekräftige Nennwert-Verläufe zum Optimierungsverlauf enthalten. Diese müssen ohne erneute Experiment-Durchführung betrachtbar sein.
4. Es ist zu überprüfen, dass die als Anhang der E-Mail einzusendenden Dateien **Etappe2b\_xx.ism** und **Etappe2b\_xx.opy** portabel sind (lauffähig auf einem anderen PC in einem beliebigem Ordner).
5. **Achtung:** Es ist sinnvoll, beide Dateien in ein Archiv (z.B. .zip) zu packen, da es manchmal Probleme beim Öffnen von versendeten Text-Dateien gibt ("unsichtbare" Steuerzeichen?).

*Damit haben wir den zweiten Abschnitt (B) der Etappe2 beendet*

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php/Software:\\_SimX\\_-\\_Nadelantrieb\\_-\\_Aktordynamik\\_-\\_Hysterese-Experimentalauswertung](http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Aktordynamik_-_Hysterese-Experimentalauswertung)“