

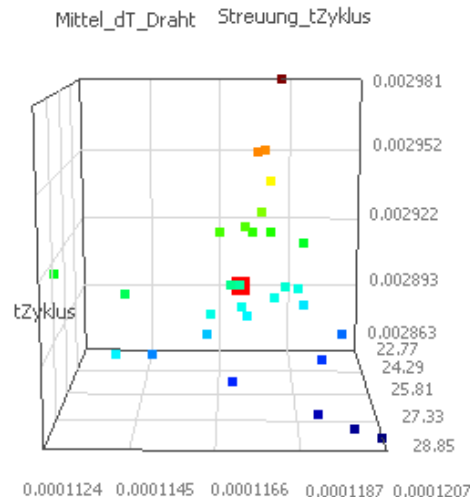
Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung

Aus OptiYummy

↑

← →

6. Etappe im Übungskomplex "Nadelantrieb" Ausschuss-Minimierung & Mehrkriterielle Robust-Optimierung Autor: Dr.-Ing. Alfred Kamusella



*Je planmäßiger der Mensch vorgeht,
um so wirkungsvoller trifft ihn der Zufall.
- Friedrich Dürrenmatt -*

Die Ergebnisse der bisherigen Nennwert-Optimierung führen zu einer Versagenswahrscheinlichkeit unseres Antriebs von meist über 50%. Erst eine zuverlässigkeitsbasierte Optimierung unter Einbeziehung der wirksamen Streuungen ergibt wirklich optimale Entwurfsparameter, mit denen die Funktionssicherheit gewährleistet ist.

A. Ausschuss-Minimierung

1. Experiment-Konfiguration
2. Experiment-Ergebnisse

B. Mehrkriterielle Robust-Optimierung

1. Grundlagen
2. Experiment-Konfiguration
3. Experiment-Ergebnisse

Einzusendende Ergebnisse:

- . Teilnehmer der Lehrveranstaltung "Konstruktionstechnik" schicken ihre Ergebnisse per Mail an **a.kamusella@ifte.de**
- . Als Anhang dieser Mail sind die **.ism-** und **.opy-**Dateien möglichst in einem Archiv-File zu senden.
- . Einsendeschluss ist innerhalb von 2 Wochen nach dem Übungstermin.

← →

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

Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Ausschuss-Problem

Aus OptiYummy

↑

← →

Ausschuss-Minimierung (Experiment-Konfiguration)

- Innerhalb des vorhandenen Streubereiches der Parameter-Streuungen muss der Antrieb sicher funktionieren.
- In diesem Streubereich müssen alle in Form der Restriktionen beschriebenen Forderungen eingehalten werden.
- Wir streben eine Versagenswahrscheinlichkeit von Null an.



Hinweise:

- Um die Ergebnisse der vorherigen Etappe nicht zu zerstören, erzeugen wir das Modell **Etappe6_xx.ism** als Kopie von **Etappe5_xx.ism**.
- Teilnehmer der Lehrveranstaltung benutzen wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse weiterhin einheitlich einen Wirbelstromwiderstand **1.5 mOhm**.
- Als Temperatur der Spule benutzen wir im SimX-Modell die maximal zulässige Temperatur **T_{Spule}=90°C**.
- Wir bauen einen neuen Versuchsstand **Etappe6_xx_Ausschuss.opy** auf.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Statistische Versuchsplanung
- 2 Optimierungsverfahren
- 3 Entwurfparameter (Nennwerte)
- 4 Entwurfparameter (Streuungen)
- 5 Restriktionen
- 6 Gütekriterien

Statistische Versuchsplanung

Bei der zuverlässigkeitsbasierten Optimierung wird als Basis für die Bewertung nicht der einzelne Modell-Lauf, sondern die Berechnung einer kompletten Stichprobe benutzt:

- In der vorherigen Übungsetappe haben wir festgestellt, dass die Interaktionen zwischen den betrachteten Parameter-Streuungen praktisch vernachlässigbar sind.
- Wir werden deshalb für die probabilistische Simulation die Momenten Methode mit einem Polynomansatz 2. Ordnung ohne Berücksichtigung von Interaktionen verwenden.
- Das bedeutet eine wesentliche Reduzierung der benötigten Simulationszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der berücksichtigten Streuungen:

Anzahl der Streuungen	Polynom 2.Ordnung Läufe=2·n ² +1	ohne Interaktionen Läufe=2·n+1
n=2	9	5
n=3	19	7
n=4	33	9
n=5	51	11

- Man erkennt deutlich, dass die Kenntnis über existierende Interaktionen zwischen den streuenden Parametern von grundsätzlicher Bedeutung für die Einsparung von Berechnungszeit ist.
- Im Beispiel können wir die Anzahl der Streuungen auf 3 reduzieren, da die Streuungen der Betriebsspannung und der Spulentemperatur kaum Auswirkung auf das Verhalten hatte.

Optimierungsverfahren

Im Unterschied zu den Sample-Verfahren ist bei den Momenten-Verfahren das "numerische Rauschen" bei der Simulation einer Stichprobe gering:

- . Der entscheidende Unterschied der Momenten- zu den Antwortflächenverfahren liegt in der Berechnung der statistischen Verteilungen der Ausgangsgrößen. Nach der Ermittlung des Metamodells werden hier die statistischen Zentralmomente μ (Mittelwert, Varianz, Schiefe und Überhöhung) der Ausgangsgrößen aus den vorgegebenen Momenten der Eingangsgrößen auf der Basis der Ersatzfunktionen $y(x)$ berechnet. Dadurch gibt es dabei keinen stochastischen Anteil infolge der virtuellen Stichprobe.
- . Die unbekanntenen Koeffizienten der Ersatzfunktionen $y(x)$ des Metamodells werden mittels partieller Ableitungen durch definierte Abtastung des echten Modells berechnet. Dabei entstehen nur geringe Zufallsfehler durch die unterschiedliche Ordnung von echtem Modell und verwendeter Ersatzfunktion. Das äußert sich darin, dass kleine Änderungen der Nennwerte durch die Verschiebung der Abtaststellen zu geringen Sprüngen in den Stichproben-Ergebnissen führen.
- . Die Verteilungen der Ausgangsgrößen werden abschließend mittels einer allgemeinen Lambda-Verteilung durch den Vergleich mit einer bekannten Momententabelle approximiert. Diese Berechnung erfolgt also vollkommen analytisch und deterministisch ohne Zufallszahlen.

Beachte:

"Geringes numerisches Rauschen" ist nicht gleichzusetzen mit "hoher Genauigkeit" der Berechnungsergebnisse!

- . Da die auf Basis der Momenten-Methode gebildete Zielfunktion hinreichend glatt ist, können wir das Hooke-Jeeves-Verfahren verwenden.
- . Eine Anzahl von 300 Optimierungsschritten könnte ausreichend sein und kann nachträglich problemlos verändert werden.

Entwurfparameter (Nennwerte)

Die mittels Nennwert-Optimierung ermittelten "optimalen" Nennwerte sollen so verändert werden, dass trotz aller Streuungen eine Versagenswahrscheinlichkeit=0 entsteht:

- . Beim Hooke-Jeeves-Verfahren steigt die Anzahl der erforderlichen Tastschritte proportional mit der Anzahl der Entwurfsgrößen.
- . Jeder Tastschritt des Optimierungsverfahrens besteht aber jetzt aus den n Tastschritten der probabilistischen Simulation (Stichprobenberechnung).

Die Reduzierung des Suchraumes hat deshalb bei der zuverlässigkeitsbasierten Optimierung eine wesentlich größere Bedeutung als bei der bisherigen Nennwert-Optimierung:

- . Da wir nur noch 4 Entwurfsgrößen in die Nennwert-Optimierung einbeziehen, kann man im Beispiel den Suchraum nicht mehr wesentlich reduzieren.
- . Wir benötigen somit für dieses Experiment nur 4 variable Nennwerte:

```

d_Anker      : 5...15 mm
w_Spule      : 100...1000
R20_Spule    : 0.1...10 Ohm
k_Feder      : 1...100 N/mm (Toleranz.kF_Mitte)

```

Achtung: Nutzt man den Workflow zur Optimierung, so muss zu jeder Streuung für den zugeordneten Modell-Parameter ein Nennwert definiert werden. Ansonsten kann es nach abnormalen Simulationsläufen zu undefinierten Verschiebungen der Streubereiche kommen:

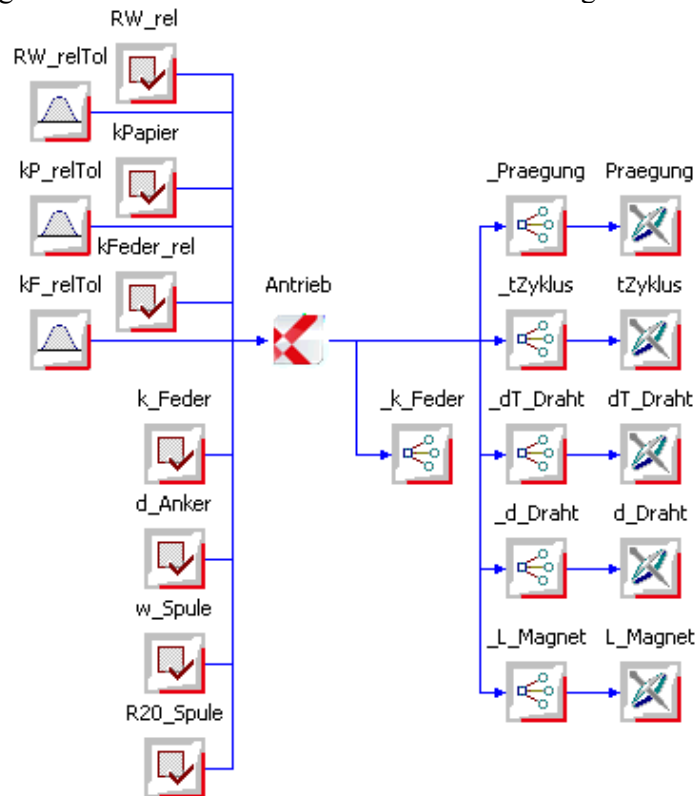
- . Im Beispiel sind die variablen Nennwerte mit anderen Modell-Parametern verknüpft als die Streuungen. Das gilt auch für die Federsteife.
- . Deshalb müssen wir für alle Streuungen zusätzliche konstante Nennwerte definieren, deren Wert dem

Toleranz-Mittewert der zugehörigen Streuung entspricht:

```
RW_rel      : 1 (Toleranz.RW_relTol)
kPapier     : 1 (Toleranz.kP_relTol)
kFeder_rel  : 1 (Toleranz.kF_relTol)
```

Hinweis: Im Workflow für die probabilistische Simulation haben wir diesen Aufwand mit den zusätzlichen Nennwerten nicht getrieben und es funktionierte trotzdem! Probleme gibt es nur bei der probabilistischen Optimierung - im Fehlerfall würden die Mittewerte der Streuungen undefiniert verändert.

Mit diesen Entwurfparametern beginnen wir den Aufbau des Workflows. Die Ausgangsgröße *_k_Feder* dient nur der Kontrolle, ob eine geänderte Federsteife zur korrekten Veränderung ihres Streubereiches führt:



Folgende Startschrittweiten für die Abtastung der Zielfunktion haben sich als günstig erwiesen:

```
d_Anker     : 0.01 mm
w_Spule     : 1 (zusätzlich Genauigkeit=1)
R20_Spule   : 0.001 Ohm
k_Feder     : 0.1 N/mm
```

Entwurfparameter (Streuungen)

Die Streuungen bleiben weiterhin vorgegebene "konstante" Größen (Werte aus der vorherigen Etappe benutzen!). Um die Bearbeitungszeit für diese Übungsaufgabe in Grenzen zu halten, beschränken wir uns auf 3 Streuungen. Diese erfordern nur 7 Abtastschritte pro Stichprobe.

Die Beschränkung auf die folgenden 3 Streuungen erfolgte anhand der ermittelten globalen Sensitivitäten (Effekte):

```
RW_relTol: Wirbelstromwiderstand normalverteilt um aktuellen Wert=1 mit Toleranzbreite=1.
kP_relTol: Papiersteife normalverteilt um aktuellen Wert=1 mit Toleranzbreite=1.
kF_relTol: relative Federsteife normalverteilt um aktuellen Wert=1 mit Toleranzbreite=0.6
```

Hinweise:

- Unabhängig von den individuellen Ergebnissen sollten alle Teilnehmer der Lehrveranstaltung "Konstruktionstechnik" ebenfalls diese 3 Streuungen benutzen!
- Der zugehörige Toleranzmittenwert jeder Streuung ist nun zusätzlich als *Entwurfsparameter.Nennwert* mit dem streuenden Modellparameter verbunden. Die Größe *Nennwert* in den Eigenschaften der Streuung ist deshalb jetzt als *Toleranzmitten-Abstand* zu interpretieren. Da unsere Parameter-Streuungen symmetrisch sind, ist ***Streuung.Nennwert=0*** zu setzen (*Toleranzmitten-Abstand*).
- Für den virtuellen Entwurf wird der Nennwert der Streuung vom OptiY automatisch auf die Summe aus Toleranzmittenwert und Toleranzmittenabstand gesetzt.

Eigenschaft	
Streuung Daten	
Name	kF_relTol
Einheit	-
Kommentar	Federsteife - normiert
Werte	
Nennwert	0
Toleranz	0.6
Verteilung	Normalverteilung
Typ	Konstante
Virtueller Entwurf	
Entwurfsparameter	False
Nennwert	1
Toleranz	0.6

Restriktionen

Der Workflow muss folgende Restriktionen enthalten:

```

Praegung = 1 (Prägungsmaß)
tZyklus ≤ 0.0034 s (Zykluszeit)
L_Magnet ≤ 30 mm (Magnetlänge)
dT_Draht ≤ 40 K (Erwärmung) -> deshalb T_Spule=90°C
d_Draht = Norm-Drahtdurchmesser

```

Eine kritische Größe bei dieser Optimierung ist wieder der Drahtdurchmesser:

- Die Veränderung von Ankerdurchmesser, Windungszahl und Spulenwiderstand führt zu einer Veränderung des daraus resultierenden Drahtdurchmessers.
- Bisher wurde mittels der Restriktionsgröße *d_Draht* die Optimierung gezwungen, hinreichend genau einen Normdraht-Durchmesser anzustreben.
- Es könnte sein, dass die Ausschuss-Minimierung einen anderen Normdrahtdurchmesser erfordert.
- Deshalb sollte man zuerst die Grenzen für den zulässigen Drahtdurchmesser sehr groß wählen (z.B. 0.1 mm bis 1 mm - **Achtung:** Einheit **m** verwenden!). Bei der Ausschuss-Minimierung erkennt man dann die Tendenz der erforderlichen Veränderung.

Im Unterschied zur Nennwert-Optimierung muss man bei der zuverlässigkeitsbasierten Optimierung wesentlich mehr Sorgfalt auf die Konfiguration der Restriktionsgrößen legen:

- Bei der Nennwert-Optimierung wird nur überprüft, ob der aktuelle Wert der Restriktionsgröße im zulässigen Bereich liegt. Der zulässige Wertebereich wird durch Unter- und Obergrenze beschrieben.
- Bei der zuverlässigkeitsbasierten Optimierung muss jedoch überprüft werden, ob der gesamte aktuelle Streubereich der Restriktionsgröße im zulässigen Bereich liegt.

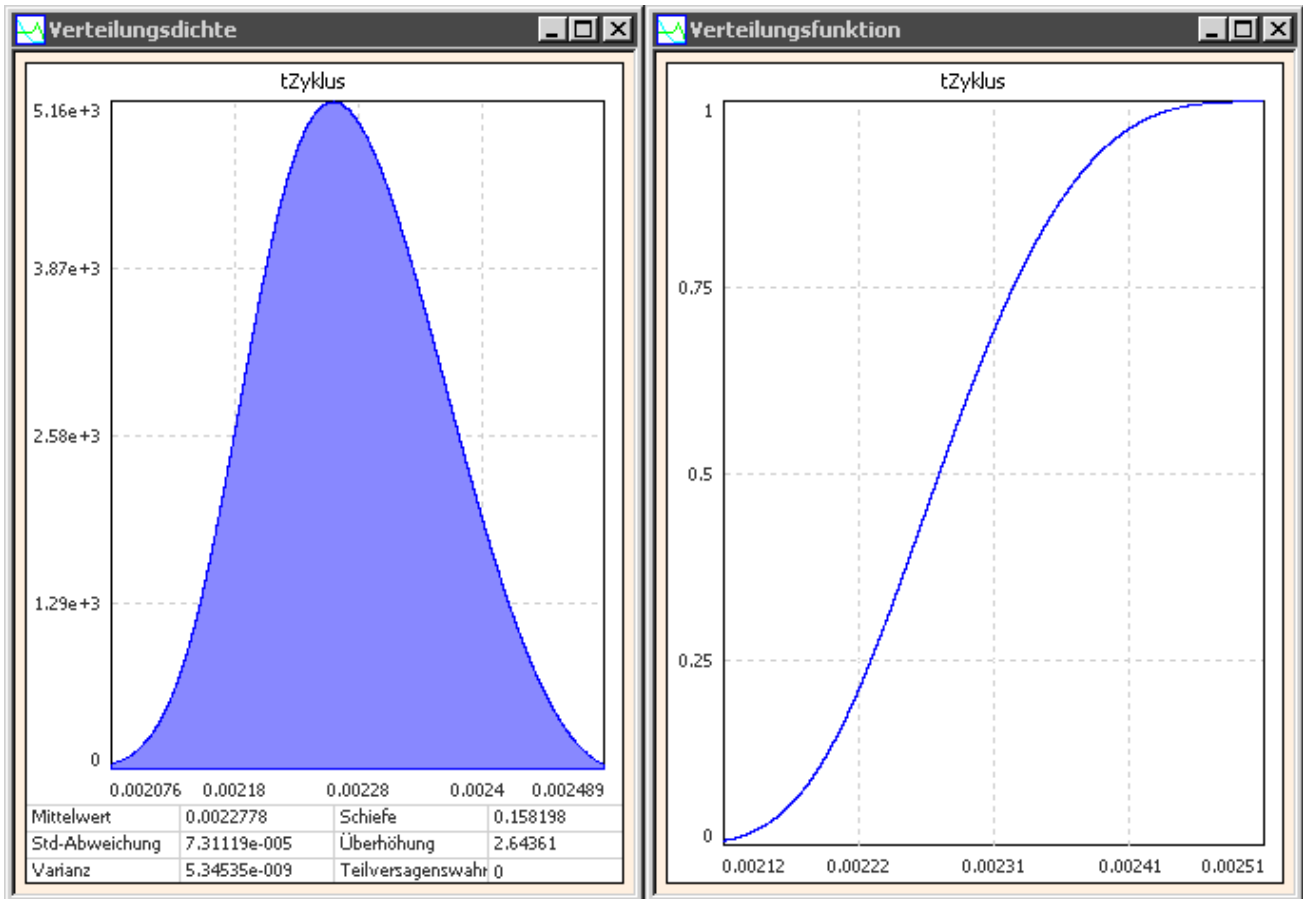
Für jede Restriktionsgröße kann bei der probabilistischen Simulation ein zulässiger Ausschuss angegeben werden:

Eigenschaft	
Restriktion Daten	
Name	Praegung
Einheit	
Kommentar	Prägungsgrad
Werte	
Untergrenze	0.85
Obergrenze	1.3
Gewichtsfaktor	1
Approximation	Polynomial
Polynomordnung	2
Zulässiger Ausschuss [0..1]	0.003
Last Value	1

- Das kann sinnvoll sein, wenn man z.B. bei der Fertigung anhand dieser Prüfgröße unzulässige Exemplare aussortiert. Das kann durchaus weniger Kosten verursachen, als eine extrem genauere Fertigung.
- Strebt man bei der Ausschuss-Minimierung eine Gesamtversagenswahrscheinlichkeit von Null an, so erlangen bei sehr kleinen Teilversagenswahrscheinlichkeiten die numerischen Fehler bei der Simulation der Ausgangsstreuungen eine wachsende Bedeutung. Um dieses "numerische Rauschen" zu eliminieren, ist es günstig, einen sehr kleinen zulässigen Ausschusswert angeben, z.B. 0.3%. Das entspricht dann praktisch einem Ausschuss=0.

Dieses Problem des numerischen Rauschens bei sehr kleinen Teilversagenswahrscheinlichkeiten soll nun näher betrachtet werden:

Im allgemeinen besitzt eine Streuung keine scharfen Grenzen. In OptiY ist die Toleranzbreite T als der 6-fache Wert der Standard-Abweichung σ definiert. Damit erfasst man z.B. bei einer Normalverteilung 99,7% aller möglichen Werte der streuenden Restriktionsgröße.



An den Diagrammen der Verteilungsdichte und der Verteilungsfunktion werden für die X-Achsen unterschiedliche Grenzwerte eingetragen. Bei genauerem Hinschauen erkennt man, dass die Funktionswerte auch außerhalb dieser Grenzen z.B. noch nicht Null sind.

Die Funktionen werden bei der Darstellung abgeschnitten, wenn ihr Funktionswert den Wert $Y_{\max} \cdot 0.0067$ unterschreitet (Y_{\max} = maximaler Funktionswert).

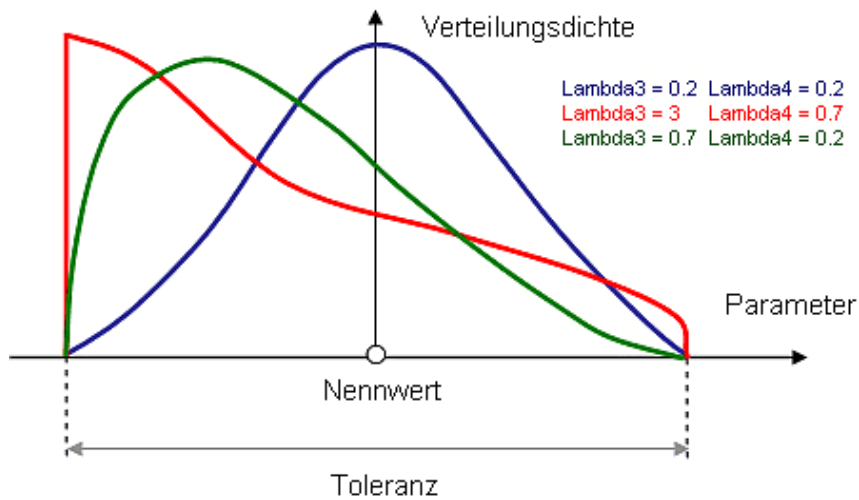
Die Streuungen der Ausgangsgrößen werden bei der Momenten-Methode als allgemeine Lambda-Verteilung approximiert. Eine Lambda-Verteilung besitzt immer definierte Grenzwerte. Die **Quantilfunktion** x und **Dichtefunktion** $f(x)$ lauten:

$$x = \lambda_1 + \frac{u^{\lambda_3} - (1-u)^{\lambda_4}}{\lambda_2}$$

$$f(x) = \frac{\lambda_2}{\lambda_3 \cdot u^{\lambda_3-1} + \lambda_4 \cdot (1-u)^{\lambda_4-1}}$$

Dabei ist $0 < u < 1$. Durch die Parameter λ_1 , λ_2 , λ_3 und λ_4 kann man eine beliebige Verteilungsfunktion abbilden. Dabei ist λ_1 der Mittelpunkt und λ_2 die Skalierung der Verteilung. λ_3 und λ_4 sind die Formfaktoren. Bei symmetrischer Verteilung ergibt sich $\lambda_3 = \lambda_4$. Vertauschen von λ_3 und λ_4 bedeutet eine Spiegelung der Verteilung um den Mittelpunkt. Der Toleranzwert ist intern festgesetzt auf $T = 2/\lambda_2$ und der Mittelwert ist dabei immer der zugehörige Nennwert der Streugröße (Toleranzmittenwert).

Im folgenden Bild sind beispielhaft einige Verteilungsdichtefunktionen dargestellt:



Zusätzlich zum Fehler des Ersatzmodells (z.B. Polynomansatz 2. Ordnung) resultiert ein weiterer Fehler des Moment-Verfahrens daraus, dass mit dieser allgemeinen Lambdafunktion die wirkliche Streuung der Ausgangsgrößen natürlich nie exakt abgebildet werden kann. Der relative Fehler der Approximation steigt an der Rändern der Toleranzbreite.

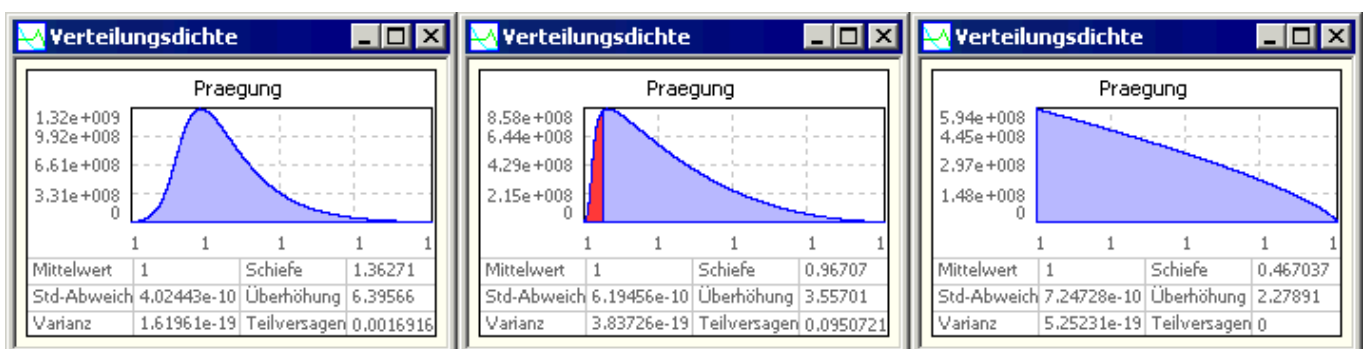
Für das sichere Konvergieren des Gesamtversagens gegen den Wert=0 hat sich folgende Vorgehensweise bewährt:

- Für alle Restriktionsgrößen trägt man **zulässiger Ausschuss = 0.003** ein. Das entspricht mit 0,3% dem Anteil der Lösungen, der bei einer Normalverteilung außerhalb der Toleranz $T=6\cdot\sigma$ liegt.
- Ein Ausschuss kleiner 0.3% ist praktisch irrelevant, weil er nur statistische Rechen- und Approximationsfehler beinhaltet. Deshalb sollten kleinere Teilversagenswahrscheinlichkeiten bei der Berechnung des Gesamtversagens nicht berücksichtigt werden.
- Diesen Wert von 0.003 kann man durch Beobachtung der Teilversagenswahrscheinlichkeiten während der Ausschuss-Minimierung bei Bedarf noch präzisieren. Unter Umständen ist ein etwas höherer Wert dafür erforderlich.
- Das Gütekriterium "Versagen" ist nur ein Maß für das Gesamtversagen der Lösung. Der Wert ergibt sich als Summe der gewichteten Teilversagenswahrscheinlichkeiten. Im Normalfall sollte man für alle Restriktionen **Gewichtsfaktor=1** setzen.

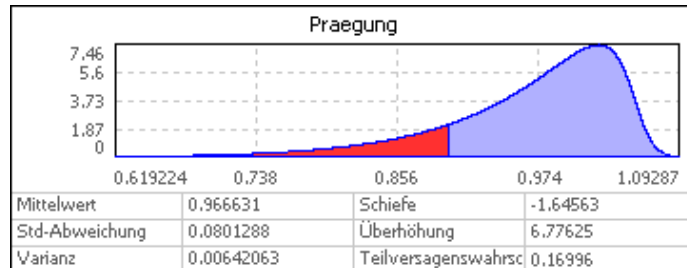
Unstetig streuende Restriktionsgrößen:

Praegung ist ein Maß für das erfolgreiche Prägen des Papiers. Infolge des im Modell eingebauten Anschlages für die Nadelbewegung ist im Erfolgsfall **Praegung=1**. Es existiert dabei keine Streuung! Wir hatten ursprünglich für die Grenzen der *Praegung* bereits ein Intervall von 1 bis 1.1 angegeben, um eine stabile Konvergenz für die Nennwert-Optimierung zu erreichen. Leider gibt es bei der probabilistischen Simulation (von Stichproben) erneut Probleme mit diesen Grenzen:

- Auch für die Abhängigkeit der *Praegung* von Streuergößen wird mittels Polynomansatz ein Metamodell gebildet. Auf Basis dieses Metamodells wird eine Lambda-Verteilung für die Streuung der *Praegung* berechnet.
- Dabei wird natürlich nur numerisches Rauschen als Streuung interpretiert. Das erkennt man daran, dass z.B. auch für fast identische Nennwerte sich die Kurvenform für die Verteilungsdichte der *Praegung* "unmotiviert" stark ändert:



- In jedem Fall ist jedoch der *Mittelwert*=1. Deshalb kommt es zu einem größeren Teilversagen, weil die untere Grenze von 1 durch die approximierte Verteilungsfunktion um ca. $1e-10$ unterschritten wird!
- Wenn während der probabilistischen Simulation ein stabiles Prägen in allen Stichproben gewährleistet wäre, könnten wir den **unteren Grenzwert=0.99** setzen, was die Überprüfung des wirklichen Prägevorgangs nicht stören dürfte!
- Leider ist ein störender Nebeneffekt der vorangegangenen Strukturoptimierung, dass diese Prägung nicht mehr in der gesamten Stichprobe gewährleistet ist.
- Ungefähr bei *Praegung*=0.8 erfolgt der Riss des Papiers. Dieser Wert markiert die Unstetigkeitsstelle, denn alle Exemplare, bei denen die Nadel diese Rissposition überschreiten konnte, führen die *Praegung* auch aus!
- Deshalb sollte man den unteren Grenzwert einer un stetigen und begrenzten Restriktionsgröße sinnvoll zwischen Unstetigkeitsstelle und Begrenzungswert setzen. Im Beispiel hat sich für **Praegung** ein **unterer Grenzwert=0.85** als günstig erwiesen, um die tatsächliche Teilversagenswahrscheinlichkeit hinreichend abzubilden:



- Da bei entsprechend vielen "nichtprägenden" Exemplaren die approximierte Verteilungsdichte nach oben flach auslaufen kann, sollte ein etwas höherer **oberer Grenzwert=1.3** benutzt werden.

Gütekriterien

Strafe:

- Wird automatisch als Gütekriterium ergänzt, weil Restriktionen definiert sind.
- Die "Hierarchische Optimierung" wirkt dann wie folgt:
 - Zuerst werden *Entwurfsparameter.Nennwerte* (=Toleranzmittenwerte) gesucht, welche ohne Berücksichtigung der Streuungen alle Forderungen erfüllen (*Strafe*=0).
 - Erst dann werden unter Berücksichtigung der Versagenswahrscheinlichkeit die *Entwurfsparameter.Nennwerte* so verändert, dass das Versagen kleiner wird.

Versagen:

- Wird automatisch ergänzt, weil Streuungen als Entwurfsparameter definiert sind.
- Es handelt sich um ein Maß für die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit einer Stichprobe:
 - Für jede Restriktionsgröße werden Teilversagenswahrscheinlichkeiten ermittelt.
 - Der Wert für das "Versagen" ergibt sich bei der Momenten-Methode als Summe der gewichteten Teilversagenswahrscheinlichkeiten. Damit ist bei einer Ausschussquote=0 auch *Versagen*=0.

Minimale Zykluszeit:

- Wir wünschen uns weiterhin, dass nach der Ausschuss-Minimierung der Nadelantrieb auch für den schlechtesten Fall noch möglichst schnell funktioniert.
- Diesen Wunsch formulieren wir wie gewohnt durch Vorgabe einer oberen Grenze für die **Restriktion tZyklus**.
- Ausgehend von einem Anfangswert können wir uns dann iterativ einem möglichst kleinen Maximalwert für die Zykluszeit nähern, bei dem noch *Versagen*=0 erreicht wird.
- Die vorherige Analyse ergab, dass wir die Forderung aus der Aufgabenstellung von 3.4 ms in Stichprobe teilweise überschreiten. Deshalb sollte man zuerst diesen Grenzwert eintragen, da diese Forderung in jedem Fall einzuhalten ist.

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Robust-Optimierung_-_Ausschuss-Problem“

Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Ausschuss-Minimierung

Aus OptiYummy

↑

← →

Ausschuss-Minimierung (Experiment-Ergebnisse)

Die für den Optimierungsverlauf wichtigen Kenngrößen wollen wir in Diagrammen darstellen:

Nennwert-Verläufe

- Strafe (= Versagen für aktuelle Nennwerte)
- Versagen (= Maß für Ausschuss-Quote der Stichprobe)
- Diagramme der variablen Entwurfparameter (Nennwerte)
- Nennwert-Verläufe der Restriktionen *tZyklus*, *L_Magnet* und *d_Draht*

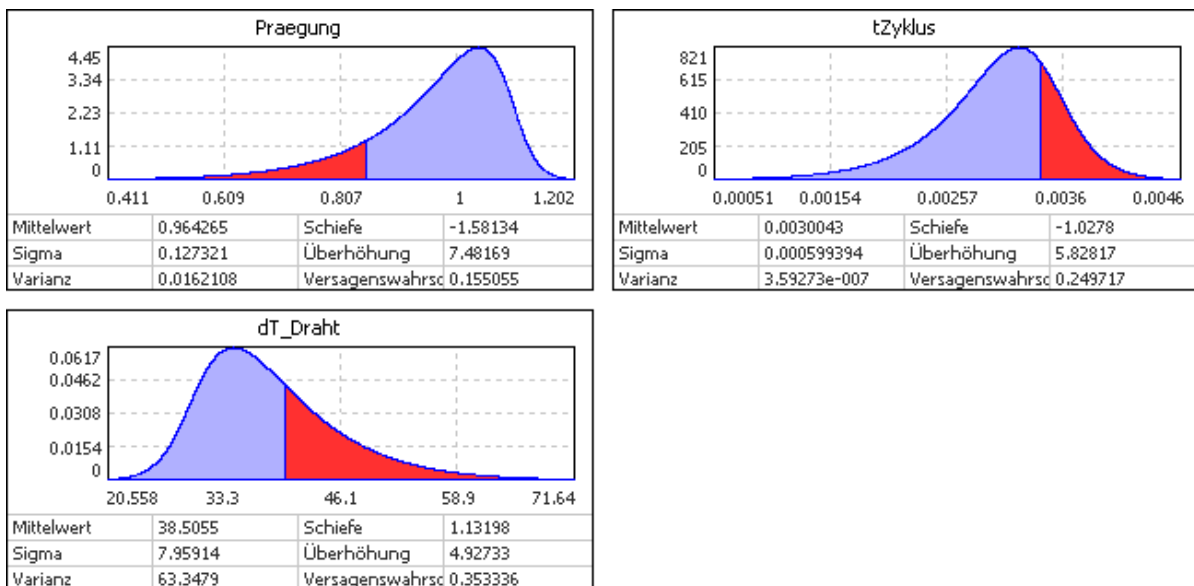
Verteilungsdichten

- Die geometrisch determinierten Restriktionen *d_Draht* und *L_Magnet* sind im Experiment nicht von den berücksichtigten Streuungen abhängig und brauchen deshalb auch nicht als Verteilungsdichten dargestellt werden.
- Dafür kommen nur die streuenden Restriktionen *tZyklus*, *Praegung* und *dT_Draht* in Frage.

Ausschuss-Minimierung ist ein zweistufiger Prozess:

1. Das Finden einer zulässigen Lösung für die Nennwerte der Entwurfparameter besitzt höchste Priorität (**Strafe** als Zielfunktion). Wenn das vorherige Nennwert-Optimum Restriktionen noch geringfügig verletzte, dauert es einige Schritte, bis **Strafe=0** erreicht wird. Sollte dies nicht gelingen, so muss man sich Gedanken zu einer Abmilderung der Forderungen machen!
2. Erst wenn Strafe=0 erreicht ist, benutzt die Optimierung das **Versagen** als Zielfunktion. Die weitere Optimierung hat das Ziel, **Versagen=0** zu erreichen.

Das ursprüngliche Nennwert-Optimum kann durch teilweises Nichtprägen gekennzeichnet sein. Daraus resultiert dann im Modell eine scheinbare Temperaturerhöhung, welche durch die vereinfachte Temperaturermittlung bedingt ist. Die sehr kleinen Werte für *tZyklus* resultieren ebenfalls aus den "nichtprägenden" Simulationsläufen und haben nichts mit der Realität zu tun:



Achtung:

- Leider ist die un stetige Restriktionsgröße **Praegung** für die probabilistische Optimierung ziemlich anspruchsvoll.
- Ist die Startlösung bereits durch teilweisen Nichtprägen gekennzeichnet, so kann der Bereich des vollständigen Prägens durch die Optimierung nicht zielgerichtet angestrebt werden. Ursache ist die Unstetigkeit des Übergangs zwischen Prägen und Nichtprägen. Man kann die Entwurfparameter in weiten

Bereichen ändern, ohne dass sich das Verhalten in Bezug auf das Prägen ändert. Am Übergang genügt dann eine winzige Änderung der Parameter. Deshalb sollte man grundsätzlich die Startlösung so modifizieren, dass man ein stabiles Prägen innerhalb der gesamten Streuung erreicht!

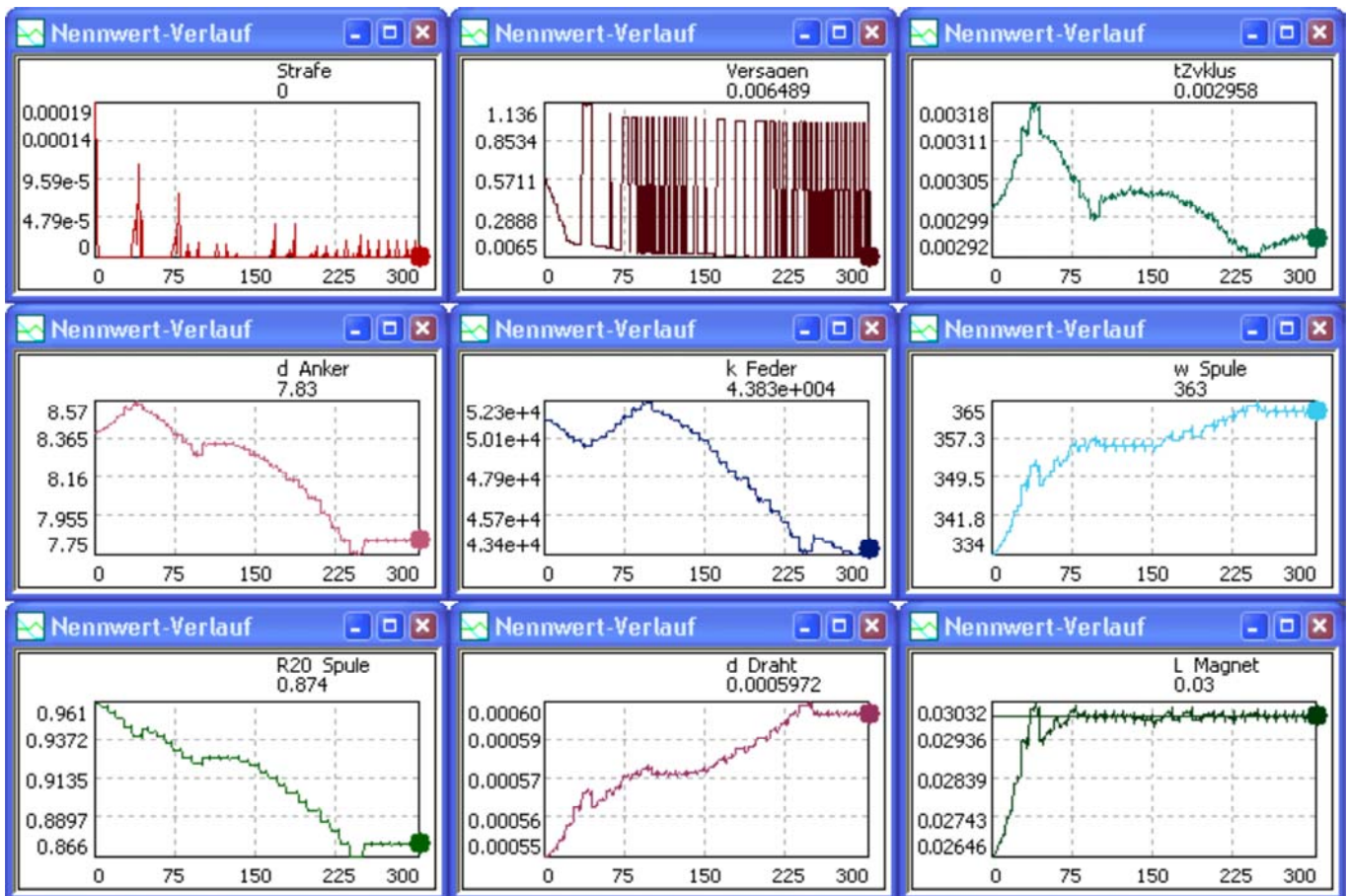
Für dieses Umkonfigurieren gibt es zwei einfache Varianten:

1. Verringerung des Nennwertes **k_Feder** um 30 bis 50%. Damit steht mehr Kraft für das Prägen zur Verfügung. Die davon ausgehende Optimierung vermeidet Bereiche des unvollständigen Prägens und führt wahrscheinlich zum minimalen Versagen.
2. Falls die erste Variante nicht hilft, kann man zusätzlich **d_Anker** um ca. 10% vergrößern.

Zur Überprüfung des kompletten Prägens muss man nur die probabilistische Simulation für die modifizierte Ausgangslösung durchführen und sich die Verteilungsdichte der Prägung anschauen.

Kritisch bei der Ausschuss-Minimierung ist im Einzelfall der ständige Wechsel zwischen den beiden Zielfunktionen *Strafe* und *Versagen* an Restriktionsgrenzen:

1. Nennwerte des Magnetkreises der jeweils aktuellen Lösung führen zu einem Ausschöpfen vorgegebener Grenzwerte.
2. Tendiert die Versagensverringerng zu einem Überschreiten solcher Grenzwerte, so hangelt sich das Optimierungsverfahren an der zugehörigen Restriktionsgrenze entlang. Das behindert die Konvergenz zum globalen Ausschuss-Minimum, wie dies im folgenden Bild gezeigt wird:



Im obigen Beispiel kommt man trotz der Konvergenzbehinderung an der Begrenzung $L_{\text{Magnet}}=30$ mm zu einer Ausschuss-Quote von praktisch Null.

Es ergibt sich zufällig ein optimaler Drahtdurchmesser von 0.6 mm, so dass man sich eine weitere Optimierung in Hinblick auf zulässige Drahtdurchmesser sparen kann.

Hinweis:

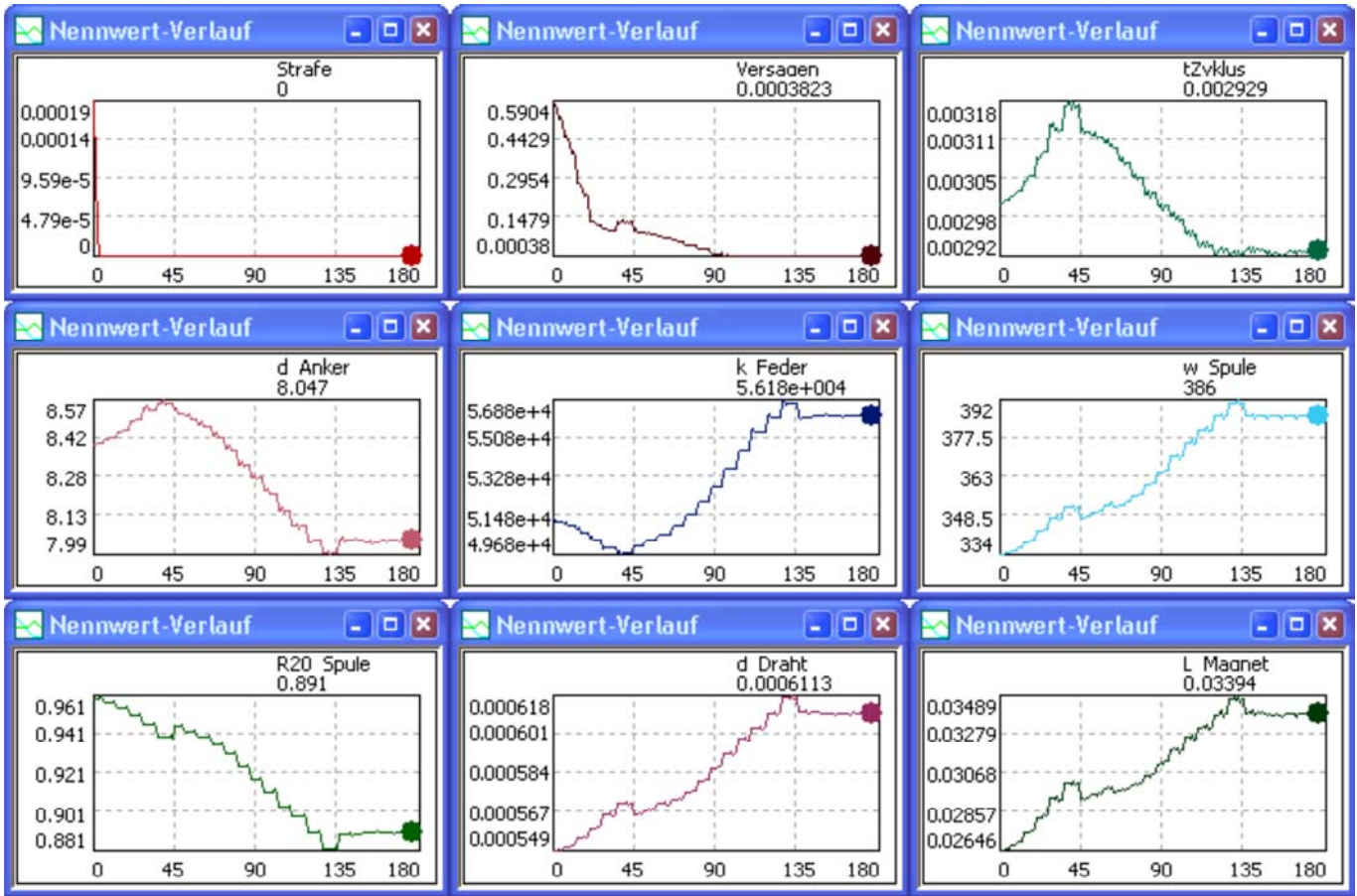
Falls die Forderung nach max. 30 mm Magnetlänge die Konvergenz der Lösungssuche zum Optimum behindert, sollte man diese Forderung zumindest temporär aufweichen.

Im Sinne einer kurzen Zykluszeit tendiert der Antrieb insgesamt zu einer kurzen Magnetlänge. Das globale Optimum wird wahrscheinlich nur eine geringfügige Vergrößerung der Magnetlänge erfordern.

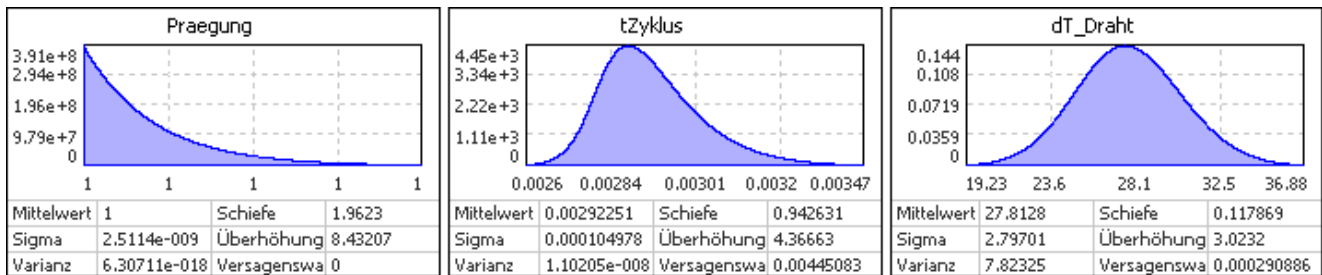
Falls dies der Fall ist, lässt sich dieser zusätzliche Bauraum nach Abstimmung mit den Bearbeitern anderer

Drucker-Komponenten sicher realisieren.

Wenn wie im Beispiel keine Restriktionsverletzung für die Nennwerte mehr auftritt, kann das Versagen ungestört minimiert werden:



Nach der Ausschuss-Minimierung wird mit großer Wahrscheinlichkeit innerhalb des Streubereiches ein stabiles Prägen erreicht:



Der veränderte Drahtdurchmesser wird wahrscheinlich keinem Normdraht entsprechen (0.3 / 0.32 / 0.35 / 0.37 / 0.40 / 0.45 / 0.50 / 0.55 / 0.60 / 0.65 / 0.70 / 0.75 / 0.80 / 0.90 / 1.00 / 1,20 / 1,50 / 1,80 / 2,00 mm):

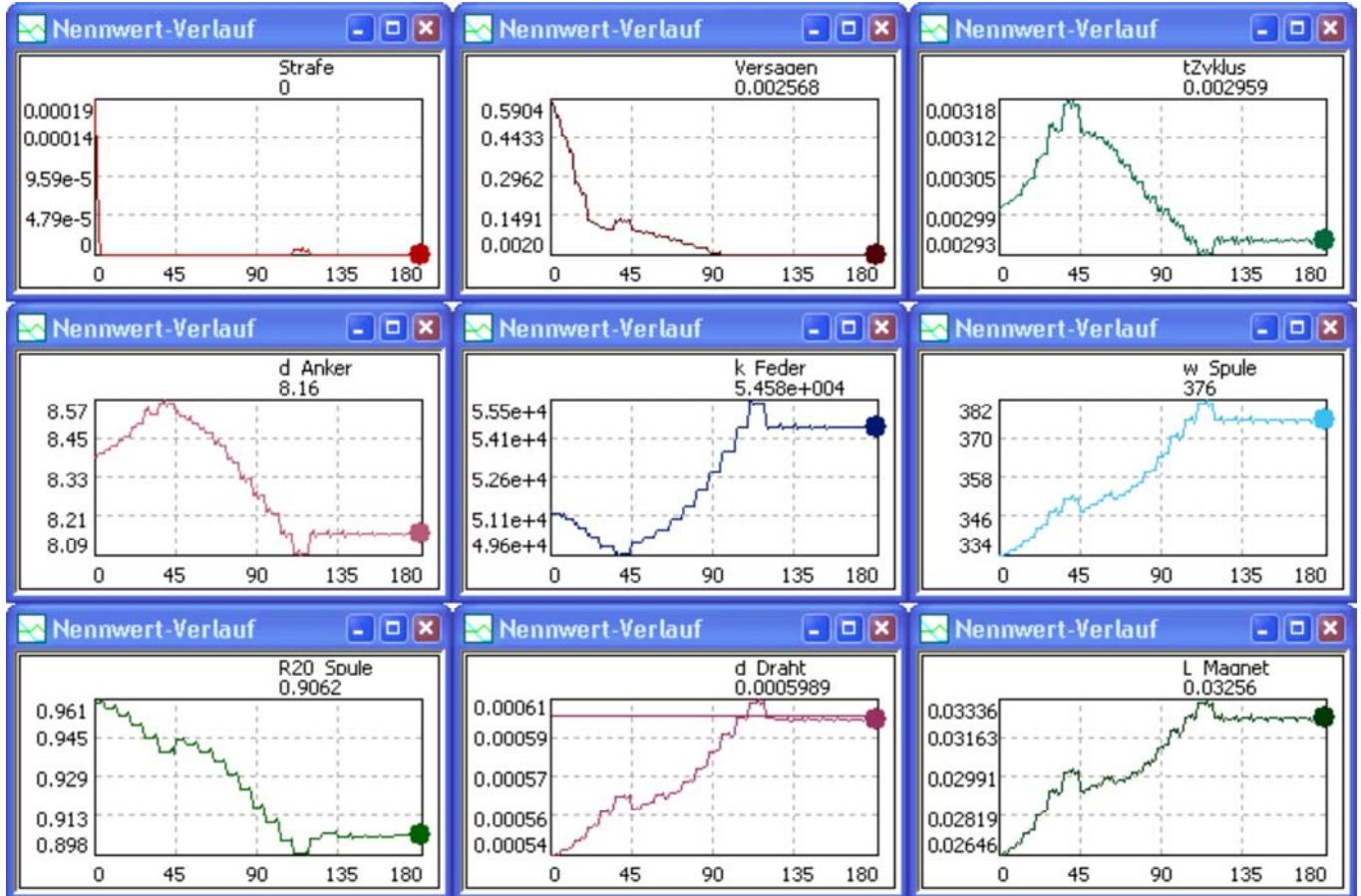
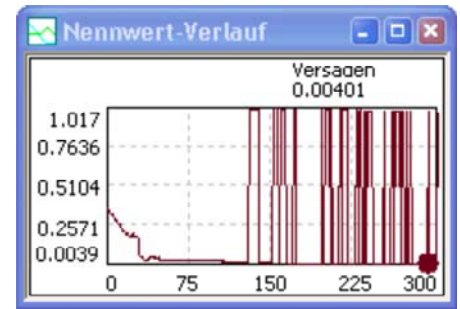
Im Beispiel vergrößerte sich der optimale Drahtdurchmesser von 0.55 mm auf etwas über 0.6 mm. Der anzustrebende Wert beträgt also 0.60 mm.

Das Einhalten der erforderlichen Draht-Restriktion wird die Minimierung des Versagens infolge von Strafe>0 stören. Man sollte versuchen, diese Störungen möglichst gering zu halten. Eine erfolgreiche Vorgehensweise soll am Beispiel erläutert werden:

- Ohne Drahtrestriktion wurde ausgehend von 0.55 mm der Drahtdurchmesser durch das Optimierungsverfahren stetig erhöht. Am Ende erfolgte eine geringe Reduktion des Drahtdurchmessers auf das Optimum von 0.61 mm.
- Die **untere Grenze** des Drahtdurchmessers setzt man deshalb unterhalb des Startwertes (z.B. $d_{\text{Draht}} \geq 0.54$ mm). So kann die Minimierung des Versagens am Anfang ungestört von Restriktionsverletzungen beginnen.
- Die **obere Grenze** setzt man auf den zu erreichenden Drahtdurchmesser ($d_{\text{Draht}} \leq 0.6$ mm). Die Lösung müsste sich dieser oberen Grenze annähern, weil das eigentliche Optimum oberhalb dieser Grenze liegt.

Hinweis:

Der **Gewichtsfaktor=1** für die Restriktion **d_Draht** äußert sich im Versagen durch jeweilige Überhöhungen um den Wert=1, wenn Strafe>0 infolge unzulässigem Drahtdurchmessers (Beispiel im Bild rechts). Damit man die tendenzielle Änderung des Versagens im Diagramm besser erkennen kann, sollte man **Gewichtsfaktor=0.001** setzen. Das Ergebnis der Optimierung wird dadurch nicht verändert.



Mit **d_Draht=0.60 mm** gelangen wir im Beispiel zu einem etwas längeren Magneten im Vergleich zur ursprünglichen Lösung mit **L_Magnet=30 mm**:

In der Ausschussquote gibt es praktisch keinen Unterschied zwischen der längeren und der kürzeren Lösung. Da eine weitere Verkürzung der Zykluszeit mit dem größeren Magneten kaum möglich sein wird, kann man sich im Beispiel für den kleineren Magneten als optimale, ausschussminimierte Lösung entscheiden.

Experiment-Ergebnisse (Ausschuss-Minimierung)

Mit welchen technisch sinnvollen Nennwerten ergibt sich bei Berücksichtigung von Normdrähten und einer zulässigen Spulen-Erwärmung von **40 K** eine möglichst schnelle Antriebslösung mit einer Ausschuss-Quote von "praktisch" Null:

- **d_Anker** (Ankerdurchmesser)
- **L_Magnet** (Magnetlänge ohne Restriktion!)
- **R20_Spule** (Widerstand der Spule bei 20°C)
- **w_Spule** (Windungszahl)
- **d_Draht** (aus Normreihe)
- **Feder.k** (Elastizitätskonstante)
- **Feder.s0** (Vorspannweg)
- **Widerstand.R** (Abschaltwiderstand)
- **t_Zyklus** (Mittelwert und unterer/oberer Grenzwert)

Hinweis: Zu technisch sinnvollen Werten gehört auch die Wahl einer vernünftigen Anzahl von Ziffernstellen!

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Robust-Optimierung_-_Ausschuss-Minimierung“

Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Grundlagen

Aus OptiYummy

↑

← →

Robust-Optimierung (Grundlagen)

Mit der Minimierung der Versagenswahrscheinlichkeit erreichten wir eine Lösung, welche auf den ersten Blick allen Forderungen genügen sollte. Doch da wir inzwischen nicht mehr "computergläubig" sind, sollten wir auch diese Ergebnisse einer tieferen Analyse unterziehen:

1. Modelle als vereinfachte Abbilder

- . Es wurden nur die physikalischen Effekte im Modell berücksichtigt, die in Hinblick auf die Nutzung des Modells bisher als relevant eingeschätzt wurden.
- . Abweichungen im zeitlichen Verlauf der Modellgrößen von ca. $\pm 20\%$ können für das Dynamik-Modell eines Elektromagneten als ziemlich genau gelten.
- . Die berechneten Streuungen der Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von den Parameter-Streuungen sind deshalb mit einem Fehler gleicher Größenordnung behaftet.

2. Vernachlässigung von Streuungen

- . Aus Gründen der zeitlichen Machbarkeit ist es mit den jetzigen numerischen Methoden in den nächsten Jahren noch nicht möglich, die Streuungen aller Modellparameter bei der Simulation zu berücksichtigen.
- . Die Reduktion der Simulation auf die Streuungen mit dem größten Einfluss auf die Bewertungsgrößen führt zu "geschönten" Ergebnissen in Hinblick auf die Versagenswahrscheinlichkeit.

3. Fehler bei probabilistischer Simulation

- . Ungenaue Verteilungsfunktionen für die Streuungen infolge unzureichender Informationen zur Fertigung und zu den Einsatzbedingungen.
- . Begrenzte Stichprobengröße bzw. Bildung vereinfachter Übertragungsfunktionen.
- . Diese Ungenauigkeiten der Abbildung der Streuungen im probabilistischen Modell führen zu Unsicherheiten in Hinblick auf die Streuungen der Ausgangsgrößen.

4. Validierte Modelle sind tendenziell richtig

- . Die Validierung muss zuvor für den angestrebten Nutzungsbereich des Modells erfolgt sein.
- . Änderungen von Modellparametern bewirken dann eine qualitativ richtige Reaktion der Ausgangsgrößen.
- . Damit korreliert eine Verbesserung des Modellverhaltens sehr stark mit einer Verbesserung des realen Objektverhaltens.

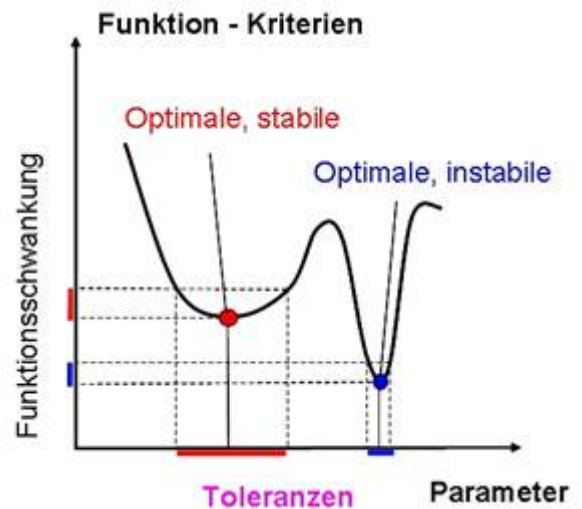
Aus diesen Feststellungen kann man für die optimale Lösung der Ausschuss-Minimierung schlussfolgern:

- . Die zuverlässigkeitsbasierte optimierte Lösung wird innerhalb der Parameter-Streuungen besser funktionieren, als die Ausgangslösung ohne Berücksichtigung von Streuungen.
- . Auf Grund der unvermeidlichen Ungenauigkeiten und Vereinfachungen ist es sehr wahrscheinlich, dass die Versagenswahrscheinlichkeit im praktischen Betrieb noch nicht bei Null liegt.
- . Es wäre günstig, wenn man vor dem endgültigen Bau eines teuren Versuchsmusters die

Wahrscheinlichkeit vergrößern könnte, dass man im praktischen Betrieb eine stabile und weitestgehend funktionsfähige Lösung erhält.

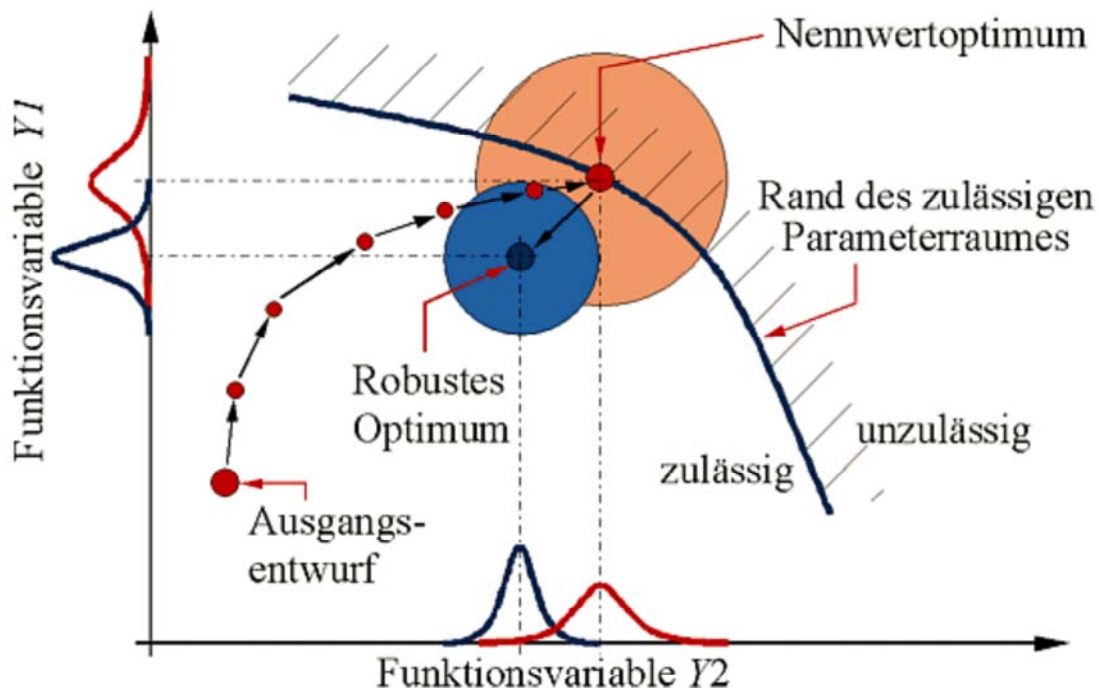
Robust-Optimierung ist ein Ansatz für eine weitere Verbesserung unserer optimierten Lösung:

- Streuungen der Modellparameter sollten nur zu einer kleinen Streuung der Ergebnisgrößen führen.
- Meist sind die Streuungen der Modellparameter durch die Herstellung und die Einsatzbedingungen bereits vorgegeben.
- Aufgabe der Robustoptimierung ist es, die Streuungen der Bewertungsgrößen bei vorgegebenen Parameter-Streuungen zu minimieren.
- Im nebenstehenden Bild wird versucht, den Unterschied zwischen einer instabilen und einer robusten Optimallösung zu verdeutlichen.



Die Streuungen der Bewertungsgrößen werden mathematisch über ihre Varianzen erfasst:

- Gesucht wird eine möglichst gut funktionierende Lösung, welche zusätzlich zur Ausschussquote=0 minimale Varianz-Werte für die wesentlichen Bewertungsgrößen aufweist.
- Es handelt sich praktisch um eine Ausschuss-Minimierung mit gleichzeitiger Minimierung der Varianzen der streuenden Bewertungsgrößen. D.h., der Streubereich der Lösung soll verkleinert werden.



Bei der Suche nach solch einer Lösung wird es mit großer Wahrscheinlichkeit zu Widersprüchen zwischen den einzelnen Bewertungsgrößen kommen! Erforderlich ist deshalb eine Mehrkriterien-Optimierung, welche die Entscheidungsgrundlage für eine angemessene Kompromisslösung liefert.

Mehrkriterien-Optimierung

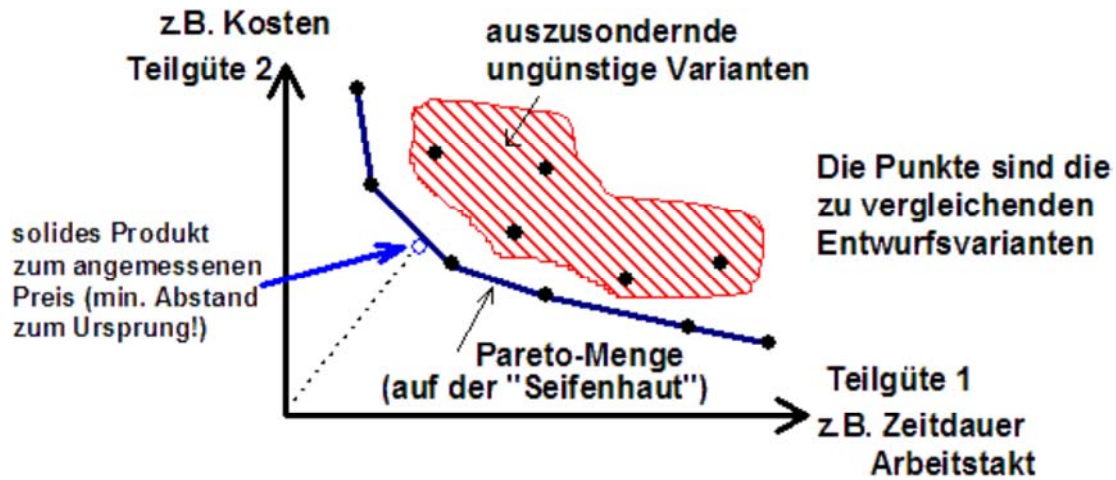
- In der Entwicklung und Konstruktion von Produkten trifft man sehr häufig Optimierungsaufgaben mit mehreren Gütekriterien. Dabei wird ein Vektor von Entwurfparametern gesucht, mit dem möglichst die Werte aller Gütekriterien minimiert werden (Mehrkriterien-Optimierung, auch

Pareto-Optimierung genannt).

Die Kriterien sind miteinander oft nicht verträglich. Beim Versuch die Werte einiger Kriterien zu minimieren, können sich die Werte anderer Kriterien vergrößern. Bei unserem E-Magneten führt z.B. eine Verkleinerung der Einbaulänge zu einer Erhöhung der Spulentemperatur. Auch eine Verringerung der Zykluszeit führt zu einer Temperaturerhöhung.

Es gilt fast in jedem Fall: bessere Funktionserfüllung führt zu höheren Kosten.

Es gibt keine eindeutige Lösung, sondern eine **pareto-optimale Lösungsmenge**:



Dieses Pareto-Optimum (nach Vilfredo Pareto) ist dadurch gekennzeichnet, dass es nicht mehr möglich ist, eine Teilgüte zu verbessern, ohne gleichzeitig mindestens eine andere Teilgüte zu verschlechtern. In Abhängigkeit von den Verwertungsbedingungen kann der Nutzer dann eine Lösung aus der Pareto-Menge wählen, z.B.:

- . Beste Funktionalität um jeden Preis.
- . Ausgewogenes Preis-/Leistungsverhältnis.
- . So billig wie möglich, solange es überhaupt funktioniert.

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Robust-Optimierung_-_Grundlagen“

Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Experimentkonfiguration

Aus OptiYummy



Robust-Optimierung (Experiment-Konfiguration)

Inhaltsverzeichnis

Mehrkriterielle Robust-Optimierung

Wir wollen nun **ausgehend vom Bestwert der Ausschuss-Minimierung** eine robuste Lösung für unseren Antrieb suchen, die folgenden Kriterien möglichst gut genügt:

- . Die Streubreite der Zykluszeit ist zu minimieren (**Robustoptimierung**).
- . Ein Prägezyklus soll dabei möglichst schnell erfolgen (Mittelwert über eine Stichprobe).
- . Die Spulenerwärmung soll möglichst gering sein (Mittelwert über eine Stichprobe).
- . Die Streubreite der Spulenerwärmung ist funktionell von geringerer Bedeutung, solange die max. Erwärmung nicht markant überschritten wird. Deshalb streben wir im Rahmen dieser Robust-Optimierung keine Minimierung dieser Streuung an.
- . Wir wollen drei unterschiedlichen Gütekriterien möglichst gut genügen (**Mehrkriterien-Optimierung**). Zumindest die Ziele der Verringerung der Zykluszeit und der Spulenerwärmung widersprechen sich!

Als unmittelbares Ergebnis einer Mehrkriterien-Optimierung wird eine Pareto-Menge der optimalen Kompromisslösungen ermittelt:

- . Wir erhalten als Entscheidungsgrundlage für die endgültige Lösungswahl einen Zusammenhang, in welchem Maße die Verbesserung einer Teilgüte zur Verschlechterung der anderen Teilgüten führt.
- . Anhand dieser Pareto-Menge können wir bewerten, in welchem Maße die bisherige Ausschuss-minimierte Lösung noch im Sinne einer robusteren Lösung verbessert werden kann bzw. ob für den Einsatzzweck ein anderer Kompromiss zwischen sich widersprechenden Gütekriterien sinnvoll ist.
- . Die gewählte endgültige Lösung muss dann alle aktuellen Forderungen (Restriktionen) innerhalb des Streubereichs der berücksichtigten Parameter-Streuungen einhalten.

Als wesentliche Streuungen berücksichtigen wir wie bei der Ausschuss-Minimierung:

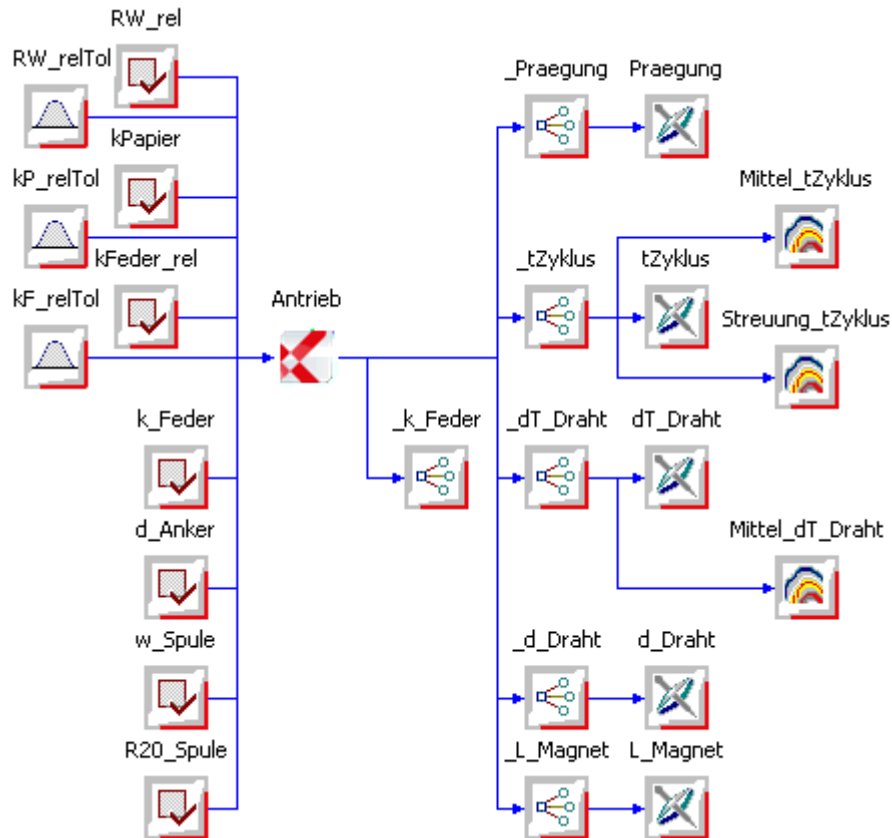
- . Unsicherheit des Wirbelstromwiderstands
- . Fertigungstoleranzen der Rückholfeder
- . Unterschiedliche Papiersorten

Hinweise:

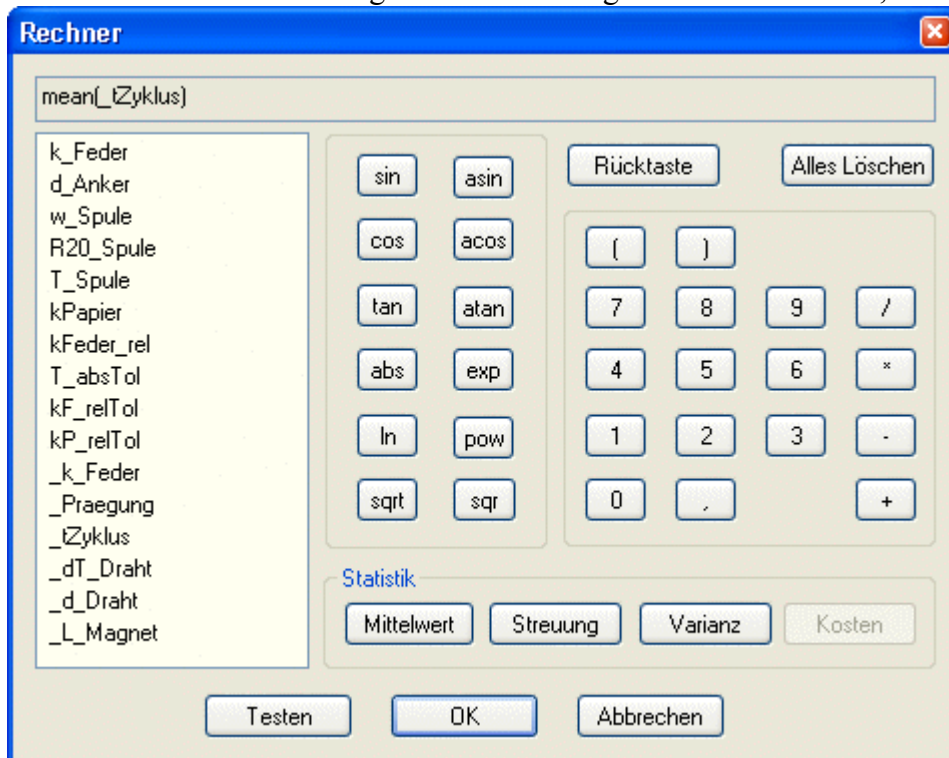
- . Wir nutzen weiterhin das SimulationX-Modell **Etappe6_xx.ism**. Da die multikriterielle Optimierung mittels Evolutionsstrategie (Co-evolutionäres Verfahren) zu "wildem" Schwingungen im Suchraum entlang der Pareto-Menge führt, erhöhen wir im Simulationsmodell **tStop=20 ms**. Damit können auch extrem langsame Antriebsexemplare vollständig simuliert werden.
- . Wir verwenden einen neuen OptiY-Versuchsstand **Etappe6_xx_Robust.opy**. Diese Datei erzeugen wir als Kopie aus der Datei **Etappe6_xx_Ausschuss.opy**.
- . In dieser neuen Datei übernehmen wir den bei der Ausschuss-Optimierung erreichten **Bestwert als Parameter** und somit als Ausgangslösung für die Robust-Optimierung.

Für die Minimierung der Streuung von *tZyklus* benutzen wir im OptiY-Workflow die Standardabweichung. Ihr Wert repräsentiert direkt die Streubreite in der verwendeten Maßeinheit.

Deshalb ist die Standardabweichung physikalisch einfacher zu interpretieren als der zugehörige Varianz-Wert:



Zur Berechnung von Mittelwert bzw. Standardabweichung (Streuung) der Gütekriterien nutzen wir die Möglichkeiten des für das Bearbeiten der Eigenschaften bereitgestellten "Rechners", z.B.:



Statistische Versuchsplanung

In Hinblick auf die Wechselwirkungen zwischen den Parameter-Streuungen kann man im Beispiel annehmen, dass die gleichen Bedingungen gelten, wie bei der vorherigen Ausschuss-Minimierung. Wir können deshalb für die probabilistische Simulation der Stichproben wieder das Moment-Verfahren mit dem Polynomansatz 2. Ordnung ohne Berücksichtigung von Interaktionen verwenden.

Optimierungsverfahren

Im Vergleich zu unseren bisherigen Optimierungsexperimenten haben wir nun ganz andere Bedingungen in Hinblick auf die Gütekriterien:

- Bei *Strafe* und *Versagen* handelt es sich, wie bereits bekannt, um interne Gütekriterien innerhalb der hierarchischen Optimierungsstrategie.
- Jedoch sollen insgesamt drei "echte" Gütekriterien möglichst gleichzeitig in Hinblick auf ihre Werte minimiert werden!
- Es ist sehr wahrscheinlich, dass es dabei zu Widersprüchen kommt und man sich letztendlich für eine Kompromisslösung entscheiden muss.
- Grundlage für diese Entscheidungsfindung ist die Pareto-Menge. Diese Lösungsmenge kann in OptiY nur bei Verwendung *Evolutionärer Algorithmen (Evolutionsstrategie)* generiert werden:



Eigenschaft	
Optimierung	
Automatischer Stop	False
Optimierungsschritte	300
Startschrittweite	Manuell
Verfahren	Evolutionäre Algorithmen
Parameter	Manuell
Anzahl der Eltern	3
Anzahl der Kinder	15
Evolutionäre Parameter	Experte
Anzahl der Pareto-Lösungen	20
Art der Rekombination	Rampenverteilung
Art der Selektion	Plus
Art der Schrittweitenregelung	Multischritt
Auswahl der Schrittweite	Mittelwert
Zufallsgenerator	Initialisiert

- Für das Optimierungsproblem werden wir die Werte aus den Standardeinstellungen etwas modifizieren. Dazu müssen wir eine Umschaltung von "Standard" auf "Manuell" und "Experte" vornehmen:
 - Wir arbeiten mit 3 Eltern, die gemeinsam in jeder Generation 15 Kinder durch Multirekombination erzeugen. Die Erhöhung der Elternzahl soll eine gewisse Glättung auf der etwas verrauschten Zielfunktion bewirken. Um den Selektionsdruck zu erhalten, musste die Kinderzahl entsprechend erhöht werden.
 - Das Eltern konkurrieren gemeinsam mit ihren Kindern darum, in der nächsten Generation wieder zu den 3 Eltern zu gehören (*Selektion=Plus*).
 - Die Anpassung der Mutationsschrittweite an die Zielfunktion erfolgt getrennt für jede Entwurfgröße (*Schrittweitenregelung=Multischritt*).
 - Die Anzahl der *Optimierungsschritte=300* beschreibt für das Optimierungsverfahren die Gesamtzahl der zu berechnenden Kinder. Man beachte, dass bei der zuverlässigkeitsbasierten Optimierung jedes "Kind" eine probabilistische Simulation einer Stichprobe darstellt, die mehrere (hier 7) Modell-Läufe benötigt!
 - Die *Anzahl der Pareto-Lösungen* ist eine interne Steuergröße für die Co-evolutionären Prinzipien bei der Mehrkriterien-Optimierung. Dieser Wert=20 ist unabhängig von der Größe der Pareto-Menge, welche man für die Darstellung in Diagrammen festlegen kann!

Entwurfparameter (Nennwerte und Streuungen)

Die Lösung der Robust-Optimierung kann sich von dem Ergebnis der Ausschuss-Minimierung unterscheiden. Das wird jedoch durch die zusätzlichen Gütekriterien gesteuert. Die Einstellungen für die Entwurfparameter können wir unverändert von der Ausschuss-Minimierung übernehmen:

- Für die Spulentemperatur T_{Spule} benutzen wir als Konstante weiterhin den Bereichsmitten-Wert von 25°C.
- Die Startwerte der variablen Nennwerte sollten dem Nennwert-Optimum entsprechen.
- Die Startschrittweiten dienen nun als Maß für die Mutation.
- Als Grenzen für den Suchraum haben sich folgende Werte als günstig erwiesen, um z.B. negative

Parameterwerte infolge "wilder" Schwingungen zu erschweren:

```
d_Anker      : 6...15 mm
w_Spule     : 200...1000
R20_Spule   : 0.1...10 Ohm
k_Feder     : 10...100 N/mm (Toleranz.kF_Mitte)
```

Die Streuungen besitzen die gleichen vorgegebenen, konstanten Werte, wie bei der Ausschuss-Minimierung:

```
RW_tel      : 1 (Toleranz.RW_relTol)
kPapier     : 1 (Toleranz.kP_relTol)
kFeder_rel  : 0.6 (Toleranz.kF_relTol)
```

Restriktionen

In Hinblick auf die Benutzung von Restriktionen müssen wir bei der mehrkriteriellen Optimierung umdenken, denn es wirkt nun eine erweiterte Zielfunktionshierarchie:

1. Einhaltung des Suchraums (Grenzen der variablen Entwurfsparameter)
2. Einhaltung aller Forderungen (Restriktionen) für die Nennwerte der Stichprobe (**Strafe=0**)
3. Einhaltung aller Forderungen (Restriktionen) für die gesamte Streuung der Stichprobe (**Versagen=0**)
4. Erfüllung der Wünsche (benutzereigene Gütekriterien)

Wenn wir alle Forderungen der Aufgabenstellung weiterhin als wirksame Restriktionen definieren, kommt die Optimierung mit Sicherheit kaum zur Bearbeitung der eigentlich interessierenden letzten Zielfunktion:

Bereits bei der Ausschuss-Minimierung mussten wir uns Bemühen, Restriktionsverletzungen für die Nennwerte der Stichproben weitestgehend zu reduzieren. Als besonders kritisch erwies sich hier eine Konvergenz der Lösung entlang von Restriktionsgrenzen. Durch geschicktes "Ansteuern" eines verfügbaren Drahtdurchmessers und eventueller Freigabe der Magnetlänge konnten wir mit viel Kreativität diese Hürde (hoffentlich) überwinden.

Nun müssen wir dafür Sorge tragen, ein $Versagen > 0$ von Stichproben bei der Ermittlung der pareto-optimalen Lösungsmenge möglichst zu vermeiden:

1. Die Gütekriterien sind so zu definieren, dass sie tendenziell die zugehörigen Forderungen der Aufgabenstellungen übererfüllen. Dies gilt im Beispiel für das Minimieren der Zykluszeit genauso, wie für das Minimieren der Drahterwärmung. Restriktionen, für welche solche Gütekriterien definiert wurden, können deshalb durch Aufweiten ihrer Grenzen unwirksam gemacht werden (**unwirksame Grenzen** für **tZyklus** und **dT_Draht**).
2. Falls im Sinne von $Versagen > 0$ noch kritische Restriktionen existieren, sollte man überlegen, ob diese durch Definition geeigneter Gütekriterien eliminiert werden können. Im Beispiel betrifft dies die unstetige Größe *Praegung*, welche zu einem Teilversagen einer Stichprobe führen kann. Da dies jedoch nur sporadisch auftritt, wird dadurch die Pareto-Optimierung nur unwesentlich behindert. Wir benötigen dafür kein weiteres Gütekriterium, müssen die Restriktion aber beibehalten (**Praegung=0.9...1.4**).
3. Forderungen der Aufgabenstellung, welche kritisch im Sinne von $Strafe > 0$ sind, behandeln wir wie bei der Ausschuss-Minimierung. Die Magnet-Länge begrenzen wir nun nicht mehr, da ein eventuell etwas größerer Bauraum realisierbar ist. Den Drahtdurchmesser berücksichtigen wir vorläufig nicht (**unwirksame Grenzen** für **L_Magnet** und **d_Draht**).

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_SimX_-_Nadelantrieb_-_Robust-Optimierung_-_Experimentkonfiguration“

Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Ergebnisse

Aus OptiYummy

↑

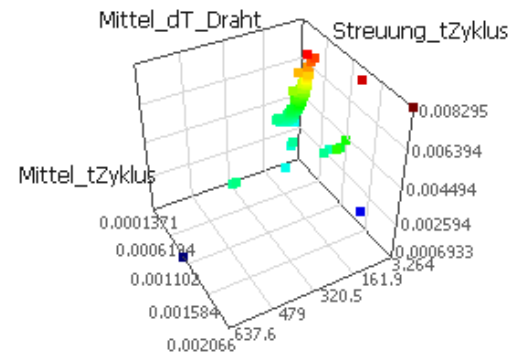
← →

Robust-Optimierung (Experiment-Ergebnisse)

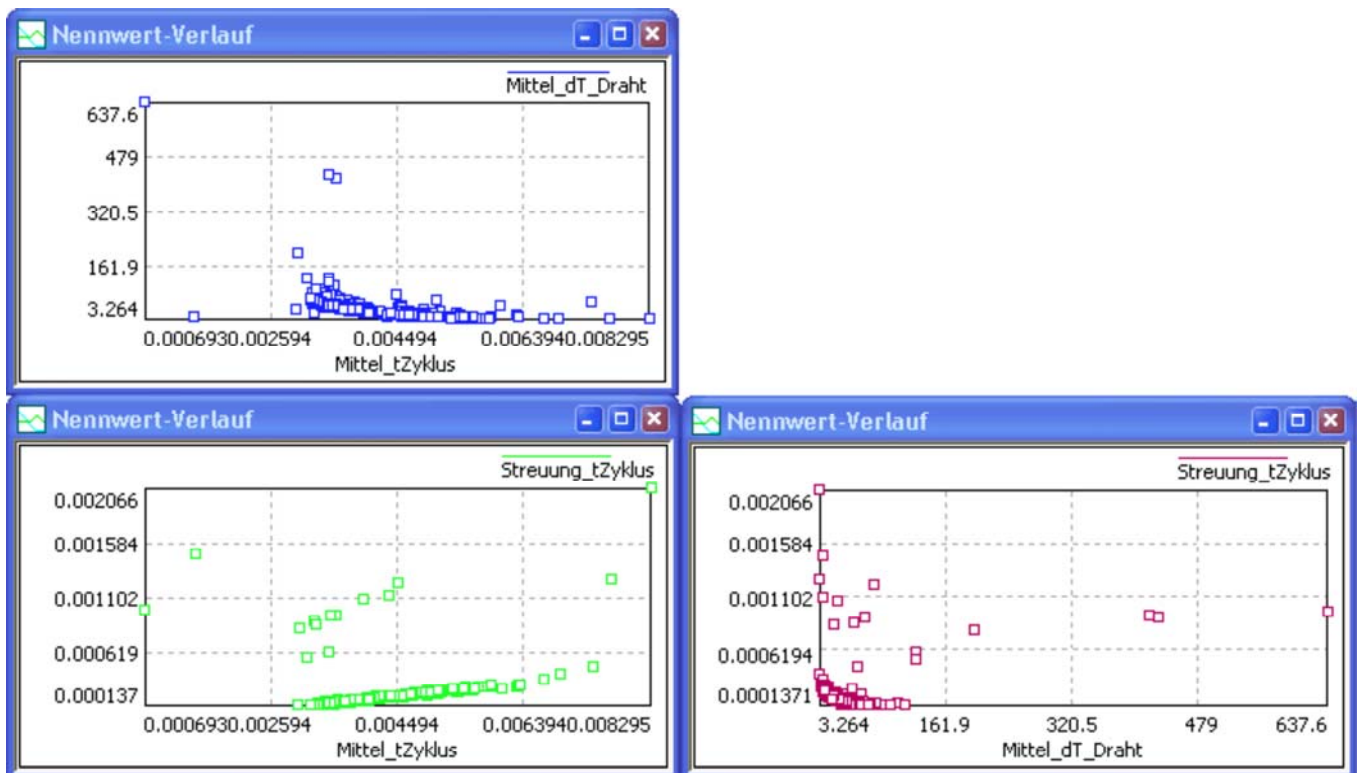
Experiment-Durchführung

Hinweis: Um die Zeit zu nutzen, sollten wir bereits vor der Konfiguration der Diagramm-Fenster die Optimierung starten.

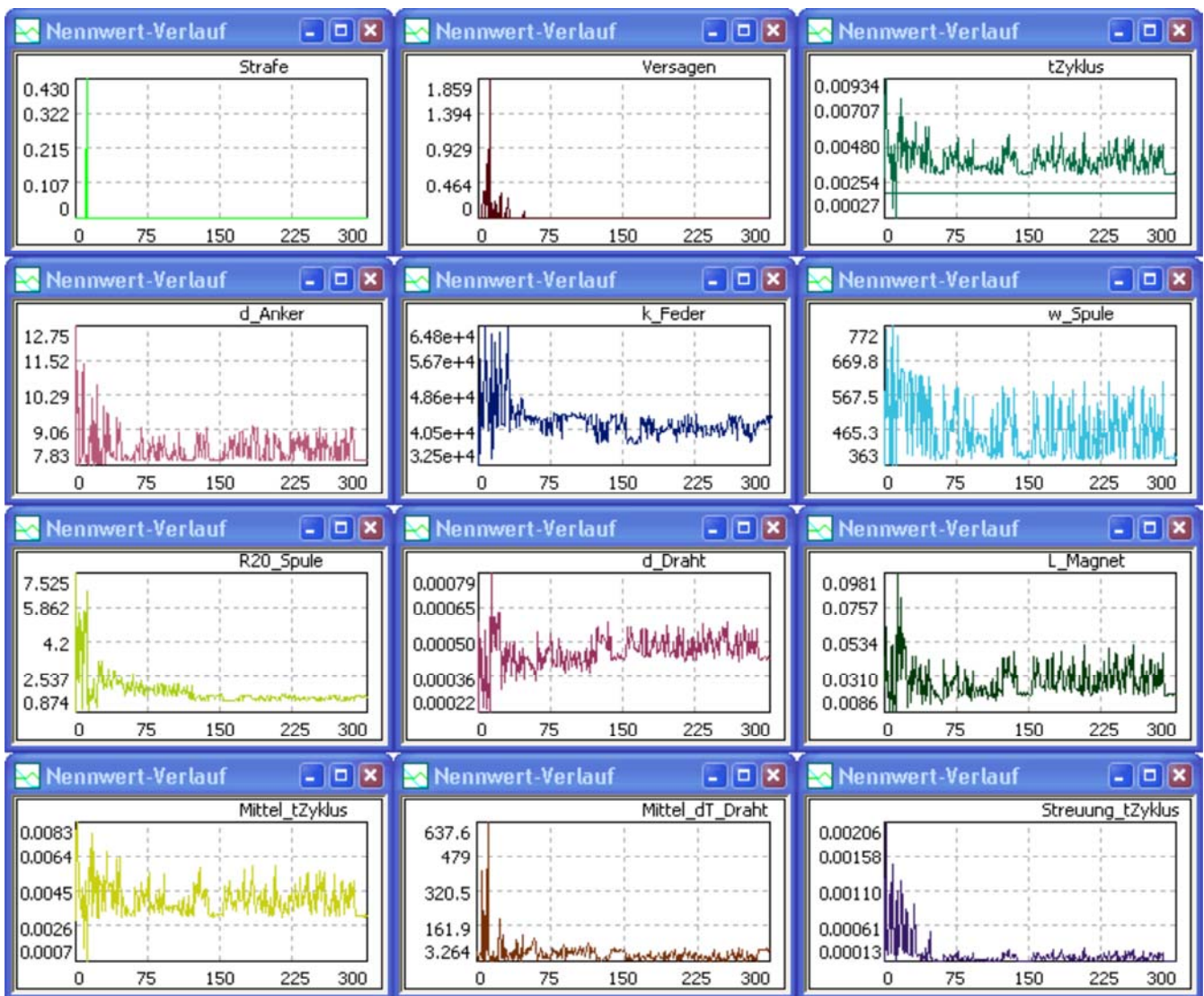
Da wir nur drei Gütekriterien berücksichtigen, können wir die Lösungen noch komplett in einer 3D-Darstellung als "Kriterien-Raum" visualisieren. Die Achsen belegen wir mit unseren Gütekriterien, wobei es sinnvoll ist, die mittlere Zykluszeit als funktionelle Größe auf die Z-Achse zu legen. Zusätzlich ist es sinnvoll, möglichst alle Abhängigkeiten zwischen den Gütekriterien als 2D-Darstellung im Sinne von Projektionen des mehrdimensionalen Kriterien-Raumes abzubilden:



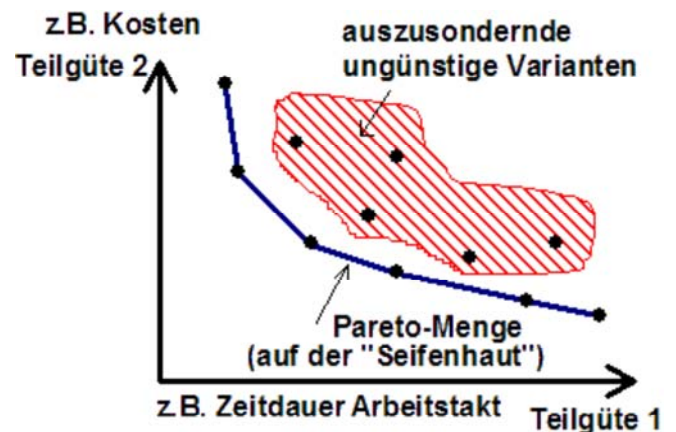
- Dazu stellt man jeweils zwei Kriterien in einem Nennwert-Fenster dar und schaltet danach unter **Analyse - Darstellung** auf 2D-Darstellung um (ein Kriterium muss dabei zuvor als X-Achse selektiert sein).
- Die 2D-Diagramme muss man dann auch noch so konfigurieren, dass nur die Lösungspunkte dargestellt werden.
- Im Beispiel ergibt das drei Projektionen der Lösungsmenge entsprechend der Anzahl möglicher Paar-Kombinationen:



Die einzelnen Lösungspunkte repräsentieren jeweils eine Stichprobe, die im Rahmen der co-evolutionären Optimierungsstrategie berechnet wird. Der Verlauf der Co-Evolution widerspiegelt sich in den Nennwert-Diagrammen der variablen Entwurfsparameter und der Bewertungsgrößen des Experiments:

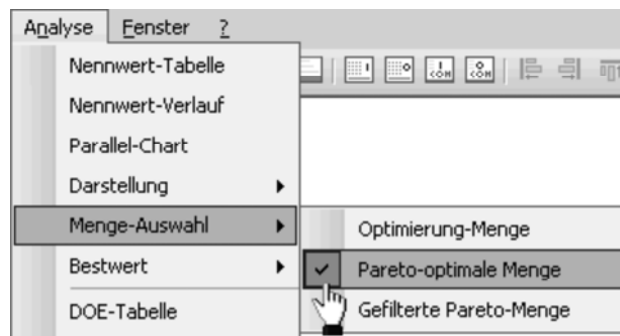


- Im Beispiel entsprechen 15 Stichproben (Kinder) jeweils einer Generation innerhalb der Evolutionsstrategie.
- Die Nennwert-Verläufe erinnern stark an **Rosa Rauschen**. Der längerfristigen evolutionären Entwicklung der Population sind die Mutationen der einzelnen Individuen überlagert.
- Die Population bewegt sich infolge der Evolutionsstrategie zuerst in den Bereich zulässiger Nennwert-Lösungen (Strafe=0).
- Danach entwickelt sich die Population weiter in Richtung minimalen Versagens innerhalb der Streuungen um die Nennwertlösungen (Versagen→0).
- Bildlich gesehen bewegt sich die Population zum Bereich der pareto-optimalen Lösungsmenge.
- Infolge der zusätzlich unterlegten co-evolutionären Strategie oszilliert die Population danach bei Versagen=0 endlos auf der pareto-optimalen Lösungsmenge.
- Durch die Mutationen entstehen auch einzelne "Ausreißer", welche im Normalfall zu sehr schlechten Lösungen führen. Gleichzeitig bieten diese Fluktuationen aber auch die Chance für größere Sprünge innerhalb des Suchraumes und damit dem Erreichen neuer "ökologischer Nischen".

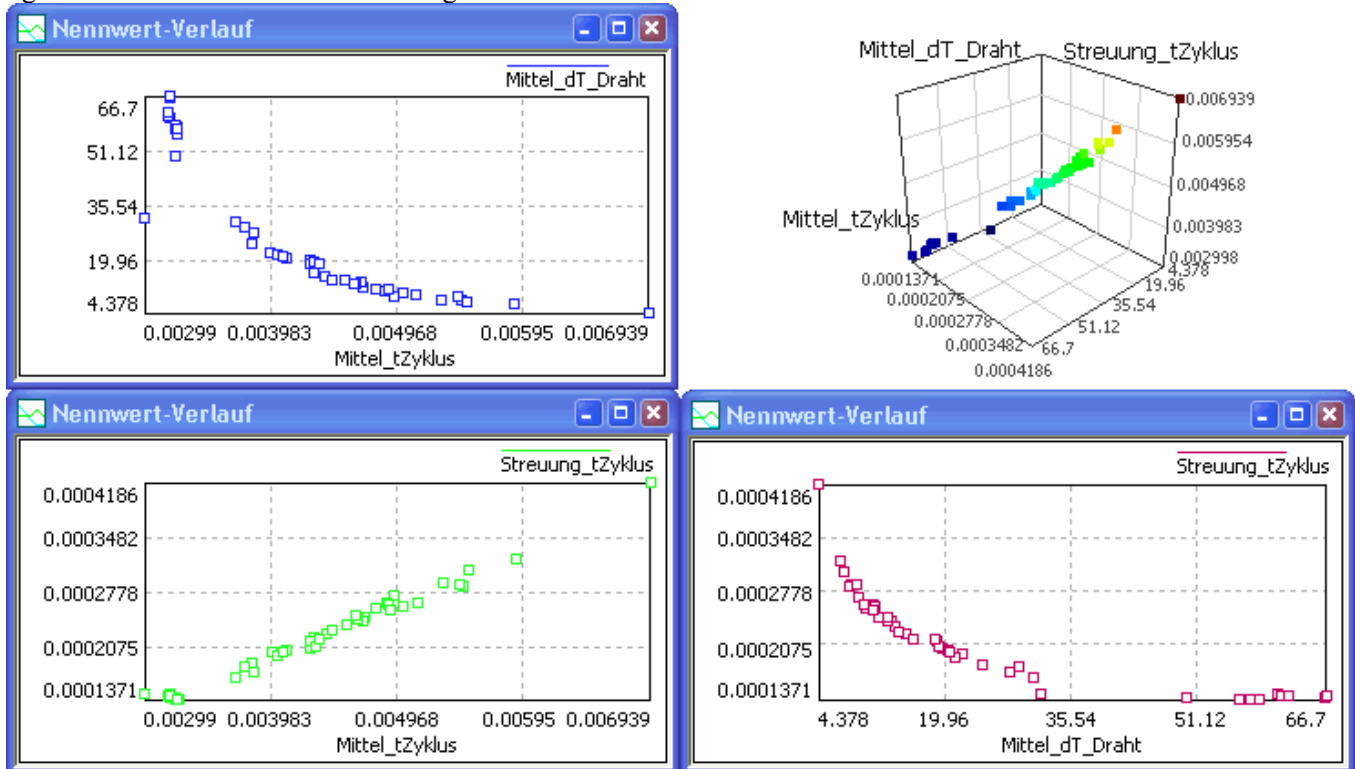


Experiment-Auswertung

Bisher werden in den 2D/3D-Diagrammen alle berechneten "Kinder" (=probabilistische Simulationsläufe) dargestellt. Uns interessieren aber nur die Mitglieder der Pareto-Menge:



Es bleiben nur die zulässigen Lösungen der "Seifenhaut" in den Diagrammen erhalten. Leider können einzelne Ausreißer (im Beispiel *Streuung_tZyklus* sehr groß) eine automatische Skalierung verhindern, welche nur die eigentlich interessierende Pareto-Menge umfasst:



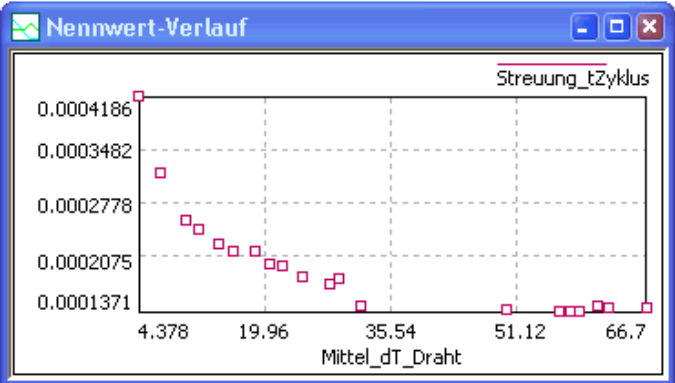
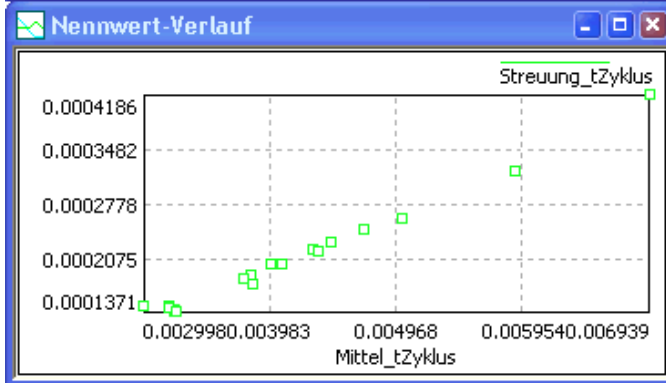
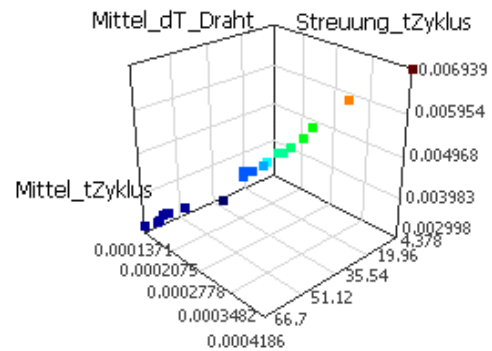
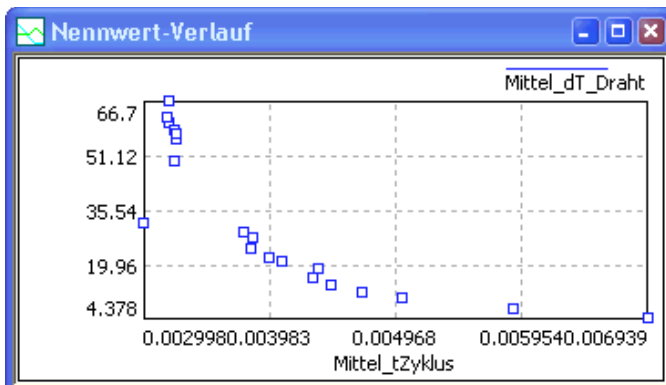
Falls dieser Ausreißer-Effekt störend in Erscheinung tritt (was im Beispiel noch nicht der Fall ist), gelangt man über einen Zwischenschritt zu einer sinnvoll skalierten Darstellung:

Man wählt **Analyse > Menge-Auswahl > Gefilterte Pareto-Menge**.

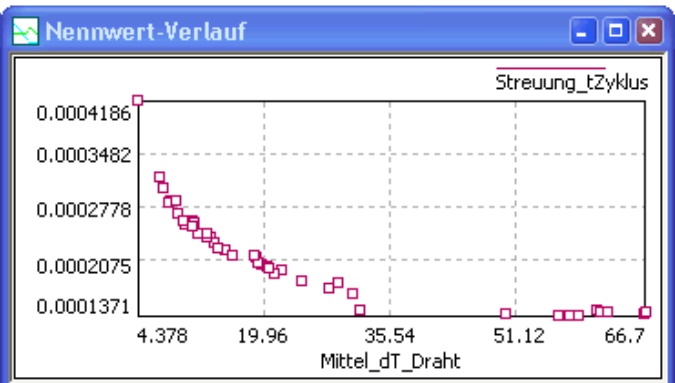
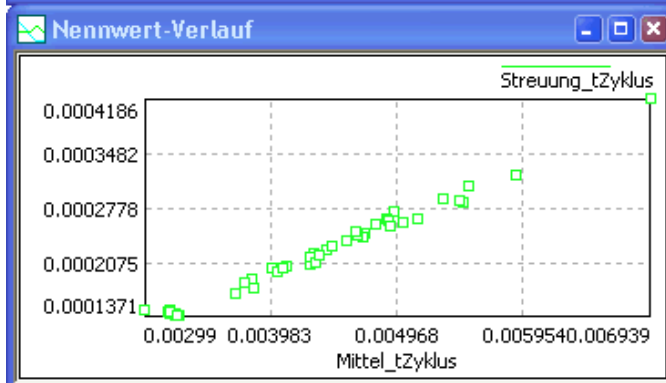
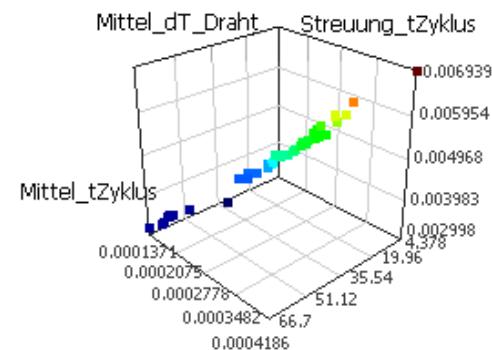
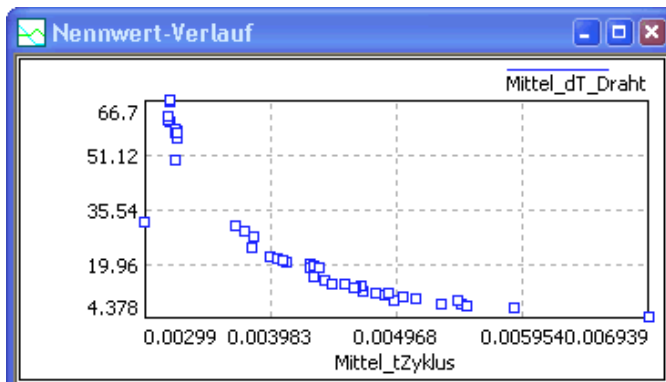
Standardmäßig enthält die gefilterte Pareto-Menge nur 10 Lösungen.

Wir erhöhen die Anzahl der Lösungen in der Pareto-Menge, indem wir in einem der Fenster-Eigenschaften diesen Wert=20 setzen. Der neue Wert wird dann für alle Fenster übernommen und die gefilterte Pareto-Menge wird neu berechnet. Die Lösungspunkte dieser gefilterten Pareto-Menge verteilen sich gleichmäßig auf der Pareto-Schale, weil dicht beieinander liegende Lösungen und Ausreißer herausgefiltert werden:

Eigenschaft	
3D Darstellung	
Rahmen	True
Punkte	True
Linien	False
Fläche	False
Pareto Anzahl	20
Auto-Skalierung	True



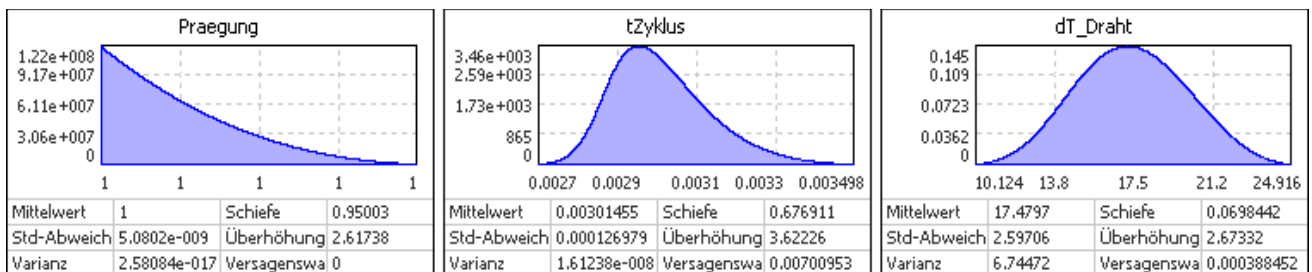
Danach schalten wir in allen 2D/3D-Diagrammen die Autoskalierung ab und wählen in der Menge-Auswahl wieder die vollständige Pareto-Menge:



Hinweis: Im 3D-Diagramm können nun Lösungen außerhalb der Grenzen liegen (im Beispiel nicht). Das würde nicht stören, weil es sich hierbei im Sinne der Robust-Optimierung um ungünstige Lösungen handelt.

Die Aufgabe besteht nun darin, aus der dargestellten Pareto-Menge eine günstige Kompromisslösung auszuwählen:

- Jeden einzelnen Lösungspunkt in einem 2D-Diagramm kann man mit dem Cursor auswählen.
- Die ausgewählte Lösung erscheint dann in allen 2D- und 3D-Diagrammen als markiert.
- Um einzelne Lösungen analysieren zu können, sollte man die Verteilungsdichte-Diagramme der Restriktionsgrößen darstellen, welche zu den Gütekriterien gehören. Nach Auswahl eines Lösungspunktes werden in diesen Diagrammen die Verteilungsdichten der Lösung dargestellt:

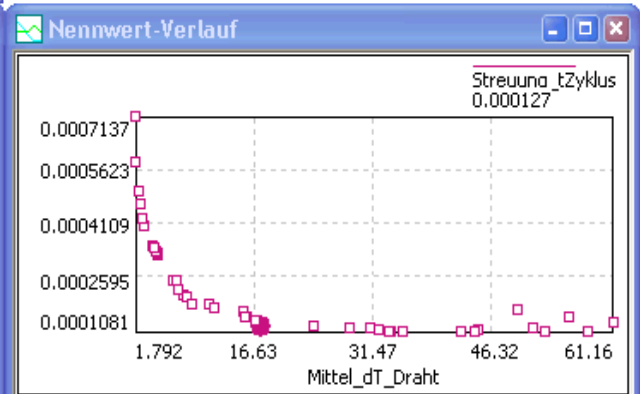
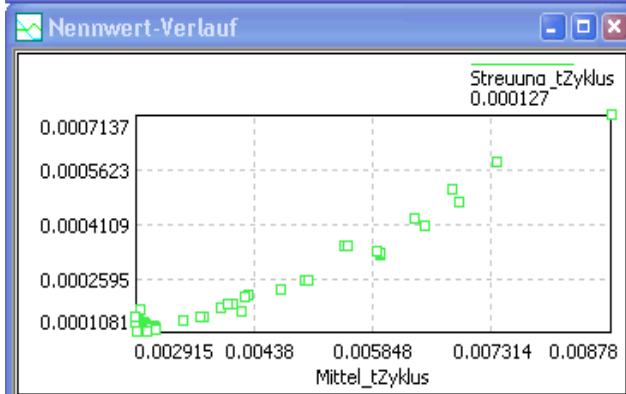
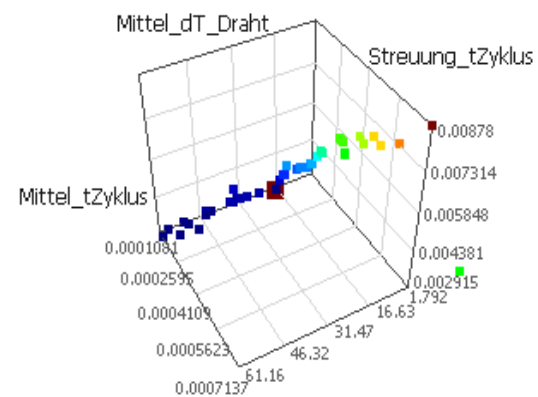
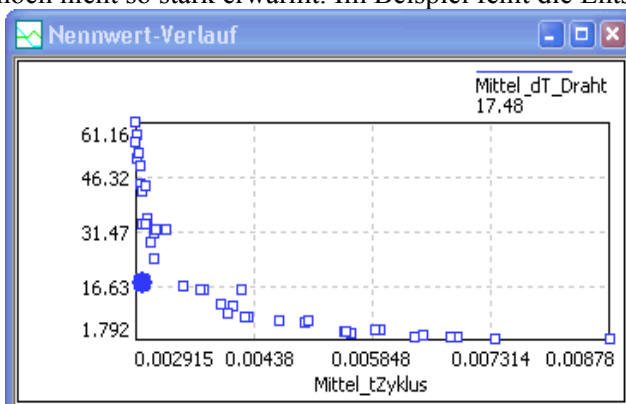


Wichtig: Damit die Teilversagenswahrscheinlichkeiten in Verteilungsdichte-Diagrammen angezeigt werden können, müssen zuvor die Restriktionsgrenzen für die Zykluszeit und die Spulenerwärmung wieder auf den geforderten Wert gesetzt werden!

Man kann auf Grundlage der Pareto-Menge entscheiden, wieviel Verschlechterung einzelner Gütekriterien man akzeptiert, um anderen Kriterien möglichst gut zu genügen:

Der Hauptwiderspruch zwischen möglichst schneller Zykluszeit und minimaler Erwärmung ist im zugehörigen 2D-Diagramm deutlich erkennbar. Je schneller der Magnetantrieb, desto größer ist die Erwärmung der Spule.

Man wird sich in diesem Diagramm für einen Antrieb entscheiden, der möglichst schnell ist und sich trotzdem noch nicht so stark erwärmt. Im Beispiel fehlt die Entscheidung leicht:



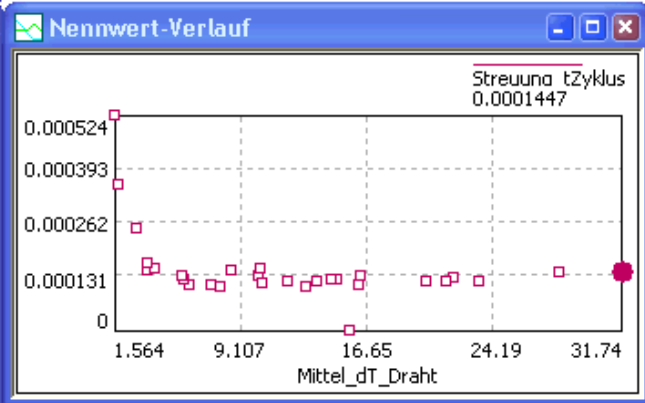
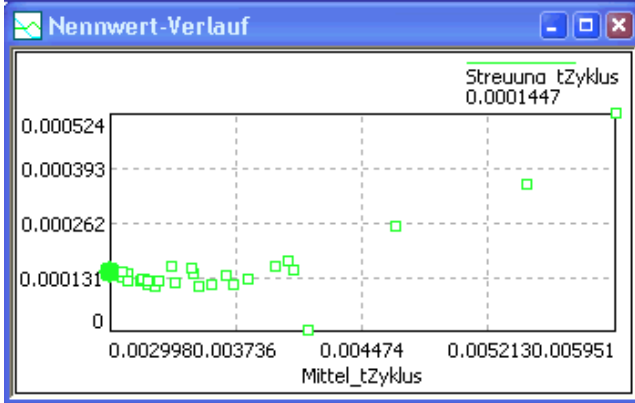
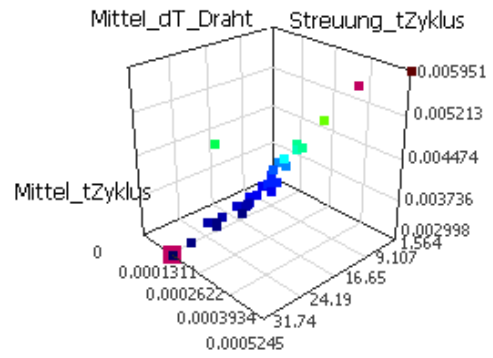
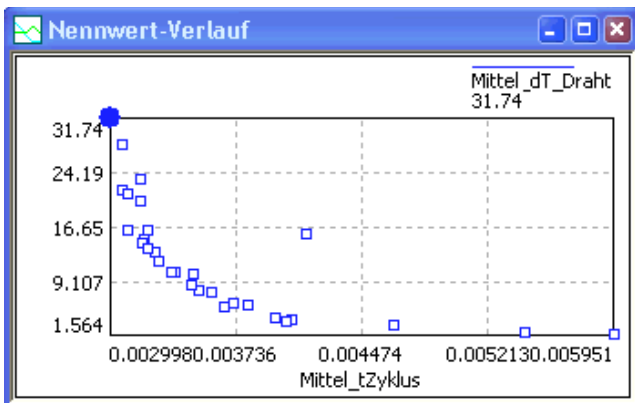
Obige Verteilungsdichten gehören zu der markierten Lösung. Die Stichprobe prägt stabil und die Teilversagenswahrscheinlichkeiten für die Zykluszeit und Drahterwärmung sind praktisch Null.

Im Beispiel sollte einem diese Lösung bekannt vorkommen. Es handelt sich um den Bestwert aus der Ausschuss-Minimierung! Diese Lösung hatten wir als Startwert für die multikriterielle Robustoptimierung benutzt. Es konnte keine Verbesserung im Sinne "möglichst schnell bei minimaler Erwärmung" gefunden werden

Die Streuung der Zykluszeit im Sinne einer robusteren Lösung konnte ebenfalls nicht verringert werden. Es gibt praktisch keine Lösungen, deren Zykluszeit weniger streut.

Da wir im Rahmen dieser Übung nur eine relative geringe Zahl (300) an Optimierungsschritten genutzt haben, sind die Lösungen noch nicht vollständig bis zur "richtigen" Paretomenge konvergiert. Man erkennt das daran, dass die Anfangslösung als beste Kompromisslösung noch etwas außerhalb der berechneten Paretomenge liegt.

Im Beispiel kommt man nach ca. 2000 Optimierungsschritten der realen Pareto-Menge schon recht nahe (für Teilnehmer der Übung nicht erforderlich!):



In obigen Diagrammen erkennt man einen **Ausreißer mit Streuung_tZyklus=0**. Hierbei kam es zu numerischen Problemen bei der Simulation der Stichprobe, welche anscheinend vom OptiY nicht erkannt wurden.

Interessant an dieser genauer berechneten Pareto-Menge ist die Existenz mehrerer in Hinblick auf die Zykluszeit gleichberechtigte Lösungen. Diese führen jedoch teilweise z.B. auf Grund dickeren Drahtes und größerer Magnetlänge zu bedeutend geringerer Erwärmung!

Hinweis:

Im Beispiel wurde bereits bei der Ausschuss-Minimierung eine robuste Lösung gefunden, weil die Zeit-Forderung nur durch Ausschöpfung aller anderen Grenzwerte erfüllbar war. Die gesamte Stichprobe kann dabei im Rahmen der Parameterstreuung nur dann innerhalb der zulässigen Grenzen bleiben, wenn die Streuung des Verhaltens ebenfalls minimiert wird. Die anschließende multikriterielle Robustoptimierung hat dann dieses Ergebnis bestätigt.

Problem des Drahtdurchmessers:

Bei der Ausschuss-Minimierung war es noch problemlos möglich, einen genormten Drahtdurchmesser mit Hilfe der entsprechenden Restriktionsgröße zu erzwingen. Da die damit erreichte Optimal-Lösung im Beispiel beibehalten werden kann, gibt es das Problem des Drahtdurchmessers bei der multikriteriellen Robustoptimierung nicht mehr. Die sich im Beispiel mit $d_Draht=0.6\text{ mm}$ ergebende Magnetlänge erfüllt sogar die ursprüngliche Vorgabe für die Magnetlänge. Eine eventuell erforderliche Vergrößerung des Magneten wird sich praktisch immer realisieren lassen:



Falls sich wider Erwarten eine andere Lösung als optimale Kompromisslösung erweist, so wird der benötigte Drahtdurchmesser wahrscheinlich keinem Normdraht entsprechen:

- Infolge der zusätzlich erforderlichen, sehr engen Draht-Restriktion scheitert dann die co-evolutionäre Strategie mit großer Wahrscheinlichkeit. Eine Oszillation der Lösung entlang der Pareto-Menge kommt nicht zustande!
- In diesem Fall hilft nur unter Einbeziehung der gewonnenen Erkenntnisse zur Robust-Optimierung eine erneute Ausschuss-Minimierung. Im Rahmen der Übung soll dies jedoch nicht mehr durchgeführt werden!

Experiment-Ergebnisse (Robust-Optimierung)

Falls die optimale Lösung der Ausschuss-Minimierung nicht bestätigt werden konnte, wird man sich für eine bessere Lösung entscheiden. Mit welchen **technisch sinnvollen** Nennwerten ergibt sich dann (ohne Berücksichtigung von Normdrähten) eine möglichst robuste und trotzdem schnelle Antriebslösung mit der Ausschuss-Quote Null:

- . **Mittel_tZyklus** (mittlere Zykluszeit)
- . **Streuung_tZyklus** (um die mittlere Zykluszeit)
- . **Mittel_dT_Draht** (mittlere Spulen-Erwärmung)
- . **d_Anker** (Ankerdurchmesser)
- . **L_Magnet** (Magnetlänge ohne Restriktion!)
- . **R20_Spule** (Widerstand der Spule bei 20°C)
- . **w_Spule** (Windungszahl)
- . **d_Draht** (Drahtdurchmesser)
- . **Feder.k** (Elastizitätskonstante)
- . **Feder.s0** (Vorspannweg)
- . **Widerstand.R** (Abschaltwiderstand)

← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php/Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Ergebnisse>“