Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung

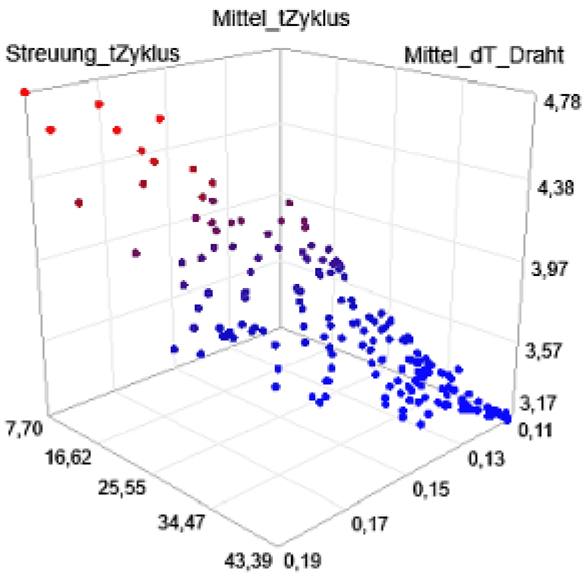
Aus OptiYummy

↑

← →

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 Strukturoptimierung erhöhte die Robustheit unseres Prägenadel-Antriebs. Trotzdem führten die Ergebnisse auch dieser Nennwert-Optimierung wieder zu einer Versagenswahrscheinlichkeit von merklich über 0%. Eine zuverlässigkeitsbasierte Optimierung unter Einbeziehung der wirksamen Streuungen soll nun wirklich optimale Entwurfsparameter ergeben, welche die Funktionssicherheit im gesamten Bereich der Toleranzen gewährleisten.



Selbststudium der Grundlagen

1. ***Optimierungsverfahren***
2. ***Probabilistische Optimierung***

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 **Optimierung** laden ihre Ergebnisse verpackt in einem Archiv-File im zugehörigen Opal-Kurs hoch.
- Das Archiv-File muss die konfigurierten **.isx**- und **.opy**-Dateien der Ausschuss-Minimierung und der Robust-Optimierung enthalten. Zusätzlich sind die Fragen zu den optimalen Lösungen zu beantworten.
- Einsendeschluss ist 2 Wochen nach dem Übungstermin um 10 Uhr.

← →

Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimi rung - Ausschuss-Problem

Aus OptiYummy

↑

←→
Ausschuss-Minimierung (Experiment-Konfiguration)

Inhaltsverzeichnis

Zielstellung der Ausschuss-Minimierung

- Im vorhandenen Streubereich der Parameter muss der Prägenadel-Antrieb sicher funktionieren.
- D.h. alle in Form von Restriktionen beschriebenen Forderungen an den Antrieb müssen eingehalten werden.
- Wir streben eine Versagenswahrscheinlichkeit von Null an.

Vorbereitendende Arbeiten

Simulationsmodell:

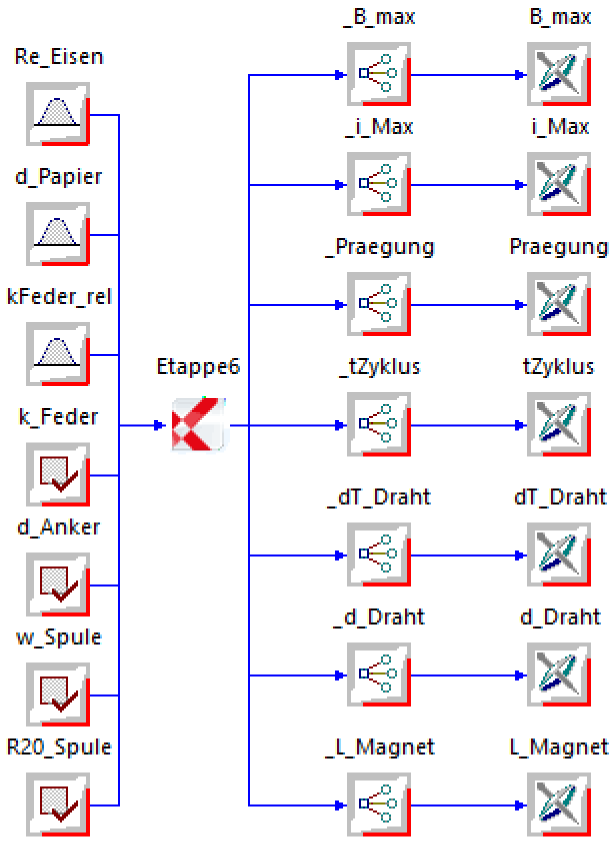
- Um auf den Ergebnissen der Nennwertoptimierung der vorherigen Etappe aufzubauen, erzeugen wir ein Modell **Etappe6_xx_Ausschuss.isx** als Kopie der archivierten Datei **Etappe5_xx_Nennwert.isx**.
- Teilnehmer der Lehrveranstaltung **"Optimierung"** benutzen wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse weiterhin einheitlich einen Wirbelstromwiderstand **1.5 mOhm**.
- Als Temperatur der Spule verwenden wir im SimulationX-Modell die maximal zulässige Temperatur **T_Spule=70°C**.
- Wir lassen die Strombegrenzung auf dem Wert von **i_Grenz = 3 A**.

Optimierungsworkflow:

- Wir benötigen eine neue OptiY-Projektdatei **Etappe6_xx_Ausschuss.opy**.
- Günstig ist dafür als Grundlage eine Kopie der Datei **Etappe5_xx_Nennwert.opy**.
- ***Wichtig***:
  - Als Startwert für die Ausschuss-Minimierung muss man den Bestwert aus der vorherigen Nennwert-Optimierung eintragen. Dann kann man direkt die sich ergebenden Veränderungen für die Versagensminimierung verfolgen.
  - Dieser Bestwert sollte in der kopierten .opy-Datei enthalten sein und kann als neuer Startwert übernommen werden (***Analyse > Bestwert > Parameter übernehmen***).

In **Etappe6_xx_Ausschuss.opy** stellen wir die Verbindung mit dem aktuellen SimulationX-Modell **Etappe6_xx_Ausschuss.isx** her. Danach ergänzen wir die erforderlichen Streuungen:

- Wir berücksichtigen nur die drei Streuungen mit dem größten Einfluss (im Beispiel: Wirbelstromwiderstand, Papierdicke und Federkonstante).
- Mit unseren Erfahrungen sollte es kein Problem darstellen, diese im den Workflow eingefügten Streuungen mit den zugehörigen Modellgrößen zu verbinden:



Hinweis:

- Unabhängig von den individuellen Ergebnissen müssen alle Teilnehmer der Lehrveranstaltung **"Optimierung"** ebenfalls diese 3 Streuungen benutzen!

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 Momentenmethode 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·n²+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 hatten.

Optimierungsverfahren

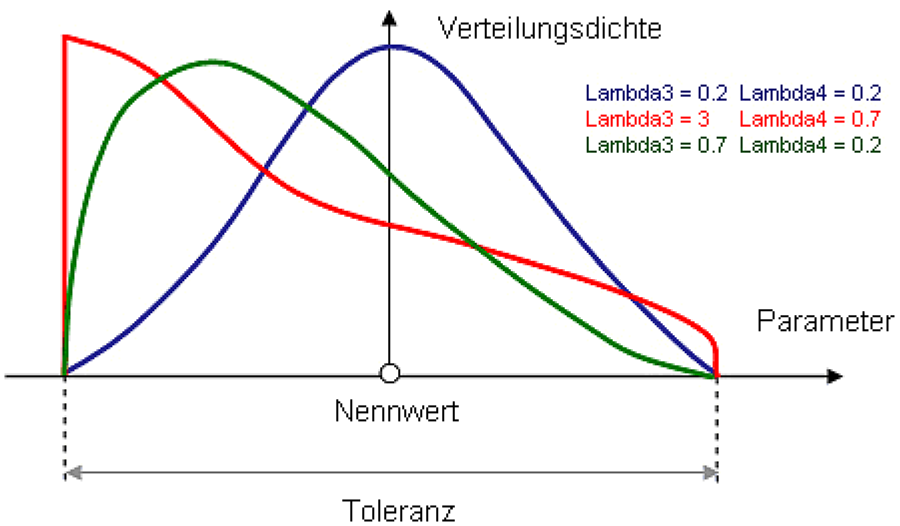
Im Unterschied zu den Sample-Verfahren ist bei den Momenten-Verfahren das "numerische Rauschen" bei der Simulation einer Stichprobe gering:

- 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 unbekannten 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 Streuungen der Ausgangsgrößen werden bei der Momenten-Methode als allgemeine Lambda-Verteilung durch den Vergleich mit einer bekannten Momenttabelle approximiert. Diese Berechnung erfolgt also vollkommen analytisch und deterministisch ohne Zufallszahlen.
- 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 *Lambda1*, *Lambda2*, *Lambda3* und *Lambda4* kann man eine beliebige Verteilungsfunktion abbilden. Dabei ist *Lambda1* der Mittelpunkt und *Lambda2* die Skalierung der Verteilung. *Lamda3* und *Lambda4* sind die Formfaktoren. Bei symmetrischer Verteilung ergibt sich *Lambda3=Lambda4*. Vertauschen von *Lambda3* und *Lambda4* bedeutet eine Spiegelung der Verteilung um den Mittelpunkt. Der Toleranzwert ist intern festgesetzt auf *T=2/Lambda2* 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 den Rändern der Toleranzbreite.

Schlussfolgerung für die Konfiguration:

- **Hooke-Jeeves-Verfahren** kann verwendet werden, da die auf Basis der Momenten-Methode gebildete Zielfunktion hinreichend glatt ist.
- **300 Optimierungsschritte** könnten ausreichend sein (kann nachträglich problemlos verändert werden).

Entwurfsparameter (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.

Der aktuelle Wert unserer Entwurfsgrößen muss dem individuellen Bestwert aus der vorherigen Struktur-Optimierung entsprechen:

- Die folgenden Suchraumgrenzen gewährleisten, dass sich das Optimum innerhalb des Suchraums befindet und die Grenzen die Suche nicht behindern:

```
d_Anker    : 5...15 mm
w_Spule    : 100...1000
R20_Spule  : 0.1...10 Ohm
k_Feder    : 1...100 N/mm
```

- 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
```

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

```
d_Papier   : Nennwert=0,2 mm  / Toleranz=0,2 mm      / Gleichverteilung (verschiedene Papiersorten)
Re_Eisen   : Nennwert=1,5 mΩ  / Toleranz=1,5 mΩ      / Normalverteilung
kFeder_rel: Nennwert=1        / Toleranz=0,6         / Normalverteilung (±30% um normierten Nennwert)
```

- Mit der gewählten **Second Order Methode** (ohne Interaktionen) sind nur 7 Abtastschritte pro Stichprobe erforderlich.

Restriktionen

Der Workflow muss folgende Forderungen in Hinblick auf den Prägenadel-Antrieb enthalten:

```
Praegung = 1 (Prägungsmaß)
tZyklus  ≤ 0.0036 s (Zykluszeit)
L_Magnet ≤ 30 mm (Magnetlänge) ?
dT_Draht ≤ 40 K (Erwärmung)
d_Draht  = Norm-Drahtdurchmesser
```

Der **Drahtdurchmesser** ist wieder eine kritische Größe bei dieser Optimierung:

- 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 auf unwirksame Werte setzen (z.B. 0.1 mm bis 1 mm). Bei der Ausschuss-Minimierung erkennt man dann die Tendenz der erforderlichen Veränderung.

Die **Magnetlänge** behindert mit ihrer bisherigen Begrenzung auf **30 mm** die Lösungssuche:

- Geringere Erwärmung erfordert mehr Volumen (Wickelraum für dickeren Draht und Oberfläche für Wärmeabführung).
- Kürzere Zykluszeiten erfordern eine geringe Ankermasse (Topfmagnet mit kleiner Magnetlänge)
- Die Suche einer optimalen Kompromisslösung wird durch die bisherige Längen-Begrenzung gestört!
- Wir setzen deshalb vorläufig einen unwirksamen oberen Grenzwert für die Magnetlänge (z.B. **60 mm**).
- Ob die zu erwartende geringe Überschreitung der bisher angestrebten Magnetlänge akzeptabel ist, entscheiden wir nach dem Finden des Bestwertes.

Zusätzlich sind noch die beiden Restriktionen zur Beachtung der eingeschränkten Modell-Gültigkeit erforderlich:

```
B_max ≤ 1.65 T (max. zulässige Flussdichte für die verwendete Magnetisierungskennlinie)
i_Max ≤ 1.5 A  (verhindert die "Nutzung" der Magnetsättigung im Nennwert-Betrieb)
```

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

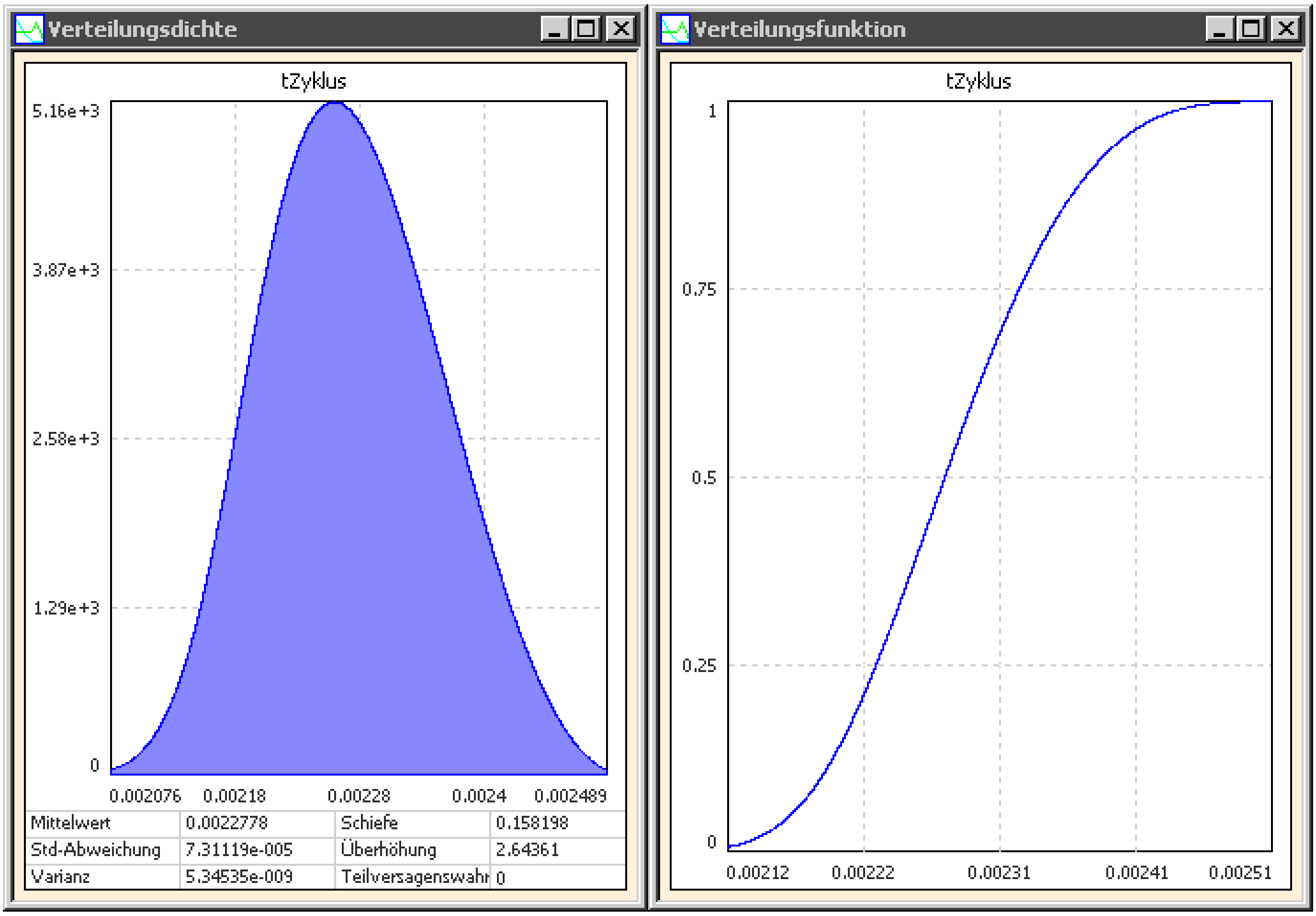
- Bei der Nennwert-Optimierung wird nur überprüft, ob der aktuelle Wert jeder Restriktionsgröße im zulässigen Bereich liegt. Der zulässige Wertebereich wird jeweils durch Unter- und Obergrenze beschrieben.
- Bei der zuverlässigkeitsbasierten Optimierung muss jedoch überprüft werden, ob der gesamte aktuelle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

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

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.
2. 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 anzugeben, 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=Ymax*0.0067 unterschreitet (Ymax = maximaler Funktionswert).

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·σ** 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.

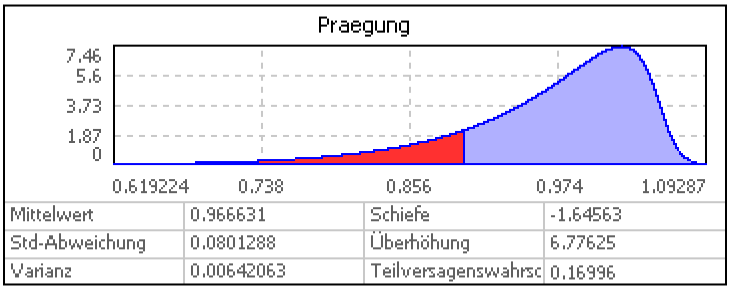
Unstetig streuende Restriktionsgrößen:

Praegung ist ein Maß für das erfolgreiche Prägen des Papiers. Infolge des im Modell eingebauten Anschlages für die Nadelbewegung ist im Erfolgsfall **Praegung=1.000...**:

- Zum Glück ist unsere bisherige optimale Lösung so robust, dass die Prägung in der gesamten Stichprobe gewährleistet ist. Trotzdem sollte man weiterhin die Möglichkeit des teilweisen Nichtprägens berücksichtigen!
- 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 zu **Praegung=1**!

- Deshalb sollte man den unteren Grenzwert einer unstetigen 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:

Eigenschaft	
Restriktion Daten	
Name	Praegung
Einheit	
Kommentar	Prägungsgrad
Werte	
Untergrenze	0.85
Obergrenze	1.3
Gewichtsfaktor	1
Zulässiger Ausschuß [0..1]	0.003
Last Value	1



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

Gütekriterien

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 aber wie gewohnt als Teil der Strafzielfunktion 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 **3.6 ms** in der Stichprobe teilweise überschreiten. Deshalb sollte man zuerst diesen Grenzwert eintragen, da diese Forderung in jedem Fall einzuhalten ist.

Strafe:

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

Versagen:

- Wird automatisch als Gütekriterium ergänzt, wenn 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 $\boldsymbol{F}$ ergibt sich bei der Momenten-Methode als Summe der mit $\boldsymbol{w_i}$ gewichteten Teilversagenswahrscheinlichkeiten $\boldsymbol{F_i}$:

$$F = \sum w_i \cdot F_i$$

Anschauliches Gesamt-Versagen trotz Momentmethode

Verwendet man für alle Restriktionsgrößen den Gewichtsfaktor=1, kann man "meist" davon ausgehen, dass nach Erreichen des minimal möglichen Versagen-Wertes auch die Ausschuss-Quote dem möglichen Minimalwert entspricht. Leider gibt es mindestens zwei Ausnahmen von dieser Annahme, welche in unserem Beispiel beide zu beachten sind:

1. Da nur das Maß für das Versagen minimiert wird, werden die verwendeten Gewichtsfaktoren die Dimensionierung des erreichten Bestwertes meist beeinflussen:
   - Für unseren Antrieb beeinflussen die Gewichtsfaktoren z.B. den Kompromiss zwischen Spulenerwärmung und Schnelligkeit (wenn nicht beide Teilversagenswahrscheinlichkeiten gemeinsam den Wert=0 erreichen können).
   - Die Restriktionsgrößen für den Schwerpunkt der Ausschuss-Minimierung (die Einhaltung einer möglichst schnellen **tZyklus ≤ 3.6 ms** bei vollständiger **Praegung = 1**) sollte man unbedingt dauerhaft mit dem **Gewichtsfaktor=1** versehen. Damit entspricht das "tZyklus"-Teilversagen bei vollständigem Prägen ungefähr dem Gesamtversagen, wenn unwichtigere Forderungen viel geringer gewichtet wurden.
   - Die vorherigen Analysen ergaben, dass bereits vor der Ausschuss-Minimierung die teilweise auftretenden Übertemperaturen unkritisch sind. Deshalb könnte man z.B. in einer zweiten Stufe für die **dT_Draht**-Restriktion einen geringeren **Gewichtsfaktor=0.1** verwenden (in der Hoffnung durch etwas mehr Erwärmung noch schnellere Zykluszeiten zu erreichen).
2. Geometrische Forderungen, welche nur von den Entwurfsparametern, aber nicht von den Streuungen abhängen, sind entweder erfüllt oder nicht erfüllt (Versagen = 0 oder 1):
   - Diese Restriktionen sollen nur beim Ansteuern von **Strafe=0** für den aktuellen Nennwert wirken, nicht beim Versagen der Stichprobe.
   - Um Sprünge von jeweils 100% je verletzter Geometrie-Restriktion beim Versagen zu verhindern, kann man z.B. **Gewichtsfaktor=0.01** für diese Größen verwenden.
3. Existieren Hilfsrestriktionen (für unseren Magnet-Antrieb **i_Max** und **B_max**), welche z.B. die Lösungssuche auf den gültigen Modellbereich beschränken, behindern diese das Erreichen eines funktionellen Ausschuss-Minimums:
   - Die Hilfsgrößen sollen nur beim Ansteuern von **Strafe=0** für den aktuellen Nennwert wirken.
   - Die Minimierung des Gesamt-Versagens bei Einhaltung von Strafe=0 darf durch diese Hilfsgrößen nicht beeinflusste werden (obwohl deren Teilversagen im Bereich von 50% liegen kann!).
   - Diese beiden Ansprüche kann man erfüllen, indem man die Wichtung solcher Hilfsrestriktionen sehr gering hält, z.B. **Gewichtsfaktor=0.01**.

Die Zielstellungen in Hinblick auf einen "korrekten" Wert für das Gesamt-Versagen, als auch in Hinblick auf ein Erreichen eines akzeptablen Bestwertes für das Ausschuss-Minimum können wir durch die Wahl geeigneter Gewichtsfaktoren für die Restriktionen erfüllen:

1. **Essentielle Forderungen** (tZyklus, Praegung) → permanent **Gewichtsfaktor = 1**
2. **Unkritische Forderungen** (dT_Draht) → anfänglich **Gewichtsfaktor = 1**, danach testweise **Gewichtsfaktor = 0.1**
3. **Geometrische Forderungen** (L_Magnet, d_Draht) → **Gewichtsfaktor = 0.01**
4. **Hilfsrestriktionen** für den Optimierungsprozess (i_Max, B_max) → **Gewichtsfaktor = 0.01**

Die Gewichtsfaktoren für alle Restriktionsgrößen des Experiments sind entsprechend zu modifizieren!

***Anmerkungen*:**

- Den "korrekten" Wert für das Gesamtversagen trotz Momenten-Methode können wir nur realisieren, weil in unserem Beispiel praktisch nur die Zykluszeit als einziges Versagenskriterium übrigbleibt.
- Mit Ausnahme des **Gewichtsfaktor = 1** sind die übrigen konkreten Werte nur Vorschläge zur Größenordnung der Abstufung der Wichtung, welche sich im Beispiel jedoch bewährt haben.

← →

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

Aus OptiYummy

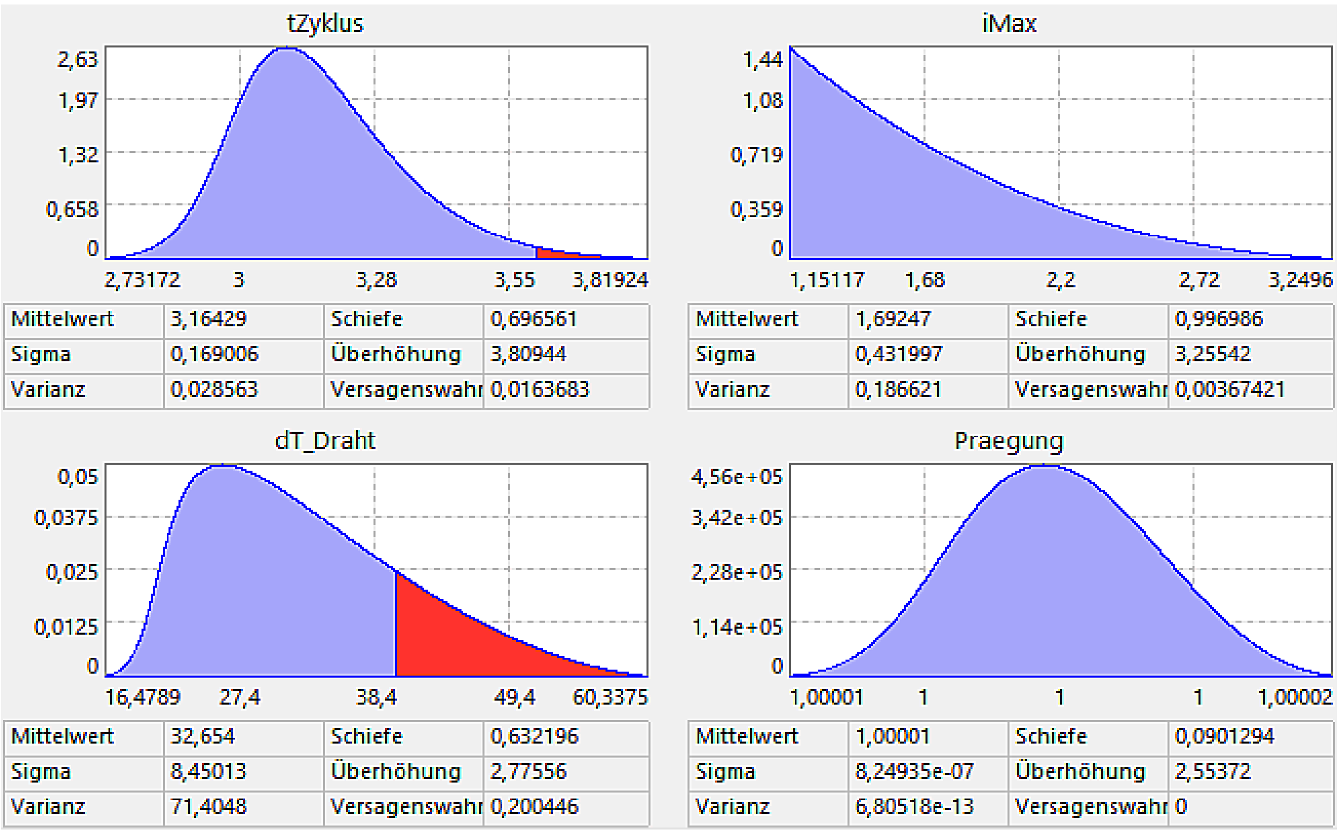
↑

← →
Ausschuss-Minimierung (Experiment-Ergebnisse)

Ausschuss-Minimierung ist ein zweistufiger Prozess:

1. Das Finden einer zulässigen Lösung für die Nennwerte der Entwurfsparameter 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.

Unser Nennwert-Optimum funktioniert nach der Struktur-Optimierung schon sehr robust innerhalb des vorgegebenen Streubereiches:

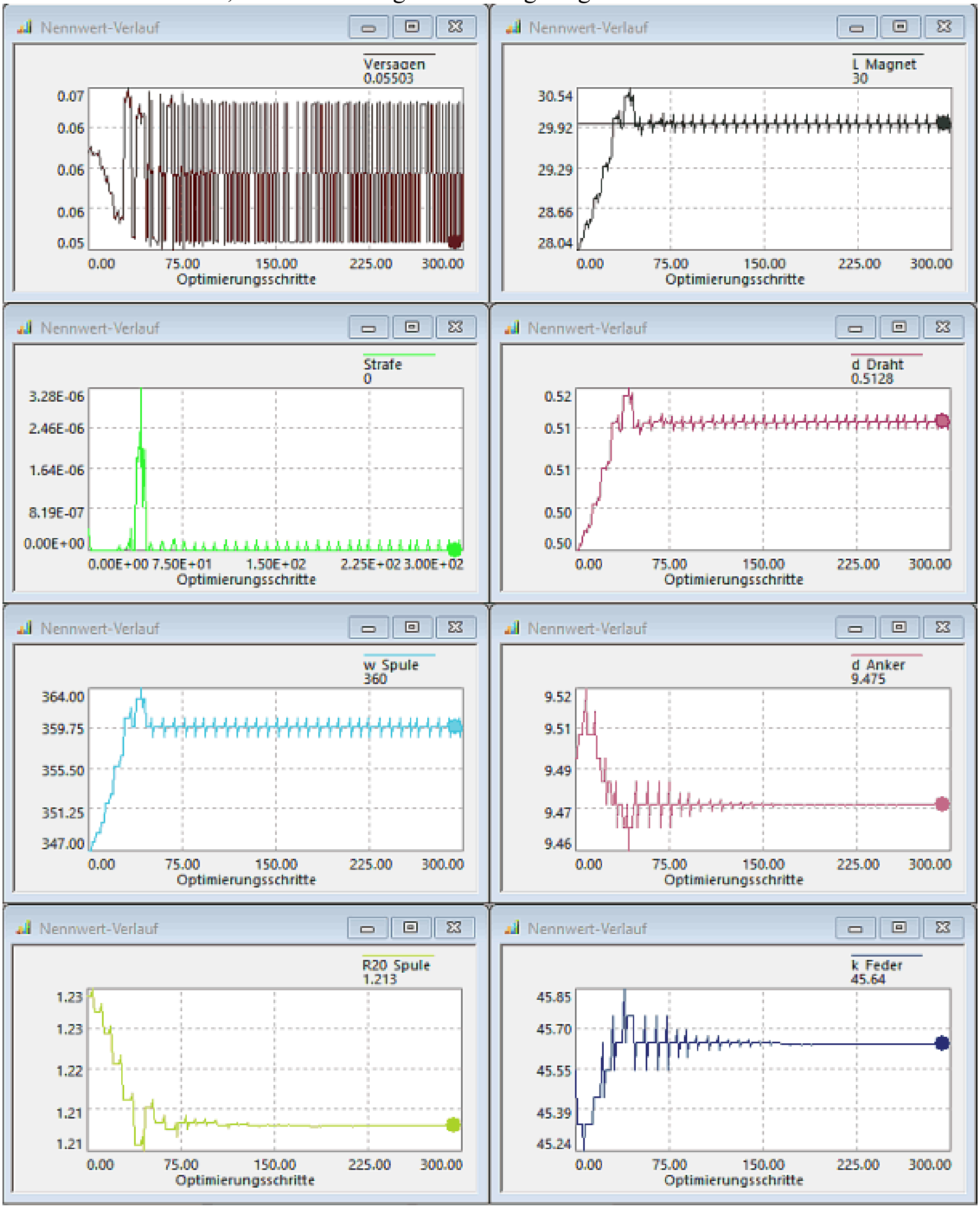


- Es besteht die Möglichkeit, dass die geforderte Zykluszeit manchmal etwas überschritten wird.
- In ca. 1/5 der Stichprobe wird die geforderte max. Temperatur-Erhöhung des Spulendrahtes um bis zu 20 K überschritten.

Damit besteht das Ziel der Ausschuss-Minimierung darin, mit geringerer Erwärmung die geforderte Zykluszeit möglichst immer einzuhalten.

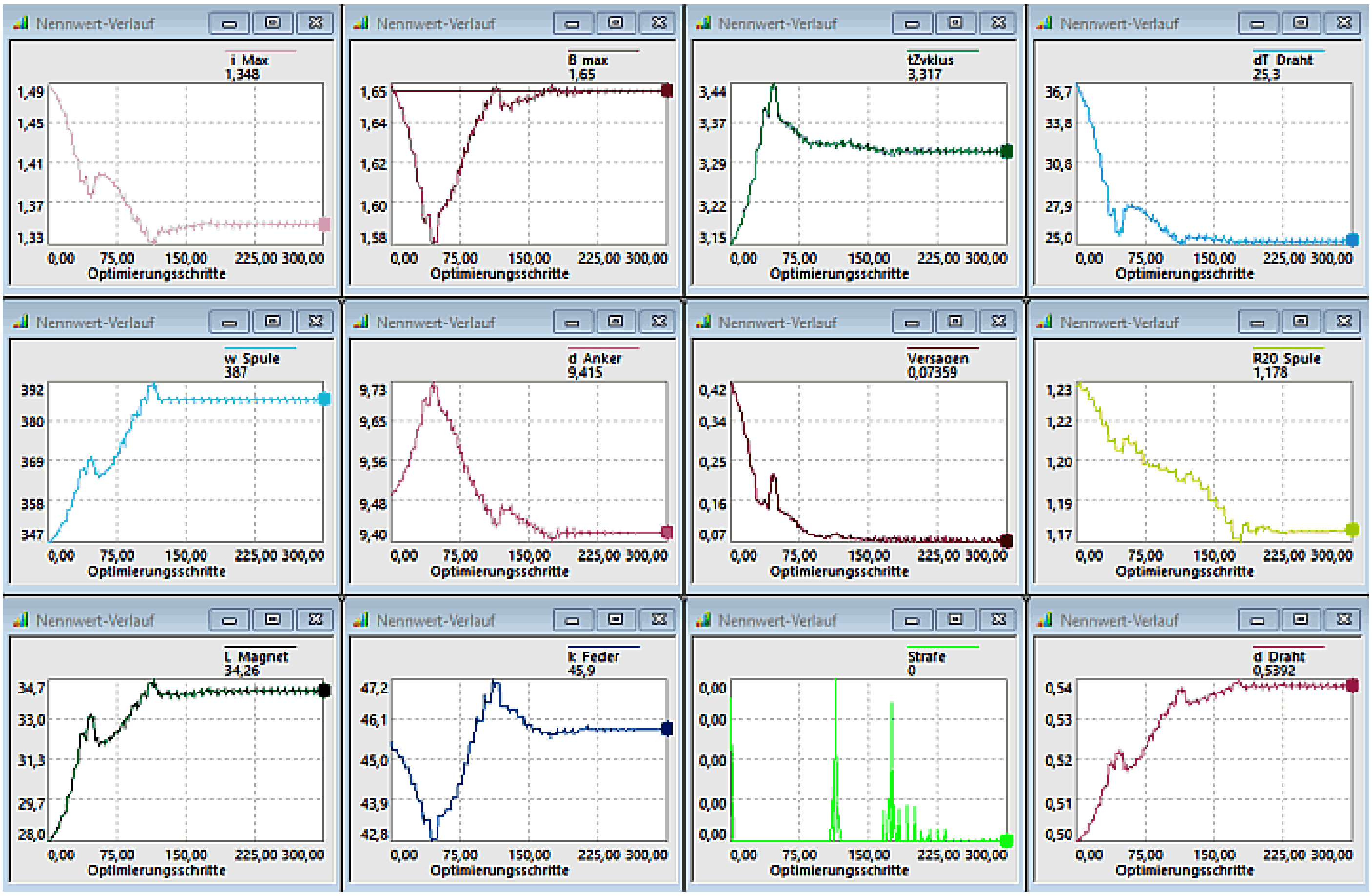
Kritisch bei der Ausschuss-Minimierung ist im Einzelfall der ständige Wechsel zwischen den beiden Zielfunktionen *Strafe* und *Versagen* an Restriktionsgrenzen:

1. Nennwerte des Magnetkreises der jeweils aktuellen Lösung führen zu einem Ausschöpfen vorgegebener Grenzwerte.
2. Tendiert die Versagensverringerung 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 ergibt sich infolge der Konvergenzbehinderung an der Begrenzung **L_Magnet=30 mm** keine praktische Verbesserung.
- Um während dieser Übung die Zeit für solche Erkenntnis-Iterationen zu sparen, geben wir die Magnetlänge von Anfang an frei.

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



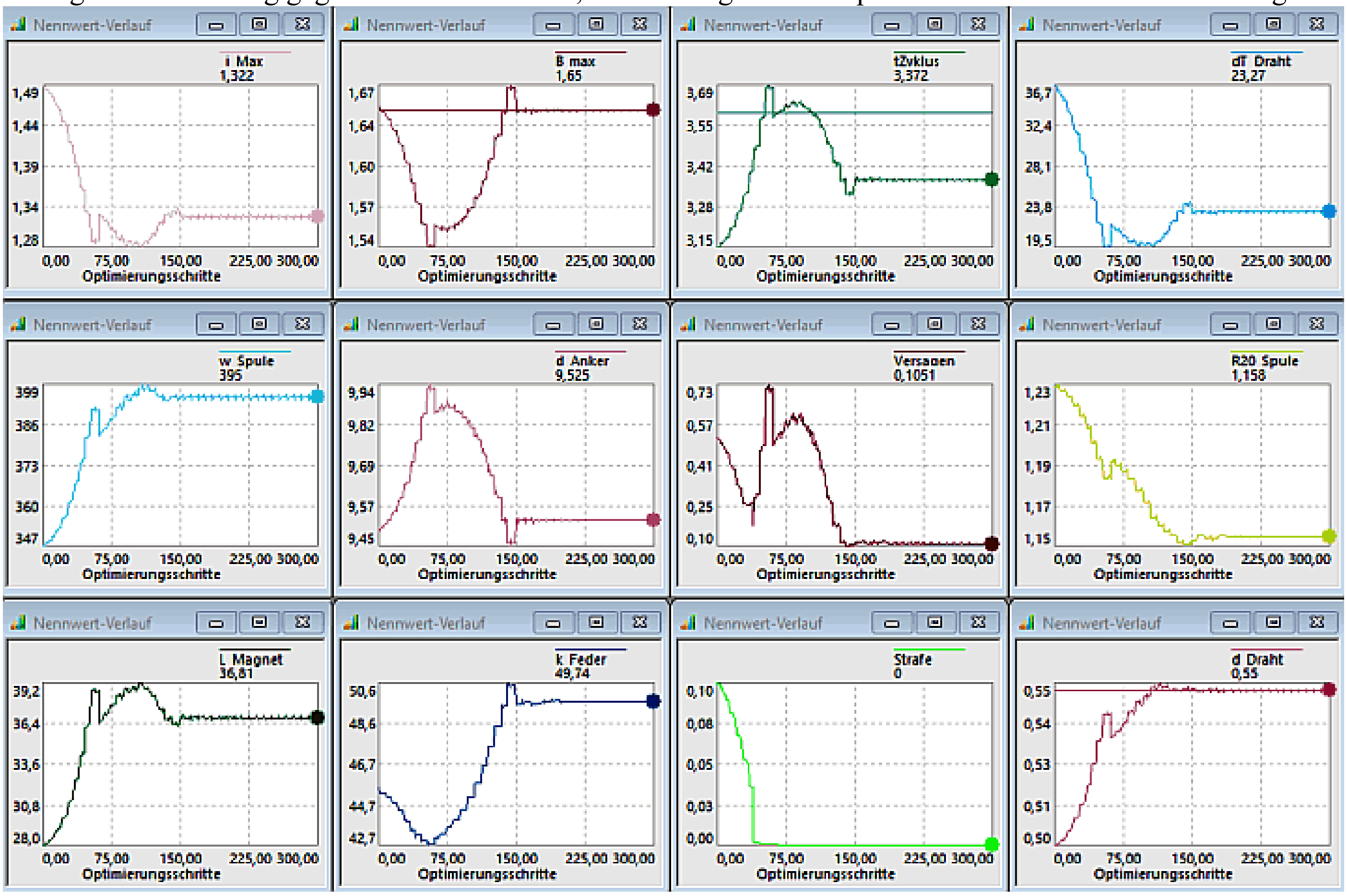
- Durch die Freigabe der Magnetlänge entsteht ein etwas längerer Magnet (im. Beispiel ca. **4 mm** länger), was in Hinblick auf den Bauraum wahrscheinlich noch unkritisch ist.
- Der Verlauf des Versagens entspricht infolge der geschickten Wahl der Gewichtsfaktoren nach Erreichen von Strafe=0 wertmäßig ziemlich genau der Teilversagenswahrscheinlichkeit für das Einhalten der Zykluszeit (weil das Teilversagen für die Erwärmung trotz Gewichtsfaktor=1 praktisch vernachlässigt werden kann).
- Nach der Ausschuss-Minimierung wird bei weiterhin stabilem Prägen und fast unmerklich erhöhten Zykluszeiten eine wesentlich "kühlere" Spule 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 **0.50 mm** auf ca. **0.54 mm**.
- Der anzustrebende Wert beträgt also **0.55 mm**.

Das Einhalten der erforderlichen Draht-Restriktion wird die Versagensminimierung infolge von Strafe>0 stören. Man sollte versuchen, diese Störungen möglichst gering zu halten (z.B. durch folgende Vorgehensweise):

- Ohne Drahtrestriktion wurde ausgehend von **0.50 mm** der Drahtdurchmesser durch das Optimierungsverfahren stetig erhöht. Am Ende erfolgte ein geringfügiges Einschwingen des Drahtdurchmessers auf das Optimum von **0.54 mm**.
- Die **untere Grenze** des Drahtdurchmessers muss man auf den Zielwert des Drahtdurchmessers setzen (z.B. **d_Draht≥0.55 mm**). So erfolgt am Anfang überhaupt keine Minimierung des Versagens, sondern es erfolgt nur eine Nennwert-Optimierung, bis Strafe=0 erreicht ist.
- Die **obere Grenze** setzt man den nächsten Drahtdurchmesser aus der Normreihe (im Beispiel d_Draht≤0.6 mm). Nach dem Überschwingen über den unteren Grenzwert konvergiert die Lösung zur Versagensminimierung gegen diesen Grenzwert, weil das eigentliche Optimum oberhalb dieser Grenze liegt:



Mit **d_Draht=0.55 mm** gelangen wir im Beispiel zu einem noch etwas längeren Magneten, da der dickere Draht mehr Wickelraum benötigt:

- Thermisch ist die größere Magnetoberfläche mit dem dickeren Draht natürlich günstig.
- So wird die Ausschussquote weiterhin nur durch die teilweise etwas zu hohe Zykluszeit bestimmt. Die Verschlechterung der Zykluszeit infolge des dickeren Drahtes ist praktisch nicht relevant.
- Man könnte versuchen, mit einem Gewichtsfaktor=0.1 für die Drahterwärmung einen schnelleren Antrieb zu erreichen. Dies wird jedoch wahrscheinlich misslingen, weil die langsamen Zykluszeiten aus der Abfallverzögerung bei hohen Wirbelströmen resultieren (ohne Einfluss auf die Verlustleistung im Draht!).

Der Vollständigkeit halber muss man die gleiche Optimierung auch für den nächstdünneren Normdraht (im Beispiel mit **0,5 mm**) durchführen:

- Dabei wird eine stärkere Erwärmung der Spule auftreten.
- Es besteht jedoch die Hoffnung, dass man zu einem schnelleren Antrieb gelangt, wenn man z.B. eine unkritische Übertemperatur von z.B. 10 K (oder etwas mehr) akzeptiert.
- Entscheidet man sich für solch eine Lösung. muss man dies jedoch sorgfältig begründen!

Experiment-Ergebnisse (Ausschuss-Minimierung)

Mit welchen technisch sinnvollen Nennwerten ergibt sich bei Berücksichtigung von Normdrähten und einer zulässigen Spulen-Erwärmung von "unwesentlich" über **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)
- **t_Zyklus** (Mittelwert sowie min. und max. auftretende Werte → Grenzwerte von 6σ)

Hinweise:

- Zu technisch sinnvollen Werten gehört auch die Wahl einer vernünftigen Anzahl von Ziffernstellen (z.B. 3 Ziffern)!
- Die Wahl der Lösungsvariante ist zu begründen!

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. ±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

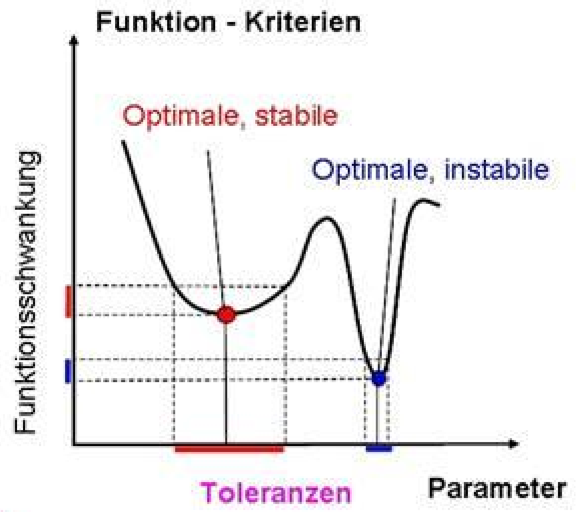
- Die Validierung muss zuvor für den angestrebten Nutzungsbereich des Modells erfolgt sein.
- Änderungen von Modellparametern bewirken dann eine qualitativ richtige Reaktion der Ausgangsgrößen.
- Damit korreliert eine Verbesserung des Modellverhaltens sehr stark mit einer Verbesserung des realen Objektverhaltens.

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.

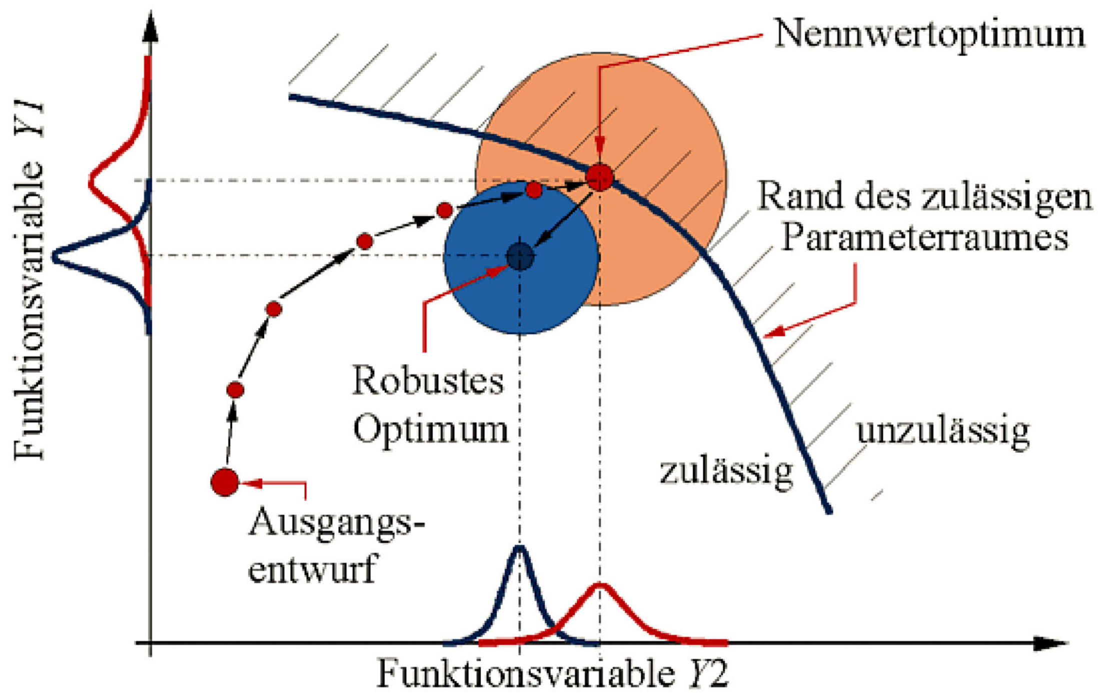
Robust-Optimierung ist ein Ansatz für eine weitere Verbesserung unserer optimierten Lösung:

- 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.

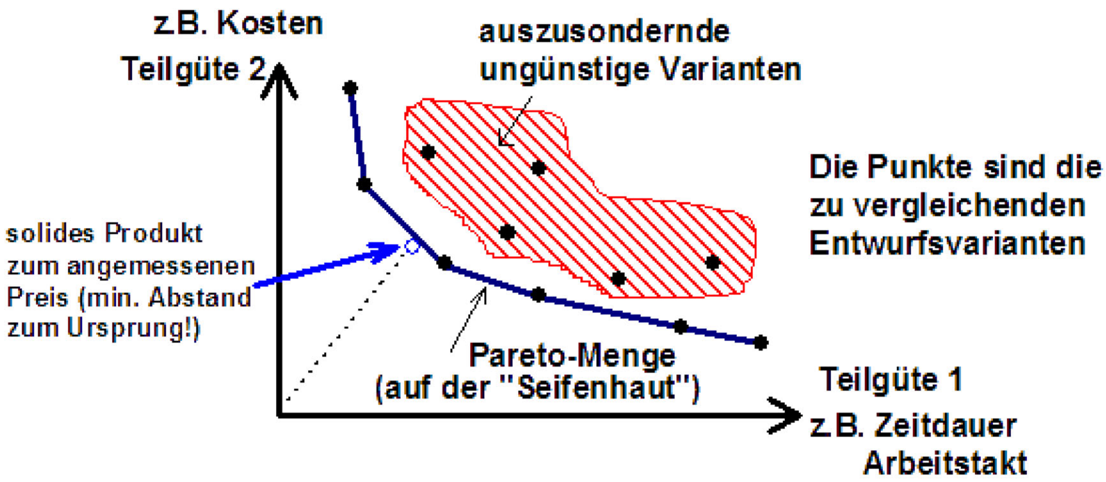


Bei der Suche nach solch einer Lösung wird es mit großer Wahrscheinlichkeit zu Widersprüchen zwischen den einzelnen Bewertungsgrößen kommen! Erforderlich ist deshalb eine Mehrkriterien-Optimierung, welche die Entscheidungsgrundlage für eine angemessene Kompromisslösung liefert.

Mehrkriterien-Optimierung

- In der Entwicklung und Konstruktion von Produkten trifft man sehr häufig Optimierungsaufgaben mit mehreren Gütekriterien. Dabei wird ein Vektor von Entwurfsparametern 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.

← →

Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Experimentkonfiguration

Aus OptiYummy

↑

←→
Robust-Optimierung (Experiment-Konfiguration)

☐

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.
- Es handelt sich hierbei um eine **Mehrkriterien-Optimierung**, denn wir wollen drei unterschiedlichen Gütekriterien möglichst gut genügen. Zumindest die Ziele der Verringerung der Zykluszeit und der Spulenerwärmung widersprechen sich wahrscheinlich!

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.

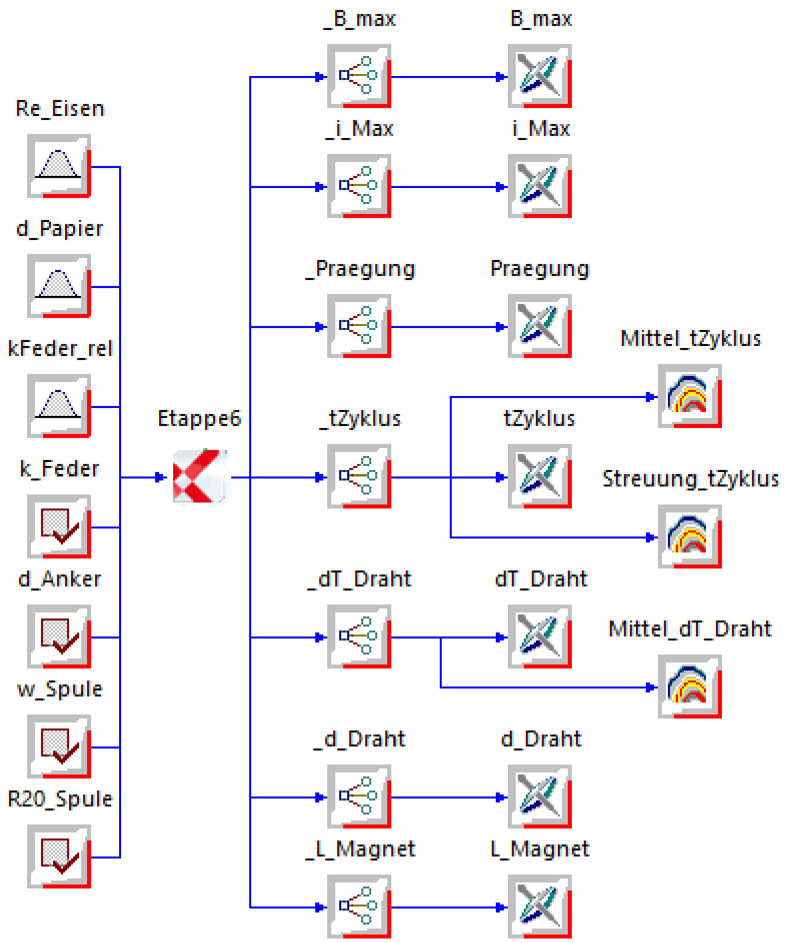
Als wesentliche Streuungen berücksichtigen wir wie bei der Ausschuss-Minimierung:

- Unsicherheit des Wirbelstromwiderstands
- Fertigungstoleranzen der Rückholfeder
- Unterschiedliche Papiersorten

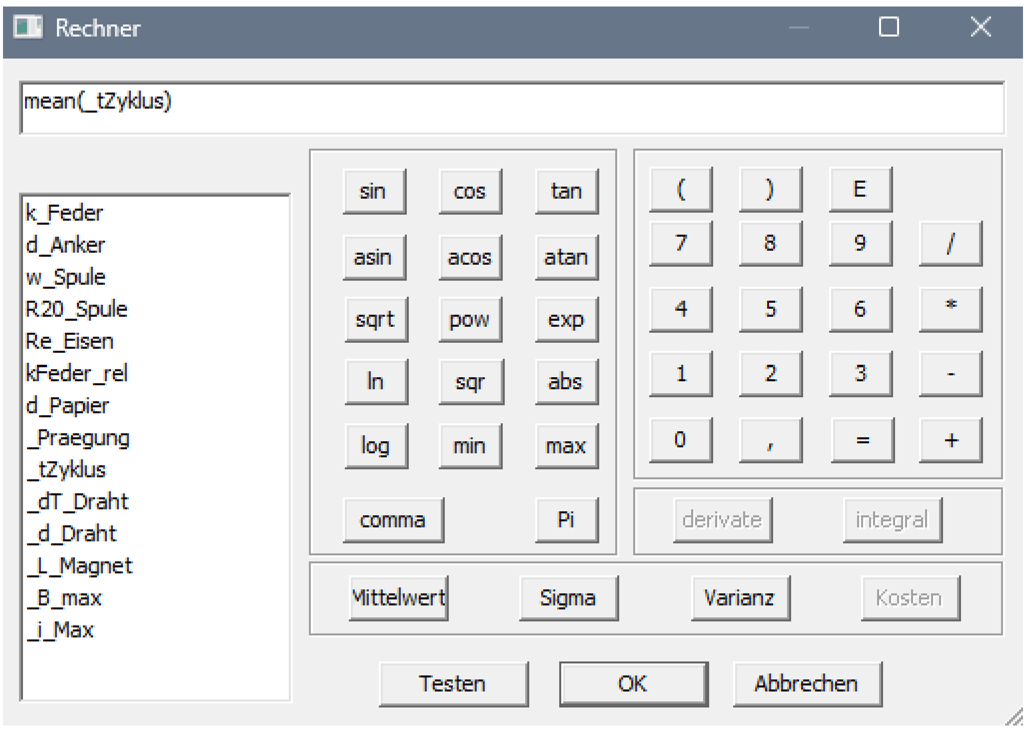
Hinweise:

- Wir nutzen das neue SimulationX-Modell ***Etappe6_xx_Robust.isx*** ebenfalls als Kopie der Datei ***Etappe5_xx_Nennwert.isx***.
- 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.
- Im Workflow wählen wir für das SimulationX-Modell die neue Datei ***Etappe6_xx_Robust.isx***.
- Nach **Rücksetzen des Projektes zum Löschen der veralteten Experimentdaten** speichern wir **Etappe6_xx_Robust.opy**.

Für die Minimierung der Streuungen von **tZyklus** und **dT_Draht** benutzen wir im OptiY-Workflow die **Standardabweichung "sigma"**. 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:

- Gütekriterien
  - Strafe
  - Versagen
  - Mittel_tZyklus
  - Streuung_tZyklus
  - Mittel_dT_Draht
  - Hypervolumen

- Bei **Strafe** und **Versagen** handelt es sich, wie bereits bekannt, um interne Gütekriterien innerhalb der hierarchischen Optimierungsstrategie.
- Jedoch sollen nun 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.
- Das **Hypervolumen** als ein weiteres internes Gütekriterium wird bei mehr als zwei "echten" Gütekriterien hinzugefügt:
  - Dieser Hypervolumen-Indikator (**HVI**) wird zur Qualitätsbewertung von Pareto-Front Approximationsmengen in der Mehrkriterien-Optimierung eingesetzt.
  - Über den **HVI**-Wert wird die Konvergenz der Lösungen in Richtung auf die Pareto-Menge gesteuert.
- Diese Pareto-Lösungsmenge kann in *OptiY* nur bei Verwendung *Evolutionärer Algorithmen* (**Evolutionsstrategie**) generiert werden:

Eigenschaft	
Optimierung	
Auto-Stop	Manueller Stop
Optimierungsschritte	300
Startschrittweite	Manuell
Verfahren	Evolutionsstrategien
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
Benutzer-Definierte Parameter	☐

- Für das Optimierungsproblem werden wir die Werte aus den Standardeinstellungen etwas modifizieren. Dazu müssen wir eine Umschaltung von "Standard" auf "Manuell" bzw. "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.
- Die 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 Entwurfsgröße (*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!

***Hinweis*: Das Gütekriterium "**Hypervolumen**" erscheint erst im Experiment-Browser nach Wahl von "**Evolutionsstrategien**" als Optimierungsverfahren. Allerdings nur, wenn man im geöffneten Workflow irgendein Objekt anklickt oder die Datei nach dem Speichern wieder geöffnet wird (Darstellungsfehler?).

Entwurfsparameter (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 Entwurfsparameter können wir fast unverändert von der Ausschuss-Minimierung übernehmen:

- Die Startwerte der Nennwerte müssen dem Bestwert aus der Ausschuss-Minimierung 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
```

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

```
d_Papier   : Nennwert=0,2 mm  / Toleranz=0,2 mm      / Gleichverteilung (verschiedene Papiersorten)
Re_Eisen   : Nennwert=1,5 mΩ  / Toleranz=1,5 mΩ      / Normalverteilung
kFeder_rel: Nennwert=1        / Toleranz=0,6         / Normalverteilung (±30% um normierten Nennwert)
```

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, müssen deshalb durch Aufweiten ihrer Grenzen unwirksam gemacht werden (**unwirksame Grenzen** für **tZyklus**, **dT_Draht** sowie für **B_max** und **i_Max**).
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=0.85...1.3**).
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**).

← →

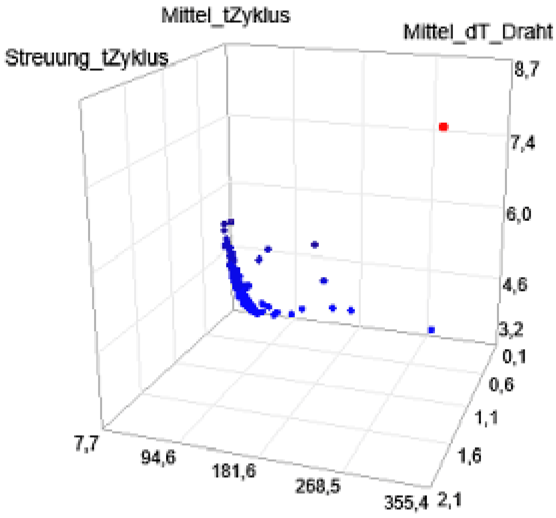
Software: SimX - Nadelantrieb - Robust-Optimierung - Ergebnisse

Aus OptiYummy

↑

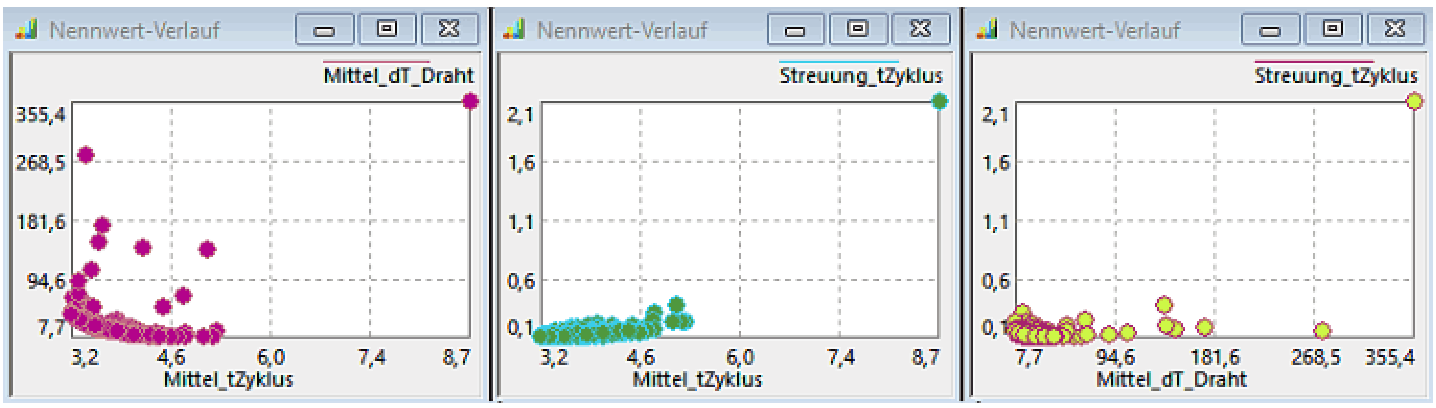
Experiment-Durchfuehrung

Da wir nur drei Gütekriterien berücksichtigen, können wir die Lösungen noch komplett in einer 3D-Darstellung als "Kriterien-Raum" visualisieren (***Analyse*** > ***Darstellung*** > ***3D-Darstellung***). Die Achsen belegen wir mit unseren Gütekriterien, wobei es sinnvoll ist, die mittlere Zykluszeit als funktionelle Größe auf die Z-Achse zu legen:



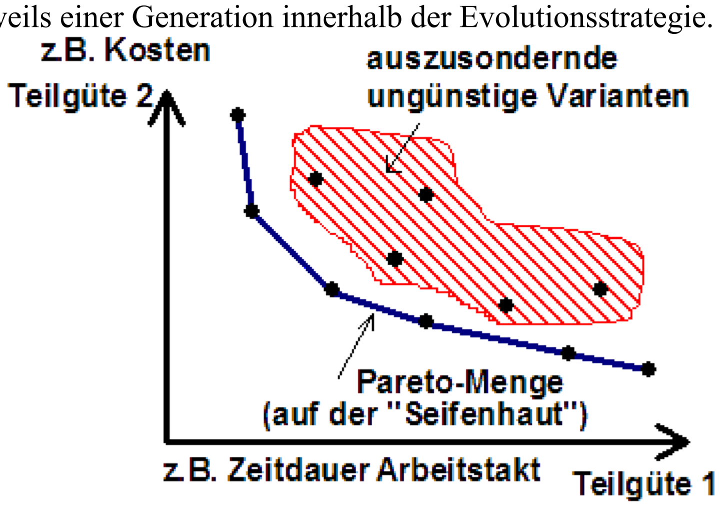
Zusätzlich ist es sinnvoll, möglichst alle Abhängigkeiten zwischen den Gütekriterien als 2D-Darstellung im Sinne von Projektionen des mehrdimensionalen Kriterien-Raumes abzubilden:

- 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 im Nennwert-Fenster 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:

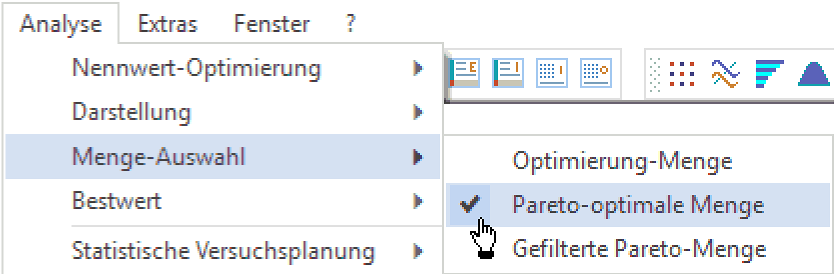
- Im Beispiel entsprechen 15 Stichproben (Kinder) jeweils einer Generation innerhalb der Evolutionsstrategie.
- Der längerfristigen evolutionären Entwicklung der Population sind die Mutationen der einzelnen Individuen überlagert.
- Die Population bewegt sich infolge der Evolutionsstrategie zuerst in 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).
- Über den **Hypervolumen-Indikator**-Wert wird danach die Konvergenz der Lösungen in Richtung auf die Pareto-Menge gesteuert. Bildlich gesehen bewegt sich die Population zum Bereich der pareto-optimalen Lösungsmenge.



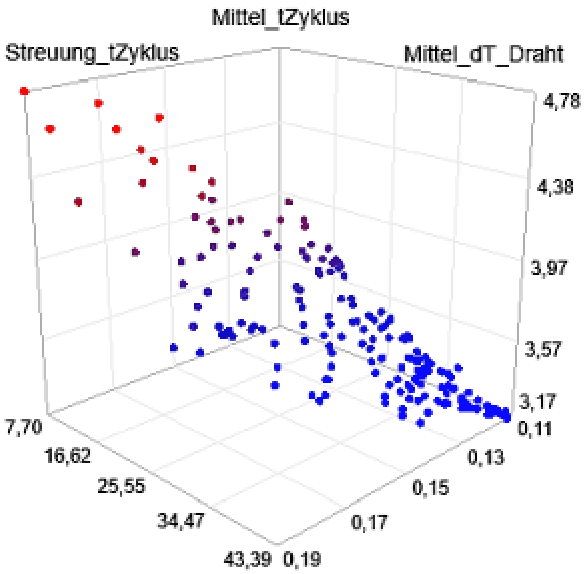
- Infolge der zusätzlich unterlegten co-evolutionären Strategie oszilliert die Population dann bei Versagen=0 endlos auf der pareto-optimalen Lösungsmenge.
- Durch die Mutationen entstehen auch einzelne "Ausreißer", welche im Normalfall zu sehr schlechten Lösungen führen. Gleichzeitig bieten diese Fluktuationen aber auch die Chance für größere Sprünge innerhalb des Suchraumes und damit dem Erreichen neuer "ökologischer Nischen".

Experiment-Auswertung

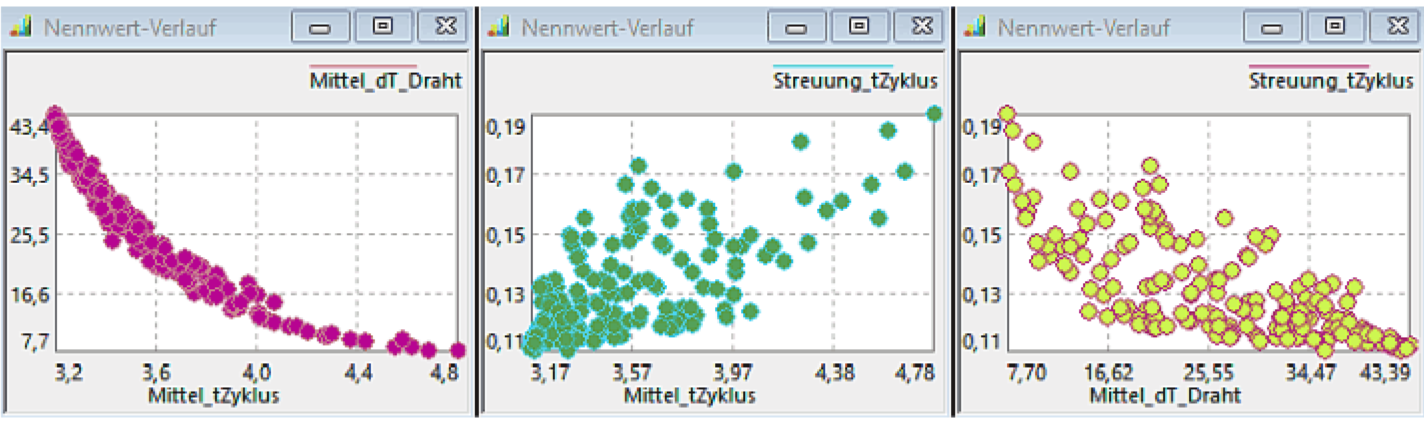
Bisher werden in den 2D/3D-Diagrammen für jeden Optimierungsschritt (entspricht jeweils einer berechneten Generation) die Nennwerte des jeweils "besten" Exemplars dargestellt. Diese Darstellung der kompletten "Optimierungsmenge" ist durch die Vielzahl von "schlechten Lösungen" (insbesondere durch die Ausreißer) sehr unübersichtlich. Uns interessieren nur die Mitglieder der Pareto-Menge:



Nach Wahl der "Pareto-optimalen Menge" bleiben nur die zulässigen Lösungen auf der "Seifenhaut" in den Diagrammen erhalten:



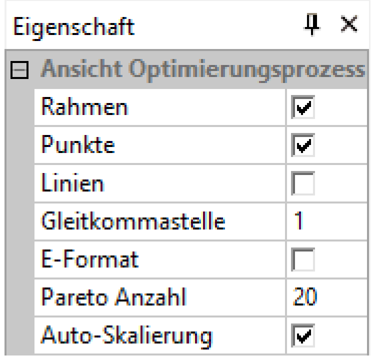
Die 2D-Projektionen dieser "Seifenhaut"-Menge führt im Beispiel nur für die (Mittel_tZyklus, Mittel_dT_Draht)-Ebene zu einer anschaulichen Darstellung der Pareto-Menge:

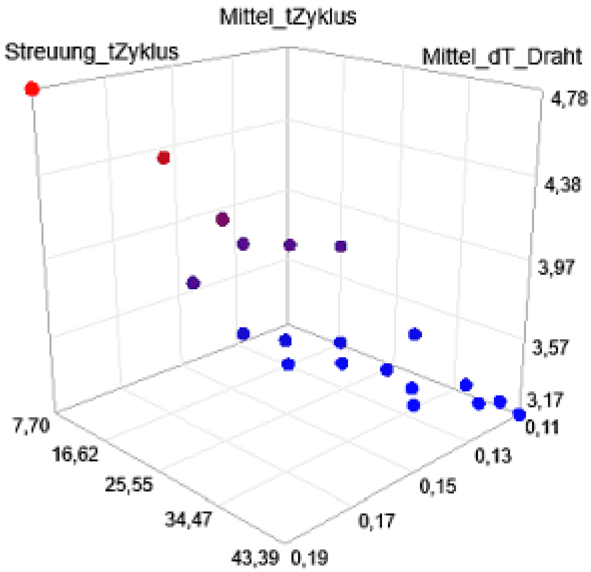


Die anderen beiden Projektionen resultieren aus der ungünstigen Blickrichtung auf die Lösungspunkte der "Seifenhaut".

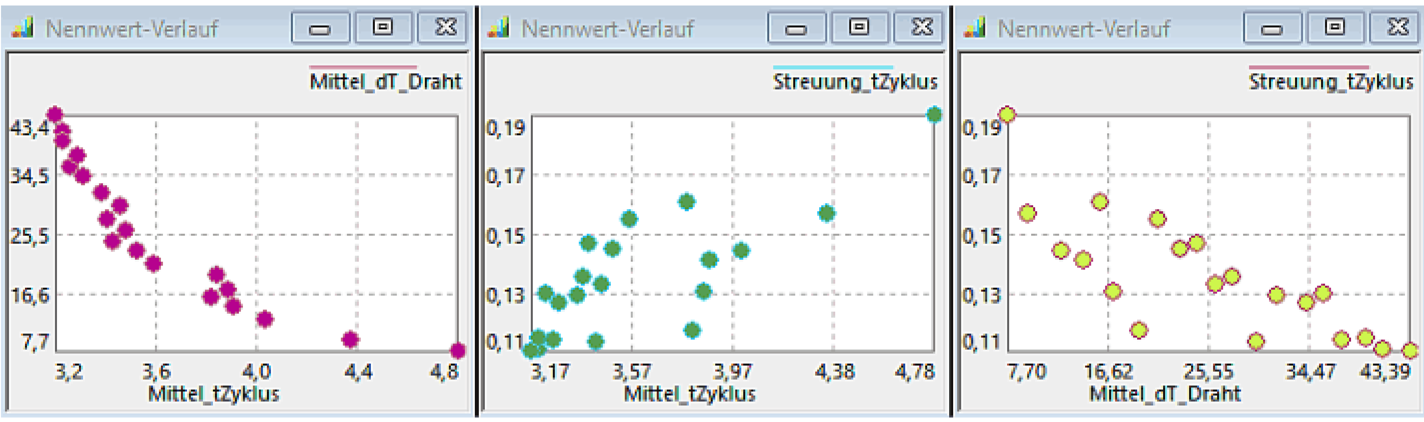
Die berechneten Lösungspunkte sind auf der "Seifenhaut" ungleich verteilt. Um eine Entscheidung in Hinblick auf die beste Kompromisslösung zu erleichtern, ist es günstig die Anzahl der dargestellten Lösungspunkte auszudünnen. Diese Filterung sollte so erfolgen, dass eine vorgegebene Anzahl von Lösungspunkten übrigbleibt, welche gleichmäßig auf der Seifenhaut verteilt ist und die beste Kompromisslösung enthält:

- 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:





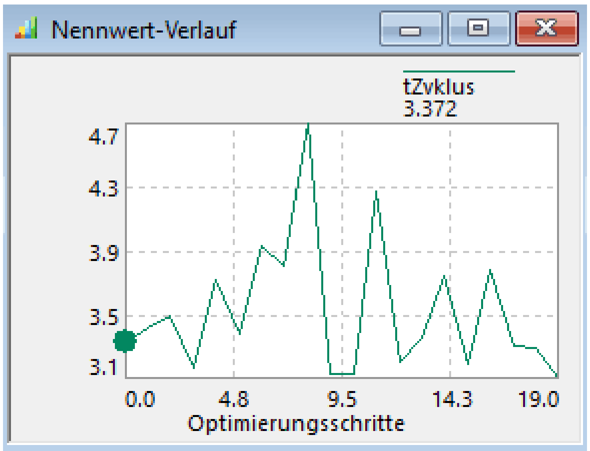
- Nach der Filterung sind die noch vorhandenen 20 Lösungspunkte auch in den 2D-Darstellungen einzeln erkennbar:

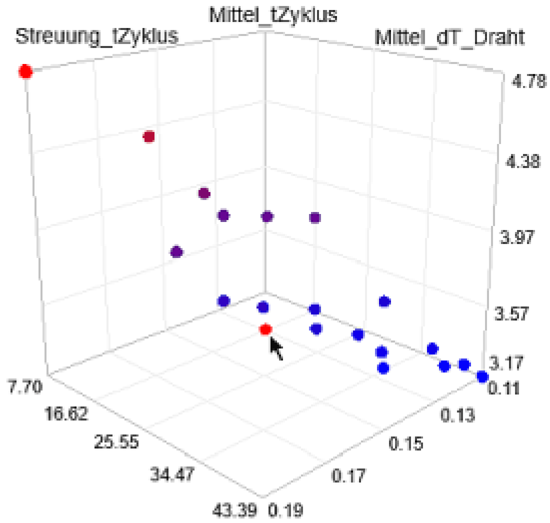


- ***Hinweis*:** Leider bleibt nach einem Speichern und neu Öffnen der .opy-Datei die Darstellung der gefilterten Pareto-Menge in den Diagrammen nicht erhalten (Kurzzeitiges Umschalten in der Mengenauswahl ist erforderlich!).

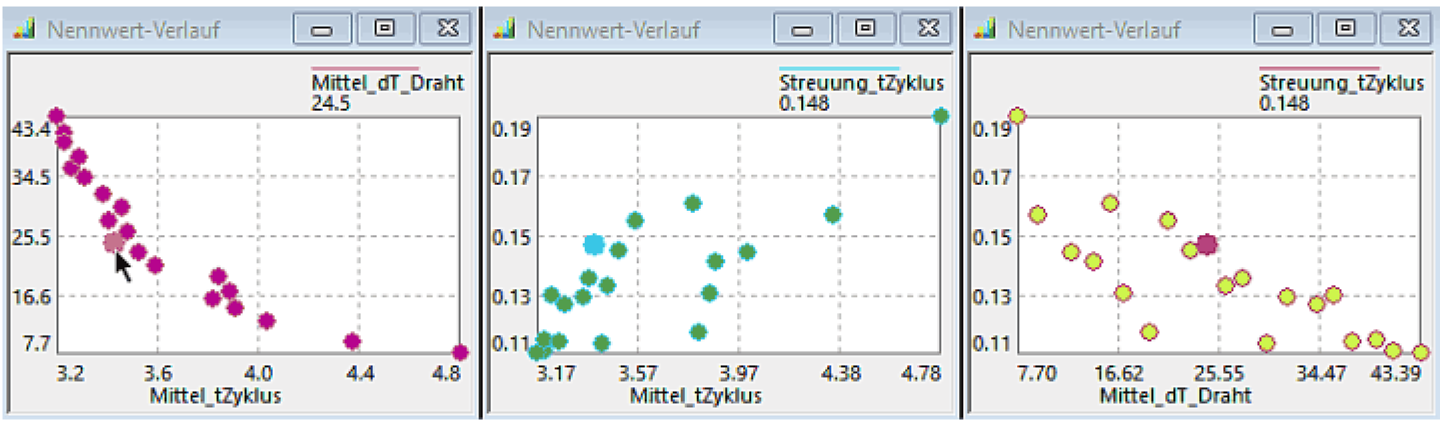
Die Aufgabe besteht nun darin, aus der dargestellten gefilterten Pareto-Menge eine günstige Kompromisslösung auszuwählen:

- In jedem der 2D-Diagramm kann man einen der zu analysierenden Lösungspunkte mit dem Cursor auswählen. Die ausgewählte Lösung erscheint dann in allen 2D- und auch den 3D-Diagrammen als markiert.
- Zuerst sollte (wie gezeigt) der Bestwert aus der Ausschuss-Minimierung ausgewählt werden, um seine Position in Hinblick auf die Pareto-Menge einschätzen zu können. Dieses Ausschuss-Minimum war der Startwert unserer Robust-Optimierung (**Optimierungsschritt=0**) und sollte in der gefilterten Pareto-Menge enthalten sein. Die Auswahl kann günstiger Weise im Nennwert-Verlauf der Zykluszeit erfolgen (Pfeil zeigt auf zugehörigem Lösungspunkt im 3D-Diagramm):

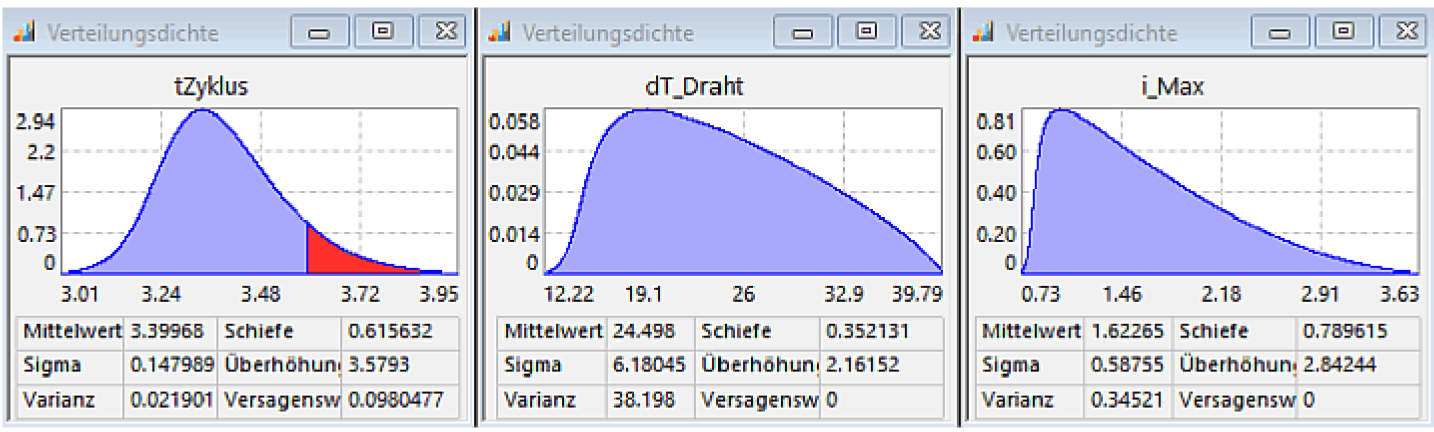




- ***Hinweis***: Ist das Ausschuss-Minimum wider Erwarten nicht enthalten, so muss man zur Beurteilung seiner Lage die Mengenauswahl wieder auf die Pareto-Menge oder sogar auf die komplette Optimierungsmenge zurücksetzen!
- In den 2D-Diagrammen ist das gewählte Ausschuss-Minimum links mit einem Pfeil markiert und hebt sich in den folgenden Diagrammen farblich gut ab:



- Um eine ausgewählte Lösung 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!

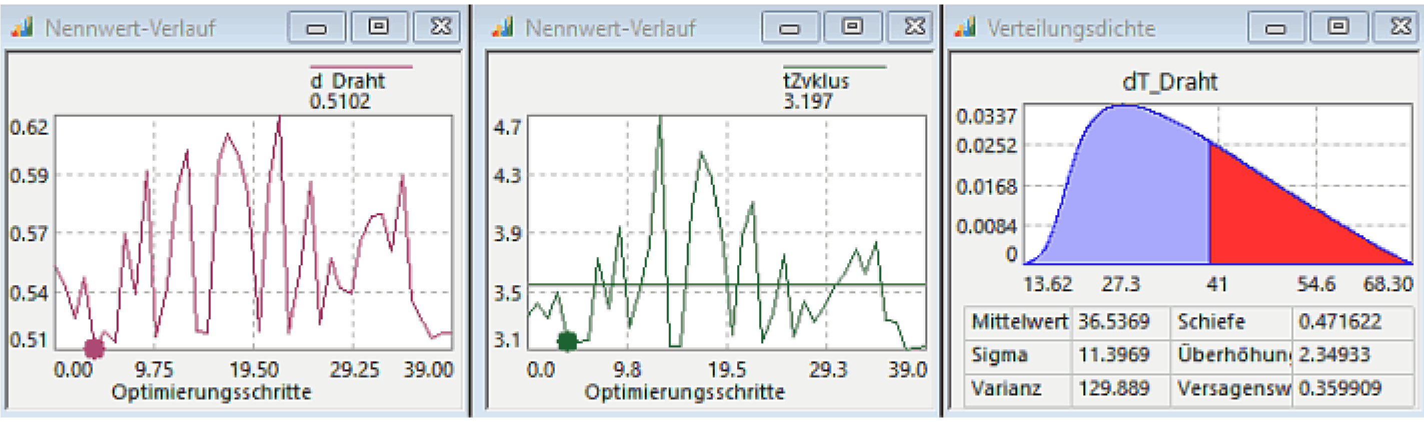
Auf Grundlage der Pareto-Menge kann man entscheiden, wieviel Verschlechterung einzelner Gütekriterien man akzeptiert, um anderen Kriterien möglichst gut zu genügen:

- Der Hauptwiderspruch zwischen möglichst schneller Zykluszeit und minimaler Erwärmung ist im linken 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.
- Die Streuungen der Zykluszeit und der Spulentemperatur spielen keine wesentliche Rolle, weil diese für die Lösungen der Paretomenge bereits minimiert sind.
- Der bereits ausgewählte Bestwert aus der Ausschuss-Minimierung stellt im Beispiel anscheinend schon einen sehr guten Kompromiss dar.
- Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass sie bereits auf einem Norm-Drahtdurchmesser benutzt!

Problem des Drahtdurchmessers:

- Während der Ausschuss-Minimierung war es noch problemlos möglich, einen genormten Drahtdurchmesser mit Hilfe der entsprechenden Restriktionsgröße zu erzwingen.
- Bei der multikriteriellen Robustoptimierung scheitert die co-evolutionäre Strategie mit großer Wahrscheinlichkeit an den zusätzlich erforderlichen, sehr engen Draht-Restriktionen. Eine Oszillation der Lösung entlang der Pareto-Menge kommt dann nicht zustande!
- Wenn die erreichte Optimal-Lösung der Ausschuss-Minimierung beibehalten werden kann, gibt es das Problem des Drahtdurchmessers bei der multikriteriellen Robustoptimierung nicht mehr.
- Man erhält dann mit der multikriteriellen Robustoptimierung nur noch die Bestätigung, dass man bereits über eine optimale Kompromisslösung verfügt.
- Falls sich wider Erwarten andere Lösungen als optimale Kompromisslösungen erweisen, so kann man versuchen, eine Lösung zu wählen, welche näherungsweise einen Normdraht enthält. Durch vorherige Wahl einer größeren Pareto-Anzahl (z.B. 40) stehen dafür mehr Lösungspunkte zur Verfügung:



- Man findet im Beispiel zwar Lösungen mit etwas kürzeren Zykluszeiten bei dünnerem Draht, aber wie schon aus der Ausschuss-Minimierung bekannt, wird dabei die Spule wesentlich wärmer.
- Da der verfügbare Draht mit 0,5 mm noch etwas dünner ist, als in den Lösungen mit 0,51 mm, würde sich die Temperatur noch erhöhen.
- Zumindest im gezeigten Beispiel findet man keine bessere Kompromiss-Lösung als den Bestwert aus der Ausschuss-Minimierung.

Experiment-Ergebnisse (Robust-Optimierung)

Falls die optimale Lösung der Ausschuss-Minimierung nicht bestätigt werden konnte, wird man sich für eine bessere Lösung entscheiden. Die Wahl dieser Lösung ist zu begründen!

Mit welchen **technisch sinnvollen** Nennwerten ergibt sich dann (ohne Berücksichtigung von Normdrähten) eine robuste und trotzdem schnelle Antriebslösung mit möglichst geringer Ausschuss-Quote:

- **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)
- **t_Zyklus** (Mittelwert sowie min. und max. auftretende Werte → Grenzwerte von 6σ)

***Wichtig*:**

- Als Bestandteil der Lösung muss die gespeicherte .opy-Datei der Robust-Optimierung die Optimierungsergebnisse in den erläuterten Diagrammen in anschaulicher Form enthalten.
- Das zugehörige SimulationX-Modell ist mit den Nennwert-Parametern für die gefundene optimale Lösung zu konfigurieren. Der simulierte Verlauf des Prägezyklusses ist in anschaulicher Form in einem Ergebnisfenster darzustellen. Überflüssige Ergebnisfenster sind zu löschen!

← →