

Robustheitsaspekte in verteilten Entwicklungsumgebungen

Michael Lockan, Dieter Bestle

- Motivation
- Gesamtentwurfsprozess zum Vergleich
- Verteilter Entwurfsprozess
- Antwortflächenverfahren
- Ergebnisvergleich
- Zusammenfassung/Ausblick

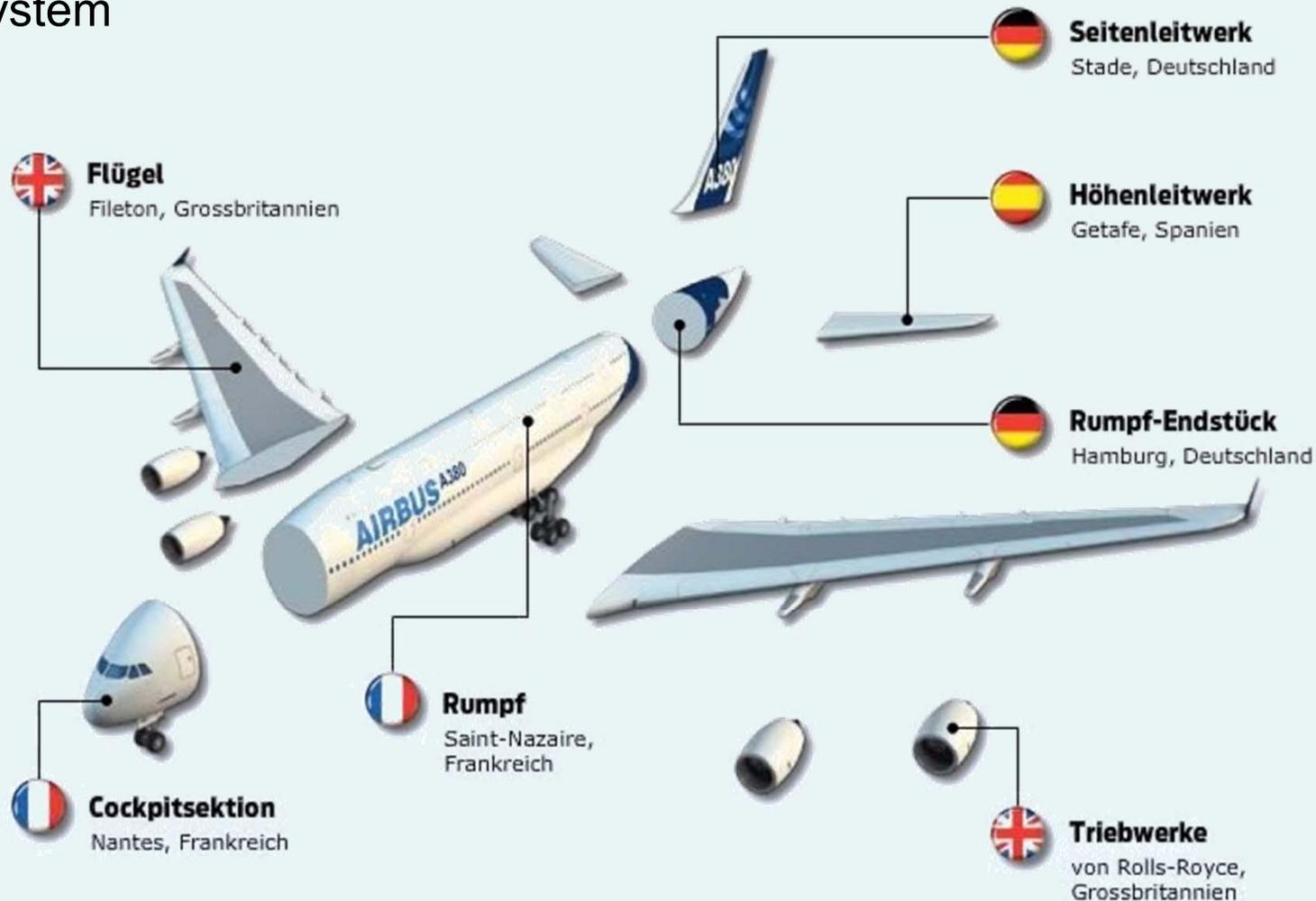


Research has been carried out within the CRESCENDO Integrated Project, which is partly sponsored by the European Union's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) under grant agreement No. 234344 (www.crescendo-fp7.eu).

Motivation

Verteilte Auslegung komplexer Systeme am Beispiel des Airbus A380

- Vielzahl an Partner und Entwicklungsumgebungen → IPR's verhindern Gesamt-Optimierungsmodell
- Zusammenführung optimaler Komponenten führt nicht notwendig auf optimales Gesamtsystem



Entwicklung eines Triebwerkes am Beispiel des TP400

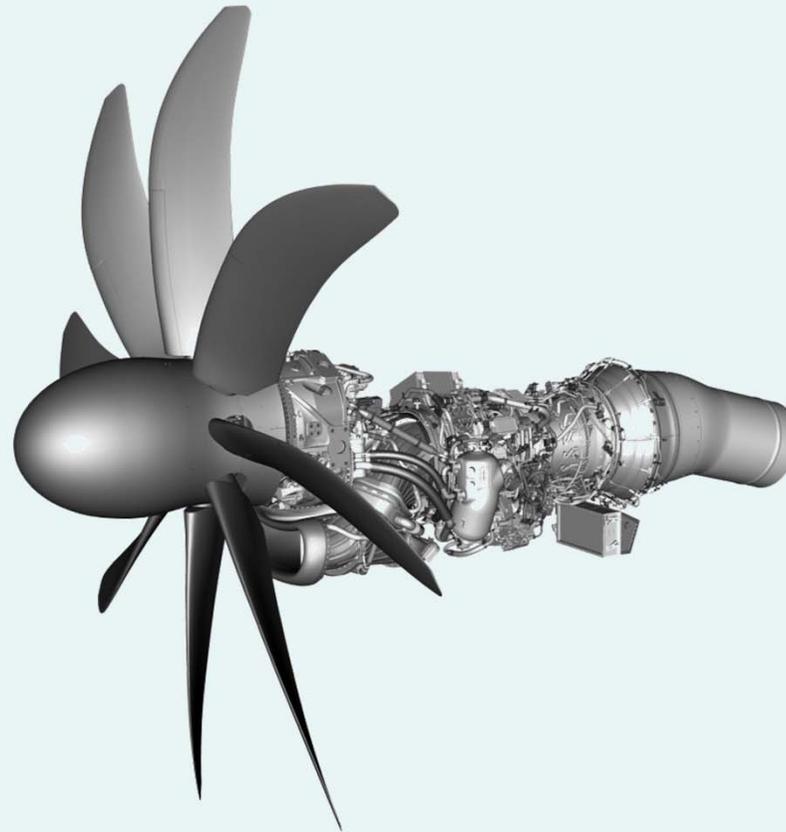


Rolls-Royce

Hochdruckverdichter
Niederdruckwelle
Luft- und Ölsystem
Zwischengehäuse
Leistungsrechnung



Brennkammer
Hochdruckturbine
Anbaugesetze
Anlasser
Montage am Flugzeug



Mitteldruckverdichter,
-Turbine und -Welle
FADEC
Endmontage
Erprobung



Niederdruckturbine
Frontlager
Düse
Turbinengehäuse
Außenleitungen

Beispiel eines verteilten Auslegungsprozesses:

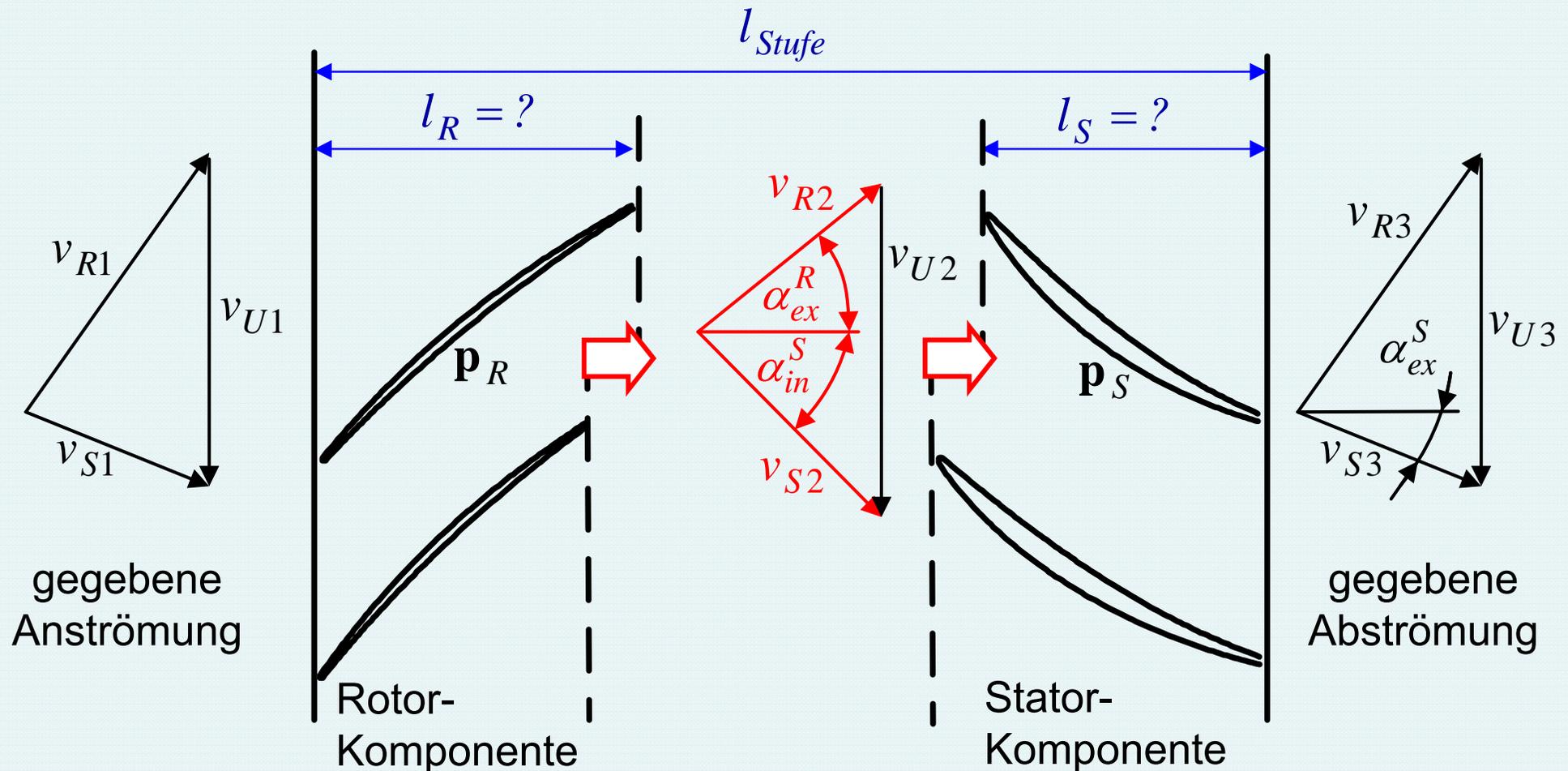
optimale Längenaufteilung zwischen Rotor und Stator einer Verdichterstufe

➤ übergeordnete Entwurfparameter: Änderung der Rotorstufenbreite Δl_R

➤ Komponenten-Entwurfparameter: Rotor \mathbf{p}_R

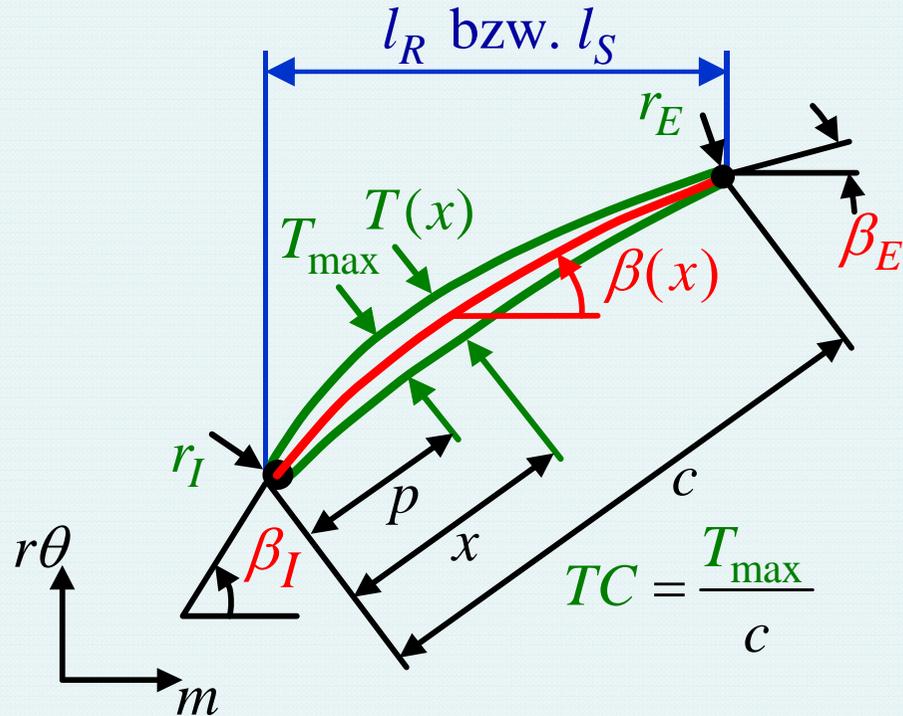
Stator \mathbf{p}_S

➤ Kopplung über Geschwindigkeitsdreiecke: $\alpha_{in}^S = \alpha_{in}^S(\alpha_{ex}^R)$

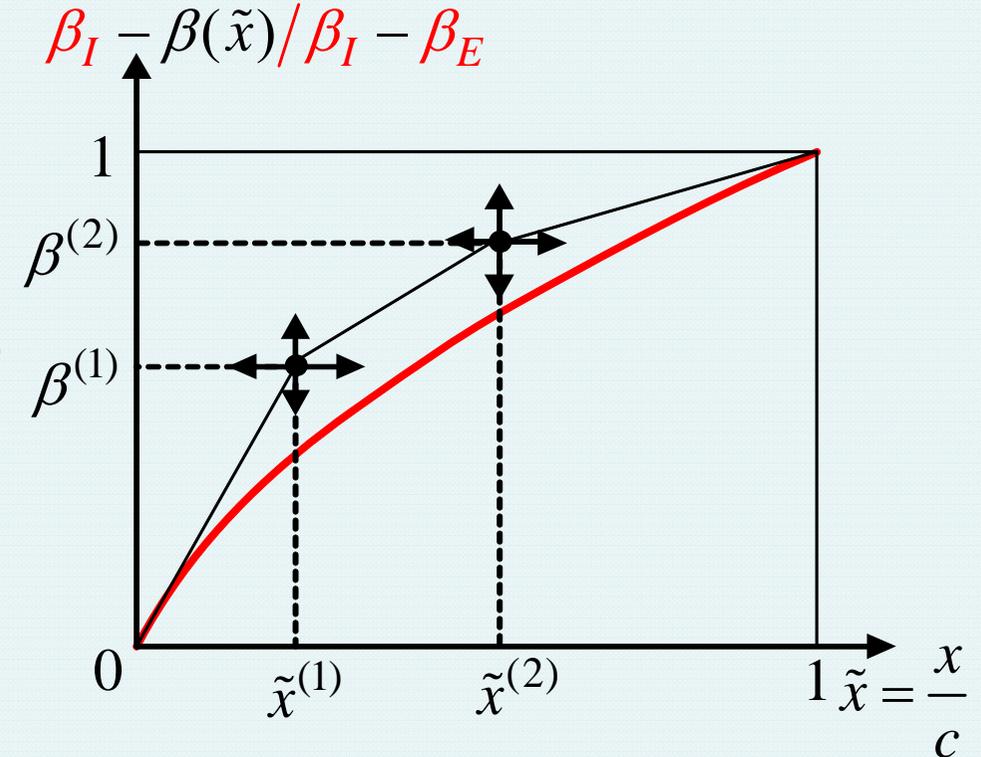


Parametrisierung der Rotor- und Stator-Schaufelschnitte für Komponentenoptimierung

- Überlagerung von **Dicken-** und **Skelettlinienwinkelverteilung**



- Beschreibung der **Skelettlinienwinkelverteilung** mittels Bezier-Spline



- Relativ-Parametrisierung zur Vermeidung von Nebenbedingungen

$$\tilde{x}^{(1)} = p^{(1)}, \tilde{x}^{(2)} = \tilde{x}^{(1)} + p^{(2)} (1 - \tilde{x}^{(1)}), \beta^{(1)} = p^{(3)}, \beta^{(2)} = \beta^{(1)} + p^{(4)} (1 - \beta^{(1)})$$

- Entwurfsvektor bei konstanter **Dickenverteilung**

$$\mathbf{p}_{R,S} = \left[p^{(1)}, p^{(2)}, p^{(3)}, p^{(4)}, TC, \beta_I, \beta_E \right]$$

Gesamtentwurfsprozess zum Vergleich

- Formulierung des Optimierungsproblems

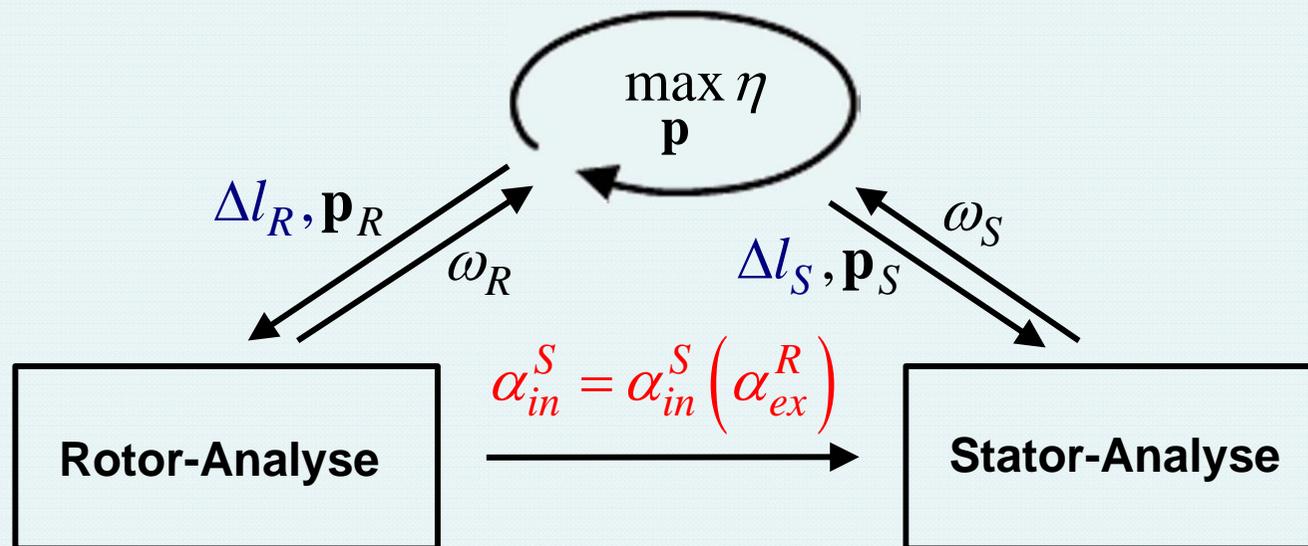
$\max_{\mathbf{p} \in P} \eta$ ~ Wirkungsgrad der Stufe mit Rotorverlust ω_R und Statorverlust ω_S

mit $\eta = (1 - \omega_R)(1 - \omega_S)$

$$P = \left\{ \mathbf{p} = \left[\Delta l_R, \mathbf{p}_R^T, \mathbf{p}_S^T \right]^T \in \mathbb{R}^{15} \mid \left| \alpha_{ex}^R - \alpha_{ex}^{R,soll} \right| \leq \varepsilon^R, \left| \alpha_{ex}^S - \alpha_{ex}^{S,soll} \right| \leq \varepsilon^S, \right.$$

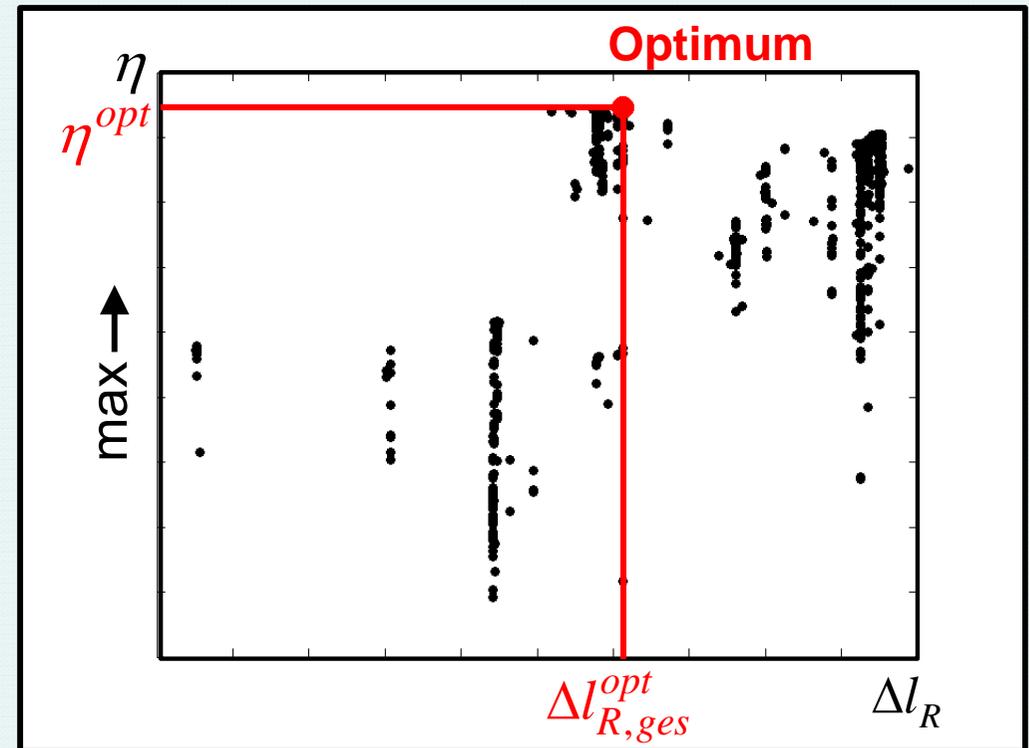
$$\left. \alpha_{in}^S = \alpha_{in}^S(\alpha_{ex}^R), l_R + l_S = const. \right\}$$

- Prozess-Ablauf:



➤ Optimierungsergebnis

Algorithmus	MIGA
Funktionsauswertungen	10000
konvergierte Entwürfe	6797
zulässige Entwürfe	4284
1. zulässiger Entwurf	#471

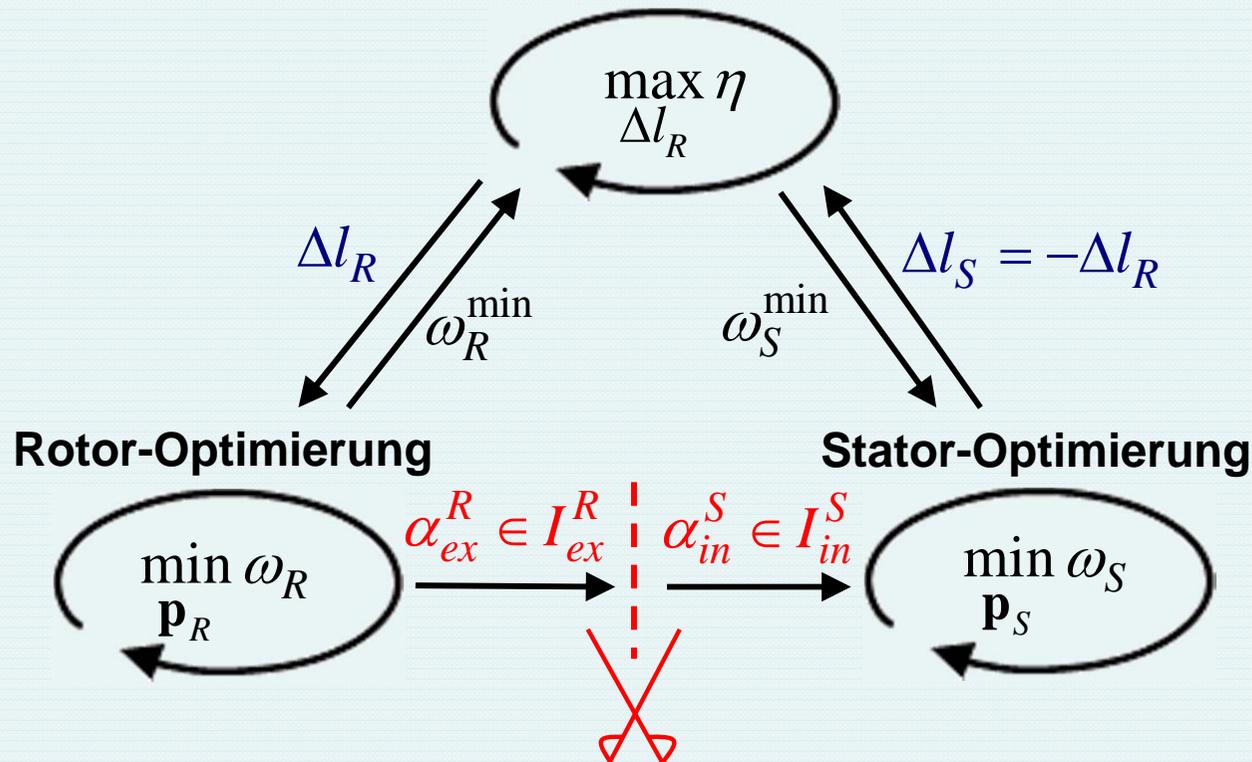


- hoch-dimensionaler Entwurfsraum, da Rotor- und Stator-Parameter gemeinsam variiert werden
- Schwierigkeiten beim Auffinden zulässiger Lösungen
- Kommunikation zwischen den Komponenten in jedem Optimierungsschritt
- Parallelisierung schwer möglich, da Stator-Analyse auf Abströmwinkel des Rotors warten muss

Verteilter Entwurfsprozess

Zur Reduktion der Entwurfsraumdimension werden Rotor- und Statoroptimierung entkoppelt und in einer übergeordneten Stufenoptimierung zusammengeführt:

➤ Prozess-Ablauf:



- übergeordnete Stufen-Optimierung für Δl_R Kopplungsparameter
- untergeordnete Komponenten-Optimierungen mit lokalen Entwurfsparametern zur Erfüllung übergeordneter Vorgaben

- Formulierung der übergeordneten Stufen-Optimierung bzgl. Δl_R

$$\max_{\Delta l_R} \eta$$

$$\text{mit } \eta = \left(1 - \omega_R^{\min}\right) \left(1 - \omega_S^{\min}\right)$$

- unrestringierte skalare Optimierung

- Optimierung des Rotorwirkungsgrades für gegebenes Δl_R

$$\min_{\mathbf{p}_R \in P_R} \omega_R$$

$$\text{mit } P_R = \left\{ \mathbf{p}_R \in \mathbb{R}^7 \mid \alpha_{ex}^R(\mathbf{p}_R) \in I_{ex}^R \right\}$$

- restringierte skalare Optimierung

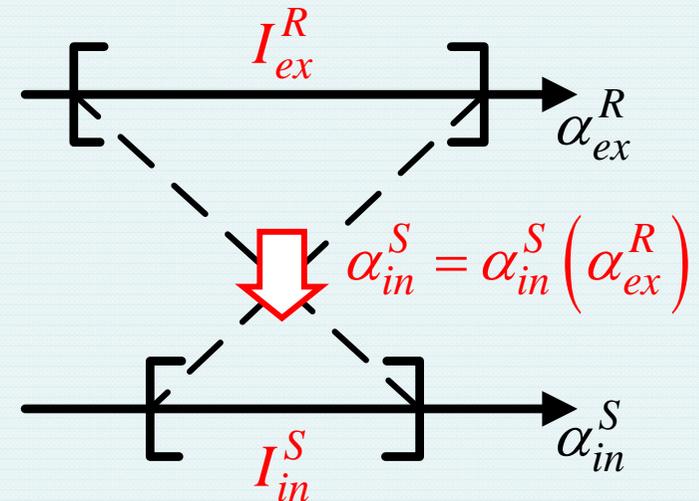
- Optimierung bzgl. unsicherer Anströmung $\alpha_{in}^S \in I_{in}^S$ für gegebenes $\Delta l_S = -\Delta l_R$

$$\min_{\mathbf{p}_S \in P_S} \max_{\alpha_{in}^S \in I_{in}^S} \omega_S$$

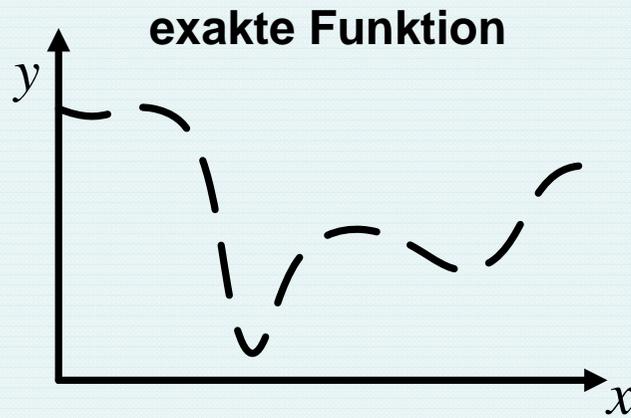
$$\text{mit } P_S = \left\{ \mathbf{p}_S \in \mathbb{R}^7 \mid \max_{\alpha_{in}^S \in I_{in}^S} \left| \alpha_{ex}^S(\mathbf{p}_S) - \alpha_{ex}^{S,soll} \right| \leq \varepsilon^S \right\}$$

- restringierte robuste Optimierung

- jede Auswertung der Stufen-Optimierung erfordert Rotor- und Stator-Optimierung
- Aufwand von robuster Optimierung mit Antwortflächen-Verfahren reduzierbar

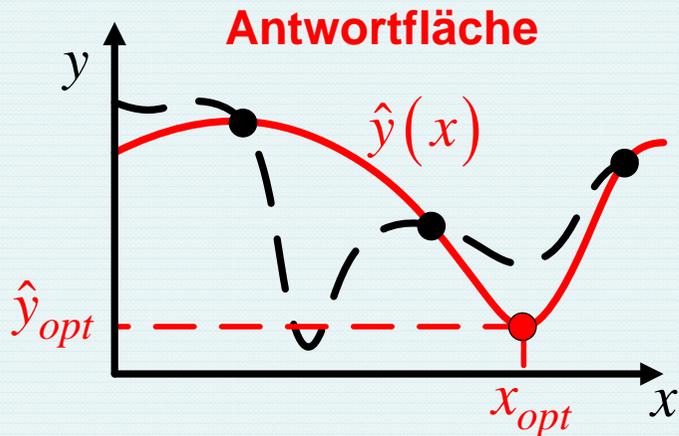


Antwortflächenverfahren



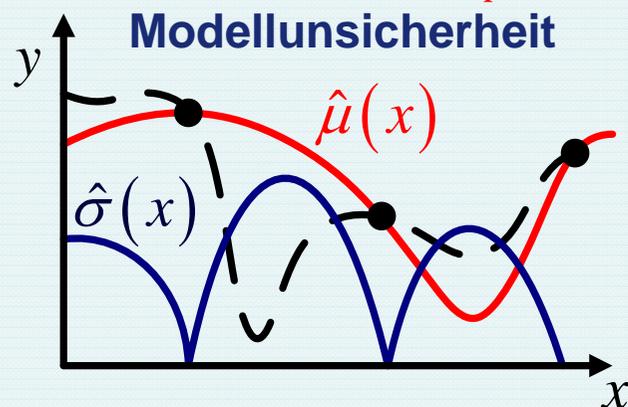
globale Optimierung kaum möglich, wenn Auswertung der Original-Analyse sehr zeitaufwändig

↓ Auswerten weniger Stützstellen



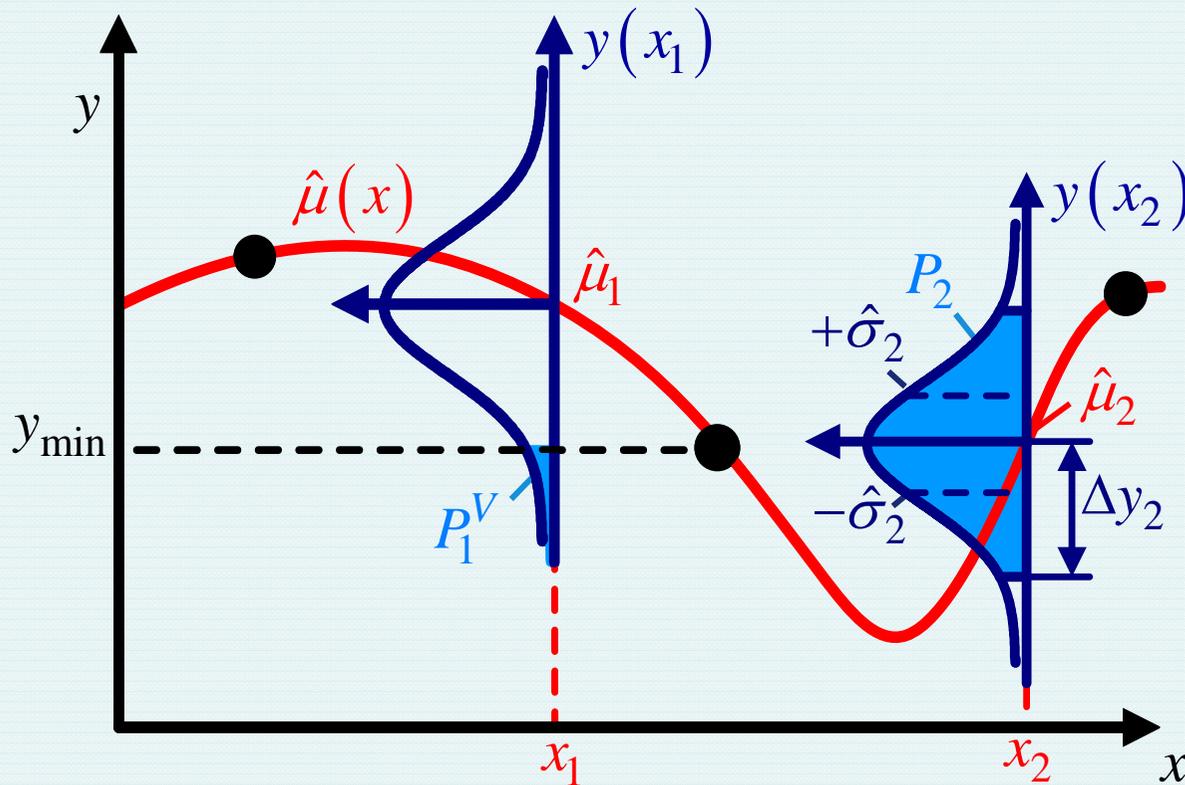
Antwortfläche abhängig von Wahl der Stützstellen
→ Optimierung kann zu lokalen Optima führen

↓ Berücksichtigung von Modellunsicherheiten



Gauß-Prozess-Modelle wie Kriging erlauben neben der Schätzung des Erwartungswertes auch eine Schätzung der Varianz

➤ Aussagen der Antwortfläche



- Wahrscheinlichkeit einer Verbesserung

$$P_1^V = P[Y(x_i) < y_{\min}]$$

- Erwartungswert der Verbesserung

$$\Delta y^V = E[\max(y_{\min} - Y(x_i), 0)]$$

- y-Bereich für vorgegebene Wahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} P_2 &= P[\hat{\mu}_2 - \Delta y_2 \leq Y(x_2) \leq \hat{\mu}_2 + \Delta y_2] \\ &= P[\hat{\mu}_2 - k\hat{\sigma}_2 \leq Y(x_2) \leq \hat{\mu}_2 + k\hat{\sigma}_2] \\ &= \Phi(k) - \Phi(-k) \end{aligned}$$

➤ Rotoroptimierung auf Basis der erwarteten Verbesserung

$$\min_{\mathbf{p}_R} \omega_R \quad s.t. \quad \alpha_{ex}^R \in I_{ex}^R$$

initiale Stützstellen $\mathbf{p}_{R,i}$

Antwortflächen für ω_R, α_{ex}^R

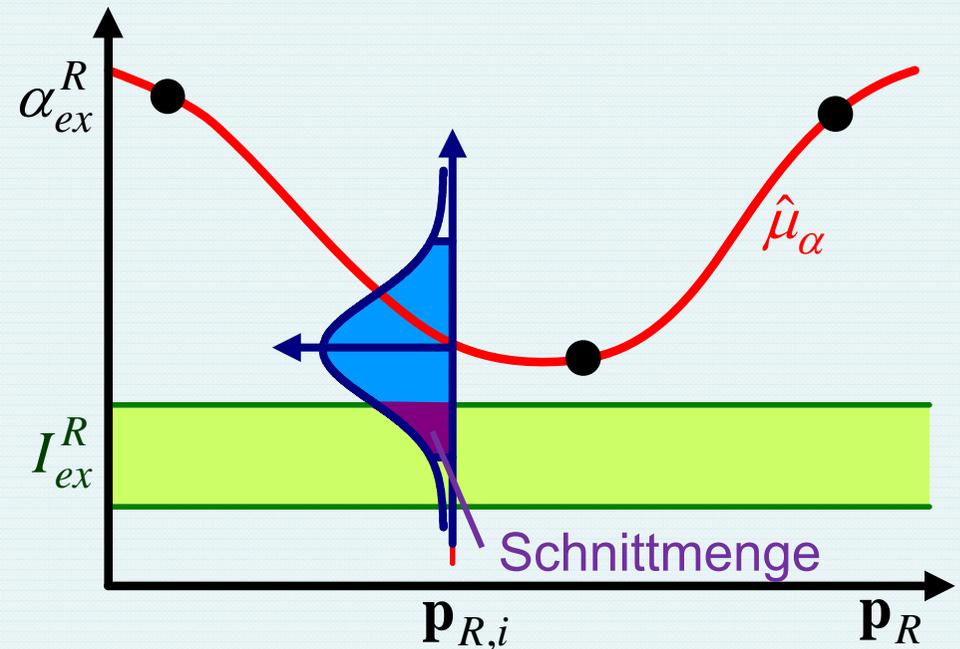
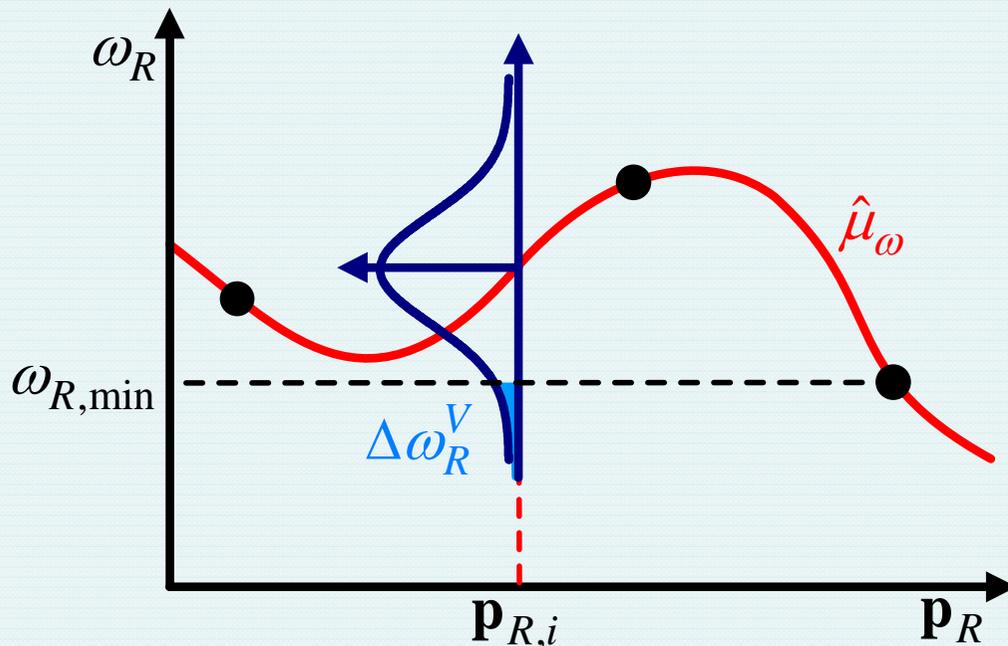
Suche auf Antwortfläche nach maximaler, zulässiger Verbesserung in ω_R

$$\mathbf{p}_R^* = \arg \max_{\mathbf{p}_R} \Delta \omega_R^V \quad s.t.$$

$$[\hat{\mu}_\alpha - \Delta\alpha, \hat{\mu}_\alpha + \Delta\alpha] \cap I_{ex}^R \neq \emptyset$$

Antwortflächenadaption mit \mathbf{p}_R^* ,

$$\text{falls } E_{\omega_R}^V(\mathbf{p}_R^*) \leq E_{\omega_R, \min}^V$$



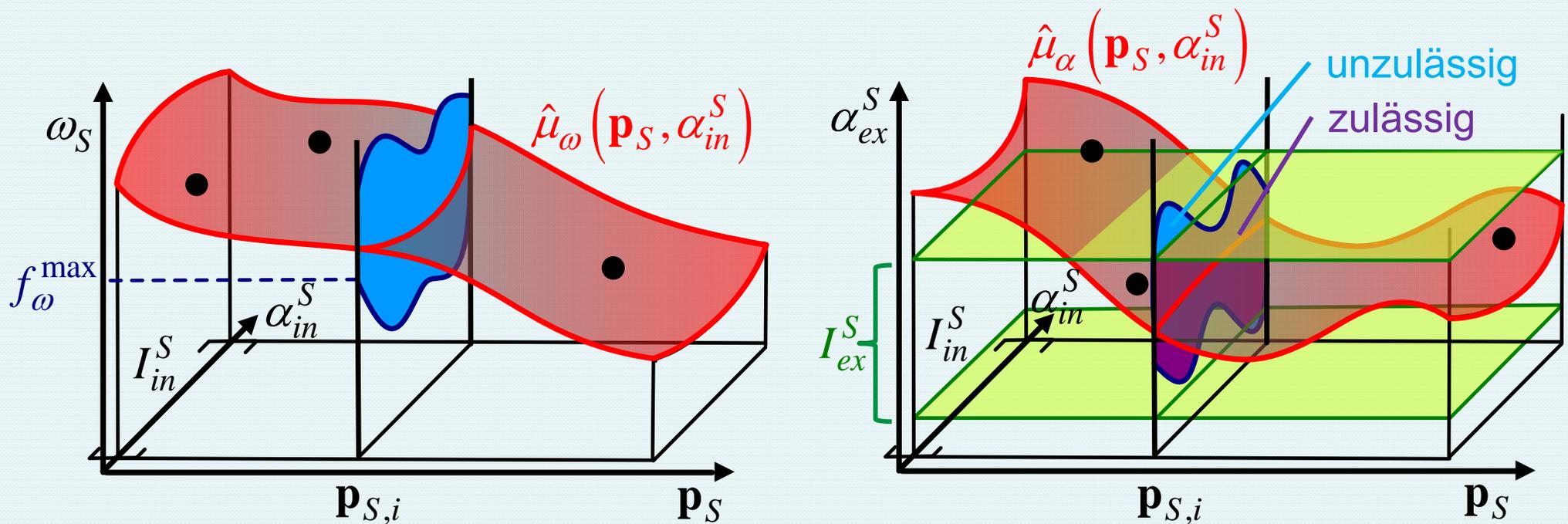
➤ Robuste Statoroptimierung

$$\min_{\mathbf{p}_S} \max_{\alpha_{in}^S \in I_{in}^S} \omega_S \quad s.t. \quad \max_{\alpha_{in}^S \in I_{in}^S} \left| \alpha_{ex}^S - \alpha_{ex}^{S,soll} \right| \leq \varepsilon^S$$

- Suche auf Antwortfläche von ω_S und α_{ex}^S nach robust-optimalen Entwurf \mathbf{p}_S^* , so dass:

- 1) $f_\omega^{\max} = \max_{\alpha_{in}^S} (\hat{\mu}_\omega - 3\hat{\sigma}_\omega)$ bzgl. \mathbf{p}_S minimal wird und

- 2) $[\hat{\mu}_\alpha - \Delta\alpha, \hat{\mu}_\alpha + \Delta\alpha] \cap I_{ex}^S \neq \emptyset \quad \forall \quad \alpha_{in}^S \in I_{in}^S$ an dieser Stelle gilt



- gefundener Punkt dient zum Antwortfläche-Update oder ist Ergebnis

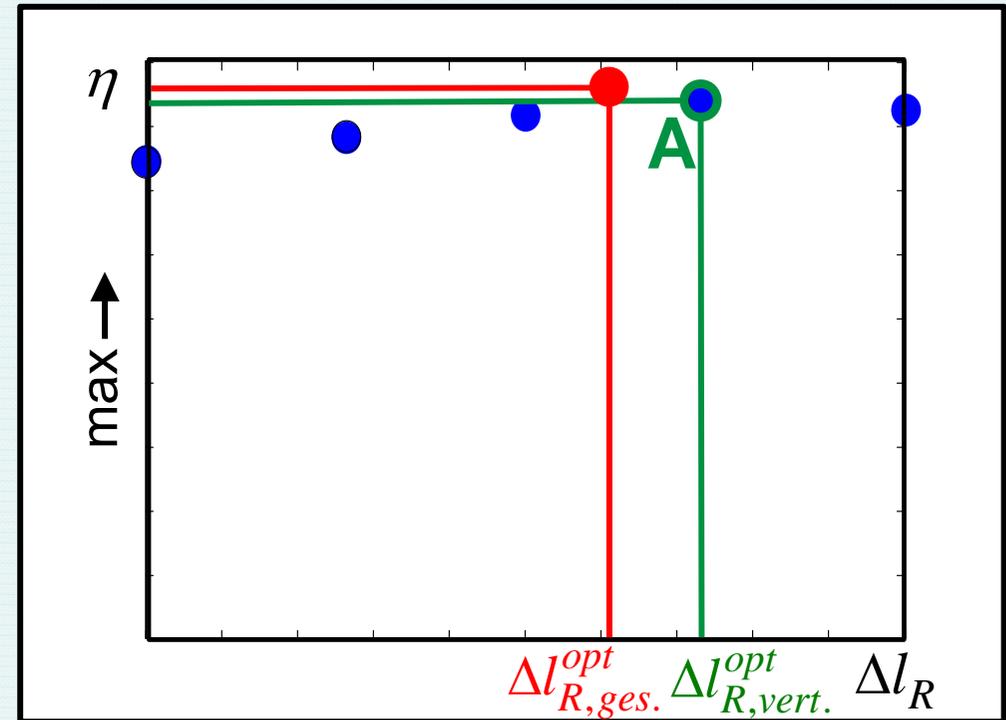
Ergebnisvergleich

➤ Optimum der Gesamtoptimierung

➤ DoE des verteilten Prozesses

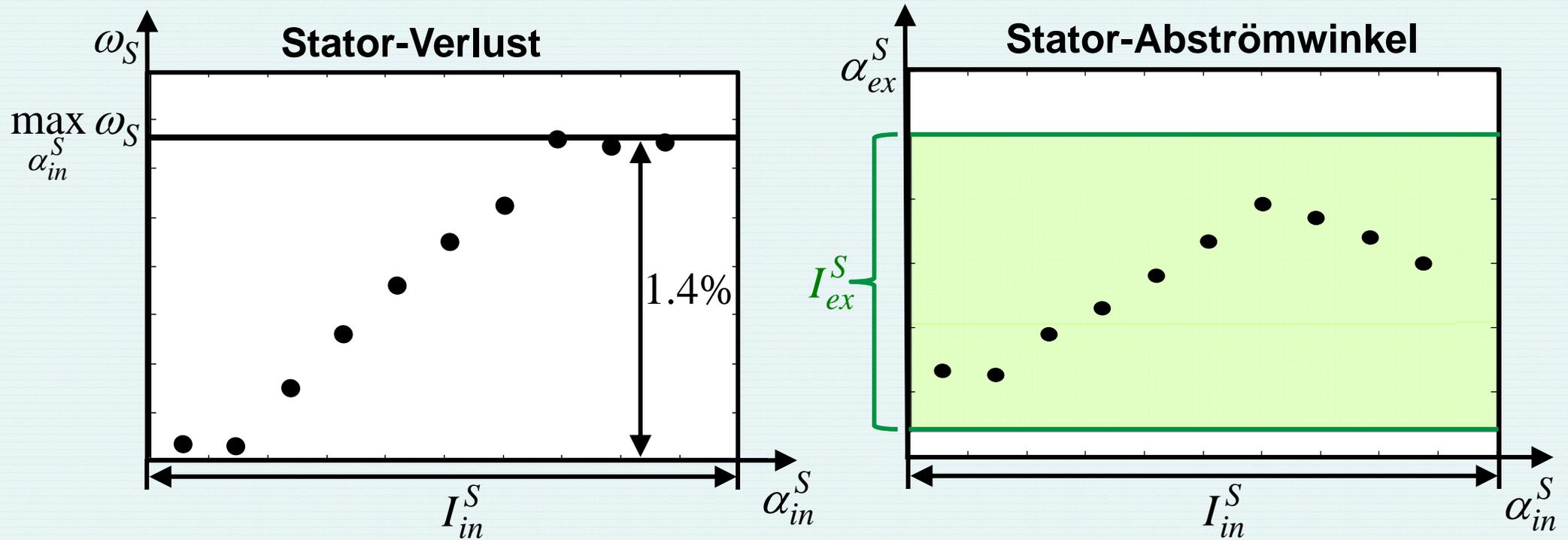
	Funktionsauswertungen	Konvergenzrate
Rotor	6000	39%
Stator	3500	80%

➤ Maximum des verteilten Prozesses



- eine leichte Erhöhung der Rotorstufenbreite erhöht den Gesamtwirkungsgrad der Stufe
- Verteilter Prozess und Gesamtprozess liefern ähnliche Ergebnisse, Optimum leicht verschoben
- niedrige Konvergenzrate der Rotoroptimierung spiegelt schwierigen Umgang von Antwortflächenverfahren mit nicht-konvergierten Lösungen wider

Nachrechnen des Stators für besten Stufen Entwurf **A**



- Variation des Stator-Verlustes über dem gesamten Intervall gering
- der geforderte Abströmwinkel α_{ex}^S des Stators kann über dem gesamten Intervall der möglichen Zuströmwinkel eingehalten werden
- alle Entwürfe konvergierten trotz Anströmwinkel-Variation

- Entwurf komplexer Systeme durch mehrere Partner erfordert spezielle Strukturen verteilter Optimierungen
- entkoppelte Optimierungen erzeugen durch unsichere Kopplungsparameter Robustheitsproblematiken
- Antwortflächenverfahren bieten gute Möglichkeiten, Optimierungen effizient durchzuführen und sogar robuste Kriterien zu berücksichtigen
- Antwortflächenverfahren werden durch nicht-konvergierte Analysen beeinträchtigt und benötigen entsprechende Strategien