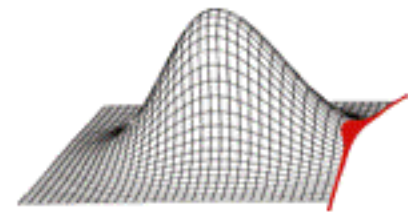


Robustheitsverbesserung des strömungsmechanischen Verhaltens einer Verdichterschaufel

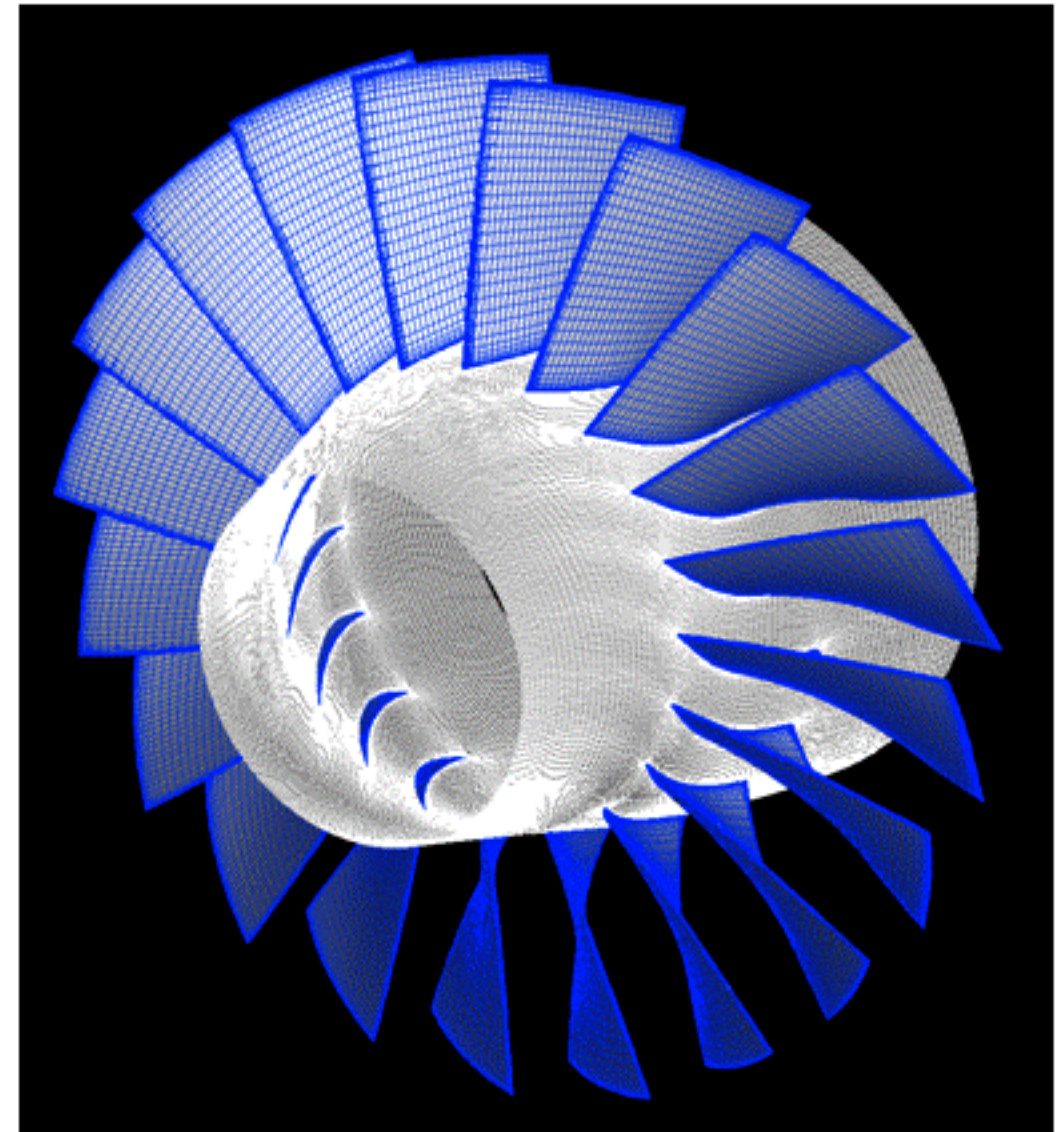
3. Dresdner Probabilistik Workshop

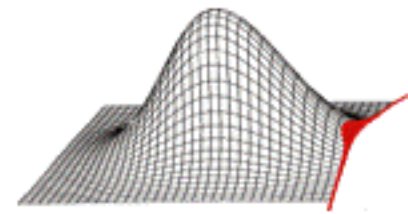
Alexander Lange, Matthias Voigt, Konrad Vogeler

TU Dresden, 08. Oktober 2010

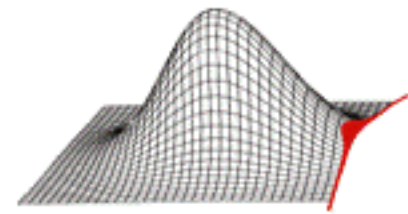


- Ziel: Verbesserung des strömungsmechanischen Verhaltens einer Verdichterschaufel gewünscht
 - keine parameterbasierte Beschreibung, nur als CAD-Geometrie vorhanden
 - kein Optimierungsalgorithmus vorhanden
 - keine Kenntnisse bezüglich des Systemverhaltens (Zielfunktion!)

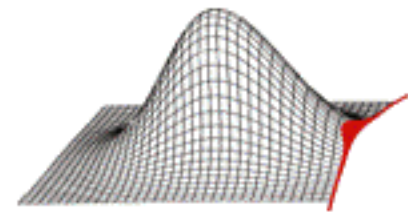




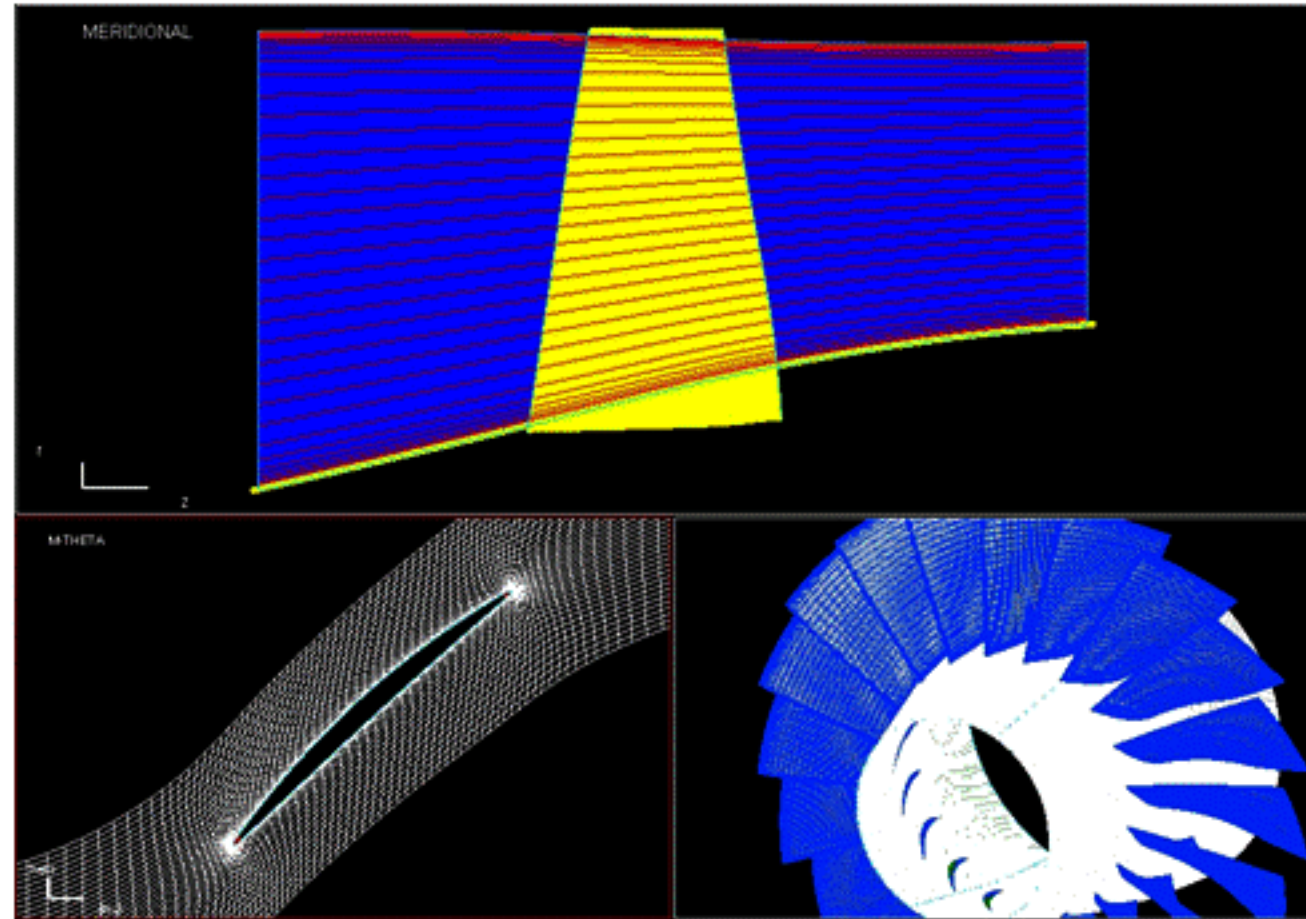
- Ansatz: iterative MCS mit delta-Parametermodell
- Erzeugen eines numerischen Netzes mit Numeca AutoGrid und **deterministischen CFD-Modells** mit Fine Turbo
- Verwendung eines **delta-Parametermodells** zur Identifikation klassischer Profilparameter und Erzeugung geometrischer Variationen
- **deterministische Optimierung** durch Abtasten und Kennenlernen des Systemverhaltens über Monte-Carlo und Regressionsmodelle und iterative Verlagerung des Definitionsbereiches hin zu gewünschter Systemantwort
- **Robuste Optimierung** durch Bestimmung einer Überlebenswahrscheinlichkeit für jede Realisierung mit Validierungsrechnungen durch CFD

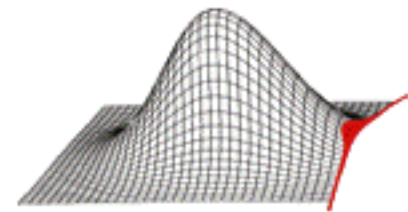


- **deterministisches Modell**
- **delta-Parametermodell**
- **deterministische Optimierung**
- **Robustheitsoptimierung**

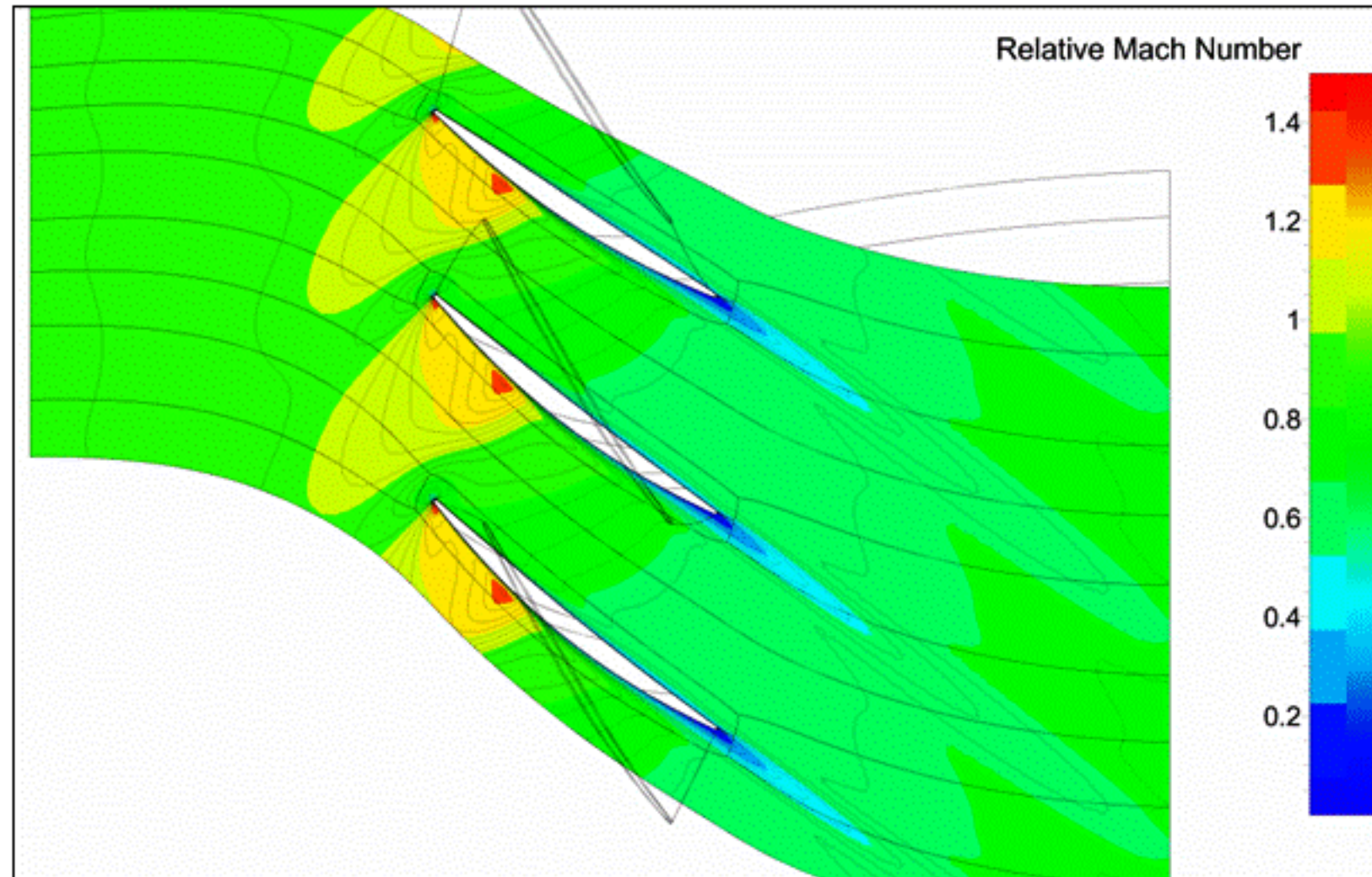


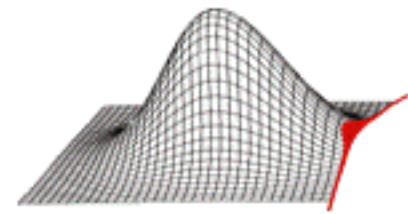
- Fan-Schaufel für transsonische Anwendung
- Import der CAD-Geometrie in AutoGrid
- Vernetzung mit ~450k Zellen in O4H-Topologie mit Gehäusespalt
- CFD-Modell in FineTurbo aufgesetzt mit folgenden Randbedingungen:
 - N fest bei ~ 28000/min
 - Einlass: Massenstrom, Strömungswinkel, stat. Temp.
 - Auslass: stat. Druck (rad. GGW)



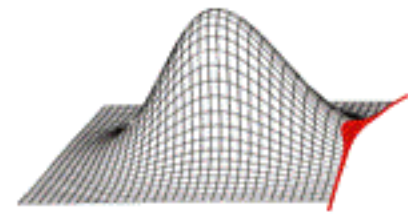


- Relative Mach-Zahl bei 50% Schaufelhöhe
- Ab ca. 25% Schaufelhöhe Überschallströmung
 → Verdichtungsstoß
 → starke Verzögerung der Strömung auf der Saugseite des Profils
 → Potential zur Verbesserung:
 - Lage des Stoßes
 - Machzahl am Stoßeintritt





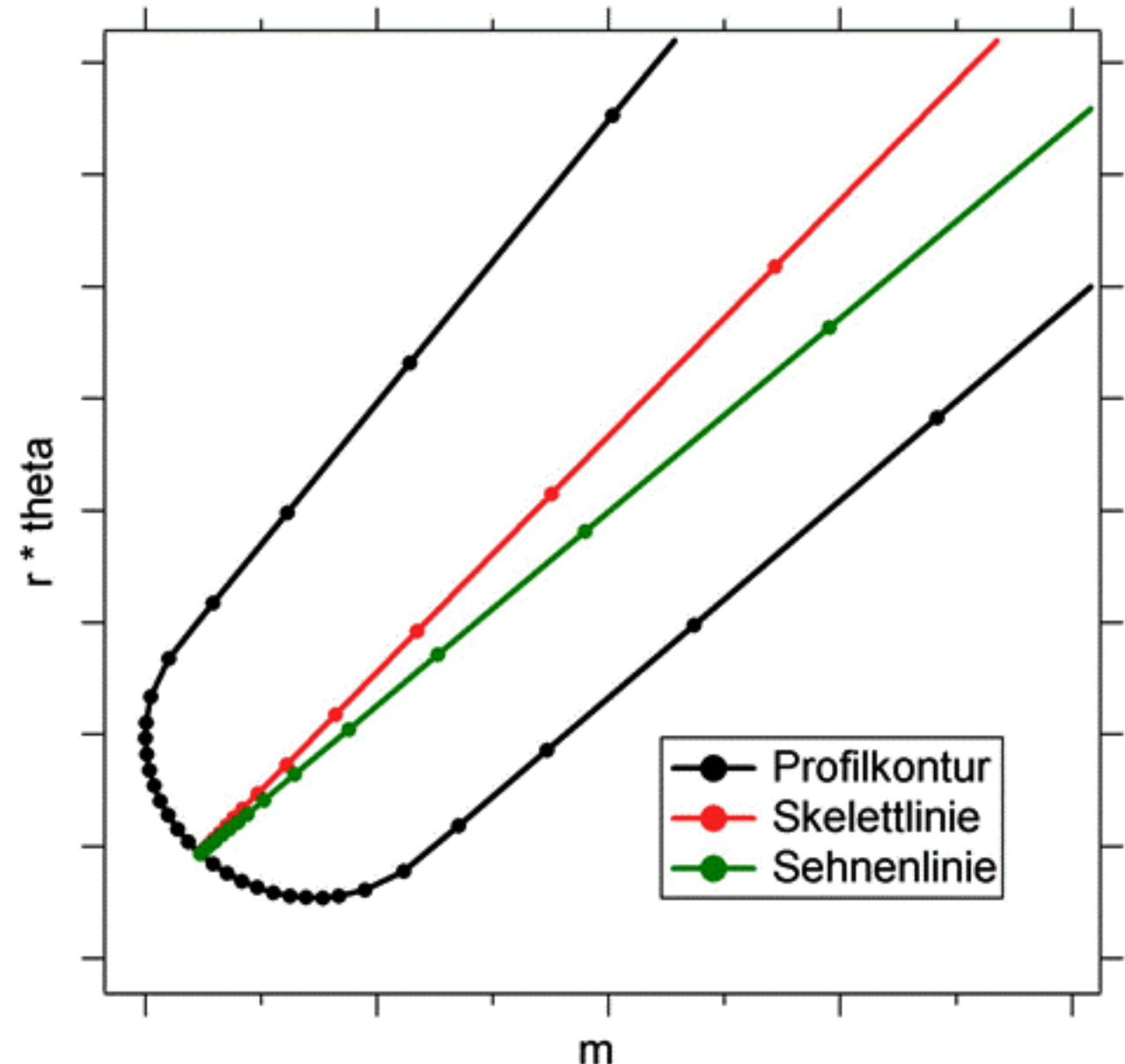
- **deterministisches Modell**
- **delta-Parametermodell**
- **deterministische Optimierung**
- **Robustheitsoptimierung**

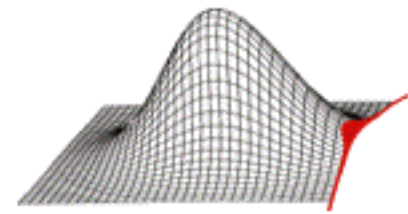


1. Identifikation klassischer Profilparameter der vorhandenen Verdichterschaufel
→ Zerlegen des Profils in Dicken- und Wölbungsverteilung

somit sind 10 Parameter pro Profilschnitt bekannt:

- Stafflungswinkel
- Sehnenlänge
- Vorder- und Hinterkantendicke
- jeweils mit Pos. auf der Sehne
- max. Dicke und Wölbung
- jeweils mit Pos. auf der Sehne





2. Erstellen parameterbasierter Variationen dieser Schaufel

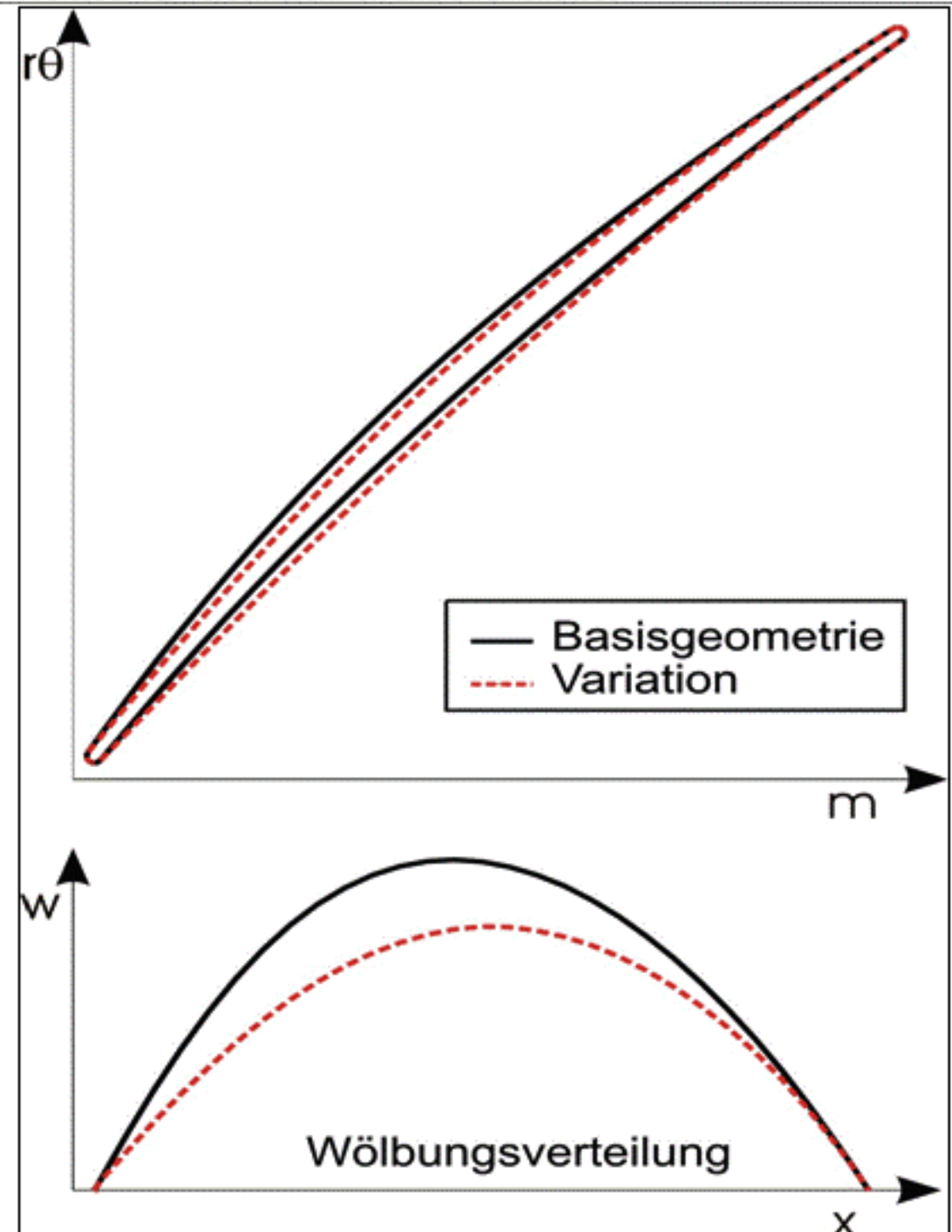
- Variation der Profilparameter
- Variation der Dicken- und Wölbungsverteilung

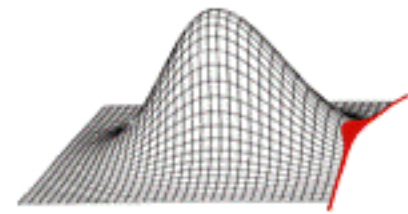
dabei: Modellierung der Änderung gegenüber der unverzerrten Referenzgeometrie

- Kein Fitting-Gap (geringe Änderungen)
- wenige Parameter (vgl. 3D-Modell)

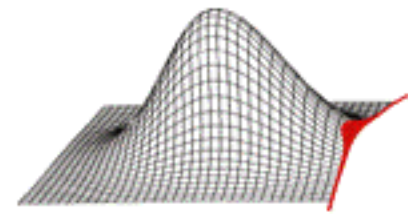
hier: Parameter über Schaufelhöhe gemittelt betrachtet

- 10 Designparameter



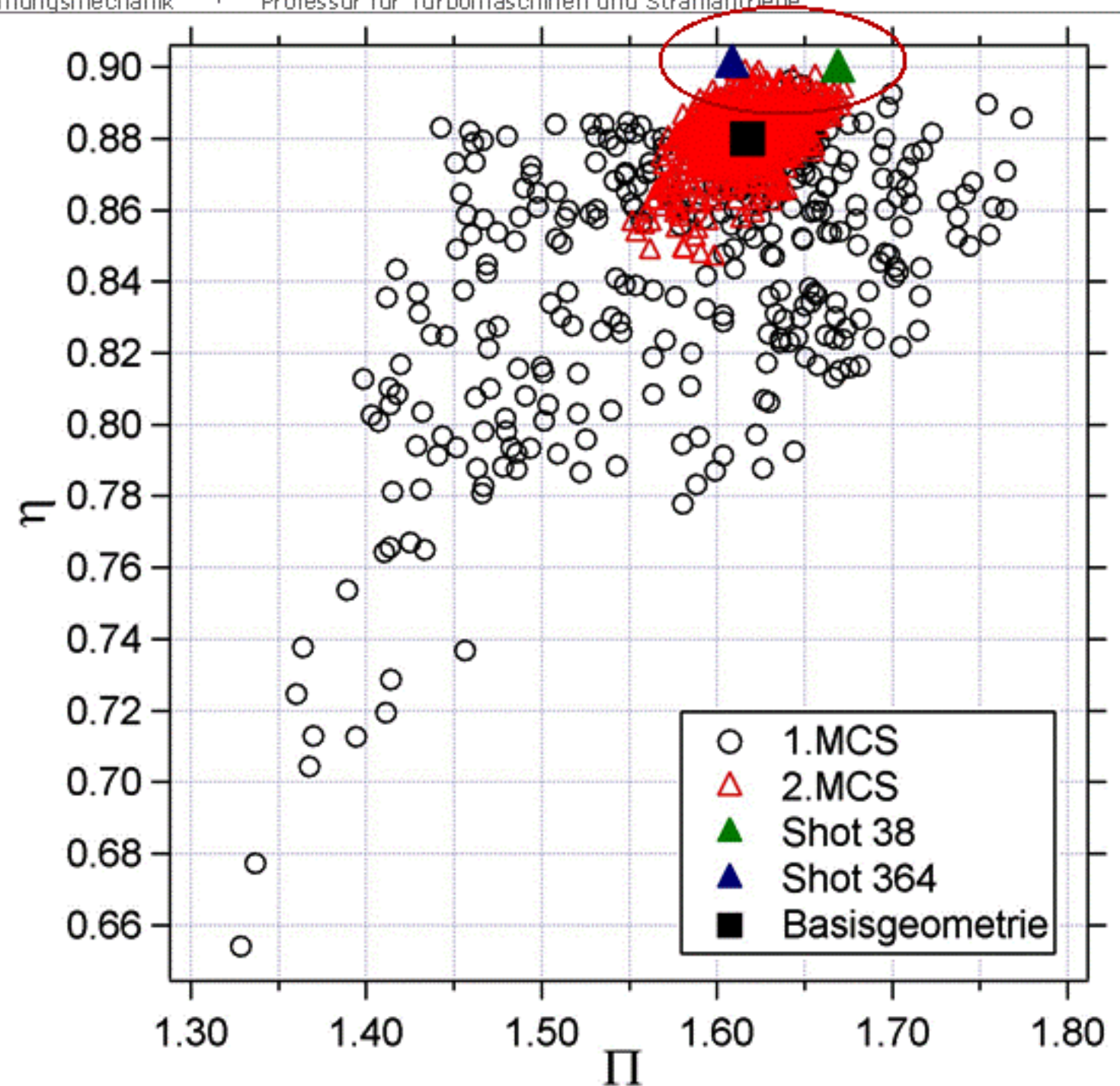


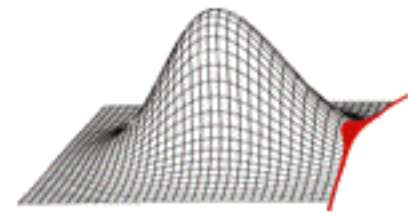
- **deterministisches Modell**
- **delta-Parametermodell**
- **deterministische Optimierung**
- **Robustheitsoptimierung**



- iterative MCS:
 - gleichverteilte und unkorrelierte Zufallszahlen
 - schrittweise Verlagerung des Definitionsbereiches zu gewünschten Ergebnissen
- 1. MCS 300 Shots (weite Grenzen)
- 2. MCS 600 Shots (verlagerte und eingengte Grenzen)

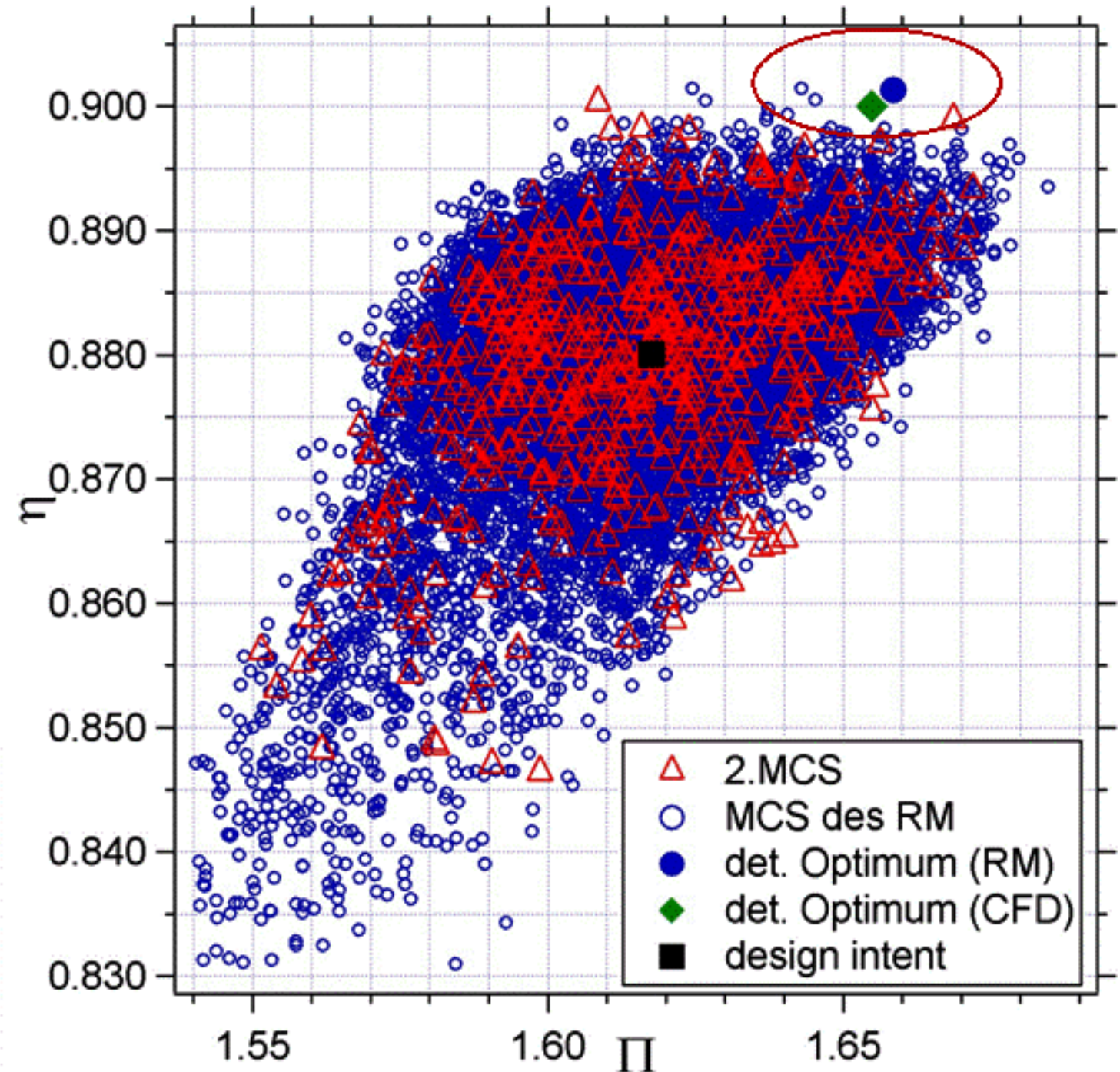
Realisierung	Π	η
Basisgeometrie	1.6176	0.8801
shot 38	1.6687	0.8989
shot 364	1.6085	0.9003

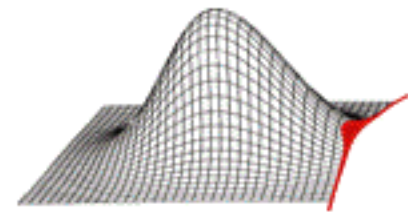




- Approximation des Systemverhaltens über Regressionsmodell (RM): (Antwortfläche dritter Ordnung: $R^2=1$ erreicht)
- Auflösung des Bereiches zwischen beiden Shots mit 10000er MCS der Antwortfläche
- bester Shot als det. Optimum akzeptiert.

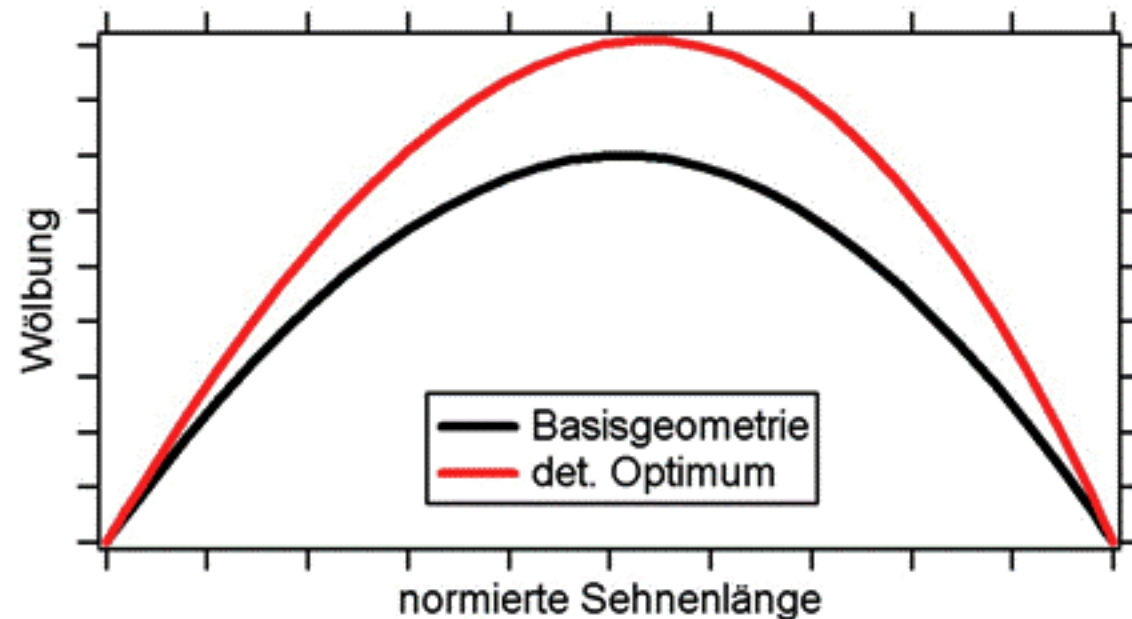
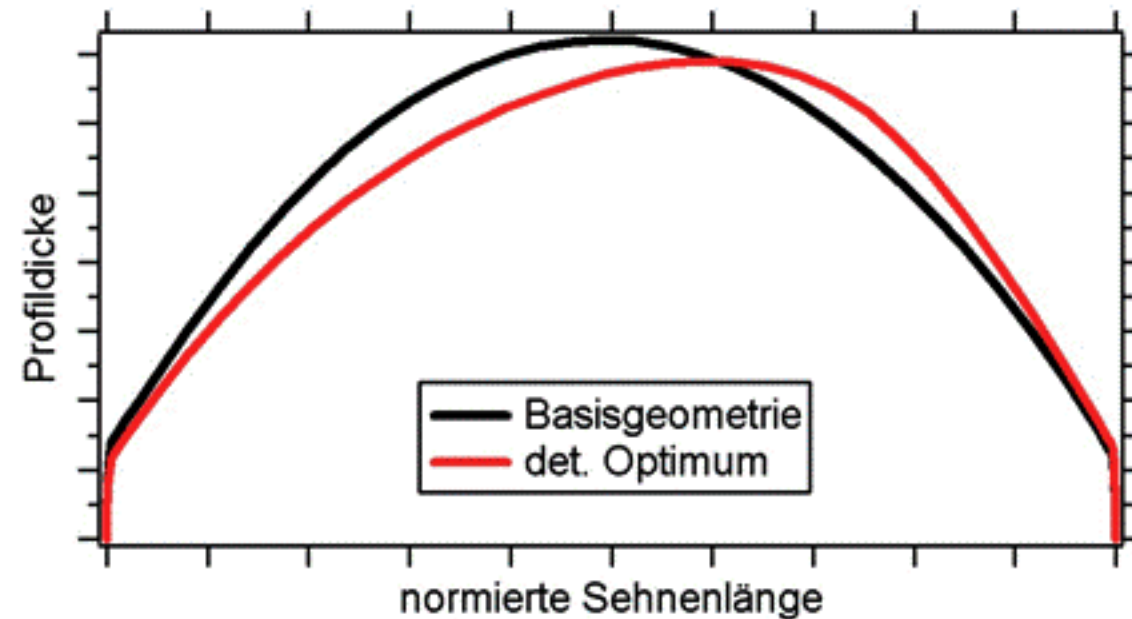
Realisierung	Π	η
Basisgeometrie	1.6176	0.8801
det. Optimum (RM)	1.6580	0.9014
det. Optimum (CFD)	1.6549	0.9000

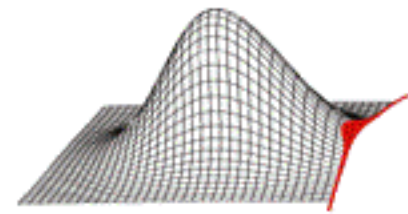




det. Optimum:

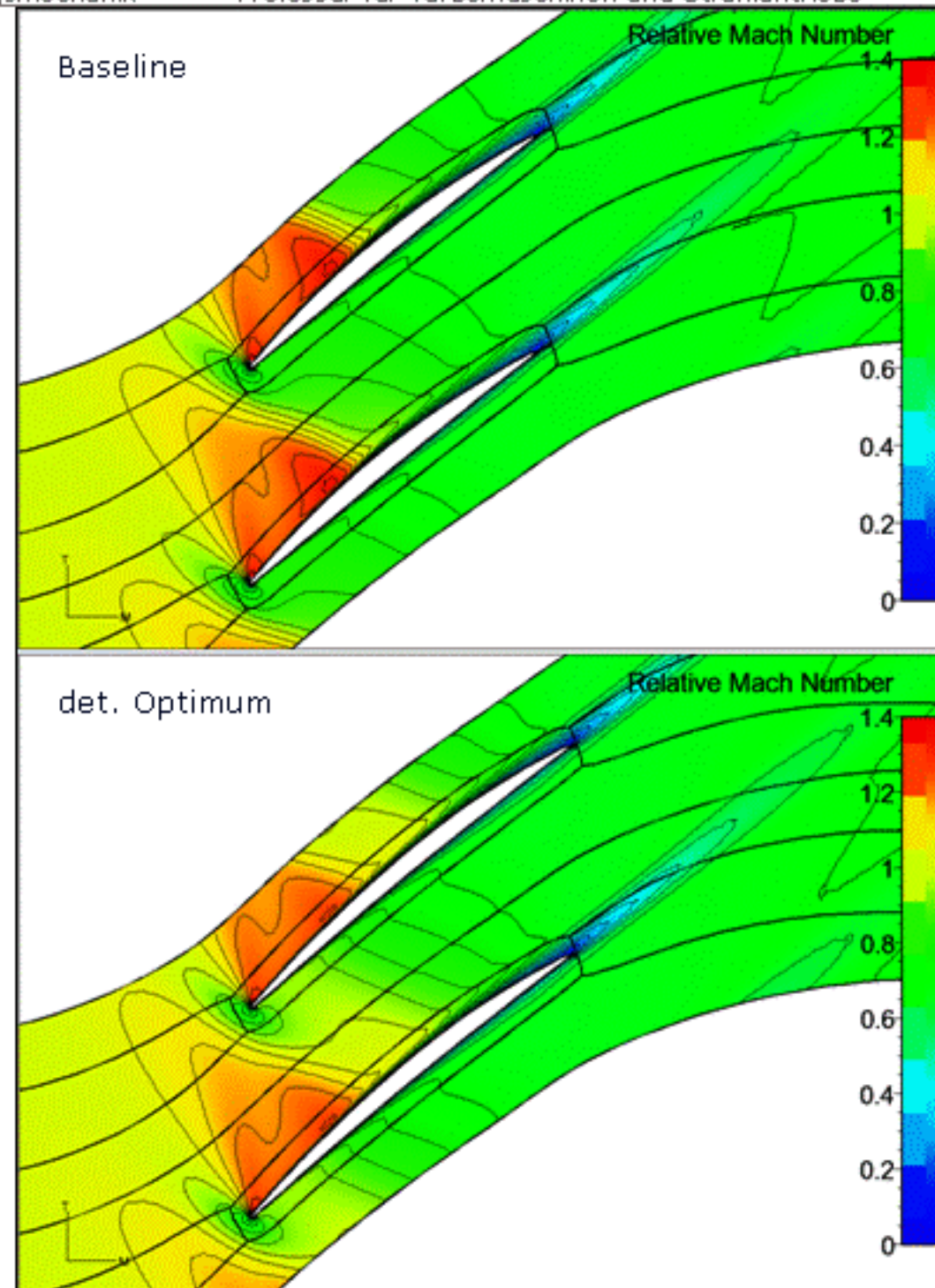
- max. Dicke und max. Wölbung nach hinten verlagert
→ Stoßkonfiguration
- max. Wölbung vergrößert
→ Umlenkung

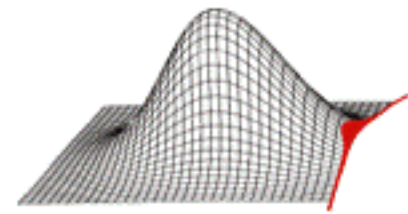




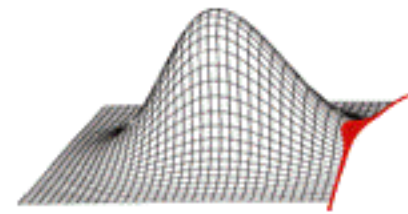
det. Optimum:

- relative Machzahl im Mittelschnitt
- wesentlich verbesserte Stoßkonfiguration
 → geringere Beschleunigung (und Verzögerung) auf SS
 → geringere Eintrittsmachzahl in den Stoß
 → geringere Verluste





- **deterministisches Modell**
- **delta-Parametermodell**
- **deterministische Optimierung**
- **Robustheitsoptimierung**

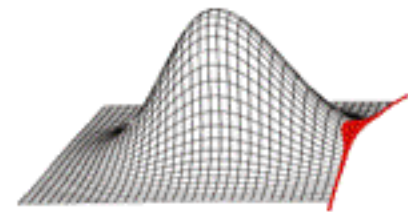
Zielstellung:

- Lösen von:
$$P = \int_{g(\mathbf{x}, f(\mathbf{x})) > 0} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

→ analytisch nicht bzw. nur in Ausnahmefällen möglich

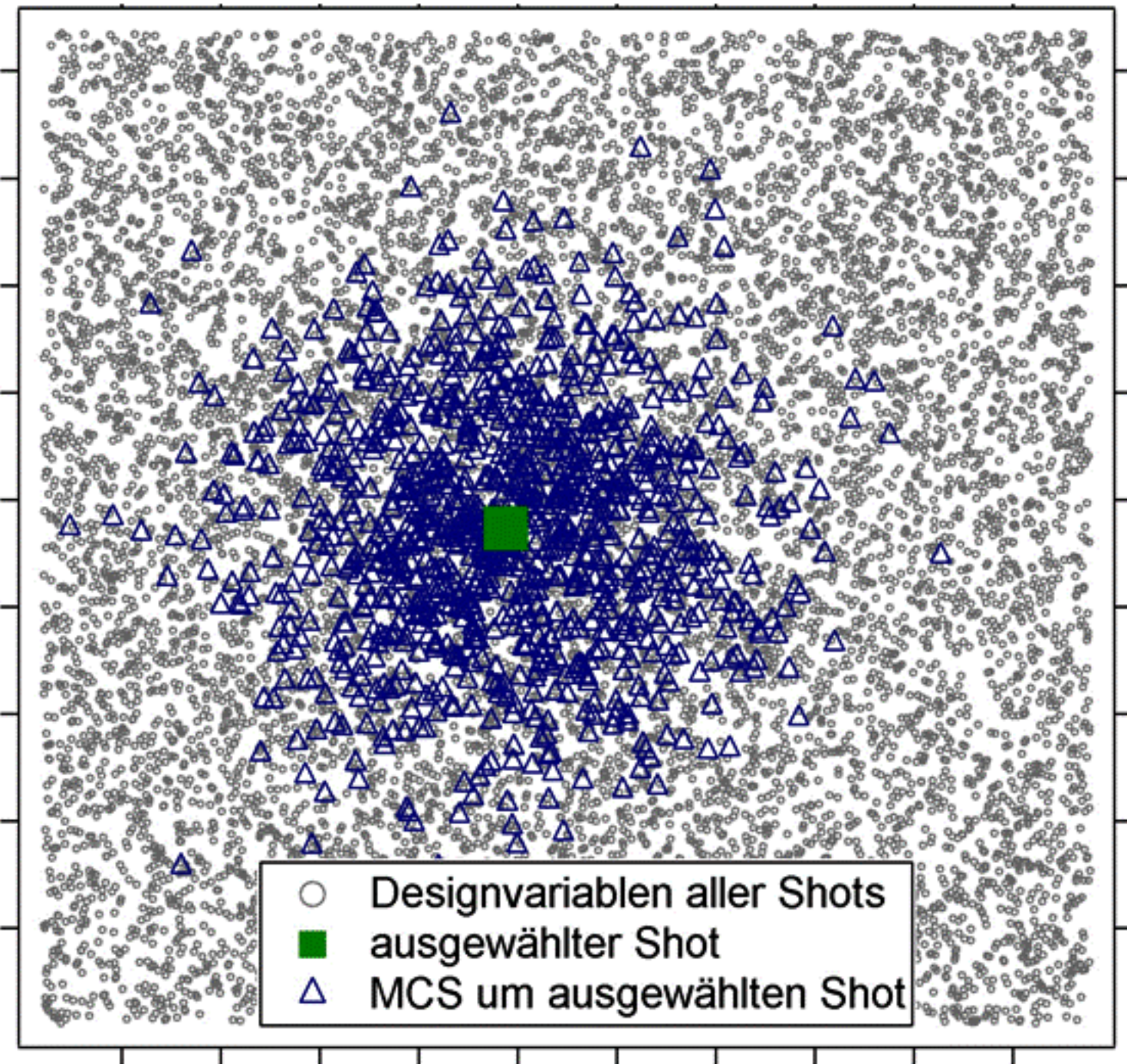
Numerische Umsetzung:

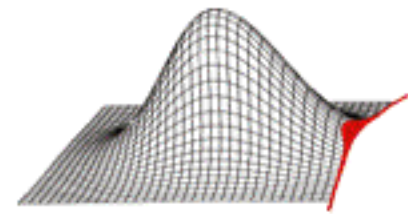
- MCS zur näherungsweise Lösung über:
$$P \approx \frac{N_{Ueberleben}}{N_{gesamt}}$$
- 10000 Shots Designvariablen + 1000 Shots Streuungsvariablen
 - 10 Mio. Systemauswertungen (auf RM mit $R^2=1 \Rightarrow 45\text{min}$)
 - für jeden Punkt im Designraum ist für die Ergebnisgrößen bekannt:
 - Versagenswahrscheinlichkeit $P(Y < Y_{Referenz})$
 - Streuung
 - Mittelwert



Teilen des Parameterraumes:

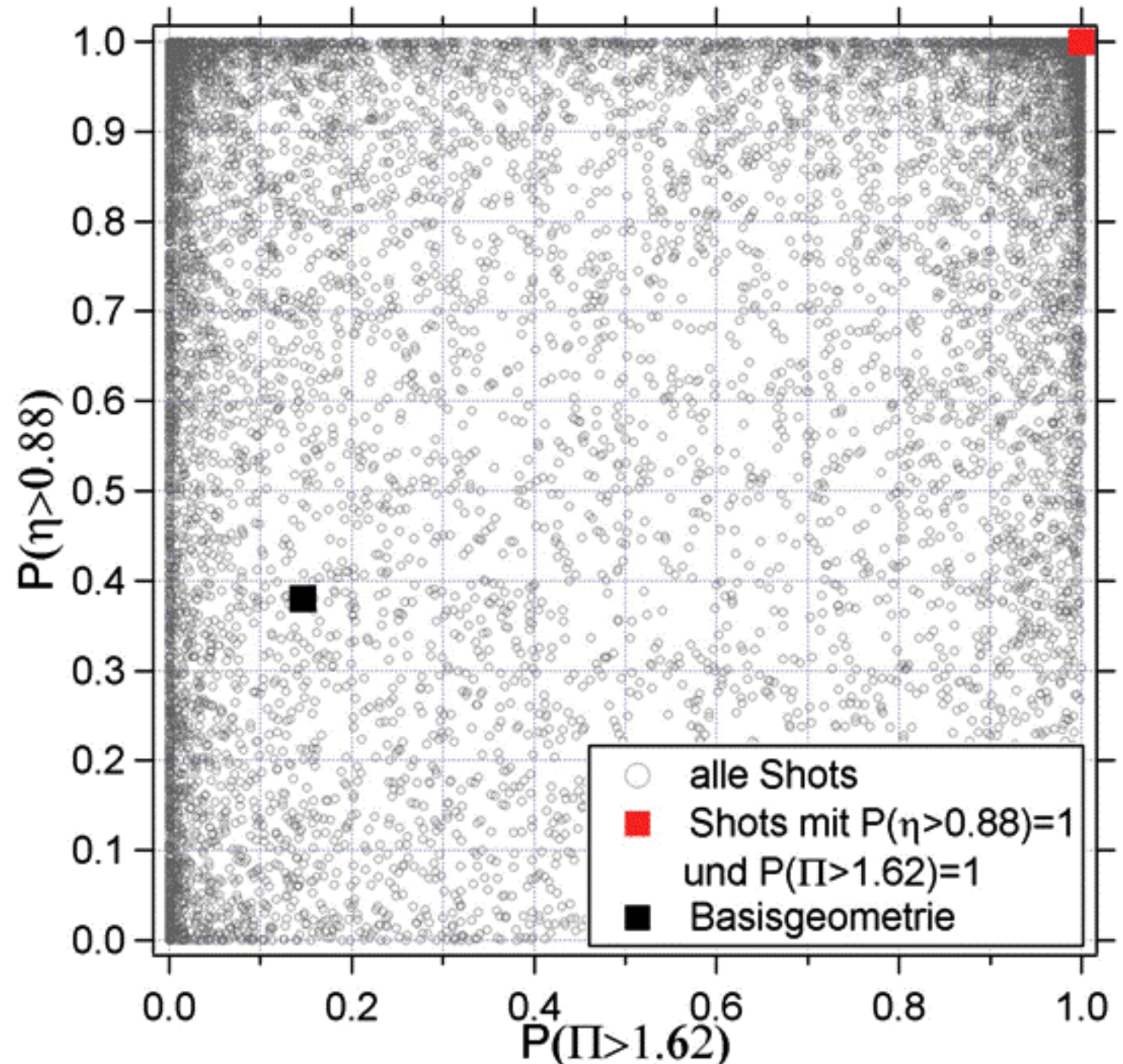
- Designvariablen 10000 Shots
 → gleichverteilt
 → unkorreliert
 → $\Delta P = 0.8 \Delta P_{MCS}$
- Streuungsvariablen 1000 Shots
 → normalverteilt
 → unkorreliert
 → $\sigma P = 0.2 \Delta P_{MCS}$
 (akademische Annahme! Wenn statistische Informationen der Streuungsparameter vorhanden, dann hier verwenden.)

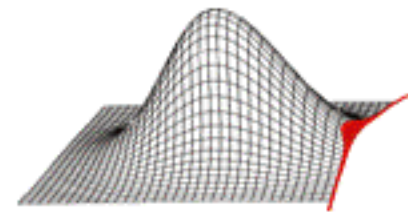




Ergebnisse I:

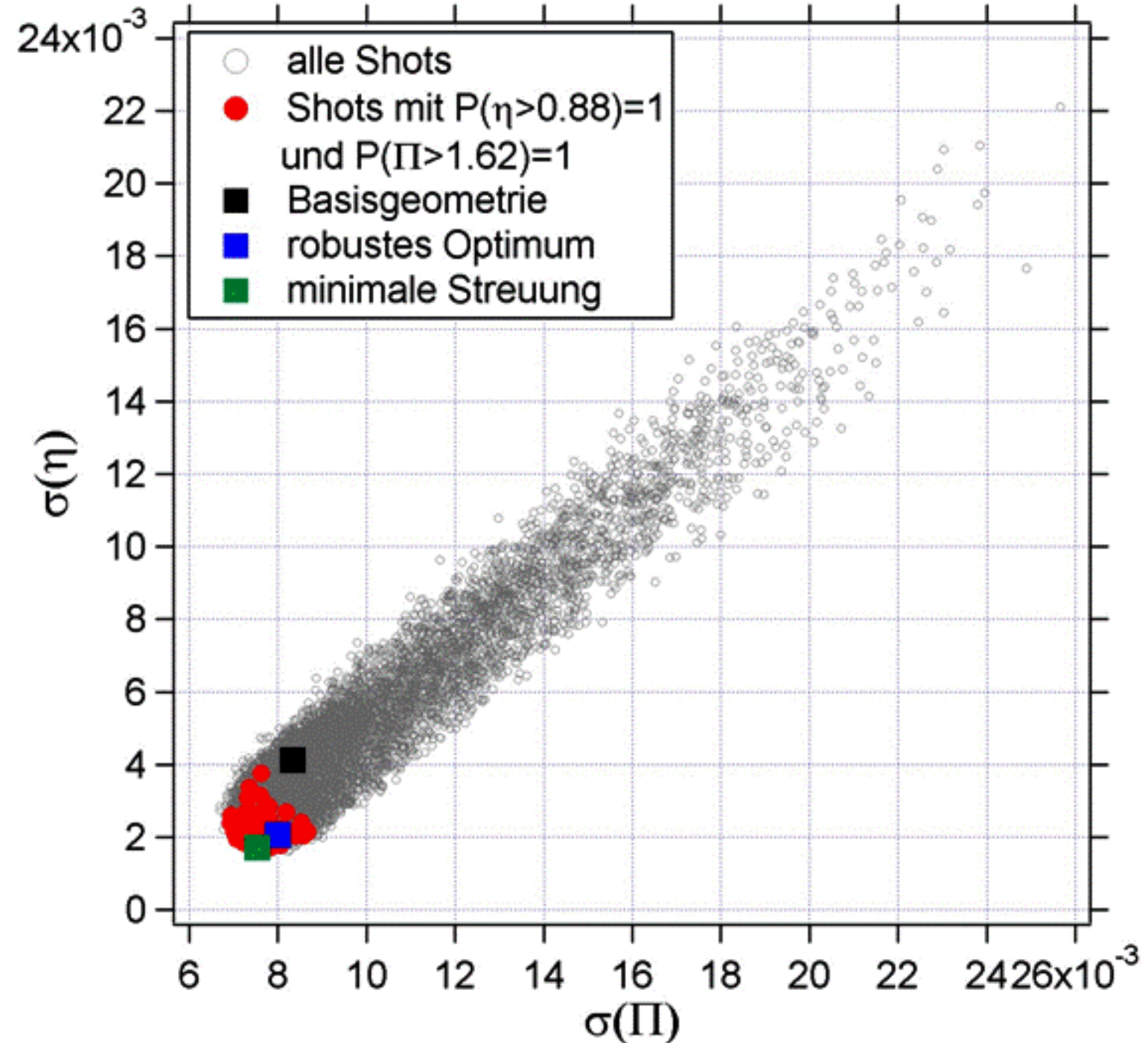
- Wahrscheinlichkeit des Überschreitens der geforderten Grenzwerte beider Ergebnisse
- Auswahl der Shots, die die Grenze zu 100% überschreiten

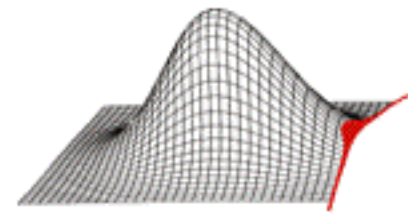




Ergebnisse II:

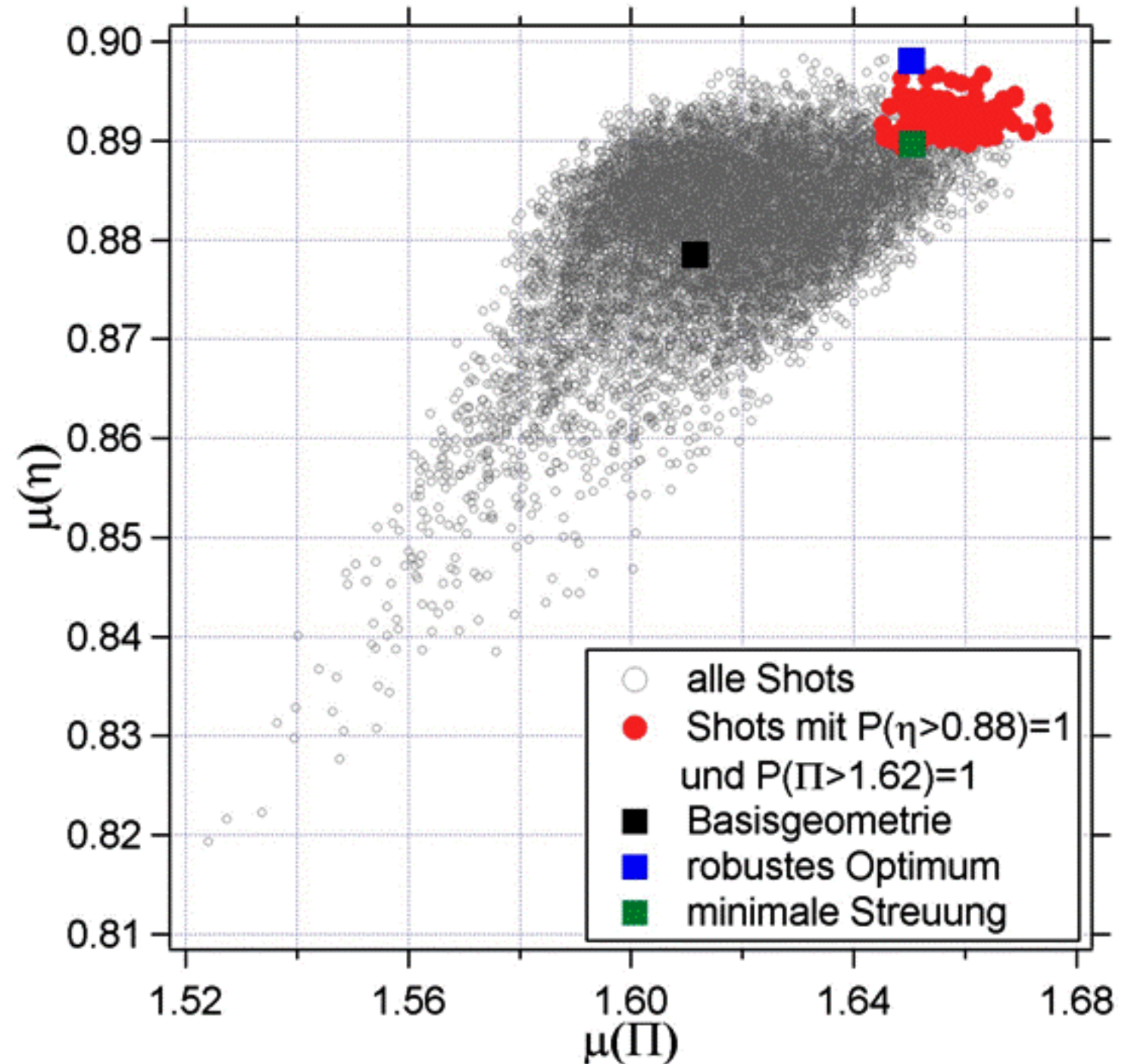
- Streuungen der Ergebnisgrößen
- Aus markierten (100% Wahrscheinlichkeit für Überschreiten) Schaufel mit min. Streuung für Wirkungsgrad ausgewählt → „minimale Streuung“

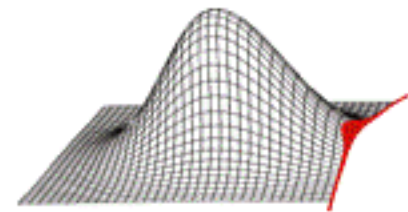




Ergebnisse III:

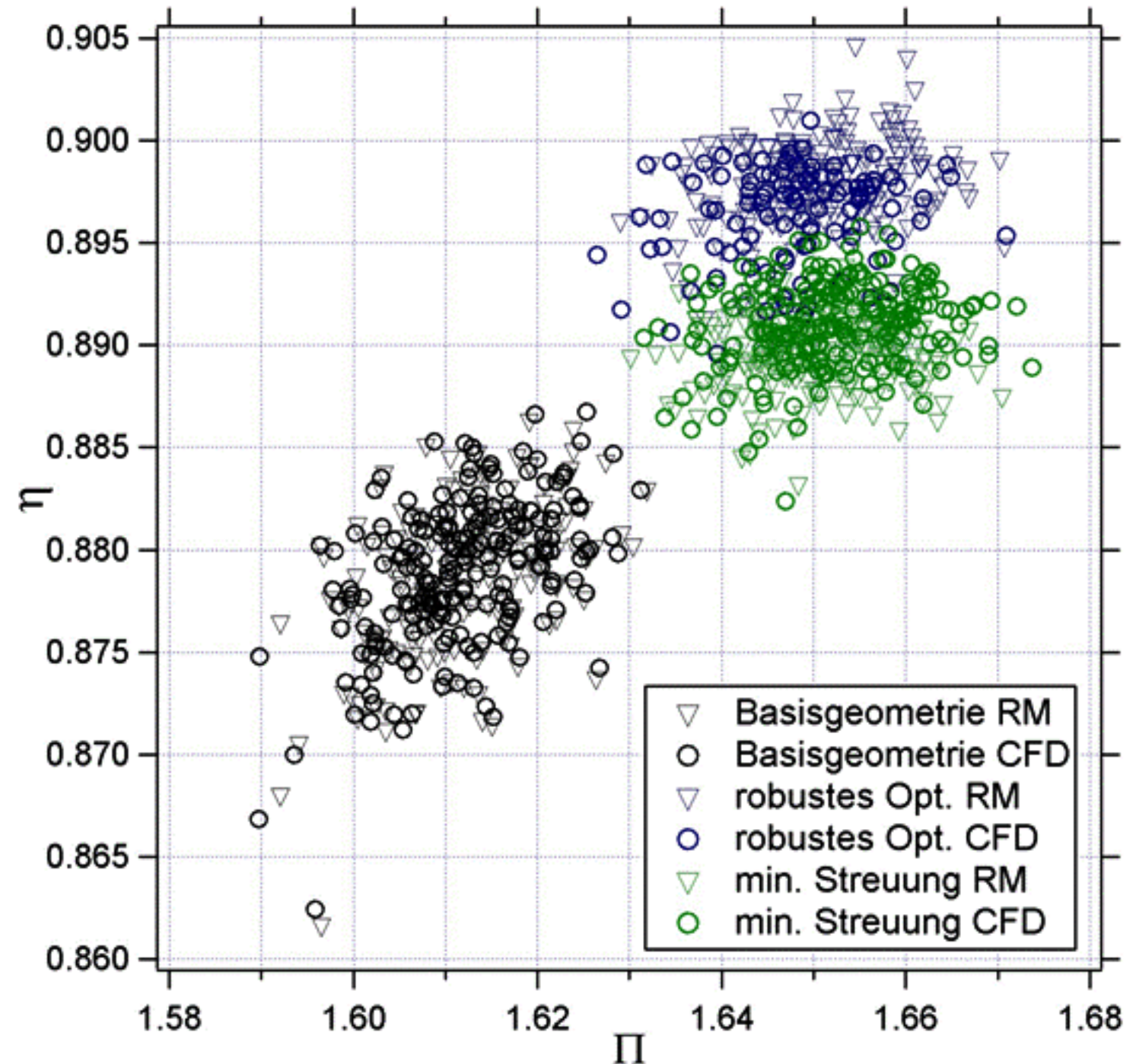
- Mittelwerte der Ergebnisgrößen
- Aus markierten (100% Wahrscheinlichkeit für Überschreiten) Schaufel mit max. Mittelwert für Wirkungsgrad ausgewählt
→ „robustes Optimum“

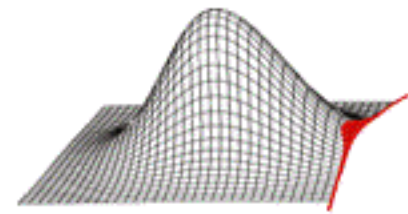




Validierung:

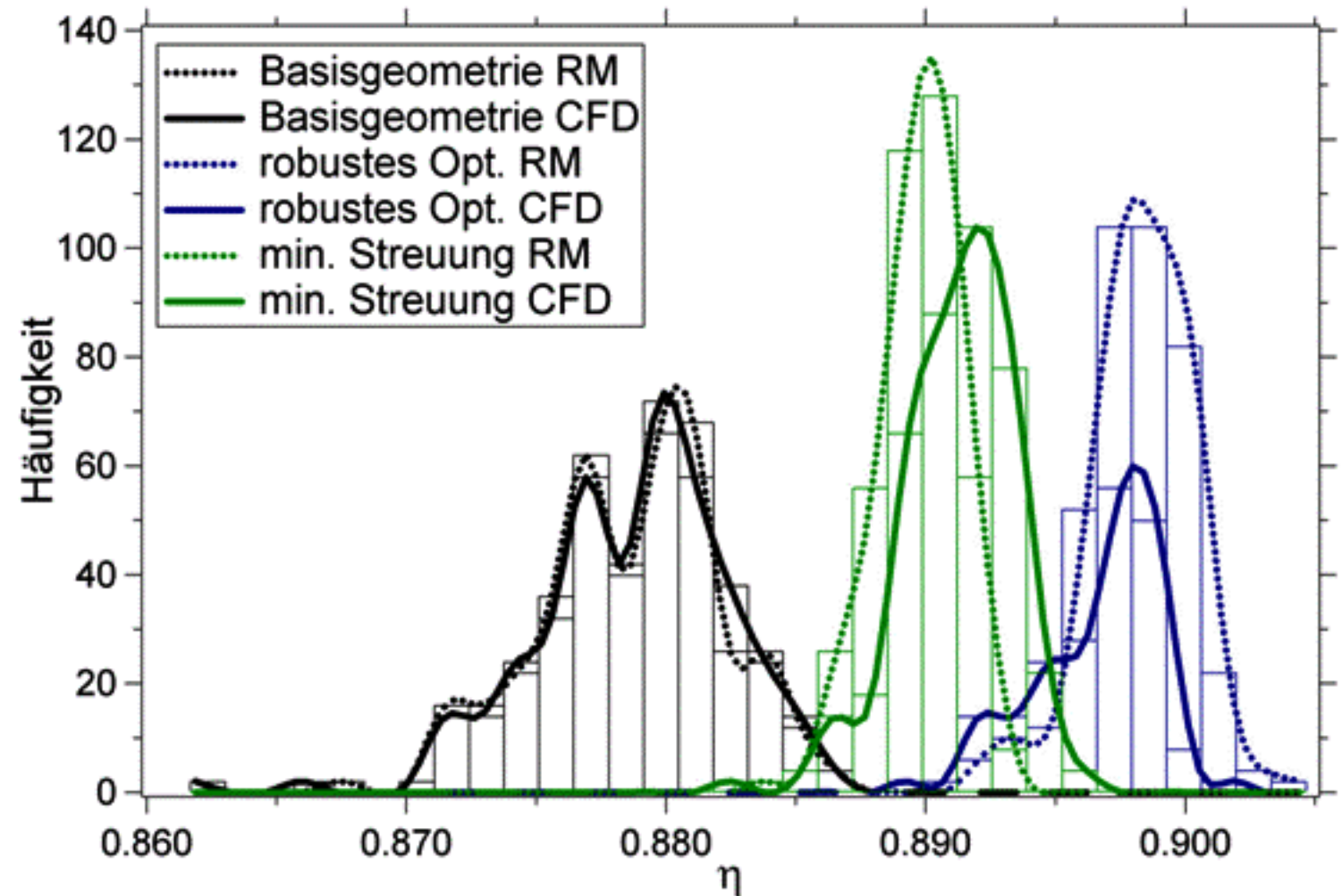
- MCS mit 200 Shots mit gleichen Verteilungsparametern
 - vergleichende Auswertung mit CFD und RM
- sehr gute Übereinstimmung für Basisgeometrie
- gute Übereinstimmung für optimale Geometrien

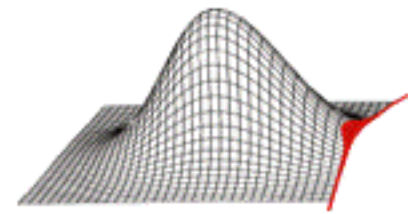




Validierung:

- MCS mit 200 Shots mit gleichen Verteilungsparametern
- vergleichende Auswertung mit CFD und RM
- sehr gute Übereinstimmung für Basisgeometrie
- gute Übereinstimmung für optimale Geometrien

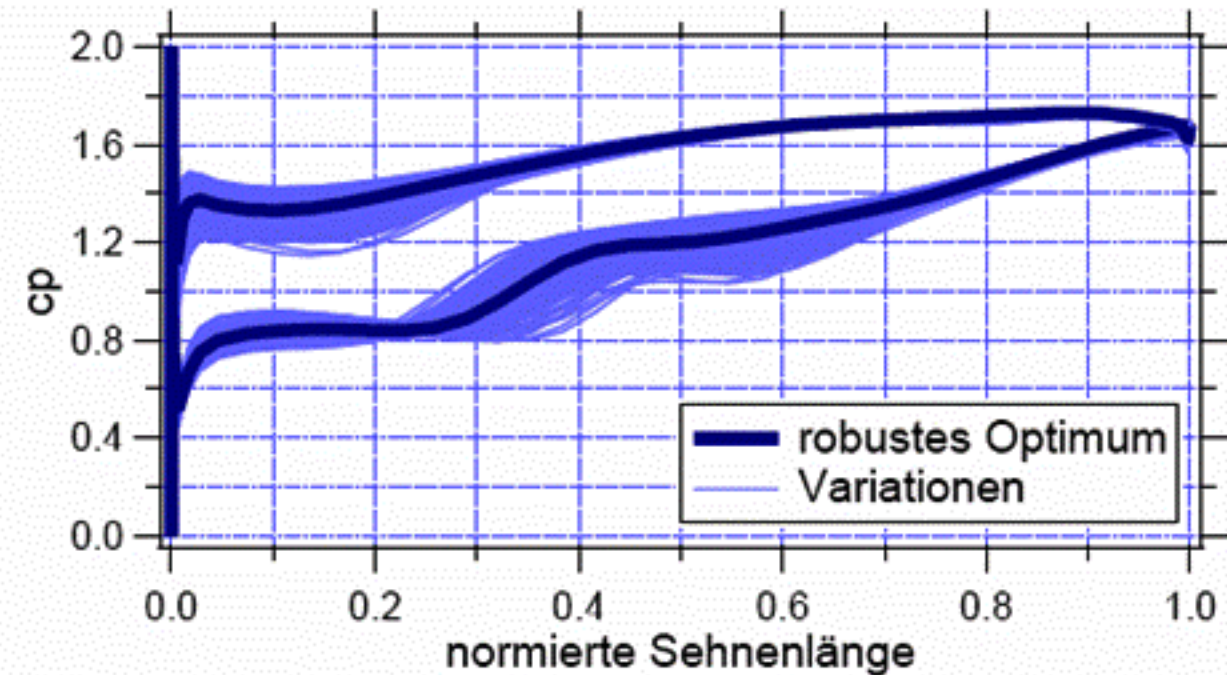
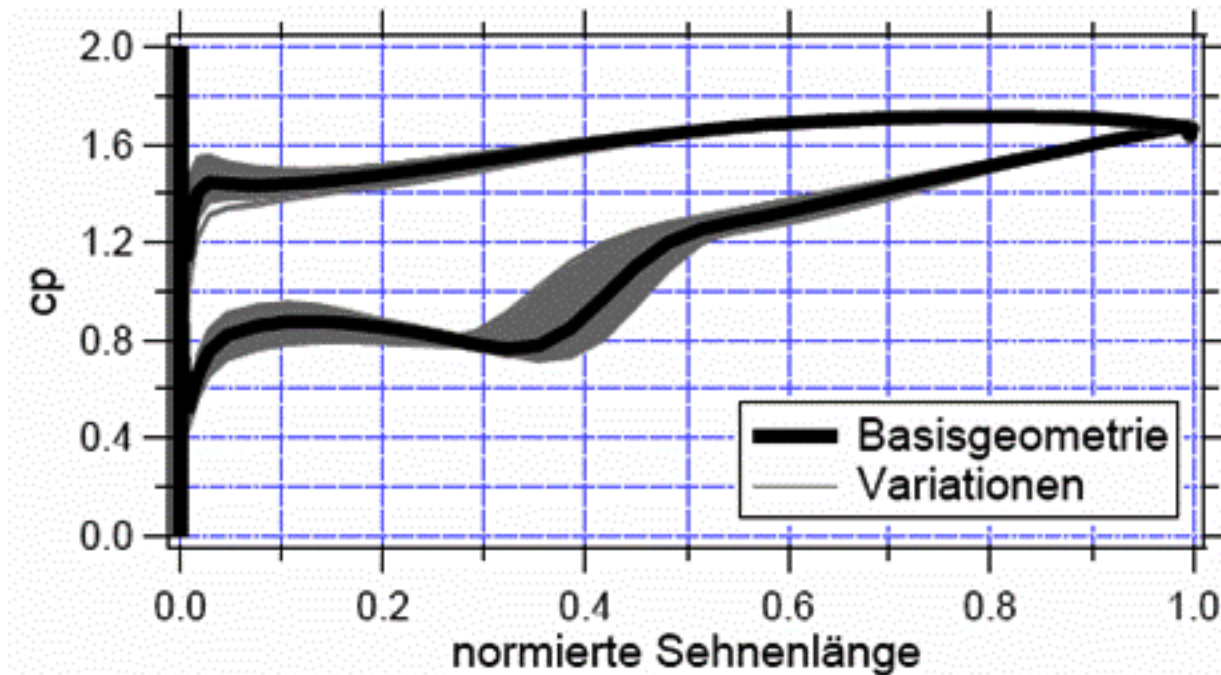
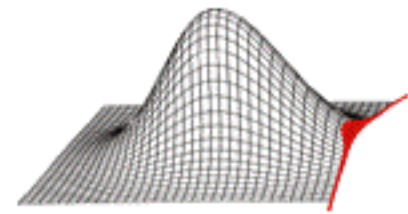




Validierung:

- CFD bestätigt RM-Prognosen gut bis sehr gut
- wesentliche Reduktion der Streuungen bei isentr. Wirkungsgrad (~ 35%)
- wesentliche Mittelwertverbesserungen bei beiden Größen (~ +2%)

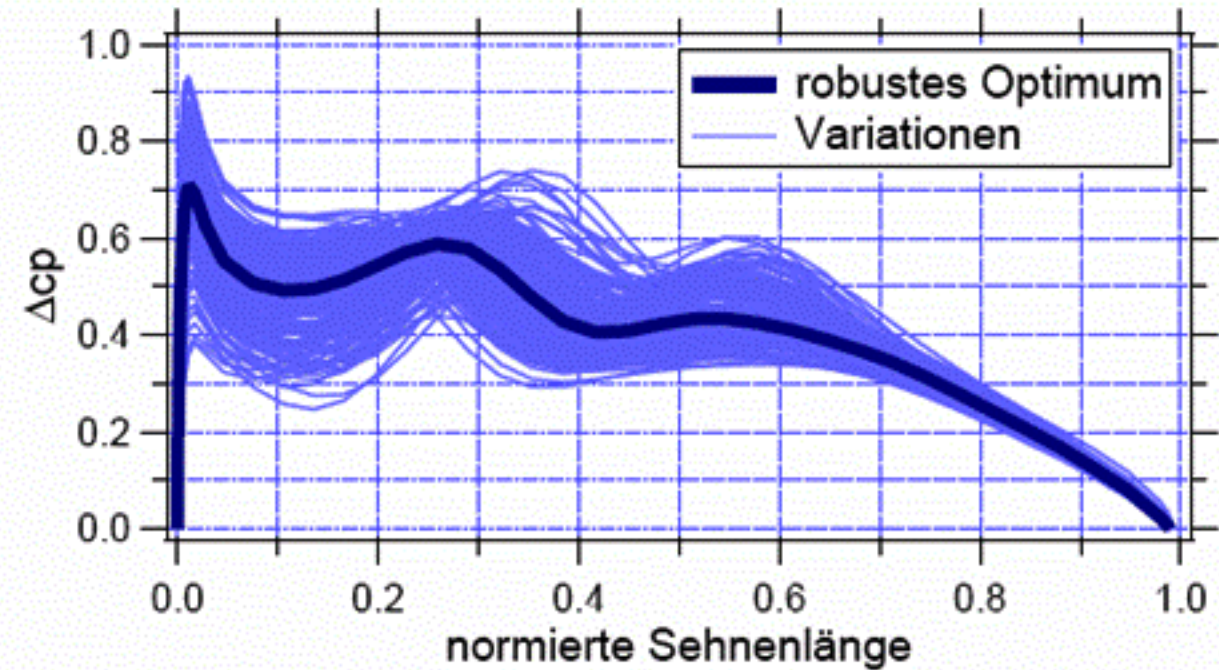
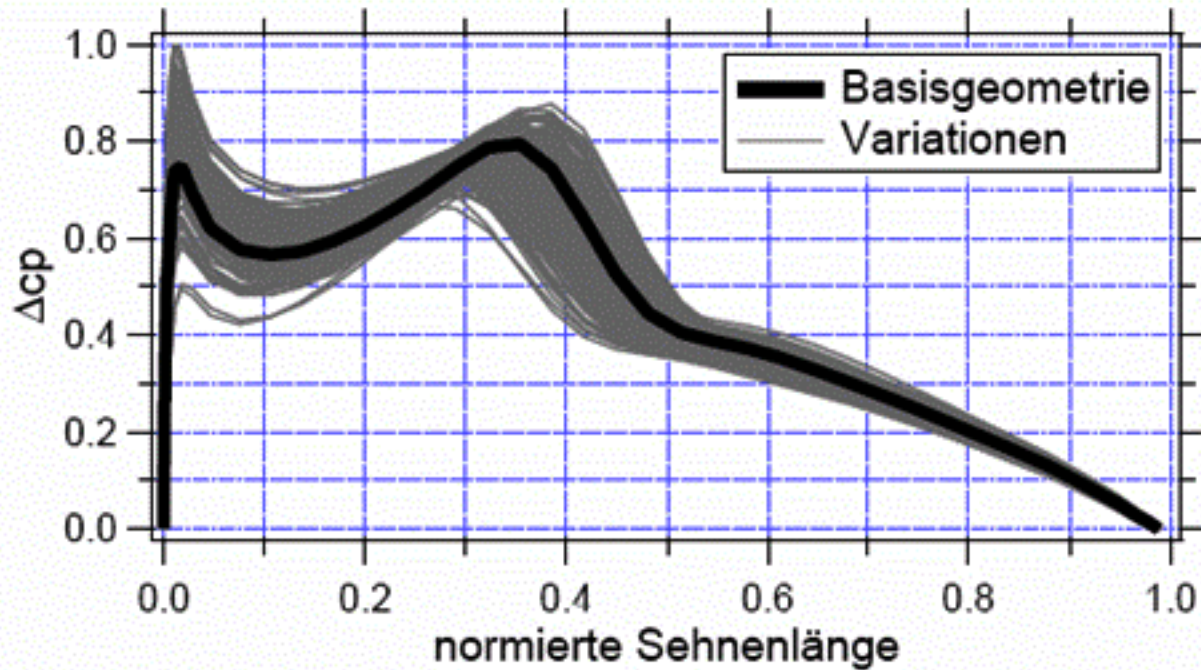
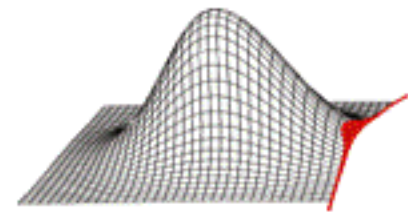
	Basisgeometrie		robustes Optimum		min. Streuung	
	RM	CFD	RM	CFD	RM	CFD
$\mu(\eta)$		0.879		0.897		0.891
$\sigma(\eta)$		0.0036		0.0023		0.0022
$\mu(\Pi)$		1.612		1.648		1.652
$\sigma(\Pi)$		0.0079		0.0082		0.0081



Druckbeiwert c_p im Mittelschnitt:

$$c_{p,k} = \frac{p_k}{p_{t,inlet} - p_{inlet}}$$

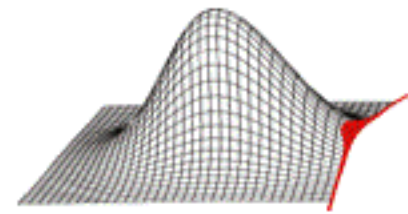
- harmonischerer Verlauf bei optimierter Geometrie
- Stoß über längeren Bereich der Sehnenlänge
- Wegfall des Beschleunigungsgebiets um $x/c \sim 0.3$
 → geringere Mach-Zach bei nachfolgendem Stoß
 → geringere Stoßverluste



Belastungsbeiwert Δc_p aus Differenz der Druckbeiwerte im Mittelschnitt:

$$\Delta c_{p,k} = c_{p,k,DS} - c_{p,k,SS}$$

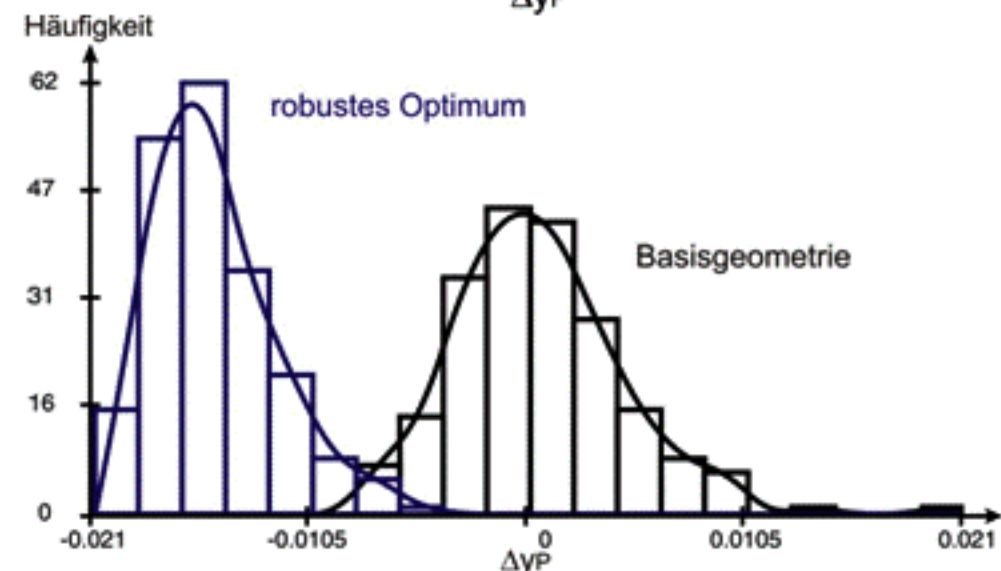
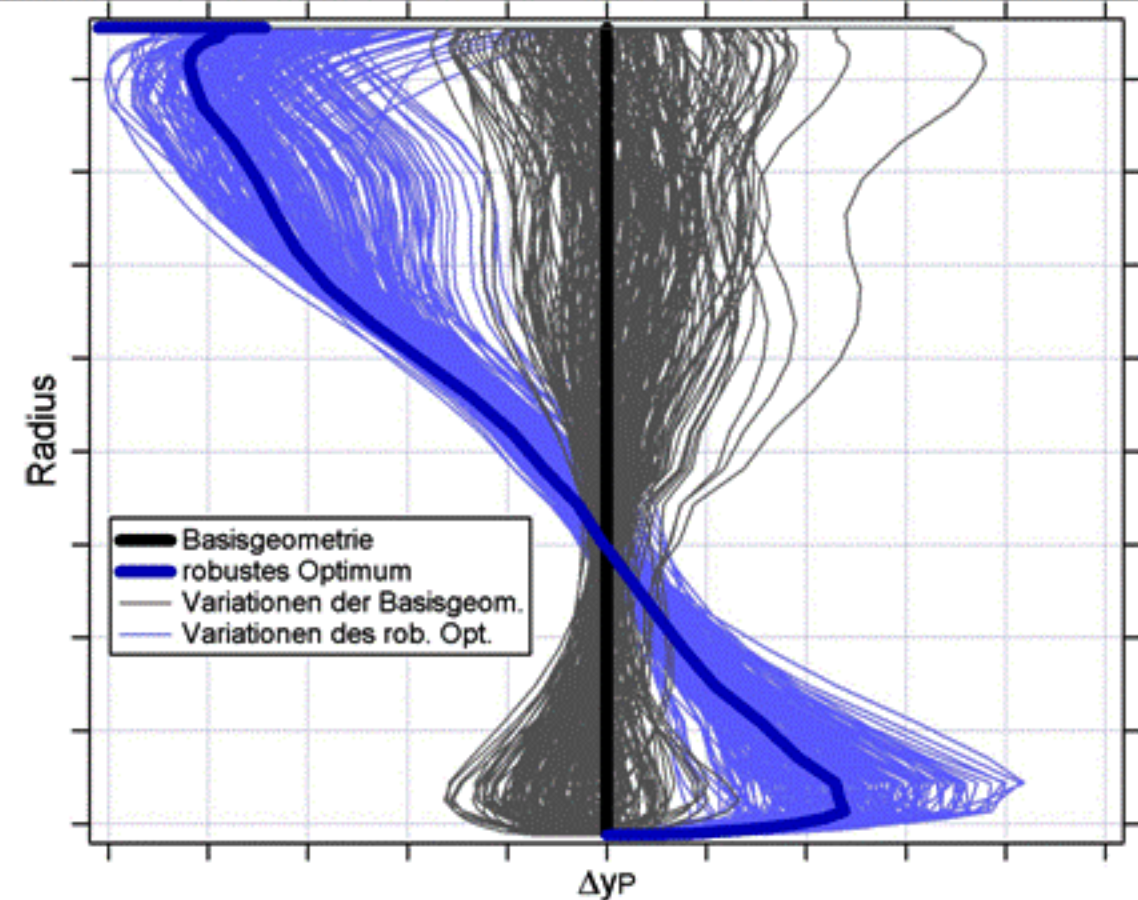
- Peak um $x/c \sim 0.35$ wesentlich abgeschwächt
- Im Bereich der Vorderkante geringere Belastung

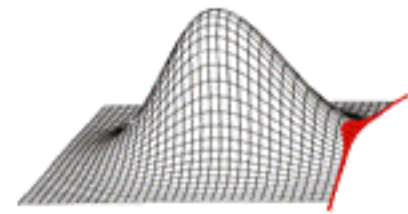


Totaldruckverlustbeiwert :

$$y_{p,j} = \frac{P_{t,inlet,j} - P_{t,outlet,sl}}{P_{t,inlet,j} - P_{inlet,j}}$$

- Differenz zu Basisgeometrie dargestellt
- obere 2/3 der Schaufel Reduktion und untere 1/3 Zunahme
→ Optimierung im Mittel gelöst, mehr Parameter würden bessere Lösung erlauben
- mittlere Verlustbeiwerte für optimale Geometrie wesentlich geringer
→ Bestätigung der integralen Ergebnisse





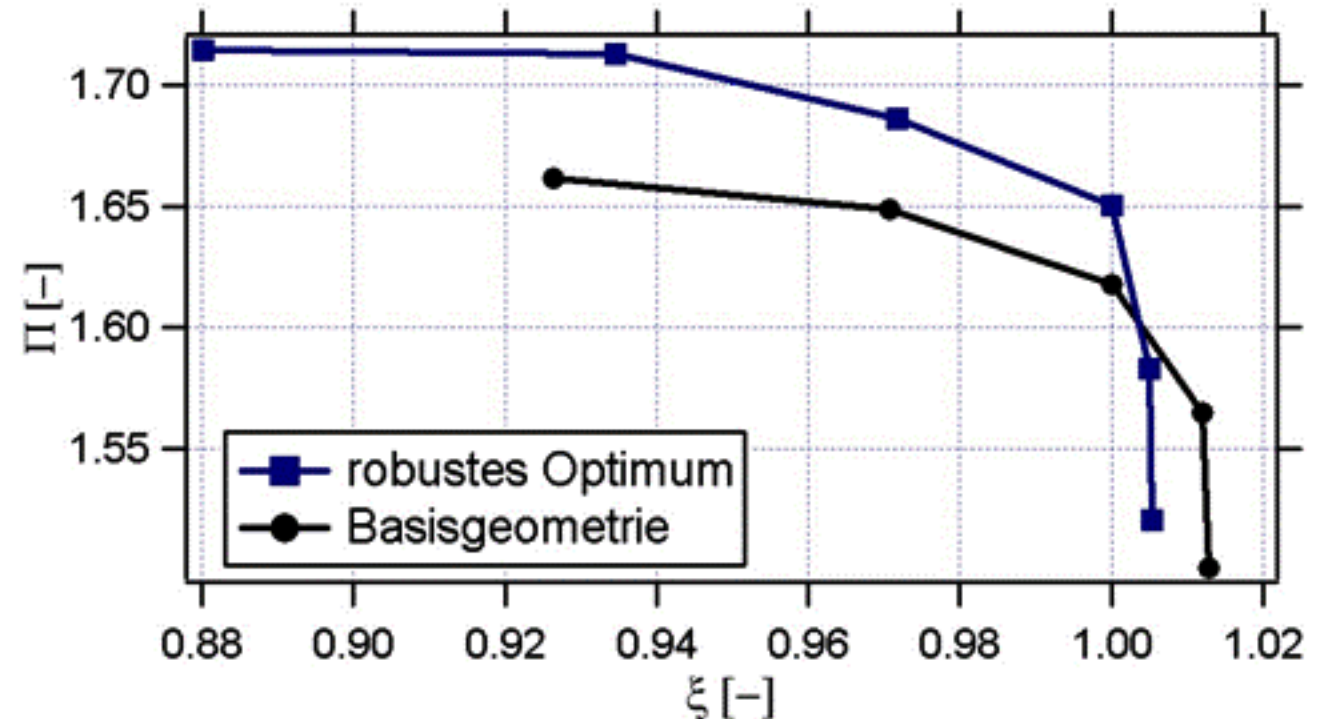
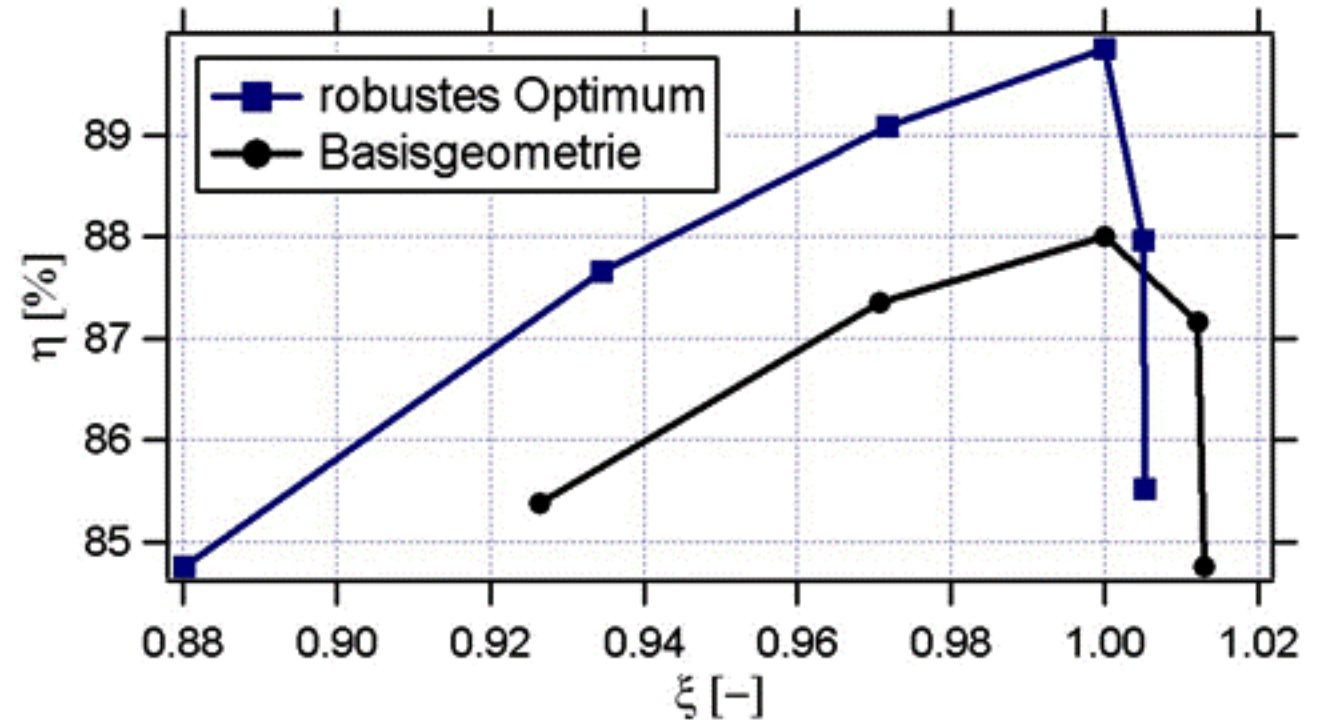
Off-design Verhalten:

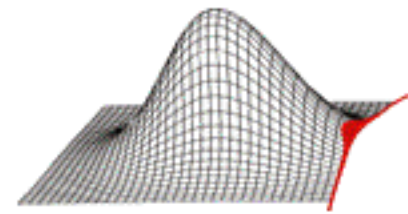
- Vergleich beider Kennfelder
- Abszisse ξ : normierter reduzierter Massestrom

$$\xi = \frac{\dot{m} \sqrt{T_t} / p_t}{\dot{m}_{DP} \sqrt{T_{t,DP}} / p_{t,DP}}$$

→ über weitem Betriebsbereich:
höherer Wirkungsgrad und
höheres Druckverhältnis als
Basisgeometrie

→ robustes Design hinsichtlich
Betriebsbedingungen





- Methodik zur Verbesserung des strömungsmechanischen Verhaltens einer Verdichterschaufel vorgestellt
- geometrische Variationen einer bestehenden Geometrie mit delta-Parametermodell erzeugt
- Definitionsbereich mit iterativer MCS hoher Shot-Anzahl untersucht und beste Realisierung als Optimum akzeptiert
dabei: 1. MCS: 300 Shots, 2. MCS: 600 Shots und ca. 10Mio. Shots (RM)
- deterministisches Optimum:
→ isentroper Wirkungsgrad und Totaldruckverhältnis +2%
- Robustes Optimum:
→ Mittelwert, Streuung und Ausfallwahrscheinlichkeit bekannt
 - Ausfallwkt.: deterministische Werte der Referenz zu 100% überschritten
 - Mittelwerte: Verbesserung um fast 2%
 - Streuungen: Π etwa gleich und η Reduktion um ca. 35%
- Off-design Untersuchung bestätigt Verbesserung für weite Betriebsbedingungen