



Handbuch zur Software

“Form- und Topologieoptimierung”

- Prof. Dr. M. Hintermüller (Humboldt-Universität zu Berlin)
- Dr. K. Knall (Mathtec, Wien)
- MMag. M. Kanitsar (Mathtec, Wien/Universität Graz)

Software-Version: 1612.



Inhaltsverzeichnis

1 Installation	3
1.1 Ordnerstrukturierung und Kompilieren der Applikationen	3
2 Geometriedaten	3
2.1 Speicherstruktur der Daten im STL-Format	3
2.2 Modellierung der Ein-/Ausströmbereiche	4
2.2.1 Einströmbereiche	4
2.2.2 Ausströmbereiche	5
2.3 Benutzerdefiniertes Einströmprofil	5
2.4 Anfangsgeometrie Topologieoptimierung	5
3 Parameter und deren Bedeutung	6
3.1 Gittererzeugung	6
3.2 Modellwahl und physikalische Einstellungen	7
3.3 Lösereinstellungen für die primale und adjungierte Gleichung	8
3.4 Liniensuche	9
3.5 Abbruchkriterien der Formoptimierung	10
3.6 Formoptimierung: Zielfunktionale	11
3.6.1 Gleichmäßige Ausströmung und Totaldruckverlust	11
3.6.2 Zielfunktionale bei mehreren Ausströmbereichen	12
3.7 Geometrische Restriktionen	13
3.7.1 Methode 1: Fixieren am Übergangsbereich	13
3.7.2 Methode 2: Verwendung von Zielfunktionale für Bauraum und Übergangsrestriktionen	13
3.7.3 Heuristische Skalierung der Zielfunktionale bei geom. Restriktionen	14
3.7.4 Methode 3: Dämpfung im Übergangsbereich	15
3.7.5 Methode 4: Glättung des Formgradienten	16
3.8 Topologieoptimierung	18
3.9 Extrahieren der topologieoptimierten Geometrie	19
4 Initialisierung und Berechnung	20
4.1 Ausführen der Formoptimierung	20
4.2 Ausführen der Topologieoptimierung	20
4.3 Stopp und Neustart der Formoptimierung	20
5 Datenauswertung und Visualisierung	21
5.1 Ausgabedaten	21
5.2 Visualisierung mit ParaView	22
5.3 Struktogramm	24

1 Installation

1.1 Ordnerstrukturierung und Kompilieren der Applikationen

Zur Verwendung der Form- und Topologieoptimierung ist die Standard-Installation von OpenFOAM (`$FOAM_APP/solvers/incompressible/`) um folgende Applikationen zu erweitern:

- `generateFieldsFoam`
- `shapeGradientWall,`
- `shapeGradientCCM,`
- `setupShapeGradientCCM,`
- `shapeGradientAddSTL,`
- `shapeGradientCloseAll,`
- `topoOpt,`
- `topoOptCloseAll,`
- `topoExtractSTL.`

Der Ordner `InitialSGccm` ist in das Verzeichnis `$FOAM_RUN/tutorials/` zu kopieren. Die Konsolen-Befehle zur Installation befinden sich im shell-script `installShapeGradient.sh`.

2 Geometriedaten

2.1 Speicherstruktur der Daten im STL-Format

Die Geometriedaten sind im Ordner `initial_stl` anzulegen. Neben der Bauraumgeometrie (`bds.stl`) werden die Oberflächen in 4 Dateien im STL-Format gespeichert (`inlet.stl`, `fixed.stl`, `wall.stl`, `outlet.stl`).

Zur Veranschaulichung dient die Testgeometrie `M23` mit 2 Inlets, 3 Outlets und einer zusätzlichen fixen Geometrie (siehe Tabelle 1).

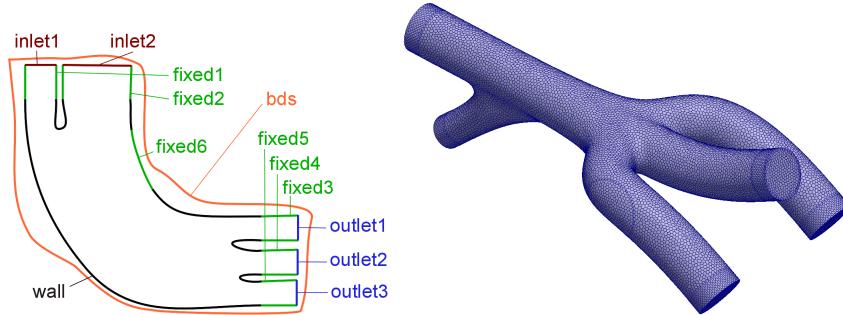
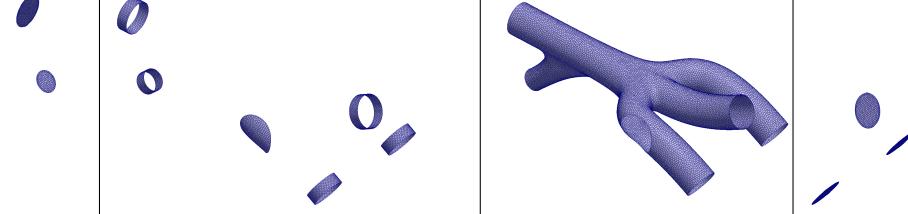


Abbildung 2.1: Links: Skizze Geometriedaten, rechts Testgeometrie M23.

Jeder Ein- und Ausströmbereich besitzt jeweils eine fixe Geometrie, die die Verbindung zu der zu formoptimierenden Geometrie beschreibt. Zusätzlich kann der Benutzer fixe Geometrien festlegen die lediglich mit der zu formoptimierenden Geometrie verbunden sind (z.B.: `fixed6` in Testgeometrie M23).

Die **Nummerierung der fixen Geometrien** erfolgt fortlaufend, beginnend bei den Verbindungen zur Einströmgeometrie, weiterführend bei den Verbindungen zur Ausström-



inlet.stl	fixed.stl	wall.stl	outlet.stl
inlet1 inlet2	fixed1 [inlet1] , fixed2 [inlet2] fixed3 [outlet1] , fixed4 [outlet2] fixed5 [outlet3] , fixed6	wall.stl	outlet.stl

Tabelle 1: Geometriedaten im STL-Format.

Dateiname	Bezeichnung	Beschreibung
inlet.stl	inlet1, inlet2, inlet3	Einströmgeometrien.
outlet.stl	outlet1, outlet2, outlet3	Ausströmgeometrien.
fixed.stl	fixed1, fixed2, fixed3, fixed4, fixed5, fixed6, fixed7, fixed8, fixed9	Geometriedaten der fixen Bereiche.
wall.stl	wall	Geometriedaten des zu formoptimierenden Bereiches.
bds.stl	bds	Geometriedaten des Bauraumes.

Tabelle 2: Geometriedaten im STL-Format.

geometrie und am Ende bei den fixen Geometrien, die nur mit der zu formoptimierenden Geometrie verbunden sind.

Bei der Wahl der Bauraumgeometrie sollte darauf geachtet werden, dass die Startgeometrie vollständig im zulässigen Bereich liegt und über die Interfaces `inti_free-geom_fixed-inlet` und `into_free-geom_fixed-outlet` hinausreicht (siehe Abbildung 2.1).

2.2 Modellierung der Ein-/Ausströmbereiche

Folgende Aufbereitung dient dazu, die Modellierung einer Anwendung hinsichtlich der Oberflächengeometrien der Einströmbereiche und der Ausströmbereiche darzustellen.

2.2.1 Einströmbereiche

Es können beliebig viele Einströmbereiche festgelegt werden. Ein Einströmbereich kann auch aus mehreren nicht zusammenhängenden Geometrien bestehen. Auszeichnend für einen Einströmbereich ist nicht die Form/Topologie sondern sind die physikalischen Eigenschaften, wie z.B.: Einströmgeschwindigkeit.

- Daher kann eine Anwendung mit gleicher Einströmgeschwindigkeit auch mit einem Einströmbereich modelliert werden (linke Grafik in Abb. 2.2).
- Gibt es in der Anwendung unterschiedlichen Einströmgeschwindigkeiten so sind unterschiedliche Einströmbereiche festzulegen (rechte Grafik in Abb. 2.2).

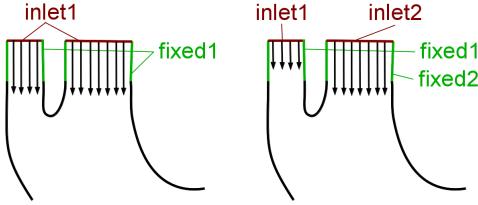


Abbildung 2.2: Einströmbereiche.

2.2.2 Ausströmbereiche

Es können beliebig viele Ausströmbereiche festgelegt werden. Analog zur Festlegung der Einströmbereiche ist die Festlegung der Ausströmbereiche anhand der physikalischen Eigenschaften zu treffen. Bei den bisherigen Anwendungen wurde jedoch stets einheitlich die '*do nothing*' Randbedingung verwendet. Die Aufteilung in unterschiedliche Ausströmbereiche ist ebenfalls relevant, wenn unterschiedliche Ausströmprofile angestrebt werden. In Abbildung 2.3 sind die beiden Optimierungsvarianten für eine gleichmäßige Ausströmung (\mathcal{J}_1) illustriert.

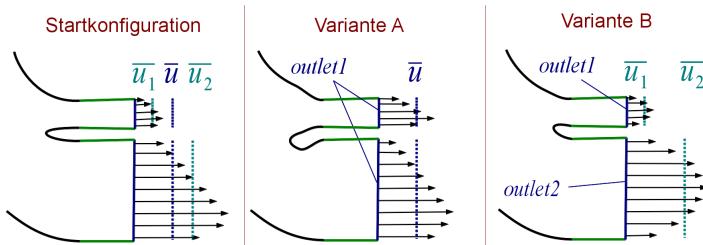


Abbildung 2.3: Links: Start. Mitte: Optimierung $\mathcal{J}_1|_{\Gamma_o^1 \cup \Gamma_o^2}$. Rechts: Optimierung $\gamma_1 \mathcal{J}_1|_{\Gamma_o^1} + \gamma_2 \mathcal{J}_1|_{\Gamma_o^2}$.

2.3 Benutzerdefiniertes Einströmprofil

Im Falle, dass ein Einströmprofil vorgegeben werden möchte, ist der entsprechende Eintrag im Parameter **velocity_massflow** auf 0 zu setzen und eine Datei **velocity_inletI.csv** mit $I = \{0, 1, 2, \dots\}$ im Order der Testrechnung anzugeben. Möchte man im Beispiel M23 am 2. Einströmbereich ein Profil vorgegeben, so ist **velocity_massflow = 2(36.5, 0)** zu setzen und eine Datei **velocity_inlet2.csv** anzulegen.

2.4 Anfangsgeometrie Topologieoptimierung

Bei der Topologieoptimierung ist eine möglichst große Anfangsgeometrie vorzugeben. In Abbildung 2.4 ist eine Anfangsgeometrie für das Anwendungsbeispiel Reinluftrohr(RLR) dargestellt.

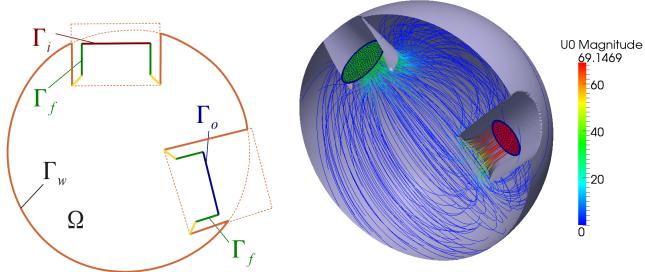


Abbildung 2.4: Anfangsgeometrie Topologieoptimierung RLR.

3 Parameter und deren Bedeutung

Neben den Geometriedaten ist die Parameterdatei *parameter_sg* anzulegen. Die darin enthaltenen Parameter werden in diesem Kapitel erläutert. Die Parameter werden in den Java-Skripten *mbmw3.java*, *solvePrimal.java* und *solveAdjoint.java* eingefügt. Falls Änderungen in der Star-CD CCM+ Verwendung vorgenommen werden wollen, sind diese drei Dateien im Ordner *initialSG* anzupassen. Die für OpenFOAM relevanten Parameter werden nach Aufruf der Setup-Routine in *system/fvSolution* gespeichert.

Parameter-name	Default-wert	Zulässigkeit	RLR	M23	Beschreibung
install_location					Pfad der Star-CD CCM+ bin-Datei, um CCM+ zu starten.
prozessNumber	2	[1,100]	2	2	Prozessoranzahl bei Parallelisierung in Star-CD CCM+.

Tabelle 3: Parameter Star-CD CCM+.

3.1 Gittererzeugung

In Star-CD CCM+ wird ein Polyedergitter erzeugt. Die Gitterfeinheit ist über den Referenzwert für die Zellengröße **base_size** einstellbar. Die Anzahl der In- und Outlets sowie die Anzahl der optionalen fixen Oberflächen ist anzugeben (**numInlet**, **numOutlet**, **numFixed**). Die Gitterqualität bei der Netzgenerierung kann über die Parameter **mesh_opt_cycles** und **mesh_quality_threshold** erhöht werden. In Wandnähe sind Layerschichten zu verwenden, deren Größe und Anzahl durch die Parameter **num_layer_wall**, **thick_layer** und **layer_stretch** festgelegt sind. Um Rückströmungen auf der Ausströmgeometrie ('do-nothing' Randbedingung) zu verhindern, ist meist eine zusätzliche Extrusionsgeometrie erforderlich. Die Einstellung der Länge und Diskretisierung ist mit den Parametern **extrude_...** festzulegen. Anhand der Oberflächenbeschaffenheit wird in CCM+ lokal das Gitter verfeinert. Falls diese Verfeinerung nicht durchgeführt werden soll, so ist der Parameter **grid_local_refinement** auf 0 zu setzen.

Parameter-name	Default-wert	Zuläs-sigkeit	RLR	M23	B135	Beschreibung
base_size	0.004	[1e-4,0.1]	0.004	0.03	0.04	Gitterfeinheit: Zellgröße.
numInlet	1	{1,2,...1e3}	1	2	1	Anzahl der Einströmbereiche.
numOutlet	1	{1,2,...1e3}	1	3	1	Anzahl der Ausströmbereiche.
numFixed	0	{0,1,...1e3}	0	1	0	Anzahl der optional fixen Geometrien.
num_layer_wall	2	[0,6]	2	3	6	Anzahl der Layerschichten am Rand.
thick_layer	60	[10,100]	80	60	60	Stärke der Layerschichten in Prozent (Relativ zur Nachbarzellgröße).
layer_stretch	1.5	[1e-3,1e3]	1.5	1.5	1.4	Vergrößerungsfaktor d. Layerschichten.
extrude_outlet_length	0.05	[1e-8,1e8]	0.06	0.2	1.2	Länge der Extrusionsgeometrie am Outlet.
extrude_outlet_num	32	[1,1e5]	20	10	90	Anzahl der Zellschichten in der Extrusionsgeometrie am Outlet.
extrude_outlet_stretch	1	[1e-3,1e3]	1	1	1	Vergrößerungsfaktor d. Layerschichten in d. Extrusionsgeometrie am Outlet.
extrude_inlet_length	0.025	[1e-8,1e8]	0.03	0.2	0.2	Länge der Extrusionsgeometrie am Inlet.
extrude_inlet_num	16	[1,1e5]	10	10	15	Anzahl der Zellschichten in der Extrusionsgeometrie am Inlet.
extrude_inlet_stretch	1	[1e-3,1e3]	1	1	1	Vergrößerungsfaktor der Layerschichten in der Extrusionsgeometrie am Inlet.
mesh_opt_cycles	8	[1,8]	8	8	8	Polyedergitter: Qualitätsoptimierungsschleifen.
mesh_quality_threshold	1	[0,1]	1	1	1	Polyedergitter: Qualitätsoptimierungsschranke.
grid_local_refinement	0	{0,1}	0	1	1	Lokale Gitterverfeinerung: 0:nein, 1:ja.
ext_merge	0	{0,1}	0	1	0	Extrusionsgeometrie mit fixen Geometrien vereinigen: 0:nein, 1:ja.

Tabelle 4: Parameter für die Gittererzeugung in Star-CD CCM+.

3.2 Modellwahl und physikalische Einstellungen

Zur Angabe der Strömungsgeschwindigkeit kann entweder eine konstante Einströmgeschwindigkeit in m/s oder die Massenflussrate in kg/s angegeben werden (**velocity_massflow_par** = 0 oder 1). Die Werte sind durch den Parameter **velocity_massflow** anzugeben. Die entsprechende Syntax ist der Tabelle 5 zu entnehmen.

Neben der Direkten Numerischen Simulation (**turb_model** = 0) können derzeit 4 Turbulenzmodelle mit dem Parameter **turb_model** gewählt werden. Falls sich bei künftigen Softwareversionen andere Turbulenzmodelle als geeignet erweisen, so ist das Java-Skript *mbmw3.java* entsprechend anzupassen. Weiters sind folgende Modell-Kenngrößen in Star-CD CCM+ anzugeben: **inlet_turb_intensity**, **inlet_visc_ratio**, **outlet_turb_intensity**, **outlet_visc_ratio**.

Parametername	Default-wert	Zuläs-sigkeit	RLR	M23	B135	Beschreibung
turb_model	2	[0,100]	1	0	4	0: DNS, 1: Realiz. $k-\varepsilon$ all Y_+ , 2: Std. $k-\varepsilon$ high Y_+ , 3: RSM all Y_+ , 4: Realiz. $k-\varepsilon$ low Y_+ .
velocity_massflow_par	0	{0,1}	0	0	0	Einströmung: 0:Geschwindig-keit, 1:Massenstrom.
velocity_massflow	1(0.1)	[1e-8,1e8]	1(36.5)	2(0.006, 0.006)	1(4.3)	Einströmung (Geschwindig-keit bzw. Massenstrom)
inlet_turb_intensity	0.1	[1e-8,1e8]	0.1		0.1	Turbulent Intensity Inlet.
inlet_turb_length	10	[1e-8,1e8]	0.1		10	Turbulent Length Scale Inlet.
outlet_turb_intensity	0.1	[1e-8,1e8]	0.1		0.1	Turbulent Intensity Outlet.
outlet_turb_length	10	[1e-8,1e8]	0.1		10	Turbulent Length Scale Outlet.

Tabelle 5: Parameter zu Physikalischen Modellen.

3.3 Lösereinstellungen für die primale und adjungierte Gleichung

Bei den Lösern in CCM+ wird ein pseudo-Zeitschrittverfahren verwendet. Die Schrittweitensteuerung ist über die Courant-Friedrichs-Lowy-Zahl (**CFLpri**, **CFLadj**) anzugeben. Die Wahl einer großen Zahl ermöglicht ein schnelleres Erzielen der gewünschten Lösung, kann jedoch bei zu großer Wahl zu Konvergenzproblemen führen. Für die adjungierte Gleichung steht neben dem Standardlöser auch ein GMRES Löser zur Verfügung (**gmresAdj**) mit den relevanten Einstellungen **krylov_dim**, **krylov_accuracy**.

Als Abbruchkriterien werden die maximale Anzahl an Iterationen (**iterPri**, **iterAdj**) und ein Abbruch bei gewünschten Genauigkeiten verwendet. Weiteres ist erzielt, wenn die Standardabweichung jeweils unter den Toleranzwerten (**stop_accuracyPri**, **stop_accuracyAdj**) liegt. Wählt man **stop_sample** z.B. 100, so wird stets die Standardabweichung der letzten 100 Iterationen berechnet.

Der primale Löser gilt als auskonvergiert, wenn die gewünschte Lösungsgenauigkeit vor erreichen der Iteration **iterPri** erzielt wird. Ist die Genauigkeit nach **iterPri** Schritte nicht erreicht, so wird bei der Gitterverschiebung eine kleinere Schrittweite gewählt. Wichtig ist daher stets sicherzustellen, dass **iterPri** groß genug gewählt wird!

Falls es zu Konvergenzproblemen des adjungierten Lösen kommt, so ist der Parameter **adj_order** auf 1 zu setzen.

Parameter-name	Default-wert	Zuläs-sigkeit	RLR	M23	B135	Beschreibung
ccm_solver	1	{0,1}	1	1	1	1: Verwendung von CCM+ Löser, 0: Alternative Löser.
gmresAdj	0	{0,1}	0	0	0	Adjungierter Löser: 0: ohne GM- RES, 1: mit GMRES.
krylov_dim	50	[1,1e5]				Anzahl der Krylovräume (adj, GMRES).
krylov_accuracy	1e-12]0,1]				Rechengenauigkeit Krylovräume.
CFLpri	4	[0.1, 1000]	4	3	4	CFL primal.
CFLadj	100	[0.1, 10000]	90	40	90	CFL adjoint.
stop_accuracyPri	1e-12]0,1]	1e-12	1e-12	1e-8	Abbruchkriterium Standardab- weichung: Genauigkeit primale Lösung.
stop_accuracyAdj	1e-12]0,1]	1e-12	1e-12	1e-12	Abbruchkriterium Standardab- weichung: Genauigkeit adjungier- te Lösung.
stop_sample	100	[1,1e5]	200	50	50	Abbruchkriterium Standard- abweichung: Anzahl der zu betrachtenden Iterationen.
iterPri	2000	[1,1e4]	4000	2500	1200	Maximale Iterationszahl der pri- malen Gleichung nach einem Re- meshing.
iterAdj	1000	[1,1e5]	3000	2000	1000	Maximale Iterationszahl der ad- jungierten Gleichung nach einem Remeshing.
adj_order	2	{1,2}	2	2	1	Diskretisierung Adjungierte Ord- nung.

Tabelle 6: Parameter für die Löser in Star-CD CCM+.

3.4 Liniensuche

Im Zuge der Formoptimierung verwenden wir eine Schrittweitensteuerung basierend auf der Gitterqualitätsabfrage und der Abfrage nach einer hinreichend großen Reduktion des Funktionswertes. Die verwendete Regel nennt sich *Armijo line search* und lautet:

$$\mathcal{J}_{12}^{\alpha}(\Omega^{k+1}) \leq \mathcal{J}_{12}^{\alpha}(\Omega^k) - \mu s_k \|\mathcal{D}\mathcal{J}_{12}^{\alpha}(\Omega^k)\|_{L^2(\Gamma_w^k)} \quad (3.1)$$

mit $0 < \mu < 1$ und $\Omega^{k+1} = \mathcal{T}_{D(s_k, \Omega^k)}(\Omega^k)$. Die Abbildung $\mathcal{T}_{D(s_k, \Omega^k)(\Omega)}(\boldsymbol{x}): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ wird anhand des Formgradienten bestimmt.

Vom Benutzer ist eine Startschrittweite s_0 (**spStepLength**) anzugeben. Im Falle, dass die Bedingung (3.1) nicht erfüllt ist, wird die Schrittweite um den Faktor **spReduce-Koeff** verkleinert. Die Reduktion der Schrittweite wird so lange durchgeführt, bis die Schrittweite kleiner ist als der Wert **spLowerBound**. Danach erfolgt eine Gitterneuvernetzung. Die Gewichtung $\mu > 0$ (**linesearchGewicht**) sichert einen hinreichend großen Abstieg, welcher für die mathematische Betrachtung der Liniensuche relevant

ist. Für die numerische Anwendung sollte dieser Parameter eher klein gesetzt werden. Falls man eine Gitterneuvernetzung nach einer gewissen Anzahl an Iterationen erzwingen möchte, kann dies mit dem Parameter **remesh_iter** erfolgen. Üblicherweise ist eine Gitterneuvernetzung bei zulässigem Gitter nicht erforderlich. Somit wurde dieser Wert bei den Berechnungen größer als die maximale Iterationszahl gesetzt.

Parametername	Default-wert	Zuläs-sigkeit	RLR	M23	Beschreibung
spStepLength	2.0e-6	[0,1]	1e-4	1e-2	Startschrittweite s_0 in der Armijo Liniensuche 3.1.
spLowerBound	1.0e-8	[0,1]	1e-6	1e-5	Untere Schranke der Schrittweite.
spReduceKoeff	0.5	[0,1]	0.6	0.5	Reduktionsfaktor bei Schrittweitensteuerung.
linesearchGewicht	1.0e-16	[0,1]	1e-14	0	Gewichtung μ in Armijo-Liniensuche.
remesh_iter	1000	[1,1e5]	900	10	Remeshing in jeder ... ten Iteration erzwingen (auch wenn Gitterqualität OK).

Tabelle 7: Parameter zur Liniensuche in OpenFOAM.

3.5 Abbruchkriterien der Formoptimierung

In Tabelle 8 sind die Parameter zur Beendigung der Formoptimierung angegeben. Am relevantesten dafür sind maximale Anzahl an Iterationen (**outerLoopEnd**), die Anzahl an durchgeführten Remeshings (**rem_max**) und der Fortschritt im Zielfunktional (**sigma_stop_J**).

Parametername	Default-wert	Zuläs-sigkeit	RLR	M23	Beschreibung
outerLoopEnd	8	[1,1e5]	200	200	Maximale Anzahl an Iterationen.
rem_max	20	[1,1000]	30	30	Maximale Anzahl an durchgeführten Remeshings.
rem_num_max	8	[1,1000]	30	30	Maximale Anzahl an Remeshings mit rem_tol Abstand.
rem_tol	2	[0,100]	2		Abstandstoleranz bei Remeshing.
sigma_stop_J	50	[0,100]	100	100	Abbruchkriterium: Fortschritt in % im Zielfunktional J. Notation: σ .
sigma_stop_DJ	50	[0,100]	100	100	Abbruchkriterium: Fortschritt in % in der L2-Norm des Formgradienten. Notation: σ_d .

Tabelle 8: Abbruchkriterien der Formoptimierung in OpenFOAM.

3.6 Formoptimierung: Zielfunktionale.

3.6.1 Gleichmäßige Ausströmung und Totaldruckverlust

Die Formoptimierung kann hinsichtlich des Erzielens einer gleichmäßigen Ausströmung und der Minimierung des Totaldruckverlustes durchgeführt werden. Das diskrete Zielfunktional hinsichtlich gleichmäßiger Ausströmung lautet:

$$\mathcal{J}_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{A} \sum_{k \in \Gamma_o} (\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{n}_k - \bar{u})^2 A_k}}{\bar{u}} \quad (3.2)$$

mit

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \sum_{j \in \Gamma_o} \mathbf{u}_j \cdot \mathbf{n}_j A_j, \quad (3.3)$$

wobei $A = |\Gamma_o|$. Das diskrete Zielfunktional hinsichtlich Minimierung des Totaldruckverlustes lautet:

$$\mathcal{J}_2 = \left| \frac{\sum_{k \in \Gamma_i} \left(p_k + \frac{\rho_k}{2} (\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{u}_k) \right) \mathbf{u}_k \cdot (-\mathbf{n}_k) A_k}{\sum_{k \in \Gamma_i} \mathbf{u}_k \cdot (-\mathbf{n}_k) A_k} \right| - \left| \frac{\sum_{k \in \Gamma_o} \left(p_k + \frac{\rho_k}{2} (\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{u}_k) \right) \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{n}_k A_k}{\sum_{k \in \Gamma_o} \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{n}_k A_k} \right|. \quad (3.4)$$

Wir bezeichnen mit \mathbf{u}_k den Geschwindigkeitsvektor an der finiten Fläche mit Index k . Der Druck p_k und die Dichte ρ_k wird ebenfalls jeweils an der finiten Fläche mit Index k ausgewertet. Um die Notation einfach zu halten, bezeichnen wir die Indexmenge aller Flächenstücke an der Einströmgeometrie bzw. Ausströmgeometrie mit Γ_i bzw. Γ_o . Das Oberflächenmaß einer finiten Fläche ist mit A_k bezeichnet. Der nach außen gerichtete Einheitsnormalvektor wird mit \mathbf{n}_k bezeichnet. Der Einheitsnormalvektor \mathbf{n}_k auf Γ_i ist gegen die Hauptströmungsrichtung orientiert. Daraus ergibt sich das gemischte Zielfunktional:

$$\mathcal{J}_{12}(\mathbf{u}(\Omega)) = (1 - \gamma) \mathcal{J}_1(\mathbf{u}(\Omega)) + \gamma \rho \mathcal{J}_2(\mathbf{u}(\Omega)) \quad (3.5)$$

$$\text{mit } \gamma \in [0, 1] \quad \text{und} \quad \rho = \begin{cases} \frac{\|\partial \mathcal{J}_1(\mathbf{u}(\Omega^0))\|_{L^2(\Gamma_w^0)}}{\|\partial \mathcal{J}_2(\mathbf{u}(\Omega^0))\|_{L^2(\Gamma_w^0)}} & \text{wenn } \gamma \in (0, 1), \\ 1 & \text{wenn } \gamma \in \{0, 1\}, \end{cases}$$

mit dem Gewichtungsparameter γ (**dp_J12**). Die Parameter **gnu_plot_visual** und **gnu_plot_visual_i**

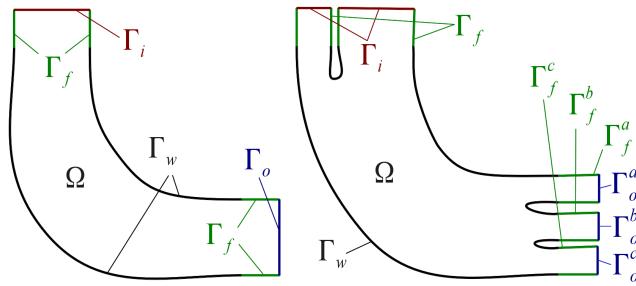


Abbildung 3.1: Skizze von Ω mit Bezeichnung der Teile der Oberfläche.

dienen zur grafischen Darstellung der Zielfunktionswerte. Falls diese Option gewählt

wird, erscheinen die Grafiken während der Formoptimierung und werden im Testlauf-Ordner unter *Funktionswerte_J1.ps*, *Funktionswerte_J2.ps* und *Funktionswerte_J12.ps* gespeichert.

Parametername	Default-wert	Zulässigkeits	RLR	M23	Beschreibung
dp_J12	0.5	[0,1]	0.5	0.5	Gewichtungsparameter γ zwischen \mathcal{J}_1 und \mathcal{J}_2 .
dp_J1	1(0)	$\sum dp_J1 \in [0,1]$	1(0)	3(0.25, 0.25, 0.25)	Gewichtungsparameter γ_i betreffend \mathcal{J}_1 .
gnu_plot_visual	0	{0,1}	0	0	Grafische Darstellung der Zielfunktionswerte (1). Keine grafische Darstellung (0).
gnu_plot_visual_i	3	[1,1000]	1	1	Aktualisieren der Grafiken nach ... Iterationen.

Tabelle 9: Formoptimierung: Zielfunktionale

3.6.2 Zielfunktionale bei mehreren Ausströmbereichen

Zur Veranschaulichung verwenden wir 3 Aussrömbereiche und bezeichnen diese mit $\Gamma_o^a, \Gamma_o^b, \Gamma_o^c$. Die Zielfunktionale für die gleichmäßige Ausströmung lauten:

$$\mathcal{J}_1 = \mathcal{J}_1|_{\Gamma_o^a \cup \Gamma_o^b \cup \Gamma_o^c}, \quad \mathcal{J}_{1a} = \mathcal{J}_1|_{\Gamma_o^a}, \quad \mathcal{J}_{1b} = \mathcal{J}_1|_{\Gamma_o^b}, \quad \mathcal{J}_{1c} = \mathcal{J}_1|_{\Gamma_o^c}. \quad (3.6)$$

Das gemischte Zielfunktional lautet:

$$\mathcal{J}_{12} = (1 - \gamma) (1 - \gamma_a - \gamma_b - \gamma_c) \rho_1 \mathcal{J}_1 \quad (3.7)$$

$$+ (1 - \gamma) \gamma_a \rho_{1a} \mathcal{J}_{1a} + (1 - \gamma) \gamma_b \rho_{1b} \mathcal{J}_{1b} + (1 - \gamma) \gamma_c \rho_{1c} \mathcal{J}_{1c} \quad (3.8)$$

$$+ \gamma \rho_2 \mathcal{J}_2 \quad (3.9)$$

mit den, vom Benutzer vorgegebenen, Gewichtungsparametern $\gamma, \gamma_a, \gamma_b, \gamma_c \in [0, 1]$ (**dp_J12**, **dp_J1**) wobei $\gamma_a + \gamma_b + \gamma_c \leq 1$ zu gelten hat und den Skalierungen $\rho_1, \rho_2, \rho_{1a}, \rho_{1b}, \rho_{1c}$, die sich folgendermaßen berechnen falls $\gamma < 1$. Wir definieren

$$\mu_{uni} = \max \left(\hat{\gamma}_1 \| \partial \mathcal{J}_1(\mathbf{u}(\Omega^0)) \|_{L^2(\Gamma_w^0)}, \hat{\gamma}_a \| \partial \mathcal{J}_{1a}(\mathbf{u}(\Omega^0)) \|_{L^2(\Gamma_w^0)}, \right. \quad (3.10)$$

$$\left. \hat{\gamma}_b \| \partial \mathcal{J}_{1b}(\mathbf{u}(\Omega^0)) \|_{L^2(\Gamma_w^0)}, \hat{\gamma}_c \| \partial \mathcal{J}_{1c}(\mathbf{u}(\Omega^0)) \|_{L^2(\Gamma_w^0)} \right) \quad (3.11)$$

wobei wobei Ω^0 und Γ_w^0 die Geometrie im Gebiet und am Rand zu Beginn der Formoptimierung ist und

$$\hat{\gamma}_1 = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \gamma_a + \gamma_b + \gamma_c = 1, \\ 1 & \text{wenn } \gamma_a + \gamma_b + \gamma_c < 1, \end{cases} \quad \hat{\gamma}_I = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \gamma_I = 0, \text{ mit } I \in \{a, b, c\}, \\ 1 & \text{wenn } \gamma_I > 0, \end{cases} \quad (3.12)$$

Die Skalierungsparameter lauten

$$\rho_k = \frac{\mu_{uni}}{\| \partial \mathcal{J}_k(\mathbf{u}(\Omega^0)) \|_{L^2(\Gamma_w^0)}} \text{ mit } k \in \{1, 2, 1a, 1b, 1c\}. \quad (3.13)$$

Falls $\gamma = 1$, so ist $\rho_1 = 1$ gesetzt.

3.7 Geometrische Restriktionen

Die Formoptimierung unterliegt zwei geometrischen Restriktionen:

- Bauraumrestriktion: Es ist eine optimale Geometrie innerhalb eines fest vorgegebenen Bauraumes gesucht.
- Übergangsrestriktion: Am Übergang zwischen der zu formoptimierenden Geometrie und der fixen Geometrie soll eine Kante vermieden werden, um Probleme in der Strömungssimulation zu vermeiden.

3.7.1 Methode 1: Fixieren am Übergangsbereich

Formgradient an den Mittelpunkten der Flächen, die an die fixe Geometrie angrenzen gleich 0 setzen.

Numerische Berechnung an diesen Stellen ist nicht vertrauenswürdig.
Bei bisherigen Berechnungen wurde der Formgradient automatisch auf diesen Flächen gleich null gesetzt. Dies empfiehlt sich auch für die weiteren Testrechnungen.
Die Einstellung erfolgt über den Parameter: `uer_fix_faces`
(0:nicht fixieren, 1: fixieren).

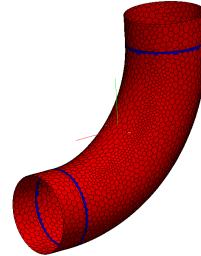


Abbildung 3.2: BLAU: Faces, auf denen der Formgradient im Flächenmittelpunkt 0 gesetzt wird.

3.7.2 Methode 2: Verwendung von Zielfunktionale für Bauraum und Übergangsrestriktionen

Um diese Restriktionen in der Formoptimierung zu berücksichtigen, wird das bisher verwendete Zielfunktional \mathcal{J}_{12} erweitert zu

$$\mathcal{J}_{12}^{\alpha, \varphi}(\mathbf{u}(\Omega)) = \mathcal{J}_{12}(\mathbf{u}(\Omega)) + \alpha \mathcal{L}(\Omega) + \varphi \mathcal{L}_F(\Omega)$$

mit $\mathcal{L}(\Omega) = \int_{\Omega} \ell(x)$, $\mathcal{L}_F(\Omega) = \int_{\Omega} (d(x, K_F))^2$, den Gewichtungsparametern $\alpha \geq 0$ (**bauraum_gewichtung**), $\varphi \geq 0$ (**fix_gewichtung**) und der Distanzfunktion $d(x, K_F) = c_1 \min_{y \in K_F} |x - y|$. Im Falle der Barriere-Methode ist $\ell(x) = |\ln d(x, K^c)|$ und im Falle des Penalty-Verfahrens ist $\ell(x) = c_2 (d(x, K))^{\beta}$, mit $\beta > 0$ (**bauraum_straf_potenz**). Die Skalierungsfaktoren c_1, c_2 werden im Abschnitt 3.7.3 behandelt. Die Geometrie K bezeichnet die Bauraumgeometrie, $K^c = \mathbb{R}^n \setminus K$ und die Geometrie K_F bezeichnet den zulässigen Bereich der Geometrie im Übergang zwischen den fixen und den zu formoptimierenden Teilen. Der Parameter **bauraum_restriktion** gibt an ob bzw. welche Methode im Umgang mit der Bauraumrestriktion verwendet werden soll. Will man die Bauraumgewichtung α während der Formoptimierung erhöhen (im Falle des Penalty-Verfahrens) bzw. verringern (im Falle der Barriere-Methode) so können die Parameter

Innerhalb des Bereiches, welcher durch den Abstand zur fixen Geometrie (**uer_bereich**) festgelegt ist, erfolgt die Übergangsrestriktion. Der Benutzer kann die Restriktionsgeometrie mit den Parametern: **uer_pow** (Grad der Potenzfunktion des nichtlinearen Anteils), **uer_nonlinear** und **uer_linear** (siehe Abb. 3.3) steuern.

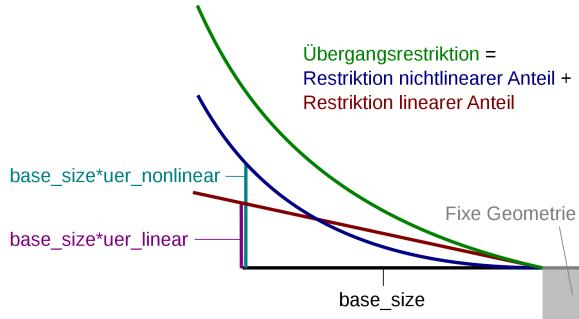


Abbildung 3.3: Übergangsgeometrie.

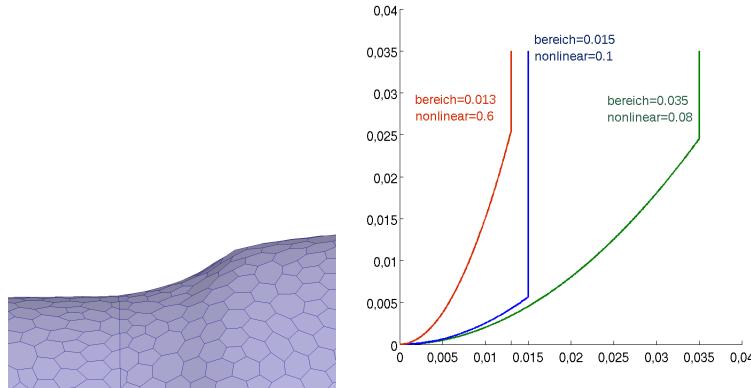


Abbildung 3.4: Links: Geometrie am Übergang. Rechts: unterschiedliche Übergangsrestriktionen.

OuterLoopCycleNr (Tabelle 8) und **bauraum_modification_scale** verwendet werden.

In Abbildung 3.4 sind Übergangskurven bei drei unterschiedlichen Parametereinstellungen dargestellt. Um starke Krümmungen der Geometrie zu verhindern, ist die Variable in grüner Farbe zu empfehlen.

3.7.3 Heuristische Skalierung der Zielfunktionalen bei geom. Restriktionen

Um gleiche Größenordnungen von geometrischen Zielfunktionalen und physikalischen Zielfunktionalen zu erzielen, verwenden wir eine Skalierung c_1 der Raumkoordinaten und eine Skalierung c_2 der Funktion $\ell(d)$ unter Verwendung der Startgeometrie Ω^0 . Im Falle des **Penalty-Verfahrens** werden die Parameter c_1 und c_2 so gewählt, dass die Gleichungen

$$\int_{\Sigma(d_{min})} \int_0^{c_1 d_{max}} c_2 d^\beta dd = \mathcal{J}_{12}(\mathbf{u}(\Omega^0)), \quad (3.14)$$

$$c_2 (c_1 d_{max})^\beta = \|\mathcal{D}\mathcal{J}_{12}^\alpha(\Omega^0)\|_{L^\infty(\Gamma_w^0)} \quad (3.15)$$

erfüllt sind, wobei d_{min} und d_{max} anzugeben sind durch die Wahl der Parameter **dminDS** und **dmaxDS** für die Bauraumrestriktion (bzw. analog **dminIF** und **dmaxIF** für die Übergangsrestriktion).

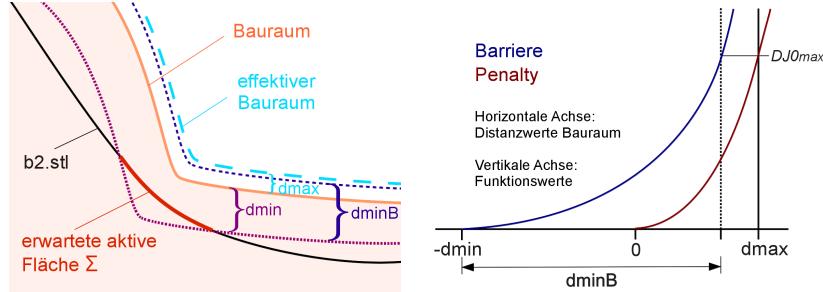


Abbildung 3.5: Links: Skizze Bauraum. Rechts: Funktionen: Penalty, Barriere.

Im Falle der **Barriere-Methode** kann anstelle des geometrischen Bauraumes (*bds.stl*) ein effektiver Bauraum gewählt werden. Hierbei wird der Bauraum um die Länge **dmaxDS** (Einheit in Meter) vergrößert. Wird dieser Parameter gleich 0 gesetzt, so ist der effektive Bauraum gleich dem geometrischen Bauraum. Die Einstellung von **dmaxDS** größer 0 ist insbesondere für jene Fälle angedacht, bei denen die Startgeometrie außerhalb des geometrischen Bauraumes liegt. Die Skalierungsgrößen c_1 und c_2 werden so gewählt, dass die Gleichungen

$$\int_{\Sigma(d_{min})} \int_0^{c_1 d_{minB}} c_2 d^\beta dd = \mathcal{J}_{12}(\mathbf{u}(\Omega^0)), \quad (3.16)$$

$$c_2 (c_1 d_{minB})^\beta = \|\mathcal{D}\mathcal{J}_{12}^\alpha(\Omega^0)\|_{L^\infty(\Gamma_w^0)} \quad (3.17)$$

erfüllt sind, wobei d_{min} und d_{minB} durch die Wahl der Parameter **dminDS** und **dminBDS** anzugeben sind (siehe Abbildung 3.5).

3.7.4 Methode 3: Dämpfung im Übergangsbereich

Dämpfung des Formgradienten im Übergangsbereich.

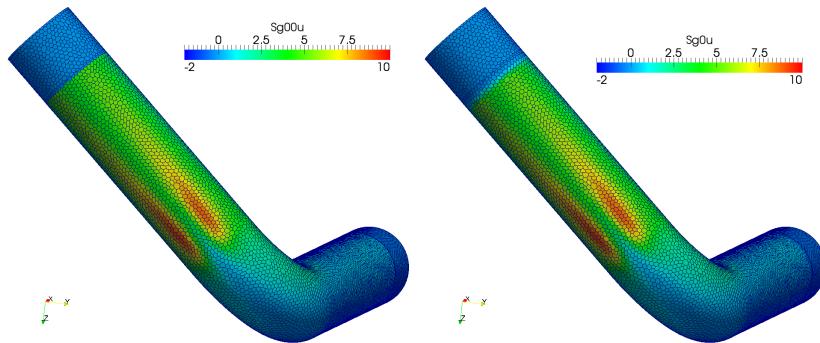


Abbildung 3.6: Links: Rohr 3 ohne Dämpfung. Rechts: Rohr 3 mit Dämpfung.

Eigenschaften:

- - Ungünstig bei unzulässiger Startgeometrie.
- - Unerwünschte Effekte im Übergang von gedämpftem zum ungedämpften Bereich.
- + Einfache Benutzerhandhabung, da kein zusätzlicher Parameter erforderlich ist.

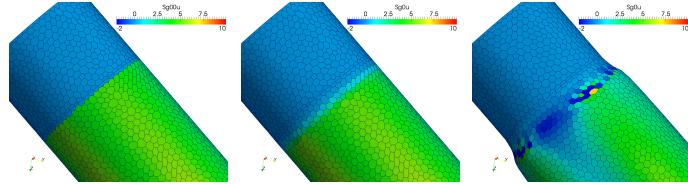


Abbildung 3.7: Detailansicht: links: ohne Dämpfung, mitte: mit Dämpfung, rechts: gedämpfter Forgradient nach 40 Iterationen.

3.7.5 Methode 4: Glättung des Formgradienten

Lösen der Laplace-Beltrami Gleichung mit Randbedingungen gleich 0 auf der Übergangskurve.

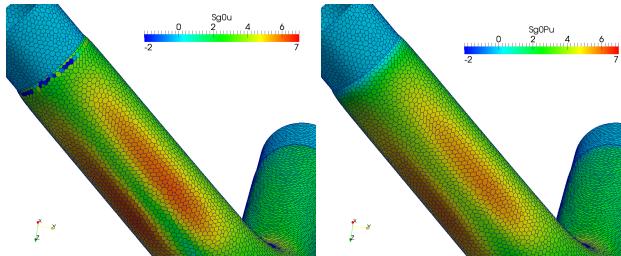


Abbildung 3.8: Rohr 3: links: ohne LB-Glättung, rechts: mit LB-Glättung.

$$-\varepsilon \Delta_\Gamma w + w = -g_{\mathcal{J}_{12}} \quad \text{auf } \Gamma \quad (3.18)$$

$$w = 0 \quad \text{auf } \partial\Gamma \quad (3.19)$$

Der Parameter ε in Gleichung (3.18) entspricht dem Parameter **scaleLB** in Tabelle 11. Falls keine Laplace-Beltrami Glättung erfolgen soll, so ist dieser Parameter auf 0 zu setzen. Erfahrungsgemäß sollte der Parameter im Bereich [1e-6, 1e-3] gewählt werden. Die Glättung wird stärker je größer der Parameter gewählt wird.

Parametername	Defaultwert	Zulässigkeit	RLR	M23	Beschreibung
uer_bereich	0.01	[0,100]	0.015	0.35	Übergangsrestriktion: Bereich in m.
uer_nonlinear	0.2	[0,100]	0.6	0.3	Übergang.: «1: flache, »1:steile Kurve.
uer_linear	0	[0,100]	0	10	Übergang.: «1: flache, »1:steile Gerade.
uer_pow	2	[0,10]	2	2	Übergang: Potenz d. Übergangsfkt.
bauraum_restriktion	1	{0,1,2}	2	0	0:ohne Bauraum, 1:Barriere, 2:Penalty.
bauraum_straf_potenz	2	[1,3]	2	2	Potenz β bei Penalty-Verfahren.
fix_gewichtung	1	[0,100]	1	1	Gewichtung φ für Übergangsrestr.
uer_fix_faces	1	{0,1}	1	1	Übergangsrestriktion: Methode 1 verwenden: 0:nein, 1:ja.
scaleShapeGradientFix	1	{0,1}	1	0	Übergangsrestriktion: Methode 3 verwenden: 0:nein, 1:ja.
scaleLB	1e-5	[0,1]	5e-5	1e-3	Übergangsrestriktion: Methode 4 Glättungsparameter: 0 keine Glättung, 1 starke Glättung.

Tabelle 10: Geometrische Restriktionen 1.

Parametername	Defaultwert	Zulässigkeit	Beschreibung
dminIF, dmaxIF	1e-2, 5e-3	[0,10]	Übergangsrestr.: Skalierung.
dminDS, dminDS	1e-2, 5e-3	[0,10]	Bauraumrestr.: Skalierung.
dminBDS	(dminDS+dmaxDS)*0.8	[0,10]	Bauraumrestr.: Skalierung.

Tabelle 11: Geometrische Restriktionen 2 (Detail).

Parametername	Defaultwert	Zulässigkeit	Beschreibung
restart_opt	0	{0,1}	Ausgangsgeometrie wall0.stl für Geometrieänderung verwenden: 0:nein, 1:ja.
damp	3(0 0 0)	[0,1e20]	Dämpfungsparameter $(\rho_2, \rho_1, \rho_{1a}, \rho_{1b}, \rho_{1c})$, optional anzugeben anhand der Einträge in Testlauf_Info.txt.

Tabelle 12: Optionale Restart - Parameter.

3.8 Topologieoptimierung

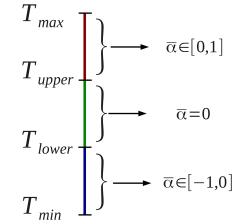
Falls die Topologieoptimierung durchgeführt werden soll ist der Parameter **topOpt** auf 1 zu setzen. Die angepasste Impulsgleichung der Strömung in einem porösen Medium lautet:

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{u}^T) - \nu \Delta \mathbf{u} + \nabla p + P_V \mathbf{u} + P_I |\mathbf{u}| \mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad (3.20)$$

Die maximalen Werte für P_V und P_I sind durch die Parameter **porosityV** und **porosityI** anzugeben. Diese Werte werden mit dem Parameter **startPOR** multipliziert um die Startporosität festzulegen.

Es scheint numerisch notwendig, Grenzwerte T_{upper} (**thresholdTOPupper**) und T_{lower} (**thresholdTOPlower**) festzulegen, bei denen die Porosität erhöht bzw. verringert wird. Theoretische Festsetzung wäre $T_{upper} = T_{lower} = 0$.

Separates Skalieren der Werte größer als T_{upper} und jener kleiner T_{lower} führt zu $\bar{\alpha}$ (siehe rechte Grafik). Wenn diese Skalierung gewünscht ist, so ist **boundPOR** auf 1 zu setzen.



Parametername	Defaultwert	Zulässigkeit	B135	Beschreibung
topOpt	0	{0,1}	1	0: Formoptimierung, 1: Topologieoptimierung.
startPOR	0	[0,1]	0.1	Skalierung der Startporosität.
porosityI	0	[0,1e6]	0	Porous Inertial Resistance (maximaler Wert).
porosityV	0	[0,1e6]	150	Porous Viscous Resistance (maximaler Wert).
boundPOR	1	{0,1}	1	Verwendung der Skalierungs-technik.
thresholdTOPupper	2	[0,10]	-1e-4	Oberer Grenzwert bei Update der Porosität.
thresholdTOPlower	1	{0,1,2}	-0.05	Unterer Grenzwert bei Update der Porosität.

Tabelle 13: Topologieoptimierung.

3.9 Extrahieren der topologieoptimierten Geometrie

Die extrahierte Geometrie kann auf Basis der Porosität oder des topologischen Gradienten erfolgen (**grad_por**). Mit dem Parameter **extractFolder** ist die Ordnernummer anzugeben in welcher sich der gewünschte Datensatz befindet.

Anstelle der Originaldaten kann \mathcal{T}_σ verwendet werden:

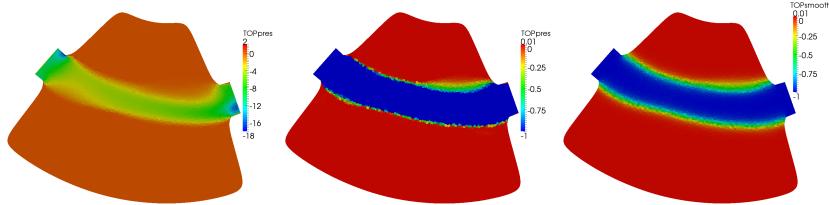


Abbildung 3.9: Links: $\mathcal{T}(\mathbf{x})$, mitte: $\bar{\mathcal{T}}(\mathbf{x})$, rechts: $\mathcal{T}_\sigma(\mathbf{x})$.

$$\bar{\mathcal{T}}(\mathbf{x}) = \min (\max (\mathcal{T}(\mathbf{x}), \mathcal{T}_{min}), \mathcal{T}_{max}), \quad (3.21)$$

$$-\sigma \Delta \mathcal{T}_\sigma + \mathcal{T}_\sigma = \bar{\mathcal{T}} \quad \text{in } \Omega, \quad (3.22)$$

$$\mathcal{T}_\sigma = \mathcal{T}_{min} \quad \text{auf } \Gamma_i \cup \Gamma_o, \quad (3.23)$$

$$\partial_n \mathcal{T}_\sigma = 0 \quad \text{auf } \Gamma_w \cup \Gamma_f. \quad (3.24)$$

Die darin enthaltenen Parameter \mathcal{T}_{min} und \mathcal{T}_{max} sind vom Benutzer durch **cutTOP** anzugeben. Der Glättungsparameter σ ist mit **smoothTOP** festzulegen. Zur Vermeidung möglicher Überschneidungen mit den fixen Geometrien kann der Parameter **feasibleTOP** verwendet werden, um den Zulässigkeitsbereich festzulegen (siehe Abbildung 3.10). Um eine rasche Änderung der Parameter dem Benutzer zu ermöglichen erfolgt



Abbildung 3.10: Links: Unzulässigkeitsbereich (rot); Extrahierte Geometrie: mitte: *wallExtract.stl*, rechts: *wall.stl*

bei Aufruf der Routine *topoExtractSTL* eine Auflistung der Default-Werte und eine Eingabeoption. Die Parameter können auch in *system/fvSolution/SGparameter* geändert werden.

Parametername	Default-wert	Zuläs-sigkeit	B135	Beschreibung
grad_por	0	{0,1}	0	0: verwende TOPpres; 1: ver-wende PORalpha.
extractFolder	1	{0,1e4}	60	Geometrie extrahieren aus Ordner mit dieser Nummer.
cutTOP	2(0 0)	{0,1}	2(-1,0.01)	Maximal- und Minimalwert.
smoothTOP	0	[0,1e5]	0.003	Laplace Glättung der Top.Grad. Information.
feasibleTOP	2(0 0)	[0,1e6]	2(0 0)	Bereich der Unzulässigkeit am In-/Outlet in Meter.
thresholdTOP	0	[-1e6,1e6]	-0.5	Niveau-Schicht zum Erzielen der Oberfläche.

Tabelle 14: Extrahieren der topologieoptimierten Oberfläche.

4 Initialisierung und Berechnung

4.1 Ausführen der Formoptimierung

- Erstellen eines Ordneres z.B. M23Test in \$FOAM_RUN/tutorials/incompressible/.
- Im Ordner M23Test ist die Datei parameter_sg mit den Parametern und der Ordner initial_stl mit den Geometriedaten anzulegen.
- Vom Ordner M23Test aus sind die Befehle *setupShapeGradientCCM* und danach *shapeGradientCCM > outtestShape.txt* auszuführen.

4.2 Ausführen der Topologieoptimierung

- Erstellen eines Ordneres B135Test in \$FOAM_RUN/tutorials/incompressible/. Im Ordner B135Test ist die Datei parameter_sg mit den Parametern und der Ordner initial_stl mit den Geometriedaten anzulegen.
- Vom Ordner B135Test aus sind die Befehle *setupShapeGradientCCM* und *topoOpt > outtestTop1.txt* auszuführen. Dies liefert TOPpres und PORalpha.
- Vom Ordner M23Test aus sind die Befehle *topoExtractSTL* und *topoOptCloseAll > outtestTop2.txt* auszuführen. Dies liefert das Zwischenergebnis wallExtract.stl und das Ergebnis wall.stl.

4.3 Stopp und Neustart der Formoptimierung

Zu Beginn der Formoptimierung wird automatisch die Datei *STOP.txt* angelegt. Im Falle, dass die Formoptimierung beendet werden soll, so ist die Zahl in der Datei auf 0 abzuändern. Während der Formoptimierung wird in den Iterationszahl-Ordnern, in denen eine Gitterneuvernetzung durchgeführt wurde, der Unterordner *sim* angelegt. Darin befindet sich neben der gespeicherten Simulation der vorangegangenen Iterationen auch die Datei *wall.stl*. Zusammen mit den Startgeometrien *inlet.stl*, *outlet.stl*, *fixed.stl* und gegebenenfalls *bds.stl* kann *wall.stl* für eine neue Testrechnung verwendet werden. Falls die Geometrieveränderung bezüglich der Startgeometrie berechnet werden soll, so

ist diese in der Datei `wall0.stl` im Ordner `initial_stl` zu speichern und der Parameter **restart_opt** auf 1 zu setzen (siehe Tabelle 12). Wenn die selbe Skalierung der Zielfunktionale gewünscht ist, so ist der Parameter **damp** im `parameter_sg` File anzugeben. Diese Werte werden stets in der `Testlauf_Info.txt` Datei gespeichert.

5 Datenauswertung und Visualisierung

5.1 Ausgabedaten

Während der Form- und Topologieoptimierung werden in jeder Iteration die relevanten Daten (siehe Tabelle 15 und 16) in den entsprechenden Ordnern (Bezeichnung gemäß der Iterationszahl) gespeichert. Die aktuellen Geometriedaten werden in **polyMesh** gespeichert. Weitere Daten wie Zielfunktionswerte, verwendete Schrittweiten etc. befinden sich im Textfile `Testlauf_Info.txt`.

Ausgabedatei	Dimension	Auftreten	Beschreibung
U0	Vektor	Gebiet, Rand	Lösung \mathbf{u} der primalen Gleichung (Geschwindigkeit).
p0	Skalar	Gebiet, Rand	Lösung p der primalen Gleichung (Druck).
density0	Skalar	Gebiet, Rand	Verwendete Dichte in der Navier - Stokes Gleichung.
Vunif	Vektor	Gebiet, Rand	Lösung \mathbf{v} der adjungierten Gleichung (adjungierte Geschwindigkeit) hinsichtlich Erzielen einer gleichmäßigen Ausströmung.
Vpres	Vektor	Gebiet, Rand	Lösung \mathbf{v} der adjungierten Gleichung (adjungierte Geschwindigkeit) hinsichtlich Minimierung des Totaldruckverlustes.
Sg0u	Skalar	Rand	Negativer Formgradient (skaliert).
Sg00u	Skalar	Rand	Negativer Formgradient (skaliert): Anteil von $\mathcal{J}_1, \mathcal{J}_2$.
Sg0Lu	Skalar	Rand	Negativer Formgradient (skaliert): Anteil geometrische Restriktion.
SgVpres0	Skalar	Rand	Negativer Formgradient (skaliert): Anteil von \mathcal{J}_2 (Totaldruckverlust).
SgVunif0	Skalar	Rand	Negativer Formgradient (skaliert): Anteil von \mathcal{J}_1 (gleichmäßige Ausströmung).
GeomChange	Skalar	Rand	Geometrieänderung zur Ausgangsgeometrie (in Meter).
Distance	Skalar	Rand	Distanz zur Bauraumgeometrie (in Meter).
Sg0Pu	Skalar	Rand, Point	Negativer Formgradient - Laplace-Beltrami (skaliert).

Tabelle 15: Ausgabedaten Formoptimierung.

Ausgabedatei	Dimension	Auftreten	Beschreibung
TOPpres	Skalar	Gebiet	Topologische Sensitivität Totaldruckverlust.
TOPmix	Skalar	Gebiet	Effektive Topologische Sensitivität.
PORalpha	Skalar	Gebiet	Porosität.
1/TOPsmooth	Skalar	Gebiet	Geglättete Daten \mathcal{T}_σ (smoothTOP).
1/TOPfea	Skalar	Gebiet	Zulässigkeitsbereich (feasibleTOP).

Tabelle 16: Ausgabedaten Topologieoptimierung.

5.2 Visualisierung mit ParaView

Zur Visualisierung der Daten empfiehlt sich die Verwendung von ParaView. Nach Installation im Zuge der OpenFOAM Setzung kann paraView mit dem Befehl *paraFOAM* im Ordner, mit den zu visualisierenden Daten, aufgerufen werden. Folgende Darstellungsmöglichkeiten der Daten können in paraView verwendet werden (siehe Abbildung 5.1 - 5.2):

- *Point Field* und *Volume Field* Information auf der Oberfläche (Sg0P, GeomChange),
- Vektorfeld mit *Glyph* (U0),
- Querschnitt mit *Clip* bzw. *Slice* oder Kontur mit *Contour* (TOPpres, PORalpha, TOPsmooth),
- STL-Daten mit *File>Open* (wallExtract.stl).

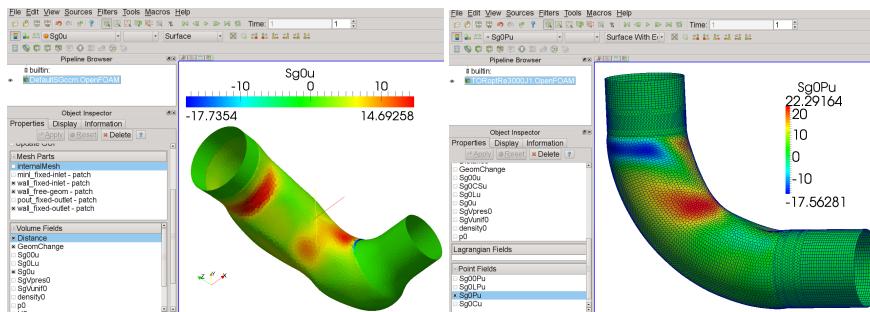


Abbildung 5.1: Verwendung von ParaView: VolumeFields, PointFields.

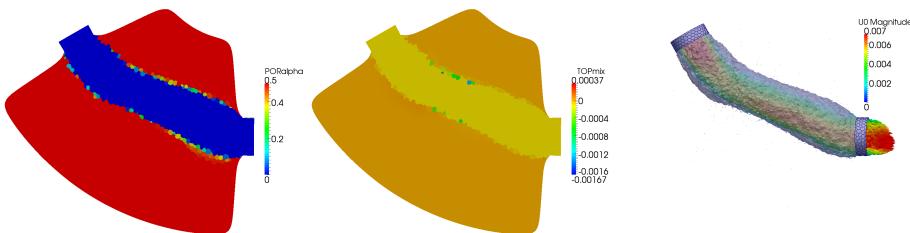


Abbildung 5.2: Porosität, Effektiver Top.-Grad und Kontur.

5.3 Struktogramm

Ein Struktogramm zur Software befindet sich in Abbildung 5.3. Berechnungsschritte sind in eckigen Feldern und Abfragen in abgerundeten Feldern dargestellt. Die wesentlichen Softwareteile sind bei den jeweiligen Berechnungsschritten in grauer Schrift angegeben. In der Ausgabedatei *Testlauf_Info.txt* befindet sich am Ende der Zeile jeder Iteration in eckigen Klammern ein Zahlencode. Dieser Zahlencode gibt den Verlauf der Schrittweitensteuerung innerhalb der jeweiligen Iteration an.

Die Ziffern finden sich im Struktogramm in Abbildung 5.3 wieder, deren Bedeutung ist in Tabelle 17 angegeben.

Ziffer	Bedeutung
0	Schritt akzeptiert / Ende der Iteration.
1	Gitterneuvernetzung.
2	Gitterqualitätskriterien nicht erfüllt für gesamte Geometrie .
3	Bauraumüberschreitung bei Verwendung von Barriere-Methode.
33	Bauraumüberschreitung der Startgeometrie bei Verwendung von Barriere-Methode.
4	Zielfunktional fällt nicht gemäß Armijo - Regel.
6	Primaler Löser konvergiert nicht.
66	Primaler Löser konvergiert nicht bei der Startkonfiguration.
7	Gitterqualitätskriterien nicht erfüllt für Geometrie <i>wall</i> .
8	Oberflächenqualität unzureichend.
9	Vom Benutzer erzwungene Neuvernetzung.

Tabelle 17: Zahlencode Liniensuche Formoptimierung.

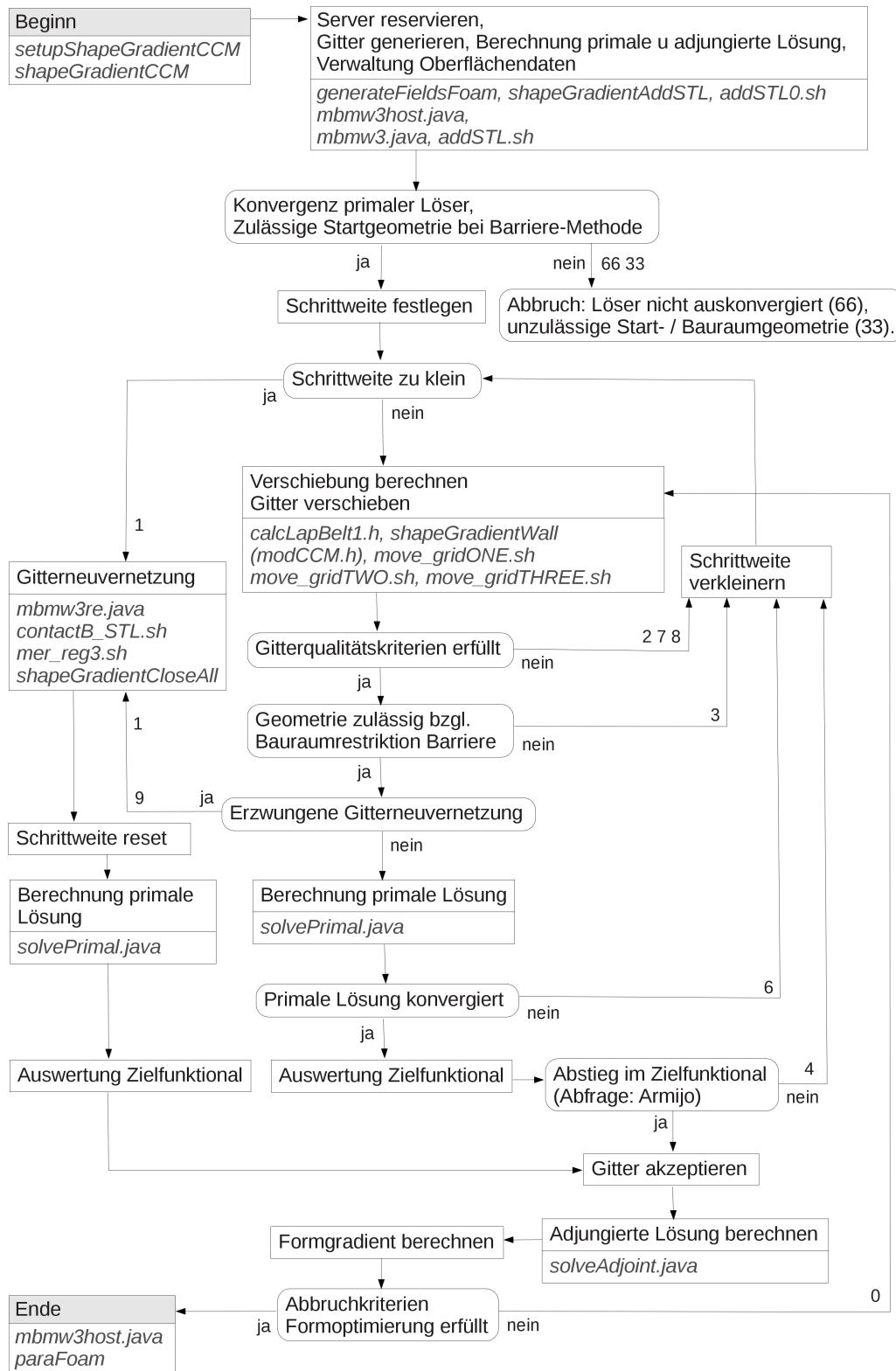


Abbildung 5.3: Struktogramm Formoptimierung.