

1 D oder 3 D Strömungsberechnung für Wasser/Dampf Bewertung anhand ausgeführter Anlagen

Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden 2021

Andre Gipperich, M.Sc., Waldemar Hoffmann, M.Eng., Dipl. Math. Thomas Will

Rely on good experience with

steinmüller engineering

The Engineers Company

Einleitung

Die wasser- und dampfseitige Durchströmung der Komponenten eines Dampferzeugers ist maßgeblich für die sichere Funktion und die Lebensdauer seiner Bauteile.

Dafür sind (aufwändige) wärme- und strömungstechnische Untersuchungen bei der Planung einer Anlage erforderlich.

Die dafür infrage kommenden Rechenmodelle unterscheiden sich durch folgende Eigenschaften:

- a) Aufwand zur Modellbildung
- b) Art des Lösungsverfahrens
- c) Benötigte Rechenleistung und Rechenzeit
- d) Übereinstimmung von Modell und Realität

Im Rahmen des Anlagenmonitorings sind Rechnungen auch im laufenden Betrieb notwendig. Stichwort: Digitaler Zwilling.

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Einleitung

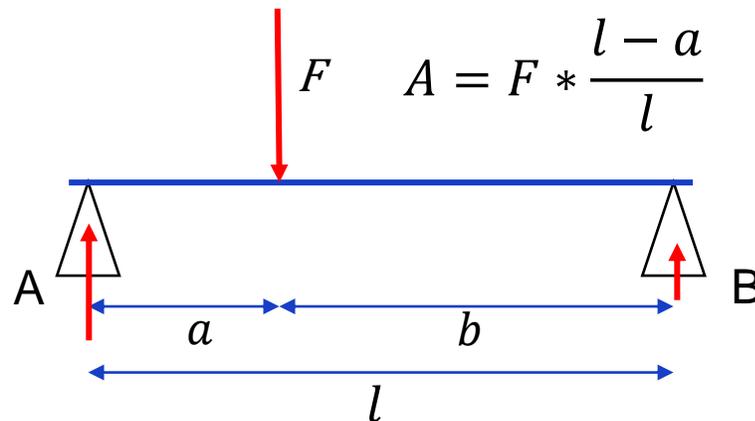
Grundlage der eindimensionalen Strömungsberechnung ist die Bernoulli-Gleichung (siehe VAIS-Handbuch, Wärme- und Strömungstechnik, Kapitel 9 „Strömung“:

$$\rho \frac{w_1^2}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \rho \frac{w_2^2}{2} + p_2 + \rho g z_2 + \Delta p_{bl,12}$$

Bei den 3-D Verfahren haben sich verschiedene CFD (Computational Fluid Dynamics) Codes etabliert, bei welchen das betrachtete Strömungsvolumen in sehr kleine Volumenelemente unterteilt wird. Die Elemente stehen miteinander über Impuls-, Kontinuitäts- und Energiegleichungen in Wechselwirkung.

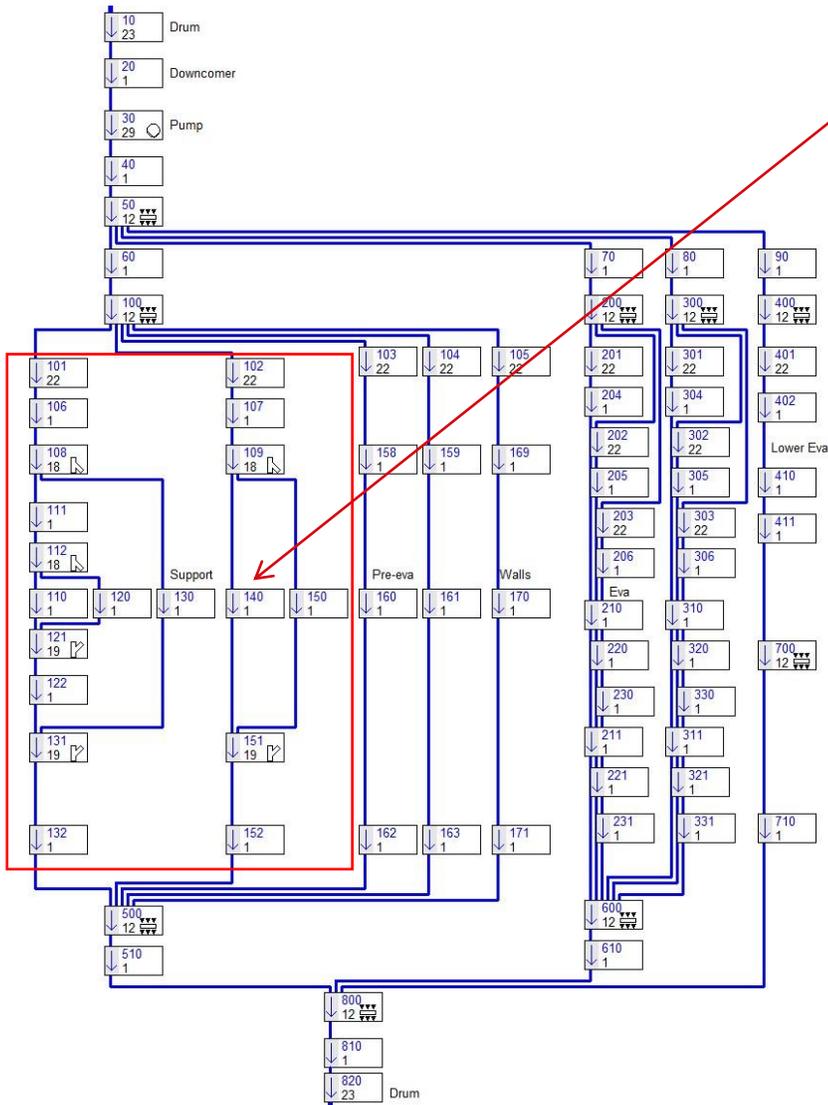
Wann sind 1-D Berechnungen ausreichend, wann werden 3-D Analysen notwendig?

Eine Analogie ist die Anwendung von FEM (Finite Element Method) in der Mechanik, was je nach Aufgabenstellung keine besseren Ergebnisse als die einfache analytische Berechnung erzeugt.



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Gekühlte Tragbalken



Positions-Nr.

Typ

Bezeichnung max. 16 Zeichen

Bemerkung max. 24 Zeichen

Anzahl Anzahl parallele Elemente

Eintritte

Lfd. Nr.

Extern ?

Anschl. Pos. Nr.

Austritte

Lfd. Nr.

Extern ?

Anschl. Pos. Nr.

Außen-/Innendurchmesser des Rohres (s. Wandart) mm

Wanddicke mm

Wandart

Flossenteilung mm

Flossendicke mm

Rauigkeit mm

?	Gerades Rohr		Umlenkung (Bogen)	
	Länge m	ΔH m	α deg	
	2,97	-0,112	180	
	2,97	0,056	180	
	2,97		180	
(0,093		30	
(0,261		90	
	0,129			

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Ausschnitt aus der Benutzungs-Oberfläche des SE Programms DruWas zur Strömungsberechnung von Wasser-/Dampf-Systemen.

Der Verdampfer besteht aus

- 5 Tragbalken
- Wandberohrung
- 2 Schutzspiralen
- Haupt-Verdampfer
- 2 zu-/abschaltbare Zusatzverdampfer

Gekühlte Tragbalken

9-36
März 2017

VAIS-Handbuch
Wärme- und Strömungstechnik



9.3.6 Rohrverzweigung

Die bleibenden Druckverluste in Rohrverzweigungen (T-Stücke, Hosenrohre) beziehen sich auf den Achsenschnittpunkt der Verzweigungen. Die Reibungsverluste der Rohre sind bis zum Achsenschnittpunkt zu berechnen.

9.3.6.1 T-Stücke

a) T-Stück mit gleichem Durchmesser des durchgehenden Rohres vor und hinter dem Abzweig

Massenstromvereinigung

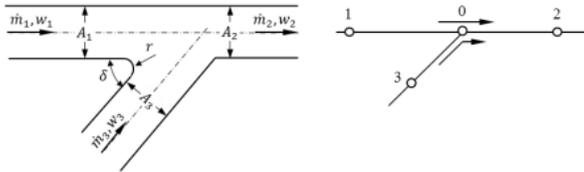


Bild 9.3-24 T-Stück für Massenstromvereinigung ($A_1 = A_2$)

Die Bestimmungsgleichungen für die Druckverluste und Widerstandsbeiwerte enthalten neben dem Abzweigwinkel δ die folgenden Parameter:

$$x_V = \dot{m}_3 / \dot{m}_2 \quad (9.3-59)$$

$$a_V = A_2 / A_3 \quad (9.3-60)$$

$$y_V = r / d_3 \quad (9.3-61)$$

Der bleibende Druckverlust eines T-Stücks gemäß Bild 9.3-24 wird nach Gl. (9.3-3) mit $\Delta p_U = \Delta p_{VdV}$ für das durchgehende Rohr und mit $\Delta p_U = \Delta p_{VaV}$ für das abzweigende Rohr berechnet:

$$\Delta p_{bl,12} = \Delta p_{R,12} + \Delta p_{VdV} \quad (9.3-62)$$

$$\Delta p_{bl,32} = \Delta p_{R,32} + \Delta p_{VaV} \quad (9.3-63)$$

9-38
März 2017

VAIS-Handbuch
Wärme- und Strömungstechnik



Massenstromtrennung

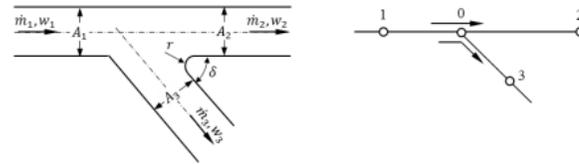


Bild 9.3-25 T-Stück für Massenstromtrennung ($A_1 = A_2$)

Die Bestimmungsgleichungen für die Druckverluste und Widerstandsbeiwerte enthalten neben dem Abzweigwinkel δ die folgenden Parameter:

$$x_T = \dot{m}_3 / \dot{m}_1 \quad (9.3-76)$$

$$a_T = A_1 / A_3 \quad (9.3-77)$$

$$y_T = r / d_3 \quad (9.3-78)$$

Der bleibende Druckverlust eines T-Stücks gemäß Bild 9.3-25 wird nach Gl. (9.3-3) mit $\Delta p_U = \Delta p_{VdT}$ für das durchgehende Rohr und mit $\Delta p_U = \Delta p_{VaT}$ für das abzweigende Rohr berechnet:

$$\Delta p_{bl,12} = \Delta p_{R,12} + \Delta p_{VdT} \quad (9.3-79)$$

$$\Delta p_{bl,13} = \Delta p_{R,13} + \Delta p_{VaT} \quad (9.3-80)$$

Hierin ist:

$$\Delta p_{VdT} = \zeta_{VdT} \frac{\rho}{2} w_1^2 \quad (9.3-81)$$

$$\Delta p_{R,12} = \left[\lambda_{R1} \frac{l_{10}}{d_1} + \lambda_{R2} \frac{l_{02}}{d_2} (1 - x_T)^2 \right] \frac{\rho}{2} w_1^2 \quad (9.3-82)$$

Auszüge aus dem VAIS-Handbuch Wärme- und Strömungstechnik, Kapitel 9

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Gekühlte Tragbalken

Ergebnis

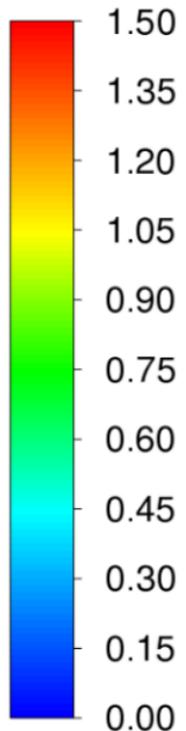
Sub-System	Massenstrom	Geschwindigkeit	Dampfanteil	
	kg/s	m/s	m ³ /m ³	kg/kg
Support 1K	0.272	1.8	0.696	0.092
Support 2K	0.236	1.7	0.729	0.107
Support 3K	0.265	1.7	0.702	0.095
Support 4K	0.228	1.7	0.738	0.111
Support 5K	0.246	1.7	0.720	0.102
Pre-Eva (1st layer)	0.564	6.7	0.800	0.151
Pre-Eva (2nd layer)	0.514	6.6	0.817	0.166

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

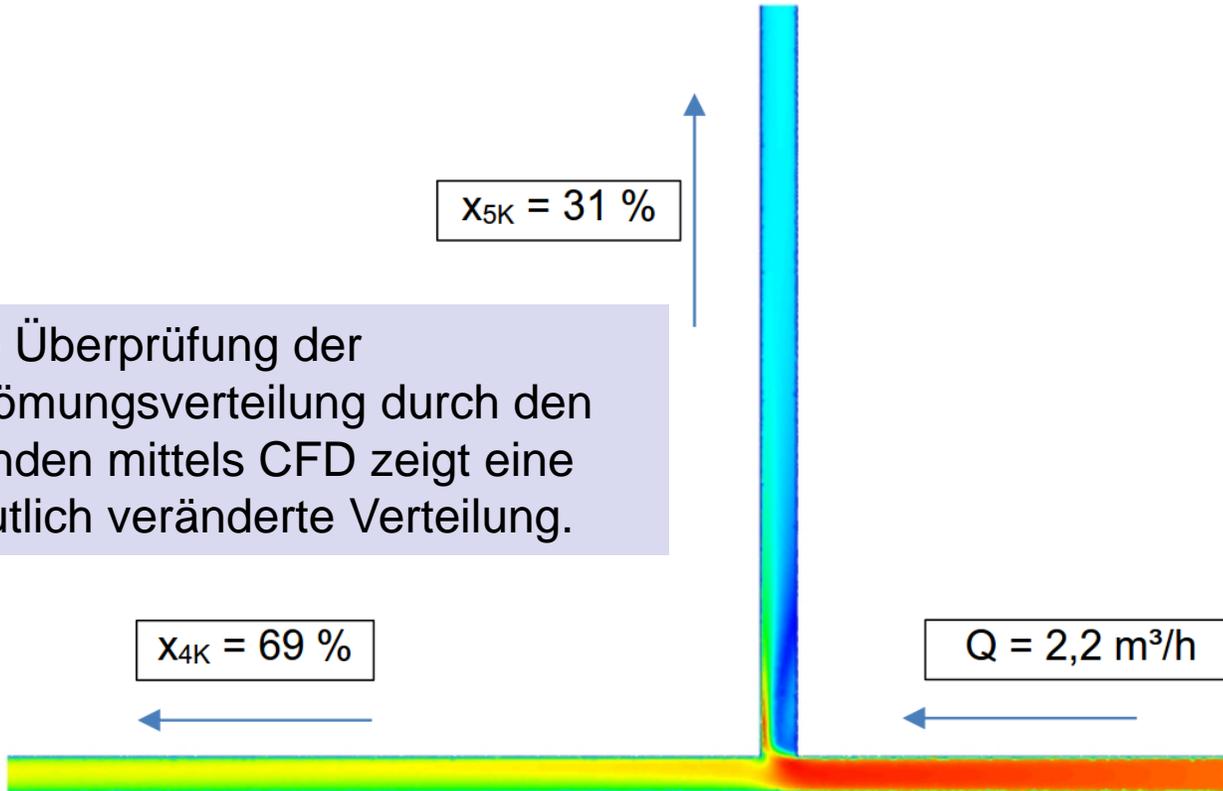
Die Berechnung ergibt eine relativ gleichmäßige Wasserverteilung über die einzelnen Tragbalken (ca. $\pm 9\%$). Die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 m/s am Eintritt und 1,7 - 1,8 m/s an den Austritten sind ausreichend, um die Tragbalken sicher zu kühlen.

Gekühlte Tragbalken

Geschwindigkeit
in m/s

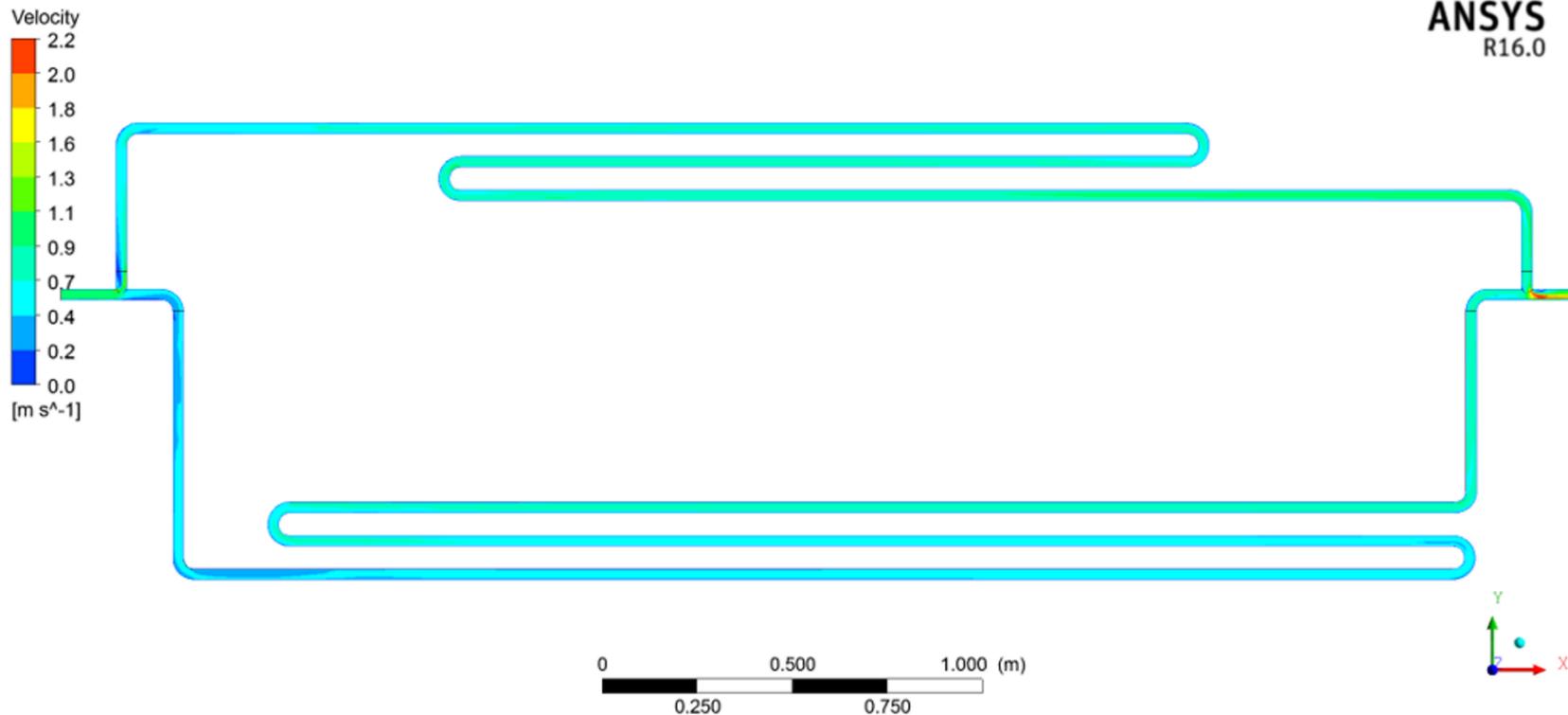


Die Überprüfung der Strömungsverteilung durch den Kunden mittels CFD zeigt eine deutlich veränderte Verteilung.



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

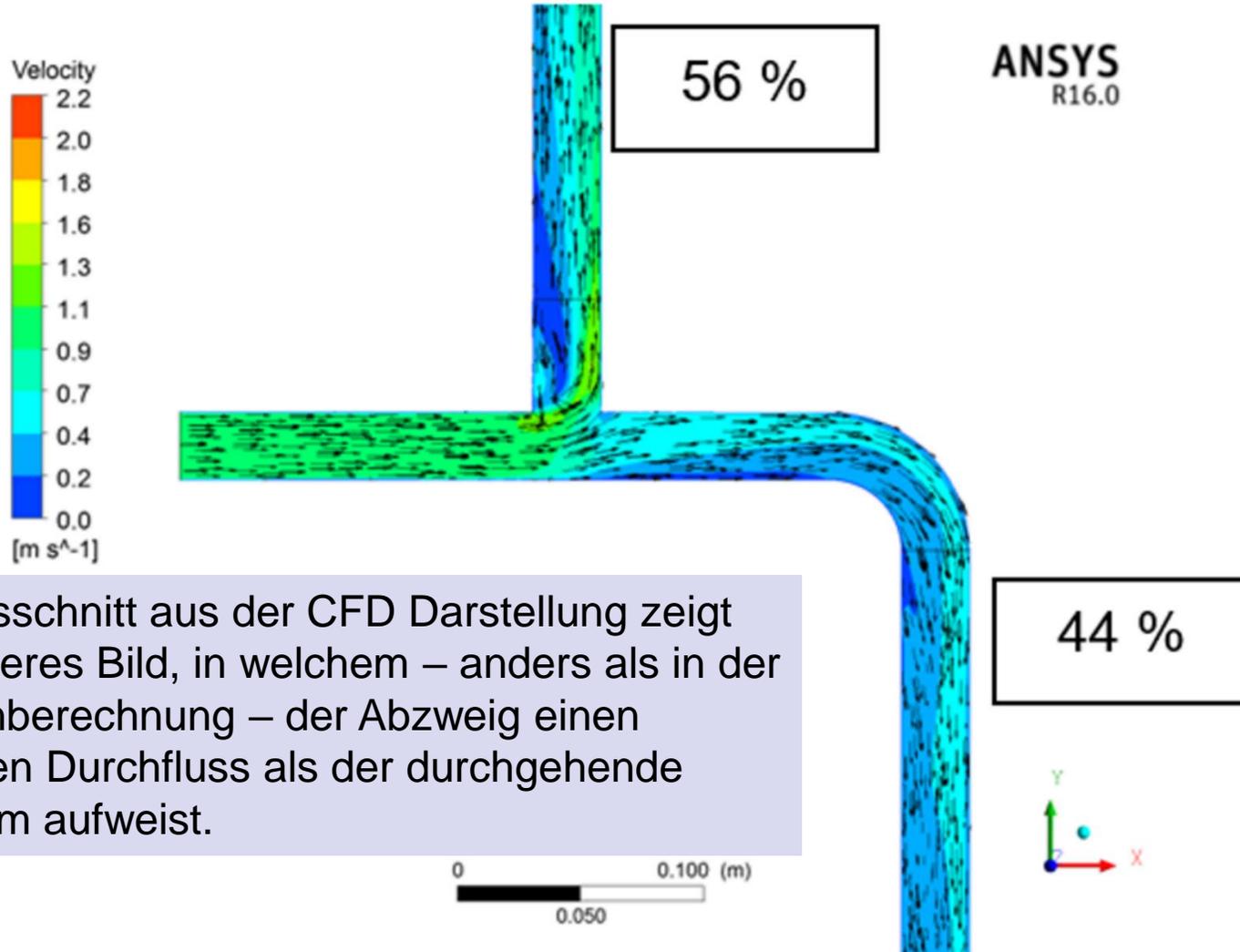
Gekühlte Tragbalken



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Zur Verifizierung wurde durch SE ein Teilsystem ebenfalls mittels CFD abgebildet. Anders als im Modell des Kunden wurden die verbindenden Rohre, welchen einen wesentlichen Strömungswiderstand bilden, mit erfasst.

Gekühlte Tragbalken



Der Ausschnitt aus der CFD Darstellung zeigt ein anderes Bild, in welchem – anders als in der Kundenberechnung – der Abzweig einen größeren Durchfluss als der durchgehende Teilstrom aufweist.

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Gekühlte Tragbalken

Ergebnisvergleich

Strömungsweg	Strömungsverteilung		
	1-D	CFD 1	CFD 2
Tragbalken 4K	48 %	69 %	44 %
Tragbalken 5K	52%	31 %	56 %

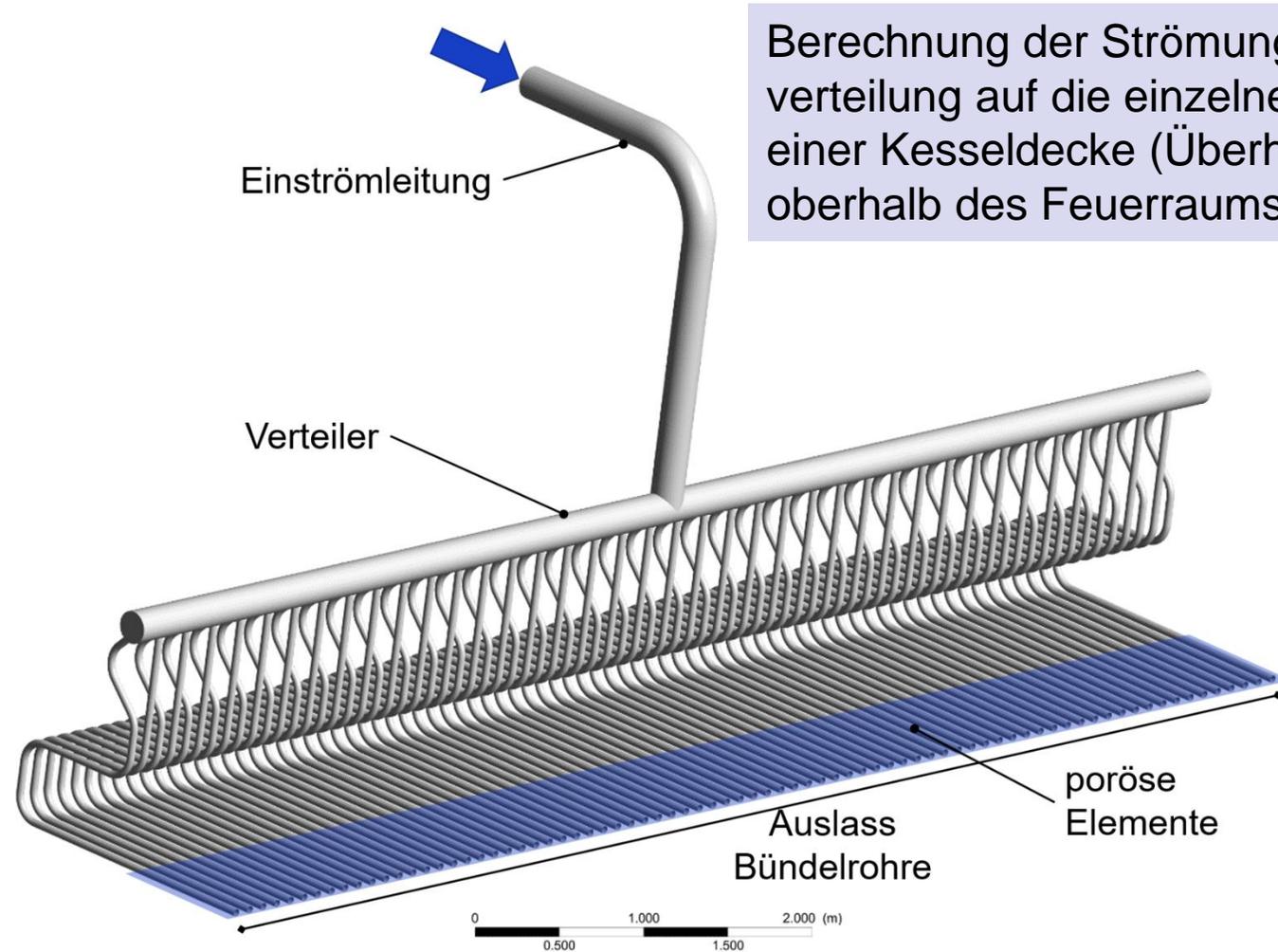
- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Obwohl die oben beschriebene Analyse nur für die Tragbalken 4K und 5K durchgeführt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass die eindimensional berechnete Verteilung an anderen Stellen ebenfalls hinreichend genau berechnet wird.

Die eindimensionale Strömungsberechnung ist für diese Aufgabenstellung ausreichend.

Ferner zeigt der Vergleich der beiden CFD-Simulationen deutlich, wie wichtig eine richtige Definition der Systemgrenzen und Randbedingungen für eine korrekte Berechnung ist.

Membranwand-Überhitzer



Berechnung der Strömungsverteilung auf die einzelnen Rohre einer Kesseldecke (Überhitzer) oberhalb des Feuerraums

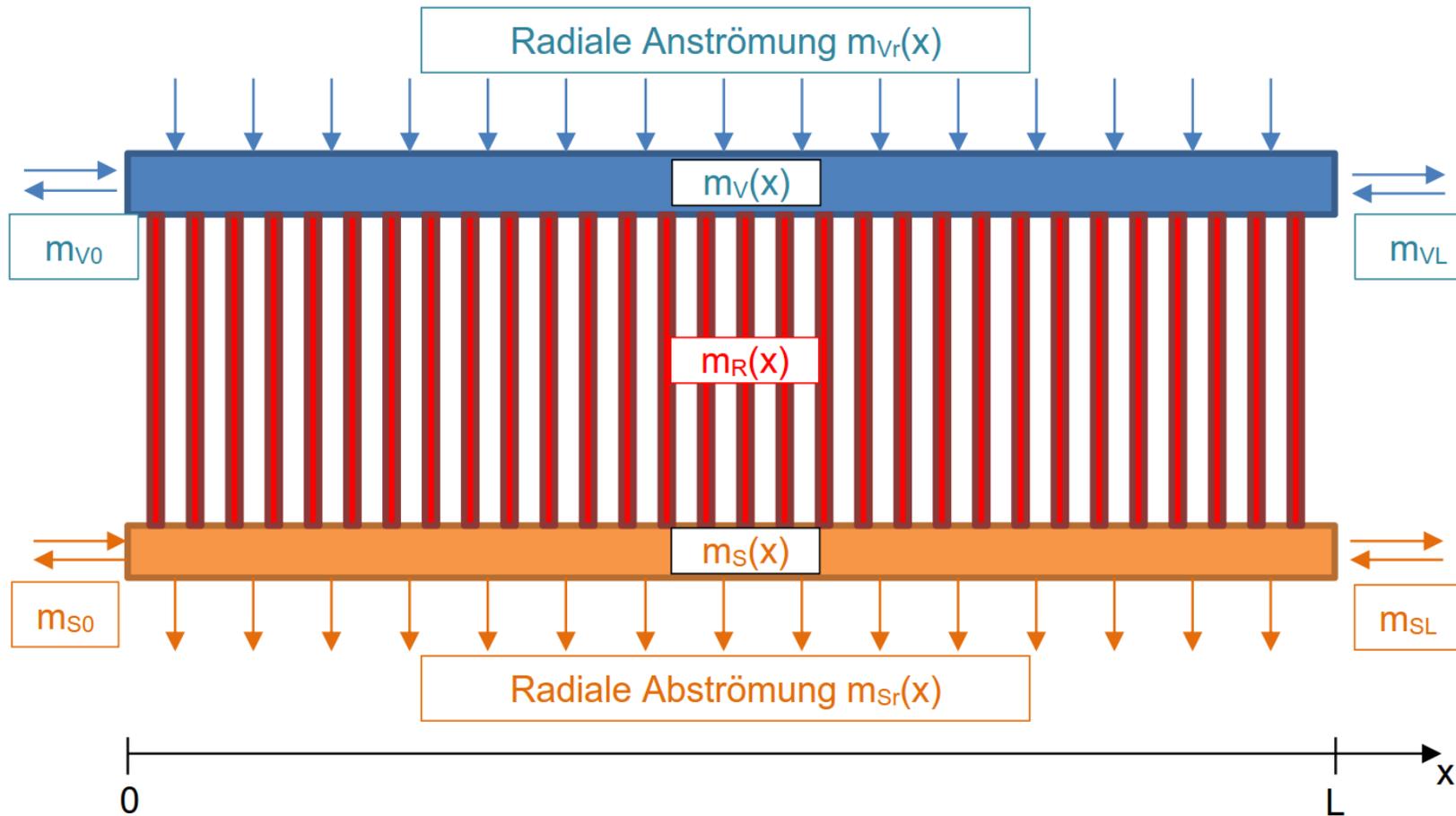
- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Membranwand-Überhitzer

Parameter	Einheit	Wert
Innendurchmesser der Zuleitung	mm	200
Innendurchmesser des Verteilers	mm	200
Länge des Verteilers	mm	9.000
Rohrinnendurchmesser	mm	46
Rohrteilung Bündel	mm	115
Anzahl der Rohre	-	77
Widerstandsbeiwert der Rohre	-	10
Dampfmassenstrom	kg/s	250
Dampfdruck	bar(a)	275
Dampftemperatur	°C	420

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- **Membranwand-Überhitzer**
- Zusammenfassung

Membranwand-Überhitzer



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Skizze zur Funktions-Beschreibung des Programms AxiDia zur Diagnose von Axial-Strömungen in Rohrregistern

Membranwand-Überhitzer

Drei gekoppelte lineare Differentialgleichungen

$$\frac{d m_V}{d x}(x) = f_V(m_V(x), m_{Vr}(x), m_R(x), d_V(x))$$

$$\frac{d m_R}{d x}(x) = f_R(m_R(x), m_V(x), m_S(x), d_R, \zeta_R)$$

$$\frac{d m_S}{d x}(x) = f_S(m_S(x), m_{Sr}(x), m_R(x), d_S(x))$$

für folgenden Größen

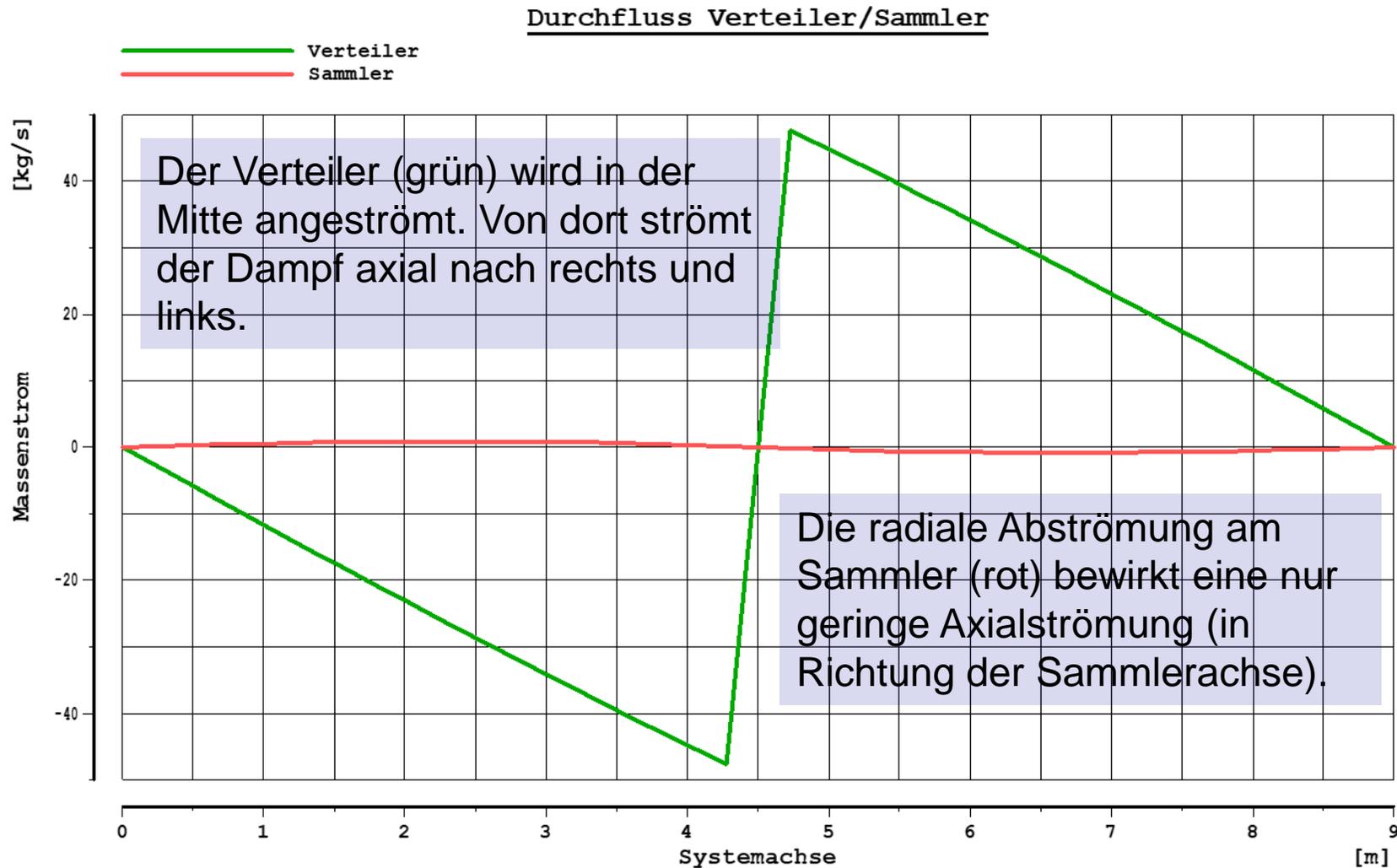
$m_V(x)$ Massenstrom im Verteiler entlang der Systemachse

$m_R(x)$ Massenstrom durch die Heizflächenrohre entlang
der Systemachse

$m_S(x)$ Massenstrom im Sammler entlang der Systemachse

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

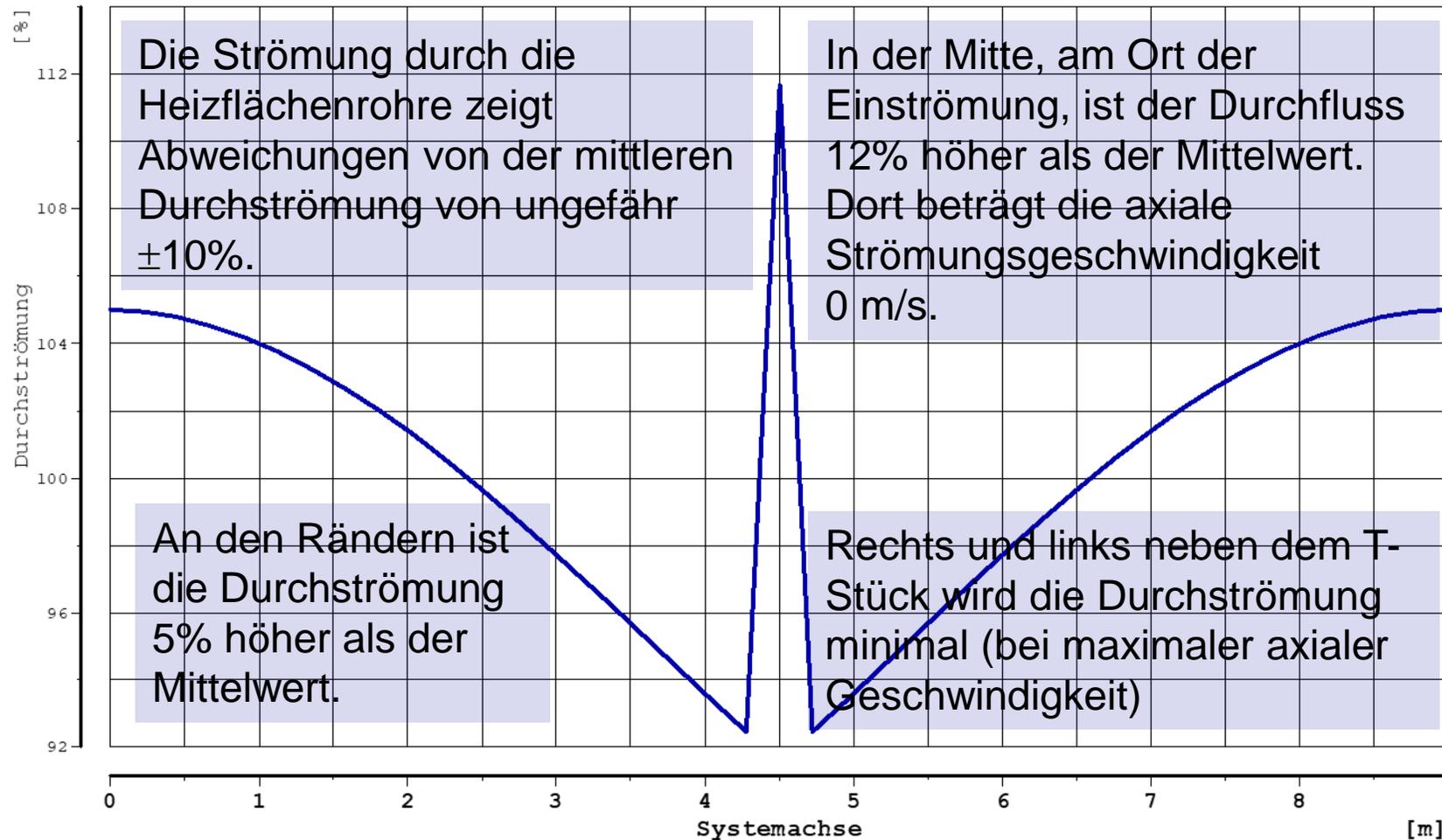
Membranwand-Überhitzer



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Membranwand-Überhitzer

Durchflussverteilung in den Rohren



Die Strömung durch die Heizflächenrohre zeigt Abweichungen von der mittleren Durchströmung von ungefähr $\pm 10\%$.

In der Mitte, am Ort der Einströmung, ist der Durchfluss 12% höher als der Mittelwert. Dort beträgt die axiale Strömungsgeschwindigkeit 0 m/s.

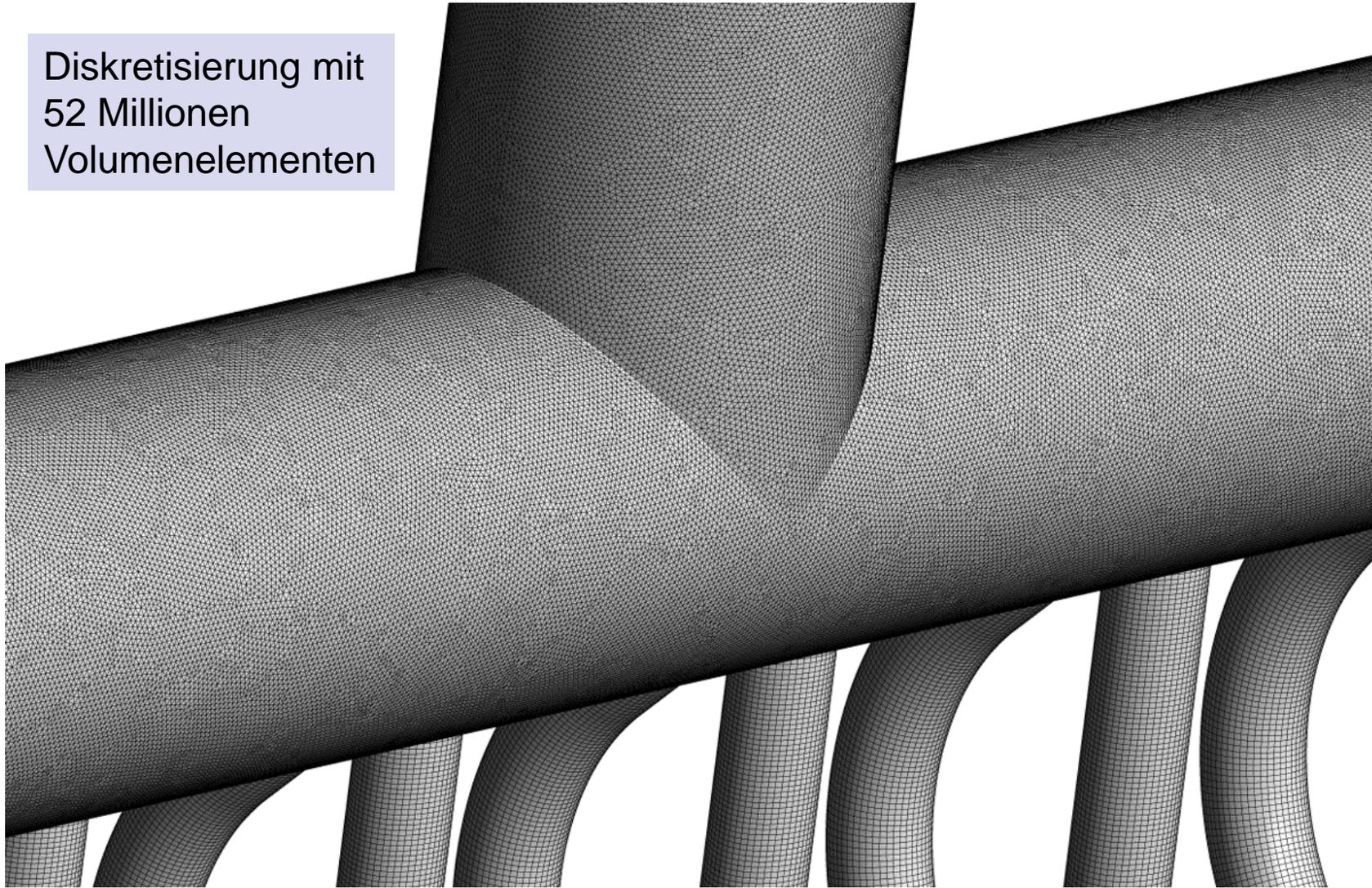
An den Rändern ist die Durchströmung 5% höher als der Mittelwert.

Rechts und links neben dem T-Stück wird die Durchströmung minimal (bei maximaler axialer Geschwindigkeit)

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Membranwand-Überhitzer

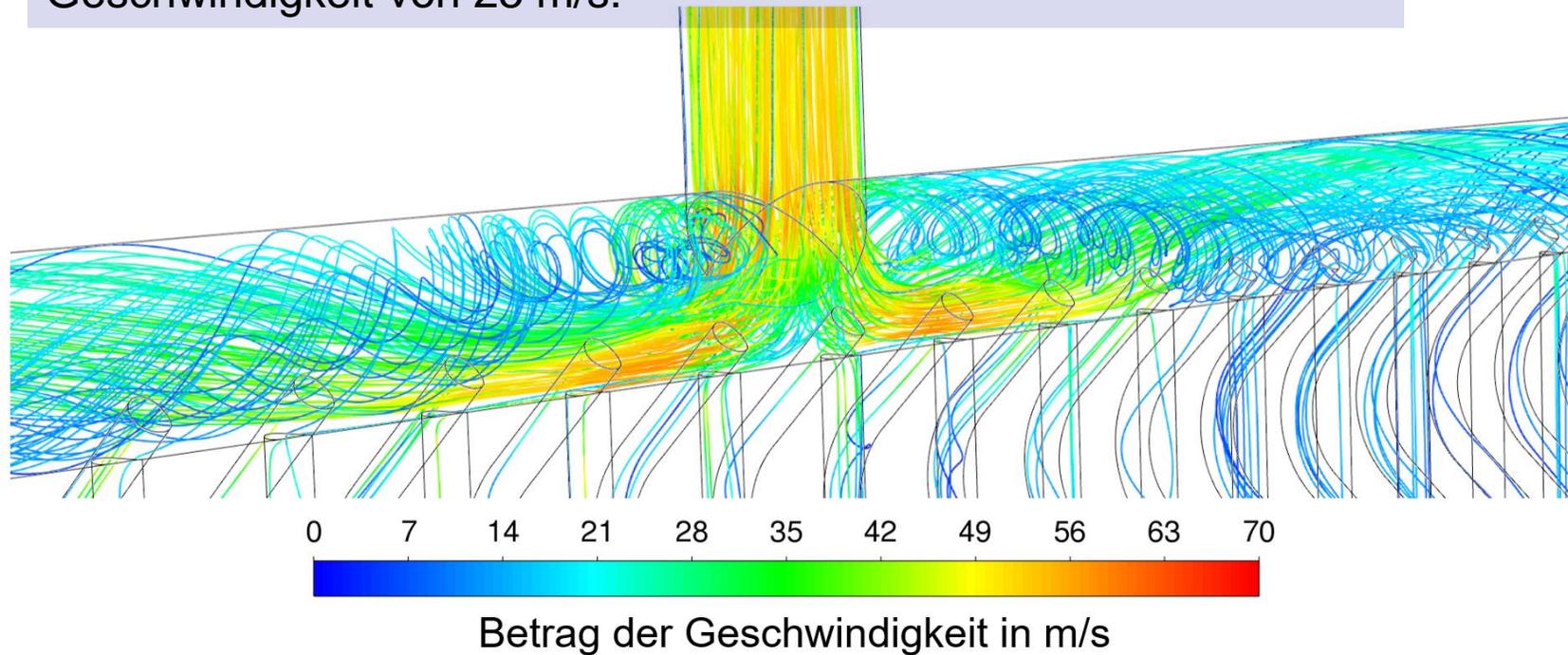
Diskretisierung mit
52 Millionen
Volumenelementen



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

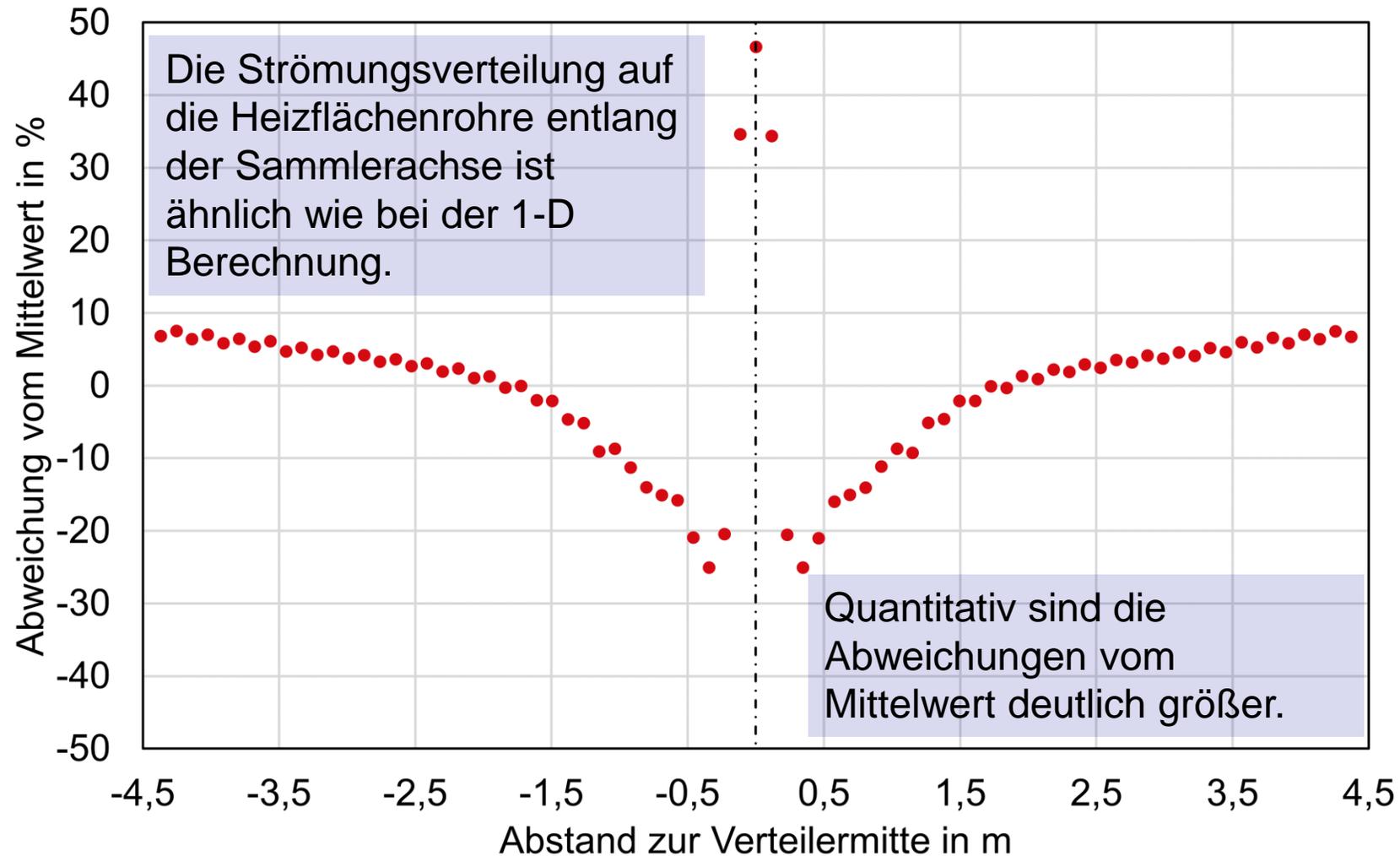
Membranwand-Überhitzer

Im Bereich der Einströmung treten Geschwindigkeiten mit Beträgen von über 50 m/s auf, dem doppelten der mittleren Geschwindigkeit von 25 m/s.



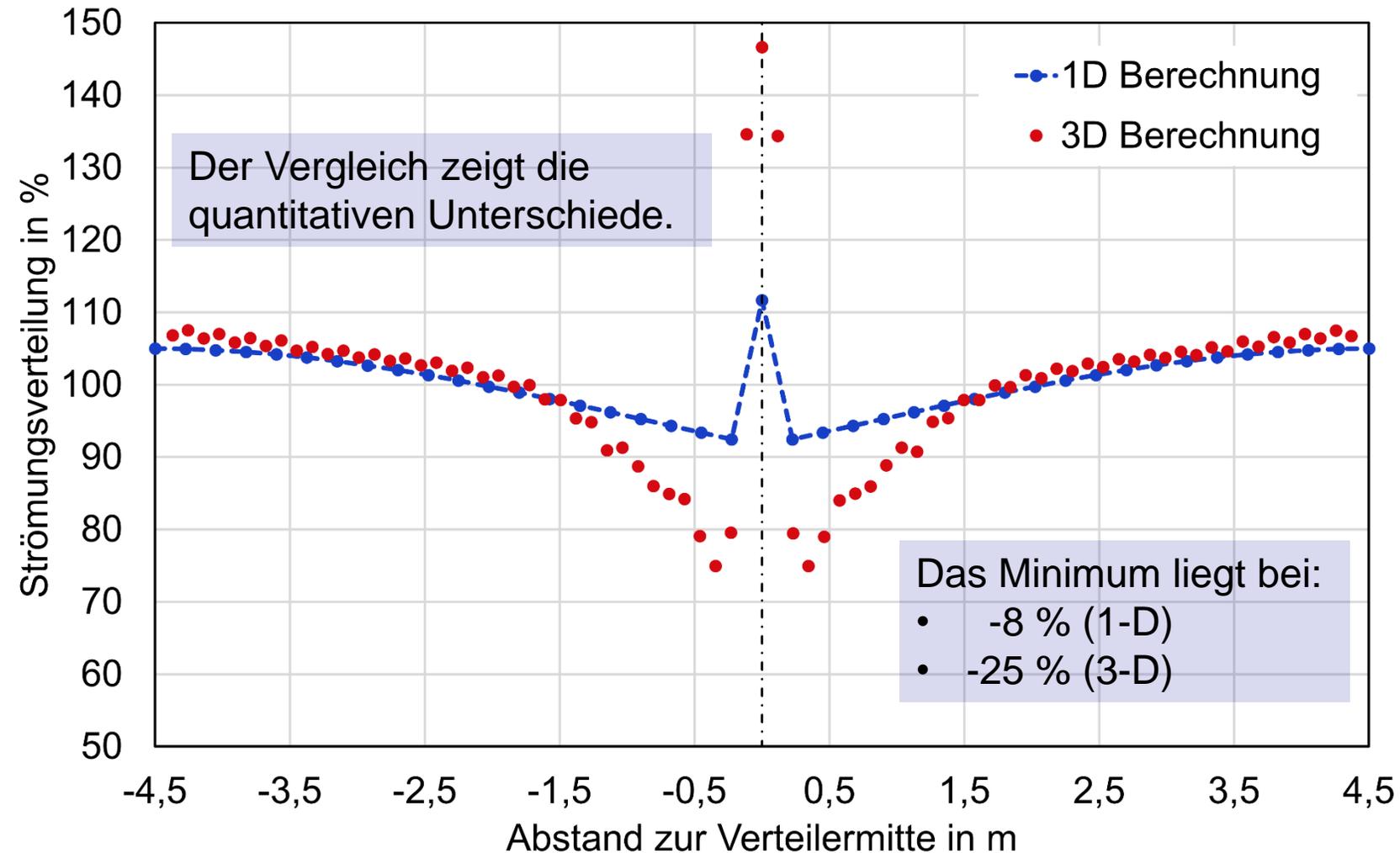
- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Membranwand-Überhitzer



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Membranwand-Überhitzer



- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

$$\text{Bernoulli-Gleichung: } \rho \frac{w_1^2}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \rho \frac{w_2^2}{2} + p_2 + \rho g z_2 + \Delta p_{bl,12}$$

Membranwand-Überhitzer

Erklärung:

- Aus der Einströmleitung prallt ein Strahl mit hohem Impuls auf die Rohrwand des Verteilers und wird um 90° abgelenkt.
- Innerhalb des Verteilers bilden sich oberhalb der umgelenkten Strömung Wirbelzonen aus. In diesen Bereichen ist das Strömungsbild dreidimensional und äußerst komplex.
- Durch die hohen axialen Strömungsgeschwindigkeiten, erfolgt auch eine sehr ungleichmäßige Anströmung jedes einzelnen Überhitzerrohres.

Zusammenfassung:

- 1-D Berechnung ist nicht ausreichend, um die Situation am T-Stück zu bewerten.
- 3-D Berechnung wäre ohne begleitende 1-D Berechnung, mit welcher die Randbedingungen aus einer Betrachtung des Gesamtsystems ermittelt werden, nicht möglich.

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

Keine Konkurrenz zwischen 1-D und 3-D Strömungsmodellen sondern sinnvolle Ergänzung.

Mit 3-D Modellen lässt sich überprüfen, ob der mit der Reduzierung auf ein 1-D Modell verbundene Fehler tolerabel ist.

Die Modellierung von komplexen Gesamtsystemen einschließlich ihrer Vernetzung wird auf absehbare Zeit nur möglich sein, wenn Teile des Systems vereinfacht, z.B. durch poröse Zonen, und nicht durch ihre detaillierte Geometrie dargestellt werden. Um die Eigenschaften der porösen Zonen und weitere Randbedingungen sachgemäß zu definieren, leisten 1-D Modelle wichtige Zuarbeit.

Unabhängig davon, ob eine 1-D oder eine 3-D Berechnung durchgeführt wird, ist die sorgfältige und korrekte Auswahl der Modellparameter und Randbedingungen notwendig.

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

Im Rahmen des Anlagenmonitorings durch Digitale Zwillinge haben verifizierte analytische Modelle, die auf etablierten Berechnungsverfahren beruhen, folgende Vorteile:

- Gestaltungsmöglichkeiten, was und wie gerechnet wird
 - Effizienz
 - Keine Lizenzierung für Fremdsoftware
- ⇒ Technologische und Digitale Souveränität

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Einleitung
- Gekühlte Tragbalken
- Membranwand-Überhitzer
- Zusammenfassung



Vielen Dank für Ihr Interesse!

