



Hochschule Zittau/Görlitz,
FG Techn. Thermodynamik,
Fakultät Maschinewesen,
Zittau



Technische Universität Dresden,
Institut für Energietechnik,
Professur für Thermische Energie-
maschinen und -anlagen, Dresden



Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt,
Institut für Antriebstechnik,
DLR Köln

Numerische Strömungssimulation und Berechnung instationärer Prozesse auf Grundlage einer schnellen und flexiblen Stoffwert-Berechnung mit Spline-Interpolation

Förderung von fünf Projekten im Zeitraum von 2008 bis 2016 durch das SMWK

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar

Bearbeiter: M. Kunick

Förderung von fünf Projekten im Zeitraum von 2008 bis 2016 durch das SMWK

SMWK: 01/2008 - 12/2008

Berechnung von Energieumwandlungsprozessen mit CO₂-Abscheidung auf der Grundlage einer schnellen und flexiblen Stoffwertberechnung mit Spline-Interpolation.
Fördersumme: 38.500 €

SMWK: 01/2009 - 12/2010

Schnelle und flexible Stoffwertberechnung mit Spline-Interpolation für die Modellierung und Optimierung fortschrittlicher Energieumwandlungsprozesse.
Fördersumme: 60.000 €

TU Cottbus: 01/2011 – 12/2011

Berechnung thermodynamischer Stoffdaten für Arbeitsfluide der Energietechnik mit Spline-Interpolation.
Drittmittel: 15.000 €

SMWK: 01/2012 - 12/2012

Konzipierung und Optimierung neuer Energieumwandlungsprozesse auf der Grundlage einer schnellen und flexiblen Stoffwertberechnung mit Spline-Interpolation.
Fördersumme: 30.000 €

Förderung von fünf Projekten im Zeitraum von 2008 bis 2016 durch das SMWK

ESF-Stipendium: 09/2012 - 12/2014

Instationäre Berechnung von Dampfturbinenprozessen auf der Grundlage einer schnellen und flexiblen Stoffwertberechnung mit Spline-Interpolation.

Fördersumme: 44.800 €

SMWK: 02/2013 – 12/2014

Entwicklung einer Guideline als internationalen Standard für die Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von Wasserdampf und Wasser in numerischen Strömungssimulationen mit CFD als Projekt der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS).

Fördersumme: 60.000 €

Aktuell:

SMWK: 08/2015 – 12/2016

Integration entwickelter Spline-Stoffwertalgorithmen in industrielle Anwendersoftware zur numerischen Strömungssimulation (CFD) und zur Modellierung instationärer energietechnischer Prozesse.

Fördersumme: 60.000 €

Numerische Prozesssimulationen – Anforderungen an die Stoffwertberechnung

Numerische Strömungssimulation (CFD)

Optimierung von Kraftwerkskomponenten

Wärmeschaltbild-Berechnung

Auslegung von Kraftwerksanlagen

Echtzeit-Prozessoptimierung

Steuerung von Kraftwerksanlagen



Simulation instationärer Prozesse

Anforderungen an die Stoffwertberechnung

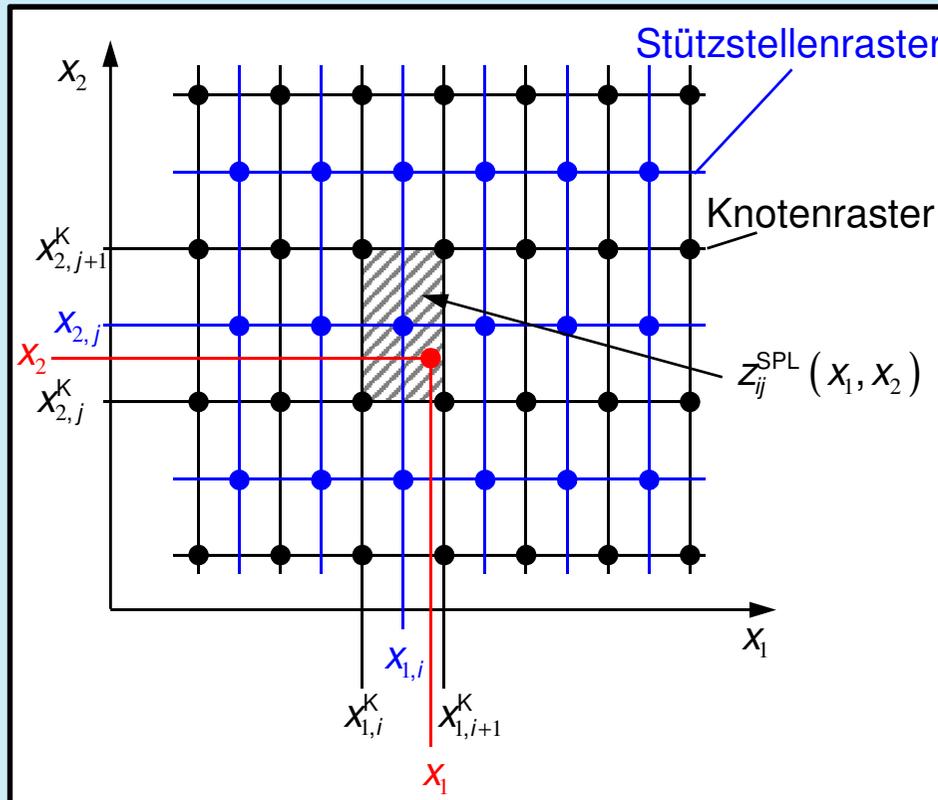
- ⇒ **Hohe Genauigkeit** – vergleichbar mit der Genauigkeit wissenschaftlicher Fundamentalgleichungen.
- ⇒ **Minimale Rechenzeit** – >100 mal schneller als Fundamentalgleichungen.
- ⇒ **Höchstmögliche numerische Konsistenz zwischen Vor- u. Rückwärtsfunktionen.**

$$p_{\text{ber}} = f(v_{\text{geg}}, u_{\text{geg}})$$

$$u_{\text{ber}} = f(p_{\text{ber}}, v_{\text{geg}})$$

Grundlagen des Spline-Basierten Table Look-up Verfahrens (SBTL)

Aufstellen einer Spline-Funktion $z^{\text{SPL}}(x_1, x_2)$ ausgehend von einer Zustandsgl. $z^{\text{EOS}}(x_1, x_2)$:

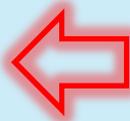


- Generierung eines Stützstellenrasters:
 - Berechnung der Stützstellen mit der zugrundeliegenden Zustandsgleichung: $z_{i,j}(x_{1,i}, x_{2,j}) = z^{\text{EOS}}(x_{1,i}, x_{2,j})$
- Transformation der Variablen z , x_1 und x_2 :
 - Verbesserung der Genauigkeit
 - Umformung des Zustandsbereichs
- Zell-Definition im Knotenraster:
 - Spline-Polynom:

$$z_{ij}^{\text{SPL}}(x_1, x_2) = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 a_{ijkl} (x_1 - x_{1i})^{k-1} (x_2 - x_{2j})^{l-1}$$
 - interpoliert die innere Stützstelle
 - stetige Funktion und erste Ableitungen
- Optimierung für:
 - geforderte Genauigkeit
 - minimale Rechenzeit
 - minimale Datenmengen
- Interpolationstabellen werden für die Stoffwert-Berechnung gespeichert

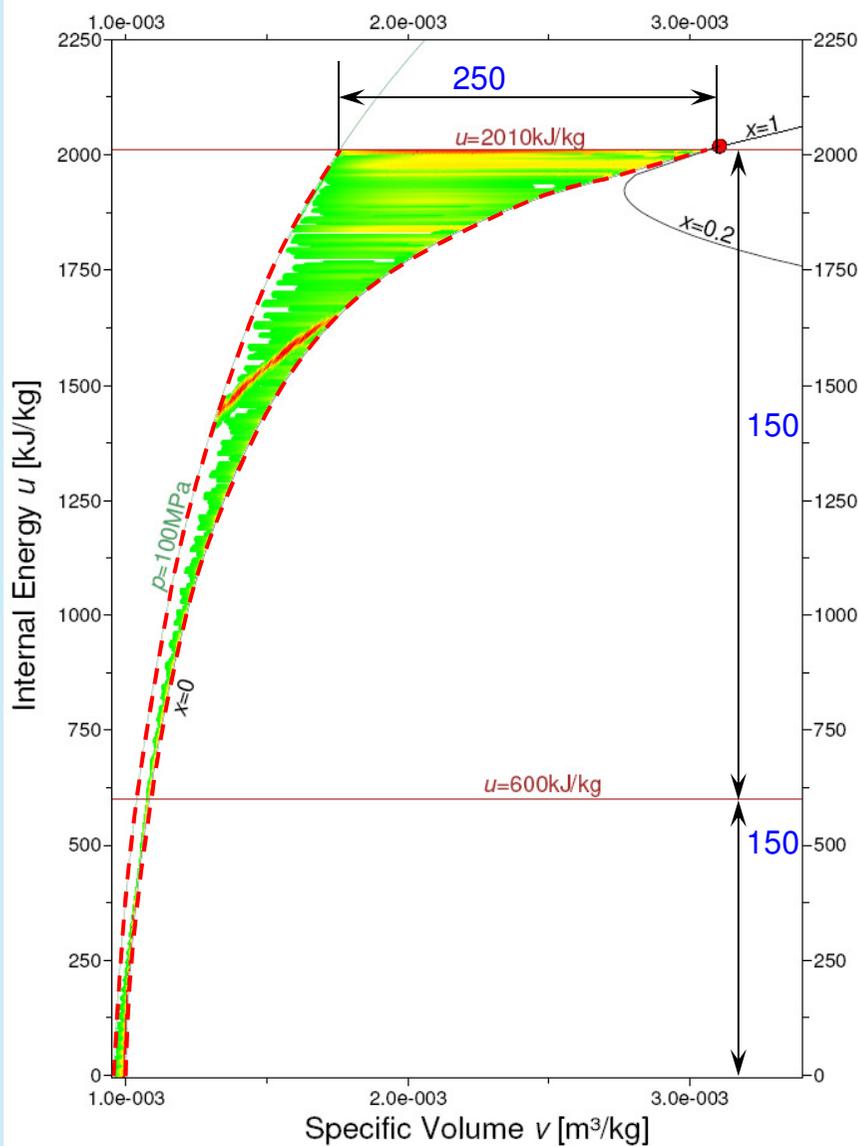
Berechnung zur Laufzeit:

- Transformation von x_1 und x_2
- schnelle Zell-Ermittlung (i,j)
- Auswertung des Spline-Polynoms
- Rücktransformation von z

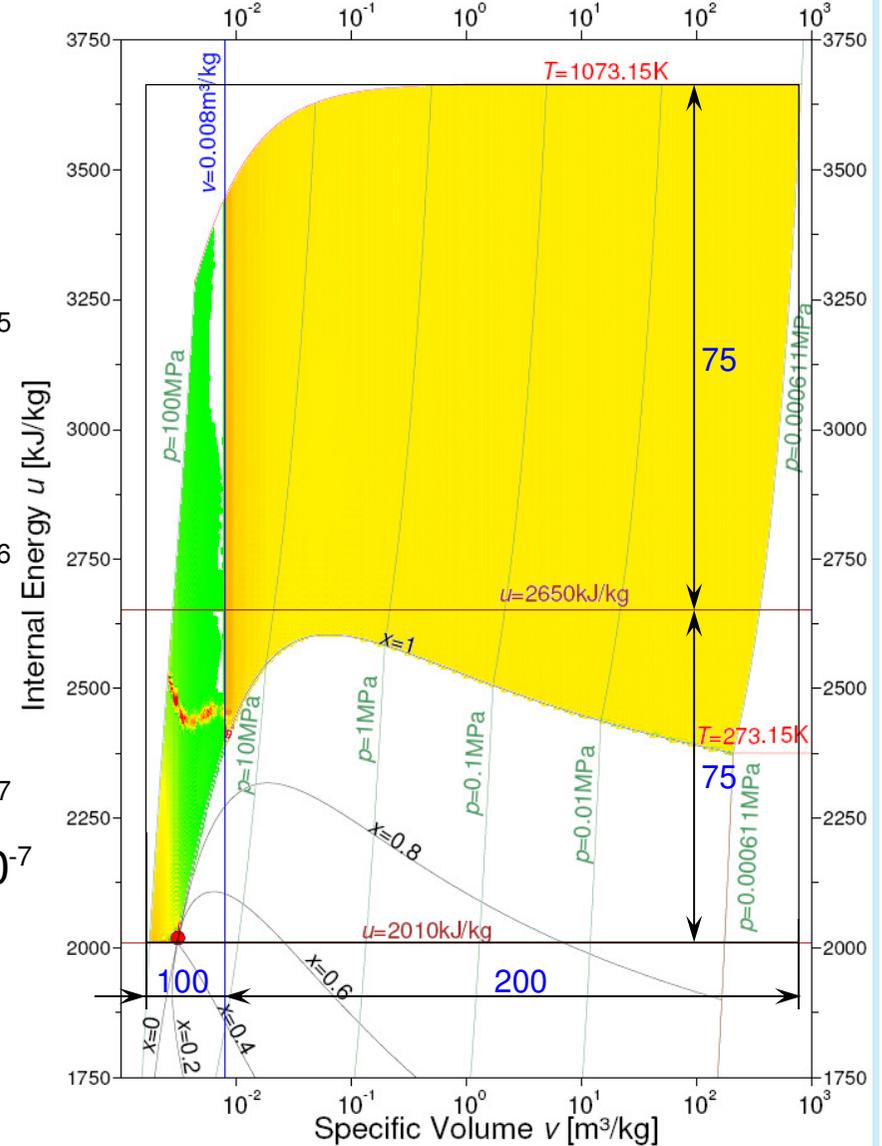


SBTL-Stoffwertfunktionen für Wasser und Wasserdampf von (v,u) – Abweichungen im Vergleich zur IAPWS-IF97

→ Spline-Funktion $p_L(v,u)$:



→ Spline-Funktion $p_G(v,u)$:



Transformationen:

\bar{v} skaliert zwischen $v(100\text{MPa},u)$ und $v'(u)$

$\bar{v} = \ln(v)$

SBTL-Stoffwertfunktionen für Wasser und Wasserdampf von (v,u) – Abweichungen im Vergleich zur IAPWS-IF97

SBTL Funktion		Max. Abweichung (flüss. Phase)	Max. Abweichung (gasf. Phase)
$p(v,u)$	$p \leq 2.5 \text{ MPa}$	$ \Delta p / p < 0.12 \%$	$ \Delta p / p < 0.001 \%$
	$p > 2.5 \text{ MPa}$	$ \Delta p < 0.6 \text{ kPa}$	
$T(v,u)$		$ \Delta T < 1 \text{ mK}$	$ \Delta T < 1 \text{ mK}$
$s(v,u)$		$ \Delta s < 10^{-6} \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$ \Delta s < 10^{-6} \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$w(v,u)$		$ \Delta w / w < 0.001 \%$	$ \Delta w / w < 0.001 \%$
$\eta(v,u)$		$ \Delta \eta / \eta < 0.001 \%$	$ \Delta \eta / \eta < 0.001 \%$



- **SBTL Stoffwertfunktionen können den Industriestandard IAPWS-IF97 mit hoher Genauigkeit wiedergeben.**
- **Die Ergebnisse der Prozesssimulation unter Nutzung der SBTL Methode bleiben gegenüber der direkten Verwendung der IAPWS-IF97 praktisch unverändert.**

SBTL-Stoffwertfunktionen für Wasser und Wasserdampf von (v,u) – Rechenzeiten im Vergleich zur IAPWS-IF97

Computing Time Ratio $CTR = \frac{\text{Rechenzeit der IAPWS - IF97 Funktion}}{\text{Rechenzeit der SBTL Funktion}}$

SBTL Funktion	IAPWS-IF97 Region				
	1 (flüssig)	2 (gasf.)	3 (krit. Gebiet)	4 (Nassdampf)	5 (Hochtemp.)
$p(v,u)$	130	271	161	19.6	470
$T(v,u)$	161	250	158	20.6	442
$s(v,u)$	164	261	160	17.8	449
$w(v,u)$	199	310	234	-	471
$\eta(v,u)$	197	309	239	-	-
$u(p,v)$	2.0	6.4	2.8	5.6	3.2
$v(u,s)$	43.5	66.4	78.8	16.2	134

➤ **Reduzierung der Rechenzeiten um Faktoren von bis zu 300 (500)!**

Processor: Intel Xeon – 3.2GHz
Operating system: Windows7 (32 Bit)
Compiler: Intel Composer XE 2011

➤ **Rechenzeiten der Bereichsbestimmung sind in diesen Werten berücksichtigt.**

FluidSplines – Software zur Erstellung von Spline-basierten Stoffwertfunktionen

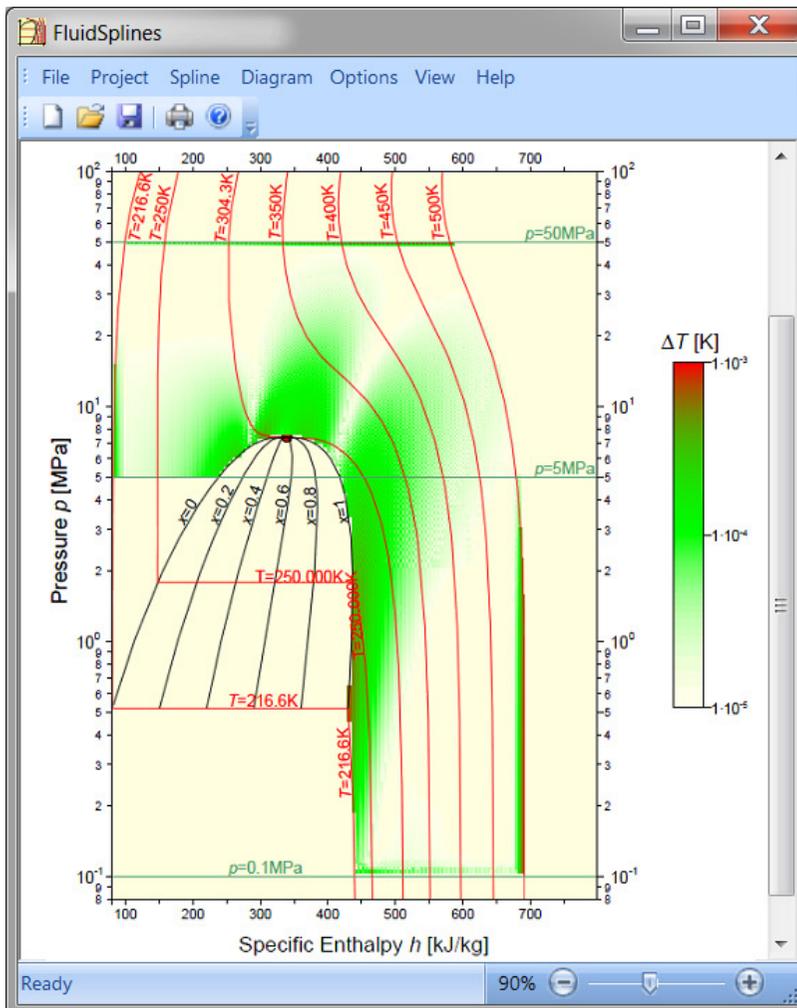
FluidSplines

ein Software-Werkzeug zur Erstellung von Spline-basierten Stoffwertfunktionen

Thermodynamische Stoffdaten:
(Datenbasis)

Stoffwertbibliotheken der
HS Zittau/Görlitz

REFPROP®



Generierung von Spline-Funktionen für:

- vorgegebenen Gültigkeitsbereich
- geforderte Genauigkeit

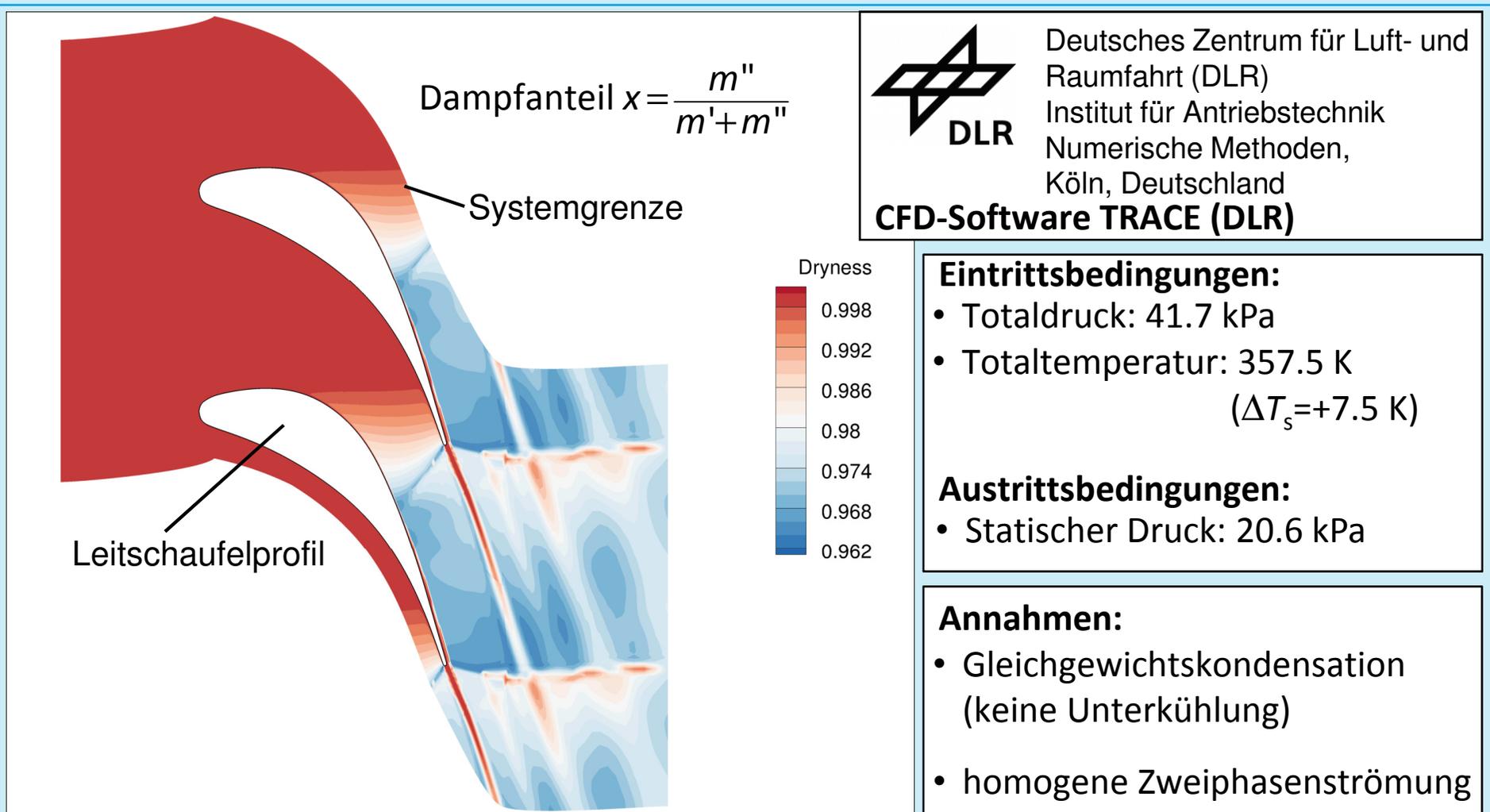
Weitere Funktionen:

- Generierung inverser Spline-Funktionen
- Genauigkeitsanalyse
- Bestimmung der Rechenzeit

Ausgabe:

- Rechenzeit-optimierte Quelltexte
- stat./dyn. Bibliotheken
- Dokumentation hinsichtlich Genauigkeit und Rechenzeit

Anwendung der SBTL Methode in CFD – Kondensierende Strömung in einer Dampfturbinenstufe



- **Durch Anwendung der SBTL Methode werden die Rechenzeiten im Vergleich zur Simulation mit dem IAPWS-IF97 Standard um das 6 – 10-fache reduziert.**
- **Im Vergleich zum Modell des idealen Gases werden die Rechenzeiten lediglich um den Faktor 1.4 erhöht.**

Weitere Anwendungen der SBTL Methode/ Drittmittleinwerbungen

➤ **RELAP-7** – Idaho National Laboratory (INL)

Weltweit verwendete Software zur Sicherheitsanalyse in Kernenergieanlagen

- SBTL Funktionen von (v,u) basierend auf IAPWS-95 (inkl. metastabile Zustände)
- Drittmittleinwerbung: 30.000 € (2015)

➤ **DYNAPLANT** – SIEMENS

Simulation instationärer Prozesse in Kraftwerksanlagen

- SBTL Funktionen von (v,h) basierend auf IAPWS-IF97
- Drittmittleinwerbung: 8.000 € (2015)

➤ **KRAWAL** – SIEMENS

Wärmeschaltbild-Berechnungssoftware zur Kraftwerksauslegung

- SBTL Funktionen von (p,h) basierend auf IAPWS-IF97
- Drittmittleinwerbung: 15.000 € (2015)

➤ **EBSILON Professional** – STEAG Energy Services

Kommerzielle Wärmeschaltbild-Berechnungssoftware

- SBTL Funktionen von (p,h) basierend auf IAPWS-IF97
- Drittmittleinwerbung: 15.000 € (2015)

Vorträge auf internationalen Konferenzen (28)

- **ASME Turbo Expo 2015**, Montreal, Canada, 15.06.2015
- **19th Symposium on Thermophysical Properties**, Boulder, CO, USA, 25.06.2015
- **IAPWS Annual Meeting 2015**, Stockholm, 28.06.2015
- **46. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2014**, Dresden, 15.10.2014
- **EBSILON Anwendertagung der STEAG Energy Services**, Wiesbaden, 26.11.2013
- **Thermodynamik-Kolloquium des VDI und der DECHEMA**, Hamburg, 08.10.2013
- **16th International Conference on the Properties of Water and Steam**, London, 01.-05.06.2013
- **2nd Symp. on Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics**, Rostock, 27.03.2013

Veröffentlichungen

Kunick, M.; Kretzschmar, H.-J.; Gampe, U.:

Fast Calculation of Thermodynamic Properties of Water and Steam in Process Modelling using Spline Interpolation.

In: Water, Steam, and Aqueous Solutions - Advances in Science and Technology for Power Generation, **Proceedings of the 15th International Conference on the Properties of Water and Steam**, Ed. by R. Span and I. Weber, VDI GET, ISBN 978-3-931384-64-7 (2008)

Kunick, M.; Kretzschmar, H.-J.; Gampe, U.; di Mare, F.:

Simulation instationärer Prozesse und CFD in Dampfturbinen mithilfe eines neuen Spline-basierten Stoffwert-Berechnungsverfahrens.

In: **Kraftwerkstechnik 2014: Strategien, Anlagentechnik und Betrieb**, ISBN 978-3-934409 (2014)

Kunick, M.; Kretzschmar, H.-J.; di Mare, F.; Gampe, U.:

CFD Analysis of Steam Turbines with the IAPWS Standard on the Spline-Based Table Look-up Method (SBTL) for the Fast Calculation of Real Fluid Properties.

In: **Proceedings of ASME Turbo Expo 2015**: Turbine Technical Conference and Exposition. GT2015, Montreal, Canada, ISBN: 978-0-7918-5679-6 (2015)

Veröffentlichungen

Kunick, M.:

Fast Calculation of Thermophysical Properties in Extensive Process Simulations with the Spline-Based Table Look-Up Method (STBL).

VDI Fortschritt-Berichte – Dissertation, in Bearbeitung

Kunick, M.; Kretzschmar, H.-J.; Gampe, U.; di Mare, F.; Hrubý, J.; Duška, M.; Vinš, V.; Singh, A.; Novi, A.; Miyagawa, K.; Weber, I.; Pawellek, R.; Blangetti, F.; Friend, D. G.; Harvey, A.H.:

Fast Calculation of Steam and Water Properties with the Spline-Based Table Look-Up Method (SBTL).

Int. J. Eng. Gas Turbines & Power, in Vorbereitung

Weitere Vorträge und Veröffentlichungen:

www.thermodynamik-zittau.de

**International verbindlicher Standard der
International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)**

The International Association for the Properties of Water and Steam

Stockholm, Sweden

July 2015

**Guideline on the Fast Calculation of Steam and Water Properties with the
Spline-Based Table Look-Up Method (SBTL)**

© 2015 International Association for the Properties of Water and Steam
Publication in whole or in part is allowed in all countries provided that attribution is given to the
International Association for the Properties of Water and Steam

President:

Dr. David Guzonas

Canadian Nuclear Laboratories

Chalk River, Ontario, Canada

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!