



*Entwicklung eines Verfahrens zur schnellen und  
genauen Stoffwertberechnung mit  
Spline-Interpolation für die Simulation  
fortschrittlicher energietechnischer Prozesse*



**Entwicklung eines Verfahrens zur schnellen und genauen  
Stoffwertberechnung mit Spline-Interpolation für die Simulation  
fortschrittlicher energietechnischer Prozesse**

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

Mitarbeiter: Dr.-Ing. M. Kunick

**Projekt: 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).

**Projekt: 08/2015 – 12/2016**

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

**Projekt: 02/2016 – 06/2018**

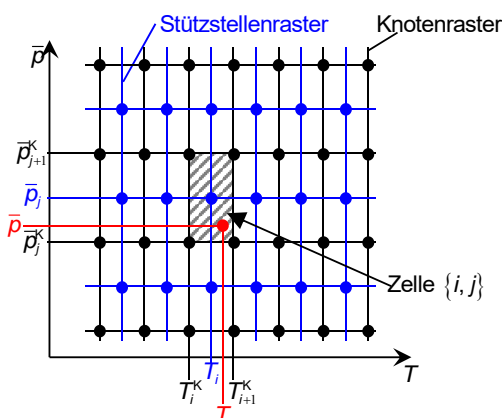
Simulation fortschrittlicher energietechnischer Prozesse mit fluiden Stoffgemischen auf Grundlage einer schnellen und genauen Stoffwertberechnung mit Spline-Interpolation.

## Projektpartner

- International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)
  - Project „CFD Steam Property Formulation“
- Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt (DLR), Köln
  - Simulation von Dampf und Gasturbinen mit der CFD-Software TRACE
- Siemens Power and Gas, Erlangen
  - Simulation von energietechnischen Anlagen mit der Inhaus-Software KRAWAL und DYNAPLANT
- STEAG Energy Services, Essen/Zwingenberg
  - Simulation von energietechnischen Anlagen mit der international führenden Software EBSILON Professional

## Spline-Based Table Look-up Method (SBTL-Verfahren)

Beispiel: Funktion  $h(p, T)$



- 1) Berechnung des Stützdatenrasters mit genauer Zustandsgleichung, z. B. IAPWS-IF97 für Wasser
- 2) Variablentransformationen (z.B.  $p \rightarrow \bar{p}$ ):
- 3) Berechnung Koeffizienten  $a_{ijkl}$  der bi-quadratischen Splinepolynome unter Einbeziehung aller Zellen:

$$h_{\{i,j\}}(\bar{p}, T) = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 a_{ijkl} (\bar{p} - \bar{p}_i)^{k-1} (T - T_j)^{l-1}$$

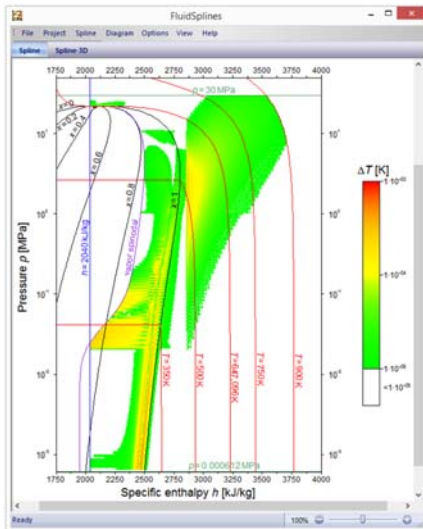
Bei Anwendung in der Prozesssimulation:

- Suchen der betreffenden Zelle für gegebene  $(p, T)$
- Berechnung des Spline-Polynoms.

Die entwickelten SBTL-Funktionen von sind im Vergleich zur Berechnung mit dem Industriestandard IAPWS-IF97 für Wasser und Wasserdampf

- je nach Funktion 30 bis 270 mal schneller
- und geben die Funktionen mit einer Genauigkeit von 10 bis 100 ppm wieder.

## Software FluidSplines



### Generierung von SBTL-Funktionen für:

- gewünschtes Fluid
- gewünschten Gültigkeitsbereich
- geforderte Genauigkeit

### Weitere Funktionen:

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

## Ergebnisse

- Durch die Integration des SBTL-Verfahrens in die CFD Software TRACE wurde deren Rechenzeit um den Faktor 10 reduziert.
- Mit dem SBTL-Verfahren werden die Rechenzeiten zur Auslegung von energietechnischen Anlagen mit den Programmen KRAWAL und EBSILON halbiert.
- Auf Grund der hohen Genauigkeit der SBTL-Funktionen sind die Simulationsergebnisse praktisch identisch zu denen, die mit den aktuellen Gleichungen der IAPWS berechnet werden.
- Das entwickelte Berechnungsverfahren wurde 2015 als „IAPWS Guideline on the Fast Calculation of Steam and Water Properties with the Spline-Based Table Look-Up Method (SBTL)“ zum internationaler Standard erhoben.
- Veröffentlichung als VDI-Fortschrittsbericht Nr. 618 in der Reihe 6 (2018): „Fast Calculation on Thermophysical Properties in Extensive Process Simulations with the Spline-Based Table Look-Up Method (SBTL)“
- Veröffentlichung in der Zeitschrift Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: „The IAPWS Guideline on the Fast Calculation of Steam and Water Properties with the Spline-Based Table Look-Up Method (SBTL)“ - eingereicht



## Folgeprojekte

- BMWi in Kooperation mit der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
  - Schnelle Berechnung realer Stoffeigenschaften im Programmsystem AC<sup>2</sup> nach den neuesten Standards der IAPWS (Projekt SBRS – AC2)
- Idaho National Laboratory, Idaho Falls
  - Integration der SBTL in das internationalen Code zur Reaktorsicherheit RELAP
- Karlsruher Institut für Technologie KIT, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Karlsruhe
  - Integration der SBTL in die Reaktorsicherheits-Software SubChanFlow und TWOPORFLOW
- Ruhr-Universität Bochum, Chair of Thermal Turbomachines and Aeroengines, Bochum
  - Nutzung der SBTL in der Simulation von Dampf und Gasturbinen mit CFD
- Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen
  - Nutzung der SBTL in der Simulation von Energiespeichern mit Druckluft