

Zur Erzeugung zweidimensionaler Zustandsdiagramme für reine Fluide – ein Beitrag zur automatisierten Bereitstellung von visuellen Arbeitshilfen für den Energietechniker

1. Einleitung

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Personalcomputern und Displays am Arbeitsplatz, gekoppelt an Rechner aller Größenordnungen, verändern sich auch die Arbeitsmittel des Wärmetechnikers grundlegend. Das heißt, die Arbeitsweise – rechnerische Verknüpfung von Informationen aus Tabellen und Diagrammen mit dem Taschenrechner – wird durch einen direkten Dialog am Display qualitativ entscheidend verändert.

Während Tabellen nahezu vollständig durch Dialogprogramme mit Zugang zu den abgespeicherten Daten bzw. Berechnungsgleichungen ersetzt werden können, kommt dem Diagramm eine neue Aufgabe zu. Sie ist darin begründet, daß mit der zunehmenden Übernahme von Rechen- und Logikprozessen durch schnell verfügbare Computer und dem damit einhergehenden Massenanstieg von Daten die Gefahr wächst, mögliche Vereinfachungen, Gesamtzusammenhänge sowie die Kritik an den „selbstverständlich“ berechneten Ergebnissen aus den Augen zu verlieren. Das bisher bei herkömmlichen Rechnungen entstandene Gefühl für die Größenordnung, den Trend und die Sensibilität der Ergebnisse ist kaum durch das alleinige Studieren der sofort vom Computer berechneten Zahlenwerte zu ersetzen. Vielmehr müssen deren qualitative Eigenschaften visuell aufbereitet, d. h. in graphischer Form, schnell und leicht in Übersichtsdiagrammen auf Plottern oder entsprechenden Bildschirmen dargestellt werden können.

An die zugehörige Software sind folgende Forderungen zu stellen:

- schnelle und unkomplizierte Herstellung der Diagramme,
- Darstellung beliebiger Größen mit auch bisher nicht üblichen Parameterkombinationen,
- Realisierung von Vergrößerungen bzw. Ausschnitten,
- Möglichkeit der Nutzung verschiedener Koordinatenachsenteilungen,
- gleichzeitige Zeichnung von Linien mehrerer Stoffe bzw. mehrerer Zustandsgleichungen für qualitative Vergleichszwecke.

Die Erarbeitung eines universellen Programms zur Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme unabhängig vom zu zeichnenden Stoff stellt im Hinblick auf die immer wieder mit geringem Aufwand herstellbaren Diagramme einen, wenn auch hohen, so doch vertretbaren einmaligen Aufwand dar. Im Wissenschaftsbereich Thermodynamik der TU Dresden wurde 1985 ein derartiges Programmsystem zur Berechnung und Zeichnung thermodynamischer Zustandsdiagramme in zweidimensionaler Darstellung fertiggestellt.

Im folgenden wird über die endgültige Fassung des bereits in [1] vorgestellten Programms berichtet. Der eingeschlagene Lösungsweg weist einen hohen Verallgemeinerungsgrad bezüglich Koordinaten, Isolinien, Stoff, Genauigkeit und Anwendbarkeit auf. Falls es sich um Stoffe handelt,

für die der Nutzer die Zustandsgleichungen programmiert vorliegen hat bzw. die Bestandteil des Stoffwert-Programmpakets des WB Thermodynamik sind, können beliebige Diagramme mit nur wenigen Eingabedaten gezeichnet werden. Darstellbar sind aber auch zum Beispiel Verläufe von Versuchsdaten.

Die hohe Zeichengenauigkeit des verwendeten Plotters DIGIGRAF gestattet, sowohl Übersichts- als auch Ablese-diagramme zu erzeugen.

2. Lösungswege zur Erzeugung von Zustandsdiagrammen

2.1. Übersicht über Verfahren

Die Auswahl der geeigneten Vorgehensweise hängt primär von der Aufgabenstellung für das zu zeichnende Diagramm ab.

Sind nur berechnete Werte darzustellen, so liegt der einfachste Fall vor. Ihre Verbindung zu geschlossenen Linienzügen erfordert entweder die Berechnung von noch mehr Punkten oder eine Interpolation aus den vorhandenen.²

Eine andere Problemstellung liegt vor, falls aus berechneten Werten einer Größe qualitativ andere Verläufe, z. B. Isolinien dieser Größe, berechnet und gezeichnet werden sollen. In diesem Fall müssen ausgehend von den geforderten Isolinienwerten die zugehörigen Koordinaten alternativ

1. iterativ aus den Berechnungsgleichungen für die Isoliniengröße,
 2. mit Hilfe von Umkehrbeziehungen,
 3. über Interpolation
- ermittelt werden. Der vorliegende Beitrag wendet sich der an dritter Stelle genannten Problemstellung zu.

2.2. Eindimensionale Darstellung

Für die Darstellung der funktionellen Abhängigkeit einer Größe z von nur einer anderen x genügt eine eindimensionale Darstellung. Üblich sind sogenannte Balken- oder Liniendiagramme sowie z,x -Diagramme mit Verläufen $z = f(x)$. Letztere kommen für thermophysikalische Funktionen zur Anwendung. Läßt sich z direkt als Funktion von x oder iterativ aus einer impliziten Abhängigkeit ermitteln, so wären prinzipiell beliebig viele Punkte für die Zeichnung berechenbar. Beim Vorliegen einer begrenzten Anzahl $z.B.$ von Versuchspunkten kann der Verlauf durch eine geeignete Interpolation wie die Spline-Interpolation (s. z. B. [2]) vervollständigt werden.

In diesem Beitrag findet aufgrund der Problemstellung die eindimensionale Darstellung lediglich beim Zeichnen der Grenzkurven implizit Berücksichtigung.

2.3. Zweidimensionale Darstellung

Eine Möglichkeit, Funktionen zweier Veränderlicher $z = f(x, y)$ graphisch zu veranschaulichen, besteht in einer Darstellung von Isolinien $z = \text{const.}$ in einem y,z -Diagramm.³ Thermophysikalische Zustandsfunktionen, für die maximal eine Abhängigkeit von zwei Größen vorliegt, werden i. allg. in solchen Diagrammen, auch für Ablesezwecke, angeboten [3], [4]. Ihre Erzeugung ist, wie dieser Beitrag

² Natürlich können die vorhandenen Punkte auch direkt zu einem Polygonzug verbunden werden.

³ Solche Diagramme entsprechen der sogenannten Höhenlinien-darstellung.

¹ Dipl.-Ing. Dietmar Rüger, Institut für Energetik, Bereich Dresden, Dr.-Ing. Hans-Joachim Kretzschmar, Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf, Bereich Reaktorphysik, und Dr.-Ing. Jochen Klinger, Technische Universität Dresden, Sektion Energieumwandlung

zeigt, recht kompliziert, da sich nur in den seltensten Fällen eine Koordinatengröße analytisch aus der anderen und der Isoliniengröße berechnen läßt (z. B. in [5] gegeben). Eine iterative Berechnung erfordert die uneingeschränkte Konvergenz im gesamten zu zeichnenden Bereich. Soll zum Beispiel ein h,s -Diagramm mit Linien $v = \text{const.}$ gezeichnet werden, und es liegen Berechnungsgleichungen $v,s,h = f(p,T)$ vor, so müßte iterativ die Abhängigkeit $h = f(v,s)$ realisiert werden. Das heißt, es sind p und T zunächst zweidimensional aus v und s zu iterieren, und anschließend ist $h = f(p,T)$ zu berechnen. Unüberschaubar werden aber die zu bewältigenden Iterationen, falls Transportgrößen oder thermodynamische Differentialquotienten beteiligt sind. Es ist offensichtlich, daß die Zielstellung des vorliegenden Beitrags, ein universelles System für beliebige Diagramme zu schaffen, auf diesem Weg nur mit größten Schwierigkeiten zu erfüllen wäre. Einen Ausweg stellt die Interpolation der Koordinaten für die gesuchten Isolinien dar. Im zitierten Beispiel werden als Ausgangsdaten v,s und h in einem p,T -Raster berechnet und daraus die Koordinatenwerte h und s für vorgegebene Isolinienwerte von v interpoliert.

2.4. Dreidimensionale Darstellung

Im zunehmenden Maß setzen sich aufgrund verfügbarer moderner Zeichensoftware für qualitative Veranschaulichungen von Funktionen zweier Veränderlicher $z = f(x,y)$ auch räumliche Ansichten durch. Üblich ist die Darstellung in einem perspektivischen z,y,x -Diagramm, wobei $x = \text{const.}$ und $y = \text{const.}$ Linien die Lage der Fläche z im Raum beschreiben. Thermophysikalische Größen werden, wie in [6], meist als Flächen über der p,T -Ebene dargestellt. Die die Fläche beschreibenden Isobaren und Isothermen werden dabei mit der Spline-Interpolation aus einer bestimmten Anzahl berechneter Daten vervollständigt. Nicht durchgesetzt hat sich für thermophysikalische Zustandsdiagramme demgegenüber die räumliche Darstellung von Isolinien $z = \text{const.}$ (Höhenlinien). Ihre weitaus kompliziertere Berechnung müßte, wie im Abschnitt 2.3. erläutert, vorgenommen werden.

Ergänzt sei noch, daß die räumliche Ansicht auch die Möglichkeit bietet, Funktionen mit drei Veränderlichen darzustellen. Die zu veranschaulichende Größe w wäre in der Form von Isolinien mit den Koordinaten x,y und z zeichnerbar.

Eine Weiterführung der Arbeiten am WB Thermodynamik der TU Dresden erfolgt mit dem Ziel, die zweidimensionalen Diagramme mit Isolinien durch räumliche Darstellung zu ergänzen. Gegenwärtig jedoch überwiegt noch die Nachfrage der Praxispartner nach konventionellen zweidimensionalen Diagrammen mit Isolinien für Ablesezwecke.

3. Erzeugung zweidimensionaler Zustandsdiagramme mit Linien konstanter physikalischer Größe

3.1. Grobstruktur des Programmsystems

Das entwickelte Programmsystem setzt sich aus den drei Teilen

- Berechnung der Ausgangsdatensätze,
- Interpolation und Sortierung der Isoliniendaten,
- Anlegen eines Zeichenarchivs

zusammen (Bild 1). Jeder Abschnitt umfaßt zwei separate Hauptprogramme getrennt für Dialog- und Stapelbetrieb. Eine Abarbeitung in einem Zuge ist jedoch ebenfalls möglich.

Die Ausgangs-DATENBERECHNUNG wird vom Unterprogramm DABERE, aufgerufen durch die Hauptprogramme DABDIA oder DABSTA, ausgeführt. Nach noch zu be-

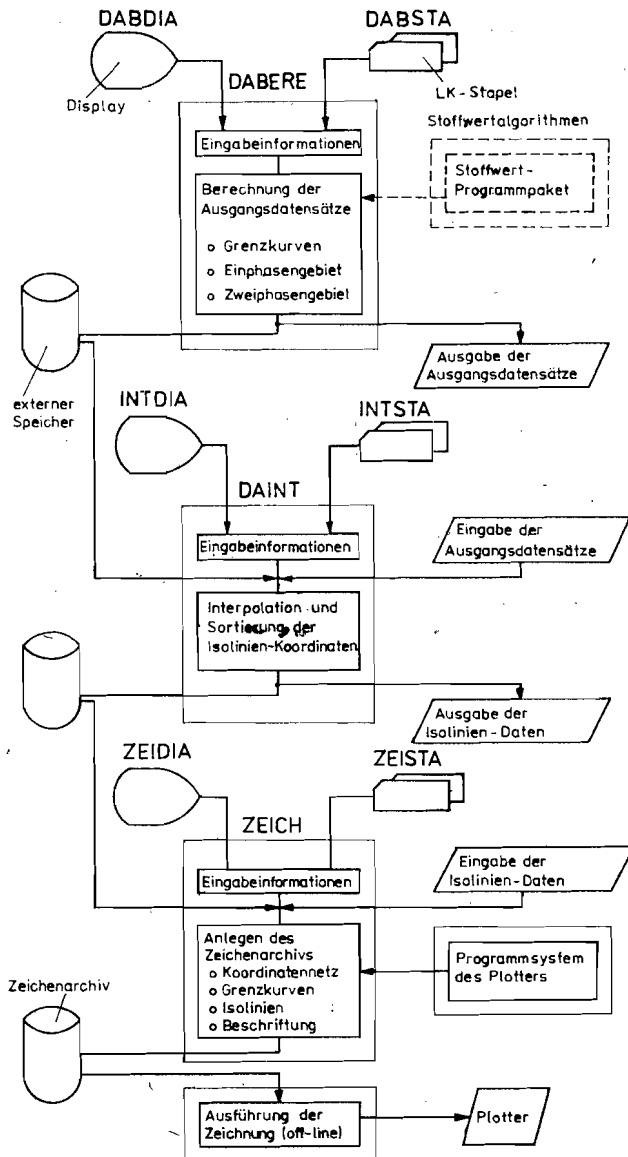


Bild 1. Verwirklichtes Prinzip der Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme

schreibenden Eingabeinformationen werden die Ausgangsdatensätze getrennt für die Grenzkurven, das Einphasen- und Zweiphasengebiet mit Hilfe von Stoffwert-Unterprogrammen berechnet und extern zwischengespeichert. Sind für die Ermittlung der Ausgangsdaten keine Algorithmen vorhanden, wie beispielsweise bei Meß- oder Tabellenwerten, so besteht auch die Möglichkeit, sie direkt einzulesen. Jedoch steht für die meisten in der Energietechnik eingesetzten reinen Arbeitsmedien, in Tabelle 1 zusammengestellt, im WB Thermodynamik ein Stoffwert-Programmpaket [7] und [8] zur Berechnung der wichtigsten thermophysikalischen Zustandsgrößen gemäß Tabelle 2 zur Verfügung. In den weiteren Ausführungen wird vom Vorhandensein solcher Unterprogramme, die die für Koordinaten und Isolinien benötigten Größen als Funktion von Druck, Temperatur und Dampfanteil berechnen können, ausgegangen.

Aus den extern vorliegenden Ausgangsdaten werden nun im UP DAINT (DATenINTERpolation) die zu den gewünschten Isolinien gehörenden Koordinaten interpoliert und in der für die Zeichnung notwendigen Reihenfolge sortiert. Als Ergebnis liegen, nach Isolinienarten und Zustandsbereichen getrennt, sortierte Datenreihen vor, die wiederum extern abgespeichert werden.

Tabelle 3. Ausgangsdatensätze für Grenzkurven, Ein- und Zweiphasengebiet auf externem Speicher (Ausschnitt)

Vorgegebene Basisdaten			Extern abgespeicherte Ausgangsdaten										
Nr. ¹	Temperatur	Druck	Dampfanteil ²	x-Koordinaten	y-Koordinaten	Isolinienwerte				Temperatur	Druck bzw. Dampfanteil	Zustandsbereich	
						z _I	z _{II}	z _{III}	z _{IV}				
Grenzkurven													
1g	T ₁	p _d (T ₁)	1	x _{1g}	y _{1g}	z _{11g}	.	.	z _{IV1g}	T ₁	p _d (T ₁)	Taulinie	} Taulinie
krit	T _{krit}	p _{krit}	1	x _{krit}	y _{krit}	z _{11krit}	.	.	z _{IVkrit}	T _{krit}	p _{krit}	krit. Zustand	
1f	T ₁	p _d (T ₁)	0	x _{1f}	y _{1f}	z _{11f}	.	.	z _{IV1f}	T ₁	p _d (T ₁)	Siedelinie	} Siedelinie
krit	T _{krit}	p _{krit}	0	x _{krit}	y _{krit}	z _{11krit}	.	.	z _{IVkrit}	T _{krit}	p _{krit}	krit. Zustand	
Einphasengebiet													
11	T ₁	p ₁	-1	x ₁₁	y ₁₁	z ₁₁₁	.	.	z _{IV11}	T ₁	p ₁	Dampf	} Gas- und Flüssigkeitsgebiet
1g	T ₁	p _d (T ₁)	1	x _{1g}	y _{1g}	z _{11g}	.	.	z _{IV1g}	T ₁	p _d (T ₁)	Taulinie	
1f	T ₁	p _d (T ₁)	0	x _{1f}	y _{1f}	z _{11f}	.	.	z _{IV1f}	T ₁	p _d (T ₁)	Siedelinie	
12	T ₁	p ₂	-1	x ₁₂	y ₁₂	z ₁₁₂	.	.	z _{IV12}	T ₁	p ₂	Flüssigkeit	
13	T ₁	p ₃	-1	x ₁₃	y ₁₃	z ₁₁₃	.	.	z _{IV13}	T ₁	p ₃	Flüssigkeit	
21	T ₂	p ₁	-1	x ₂₁	y ₂₁	z ₁₂₁	.	.	z _{IV21}	T ₂	p ₁	überkritisch	} über- kritisches Gebiet
22	T ₂	p ₂	-1	x ₂₂	y ₂₂	z ₁₂₂	.	.	z _{IV22}	T ₂	p ₂	überkritisch	
23	T ₂	p ₃	-1	x ₂₃	y ₂₃	z ₁₂₃	.	.	z _{IV23}	T ₂	p ₃	überkritisch	
-	-	-	-	-2	-2	-2	.	.	-2	-2	-2	zur Einhaltung der	} Blocklänge
-	-	-	-	-2	-2	-2	.	.	-2	-2	-2	Blocklänge	
Zweiphasengebiet													
1d1	T ₁	p _d (T ₁)	1	x _{1d1}	y _{1d1}	z _{11d1}	.	.	z _{IV1d1}	T ₁	x _{d1}	Taulinie	} Naßdampf- gebiet
1d2	T ₁	p _d (T ₁)	0,75	x _{1d2}	y _{1d2}	z _{11d2}	.	.	z _{IV1d2}	T ₁	x _{d2}	Naßdampf	
1d3	T ₁	p _d (T ₁)	0,5	x _{1d3}	y _{1d3}	z _{11d3}	.	.	z _{IV1d3}	T ₁	x _{d3}	Naßdampf	
1d4	T ₁	p _d (T ₁)	0,25	x _{1d4}	y _{1d4}	z _{11d4}	.	.	z _{IV1d4}	T ₁	x _{d4}	Naßdampf	
1d5	T ₁	p _d (T ₁)	0	x _{1d5}	y _{1d5}	z _{11d5}	.	.	z _{IV1d5}	T ₁	x _{d5}	Siedelinie	

¹ Nummer des Zustandspunktes bezieht sich auf die Kennzeichnung im Bild 2

² Dampfanteil x im Zweiphasengebiet $0 \leq x \leq 1$
im Einphasengebiet -1 (gesetzt)

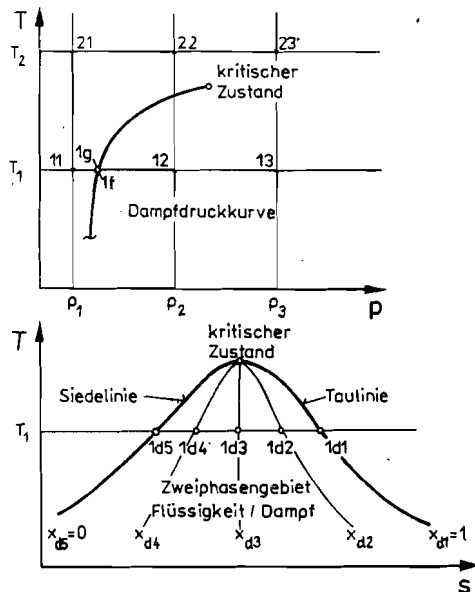


Bild 2. Veranschaulichung der Struktur der Ausgangsdatensätze für das Ein- und Zweiphasengebiet (einschließlich Grenzkurven)

datensätze hintereinander berechnet und abgespeichert werden.

Zur Interpolation von Isolinienrandpunkten auf der Siede- oder Taulinie wird der Grenzkurvendatensatz benötigt. Ausgegangen wird von den Basisdaten Temperatur, zugehöriger Sättigungsdruck und dem jeweiligen Dampfanteil $x_d = 0$ sowie $x_d = 1$. Die Temperatur wird von einem Anfangswert schrittweise bis zur kritischen, die als letzter Wert erscheint, erhöht. (Tabelle 3 und Bild 2 enthalten nur Anfangs- und Endwert.) Beginnend mit der Taulinie (Punkt 1g) und folgend auf der Siedelinie (Punkt 1f) werden daraus die Koordinaten- und Isoliniengrößen berechnet und als sortierte Datenreihe abgespeichert. Außerdem

erfolgt eine separate Speicherung der Grenzkurvenkoordinaten für ihre direkte Zeichnung.

Der Ausgangsdatensatz für das Einphasengebiet besteht aus Blöcken konstanter Temperatur. Innerhalb eines Temperaturblocks wird der Druck wahlweise mit linearer oder logarithmischer Schrittweite erhöht. Wird dabei der zur Temperatur gehörende Siededruck erreicht, so erscheinen zunächst die Werte auf der Tau- und Siedelinie (1g und 1f). Danach wird mit dem nächsthöheren Druck fortgesetzt. Der Dampfanteil wird im Einphasengebiet formal -1 gesetzt. Aus sortiertechnischen Gründen müssen alle Temperaturblöcke die gleiche Anzahl von Druckwerten, die sogenannte Blocklänge (Blocklänge = 5 in Tabelle 3), aufweisen. Bei überkritischen Temperaturen werden deshalb statt der beiden Grenzkurvendaten Steuerwerte -2 eingefügt, die das Programm später als solche erkennt und aussortiert.

Analog zum Druck wird im Zweiphasengebiet der Dampfanteil x_d für jede Temperatur unter Berücksichtigung der Blocklänge vom Wert auf der Taulinie ($x_d = 1$) bis zum Siedelinienwert ($x_d = 0$) verringert.

Einen entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeit der im folgenden Programmschritt zu interpolierenden Isolinienkoordinaten hat neben einem geeigneten Interpolationsverfahren das Temperatur, Druck-Raster der Ausgangsdaten. Sehr enge Rasterwerte erhöhen zwar in jedem Falle die Genauigkeit, haben aber einen multiplikativ steigenden externen Speicherplatzbedarf und damit einen ebenso wachsenden Rechenaufwand zur Folge. Es kommt darauf an, sinnvolle Abstände zwischen den Rasterwerten, auch unterschiedlich in den verschiedenen Zustandsbereichen, zu verwenden. Im Programm erfolgt eine automatische Schrittweitenwahl durch einen dafür konzipierten Algorithmus. So werden u. a. in der Umgebung des kritischen Punktes die Schrittweiten verringert.

Aus programmorganisatorischen Gründen ist der beschrie-

Tabelle 4. Übersicht der Interpolationsvorschriften im Ein- und Zweiphasengebiet

Isolinie	Konstante Größe bei Interpolation	
	Einphasengebiet	Zweiphasengebiet
Allgemeine Isolinie	Interpolation auf $T = \text{const.}$ (im Temperaturblock) Sonderfall: für $x = T$ bzw. $y = T$ entfällt die Interpolation	Interpolation auf $T = \text{const.}$ (im Temperaturblock) Sonderfall: für $x = T$ oder p bzw. $y = T$ oder p entfällt die Interpolation
Isotherme	Interpolation auf $p = \text{const.}$ (zwischen Temperaturblöcken) Sonderfall: für $x = p$ bzw. $y = p$ entfällt die Interpolation	Interpolation auf $x_d = \text{const.}$ (zwischen Temperaturblöcken) Sonderfall: für $x = x_d$ bzw. $y = x_d$ entfällt die Interpolation
Isobare	wie allgemeine Interpolation	Interpolation auf $x_d = \text{const.}$ (zwischen Temperaturblöcken) Sonderfall: für $x = x_d$ bzw. $y = x_d$ entfällt die Interpolation
Isohygre ($x_d = \text{const.}$)	entfällt	wie allgemeine Interpolation

bene Aufbau der Ausgangsdatensätze auch bei der vorgesehenen Eingabe über Lochkarten zu beachten.

3.3. Interpolationsalgorithmen

Ziel der Interpolation im UP DAIN T ist es, aus den Ausgangsdaten die zu einem Isolinienwert z gehörenden Koordinaten x und y unter Einbeziehung seiner Nachbarpunkte zu ermitteln. Aus dem isothermen Aufbau der Ausgangsdatensätze resultieren die in Tabelle 4 zusammengestellten Interpolationsvorschriften.

Im Bild 3 ist eine lineare Interpolation der Koordinaten x_{ges} und y_{ges} für den gegebenen Isolinienwert z_{geg} veranschaulicht. Die benachbarten Punkte $P_1(x_1, y_1)$ und $P_2(x_2, y_2)$ liegen auf einer Linie $T = \text{const.}$ Man erhält die gesuchten Koordinaten durch Projektion dieser im Raum liegenden Isothermen in die z,x - bzw. z,y -Ebene. Es entstehen die projizierten Punkte $P_1(z,x)$, $P_2(z,x)$ und $P_1(z,y)$, $P_2(z,y)$. Nun kann die Interpolation mit den abgebildeten Koordinaten in eindimensionaler Form durchgeführt werden. Für lineare Interpolation der x -Koordinate erhält man zum Beispiel die bekannte Gleichung

$$x_{ges} = x_1 + \frac{z_{geg} - z_1}{z_2 - z_1} (x_2 - x_1) \quad (1)$$

Es zeigt sich jedoch, daß die Ausgangsdatendichte sehr hoch sein muß, um die für thermophysikalische Zustandsdiagramme geforderte Genauigkeit mit Gleichung (1) zu erreichen. Aufgrund der angestrebten Verallgemeinerung auf beliebige Diagramme sollten die unterschiedlichsten Anstiege und Krümmungen möglichst von einem Algorithmus realisiert werden. Zum Beispiel muß der sehr geringe Anstieg der Isothermen im h,s -Diagramm in Richtung Idealgasgebiet genauso Beachtung finden wie der nahezu senkrechte Verlauf einer Isothermen im p,v -Diagramm im Flüssigkeitsgebiet.

Eigenen Erfahrungen nach kann durch eine geeignete Koordinatentransformation die Genauigkeit bei Beibehaltung der linearen Interpolation bis um zwei Größenordnungen erhöht werden [15]. Es kommt darauf an, die Transformationsfunktionen so zu wählen, daß bereits eine weitestgehende Linearisierung erreicht wird. Mit den Transformationsfunktionen

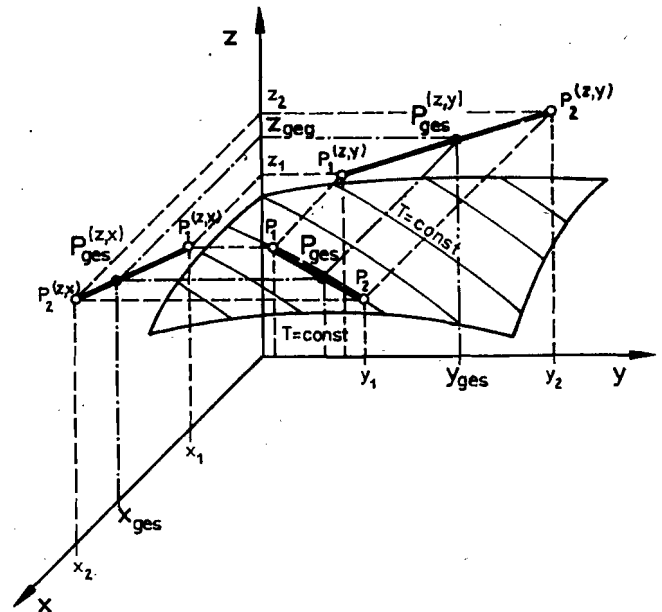


Bild 3. Räumliche Darstellung der Koordinateninterpolation eines Isolinienpunktes

$$Z = f_{Tz}(z) \quad (2)$$

$$X = f_{Tx}(x)$$

und ihren Umkehrungen

$$z = f_{Iz}(Z) \quad (3)$$

$$x = f_{Ix}(X)$$

erhält man die allgemeine lineare Interpolationsgleichung

$$x_{ges} = f_{Ix} \left[X_1 + \frac{Z_{geg} - Z_1}{Z_2 - Z_1} (X_2 - X_1) \right] \quad (4)$$

in der transformierten Z,X -Ebene. Analog lautet die Beziehung für die gesuchte y -Koordinate. Als Transformationsfunktionen bieten sich logarithmisch exponentielle, hyperbolische und trigonometrische Funktionen an. Um sie festzulegen, ist die Kenntnis der funktionellen Abhängigkeiten zwischen den an der Interpolation beteiligten Größen notwendig. Tabelle 5 enthält die Resultate der Funktionsanalysen getrennt für Ein- und Zweiphasengebiet. Die dafür vorgenommenen Testrechnungen ergaben, daß z. T. unterschiedliche Transformationsfunktionen für das Flüssigkeits- und Dampfgebiet die genauesten Ergebnisse liefern würden. Da aber die Interpolation und spätere Zeichnung nach Zustandsbereichen getrennt erfolgen, wäre eine lückenlose Verbindung der Isolinienteilstücke nicht gewährleistet. Es ist daher im gesamten Einphasengebiet

Tabelle 5. Zusammenstellung geeigneter Transformationsfunktionen für die Interpolation im Ein- und Zweiphasengebiet

Transformation: Isoliniengröße - Koordinatengröße									
Koordinate	Isolinie								
	T^1	p	v	s	h	c_p	a_s	η	λ
T	—	lo-hy	li-li	li-li	li-li	li-li	li-li	li-li	li-li
p	li-li	—	hy-li	li-lo	li-li	li-li	hy-li	li-li	hy-li
v	hy-li	lo-lo	—	li-li	li-li	lo-hy	li-hy	hy-lo	hy-lo
s	lo-li	lo-lo	li-li	—	li-li	hy-li	li-hy	lo-hy	hy-lo
h	li-li	lo-li	li-li	li-li	—	lo-hy	lo-lo	lo-hy	hy-lo
c_p	li-hy	li-hy	hy-lo	li-hy	hy-lo	—	lo-lo	hy-li	lo-lo
a_s	lo-lo	li-li	hy-li	hy-li	lo-lo	lo-lo	—	lo-hy	lo-hy
η	lo-lo	lo-hy	lo-hy	hy-lo	hy-lo	li-hy	hy-lo	—	hy-lo
λ	lo-hy	lo-hy	lo-hy	lo-hy	lo-hy	lo-lo	hy-lo	lo-hy	—

li linear (keine Transf.) lo logar. Transf. hy hyperbol. Transf.

¹ Interpolation isobar, sonst isotherm

einheitlich jeweils die nach Tabelle 5 überwiegend geeignete Transformation anzuwenden. Im Programm erfolgt die Transformation der in Tabelle 5 angegebenen Größen automatisch. Für darin nicht enthaltene hat der Nutzer die Möglichkeit, über Eingabeparameter die Transformationsfunktionen zu wählen.

Während noch das in [1] vorgestellte Programm mit linearer Interpolation arbeitete, wurde in der aktuellen Version vorrangig eine Spline-Interpolation realisiert. Die Notwendigkeit des Einbaus ergab sich aus auftretenden Schwingungen in den Isolinienverläufen. Die Berechnung der Spline-Polynome erfolgt jeweils zu Beginn der Interpolation einer Isolinienart. Verknüpft werden die Ausgangsdaten für die Isoliniengröße z mit denen der gewählten Koordinate x bzw. y auf der nach Tabelle 4 konstant gehaltenen Basisgröße. Zum Beispiel werden für eine in einem h,s -Diagramm zu zeichnende Isobare die Spline-Polynome $h = f(p)$ und $s = f(p)$ für jede Rastertemperatur im Einphasengebiet ermittelt und extern abgespeichert. Der unter Beachtung von [2] entwickelte Algorithmus zur Berechnung des Splines wird in einem Unterprogramm [16] realisiert. Als Ergebnis liegen jeweils zwischen den Stützwerten i und $i + 1$ gültige Polynome dritten Grades,

$$x_i = a_i + b_i(z - z_i) + c_i(z - z_i)^2 + d_i(z - z_i)^3 \quad (5)$$

mit $i = 1..n - 1$, wobei $n =$ Anzahl der Stützwerte ist, für die x - und y -Koordinate vor, die zur Interpolation anstatt Gleichung (1) berechnet werden. Der rekursive Algorithmus für die Koeffizienten lautet

$$\begin{aligned} a_i &= x_i \\ b_i &= \frac{a_{i+1} - a_i}{h_i} - \frac{1}{3}(2c_i + c_{i+1})h_i \\ d_i &= \frac{c_{i+1} - c_i}{3h_i} \end{aligned} \quad (6)$$

$$h_{i-1}c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)c_i + h_i c_{i+1} = 3 \left(\frac{a_{i+1} - a_i}{h_i} - \frac{a_i - a_{i-1}}{h_{i-1}} \right)$$

mit $h_i = z_{i+1} - z_i$ und $h_{i-1} = z_i - z_{i-1}$,

wobei $c_1 = 0$ und $c_n = 0^4$ sind [16].

Er beinhaltet die Stetigkeit der Polynome in den Stützstellen auch in der ersten und zweiten Ableitung [2].

Um die Anzahl der Basisdaten zu minimieren, wurde bei der Anwendung der Spline-Interpolation die Koordinatentransformation gemäß Tabelle 5 beibehalten.

Zur Gewährleistung einer fehlerfreien Zeichnung werden für jeden Isolinienpunkt neben den beiden Koordinaten auch die zugehörigen Werte für Temperatur und Druck mit interpoliert und abgespeichert.

4. Beispiele

Ein für Ablesezwecke gezeichneter Ausschnitt eines h,s -Diagrammes für Wasser nach IFC 68 [17] mit Linien $T,p,v = \text{const.}$ stellt das Bild 4 dar. Diese im Original 100 cm \times 80 cm große Tuschezeichnung, zusammengesetzt aus 4 auf dem Plotter DIGIGRAF 1008 einzeln erzeugten Quadranten, dient als Ablesediagramm für Turbinenberechnungen. Insgesamt wurden vier solche aneinanderlegbare Ausschnitte der Originalgröße 100 cm \times 80 cm im Auftrag des Praxispartners VEB Bergmann-Borsig, Stammbetrieb des KKAB, realisiert. Die Genauigkeit des Diagrammes, Berechnung und Zeichnung betreffend, liegt über der visuellen Ablesegenauigkeit. Den vier Diagrammen liegt ein

⁴ Die Gleichungen (6) führen zu sogenannten „gleitenden“ Parametern. Die zur eigentlichen Spline-Interpolation gehörende rechenzeitaufwendige Minimierung der zweiten Ableitungen der entstehenden Polynome (5) wird nicht vorgenommen, da die erreichte Genauigkeit für Diagrammzeichnungen bereits genügt.

Ausgangsdatensatz mit einem Raster von 50 Druck- und 50 Temperaturwerten zugrunde, wobei der Druckbereich logarithmisch geteilt ist⁵. Aufgrund der recht hohen Zeichenzeiten für solche Diagramme am DIGIGRAF 1008 wurde die Beschriftung von Hand vorgenommen. Das Programm läßt jedoch auch eine Beschriftung durch den Plotter zu. Zwei Beispiele für die schnelle Erstellung von Übersichtsdiagrammen beinhalten die Bilder 5 und 6. Bild 5 zeigt wiederum ein h,s -Diagramm für Wasser, jedoch hier nach „VDI 1963“ [18] berechnet und gezeichnet. Da die Interpolations- und Zeichenalgorithmen vollständig stoffunabhängig programmiert sind, mußten nur die zur Berechnung der Ausgangsdatensätze benötigten Unterprogramme umgeladen werden.

Die Möglichkeit, ohne weiteres auch andere Diagramme zeichnen lassen zu können, verdeutlicht das T,s -Diagramm für Wasser nach IFC 1967 [19] mit Linien $p,v,h,x = \text{const.}$ (Bild 6).

Weitere Beispiele könnten angegeben werden, da bereits unterschiedlichste Diagramme hauptsächlich für Wasser mit mehreren Formulierungen im für den jeweiligen Partner interessierenden Zustandsbereich gezeichnet wurden.

5. Anwendung und Nutzen

Folgende zum Teil bereits in [1] erwähnte Anwendungsmöglichkeiten des vorgestellten Programmsystems konnten erschlossen werden:

1. Nutzung von Übersichtsdiagrammen mit charakteristischen Größen für die Konzipierung und Analyse thermodynamischer und thermohydraulischer Prozeßmodellierungen;
2. Graphische Auswertung von Meßwerten einschließlich der Erstellung von Fehlerdiagrammen;
3. Vergleich des mit Zustandsgleichungen berechneten thermophysikalischen Zustandsverhaltens reiner Fluide mit ihren realen Eigenschaften, vor allem bei Differentialquotienten und Transportgrößen;
4. Qualitative Auswertung der thermodynamischen Eigenschaften verschiedener Stoffe bzw. verschiedener Zustandsgleichungen eines Stoffes in Diagrammen mit reduzierten Größen;
5. Ablesediagramme für überschlägige thermodynamische Prozeßmodellierungen.

Daraus lassen sich drei Hauptanwendungsgebiete

- Übersichtsdiagramme,
- Ablesediagramme,
- Diagramme zum Aufstellen und Bewerten von Zustandsgleichungen ableiten.

Gemessen an der Arbeitszeit, die zum herkömmlichen Entwurf und Zeichnen des h,s -Diagramms für Wasser [4] benötigt wurde, erscheint der in die Erarbeitung des Programmsystems investierte Aufwand als gerechtfertigt. Diese Feststellung wird noch durch den realisierten hohen Verallgemeinerungsgrad, verbunden mit dem breiten Anwendungshorizont, untermauert.

6. Zusammenfassung

Das vorgestellte Programmsystem, bestehend aus den Teilen

- Datenberechnung (UP DABERE),
- Isolinieninterpolation (UP DAINTE),
- Realisierung der Zeichnung (UP ZEICH)

ist in der Lage, für reine Stoffe Zustandsdiagramme mit be-

⁵ Die interpolierten Isoliniendatenreihen nahmen für ein Diagramm bereits 200 K-Worte in Anspruch.

Tabelle 4. Übersicht der Interpolationsvorschriften im Ein- und Zweiphasengebiet

Isolinie	Konstante Größe bei Interpolation	
	Einphasengebiet	Zweiphasengebiet
Allgemeine Isolinie	Interpolation auf $T = \text{const.}$ (im Temperaturblock) <i>Sonderfall:</i> für $x = T$ bzw. $y = T$ entfällt die Interpolation	Interpolation auf $T = \text{const.}$ (im Temperaturblock) <i>Sonderfall:</i> für $x = T$ oder p bzw. $y = T$ oder p entfällt die Interpolation
Isotherme	Interpolation auf $p = \text{const.}$ (zwischen Temperaturblöcken) <i>Sonderfall:</i> für $x = p$ bzw. $y = p$ entfällt die Interpolation	Interpolation auf $x_d = \text{const.}$ (zwischen Temperaturblöcken) <i>Sonderfall:</i> für $x = x_d$ bzw. $y = x_d$ entfällt die Interpolation
Isobare	wie allgemeine Interpolation	Interpolation auf $x_d = \text{const.}$ (zwischen Temperaturblöcken) <i>Sonderfall:</i> für $x = x_d$ bzw. $y = x_d$ entfällt die Interpolation
Isohygre ($x_d = \text{const.}$)	entfällt	wie allgemeine Interpolation

bene Aufbau der Ausgangsdatensätze auch bei der vorgeesehenen Eingabe über Lochkarten zu beachten.

3.3. Interpolationsalgorithmen

Ziel der Interpolation im UP DAINT ist es, aus den Ausgangsdaten die zu einem Isolinienwert z gehörenden Koordinaten x und y unter Einbeziehung seiner Nachbarpunkte zu ermitteln. Aus dem isothermen Aufbau der Ausgangsdatensätze resultieren die in Tabelle 4 zusammengestellten Interpolationsvorschriften.

Im Bild 3 ist eine lineare Interpolation der Koordinaten x_{ges} und y_{ges} für den gegebenen Isolinienwert z_{geg} veranschaulicht. Die benachbarten Punkte $P_1(x_1, y_1)$ und $P_2(x_2, y_2)$ liegen auf einer Linie $T = \text{const.}$ Man erhält die gesuchten Koordinaten durch Projektion dieser im Raum liegenden Isothermen in die z, x - bzw. z, y -Ebene. Es entstehen die projizierten Punkte $P_1(z, x)$, $P_2(z, x)$ und $P_1(z, y)$, $P_2(z, y)$. Nun kann die Interpolation mit den abgebildeten Koordinaten in eindimensionaler Form durchgeführt werden. Für lineare Interpolation der x -Koordinate erhält man zum Beispiel die bekannte Gleichung

$$x_{\text{ges}} = x_1 + \frac{z_{\text{geg}} - z_1}{z_2 - z_1} (x_2 - x_1) \quad (1)$$

Es zeigt sich jedoch, daß die Ausgangsdatendichte sehr hoch sein muß, um die für thermophysikalische Zustandsdiagramme geforderte Genauigkeit mit Gleichung (1) zu erreichen. Aufgrund der angestrebten Verallgemeinerung auf beliebige Diagramme sollten die unterschiedlichsten Anstiege und Krümmungen möglichst von einem Algorithmus realisiert werden. Zum Beispiel muß der sehr geringe Anstieg der Isothermen im h, s -Diagramm in Richtung Idealgasgebiet genauso Beachtung finden wie der nahezu senkrechte Verlauf einer Isothermen im p, v -Diagramm im Flüssigkeitsgebiet.

Eigenen Erfahrungen nach kann durch eine geeignete Koordinatentransformation die Genauigkeit bei Beibehaltung der linearen Interpolation bis um zwei Größenordnungen erhöht werden [15]. Es kommt darauf an, die Transformationsfunktionen so zu wählen, daß bereits eine weitestgehende Linearisierung erreicht wird. Mit den Transformationsfunktionen

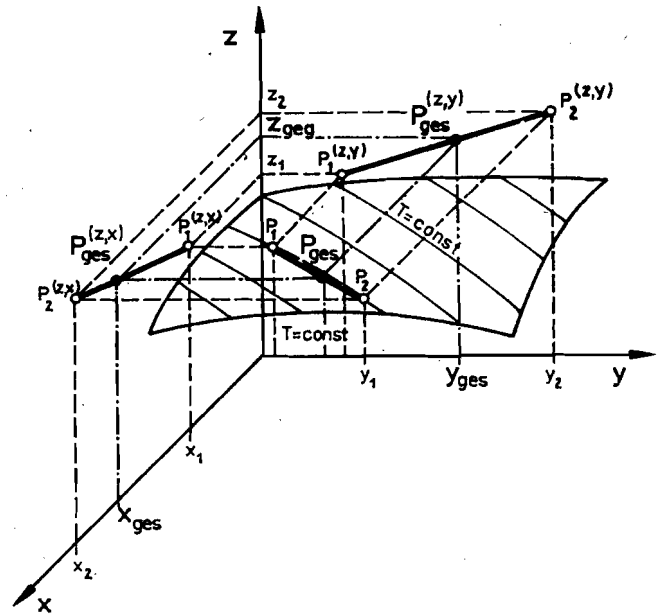


Bild 3. Räumliche Darstellung der Koordinateninterpolation eines Isolinienpunktes

$$Z = f_{Tz}(z) \quad (2)$$

$$X = f_{Tx}(x)$$

und ihren Umkehrungen

$$z = f_{Iz}(Z) \quad (3)$$

$$x = f_{Ix}(X)$$

erhält man die allgemeine lineare Interpolationsgleichung

$$x_{\text{ges}} = f_{Ix} \left[X_1 + \frac{Z_{\text{geg}} - Z_1}{Z_2 - Z_1} (X_2 - X_1) \right] \quad (4)$$

in der transformierten Z, X -Ebene. Analog lautet die Beziehung für die gesuchte y -Koordinate. Als Transformationsfunktionen bieten sich logarithmisch exponentielle, hyperbolische und trigonometrische Funktionen an. Um sie festzulegen, ist die Kenntnis der funktionellen Abhängigkeiten zwischen den an der Interpolation beteiligten Größen notwendig. Tabelle 5 enthält die Resultate der Funktionsanalysen getrennt für Ein- und Zweiphasengebiet. Die dafür vorgenommenen Testrechnungen ergaben, daß z. T. unterschiedliche Transformationsfunktionen für das Flüssigkeits- und Dampfgebiet die genauesten Ergebnisse liefern würden. Da aber die Interpolation und spätere Zeichnung nach Zustandsbereichen getrennt erfolgen, wäre eine lückenlose Verbindung der Isolinienteilstücke nicht gewährleistet. Es ist daher im gesamten Einphasengebiet

Tabelle 5. Zusammenstellung geeigneter Transformationsfunktionen für die Interpolation im Ein- und Zweiphasengebiet

Transformation: Isoliniengröße – Koordinatengröße									
Koordinate	Isolinie								
	T^1	p	v	s	h	c_p	a_s	η	λ
T	—	lo-hy	li-li	li-li	li-li	li-li	li-li	li-li	li-li
p	li-li	—	hy-li	li-lo	li-li	hy-li	li-li	hy-li	hy-li
v	hy-li	lo-lo	—	li-li	li-li	lo-hy	li-hy	hy-lo	hy-lo
s	lo-li	lo-lo	li-li	—	li-li	hy-li	li-hy	lo-hy	hy-lo
h	li-li	lo-li	li-li	li-li	—	lo-hy	lo-lo	lo-hy	hy-lo
c_p	li-hy	li-hy	hy-lo	li-hy	hy-lo	—	lo-lo	hy-li	lo-lo
a_s	lo-lo	li-li	hy-li	hy-li	lo-lo	lo-lo	—	lo-hy	lo-hy
η	lo-lo	lo-hy	lo-hy	hy-lo	hy-lo	li-hy	hy-lo	—	hy-lo
λ	lo-hy	lo-hy	lo-hy	lo-hy	lo-hy	lo-lo	hy-lo	lo-hy	—

li linear (keine Transf.) lo logar. Transf. hy hyperbol. Transf.

¹ Interpolation isobar, sonst isotherm

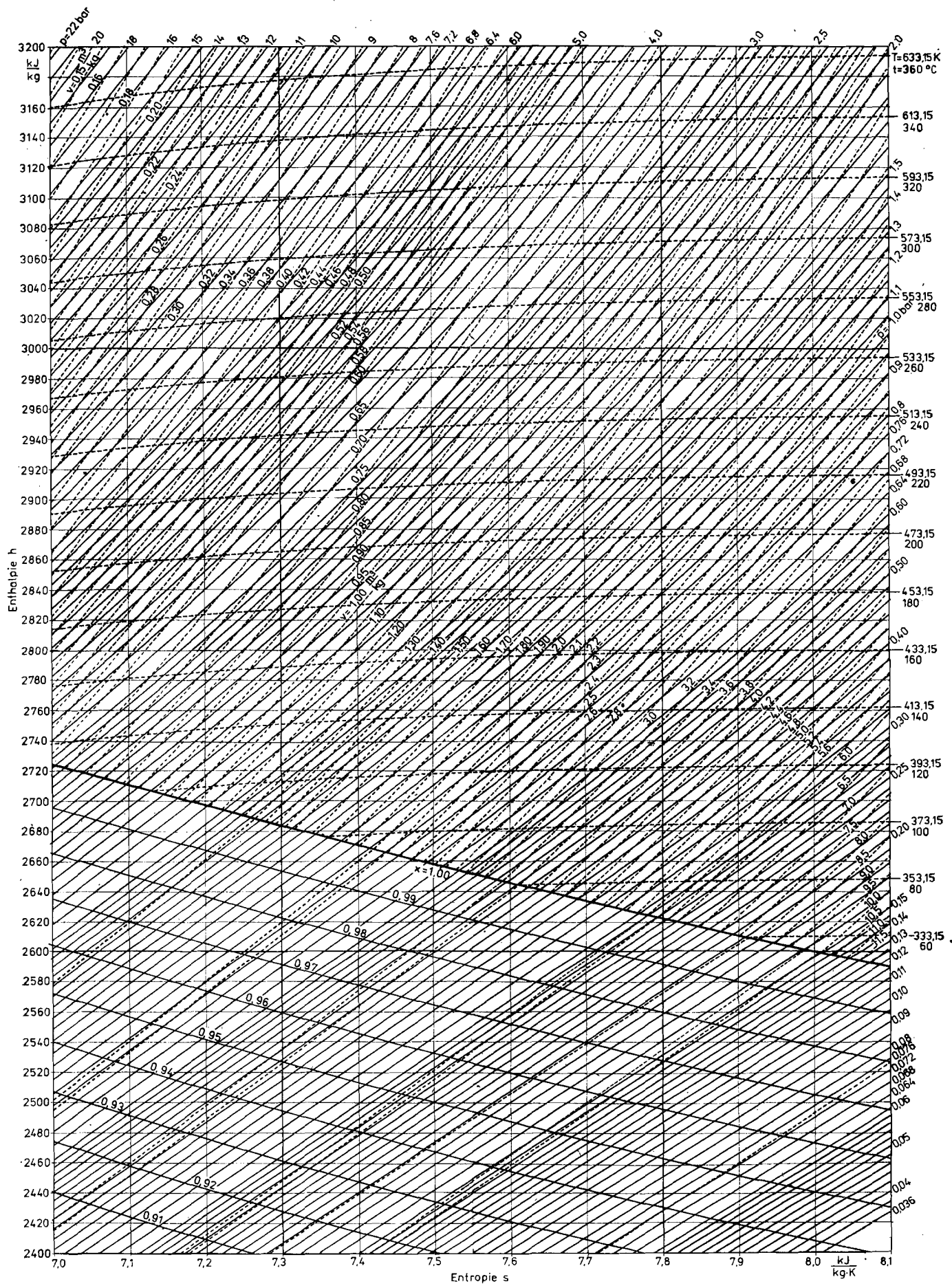


Bild 4. h,s -Ablese-Diagramm für Wasser nach „The 1968 IFC Formulation“ mit Linien $T,p,v = \text{const.}$ (Tuschezeichnung, Beschriftung von Hand)

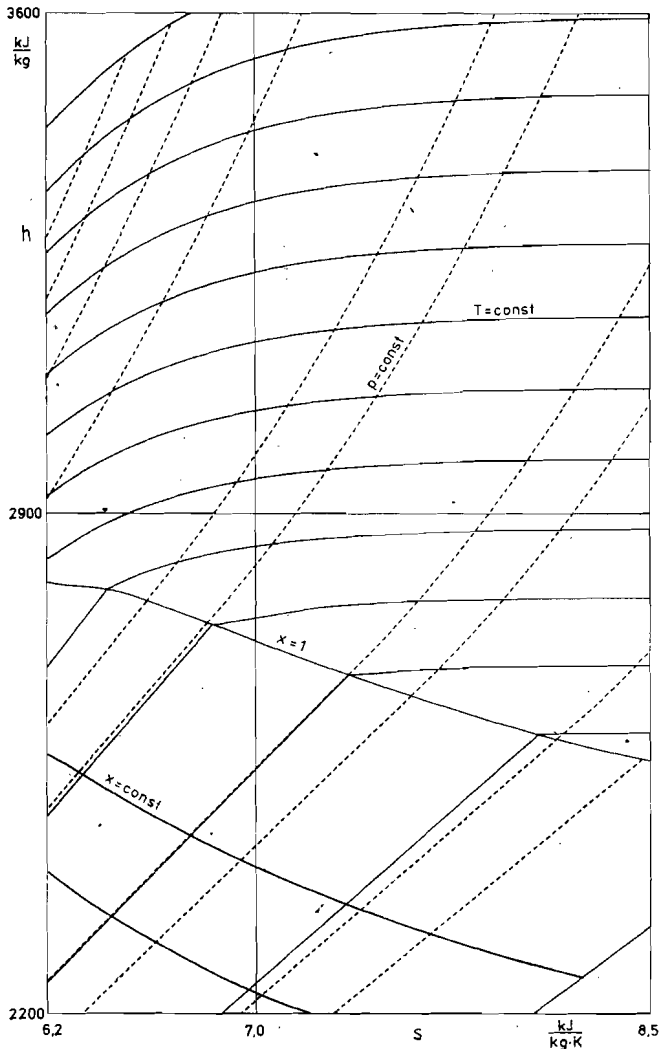


Bild 5. h,s -Übersichtsdiagramm für Wasser nach der Formulierung „VDI 1963“ mit Linien $p,T,x = \text{const}$. (Tuschezeichnung)

liebigen Koordinaten und Isolinien in zweidimensionaler Darstellung zu erzeugen.

Als Ausgangswerte werden nur die Größen für Koordinaten und Isolinien in Abhängigkeit von Temperatur und Druck im Einphasengebiet und von Temperatur und Dampfanteil im Zweiphasengebiet benötigt. Sollen Stoffe gezeichnet werden, für die Zustandsgleichungen programmiert vorliegen, so können diese Unterprogramme mit geringem Aufwand angeschlossen werden. Der WB Thermodynamik der TU Dresden besitzt hierfür ein komplettes Stoffwert-Programmpaket, das für die wichtigsten Arbeitsstoffe der Energietechnik die benötigten thermophysikalischen Eigenschaften berechnet. Die Interpolation der Isolinienkoordinaten erfolgt mit Hilfe einer Spline-Interpolation bei Transformation der beteiligten Größen. Alle interpolierten Daten werden lückenlos unter Einbeziehung der Grenzkurven und Diagrammränder zu geschlossenen Linienzügen zusammengefügt. Es ist möglich, aus einmal erstellten Ausgangsdatensätzen verschiedene Diagrammausschnitte zu interpolieren. Sollen nicht alle interpolierten Isolinien gezeichnet werden, so können nachträglich nicht benötigte ausgesondert werden.

Die notwendigen Eingabedaten, im Dialog am Terminal oder im Stapel wahlweise eingebbar, beschränken sich auf

- die Wahl der Diagrammkoordinaten,
- die Wahl der Isolinien,
- die Festlegung des Temperatur- und Druckbereichs der

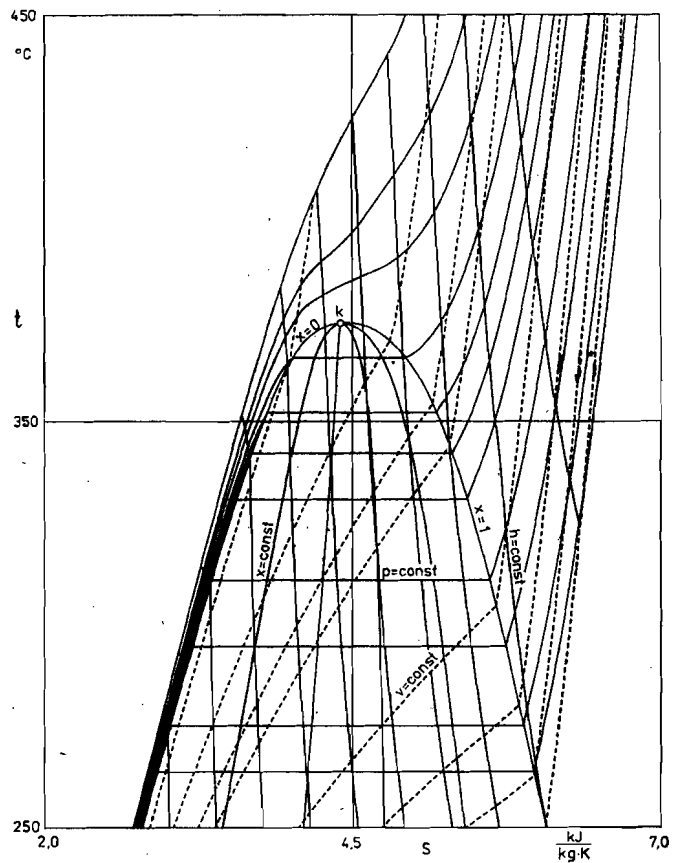


Bild 6. T,s -Übersichtsdiagramm für Wasser nach „The 1967 IFC Formulation“ mit Linien $p,v,h,x = \text{const}$. (Tuschezeichnung)

- Ausgangsdatensätze oder Eingabe der Ausgangsdaten,
- die Angabe der zu zeichnenden Isolinien oder Eingabe von Isoliniendaten,
- die Festlegung des Diagrammbereichs in x - und y -Richtung.

Die Bearbeitung von sehr großen Datenmengen ist möglich, da alle Operationen mit externen Speichern erfolgen und eine selbständige Jobteilung bezüglich Rechenzeit vorhanden ist.

Seit 1985 steht das BESM-FORTRAN-Programm zur Nachnutzung zur Verfügung. Im Rahmen seiner Möglichkeiten ist der WB Thermodynamik der TU Dresden bereit, auf Anfrage Diagramme zu erstellen.

Literatur

- [1] Naumann, F., Kretschmar, H.-J., und Klinger, J.: Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme für reine Fluide mit Hilfe von EDVA. *Wiss. Z. TU Dresden* 34 (1985) 2, S. 135-145
- [2] Späth, H.: *Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen*. München, Wien: Oldenbourg 1973
- [3] Kabus, F.: *Aufstellen von EDV-Programmen zum Berechnen und Zeichnen von Zustandsdiagrammen*. Großer Beleg, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung 1982
- [4] Elsner, N., und Klinger, J.: *Mollier-h,s-Diagramm für Wasserdampf bis 800 °C und 1 000 bar*, Werte nach „The 1968 IFC Formulation for Scientific and General Use“. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1977
- [5] Müller, H., Hultsch, Th., und Süder, M.: Ein Mollier-h,x-Diagramm für feuchtes Rauchgas. *Energietechnik* 34 (1984) 7, S. 252-254
- [6] Schiebener, P., Straub, J., und Grigull, U.: Selected Properties of Water Substance in 3-Dimensional Representation. *Proceedings of the 10th ICPS, Moskau 1984*
- [7] Kretschmar, H.-J., und Klinger, J.: Zur stoffunabhängigen Berechnung von impliziten Zustandsgleichungen - ein Beitrag zur effektiven Bereitstellung von Stoffdaten in thermodyna-

mischen Prozeßrechnungen der Energieanlagentechnik. *Energietechnik* 34 (1984) 6, S. 210-215

- [8] Kretzschmar, H.-J., und Klinger, J.: Ein neues Programmpaket zur Bereitstellung von Stoffwerten in energietechnischen Berechnungen mit stoffunabhängigen Algorithmen für die thermodynamischen Funktionen. Forschungsbericht, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1985
- [9] Software für das automatische Zeichengerät DIGIGRAF-1612 (DAPOS D-3G). Reihe ZfR-Informationen, Zentrum für Rechentechneik, Berlin 1980
- [10] Anwenderdokumentation: BESM6-Software für das Zeichengerät DIGIGRAF 1006/DAPOS D. Rechenzentrum TU Dresden, 1978
- [11] Naumann, F.: Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme mit dem EDVA-System BESM6-DIGIGRAF. Diplomarbeit, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1984
- [12] Kretzschmar, H.-J., Klinger, J., und Naumann, F.: Maschinelle Berechnung und Zeichnung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme. Forschungszwischenbericht, TU Dresden, WB Thermodynamik, 1984
- [13] Rüger, D.: Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme mit Hilfe von EDVA. Diplomarbeit, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1985

- [14] Kretzschmar, H.-J., Klinger, J., und Rüger, D.: Maschinelle Berechnung und Zeichnung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme. Forschungsabschlußbericht, TU Dresden, WB Thermodynamik, 1985
- [15] Kretzschmar, H.-J., Klinger, J., und Schneider, St.: Zur vereinfachten Berechnung von Stoffdaten auf Bürocomputern über Interpolation von in Tabellenform gespeicherten Stützpunkten. VII. Thermodynamik-Kolloquium der DDR, Johanngeorgenstadt 1985
- [16] Reiche, Ch.: SPLKON - Programm für Spline-Interpolation. ZfK Rossendorf, Bereich Reaktorphysik, 1984 (persönliche Mitteilung - unveröffentlicht)
- [17] Elsner, N., Fischer, S., und Klinger, J.: Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982
- [18] Schmidt, E.: VDI-Wasserdampfatafeln, 6. Aufl. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1983
- [19] Griggull, U.: Properties of Water and Steam in SI-Units. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag; München: R. Oldenbourg 1982

Manuskripteingang am 20. 12. 1986

ENA 405

Helmar Kahle, Schwedt¹

Dehnungsinduzierte Ribkorrosion (ϵ -iK) im primären Vorlauf eines Fernwärmenetzes

1. Sachverhalt

An einer Stichleitung mit der Abmessung 377×6 des primären Vorlaufs eines Fernwärmenetzes trat im Winter 1985/1986 ein Rohrreißer auf. Nach Freilegung und Bergung des Schadstücks wurde festgestellt, daß das betroffene Rohr auf einer Länge von etwa 3 m längs aufgerissen und durch die Gewalt des verdampfenden Wassers aufgebogen war (Bild 1). Die Leitung war bei Schadenseintritt mit einem Druck von 1,1 MPa und einer Heißwassertemperatur von 165 °C beaufschlagt. Die Gesamtlaufzeit der Stichleitung betrug zu diesem Zeitpunkt rd. 20 Jahre.

Der Vorfall war für den Betreiber der Fernwärmeleitung Anlaß, eine eingehende Untersuchung über die Ursache und den Hergang des Schadens zu veranlassen. Mit dieser Aufgabe wurde die Abteilung Materialprüfung des VEB Petrolchemisches Kombinat Schwedt, Stammbetrieb, betraut.

Wenige Monate nach diesem Ereignis versagte bei einer Kaltwasserdruckprobe ein weiteres Rohr aus der gleichen Stichleitung in ähnlicher Weise, nur daß es naturgemäß

¹ Obering. Dipl.-Met. Helmar Kahle, im VEB Petrolchemisches Kombinat Schwedt, Stammbetrieb, Abt. Materialprüfung



Bild 1. Teilansicht eines aufgerissenen Rohrs aus einer Stichleitung des primären Vorlaufs eines Fernheiznetzes

nicht zum sekundären Aufklaffen des Risses kam. Daraufhin wurde der gesamte Leitungsstrang erneuert, eine Maßnahme, die sich im Licht der Untersuchung, wie später gezeigt wird, als unbedingt notwendig erwies.

Ein weiterer Schaden in derselben Heizperiode betraf einen 30°-Faltenrohrbogen der Hauptrohrleitung NW 500 des gleichen Heiznetzes. In diesem Falle lag der sichtbare Rib (Bild 2) in Rohrumfangsrichtung im Scheitel einer Rohrfalte, wobei er sich im Betrieb durch ständig stärker werdenden Dampfaustritt bemerkbar machte, ohne daß es zu einem Bruch kam.

Schließlich wurden aus der Hauptleitung zwei gerade Rohrstücke zu einer Kontrolluntersuchung entnommen, um den Zustand dieser Baugruppe stichprobenweise zu erfassen.

2. Werkstoffuntersuchungen

2.1. Während des Betriebs geplatzter Rohrabchnitt

Die äußere Besichtigung des zerstörten Rohrabchnitts ergab, daß es sich ursprünglich um ein längsnahtgeschweißtes Rohr der Abmessung 377×6 handelte. Anhand der vorgefundenen Kennzeichnung mit Herstellerzeichen,

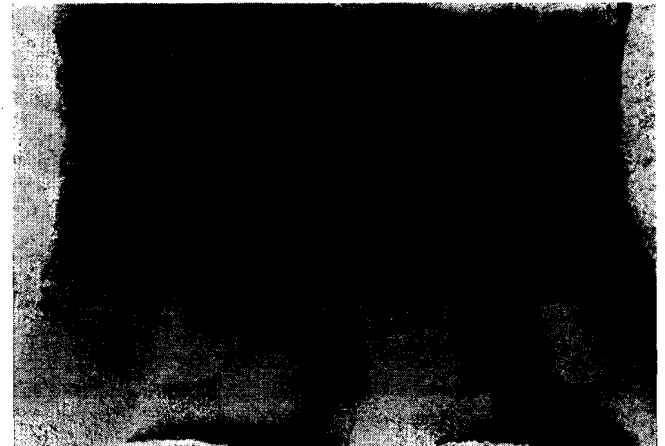


Bild 2. Stark verästelter Rib auf der Innenseite eines 30°-Faltenrohrbogens