

Sektion Energieumwandlung

Direktor:

Professor Dr. sc. techn. Günter Schramm

Frank Naumann, Hans-Joachim Kretzschmar und Jochen Klinger

Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme für reine Fluide mit Hilfe von EDVA

Im Wissenschaftsbereich Thermodynamik der TU Dresden wird seit 1982 an der Entwicklung eines Programmsystems gearbeitet, mit dessen Hilfe beliebige thermodynamische Zustandsdiagramme mit beliebigen Isolinien für reine Stoffe erzeugt werden können. Das zum gegenwärtigen Zeitpunkt vorhandene Programm soll vorgestellt und auf mögliche Anwendungen verwiesen werden. Dabei wird auf einige relevante Probleme und Details innerhalb des beschriebenen Lösungsweges eingegangen. Da die Berechnung aller benötigten Stoffdaten durch das an anderer Stelle beschriebene Stoffwert-Programmpaket des WB Thermodynamik erfolgt, zeichnet sich das vorzustellende System durch eine hohe Kombinationsfähigkeit von verschiedensten zu zeichnenden thermodynamischen Größen aus. Außerdem ist der Algorithmus prinzipiell für reine Stoffe bzw. für solche, die sich im interessierenden Parameterbereich entsprechend verhalten, stoffunabhängig geschrieben. Die hohe Zeichengenauigkeit des verwendeten Plotters DIGIGRAF 1008 verbunden mit der EDVA BESM 6 gestattet, neben Übersichts- auch Ablesediagramme zu erzeugen.

1. Einleitung

Die wachsende unmittelbare Verfügbarkeit von Rechnern aller Größenordnungen am Arbeitsplatz bzw. in dessen Nähe führt zu grundlegenden Änderungen in der Arbeitsweise des Ingenieurs in der gegenwärtigen Zeit. Waren für den Wärmetechniker bisher Ablesediagramme und Dampfatafen die herkömmlichen Hilfsmittel bei thermodynamischen Prozessberechnungen, so treten an deren Stelle Displays von EDVA, die in erheblich kürzerer Zeit und weit genauer alle benötigten Stoffwerte liefern können.¹ Einher mit der damit verbundenen Übernahme vieler Logik- und Berechnungsprozesse durch den Rechner wächst die Gefahr, Gesamtzusammenhänge, mögliche Vereinfachungen und die Kritik an den „selbstverständlich“ berechneten Ergebnissen aus den Augen zu verlieren. Daraus resultierend erscheint es den Autoren notwendig, auf die in diesem Zusammenhang wachsende Rolle von Übersichtsdiagrammen verschiedenster thermodynamischer Größen, auch mit bisher nicht üblichen Koordinaten und Parametern, zu verweisen. Sie schnell und mit Hilfe der i. allg. vorhandenen Stoffwert-Software maschinell zu erzeugen — als Dienstleistung für den Wärmetechniker — ist eine, wie die Resonanz der Praxispartner zeigt, notwendige Aufgabe.

Die Erarbeitung eines universellen Systems zum Erzeugen von beliebigen Diagrammen unter Beachtung der thermodynamischen Gegebenheiten unabhängig vom zu zeichnenden Stoff würde in bezug auf die immer wieder mit geringem Arbeitszeitaufwand erzeugbaren Diagramme einen einmaligen Aufwand darstellen. Die Arbeiten [3 bis 6] zeigen, daß dieser Aufwand auf Grund des angestrebten hohen Verallgemeinerungsgrades recht hoch, jedoch aus den geschilderten Gründen gerechtfertigt ist. Untermauert wird diese Feststellung noch durch weitere Vorteile der maschinellen Diagrammerzeugung. Sie bestehen vor allem in den Möglichkeiten:

- beliebige Parameterbereiche,

- beliebige Vergrößerungen bzw. Ausschnitte,
- unterschiedliche Koordinatenachsenteilungen (z. B. linear, logarithmisch, hyperbolisch),
- Linien mehrerer Stoffe bzw. Formulierungen gleichzeitig zeichnen zu können.

Die Annahme, daß die Erzeugung von Zustandsdiagrammen nur Probleme der Mathematik und Informationsverarbeitung beinhaltet,² hat sich beim tieferen Eindringen in die Thematik — *Zustandsdiagramme* — nicht bestätigt. Bereits die sich aus der Existenz des fluiden Zweiphasengebietes ergebenden Restriktionen:

- unterschiedliche Berechnung und Zeichnung der Daten,
- unterschiedliche Abbildung des Zweiphasengebietes in den Diagrammen (Fläche, Linie),
- Beachtung des Zustandsverhaltens am kritischen Punkt, unterhalb des Tripelzustandes und an der Verfestigungslinie

sind thermodynamische Gesetzmäßigkeiten. Auch die z. T. nicht deckungsgleichen Bereiche, die mit Zustandsgleichungen erfaßt werden und die insgesamt gezeichnet werden sollen sowie die Realisierung der Isolinien bis an den Diagrammrand stellen Probleme dar, die nur unter Beachtung der thermodynamischen Hintergründe zu lösen sind. Ausgehend von einem im WB Kältetechnik der TU Dresden entwickelten Programm zum Zeichnen von $\log p, h$ -Diagrammen für Kältemittel [7], konnte in [3] von Grimmer ein universelles Programmsystem erarbeitet werden. Die hier dargelegten Ergebnisse der Arbeit [5] sind eine Weiterentwicklung dieser Konzeption.

2. Lösungsweg zur maschinellen Zustandsdiagrammerzeugung

2.1. Allgemeiner Algorithmus

Das Bild 1 zeigt eine Übersicht des entwickelten Programmsystems, welches aus zwei getrennten Hauptprogrammen besteht. Wie dem Bild zu entnehmen ist und weiter ausführ-

¹ Die bereits seit Ende der sechziger Jahre auf EDVA vor allem im Stapelbetrieb durchgeführten umfassenden Prozeßberechnungen einschließlich Stoffwertbereitstellung (vgl. [1] und [2]) werden mit dieser Feststellung nicht berührt. Sie behalten natürlich auch weiterhin ihre Bedeutung.

² Für die zeichnerische Darstellung von Datenreihen gibt es seit Jahren fertige und anwendbare Lösungen, algorithmisch aufbereitet und programmiert.

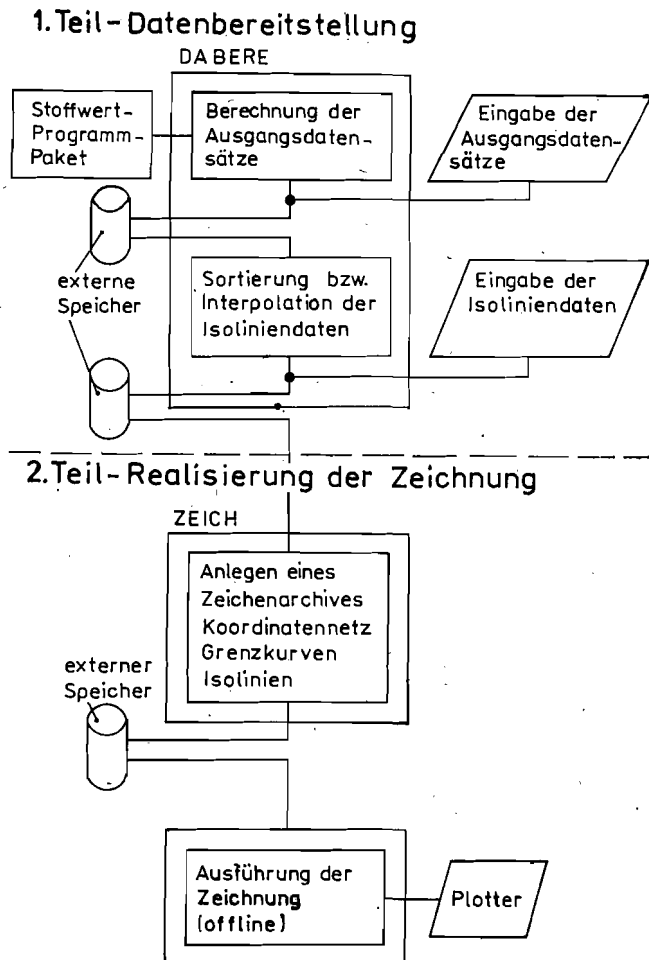


Bild 1. Verwirklichtes Prinzip der Erzeugung von thermodynamischen Zustandsdiagrammen mit EDVA (Zeichnung im Offline-Betrieb)

lich erläutert, bietet das Programmsystem viele Möglichkeiten des Einstieges und der Unterbrechung:

- Berechnung der Ausgangsdatensätze mit Stoffwert-Programmen,
- Eingabe der Ausgangsdatensätze,
- Interpolation der Isoliniendaten aus den Ausgangsdatensätzen,
- Eingabe der Isoliniendatenreihen.

Das Programm DABERE (DatenBEREitstellung) liefert sortierte Datenreihen der später zu zeichnenden Isolinien. Unter Isolinien wollen wir Linien konstanter physikalischer Größen, auch als Parameter bezeichnet, verstehen. Die Aufgabe des Programms ZEICH (ZEICHnung) besteht im Anlegen eines Zeichenarchivs auf einem externen Speicher, welches sämtliche Steuerbefehle zur Erzeugung des kompletten Zustandsdiagrammes enthält. Die Ausführung der Zeichnung selbst erfolgt im Offline-Betrieb zu einem späteren Zeitpunkt.³ Die großen Datenmengen, die berechnet und bewegt werden müssen, erfordern die ständige Arbeit mit externen Speichern, genutzt als Direkt-Zugriffs-Speicher (vgl. Bild 1).

Zunächst wird im Programm DABERE der Ausgangsdatensatz für die Grenzkurven berechnet. Er enthält u. a. die Daten, die dem Programm ZEICH ohne weitere Bearbeitung zur Zeichnung der Grenzkurven übergeben werden sowie Werte

³ Die offline vom Rechner ausgeführte Zeichnung ist spezifisch für den Plotter DIGIGRAF 1008 (vgl. dazu [8] und [9]).

für die folgende Sortierung der Isolinien auf den Grenzkurven bzw. in ihrer unmittelbaren Nähe. Im Anschluß daran wird zuerst der Ausgangsdatensatz für das Einphasengebiet und, falls gefordert, für das Zweiphasengebiet berechnet und abgespeichert. Die Berechnung der Ausgangsdatensätze übernimmt im vorliegenden Fall das Stoffwert-Programmpaket des WB Thermodynamik, bereits in den Arbeiten [1 bis 12] ausführlich beschrieben. Darin können Stoffdaten für die in Tabelle 1 aufgelisteten reinen Arbeitsstoffe berechnet werden. Da die nachfolgenden Sortier- und Interpolationsalgorithmen stoffunabhängig arbeiten und keine weitere Stoffwertermittlung mehr benötigen, können Diagramme für alle in Tabelle 1 enthaltenen Stoffe gezeichnet werden. Die Vielfalt der darzustellenden Zustandsgrößen, Transportgrößen, weiteren Eigenschaften, thermodynamischen Differentialquotienten und Ähnlichkeitskennzahlen (Tabelle 2) resultiert ebenfalls aus den Möglichkeiten des Stoffwert-Programmpaketes. Stehen keine Stoffwert-Berechnungsprogramme zur Verfügung, bzw. sollen experimentell bestimmte oder aus Tabellen entnommene Daten verarbeitet werden, kann alternativ die Eingabe der Ausgangsdaten über andere Medien (Lochkarten, Lochband) erfolgen. Aus diesen Daten, die praktisch in Tabellenform vorliegen, werden alle Isoliniendaten interpoliert. Als Ergebnis liegen Daten-

Tabelle 1

Zusammenstellung der Arbeitsstoffe im Stoffwert-Programmpaket des WB Thermodynamik (Stand Mai 1984)

Arbeitsstoff	Zustandsgleichung	Wert für n		
Wasser	IFC 1968	9		
	IFC 1967	2		
	Rivkin u. Kremenevskaja	11		
	VDI 1960	10		
Ammoniak	Martin-Hou-Gleichung (ILKA-Berechnungskatalog)	20		
		R 11	21	
		R 12	22	
		R 13	23	
		R 22	24	
		R 13 B 1	25	
		R 113	26	
		R 114	27	
		R 502	28	
		R 12	Baehr u. Hicken	3
		Kohlendioxid	Altunin bzw. UIPAC	5
		Helium	Zederberg	6
		Natrium	Pee	7
Stickstoff	Einheitliche Zustandsgleichung	12		
Helium		13		
Sauerstoff		14		
trockene Luft		15		
Methan		16		
Ethan		17		
Ethylen		18		
15 Stoffe	Modell des halbidealen Gases	1		

n bedeutet die Stoffkennzahl im Stoffwert-Programmpaket des WB Thermodynamik

Tabelle 2

Zusammenstellung der physikalischen Größen für Koordinaten und Isolinien in den Zustandsdiagrammen (Stand Mai 1984)

Symbol	Größe	Maßeinheit
p	Druck	bar
T	Temperatur	K
v	spezifisches Volumen	m ³ /kg
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
s	spezifische Entropie	kJ/(kg · K)
x_d	Dampfanteil	1
λ	Wärmeleitkoeffizient	W/(m · K)
η	dynamische Zähigkeit	Pa · s
σ_d	Oberflächenspannung	N/m
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	kJ/(kg · K)
a_s	isentropische Schallgeschwindigkeit	m/s
$\left. \begin{array}{l} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \\ \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p \\ \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T \\ \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v \end{array} \right\}$	wichtige thermodynamische Differentialquotienten	Pa/K
		(kg · K)/m ³
		m ³ /(kg · Pa)
		kJ/(kg · K ²)
Pr	Prandtlzahl	1
Re	Reynoldszahl	1
Ma	Machzahl	1

reihen, getrennt für das Ein- und Zweiphasengebiet vor, die wiederum extern abgespeichert sind. Möchte der Nutzer des Programmes direkt Isoliniendaten und evtl. Grenzkurvendaten zeichnen lassen, so kann er sie auch über externe Medien eingeben. Beim direkten Einlesen sowohl der Ausgangsdaten als auch der Isoliniendaten sind allerdings fest fixierte Vorschriften bezüglich der Datentrennung zu beachten. Aus den Isolinien-Datenreihen legt das Programm ZEICH auf einem Arbeitsband ein Zeichenarchiv³ an. Zuvor wird geprüft, ob sich die zu zeichnenden Isolinien-Punkte im vom Nutzer vorgegebenen Diagrammbereich befinden. Gegebenenfalls werden auf den Bereichsgrenzen weitere Punkte interpoliert. Das Zeichenarchiv, mit Hilfe von Serviceprogrammen [9] erzeugt, enthält nach der Abarbeitung von ZEICH alle Befehle zur eigentlichen Diagrammerzeugung:

- Zeichnung des Koordinatennetzes
- Zeichnung der Grenzkurve(n)
- Zeichnung der Isolinien
- Kennzeichnung markanter Punkte
- Beschriftung.

Sie werden zu einem späteren Zeitpunkt vom Zeichengerät, in Stiftbewegungen umgesetzt. Im folgenden wird näher auf die beiden Hauptteile Ausgangsdatensatz/Interpolation und Ausführung der Zeichnung eingegangen.

2.2. Ausgangsdatensätze

Die Erläuterung der Handhabung und Arbeitsweise des Programmsystems soll mit der Vorstellung der wichtigsten Eingabedaten für das Programm DABERE beginnen, wobei

das Vorhandensein eines leistungsfähigen Stoffwert-Programmpaketes vorausgesetzt wird. Zunächst müssen diejenigen Größen nach Tabelle 2 festgelegt werden, welche die Achsen des Diagramms bilden sollen. Nach der Angabe des Arbeitsstoffes entsprechend Tabelle 1 werden Temperatur- und Druckbereich sowie zugehörige Unterteilungen abgesteckt, für die die Ausgangsdatensätze berechnet werden sollen. Die Berechnung der Ausgangsdaten erfolgt, ausgehend von Temperatur und Druck, bei jeweils isothermer Druck-erhöhung. Im Zweiphasengebiet und auf den Grenzkurven bildet ebenfalls die Temperatur bei schrittweiser Verminderung des Dampfgehaltes die Grundlage. Da in vielen Fällen der Druckbereich mehrere Zehnerpotenzen umfaßt (absolut), ist wahlweise eine lineare oder logarithmische Druck-erhöhung möglich. Im Anschluß werden für jede gewünschte Linienart ebenfalls Bereich und Schrittweite zur Unterteilung sowie die benötigten Zustandsbereiche (Flüssigkeit, überhitzter Dampf, überkritischer Bereich, Zweiphasengebiet) eingegeben, wobei höchstens fünf Größen der Tabelle 2 in einem Diagramm als Isolinien darstellbar sind. (Erfahrungen besagen jedoch, daß bei vier Parametern die Grenze der Lesbarkeit erreicht ist.) Die letzte Angabe ist notwendig, da die Linienstücke dieser vier Bereiche getrennt sortiert und z. T. auch separat gezeichnet werden, um die plötzlichen Veränderungen der Anstiege einiger Isolinien an der Siedelinie und Taulinie nicht zu verfälschen. Zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten des Systems kann über einen Eingabeparameter außerdem entschieden werden, ob ein lineares oder ein logarithmisch erhöhtes Isolinienfeld erzeugt werden soll oder die zu zeichnenden Linienwerte einzeln einzulesen sind. Damit ist die Eingabe abgeschlossen, und das Programm kann mit der Berechnung der Ausgangsdatensätze zunächst für die Grenzkurven fortgesetzt werden.

Für die Tau- und Siedelinie, im Bild 2 (obere Hälfte) Punkte 1g und 1f, werden Wertetrios (x -Wert; y -Wert; Zustandsbereich) punktweise berechnet, aus denen später im Programm ZEICH unmittelbar die Grenzkurvenlinien zu zeichnen sind. Zusätzlich benötigt man für die Interpolation von Isolinienpunkten auf den Grenzkurven die Werte der gewünschten Linienarten an diesen Punkten (vgl. Bild 3, Spalten z_I ; ...; z_V).

Es folgt die Berechnung des Ausgangsdatensatzes im Einphasengebiet. Wie im Bild 3 ersichtlich, ist sein Aufbau analog. Er setzt sich aus Datengruppen (x -Wert; y -Wert; z_I ; ...; z_V ; Zustandsbereich) bei einer konstanten Temperatur zusammen. Zu einer Temperatur gehört ein Block, in dem der Druck in ebenfalls vorgegebenen Grenzen vom Anfangsbis zum Endwert erhöht wird, wobei die Anzahl der Zustandspunkte pro Block immer gleich groß ist. Aus der Blocktemperatur und dem aktuellen Druck werden mit Hilfe des Stoffwert-Programmpaketes die Koordinatenwerte und die Werte der Linienarten an diesem Punkt bestimmt und extern abgespeichert. Wichtig ist, daß bei Erreichen des zur konstant gehaltenen Temperatur gehörenden Siededruckes zunächst die Werte auf der Tau- und Siedelinie berechnet werden und erst danach die Druckerhöhung fortgesetzt wird.

Das Bild 2, — oberer Teil — soll den Aufbau des Ausgangsdatensatzes graphisch veranschaulichen, wobei die Bezeichnung der Zustandspunkte mit denen des Bildes 3 korrespondiert. Die Berechnung läuft unabhängig vom gewählten Diagramm stets in gleicher Weise ab. Auf Grund der daraus resultierenden einheitlichen Struktur der Ausgangsdatensätze lassen sich anhand des Verlaufes der gesuchten Isolinien in p, T -Diagrammen sichere Voraussagen über mögliche Schwierigkeiten bei ihrer späteren Sortierung treffen (vgl. dazu [13]). Ist der Enddruck im Block der Endtem-

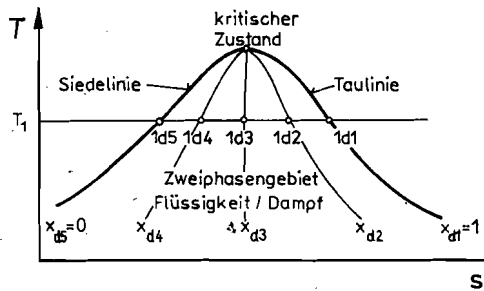
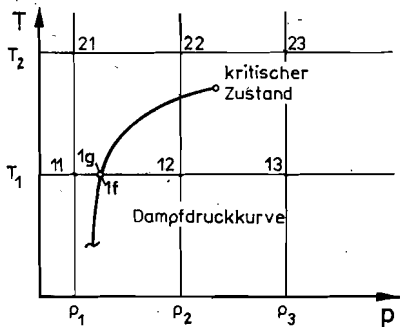
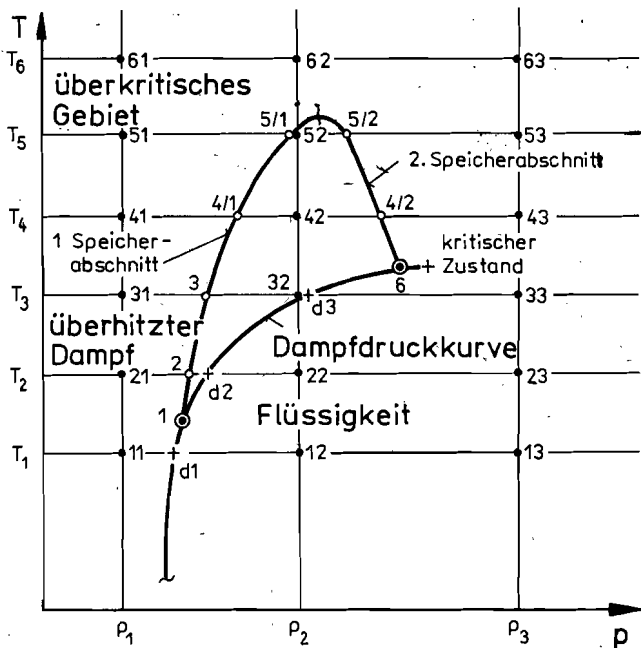


Bild 2 (links). Veranschaulichung der Struktur des Ausgangsdatensatzes im Ein- und Zweiphasengebiet (einschließlich Grenzkurven)

Bild 3 (rechts). Darstellung der Struktur des Ausgangsdatensatzes für die Grenzkurven sowie Ein- und Zweiphasengebiet auf externem Speicher (Ausschnitt)

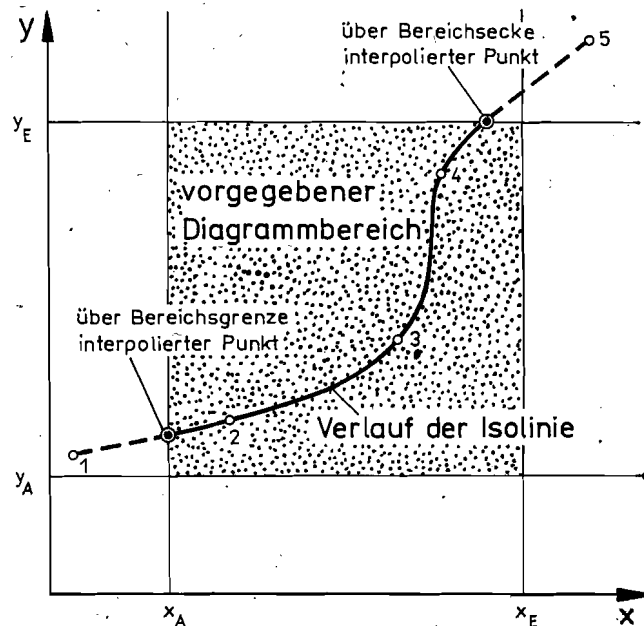
vorgegebene Basisdaten				extern abgespeicherte Ausgangsdatensätze						
Nr.*	Temp.	Druck	Dampfanteil**	x-Wert	y-Wert	Isolinienwerte			Zustandsbereich	
						z_I	z_H	z_{II}	z_V	
Grenzkurven										
1g	T_1	$p_d(T_1)$	1	x_{1g}	y_{1g}	z_{I1g}	...	z_{V1g}	Taulinie	Taulinie
krit	T_{krit}	p_{krit}	1	x_{krit}	y_{krit}	z_{Ikrit}	...	z_{Vkrit}	krit. Zustand	
1f	T_1	$p_d(T_1)$	0	y_{1f}	y_{1f}	z_{I1f}	...	z_{V1f}	Siedelinie	Siedelinie
krit	T_{krit}	p_{krit}	0	y_{krit}	y_{krit}	z_{Ikrit}	...	z_{Vkrit}	krit. Zustand	
Einphasengebiet										
11	T_1	p_1	-1	x_{11}	y_{11}	z_{I11}	...	z_{V11}	Dampf	Gas- und Flüssigkeitsgebiet
1g	T_1	$p_d(T_1)$	1	x_{1g}	y_{1g}	z_{I1g}	...	z_{V1g}	Taulinie	
1f	T_1	$p_d(T_1)$	0	x_{1f}	y_{1f}	z_{I1f}	...	z_{V1f}	Siedelinie	
12	T_1	p_2	-1	x_{12}	y_{12}	z_{I12}	...	z_{V12}	Flüssigkeit	
13	T_1	p_3	-1	x_{13}	y_{13}	z_{I13}	...	z_{V13}	Flüssigkeit	
Zweiphasengebiet										
1d1	T_1	$p_d(T_1)$	1	x_{1d1}	y_{1d1}	z_{I1d1}	...	z_{V1d1}	Taulinie	Naßdampfgebiet
1d2	T_1	$p_d(T_1)$	0,75	x_{1d2}	y_{1d2}	z_{I1d2}	...	z_{V1d2}	Naßdampf	
1d3	T_1	$p_d(T_1)$	0,50	x_{1d3}	y_{1d3}	z_{I1d3}	...	z_{V1d3}	Naßdampf	
1d4	T_1	$p_d(T_1)$	0,25	x_{1d4}	y_{1d4}	z_{I1d4}	...	z_{V1d4}	Naßdampf	
1d5	T_1	$p_d(T_1)$	0	x_{1d5}	y_{1d5}	z_{I1d5}	...	z_{V1d5}	Siedelinie	

* Nummer des Zustandspunktes bezieht sich auf die Kennzeichnung im Bild 2.
 ** Dampfanteil x im Zweiphasengebiet $0 \leq x \leq 1$
 im Einphasengebiet -1 (gesetzt)



+ Punkte des Grenzkurvendatensatzes
 o aus Ausgangsdatensatz interpolierte Punkte
 o interpolierte Grenzkurvenpunkte

Bild 4. Veranschaulichung der Interpolation einer Isolinie nahe der Grenzkurve



o interpolierte Isolinienpunkte
 o zusätzlich interpolierte Diagrammrandpunkte

Bild 5. Veranschaulichung der Interpolation von Diagrammrandpunkten

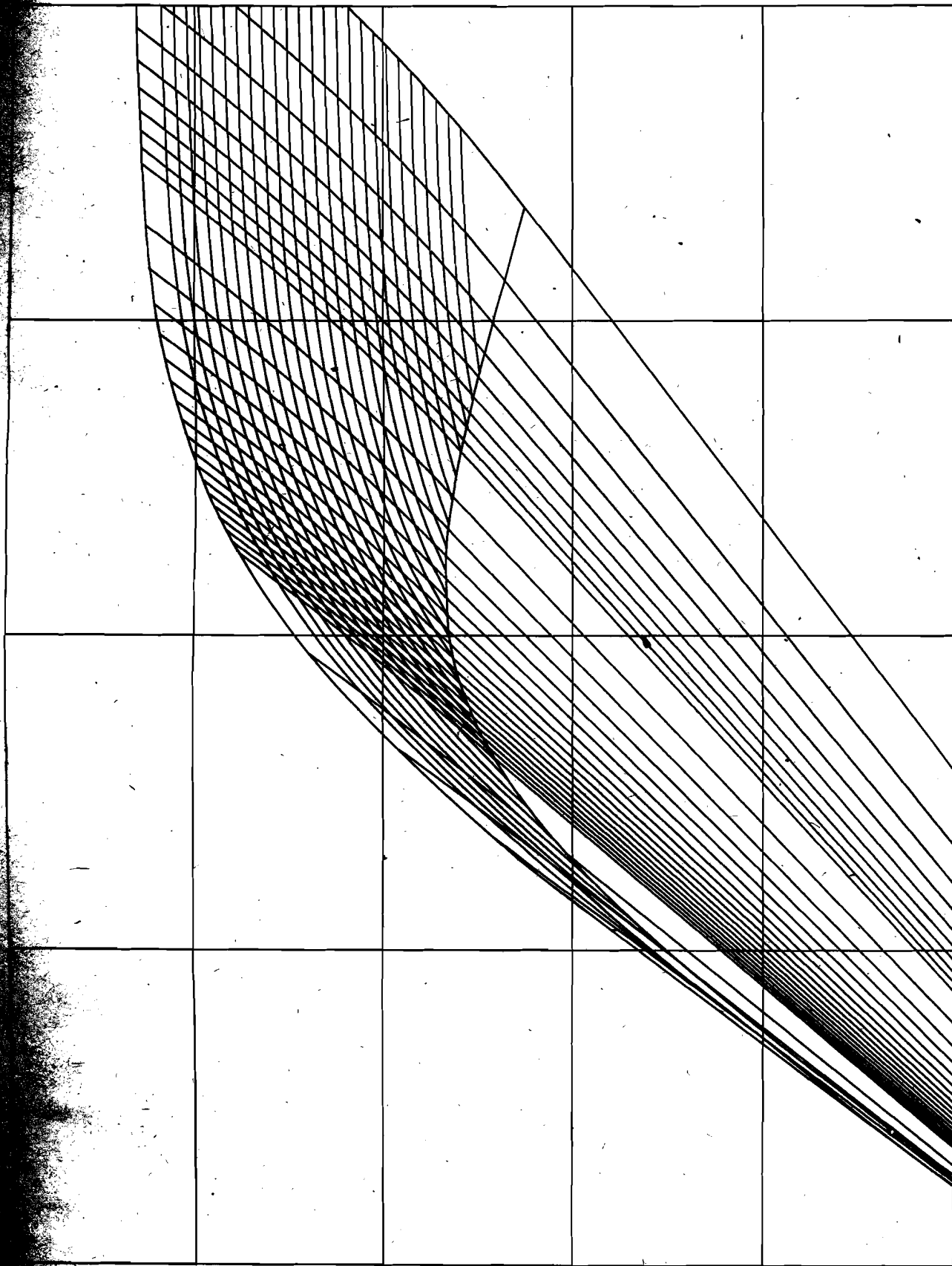
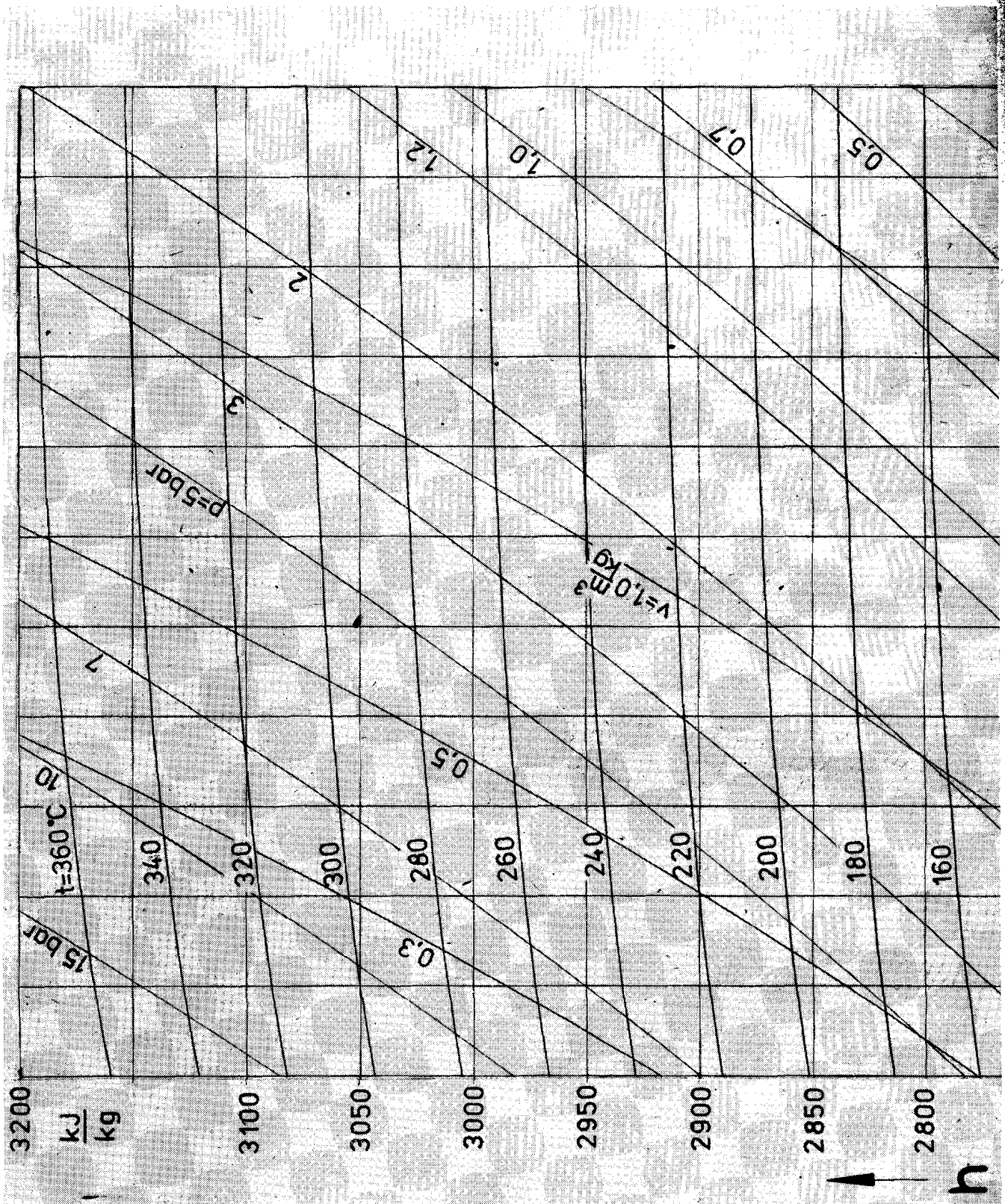


Bild 6. Mit dem EDVA-System BESM 6/DIGIGRAF erzeugtes h, s -Übersichtsdiagramm für Wasser nach IFC 1968 mit Isolinen für Druck und Temperatur (Tuschezeichnung)



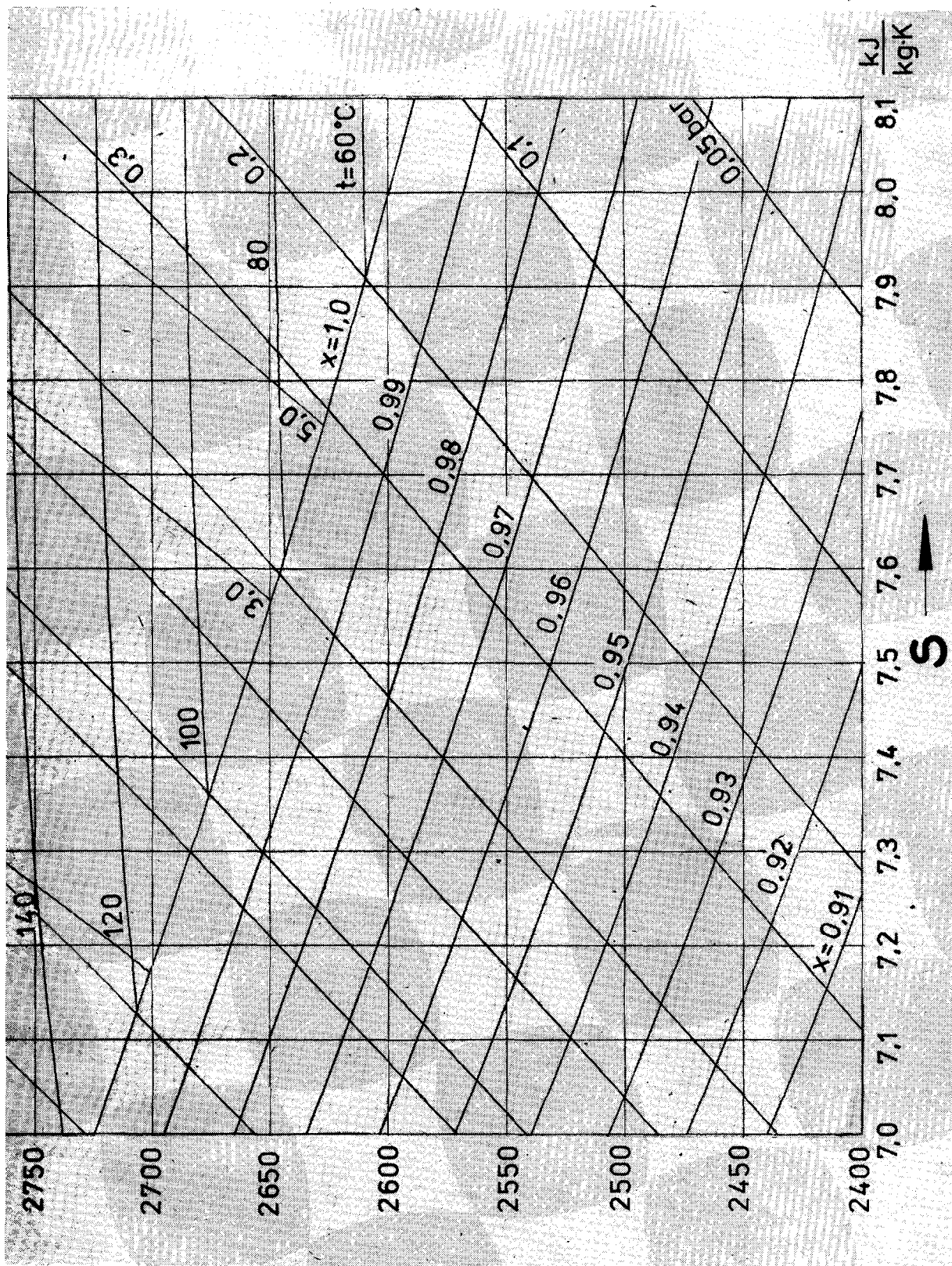


Bild 7. Mit BESM 6/DIGIGRAF erzeugter Ausschnitt eines h,s -Ablesediagrammes für Wasser nach IFC 1968 mit Isolinien für Druck, Temperatur und spezifisches Volumen (Kulzeichnung, manuell beschriftet)

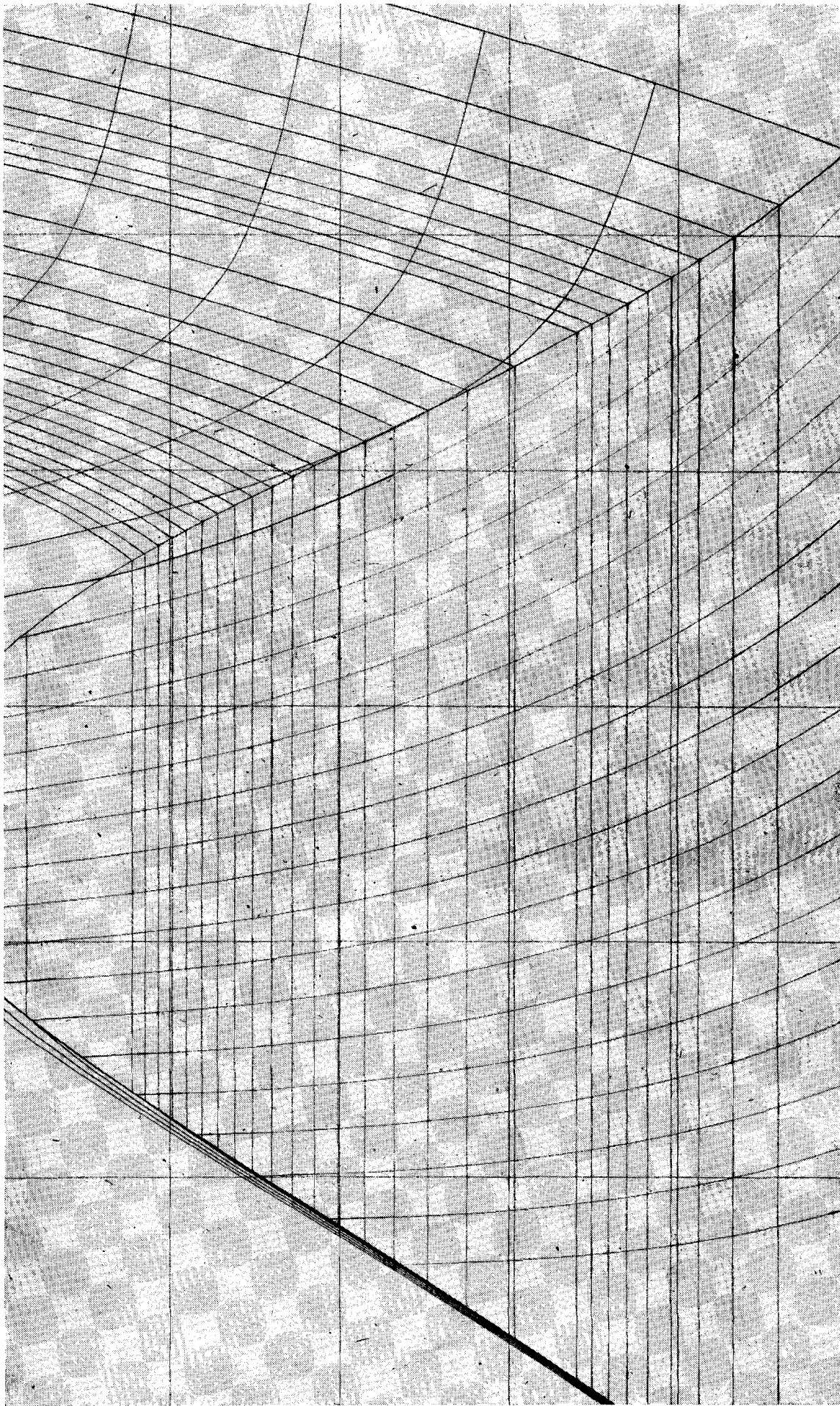


Bild 8. Mit BESM 6/DIGIGRAF erzeugtes T, s -Übersichtsdigramm für Wasser nach IFC 1968 mit Isolinien für Druck und Enthalpie (Kulzeichnung)

peratur erreicht, beginnt die Berechnung des Ausgangsdatensatzes im Zweiphasengebiet.

Auch er besteht aus Blöcken konstanter Temperatur. Innerhalb der Blöcke wird hier der Dampfanteil schrittweise von $x_d = 1$ bis auf $x_d = 0$ vermindert, so daß wieder die gleiche Blocklänge wie im Einphasengebiet entsteht. Der untere Teil des Bildes 2 veranschaulicht für eine Temperatur T_1 die Unterteilung (Blocklänge = 5). Abgespeichert werden für T_1 die im Bild 3 aufgeschriebenen Daten (x_{1di} ; y_{1di} ; z_{1di} ; ...; z_{v1di} ; Zustandsbereich) mit $i = 1, 2, \dots, 5$ Blocklänge. Damit sind alle Ausgangsdatensätze berechnet. Sie stehen auf einem externen Speicher für die weitere Bearbeitung zur Verfügung.

2.3. Interpolation der Isolinien

Der sich an die Bereitstellung der Ausgangsdatensätze anschließende Programmteil von DABERE realisiert die Interpolation der Isolinien. Da nur die Ausgangsdatensätze für die Bearbeitung herangezogen werden, ist der Algorithmus in sich geschlossen und benötigt keine weiteren Informationen.⁴ Es entstehen Wertetrios (x -Wert; y -Wert; z -Isolinienwert), die extern abgespeichert und vom Programm ZEICH direkt weiterverarbeitet werden. Da, wie beschrieben, die Ausgangsdatensätze aus Blöcken konstanter Temperatur aufgebaut sind, bietet es sich an, die Interpolation der Isothermen in allen Zustandsbereichen und der Isobaren im Zweiphasengebiet abweichend von der Interpolation beliebig anderer Isolinien zu gestalten. An dieser Stelle soll stellvertretend nur die Interpolation allgemeiner Isolinien erläutert werden. Als Beispiel dient der im T, p -Diagramm des Bildes 4 eingezeichnete Verlauf einer Isolinie, wobei auf der Dampfdruckkurve Anfangs- und Endpunkt liegen. Um die Zeichnung solcher Linien bis an die Grenzkurve heran realisieren zu können, werden aus dem Grenzkurvendatensatz die entsprechenden Randpunkte interpoliert, während sonst nur der Ausgangsdatensatz für das Einphasengebiet herangezogen wird.

Folgender Algorithmus wird bei der Bereitstellung der Isolinien gemäß Bild 4 realisiert. Im Ausgangsdatensatz des Einphasengebietes werden blockweise die Elemente nach benachbarten Werten zum vorgegebenen Isolinienwert z im betreffenden Zustandsgebiet (hier überhitzter Dampf) durchsucht. Aus den Koordinaten der gefundenen Punkte und ihren z -Werten erfolgt die Interpolation der zum Isolinienwert gehörenden Koordinaten, wobei sie wahlweise linear, einfach logarithmisch, doppelt logarithmisch oder einfach hyperbolisch durchgeführt werden kann. Damit ist gewährleistet, daß die unterschiedlichen funktionellen Abhängigkeiten der thermodynamischen Größen untereinander besser berücksichtigt werden. Der erste gefundene Punkt wäre in unserem Beispiel der Punkt 2, interpoliert aus den Punkten 21 und $d2g$ (Taulinie), im Temperaturblock T_2 . Zur Ermittlung des zugehörigen Isolinienpunktes auf der Taulinie werden neben dem Grenzkurvenpunkt der aktuellen Temperatur T_2 auch die Taulinienpunkte bei T_1 und T_3 benötigt. Sie werden aus dem Grenzkurvendatensatz gelesen. Im Beispiel ist zwischen $d1g$ und $d2g$ der Grenzkurvenpunkt 1 zu interpolieren. Bei der Bearbeitung des Blockes T_4 wird neben dem Punkt 4/1 noch ein weiterer zur Isolinie gehörender Punkt 4/2 gefunden. Werden jetzt beide Punkte in

der Reihenfolge ihrer Berechnung abgespeichert, so würde die später gezeichnete Kurve einen falschen Verlauf annehmen. Aus diesem Grund werden Zwischenspeicher angelegt, die bis zu drei Punkte einer Isolinie innerhalb eines Temperaturblockes getrennt voneinander aufnehmen können. Der erste im Block T_4 gefundene Punkt wird somit dem ersten Abschnitt, der bereits die Punkte 1 bis 4/1 enthält, zugewiesen. Die Werte der Punkte 5/2, 4/2 und 6 werden dem zweiten Speicherbereich zugeordnet. Je nach der Anzahl der interpolierten Punkte eines Blockes und der Lage des Grenzkurvenschnittpunktes sind verschiedene Varianten der Zwischenspeicherung vorgesehen, um die richtige Reihenfolge der Werte zu gewährleisten. Erst nachdem der gesamte Datensatz für einen Isolinienwert durchgesehen wurde, erfolgt die Zusammenfassung der drei möglichen Abschnitte zu einer Kurve.

Da die Interpolation im Zweiphasengebiet sinngemäß abläuft, kann auf ihre Erläuterung verzichtet werden. Die Einbeziehung der Grenzkurve wird in gleicher Weise vorgenommen. Mit dem Abschluß der Abarbeitung des Programmes DABERE liegen die abrufbereiten Isolinien extern gespeichert für den sich anschließenden Programmablauf von ZEICH vor.

2.4. Realisierung der Zeichnung

Bevor die eigentliche Zeichnung angefertigt werden kann, muß das Programm ZEICH das bereits erwähnte Archiv mit allen Steuerbefehlen zur Stiftbewegung anlegen. Da die hierfür benötigten Service-UP [9] Plotter-spezifisch sind, ist eine Übertragung auf andere EDVA-Systeme nicht möglich. Auf Grund des jedoch im Vergleich zum gesamten Programmsystem sehr geringen Umfangs dieses Programmes wäre der Einbau anderer Zeichenbefehle leicht möglich.

Dieser Abschnitt enthält eine kurze Erläuterung des Programmes ZEICH. Neben der Festlegung der Diagrammabmessungen und der Entscheidung zwischen linearer, logarithmischer oder hyperbolischer Teilung der Achsen müssen die Anfangs- und Endwerte des Diagrammes eingegeben werden. Zur Erzeugung des Koordinatennetzes sind vom Nutzer Werte festzulegen, für die entweder nur kurze Linienstücke oder Linien über das gesamte Diagramm gezogen werden sollen. Im Anschluß daran werden die von DABERE berechneten Isolinienwerte zu geschlossenen Kurvenzügen mittels Service-UP verbunden. Dieser Vorgang sei anhand eines Beispiels, im Bild 5 dargestellt, veranschaulicht. Die Datenreihen einer Isolinie liegen sortiert und erkennbar strukturiert vor. Jedes Kurvenstück wird für sich bearbeitet, indem zuerst ein Test für jeden Punkt feststellt, ob es sich innerhalb (Punkte 2, 3, 4) oder außerhalb (Punkte 1 und 5) des Diagrammes befindet. Würden für die Zeichnung in unserem Beispiel nur die Punkte 2, 3 und 4 herangezogen, entstünden je nach Punktdichte mehr oder weniger große Lücken bis zu den Diagrammrändern. Deshalb wurde ein Algorithmus konzipiert, der bei Überschreitung der Grenzen, für alle vorkommenden Fälle, zusätzliche Punkte auf den Diagrammgrenzen interpoliert. So werden im Beispiel aus den Koordinaten der Punkte 1 und 2 für den Diagrammgrenzpunkt ein y -Wert auf der Diagrammgrenzlinie x_A berechnet. Ein anders zu behandelnder Fall liegt an der Diagrammecke zwischen den Punkten 4 und 5 vor. Da sich Punkt 5 außerhalb des x - und y -Bereiches befindet, muß zunächst die Grenze ermittelt werden, auf der der zusätzliche Diagrammgrenzpunkt zu interpolieren ist. Dazu werden zwischen den betreffenden Punkten auf beiden Begrenzungslinien Werte interpoliert. Derjenige Wert, der innerhalb des zugehörigen Bereiches liegt, wird als Diagrammrandpunkt gezeichnet. Im Bild 5

⁴ Mit dem Stoffwert-Programmpaket des WB Thermodynamik könnten auch direkt (intern auf iterativen Wegen) die Isolinien berechnet werden, jedoch würde diese Vorgehensweise eine lückenlose Rechenfähigkeit, die sonst nur im technisch interessanten Bereich notwendig wäre, aller Unterprogramme erfordern. Der Aufwand, diese volle Funktionsfähigkeit stoffunabhängig zu erreichen, wäre erfahrungsgemäß weit höher als die Konzipierung eines sicheren Sortier- bzw. Interpolationsalgorithmus.

liegt der interpolierte x -Wert auf der Grenze y_E im Bereich $x_A \leq x \leq x_E$ und ist somit der richtige Grenzpunkt.

Für jeden entweder sofort übernommenen oder neu hinzu interpolierten Isolinienpunkt werden die noch quasidimensionenbehafteten x - und y -Werte unter Verwendung von Maßstabsfaktoren in ihre wahren Abstände zu den Koordinatenachsen umgerechnet. Geräte-spezifisch berechnen danach Service-UP die Anstiege in allen Punkten mit Hilfe ihrer benachbarten Werte, um schließlich geschlossene Linienzüge mit gleitender Veränderung des Anstieges zu erzeugen. Möglich ist die Ausführung der Diagramme als Tuschezeichnung mit zwei verschiedenen Strichdicken oder als Kulizezeichnung, zweifarbig.

3. Beispiele

Der Nachweis, daß der beschriebene Lösungsweg zur universellen Zustandsdiagramm-Erzeugung ausbauwürdig ist, wurde bereits mit einer früheren Programmversion [3] erbracht. Bild 6 zeigt ein mit dieser Version gezeichnetes h,s -Übersichtsdiagramm für Wasser nach IFC 68 [16]. Da eine Beschriftung durch das Zeichengerät DIGIGRAF sehr zeitaufwendig ist, sie aber manuell recht schnell vorgenommen werden kann, wird zum gegenwärtigen Bearbeitungsstand auf sie verzichtet. Ein h, s -Ablese-diagramm mit einem für technische Anwendungen vergrößerten Ausschnitt, welches durch das neueste Programmsystem [15] erzeugt wurde, ist im Bild 7 dargestellt. Im Unterschied zu Bild 6 konnte jetzt auch das Zeichnen der Kurven bis an die Grenzkurve und die Diagrammgrenzen uneingeschränkt realisiert werden. Als Beispiel der Variabilität des Systems sei ein T,s -Übersichtsdiagramm ebenfalls für Wasser hinzugefügt (Bild 8). Es enthält neben den Isobaren außerdem Isenthalpe.

4. Anwendung und Nutzung

Folgende Anwendungsmöglichkeiten maschinell erzeugter Diagramme konnten bisher erschlossen werden bzw. bieten sich an:

1. Nutzung von Übersichtsdiagrammen mit charakteristischen Größen für die Konzipierung und Analyse der verschiedensten thermodynamischen Prozesse;
2. Veranschaulichung des thermodynamischen Zustandsverhaltens von Fluiden und Vergleich mit dem über Zustandsgleichungen berechneten, vor allem bei Differentialquotienten und Transportgrößen;
2. Veranschaulichung der thermodynamischen Eigenschaften verschiedener Stoffe bzw. verschiedener Zustandsgleichungen eines Stoffes in Diagrammen mit reduzierten Größen;
4. Darstellung der Übergänge an Unterbereichsgrenzen von Zustandsgleichungen;
5. Ablese-diagramme für überschlägige Berechnungen von thermodynamischen Prozessen.

Daraus lassen sich drei übergeordnete Anwendungsgebiete

- Übersichtsdiagramme
- Ablese-diagramme
- Diagramme zur Aufstellung von Zustandsgleichungen

ableiten, denen aber jeweils z. T. mehrere der fünf Anwendungsmöglichkeiten zugeordnet werden können.⁵

Zu beachten ist bei allen Diagrammerzeugungen der Einfluß der Genauigkeiten, resultierend aus

- den Zustandsgleichungen bzw. den verwendeten experimentell ermittelten Ausgangsdaten,

⁵ Die bereits erfüllten Anforderungen von Praxispartnern führten zu dieser Systematisierung.

- dem Stützpunkt-Abstand des Ausgangsdatensatzes,
- dem Interpolationsverfahren,
- der mechanischen Genauigkeit des Zeichengerätes.

Der direkte Nutzen dieses Programmsystems ist schwer quantifizierbar. Fest steht jedoch, daß die Erstellung des Programmes einen einmaligen Aufwand darstellt. Gemessen an der Arbeitszeit, die zur herkömmlichen Erstellung des h,s -Diagrammes für Wasser [14] benötigt wurde, erscheint der in das Programmsystem investierte Arbeitsaufwand als gerechtfertigt. Diese Feststellung wird zusätzlich durch den realisierten hohen Verallgemeinerungsgrad, verbunden mit dem breiten Anwendungshorizont des Systems untermauert. Das Diagramm [14] konnte bereits mit gleicher Genauigkeit nachgezeichnet werden. Gleich gute Erfahrungen wurden im Wissenschaftsbereich Kältetechnik der TU Dresden mit dem Programm [7] gewonnen. Außerdem wurden von Praxispartnern angeforderte stark vergrößerte Ausschnitte von h,s -Diagrammen für Ablesezwecke bereitgestellt.

5. Zusammenfassung

Das vorliegende Programmsystem, bestehend aus den Hauptprogrammen DABERE und ZEICH, ist in der Lage, beliebige thermodynamische Zustandsdiagramme mit beliebigen Isolinien für reine Stoffe zu erzeugen. Der Nutzer benötigt nur wenige Eingabeinformationen, um das gewünschte Diagramm zeichnen zu können, vorausgesetzt, ihm liegen Unterprogramme zur Berechnung der Ausgangsdaten als Funktion von p,T und im Naßdampfgebiet x vor. Der WB Thermodynamik der TU Dresden kann hierfür ein komplettes Stoffwert-Programmpaket anbieten, das für die wichtigsten Stoffe alle in energetischen Prozeßberechnungen benötigten Größen bereitstellt. Sind solche Programme nicht greifbar, hat der Nutzer die Möglichkeit, den Ausgangsdatensatz direkt einzugeben. In gleicher Weise kann er auch sofort die zu zeichnenden Isoliniendaten einlesen. Die notwendigen Eingabedaten beschränken sich unabhängig davon auf

- die Wahl der Diagrammkoordinaten,
- die Wahl der Isolinien,
- die Festlegung des Druck- und Temperaturbereiches der Ausgangsdatensätze sowie Angaben zu den Zustandsbereichen und den Schrittweiten,
- die Diagrammbereiche in x - und y -Richtung.

Das Programmsystem steht ab 1985 zur Nachnutzung zur Verfügung. Es liegt als Quellmodul in FORTRAN IV bzw. als BESM6-Objektmodul vor. Im Rahmen seiner Möglichkeiten ist der WB Thermodynamik auch bereit, auf Anfrage Diagramme als Dienstleistung zu erstellen.

Literatur

- [1] Fischer, S.; Pawlowitsch, A.: Allgemeingültige Gesichtspunkte für die thermodynamische Berechnung von Energiemaschinen mit Hilfe von EDV-Anlagen. *Wiss. Z. TU Dresden*, 21 (1972) 2, S. 365–371
- [2] Fischer, S.; Pawlowitsch, A.; Sellmer, H.: Ein Beitrag zur Modellierung thermodynamischer Prozesse. *Energietechnik*, Leipzig, 29 (1979) 6, S. 218 bis 224
- [3] Grimmer, Th.: Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme mit dem EDVA-System BESM6–DIGIGRAF. Diplomarbeit Nr. 521, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1983
- [4] Kretzschmar, H.-J.; Klinger, J.; Grimmer, Th.: Maschinelle Berechnung und Zeichnung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme. Forschungsbericht, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1983
- [5] Naumann, F.: Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme mit dem EDVA-System BESM6–DIGIGRAF. Diplomarbeit Nr. 541, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1984
- [6] Kretzschmar, H.-J.; Klinger, J.; Naumann, F.: Maschinelle Berechnung und Zeichnung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme. Forschungsbericht, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1984
- [7] Kabus, F.: Aufstellen von EDV-Programmen zum Berechnen und Zeichnen von Zustandsdiagrammen. Großer Beleg, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1982

- [8] Software für das automatische Zeichengerät DIGIGRAF 1612 (DAPOS D-3G). Reihe ZfR-Informationen, Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentrum für Rechnertechnik, Berlin-Adlershof 1980
- [9] Anwenderdokumentation: BESM6-Software für das Zeichengerät DIGIGRAF 1008/DAPOS D. Rechenzentrum der TU Dresden, 1978
- [10] Kretzschmar, H.-J.; Klünger, J.: Zur stoffunabhängigen Berechnung von impliziten Zustandsfunktionen — ein Beitrag zur effektiven Bereitstellung von Stoffdaten in thermodynamischen Prozeßberechnungen der Energieanlagentechnik. Energietechnik, Leipzig, 34 (1984) 6, S. 210—215
- [11] Kretzschmar, H.-J.; Klünger, J.: Ein neues Programmpaket zur Bereitstellung von Stoffwerten in energietechnischen Berechnungen mit stoffunabhängigen Algorithmen für die thermodynamischen Funktionen. Forschungsbericht, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1983
- [12] Kretzschmar, H.-J.: Näherungen für thermodynamische Zustandsfunktionen beliebiger Variabler — angewendet als Iterationsstartwertgleichungen. Wiss. Z. TU Dresden, 33 (1984) 4, S. 139—146
- [13] Grigull, U.; Bach, J.; Reimann, M.: Die Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf nach „THE 1968 IFC FORMULATION“. Wärme- und Stoffübertragung, Berlin (West), 1 (1968) 4, S. 202—213
- [14] Elsner, N.; Klünger, J.: Mollier-*h,s*-Diagramm für Wasserdampf bis 800°C und 1000 bar, Werte nach „The 1968-IFC Formulation for Scientific and General Use“. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1977
- [15] Rügner, D.: Erzeugung beliebiger thermodynamischer Zustandsdiagramme mit dem EDVA-System BESM6—DIGIGRAF. Großer Beleg, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung 1984
- [16] Elsner, N.; Fischer, S.; Klünger, J.: Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982

Verfasser:

Dipl.-Ing. Frank Naumann
VEB Kombinat Kraftwerksanlagenbau
Dr.-Ing. Hans-Joachim Kretzschmar
Dr.-Ing. Jochen Klünger
Sektion Energieumwandlung der TU Dresden

Schlüsselwörter: EDV-Programme — thermodynamische Zustandsdiagramme — beliebige Zustandsgrößen — reine Stoffe — Flüssigkeit — Dampf — Naßdampf

Ключевые слова: вычислительные программы — диаграммы термодинамического состояния — любые величины состояния — чистые вещества — жидкость — пар — мокрый пар

Key terms: EDP programmes — thermodynamic diagrams of state — random variables of state — pure substances — liquid — steam — wet steam

Mots-clés: programme du traitement électronique des données — diagrammes d'état thermodynamiques — variables d'état arbitraires — matières pures — liquide — vapeur — humide