

R. MOLLIER UND DAS i - x -DIAGRAMM

A. ENDRÉNYI

Technische Universität, Budapest

(Received 26 July 1963)

Zusammenfassung—Anlässlich des hundertsten Geburtstages von R. Mollier und des vierzigsten Jahrestages der Veröffentlichung des i - x -Diagrammes wird das Wesen dieses Diagrammes, sowie die Rolle der verschiedenen Kurvenscharen besprochen. Der Aufsatz gibt eine Übersicht über die verschiedenen Anwendungsgebiete und eine kurze Zusammenfassung der Aufgaben, für deren Lösung das Diagramm geeignet ist. Neuere Abänderungsvorschläge, die auf Grund der befruchtenden Einwirkung des Mollier'schen Diagrammes entstanden sind, welche teils die Weiterentwicklung des Diagrammes selbst, teils die Erweiterung des Anwendungsgebietes zum Ziele haben, werden bekanntgegeben. Das Mollier'sche Diagramm ist nämlich unter anderem auch dazu geeignet, Stoffzustände durch die Luftzustände zu charakterisieren, die auf der Körperoberfläche entstehen. Die sich hieraus ergebenden weiteren Folgerungen und Entwicklungsmöglichkeiten befinden sich zur Zeit in Bearbeitung.

ZEICHENERKLÄRUNG

- i , Enthalpie des Gas-Dampfgemisches;
- x , Dampfgehalt des Trockenmittels;
- x' , Dampfgehalt des Trockenmittels im Satt-dampfzustand;
- t , Temperatur;
- t' , Sättigungstemperatur;
- p , Dampfteildruck;
- p' , Dampfteildruck im Sattdampfzustand;
- P , Trockenpotential ($= t' - t$);
- P_b , Atm. Gesamtdruck des Gas-Dampf-gemisches;
- P' , Veränderlicher Gesamtdruck des Gas-Dampfgemisches;
- φ , rel. Gasfeuchtigkeit;
- φ' , rel. Gasfeuchtigkeit bei verändertem Gesamtdruck;
- c , spez. Wärme bei konst. Druck;
- W , Stoff-Feuchte;
- r , Verdampfungswärme;
- α , Wärmeübergangszahl;
- σ , Stoffübergangszahl;
- Δ , Differenzzeichen.

- H , im hygroskopischen Bereich;
- F , im feuchten Bereich;
- W , Flüssigkeit (meist Wasser);
- b , barometrischer Druck.

1

MOLLIER'S Tätigkeit beabsichtige ich an dieser Stelle hauptsächlich und fast ausschliesslich vom Standpunkte der Stoff- und Wärmeübertragung zu behandeln, da dieser Gedankenkreis dem Gebiet dieser Zeitschrift nahe liegt.

Mollier veröffentlichte vor vierzig Jahren das für das Ingenieurwesen und für die Wissenschaft wichtige und unentbehrliche Hilfsmittel, das Zustandsdiagramm für Wasserdampf-Luftgemische, das sogenannte i - x -Diagramm, zu seinen Ehren als „Mollier'sches i - x -Diagramm“ bezeichnet. Dieser Jahrestag gibt Veranlassung, eine kurze Betrachtung der Entwicklung seiner Geschichte und der darin enthaltenen Möglichkeiten voranzustellen.

Diagramme solcher Art sind, wie das von Mollier in seinen grundlegenden Abhandlungen festgestellt wurde [1], [2], für die Zustandsänderung von aus zwei Komponenten bestehenden Gasgemischen bei konstantem Gesamtdruck gültig. Demnach ist die Anwendung dieser Diagramme nicht bloss auf Wasserdampf-Luftgemische beschränkt, sondern sie lassen

Indizes

- L , Gas (meist Luft);
- D , Dampf (meist Wasserdampf);
- nL , Gas-Dampfgemisch (meist Luft-Wasserdampf);

sich vorteilhaft z.B. auf Rauchgas-Luftgemische und neuerlich sogar auf verschiedene Lösungsmittel-(wie z.B. Tetrachlorkohlenstoff, Benzol, Toluol, Xylol) Gemische anwenden [3]. Hinsichtlich des Gesamtdruckes wirkt der atmosphärische Druck nicht beschränkend und bereits Mollier hat die Grundlagen des Überganges auf einen abweichenden Druck ausgearbeitet, anfangs zwar nur auf verschiedene atmosphärische Drücke, doch bestand kein Hindernis, sie auch auf hohe Drücke, bzw. auf Vakuum zu übertragen.

Vor allem sollen die gemeinsamen Grundlagen der die Zustandsänderung der feuchten Luft darstellenden Diagramme in grossen Zügen festgelegt werden. Der Zustand der feuchten Luft kann mit Hilfe von vier Zustandsgrössen (t , x , φ , i) bestimmt werden. Schon zwei von diesen bestimmen eindeutig den Zustand der feuchten Luft, der Wert der übrigen hängt von den ersten zwei ab. Es ist naheliegend, dass aus vier Veränderlichen je zwei ausgewählt und auf den Achsen eines Koordinatensystems aufgetragen, die übrigen zwei als Kurvenscharen dargestellt werden. Wenn aus praktischen Gründen φ stets als Parameter verwendet wird, so können die übrigen drei Zustandsgrössen in der Gruppierung $i-t$, $t-x$ und $i-x$ aneinander gereiht werden. Diese dreierlei Diagramme fanden in der Physik der feuchten Luft Verwendung und aus diesen sind die $i-t$ und $t-x$ -Diagramme gewissermassen als Vorläufer des durch Mollier geschaffenen und sich in der Praxis bewährten $i-x$ -Diagrammes zu betrachten.

So z.B. im durch Mueller im Jahre 1905 veröffentlichten $i-t$ -Diagramm werden die Kurven der konstanten Werte von φ , x , des spezifischen Gewichtes und der feuchten Temperatur dargestellt. Das Diagramm wurde für einen bestimmten Druck entworfen. Unter den $i-t$ -Diagrammen soll noch dasselbe von Höhn, unter den $x-t$ -Diagrammen das von Martin erwähnt werden. Kienzle hat sein Diagramm nach Mollier'schen Grundsätzen auf andere Stoffpaare berechnet. Ramzin hat im Jahre 1929 in der gleichen Weise wie Mollier in der Sowietunion das $i-d$ -Diagramm ausgearbeitet.

In der Reihe der $x-t$ -Diagramme war das in 1911 von Carrier vorgeschlagene das erste Temperatur - Feuchtigkeitsgehalt - Koordinaten-

system, welches nebst der Kurvenschar der φ -Werte und den diagonalen Geraden der Enthalpiewerte, auch die zu den konstanten feuchten Temperaturen gehörenden Geraden enthält. Das Diagramm erstreckt sich nicht auf das Nebelgebiet.

2

Nach solchen Vorläufern veröffentlichte Mollier [1] sein durch eine dritte Gruppierung der unabhängigen Veränderlichen entworfene $i-x$ -Diagramm.* Durch Auftragung der Feuchtigkeit (x) auf der Abszisse erhält man in einem schiefwinkligen Koordinatensystem für die Ordinaten (i) ein Diagramm, in welchem das Gebiet der am häufigsten vorkommenden Luftzustände auf eine verhältnismässig enge Fläche zusammenschumpft.

In dem schiefwinkligen Koordinatensystem sind die $i = \text{const.}$ Geraden schief und parallel zu der Abszisse $i = 0$.

Das grundlegende Element des Diagrammes ist die sogenannte Grenzkurve (Sättigungskurve). Eine Umrechnung auf veränderlichen Druck, hat aus dem ganzen Diagramm bloss auf diese Kurve, bzw. auf die hievon abgeleiteten konstante relative Feuchtigkeitskurve (φ) eine Auswirkung.†

Zwischen der Grenzkurve und der den Ursprung dieser Kurve bildenden Druckkurve besteht ein interessanter, aber gleichzeitig natürlicher Zusammenhang, welcher z.B. für das Luft-Wasserdampfgemisch bei Atmosphärendruck den Zusammenhang zwischen Dampfdruck und Temperatur darstellt. Die Übertragung dieses Zusammenhanges lieferte das entscheidende Element des $i-x$ -Diagrammes; die physikalische Bedeutung der durch die Sättigungsgrenze geteilten Flächen wurde von Mollier sofort erkannt und er gab zugleich die Charakterisierung derselben an. Die auf diese Weise

* Im Weiteren war ich überall bestrebt, die klassischen Bezeichnungen des Originalwerkes zu verwenden, auch wenn diese teilweise in einigen Beziehungen in der Zwischenzeit sich veränderten, oder eventuell ausser Gebrauch gesetzt wurden.

† Die Tatsache, dass Mollier später die Anwendung des Kurvensystems $\varphi < 1$ nicht mehr empfohlen hat, hat nurmehr historische Bedeutung. Diese Auffassung wurde von der Praxis im Weiteren nicht bestätigt.

abgegrenzten Flächen sind am besten in einem i - x -Diagramm von schiefwinkligem Koordinatensystem gekennzeichnet (das Wasserdampf-Luftgebiet, in welchem sich der Wasserdampf bei Atmosphärendruck im überhitzten Zustand befindet, wird durch die Grenzkurve von dem Nebelgebiet, bzw. von in der Nachbarschaft der gleichbleibenden feuchten Temperaturkurve, $t_w = 0$ befindlichen Eisgebiet abgegrenzt).

Ein anderes charakteristisches Liniennetz des i - x -Diagrammes wird durch die Geradenschar der Isothermen gegeben. Diese Geraden erleiden bei der Grenzkurve einen Richtungswechsel und schreiten im Nebelgebiet auf den Linien der konstanten feuchten Temperaturen (t_w), von den auf der Grenzkurve liegenden Schnittpunkten der sogenannten Ausgleichstemperaturen (Kühlgrenze) an fort. Bei Atmosphärendruck würden die Kurven $\varphi < 1$, über die Isotherme $t = 100^\circ\text{C}$ ihre Bedeutung verlieren, doch ist den die t_{100} überschreitenden φ -Linienabschnitten eine physikalische Bedeutung zuzuschreiben, wenn man nur jede ($\varphi < 1$)-Kurve als die für einen entsprechenden Gesamtdruck korrigierte Sättigungskurve auffasst. In diesem Fall ist die zu einem höheren Gesamtdruck gehörende Satttdampftemperatur entsprechende Isotherme genau so die Asymptote der zugehörenden modifizierten Sättigungskurve, wie bei Atmosphärendruck die Isotherme t_{100} der Kurve $\varphi_{1\text{ ata}} = 1$.

Das Netz des Diagramms wird noch durch die Geradenschar des absoluten Feuchtigkeitsgehaltes (x) ergänzt. Die Differenz der zu zwei verschiedenen Luftzuständen gehörenden x Werte (Verdunstungskapazität, Auftriebskraft, usw.) ist ein unmittelbares Mass der zwischen den zwei Luftzuständen auftretenden Stoffübertragung, insbesondere, wenn der eine Luftzustand sich auf der Grenzkurve befindet. Auf den Charakter solcher Punkte komme ich noch unten zurück. In dem Gebiet nicht zu hoher x -Werte, besteht zwischen diesen und den Dampfteildrücken (p) eine angenäherte Proportionalität. Diese hört bei höheren Werten auf, und erhöht bei höheren x -bzw. p -Werten die ohnehin vorhandenen Massstabschwierigkeiten, deren Beseitigung im Laufe der Weiterentwicklung des Diagrammes oft als eine der zu lösenden Aufgaben betrachtet wurde. Die Darstellung der

Dampfteildrücke ist im Übrigen ebenfalls Bestandteil der neueren i - x -Diagramme.

Bereits durch die Aufstellung des erwähnten Kurvenscharsystems wurde das i - x -Diagramm zur Grundlage zahlreicher funktioneller Zustandsänderungen des Wasserdampf-Luftgemisches, bezogen auf die Einheit $(1 + x)$, bzw. der Abwicklung zahlreicher operativer Vorgänge. Solche sind unter anderem—unter den verschiedensten Bedingungen—die Erwärmung, Kühlung, Befeuchtung, Entziehung der Feuchtigkeit, Mischung von Luftgemischen verschiedenen Zustandes, Dampf-, Wasser-Einblasung, usw. Während dieser Zustandsänderungen, erfolgende Niederschlagserscheinungen, bzw. der Begriff des Taupunktes erhalten eine eindeutige Erklärung.

All dies steht mit den Ergebnissen der Physik der feuchten Luft in engem Zusammenhang. Das bedeutet gleichzeitig, dass einige, mit den kleinen Werten von x verknüpften Voraussetzungen, so z.B. die angenäherte Konstanz der spezifischen Wärmen (c_L und c_D) in der Konstruktion des Diagrammes und in den Berechnungen unvermeidlich zum Ausdruck kommen.

Zur Kontrolle des Ablaufes der Zustandsänderung dient der Neigungswinkel, bestimmt durch die Parameter des Anfangs- und Endzustandes, oder während des Vorganges, in irgendwelchem Punkt desselben der Differentialquotient di/dx . Diese liefern ein Hilfsmittel in der Beurteilung des sog. „Gütegrades“ des Vorganges, welches mit dem die Werte der Zustandsänderungsrichtungen in kcal/kg enthaltenden Randmassstab die Kontrolle im hohen Mass erleichtert und zugleich die Sicherung des richtigen Ablaufes der zu entwerfenden Vorgänge ermöglicht.

Es wurde bereits erwähnt, dass das Mollier'sche i - x -Diagramm verständlicher Weise, sich bloss auf einen bestimmten Gesamtdruck bezieht. Die Praxis erfordert in vielen Fällen eine Anwendung auch bei anderen Drücken.

Die zu den abweichenden Drücken gehörenden φ -Kurven unterscheiden sich untereinander bloss in der Wertbezeichnung. Zum Beispiel im Fall $P_B/P' = 0,9$ entspricht die $\varphi = 0,9$ -Linie der zum Druck P' gehörenden $\varphi' = 1$ Sättigungskurve. Die t_w -Geraden—obwohl diese ihre

Richtungen beibehalten—verändern gleichzeitig ihre Lage derart, dass ihre Schnittpunkte mit den $t_{nL} = t$ Linien, auf dem jeweiligen Gesamtdruck (P') entsprechenden Sättigungslinie liegen.

3

Diese glänzende Ausstattung des i - x -Diagrammes ermöglicht, dass, abgesehen von den Untersuchungen thermodynamischer Natur, eine ganze Reihe von Aufgaben industriellen Charakters mit seiner Hilfe unmittelbar gelöst, als Ausgangspunkt genauer Folgerungen und konkreter Bemessungsverfahren verwendet und durch diese sogar die wissenschaftliche Methodik bedeutend weiterentwickelt werden kann.

Das i - x -Diagramm ist z.B. geeignet für die Darstellung der Vorgänge in Klimaanlage, Heizung, Kühlung, feuchte Kühlung, Dampf-einblasung, usw. mit inbegriffen;

für die Darstellung des Vorganges der Entnebelung;

zur Untersuchung der Entfeuchtung der Luft;

zur Untersuchung der Verdunstung (bei Trocknung oder Wasserzerstäubung);

zur Darstellung von Kompressionsvorgängen und zur Bestimmung der entstehenden Feuchtigkeitsabscheidung;

zur Berechnung der Trocknungsvorgänge;

zur Berechnung und Untersuchung der Wärmerückgewinnung in Trockenanlagen.

Im gegebenen Rahmen wäre es schwer all die Ergebnisse aufzuzählen, welche im Laufe der verschiedensten Operationen durch Verwendung der i - x -Diagramme gewonnen werden konnten, deshalb wünsche ich die vielseitige Verwendbarkeit des Mollier'schen Gedankens bloss mit beispielsweise Hinweisen auf einige Gebiete zu zeigen, welche jedoch selbst in ihrer skizzenhaft aufgeführten Form hier die Einfachheit und Übersichtlichkeit des Verfahrens bezeugen.

Mit Hilfe des i - x -Diagrammes können Vorgänge aus einem festen Punkt des Diagrammfeldes ausgehend, danach beurteilt werden, in welchem Teil des Diagrammfeldes sich der Endzustand befindet; die Mittel hiezu sind die

Verdunstungskapazität, der Enthalpieunterschied und der sog. thermische Wirkungsgrad.*

Der Vergleich kann zwischen Vorgängen mit gleichbleibenden Δx oder Δi , unter gleichen abs. Feuchtigkeits-, bzw. Enthalpiegrenzen vorgenommen werden, bei veränderlicher Temperatur, ferner unter veränderlichen Grenzen, bei gleichbleibender Temperatur, und so ferner d.h. sozusagen auf welchem Gebiet des Diagrammfeldes immer befindlichen Vorgängen. Von besonderem Interesse ist das, wie weiter unten gezeigt wird, beim Vergleich von Trocknungsvorgängen und sogar beim Entwerfen solcher.

Eine weitere Entwicklungsstufe der mit Hilfe der Mollier'schen Diagramme durchführbaren Untersuchungen bedeuten diese, welche den Einfluss der aus dem Lewis-Gesetz

$$L = \frac{\alpha}{\sigma} \frac{1}{c_{nL}} = 1$$

folgenden Werte zeigen und zwar sowohl entlang einem, aus bestimmtem Luftzustand ausgehenden, gleichbleibender feuchter Temperatur entsprechendem (nahezu adiabatischen) Vorgang, bei seiner Ausgleichtemperatur, wie im Fall des aus dem gleichen Punkt ausgehenden, aber nicht die Ausgleichtemperatur ergebenden Vorganges. Gegenstand einer weiteren Untersuchung ist die Änderung der Werte α/σ innerhalb $L = 1$, in den verschiedenen Feldern der Sättigungslinie, bei verschiedenen x Werten. Diese Frage wird durch die thermodynamisch richtige Fassung der $L = 1$ bildenden Zahlen behandelt, d.h.

$$\frac{\alpha}{\sigma} = c_{nL} = c_L \frac{1 + (c_D/c_L) x'}{1 + x'}$$

Daraus folgt, dass bei kleinen Werten von x' ($\alpha/\sigma = c_L$, bei $x' = \infty$, d.h. bei $t = 100^\circ\text{C}$ $c_{nL} = c_D$, folglich zeigt das Verhältnis des Wärmeübergangs zum Stoffübergang mit steigender Temperatur eine steigende Tendenz.

Weitere Erörterungen befassen sich besonders mit dem Zusammenhang $(\alpha/\sigma) = c_{nL} = r(\Delta x'/\Delta t)$, an der Grenzkurve ($\Delta t = t_L - t'$),

* Das ist kein wirklicher Wirkungsgrad, da derselbe nicht bloss mit Energien, sondern mit der Energieäquivalenz der verdunsteten Mengen arbeitet, daher im Gegensatz zu dem Wirkungsgrad im energetischen Sinn auch grösser als 1 sein mag.

bei der Änderung von t_L . Hieraus lässt sich ausdrücken: $\Delta t = A\Delta x'$, wo $A = (r/c_{nL})$ bedeutet. So gelangen wir zum Ausdruck des in der Trocknungstheorie so wichtigen Ausdruck ($\Delta t = P$) des Trocknungspotentials. Das kann auch als Funktion von t' in der Form $P = P(t')$ aufgeschrieben werden und ist in Abhängigkeit der Anfangsbedingungen zeichnerisch darstellbar. Mit der so gewonnenen Hilfskurve können auch solche Aufgaben gelöst werden, welche im i - x -Diagramm durch unmittelbare Konstruktion nicht durchführbar sind, so z.B. das Aufsuchen der Temperaturen t und t' , die zu einem gegebenen Potential gehören. Interessant ist dabei die Feststellung, dass die Ziffer A mit wachsendem t' abnimmt und dass

$$\lim_{t' \rightarrow 100^\circ} A = \left(\frac{r}{c_{nL}} \right)_{t' \rightarrow 100^\circ} = \frac{544,3}{c_D}$$

Durch die Ziffer A wird im allgemeinen der Wärme und Stoffaustauschvorgang, insbesondere bei Trocknungsvorgängen gekennzeichnet und die physikalische Deutung des Vorhergehenden ist die, dass die mit wachsendem t' auf gleiches Trocknungspotential entfallende Verdunstungskapazität ansteigt, d.h. die „Ausnützung“ des Potentials mit wachsender Temperatur sich erhöht. Diese Feststellung ist auch dann gültig, wenn es sich um Vorgänge handelt, welche bei gleichbleibendem t_L und steigender rel. Feuchtigkeit verlaufen.

Die Forderung einer konstanten Temperatur t_L wird meistens durch die Gegebenheiten gestellt, das Kennzeichen solcher Vorgänge ist das stetig abnehmende Potential. Das zweite Prinzip des Aufbaues der Trocknungsvorgänge ist die Konstanz des Potentials, das—insbesondere im hygroskopischen Trocknungsabschnitt poröser Körper—mit der Erhöhung der Temperaturgrenzen verbunden ist, gleichzeitig aber die Konstanz der Verdunstungsleistung zu sichern vermag. Die Verwirklichung dieses Prinzips wird durch das Einzeichnen der sogenannten Äquipotentiallinien in das i - x -Diagramm erleichtert.

Die Sicherung der Konstanz des Potentials im vorerwähnten hygroskopischen Abschnitt erfordert die Erhöhung der Temperatur des Trockenmittels, womit parallel die des Trocken-

gutes gleichzeitig vorsieht, bedingt eigentlich durch die Stofftemperaturkennlinie. Es soll noch bemerkt werden; wenn die Trockenanlage so bemessen werden sollte, dass im hygroskopischen Abschnitt, anstatt des dort gültigen Trockenpotentials P_H ein, die ursprüngliche Verdunstungsleistung sicherndes Potential P_F (d.h. Potentialwert des konstanten Abschnittes) zur Geltung komme, so wird dem Genüge geleistet, wenn das angewendete Potential zu P_F^2/P_H gewählt wird.

Dieses wichtige Bemessungsprinzip als Forderung, wird insbesondere den kontinuierlichen Trocknern gegenüber gestellt, bei welchen das Gut gegen das Trockenmittel, im Gegenstrom oder im Gleichstrom läuft. Das i - x -Diagramm macht die Darstellung solcher Vorgänge mehr oder weniger möglich, es kommen stets neuere Methoden zum Vorschein, um damit die immer mehr in den Vordergrund tretenden Material-Zustandsänderungen zu erfassen und im i - x -Diagramm mit dem jeweiligen Luftzustand in irgendeine Koordination zu bringen.

Diese Bestrebungen waren nicht immer erfolgreich. Es gibt spezielle Fälle und Umstände, in welchen diese Darstellung schon seit lange her möglich ist und auch angewandt wurde. Das sind jene Fälle, in welchen der Stoffzustand und der damit im Gleichgewicht stehende Gaszustand ungefähr mit den gleichen Parametern zu kennzeichnen sind. Dieser Fall tritt bei der Ausgleichstemperatur ein, wenn der sog. „Materialpunkt“ auf der Grenzlinie liegt und seine Temperatur annähernd gleich der Kühlgrenztemperatur ist. Das hatte bereits Grubemann [4] erkannt und deshalb die Benennung Gutzpunkt benützt. In einer besser entwickelten Form wird dasselbe durch das vorerwähnte Eintragen der Temperaturverlaufslinie bei Trocknung feuchter Güter in das i - x -Diagramm, ausgedrückt. Bei der weiteren Verwendungsmöglichkeit dieser Methode treten jedoch Schwierigkeiten auf. Vorläufig gelang es die Gutzustandsänderung in der Begleitung der koordinierten Luftzustandsänderung in den einfachsten Fällen (Trocknung bei konstanter Temperatur, ferner Gleichstrom- und Gegenstromtrocknung einstufig, ohne Rezirkulation) darzustellen, mit Hilfe des etwas modifizierten Potentialbegriffs.

Auf dieser Weise lassen sich die „Bewegung“ sowohl des Luftzustandes, wie des Gutzustandes im i - x -Diagramm befriedigend veranschaulichen. Die bei der Trocknung vorherrschende Gutzustandsänderung tritt stark hervor und wird von der Luftzustandsänderung sozusagen nur begleitet.

Die Bestrebungen, den Gutzustand mit dem i - x -Diagramm in eine noch engere Verbindung zu bringen, machen sich in der Literatur in der letzten Zeit bemerkbar. Hirsch [5], Kirschbaum [6], Grubenmann [4] zeigen die ersten Zeichen dieser Bestrebung. Lykow [7], Endrényi [8] und später Krischer [9] haben im i - x -Diagramm die $W = \text{Konst.}$ Linien auf Grund des statischen Zusammenhanges der Sorptionsisothermen mit der Stoff- und rel. Luftfeuchtigkeit konstruiert. Selbst die bei konstanter Temperatur aufgenommenen statischen Sorptionsisothermen lassen sich leicht in das i - x -Diagramm einfügen. Bei diesen Darstellungen bleibt aber die Frage dahingestellt, ob und in welchem Masse die dynamischen Vorgänge der Desorption durch die mit statischen Methoden gewonnenen Ergebnissen vertreten werden können.

Die Kurvenschar $W = \text{Konst.}$ kann auch im System der vorerwähnten Trockenpotentialdiagramme aufgetragen werden, wodurch die Darstellung der Trocknungsvorgänge weiter entwickelt werden kann.

Zunächst sollen diese Verfahren dazu bestimmt sein, die Zustandsänderung poröser Körper im hygroskopischen Abschnitt zu beschreiben. Dabei müssen die obenerwähnten offenen Fragen bezüglich der Zusammenhänge der statischen und dynamischen Felder stets beachtet werden. Das zeigt sich teilweise in den neueren Versuchen, die die Entwicklung weiterer Methoden zum Zweck haben [10] [11]. Die ersterwähnte Methode geht von der selbstständigen Auffassung der Gutzustandsänderung bzw. vom Gutsenthalpiediagramm aus, vereinigt dieses mit dem i - x -Diagramm; dadurch ist es geglückt, Luft- und Gutzustandsänderungen verschiedener Trockenvorgänge nebeneinander darzustellen. Das andere Verfahren kennzeichnet die Gutzustände, im gleichbleibenden Rahmen des i - x -Diagrammes, durch äquivalente Luftzustände und versucht auf diesem Weg den Verlauf der hygroskopischen Zustandsänderung

zu beschreiben. Diese Methode liefert eine neue Begriffsbestimmung der Kühlgrenze im Abschnitt der hygroskopischen Zustandsänderung, ferner sowohl die Parameter der hygroskopischen Ausgleichstemperatur, wie auch die mathematischen Ausdrücke der auf diese Punkte bezogenen Stoff- und Wärmeübertragung. Die Kurve, welche die dynamischen Ausgleichspunkte enthält, mag im Gegensatz zur statischen Desorptionskurve, den Namen der dynamischen Desorption tragen. Durch diese Methode gelang es, Zusammenhänge zwischen Stoffeigenschaften und den Parameters der zugeordneten Luftzustände herzustellen.

Mit derselben Methode gelang es, das Verhalten des Lewis-Gesetzes an jeder Stelle des hygroskopischen „Raumes“ klarzulegen. Das Lewis-Gesetz erhält eine neue Fassung und jeder Punkt des hygroskopischen Raumes kann mit der obenerwähnten Ziffer L gekennzeichnet werden, welche zu jedem hygroskopischen Raumpunkt der Zustandsänderung poröser Körper zuzuordnen ist.

Ein zweifelloser Nachteil dieser Methode zeigt sich in der Vereinfachung der Vorbedingungen der abgeleiteten Ergebnisse, obwohl der begangene Fehler—wie es gezeigt wurde—innerhalb der zugelassenen Grenzen bleibt. Trotzdem ist es nicht zweifelhaft, dass die bisherigen Methoden einer Vervollkommnung benötigen, mit Heranziehung der Erhaltungsgleichungen, Ähnlichkeitsgesetze und Grenzschichttheorie, wodurch weitere Kenntnisse über Zustandsänderungen und Grenzschichtprobleme des hygroskopischen Abschnittes zu erwarten wären, welche schliesslich neue und einleuchtend nützliche Beiträge zur Physik poröser Körper zu liefern berufen seien.

Die Vielseitigkeit des i - x -Diagrammes hat die Forschung in einer verhältnismässig kurzen Zeit angespornt, für seine Anwendung immer wieder neue Gebiete zu suchen. Es sei nur flüchtig erwähnt, dass es in der letzten Zeit z.B. gelungen ist, auch die konduktive Trocknung in die „Sprache“ des i - x -Diagrammes umzusetzen [12] [13], was zur Lösung mancher Probleme beigetragen hat, wo bisher Schwierigkeiten auftraten. Diese Methode verspricht neuartige Erkenntnisse der sog. konduktiven Stoffeigenschaften im hygroskopischen Gebiet, sowohl

über die Zusammenhänge, mit den „konvektiven“ (z.B. Bindungsenergie), ferner über die Stoff- und Wärmeübertragungsverhältnisse dortselbst.

4

Das i - x -Diagramm eröffnete einen fruchtbaren Boden für viele Forscher zur Weiterentwicklung des Diagrammes. Aus diesen sind die bedeutendsten: Grubenmann [4] und Kirschbaum [6], die das Mollier'sche Diagramm in rechtwinkligen Koordinaten darstellten. Letzterer war bestrebt, die Gleichgewichtszustände bei verschiedenen Strömungsverhältnissen und Stoffkennwerten darzustellen, mit besonderer Rücksicht der Ausgleichstemperatur.

Auch viele andere Forscher (Jahnke, Koch, usw.) waren und sind bestrebt, mit zweckdienlichen Vorschlägen zur Erhöhung der vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten des i - x -Diagrammes ihrerseits Beiträge zu leisten.

Tiefere Beziehungen zu den thermodynamischen Prinzipien bedeutete das von Bošnjaković [14] entworfene x - s (x -Entropie) Diagramm. Dieses ist z.B. geeignet für die Untersuchung und Erklärung meteorologischer Erscheinungen, für den Nachweis der Irreversibilität und des Entropiezuwachses der Trocknungs-, Verdampfungs-, und Mischungsvorgänge, usw.

5

Der Abschnitt des i - x -Diagrammes aus dem reichen Lebenswerk R. Mollier's, verkündet an und für sich den einmaligen Wert seiner Schöpfung, welche nicht nur eine neue einfache und elegante Behandlung bisher bekannter Erscheinungen sicherte, sondern durch ihren Ideenreichtum zum Vorgänger bisdahin garnicht geahnter Untersuchungsmethoden wurde und eine Entwicklung in Bewegung setzte, die bereits jetzt einen grossen Ertrag aufweist und noch weitere Erfolge verspricht, welche sich derzeit garnicht überblicken lassen. Jeder Bearbeiter der physikalisch-technischen Wissenschaften, dem es gegeben wurde, auf dem Wege des grossen Bahnbrechers tätig sein zu können,

wird anlässlich des hundertsten Jahrestages mit pietätvoller Erinnerung an den heute noch lebenden schöpferischen Geist von Richard Mollier denken.

LITERATURVERZEICHNIS

1. R. MOLLIER, Neue Diagramme zur technischen Wärmelehre, *Z.V.D.I.* **58**, 271–275 (1904). Ein neues Diagramm für Dampfluftgemische, *Z.V.D.I.* **67**, 869–872 (1923).
2. R. MOLLIER, Das i - x -Diagramm für Dampfluftgemische, *Z.V.D.I.* **73**, 1009–1013 (1929).
3. J. H. PERRY, *Chemical Engineers Handbook*, third ed. McGraw-Hill, New York (1950).
4. M. GRUBENMANN, *i - x -Diagramme feuchter Luft*, 3. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (1952).
5. M. HIRSCH, *Die Trockentechnik*, VII. Julius Springer Berlin (1932).
6. E. KIRSCHBAUM, Der Verdunstungsvorgang in mathematischer und graphischer Darstellung, *Z.V.D.I.* **93**, 927–932 (1953); Zustand des Gases und nassen Gutes beim Trockenvorgang, *Chem. Ing. Techn.* **23**, 129–134 (1951).
7. A. W. LYKOW, *A szárítás elmélete* (Theorie der Trocknung). Nehézipari könyvkiadó, Budapest (1952).
8. A. ENDRÉNYI, *A szárítás technológiája, különös tekintettel a felületi szárításra* (Technologie der Trocknung, mit besonderer Rücksicht auf die Oberflächentrocknung) Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest (1955).
9. KRISCHER-KRÖLL, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Vol. 1. Springer-Verlag, Berlin (1956).
10. W. MALTRY, Vorschlag eines i - x -Trocknungsdiagramms, *Energietechnik*, **11**, 509–517 (1961).
11. A. ENDRÉNYI, Heat and mass transfer in the convective process of hygroscopic materials, *Acta Technica of the Hungarian Academy of Sciences*. (In press.)
12. A. ENDRÉNYI, Wärme- und Stoffübergang in dem hygroskopischen Abschnitt der Trocknung (in russisch) *Teplo i massoperenos. Tom IV. Teplo i Massoperenos v processach suschki*, Red. A. W. Lykow und B. M. Smolski, Gosenergoizdat, Moskwa (1962).
13. A. ENDRÉNYI, Caractéristique de séchage des différentes pâtes, *A.T.I.P. Bulletin, Paris*, 113–124 (1956).
14. T. BOŠNJAKOVIĆ, *Technische Thermodynamik*, Vol. 2. Steinkopf, Dresden–Leipzig (1951).
15. W. HÄUSSLER, Das Mollier i - x -Diagramm für feuchte Luft und seine technischen Anwendungen, Verl. Steinkopf, Dresden (1960).
16. G. GOURDET und A. PROUST, *Les Diagrammes Thermodynamiques*, pp. 414. Dunod, Paris (1950)

Abstract—On the occasion of the hundredth birthday of R. Mollier and the fortieth anniversary of the publication of the i - x diagram, the essence of this diagram and the significance of the various

families of curves are discussed. The article presents a survey of the diverse fields of application and a short synopsis of problems which can be solved by use of the diagram. Recently suggested alterations, originated from the prolific influence of Mollier's diagram and intending both, further development of the diagram itself and extension of its applications are stated. Mollier's diagram is also useful in characterizing states of mass by states of air arising from a body surface. Resulting conclusions and evolutions are presently in the process of elaboration.

Résumé—A l'occasion du 100^e anniversaire de R. Mollier et du 40^e anniversaire de la publication du diagramme $i-x$ on présente ici une étude de ce diagramme et de la signification de ses familles de courbes. On fait une synthèse des divers champs d'application et une brève revue des problèmes qu'il permet de résoudre.

Devant l'importance grandissante du diagramme de Mollier on a suggéré récemment des modifications à la fois pour le compléter et permettre d'étendre le champ de ses applications. Le diagramme de Mollier est également utile pour caractériser l'état de masse à partir des états de l'air s'élevant au-dessus de la surface d'un corps. Les conclusions et les évolutions qui en résultent sont actuellement en cours d'étude.

Аннотация—По случаю столетия со дня рождения Р. Молье и сороковой годовщины со дня опубликования $i-x$ диаграммы рассматривается сущность этой диаграммы и значение различных семейств кривых. Статья представляет обзор различных областей применения диаграммы и краткую сводку задач, которые можно решить с её помощью. Излагаются предложенные в последнее время изменения, вызванные большим влиянием диаграммы Молье и предназначенные как для дальнейшей разработки самой диаграммы, так и для расширения сферы её применения. Диаграмму Молье также удобно применять при характеристике состояний массы через состояния воздуха, появляющегося на поверхности тела. Выводы и дальнейшее развитие диаграммы продолжают разрабатываться.