

## DIN EN ISO 6976



ICS 75.060

**Erdgas –****Berechnung von Brenn- und Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex aus der Zusammensetzung (ISO 6976:1995 + Corrigendum 1:1997 + Corrigendum 2:1997 + Corrigendum 3:1999); Deutsche Fassung EN ISO 6976:2005**

## Natural gas –

Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition (ISO 6976:1995 including Corrigendum 1:1997, Corrigendum 2:1997 and Corrigendum 3:1999);

German version EN ISO 6976:2005

## Gaz naturel –

Calcul du pouvoir calorifique, de la masse volumique, de la densité relative et de l'indice de Wobbe à partir de la composition (ISO 6976:1995, Corrigendum 1:1997, Corrigendum 2:1997 et Corrigendum 3:1999 inclus);

Version allemande EN ISO 6976:2005

Gesamtumfang 69 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN  
Normenausschuss Bergbau (FABERG) im DIN  
Normenausschuss Gastechnik (NAGas) im DIN

## **Nationales Vorwort**

Diese Norm enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm ISO 6976:1995, die im Technischen Komitee ISO/TC 193/SC 1 „Analyse von Erdgas“ (Sekretariat: NEN) ausgearbeitet wurde. Das zuständige nationale Gremium ist der Arbeitsausschuss NMP 573 „Gasanalyse und Gasbeschaffenheit“ des Normenausschusses Materialprüfung (NMP).

**Deutsche Fassung**

**Erdgas —  
Berechnung von Brenn- und Heizwert, Dichte, relativer Dichte  
und Wobbeindex aus der Zusammensetzung  
(ISO 6976:1995 + Corrigendum 1:1997 + Corrigendum 2:1997  
+ Corrigendum 3:1999)**

Natural gas —  
Calculation of calorific values, density, relative density and  
Wobbe index from composition  
(ISO 6976:1995 including Corrigendum 1:1997,  
Corrigendum 2:1997 and Corrigendum 3:1999)

Gaz naturel —  
Calcul du pouvoir calorifique, de la masse volumique, de la  
densité relative et de l'indice de Wobbe à partir de la  
composition  
(ISO 6976:1995, Corrigendum 1:1997, Corrigendum 2:1997  
et Corrigendum 3:1999 inclus)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 17. April 2005 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

# Inhalt

|                                                                                         | Seite     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vorwort</b> .....                                                                    | <b>4</b>  |
| <b>1 Anwendungsbereich</b> .....                                                        | <b>5</b>  |
| <b>2 Begriffe</b> .....                                                                 | <b>6</b>  |
| <b>3 Kurzbeschreibung</b> .....                                                         | <b>8</b>  |
| <b>4 Verhalten idealer und realer Gase</b> .....                                        | <b>8</b>  |
| 4.1 Verbrennungsenthalpie .....                                                         | 8         |
| 4.2 Berechnung des Realgasfaktors .....                                                 | 9         |
| <b>5 Berechnung des molaren Brennwertes/Heizwertes</b> .....                            | <b>9</b>  |
| 5.1 Ideales Gas .....                                                                   | 9         |
| 5.2 Reales Gas .....                                                                    | 10        |
| <b>6 Berechnung des massebezogenen Brennwertes/Heizwertes</b> .....                     | <b>10</b> |
| 6.1 Ideales Gas .....                                                                   | 10        |
| 6.2 Reales Gas .....                                                                    | 11        |
| <b>7 Berechnung des volumenbezogenen Brennwertes/Heizwertes</b> .....                   | <b>11</b> |
| 7.1 Ideales Gas .....                                                                   | 11        |
| 7.2 Reales Gas .....                                                                    | 12        |
| <b>8 Berechnung von relativer Dichte, Dichte und Wobbeindex</b> .....                   | <b>12</b> |
| 8.1 Ideales Gas .....                                                                   | 12        |
| 8.2 Reales Gas .....                                                                    | 13        |
| <b>9 Genauigkeit</b> .....                                                              | <b>14</b> |
| 9.1 Präzision .....                                                                     | 14        |
| 9.2 Richtigkeit .....                                                                   | 17        |
| 9.3 Ausdruck der Ergebnisse .....                                                       | 17        |
| <b>10 Tabellen empfohlener Daten</b> .....                                              | <b>18</b> |
| <b>Anhang A (normativ) Symbole und Einheiten</b> .....                                  | <b>29</b> |
| <b>Anhang B (normativ) Werte für Hilfskonstanten etc.</b> .....                         | <b>31</b> |
| B.1 Universelle Gaskonstante .....                                                      | 31        |
| B.2 Kritische Größen und azentrischer Faktor .....                                      | 31        |
| B.3 Eigenschaften trockener Luft .....                                                  | 31        |
| B.4 Verdampfungsenthalpie von Wasser .....                                              | 32        |
| <b>Anhang C (informativ) Umrechnung von Volumenanteilen in Stoffmengenanteile</b> ..... | <b>35</b> |
| <b>Anhang D (informativ) Rechenbeispiele</b> .....                                      | <b>36</b> |
| D.1 Molarer Brennwert (Abschnitt 5) .....                                               | 36        |
| D.2 Massenbezogener Brennwert (Abschnitt 6) .....                                       | 36        |
| D.3 Volumenbezogener Brennwert (Abschnitt 7) .....                                      | 37        |
| D.4 Relative Dichte, Dichte und Wobbeindex (Abschnitt 8) .....                          | 38        |
| D.5 Präzision (Abschnitt 9) .....                                                       | 39        |
| <b>Anhang E (informativ) Verhalten idealer und realer Gase</b> .....                    | <b>43</b> |
| E.1 Abhängigkeit der Idealgas-Verbrennungsenthalpie von der Temperatur .....            | 43        |
| E.2 Korrekturen für den Nicht-Idealgas-Zustand: Volumen-Änderung .....                  | 44        |
| E.3 Korrekturen für den Nicht-Idealgas-Zustand: Enthalpieänderungen .....               | 48        |
| <b>Anhang F (informativ) Einflüsse von Wasserdampf auf den Brennwert/Heizwert</b> ..... | <b>49</b> |
| F.1 Allgemeines .....                                                                   | 49        |
| F.2 Einflüsse des ausgeschlossenen Volumens .....                                       | 50        |
| F.3 (Enthalpie) Einfluss der latenten Wärme .....                                       | 51        |
| F.4 Einfluss des Realgasfaktors .....                                                   | 51        |

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Anhang G</b> (informativ) <b>Brennwert/Heizwert von Methan — Zusammenfassung, Diskussion und Auswahl</b> ..... | <b>52</b> |
| <b>Anhang H</b> (informativ) <b>Herleitung von Gleichungen bezüglich der Präzision</b> .....                      | <b>56</b> |
| <b>H.1</b> <b>Methan aus Differenz</b> .....                                                                      | <b>56</b> |
| <b>H.2</b> <b>Methan mittels Analyse</b> .....                                                                    | <b>57</b> |
| <b>Anhang J</b> (informativ) <b>Näherungswerte für die Umrechnung zwischen Referenzzuständen</b> .....            | <b>59</b> |
| <b>Anhang K</b> (informativ) <b>Durchführung der empfohlenen Verfahren mit einem Computer</b> .....               | <b>61</b> |
| <b>Anhang L</b> (informativ) <b>Molarer Brennwert/Heizwert bei einer Referenztemperatur von 60 °F</b> .....       | <b>64</b> |
| <b>Anhang M</b> (informativ) <b>Literaturhinweise</b> .....                                                       | <b>66</b> |

## **Vorwort**

Der Text von ISO 6976:1995 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 193 „Erdgas“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als EN ISO 6976:2005 durch CMC übernommen.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis November 2005, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis November 2005 zurückgezogen werden.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

### **Anerkennungsnotiz**

Der Text von ISO 6976:1995 wurde vom CEN als EN ISO 6976:2005 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt Verfahren zur Berechnung von Brennwert, Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex von trockenen Erdgasen, Erdgas austauschgasen und sonstigen Brenngasen fest, wenn die Zusammensetzung des Gases in Stoffmengenanteilen bekannt ist. Anhand dieser Verfahren können die Eigenschaften des Gasgemisches bei allgemein üblichen metrischen Referenzbedingungen berechnet werden.

Die Rechenverfahren benötigen Werte für verschiedene physikalische Eigenschaften der reinen Komponenten; diese Werte werden in Form von Tabellen und unter Angabe der jeweiligen Quellen bereitgestellt.

Des Weiteren werden Verfahren zur Schätzung der Präzision der berechneten Eigenschaften beschrieben.

Die Verfahren zur Berechnung der molaren und massenbezogenen Eigenschaftswerte gelten für alle trockenen Erdgase, Erdgas austauschgasen oder sonstige in der Regel gasförmigen Brennstoffe. Die Berechnung der volumenbezogenen Eigenschaftswerte ist auf Gase beschränkt, die überwiegend aus Methan bestehen (Stoffmengenanteil  $\geq 0,5$ ).

Beispiele zu den empfohlenen Rechenverfahren sind in Anhang D aufgeführt.

**ANMERKUNG 1** Die in dieser Internationalen Norm verwendeten Symbole und ihre Bedeutungen sind in Anhang A erläutert.

**ANMERKUNG 2** Die Qualifikationsmerkmale „higher“, „upper“, „total“ und „gross“ sind für diese Norm gleich bedeutend mit „superior“ (calorific value, Brennwert); ebenso sind „lower“ und „net“ gleich bedeutend mit „inferior“ (calorific value, Heizwert). Der Begriff „heating value“ ist gleich bedeutend mit „calorific value“; „specific gravity“ ist gleich bedeutend mit „relative density“ (relative Dichte); „Wobbe number“ ist gleich bedeutend mit „Wobbe index“ (Wobbeindex); „compressibility factor“ ist gleich bedeutend mit „compression factor“ (Realgasfaktor).

**ANMERKUNG 3** Ist die Zusammensetzung des Gases in Volumenanteilen bekannt, müssen diese in Stoffmengenanteile umgerechnet werden (siehe Anhang C). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die abgeleiteten Stoffmengenanteile größere Unsicherheiten als die ursprünglichen Volumenanteile aufweisen.

**ANMERKUNG 4** Im Sinne dieser Internationalen Norm muss die Summe der verwendeten Stoffmengenanteile 1 ergeben (bis auf 0,0001), wobei alle Komponenten mit einem Stoffmengenanteil  $> 0,00005$  zurückzuführen sind.

**ANMERKUNG 5** Für den volumenbezogenen Brennwert/Heizwert gibt es Beschränkungen hinsichtlich der Anzahl der Komponenten, die neben Methan vorhanden sein dürfen. Eine genaue Definition diesbezüglich ist unmöglich, jedoch können die folgenden Richtwerte nützlich sein:

Der Stoffmengenanteil von Stickstoff ( $N_2$ ) sollte maximal 0,3 betragen.

Der Stoffmengenanteil von Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) und Ethan ( $C_2H_6$ ) sollte jeweils maximal 0,15 betragen.

Alle sonstigen Komponenten sollten jeweils einen Stoffmengenanteil von maximal 0,05 aufweisen.

Bei Berücksichtigung dieser Grenzwerte liegt die erwartete Genauigkeit der Berechnung innerhalb 0,1 %.

**ANMERKUNG 6** Einflüsse von Wasserdampf auf den Brennwert/Heizwert (Ermittlung entweder durch direkte Messung oder Berechnung) werden in Anhang F diskutiert.

**ANMERKUNG 7** Damit die beschriebenen Rechenverfahren Gültigkeit haben, muss das Gas bei den vorgeschriebenen Referenzbedingungen oberhalb seines Kohlenwasserstoff-Taupunktes liegen.

**ANMERKUNG 8** Die Werte der zugrunde gelegten physikalischen Eigenschaften werden überarbeitet, wenn seitens maßgeblicher Stellen genauere Werte herausgegeben werden.

## 2 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

### 2.1

#### Brennwert

die Wärmemenge, die bei vollständiger Verbrennung einer gegebenen Gasmenge in Luft frei werden würde, wobei der Druck  $p_1$ , bei dem die Reaktion abläuft, konstant bleibt, und alle Verbrennungsprodukte auf die gleiche gegebene Temperatur  $t_1$  wie die der Reaktionspartner zurückgeführt werden

Alle diese Verbrennungsprodukte liegen gasförmig vor, mit Ausnahme des bei der Verbrennung entstandenen Wassers, das bei der Temperatur  $t_1$  in den flüssigen Zustand kondensiert.

Bei molarer Angabe der Gasmenge wird der Brennwert mit  $\bar{H}_s(t_1, p_1)$  bezeichnet, der massenbezogene Brennwert wird mit  $\hat{H}_s(t_1, p_1)$  bezeichnet.

Wird die Gasmenge über das gemessene Volumen angegeben, so wird der Brennwert  $\tilde{H}_s[t_1, p_1, V(t_2, p_2)]$  bezeichnet, wobei  $t_2$  und  $p_2$  die Referenzbedingungen für die Volumenmessung des Gases sind (siehe Bild 1).

### 2.2

#### Heizwert

die Wärmemenge, die bei vollständiger Verbrennung einer gegebenen Gasmenge in Luft frei werden würde, wobei der Druck  $p_1$ , bei dem die Reaktion abläuft, konstant bleibt, und alle Verbrennungsprodukte auf die gleiche gegebene Temperatur  $t_1$  wie die der Reaktionspartner zurückgeführt werden

Dabei liegen alle diese Verbrennungsprodukte gasförmig vor.

Molarer, massenbezogener und volumenbezogener Heizwert werden entsprechend mit  $\bar{H}_I(t_1, p_1)$ ,  $\hat{H}_I(t_1, p_1)$  und  $\tilde{H}_I[t_1, p_1, V(t_2, p_2)]$  bezeichnet.

### 2.3

#### Dichte

der Quotient aus der Masse einer Gasprobe und deren Volumen unter gegebenen Druck- und Temperaturbedingungen

### 2.4

#### relative Dichte

der Quotient aus der Dichte eines Gases und der Dichte trockener Luft von Standardzusammensetzung (siehe Anhang B) bei den gleichen gegebenen Temperatur- und Druckbedingungen

Der Begriff ideale relative Dichte findet Anwendung, wenn sowohl Gas als auch Luft als Medien betrachtet werden, die dem idealen Gasgesetz gehorchen (siehe 2.7); der Begriff reale relative Dichte findet Anwendung, wenn sowohl Gas als auch Luft als reale Medien betrachtet werden.

### 2.5

#### Wobbeindex

der Quotient aus dem volumenbezogenen Brennwert bei gegebenen Referenzbedingungen und der Quadratwurzel aus der relativen Dichte bei gleichen gegebenen Referenzbedingungen für die Volumenmessung

### 2.6

#### Umwandlungsenthalpie

Die Umwandlungsenthalpie eines Stoffes von einem Zustand A in einen Zustand B ist der thermodynamische Begriff für die freiwerdende Wärmemenge, die beim Übergang von einem Zustand in einen anderen Zustand anfällt. Einer positiven Wärmefreisetzung entspricht verabredungsgemäß durch Konvention eine numerisch identische negative Enthalpieänderung. Die Bedeutungen der Größen Verbrennungsenthalpie und Verdampfungsenthalpie erklären sich somit aus dem Zusammenhang selbst; der Begriff Enthalpiekorrektur bezieht sich auf die (molare) Enthalpieänderung beim Übergang vom idealen in den realen Gaszustand.

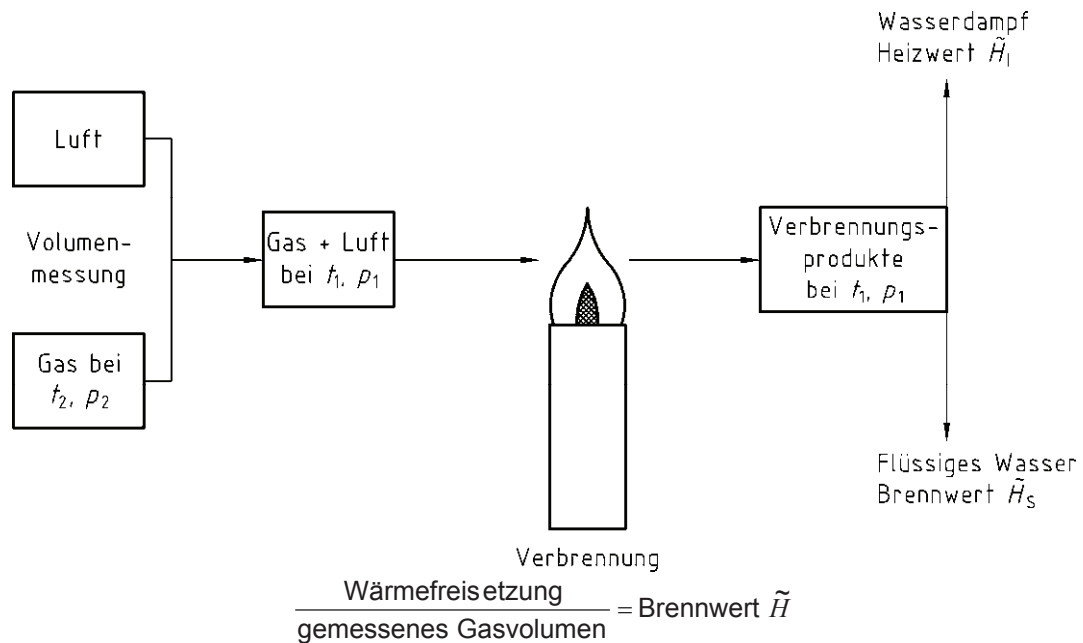


**Bild 1 — Volumenbezogener Brennwert/Heizwert — Referenzbedingungen für Volumenmessung und Verbrennung**

## 2.7

### ideales Gas und reales Gas

ein ideales Gas gehorcht dem idealen Gasgesetz:

$$p \cdot V_m = R \cdot T \quad (1)$$

Dabei ist

$p$  der absolute Druck;

$T$  die thermodynamische Temperatur;

$V_m$  das Volumen pro Mol Gas;

$R$  die universelle Gaskonstante, in abgestimmten Einheiten.

Kein reales Gas gehorcht diesem Gesetz. Für reale Gase muss Gleichung (1) wie folgt umgeschrieben werden:

$$p \cdot V_m = Z(T, p) \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Dabei ist

$Z(T, p)$  eine Variable, die häufig annähernd 1 ist und als Realgasfaktor bezeichnet wird (siehe 2.8 und E.2).

## 2.8

### Realgasfaktor

der Quotient aus dem tatsächlichen (realen) Volumen einer gegebenen Masse Gas bei gegebenem Druck und Temperatur und deren Volumen, wie er sich aus dem idealen Gasgesetz (für gleichen Druck und Temperatur) berechnet

## 2.9

### Referenzbedingungen für die Verbrennung

die ausgewiesene Temperatur  $t_1$  und Druck  $p_1$ . Dies sind die Bedingungen, bei denen der Brennstoff angenommenenerweise verbrannt wird (siehe Bild 1)

## 2.10

### Referenzbedingungen für die Volumenmessung

die ausgewiesene Temperatur  $t_2$  und Druck  $p_2$ . Dies sind die Bedingungen, bei denen die zu verbrennende Brennstoffmenge angenommenenerweise ermittelt wird; die Referenzbedingungen für Volumenmessung und Verbrennung müssen nicht a priori gleich sein

ANMERKUNG Weltweit werden verschiedene Referenzbedingungen verwendet; die entsprechenden Daten für die gebräuchlichsten Sätze von metrischen Referenzbedingungen sind in den Tabellen dieser Internationalen Norm aufgeführt.

## 2.11

### trockenes Erdgas

trockenes Erdgas ist ein Gas, bei dem der Stoffmengenanteil von Wasserdampf maximal 0,000 05 beträgt

## 3 Kurzbeschreibung

Diese Internationale Norm enthält Verfahren zur Berechnung von Brenn- und Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex von beliebigen trockenen Erdgasen, Erdgas austauschgasen oder sonstigen Brenngasen bekannter Zusammensetzung. Dabei werden Gleichungen verwendet, in denen für jede einzelne Molekülsorte des Gasgemisches die Werte der thermodynamischen Eigenschaften für ideale Gase (die angegeben sind) in Übereinstimmung mit dem entsprechenden Stoffmengenanteil gewichtet werden; all diese Terme werden dann zur über den „Stoffmengenanteil gemittelten“ Eigenschaft des idealen Gasgemisches zusammenaddiert. Volumenbezogene Werte lassen sich dann durch Anwendung eines volumetrischen Korrekturfaktors in Werte für den realen Gaszustand umrechnen.

ANMERKUNG Die Anwendung eines enthalpischen Korrekturfaktors, der im Prinzip auch bei Berechnungen von Brennwert/Heizwert erforderlich ist, gilt für alle relevanten Fälle als vernachlässigbar.

In Abschnitt 10 werden molare, massenbezogene und volumenbezogene Werte für die physikalischen Eigenschaften der reinen Komponenten von Erdgas für die allgemein üblichen Referenzbedingungen gegeben. Rechenbeispiele sind in Anhang D aufgeführt.

## 4 Verhalten idealer und realer Gase

### 4.1 Verbrennungsenthalpie

Die grundlegendsten physikalischen Größen, die für die Berechnung von Brenn- und Heizwerten benötigt werden, sind die molaren Idealgas(standard)-Verbrennungsenthalpien für die Komponenten des Gasgemisches. Diese Größen werden durch verwickelte Funktionen der Temperatur dargestellt; die benötigten Werte sind somit von der Referenztemperatur für die Verbrennung  $t_1$  abhängig. Aus praktischen Überlegungen ist nicht beabsichtigt, dass der Anwender die Berechnungen, die die entsprechenden Werte für irgendeine beliebige Referenztemperatur der Verbrennung liefern, selbst durchführt. Stattdessen werden Tabellenwerte für die Temperaturen  $t_1 = 25\text{ °C}$ ,  $20\text{ °C}$ ,  $15\text{ °C}$  und  $0\text{ °C}$  gegeben. E.1 beschäftigt sich mit den Herleitungen der tabellierten Werte; wichtig ist, dass alle vier Werte für jeden beliebigen Stoff in thermodynamischer Hinsicht wechselseitig konsistent sind.

Für den Brennwert/Heizwert (molar, massenbezogen oder volumenbezogen) ist im Prinzip eine so genannte Enthalpiekorrektur erforderlich, um die Idealgas-Verbrennungsenthalpie für das Gasgemisch in einen entsprechenden Realgaswert umzurechnen. Diese Korrektur ist jedoch im Allgemeinen genügend klein, um vernachlässigt zu werden. Gründe dafür werden in E.3 gegeben.

## 4.2 Berechnung des Realgasfaktors

Für den volumenbezogenen Brennwert/Heizwert ist eine zweite Realgas-Korrektur erforderlich, um der Abweichung des Gasvolumens vom Idealgas-Zustand Rechnung zu tragen, die in der Regel nicht vernachlässigbar ist. Diese Korrektur wird ebenfalls bei der Berechnung von Dichte, relativer Dichte und folgerichtig auch vom Wobbeindex benötigt. E.2 enthält Hintergrundinformationen dazu, wie die Korrekturen für das Volumen im Nicht-Idealgas-Zustand anzuwenden sind. Des Weiteren werden die angewandten Prinzipien diskutiert und verwendete Vereinfachungen gerechtfertigt, die es erlauben, leicht handhabbare Berechnungen ohne die Hilfe von maschinellen Verfahren durchzuführen.

Solche Korrekturen für das Volumen im Nicht-Idealgas-Zustand werden durch Berücksichtigung des Realgasfaktors  $Z$  eines Gemisches vorgenommen. Die Formel für den Realgasfaktor  $Z$  bei Referenzbedingungen für die Volumenmessung, der für die Berechnungen in den Abschnitten 7 bis 9 erforderlich ist, lautet (siehe Gleichung (E.17)):

$$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2) = 1 - \left[ \sum_{j=1}^N x_j \cdot \sqrt{b_j} \right]^2 \quad (3)$$

Hierbei erfolgt die Summierung über alle  $N$  Komponenten des Gemisches. Die Werte des so genannten Summenfaktors  $\sqrt{b_j}$  sind in Tabelle 2 (Abschnitt 10) für die drei allgemein interessierenden Referenzbedingungen der Volumenmessung aufgeführt, und zwar für alle Komponenten von Erdgas und Erdgasaustauschgasen, die in dieser Internationalen Norm berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden für alle reinen Komponenten Werte des Realgasfaktors (bzw. hypothetischen Realgasfaktors)  $Z_j$  gegeben, von denen die Werte für  $b_j$  in der Regel unter Anwendung der Beziehung  $b_j = 1 - Z_j$  abgeleitet wurden. E.2 enthält genauere Informationen zu diesem Thema.

## 5 Berechnung des molaren Brennwertes/Heizwertes

### 5.1 Ideales Gas

Der molare Idealgas-Brennwert/Heizwert eines Gemisches bekannter Zusammensetzung bei einer Temperatur  $t_1$  wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\bar{H}^0(t_1) = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \bar{H}_j^0(t_1) \quad (4)$$

Dabei ist

$\bar{H}^0(t_1)$  idealer molarer Brennwert/Heizwert des Gemisches;

$\bar{H}_j^0(t_1)$  idealer molarer Brennwert/Heizwert der Komponente  $j$ ;

$x_j$  Stoffmengenanteil der Komponente  $j$ .

Tabelle 3 (Abschnitt 10) enthält Zahlenwerte für  $\bar{H}_j^0$  für  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ . Die Werte für den Brennwert  $(\bar{H}_j^0)_S$  entstammen den in Anhang M aufgeführten Original-Literaturquellen. Die Werte für den Heizwert  $(\bar{H}_j^0)_H$  wurden unter Verwendung des anerkannten Wertes für die Standard-Verdampfungsenthalpie von Wasser bei  $25^\circ\text{C}$  abgeleitet (siehe Anhang B).

Darüber hinaus enthält Tabelle 3 auch Werte für  $\bar{H}_j^0$  bei anderen Temperaturen ( $t_1 = 20\text{ °C}$ ,  $15\text{ °C}$  und  $0\text{ °C}$ ). Diese Werte wurden gemäß den in E.1 beschriebenen Verfahren von den Werten bei  $25\text{ °C}$  abgeleitet.

ANMERKUNG 1 Die Werte für  $\bar{H}_j^0$  sind druckunabhängig; folglich ist der Referenzdruck für die Verbrennung  $p_1$  für ideale Gase irrelevant und wird in dem angegebenen Variablenverzeichnis weggelassen.

ANMERKUNG 2 Der molare Idealgas-Brennwert/Heizwert eines Gases oder Gasgemisches ist in dieser Internationalen Norm als eine positive Zahl definiert. Die in Tabelle 3 gegebenen Werte sind numerisch gleich den molaren Standard-Verbrennungsenthalpien, die jedoch verabredungsgemäß als negative Größen dargestellt werden (siehe 2.6).

## 5.2 Reales Gas

Im Sinne dieser Internationalen Norm ist der molare Realgas-Brennwert/Heizwert numerisch gleich dem entsprechenden Idealgas-Wert.

ANMERKUNG Ein exakter Ansatz zur Berechnung des molaren Realgas-Brennwertes/Heizwertes ausgehend vom Idealgas-Wert würde die Berechnung einer Enthalpiekorrektur (siehe 4.1) für das Gemisch erforderlich machen. In der Praxis ist diese Korrektur für typische Erdgase sehr gering und in der Regel vernachlässigbar. Die sich daraus ergebenden Fehler sind kleiner als  $50\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$  (etwa  $0,005\%$ ) (siehe E.3).

## 6 Berechnung des massebezogenen Brennwertes/Heizwertes

### 6.1 Ideales Gas

Der massenbezogene Idealgas-Brennwert/Heizwert eines Gemisches bekannter Zusammensetzung bei einer Temperatur  $t_1$  wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\hat{H}^0(t_1) = \frac{\bar{H}^0(t_1)}{M} \quad (5)$$

Dabei ist

$M$  molare Masse des Gemisches, die sich aus folgender Gleichung ergibt:

$$M = \sum_{j=1}^N x_j \cdot M_j \quad (6)$$

Dabei ist

$x_j$  Stoffmengenanteil der Komponente  $j$ ;

$M_j$  molare Masse der Komponente  $j$ ;

$\hat{H}^0(t_1)$  massenbezogener idealer Brennwert/Heizwert des Gemisches.

Tabelle 1 (Abschnitt 10) enthält Werte für die molare Masse aller in dieser Internationalen Norm berücksichtigten Komponenten.

Die Verwendung der Gleichungen (5) und (6) stellt das Standardverfahren zur Berechnung von  $\hat{H}^0$  dar. Ein alternatives Verfahren verwendet folgende Gleichung:

$$\hat{H}^0(t_1) = \sum_{j=1}^N \left( x_j \times \frac{M_j}{M} \right) \hat{H}_j^0(t_1) \quad (7)$$

Dabei ist

$\hat{H}_j^0(t_1)$  der massenbezogene ideale Brennwert/Heizwert der Komponente  $j$ .

Tabelle 4 (Abschnitt 10) enthält zur Erleichterung Werte für  $\hat{H}_j^0$  für vier  $t_1$ -Werte (25 °C, 20 °C, 15 °C und 0 °C); damit kann der Anwender die Notwendigkeit, Werte von  $\bar{H}_j^0$  als Ausgangspunkt für eine Berechnung zu verwenden, vermeiden.

Die so erhaltenen Zahlenwerte beider Verfahren stimmen innerhalb von 0,01 MJ·kg<sup>-1</sup> miteinander überein; dies liegt innerhalb der Nachweisgrenze des derzeitigen Standes der Technik.

## 6.2 Reales Gas

Im Sinne dieser Internationalen Norm ist der massenbezogene Realgas-Brennwert/Heizwert numerisch gleich dem entsprechenden Idealgas-Wert.

ANMERKUNG Zur Verdeutlichung und Rechtfertigung siehe 5.2.

## 7 Berechnung des volumenbezogenen Brennwertes/Heizwertes

### 7.1 Ideales Gas

Der volumenbezogene Idealgas-Brennwert/Heizwert eines Gemisches bekannter Zusammensetzung bei einer Verbrennungstemperatur  $t_1$  sowie bei einer Temperatur  $t_2$  und einem Druck  $p_2$  für die Volumenmessung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \bar{H}^0(t_1) \times \frac{p_2}{R \cdot T_2} \quad (8)$$

Dabei ist

$\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)]$  der volumenbezogene ideale Brennwert/Heizwert des Gemisches;

$R$  die universelle Gaskonstante (= 8,314 510 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, siehe B.1);

$T_2 (= t_2 + 273,15)$  die absolute Temperatur in Kelvin.

Die Verwendung der Gleichung (8) stellt das Standardverfahren zur Berechnung von  $\tilde{H}^0$  dar. Ein alternatives Verfahren verwendet folgende Gleichung:

$$\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \tilde{H}_j^0[t_1, V(t_2, p_2)] \quad (9)$$

Dabei ist

$\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)]$  der volumenbezogene ideale Brennwert/Heizwert der Komponente  $j$ .

Tabelle 5 (Abschnitt 10) erhält zur Erleichterung Werte für  $\tilde{H}_j^0$  für eine Vielzahl von Referenzbedingungen für Verbrennung und Volumenmessung; damit kann der Anwender die Notwendigkeit, Werte von  $\bar{H}_j^0$  als Ausgangspunkt für eine Berechnung zu verwenden, vermeiden.

Die so erhaltenen Zahlenwerte beider Verfahren stimmen innerhalb von  $0,01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$  miteinander überein; dies liegt innerhalb der Nachweisgrenze des derzeitigen Standes der Technik.

## 7.2 Reales Gas

Der volumenbezogene Realgas-Brennwert/Heizwert für die Verbrennung eines Gasgemisches bei einer Temperatur  $t_1$  und einem Druck  $p_1$ , gemessen bei einer Temperatur  $t_2$  und einem Druck  $p_2$ , wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)} \quad (10)$$

Dabei ist

$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)]$  der volumenbezogene Realgas-Brennwert/Heizwert des Gemisches;

$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)$  der Realgasfaktor des Gemisches bei Referenzbedingungen für die Volumenmessung.

Der Realgasfaktor  $Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)$  wird nach Gleichung (3) berechnet, wobei die Werte für den Summenfaktor  $\sqrt{b_j}$  für die einzelnen reinen Stoffe in Tabelle 2 (Abschnitt 10) gegeben sind.

**ANMERKUNG** Zur Verdeutlichung und Rechtfertigung des praktischen Ansatzes für den Realgas-Brennwert/Heizwert siehe 5.2. Da in dieser Berechnung keine Enthalpiekorrektur für den volumenbezogenen idealen Brennwert/Heizwert erfolgt, ist der Referenzdruck  $p_1$  für die Verbrennung unerheblich und wird in dem angegebenen Variablenverzeichnis weggelassen.

## 8 Berechnung von relativer Dichte, Dichte und Wobbeindex

### 8.1 Ideales Gas

Die relative Dichte des idealen Gases ist vom jeweiligen Referenzzustand unabhängig und wird anhand folgender Gleichung ermittelt:

$$d^0 = \sum_{j=1}^N x_j \times \frac{M_j}{M_{\text{Luft}}} \quad (11)$$

Dabei ist

$d^0$  die relative Dichte des idealen Gases;

$M_j$  die molare Masse der Komponente  $j$ ;

$M_{\text{Luft}}$  die molare Masse trockener Luft von Standardzusammensetzung.

Tabelle 1 (Abschnitt 10) enthält Werte für die molare Masse. In B.3 ist die Zusammensetzung normaler Luft aufgeführt; der abgeleitete Wert für  $M_{\text{Luft}}$  beträgt  $28,9626 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ .

Die Dichte des idealen Gases hängt von dessen Temperatur  $t$  und dessen Druck  $p$  ab und wird gemäß nachstehender Gleichung berechnet:

$$\rho^0(t, p) = \left( \frac{p}{R \cdot T} \right) \sum_{j=1}^N x_j \cdot M_j \quad (12)$$

Dabei ist

$\rho^0(t, p)$  die Dichte des idealen Gases;

$R$  die universelle Gaskonstante ( $= 8,314510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , siehe B.1);

$T$  ( $= t + 273,15$ ) die absolute Temperatur in Kelvin.

Der Wobbeindex des idealen Gases wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$W^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_S^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d^0}} \quad (13)$$

Dabei ist

$W^0$  der Wobbeindex des idealen Gases;

$\tilde{H}_S^0$  die Berechnung nach Gleichung in 7.1.

## 8.2 Reales Gas

Die relative Dichte des realen Gases wird anhand folgender Gleichung ermittelt:

$$d(t, p) = \frac{d^0 \cdot Z_{\text{Luft}}(t, p)}{Z_{\text{mix}}(t, p)} \quad (14)$$

Dabei ist

$d(t, p)$  relative Dichte des realen Gases;

$Z_{\text{mix}}(t, p)$  Realgasfaktor des Gemisches;

$Z_{\text{Luft}}(t, p)$  Realgasfaktor trockener Luft von Standardzusammensetzung.

Der Realgasfaktor  $Z_{\text{mix}}(t, p)$  des Gemisches wird nach Gleichung (3) berechnet, wobei die Werte für den Summenfaktor  $\sqrt{b_j}$  für die einzelnen reinen Stoffe in Tabelle 2 (Abschnitt 10) gegeben sind. Der Realgasfaktor  $Z_{\text{Luft}}(t, p)$  ist in B.3 angegeben als:

$$Z_{\text{Luft}}(273,15 \text{ K}, 101,325 \text{ kPa}) = 0,999\,41$$

$$Z_{\text{Luft}}(288,15 \text{ K}, 101,325 \text{ kPa}) = 0,999\,58$$

$$Z_{\text{Luft}}(293,15 \text{ K}, 101,325 \text{ kPa}) = 0,999\,63$$

Die Dichte des realen Gases wird gemäß folgender Gleichung berechnet:

$$\rho(t, p) = \frac{\rho^0(t, p)}{Z_{\text{mix}}(t, p)} \quad (15)$$

Dabei ist

$\rho(t, p)$  die Dichte des realen Gases.

Der Wobbeindex des realen Gases berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_S[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d(t_2, p_2)}} \quad (16)$$

Dabei ist

$W$  der Wobbeindex des realen Gases;

$\tilde{H}_S$  die Berechnung nach 7.2.

**ANMERKUNG** Für die in diesem Unterabschnitt beschriebenen Berechnungen, insbesondere die Berechnungen der Dichte, ist in Bezug auf die zu benutzenden Einheiten sorgfältig vorzugehen. Wenn  $R$  in Joule pro Mol Kelvin,  $p$  in Kilopascal und  $M$  in Kilogramm pro Kilomol ausgedrückt wird, ergibt sich der Wert für  $\rho$  automatisch in Kilogramm pro Kubikmeter, der bevorzugten SI-Einheit.

## 9 Genauigkeit

### 9.1 Präzision

#### 9.1.1 Wiederholpräzision und Vergleichpräzision

Die Präzision berechneter Werte von physikalischen Eigenschaften, die sich allein aus zufälligen Fehlern bei den Analyseverfahren ergibt, lässt sich durch die Ausdrücke Wiederhol- und/oder Vergleichpräzision beschreiben, die wie nachstehend definiert sind:

**Wiederholpräzision:** Der Wert, unterhalb dessen die absolute Differenz zwischen Ergebnissen aus einem Paar aufeinander folgender Prüfungen unter Wiederholbedingungen mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit erwartet werden kann zu liegen. Die Prüfungsbedingungen sind: gleiches Verfahren, identisches Prüfmaterial, gleicher Beobachter, gleiche Prüfeinrichtung, gleicher Prüfort, kurzer Zeitabstand. Die Wahrscheinlichkeit für das Ergebnis beträgt 95 %, wenn keine anderen Angaben gemacht werden.

**Vergleichpräzision:** Der Wert, unterhalb dessen die absolute Differenz zwischen zwei einzelnen Prüfergebnissen mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit erwartet wird. Die Prüfungsbedingungen unter Vergleichsbedingungen sind: gleiches Verfahren, identisches Prüfmaterial, unterschiedliche Beobachter, verschiedene Prüfeinrichtungen, verschiedene Prüforte. Die Wahrscheinlichkeit für das Ergebnis beträgt 95 %, wenn keine anderen Angaben gemacht werden.

Die Vergleichpräzision ist in der Regel bedeutend größer als die Wiederholpräzision. Jedes Maß der Präzision einer berechneten physikalischen Eigenschaft hängt nur von der Präzision der Analysedaten ab.

Das allgemeine begriffliche Konzept von Wiederhol- und Vergleichpräzision kann nicht nur auf physikalische Eigenschaften angewendet werden, die aus Analysen der Gaszusammensetzung berechnet werden, sondern auch auf die Konzentration jeder einzelnen Komponente aus diesen Analysen, von denen diese Eigenschaften abgeleitet wurden. Somit kann tatsächlich die Wiederhol- oder Vergleichpräzision des Wertes einer physikalischen Eigenschaft anhand der beiden nachstehend beschriebenen, offenbar gleichwertigen, Verfahren erhalten werden:

- a) Durch direkte Anwendung der o.g. Definitionen auf mehrmalige Berechnungen der fraglichen physikalischen Eigenschaft aus Wiederhol- oder Vergleichsanalysen, d. h. mit Hilfe folgender Gleichung:

$$\Delta Y = 2\sqrt{2} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (17)$$

Dabei ist

$\Delta Y$  die Wiederhol- oder Vergleichpräzision von  $Y$  (je nach Anwendungsfall);

$Y_i$  der Wert der physikalischen Eigenschaft, berechnet aus der  $i$ . Analyse des Gases;

$\bar{Y}$  das arithmetische Mittel von  $n$  Werten von  $Y_i$ .

ANMERKUNG 1 Bezüglich der Definitionen von Wiederhol- und Vergleichpräzision, ihre Darstellung mit Hilfe der Standardabweichung der Grundgesamtheit von Werten, wie sie durch Gleichung (17) gegeben ist, und bezüglich der Herkunft des darin enthaltenen Faktors  $2\sqrt{2}$  siehe Referenz [26] in Anhang M.

- b) Durch geeignete Kombination von Wiederhol- oder Vergleichpräzision der Konzentration jeder einzelnen Komponente von Gasanalysen; die entsprechenden Kombinationsformeln sind in 9.1.2 und 9.1.3 gegeben (Anhang H beschäftigt sich mit der Herleitung dieser Gleichungen).

ANMERKUNG 2 Die Gleichwertigkeit von a) und b) in der praktischen Anwendung ist noch nicht abschließend ausdiskutiert; davon unberührt ist die prinzipielle Vorgehensweise richtig. Ursache dafür ist, dass die statistische Verbindung zwischen diesen beiden Verfahren voraussetzt, dass die wiederholt gemessenen Analysewerte der Konzentration einzelner Komponenten in Form einer Gaußschen Normalverteilung verteilt seien. Ferner wird angenommen, dass dieses dann auch für die Datensätze der berechneten physikalischen Eigenschaftswerte gelte. Erfahrungen haben gezeigt, dass diese Kriterien meist nicht erfüllt werden, insbesondere im Fall kleiner Datensätze und/oder Datensätzen mit Ausreißern.

### 9.1.2 Schätzung der Wiederholpräzision

Die Wiederholpräzision  $\Delta H$  des Brennwertes/Heizwertes  $H$  bei einem Vertrauensbereich von 95 % lässt sich entweder nach Gleichung (17) berechnen, indem  $Y$  durch  $H$  ersetzt wird, oder direkt aus den Analysedaten, indem einer der beiden folgenden geeigneten Ausdrücke benutzt wird:

- a) Wenn alle Komponenten bis auf Methan analysiert werden, die Konzentration des Methans ( $j = 1$ ) also aus der Differenz berechnet wird, gilt:

$$\Delta H_{\text{mix}}^{\circ} = \left\{ \sum_{j=2}^N [\Delta x_j \cdot (H_j^{\circ} - H_1^{\circ})]^2 \right\}^{1/2} \quad (18)$$

Dabei ist

$\Delta H_{\text{mix}}^{\circ}$  die Wiederholpräzision des berechneten Idealgas-Brennwertes/Heizwertes für das Gemisch (molar- oder volumenbezogen);

$\Delta x_j$  die Wiederholpräzision des Stoffmengenanteils der Komponente  $j$  in dem Gemisch von  $N$  Komponenten;

$H_j^{\circ}$  der Idealgas-Brennwert/Heizwert der Komponente  $j$ ;

$H_1^{\circ}$  der Idealgas-Brennwert/Heizwert von Methan.

- b) Wenn alle Komponenten - einschließlich Methan - analysiert werden, dann gilt:

$$\Delta H_{\text{mix}}^{\circ} = \left\{ \sum_{j=1}^N [\Delta x_j^* \cdot (H_j^{\circ} - H_{\text{mix}}^{\circ})]^2 \right\}^{1/2} \quad (19)$$

Obwohl  $\Delta H_{\text{mix}}^0$  unter Verwendung der normierten Stoffmengenanteile  $x_j$  für das Gemisch berechnet wird, bezeichnet  $\Delta x_j^*$  die Wiederholpräzision des Stoffmengenanteils der Komponente  $j$  in dem Gemisch von  $N$  Komponenten, bevor diese normiert werden.

Die Wiederholpräzision der relativen Dichte  $\Delta d$  und die Wiederholpräzision der Dichte  $\Delta \rho$  lassen sich anhand der folgenden Gleichungen berechnen:

$$\Delta d = \frac{\Delta M}{M_{\text{Luft}}} \quad (20)$$

$$\Delta \rho = \frac{\Delta M \cdot p}{R \cdot T} \quad (21)$$

Hierbei bezeichnet  $\Delta M$  die Wiederholpräzision der mittleren molaren Masse  $M$  des Erdgases, die wie folgt gegeben ist:

— Fall a):

$$\Delta M = \left\{ \sum_{j=2}^N [\Delta x_j \cdot (M_j - M_1)]^2 \right\}^{1/2} \quad (22)$$

— Fall b):

$$\Delta M = \left\{ \sum_{j=1}^N [\Delta x_j^* \cdot (M_j - M)]^2 \right\}^{1/2} \quad (23)$$

Hierbei bezeichnet  $M_j$  die molare Masse der Komponente  $j$ .

Die Wiederholpräzision  $\Delta W$  des Wobbeindex lässt sich anhand folgender Gleichung berechnen:

$$\Delta W = W \cdot \left[ \left( \frac{\Delta \tilde{H}}{\tilde{H}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{2d} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

Ebenso wie beim Brennwert/Heizwert, können auch die Wiederholpräzisionen  $\Delta M$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta \rho$  und  $\Delta W$  aus der Standardabweichung eines Datensatzes berechneter Eigenschaftswerte rechnerisch ermittelt werden [d. h. anhand Gleichung (17), wobei  $Y$  entsprechend durch  $M$ ,  $d$ ,  $\rho$  bzw.  $W$  ersetzt wird]. Die benötigte Gaszusammensetzung muss hierzu aus einer Analyse in Übereinstimmung mit der Definition der Wiederholpräzision nach 9.1.1 bestimmt werden. Jedoch gilt der in Anmerkung 2 (zu 9.1.1) angeführte Vorbehalt auch weiterhin.

**ANMERKUNG** Der Einfluss der Wiederholpräzision  $\Delta Z$  des berechneten Realgasfaktors  $Z$  auf die Gesamt-Wiederholpräzision  $\Delta \tilde{H}$  des volumenbezogenen Brennwertes/Heizwertes ist gering und wird daher in der o. g. Gleichung nicht berücksichtigt; entsprechend wird der Einfluss von  $\Delta Z$  auf die Gesamt-Wiederholpräzision  $\Delta \rho$  der Realgas-Dichte,  $\Delta d$  der relativen Realgas-Dichte und  $\Delta W$  des Realgas-Wobbeindex ebenfalls nicht berücksichtigt.

### 9.1.3 Schätzung der Vergleichpräzision

Die Vergleichpräzisionen  $\Delta H$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta \rho$  und  $\Delta W$  von Brennwert, Heizwert, relativer Dichte, Dichte und Wobbeindex lassen sich anhand der Gleichungen (18) bis (24) berechnen; Voraussetzung ist, dass  $\Delta x_j$  und  $\Delta x_j^*$  in den Gleichungen (18), (19), (22) und (23) nun als die entsprechenden Vergleichpräzisionen der Stoffmengenanteile  $x_j$  bestimmt sind. Die Vergleichpräzisionen lassen sich ebenfalls als Standardabweichung der Grundgesamtheit der berechneten Werte  $H$ ,  $d$ ,  $\rho$  oder  $W$  multipliziert mit  $2\sqrt{2}$  nach Gleichung (17) ermitteln, wobei bei qualitativen Analysen in Übereinstimmung mit der Definition der Vergleichpräzision nach 9.1.1 durchgeführt wurden.

## 9.2 Richtigkeit

Aus der beobachteten Präzision von Analysedaten kann nicht auf die Richtigkeit dieser Daten gefolgert werden; es ist durchaus möglich, gleichzeitig eine hervorragende Präzision und eine sehr schlechte Richtigkeit zu erhalten.

Die absolute Richtigkeit eines berechneten physikalischen Eigenschaftswertes eines Erdgasgemisches kann betrachtet werden als das Ergebnis der Kombination dreier unabhängiger Quellen von systematischen Abweichungen:

- Unsicherheiten der Basisdaten, die in den Tabellen 1 bis 5 aufgeführt sind;
- systematische Abweichungen in den Rechenverfahren, die diese Daten verwenden;
- systematische Abweichungen in den Analysedaten (in Abgrenzung zu den zufälligen Abweichungen), die als Eingangsgrößen im Verfahren benutzt werden.

In der Praxis ist es aufgrund des Fehlens von ausreichenden Informationen schwierig, Berechnungen der Richtigkeit durchzuführen. So geben beispielsweise Verweise auf Originalquellen für Basisdaten häufig nur Informationen zur Präzision (siehe hierzu auch die Diskussion von Methan in Anhang G). Das Gleiche gilt häufig auch für Analysedaten. Darüber hinaus würde ein strenger Ansatz eine absolute Unsicherheit liefern, wohingegen in der Praxis häufig eine Schätzung der Unsicherheit eines physikalischen Eigenschaftswertes in Bezug auf einen bestimmten Vergleichspunkt erforderlich ist. So wird z. B. der Brennwert/Heizwert häufig in Bezug zum Brennwert/Heizwert von reinem Methan gesetzt. Folglich trägt dann eine Unsicherheit im angenommenen Brennwert/Heizwert von Methan nicht zur relativen Unsicherheit des Brennwertes/Heizwertes eines Erdgases oder zum Unterschied zwischen den Brennwerten/Heizwerten zweier verschiedener Erdgase bei.

Erfahrungen haben gezeigt, dass die relativen Unsicherheiten der in dieser Internationalen Norm berücksichtigten physikalischen Eigenschaftswerte hauptsächlich von Unsicherheiten in den Analysedaten beeinflusst werden und dass der Beitrag der Unsicherheiten in den Basisdaten und systematischer Abweichungen in den Rechenverfahren sehr gering sein wird. Der Beitrag von den Basisdaten wird auf weniger als 0,05 % und der Beitrag der systematischen Abweichungen in den Rechenverfahren auf weniger als 0,015 % geschätzt. Diese Beiträge können – verglichen mit der Unsicherheit der Analysedaten aus der Analyse eines typischen Erdgasgemisches mit 12 bis 20 Komponenten – vernachlässigt werden.

Wenn die Beiträge von Unsicherheiten in den Basisdaten und von systematischen Abweichungen in den Rechenverfahren verglichen mit der analytischen Unsicherheit bedeutend sind (z. B. für hochgenaue Analysen von Gemischen mit nur wenigen Komponenten und möglicherweise in der Zukunft, wenn die Genauigkeit der Erdgasanalysen optimiert sein wird), kann unter Umständen ein strengerer Ansatz auf Basis von a), b) und c) erforderlich sein.

## 9.3 Ausdruck der Ergebnisse

Die Anzahl der relevanten Ziffern, die für jeden Eigenschaftswert gegeben werden, sollten der erwarteten Genauigkeit der Berechnung der fraglichen Eigenschaft Rechnung tragen. Selbst im Fall einer „perfekten“ Analyse sollten die Ergebnisse der Berechnungen für Gemische nicht genauer als bis zu folgendem Ziffernniveau angegeben werden:

|                    |                     |                              |
|--------------------|---------------------|------------------------------|
| Brennwert/Heizwert | — molarer:          | 0,01 kJ · mol <sup>-1</sup>  |
|                    | — massenbezogener:  | 0,01 MJ · kg <sup>-1</sup>   |
|                    | — volumenbezogener: | 0,01 MJ · m <sup>-3</sup>    |
| Relative Dichte:   |                     | 0,000 1                      |
| Dichte:            |                     | 0,000 1 kg · m <sup>-3</sup> |
| Wobbeindex:        |                     | 0,01 MJ · m <sup>-3</sup>    |

Es ist jedoch darauf Acht zu geben, ob die Analysedaten tatsächlich die Angabe gemäß diesem Ziffernniveau rechtfertigen; ansonsten sollte die Anzahl der relevanten Ziffern entsprechend reduziert werden.

## 10 Tabellen empfohlener Daten

**Tabelle 1 — Molare Masse für Komponenten von Erdgasen**

| Komponente |                                    | Werte<br>kg·kmol <sup>-1</sup> |
|------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1          | Methan                             | 16,043                         |
| 2          | Ethan                              | 30,070                         |
| 3          | Propan                             | 44,097                         |
| 4          | <i>n</i> -Butan                    | 58,123                         |
| 5          | <i>iso</i> -Butan (2-Methylpropan) | 58,123                         |
| 6          | <i>n</i> -Pentan                   | 72,150                         |
| 7          | <i>iso</i> -Pentan (2-Methylbutan) | 72,150                         |
| 8          | Neopentan (2,2-Dimethylpropan)     | 72,150                         |
| 9          | <i>n</i> -Hexan                    | 86,177                         |
| 10         | 2-Methylpentan                     | 86,177                         |
| 11         | 3-Methylpentan                     | 86,177                         |
| 12         | 2,2-Dimethylbutan                  | 86,177                         |
| 13         | 2,3-Dimethylbutan                  | 86,177                         |
| 14         | <i>n</i> -Heptan                   | 100,204                        |
| 15         | <i>n</i> -Octan                    | 114,231                        |
| 16         | <i>n</i> -Nonan                    | 128,258                        |
| 17         | <i>n</i> -Decan                    | 142,285                        |
| 18         | Ethylen (Ethen)                    | 28,054                         |
| 19         | Propen                             | 42,081                         |
| 20         | 1-Buten                            | 56,108                         |
| 21         | <i>cis</i> -2-Buten                | 56,108                         |
| 22         | <i>trans</i> -2-Buten              | 56,108                         |
| 23         | <i>iso</i> -Buten (2-Methylpropen) | 56,108                         |
| 24         | 1-Penten                           | 70,134                         |
| 25         | Propadien                          | 40,065                         |
| 26         | 1,2-Butadien                       | 54,092                         |
| 27         | 1,3-Butadien                       | 54,092                         |
| 28         | Acetylen (Ethin)                   | 26,038                         |
| 29         | Cyclopentan                        | 70,134                         |
| 30         | Methylcyclopentan                  | 84,161                         |
| 31         | Ethylcyclopentan                   | 98,188                         |
| 32         | Cyclohexan                         | 84,161                         |

Tabelle 1 (fortgesetzt)

| Komponente |                                           | Werte<br>kg·kmol <sup>-1</sup> |
|------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| 33         | Methylcyclohexan                          | 98,188                         |
| 34         | Ethylcyclohexan                           | 112,215                        |
| 35         | Benzol (Benzen)                           | 78,114                         |
| 36         | Toluol (Toluen)                           | 92,141                         |
| 37         | Ethylbenzol                               | 106,167                        |
| 38         | o-Xylol                                   | 106,167                        |
| 39         | Methanol                                  | 32,042                         |
| 40         | Methylmercaptan (Methanthiol)             | 48,109                         |
| 41         | Wasserstoff                               | 2,015 9                        |
| 42         | Wasser                                    | 18,015 3                       |
| 43         | Schwefelwasserstoff (Dihydrogensulfid)    | 34,082                         |
| 44         | Ammoniak                                  | 17,030 6                       |
| 45         | Cyanwasserstoff                           | 27,026                         |
| 46         | Kohlenstoffmonooxid                       | 28,010                         |
| 47         | Kohlenstoffoxidsulfid (Carbonylsulfid)    | 60,076                         |
| 48         | Schwefelkohlenstoff (Kohlenstoffdisulfid) | 76,143                         |
| 49         | Helium                                    | 4,002 6                        |
| 50         | Neon                                      | 20,179 7                       |
| 51         | Argon                                     | 39,948                         |
| 52         | Stickstoff                                | 28,013 5                       |
| 53         | Sauerstoff                                | 31,998 8                       |
| 54         | Kohlenstoffdioxid                         | 44,010                         |
| 55         | Schwefeldioxid                            | 64,065                         |
| 56         | Distickstoffoxid                          | 44,012 9                       |
| 57         | Krypton                                   | 83,80                          |
| 58         | Xenon                                     | 131,29                         |
|            | Luft                                      | 28,962 6                       |

ANMERKUNG Die Werte der molaren Masse sind numerisch identisch mit den Werten der relativen molaren Masse, die man unter Verwendung der nachstehenden relativen Atommassen der Hauptelemente erhält; die Zahlen in Klammern geben dabei die Unsicherheit der letzten Nachkommastelle an (siehe Referenz [14] in Anhang M):

|   |               |
|---|---------------|
| C | 12,011 (1)    |
| H | 1,007 94 (7)  |
| O | 15,999 4 (3)  |
| N | 14,006 74 (7) |
| S | 32,066 (6)    |

Für Verbindungen, die C und/oder S enthalten, wurde die abgeleitete molare Masse auf die dritte Nachkommastelle gerundet; andere Verbindungen werden bis auf die vierte Nachkommastelle angegeben; dies gilt auch für den Wert trockener Luft von Standardzusammensetzung (siehe Tabelle B.2).