



Bachelorarbeit

Moritz Laack

Anwendung des Prinzips der absoluten Enthalpien und Entropien zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen

Moritz Laack

**Anwendung des Prinzips der absoluten
Enthalpien und Entropien zur
thermodynamischen Berechnung von
chemischen
Energiewandlungsprozessen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau – Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt
Zweitprüfer/in: Dr. Thomas Flower

Abgabedatum: 25.09.2018

Zusammenfassung

Moritz Laack

Thema der Bachelorthesis

Anwendung des Prinzips der absoluten Enthalpien und Entropien zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen

Stichworte

Absolute Stoffwerte, Brennkammer, Brennstoffzelle, Matlab, Simulink, technische Thermodynamik, Verbrennung

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung eines akademischen Tools zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen. Mithilfe des geplanten Simulink-Modells soll die Konzeptionierung neuer Übungs- und Klausuraufgaben auf dem Gebiet der technischen Thermodynamik ermöglicht und die Selbstkontrolle bei der Berechnung dieser Aufgaben vereinfacht werden.

Moritz Laack

Title of the paper

Implementation of the principle of absolute enthalpies and entropies for the thermodynamic calculation of chemical energy conversion processes

Keywords

Absolute material data, combustion chamber, fuel cell, Matlab, Simulink, technical thermodynamics, combustion

Abstract

Inside this report an academic tool for the thermodynamic calculation of chemical energy conversion processes is developed. The planned Simulink model shall be used to conceptualize new exercises and exam questions in the fields of technical thermodynamics and to simplify the self-control for calculating these exercises.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences
Department Maschinenbau und Produktion

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn/Frau **Moritz Laack**

Matrikel-Nummer: 2209099

Thema: Anwendung des Prinzips der absoluten Enthalpien und Entropien zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen

Schwerpunkte:

Der Fokus der Thesis liegt auf der Erstellung eines Simulink-basierten Tools zur thermodynamischen Berechnung von stöchiometrischen oder überstöchiometrischen chemischen Energiewandlungsprozessen. Dabei wird das Prinzip der absoluten kalorischen Stoffwerte, die die chemisch gebundene Energie beinhalten, als Grundlage für die Berechnungen genutzt. Eine Anforderung an das Tool ist die flexible Anpassung der Edukte. Neben der Produktzusammensetzung sollen u. a. auch die adiabate Verbrennungstemperatur von Brennstoffen oder Stoffgemischen ermittelt werden. Zusätzlich ist geplant, eine mögliche Kondensation des Produktwassers zu berücksichtigen. Die Vorgabe von Eingangsparametern soll entweder unmittelbar durch Eingabefelder im Simulink-Modell oder über Variablen aus dem Matlab-Workspace erfolgen. Zur Verifizierung des Modells sollen Testfälle beispielsweise anhand von bekannten Übungsaufgaben definiert werden. Durch einen Vergleich der Berechnungsergebnisse wird eine Plausibilitätsprüfung der Modelldaten ermöglicht.

Das generierte Tool dient der Selbstkontrolle bei der Berechnung von Aufgaben und bietet eine Hilfestellung bei der Konzeptionierung neuer Übungs- bzw. Klausuraufgaben. Ein weiterer Anwendungsbereich des Tools ist die Generierung von Grafiken wie zum Beispiel die Erstellung eines h - θ -Diagramms anhand der berechneten Ergebnisse des Simulink-Modells.

25.6.2018

Datum

U. Schmidt

Erstprüfer/in

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung und Abstract	I
Aufgabenstellung	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Nomenklatur	VII
Formelzeichen	VII
Indizes	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
2 Grundlagen	3
2.1 Prinzip der absoluten Stoffwerte	3
2.2 Anforderungen an das Berechnungsmodell	5
2.3 Grundlegende Gleichungen zur Berechnung von chemischen Energie-	
wandlungsprozessen	6
2.3.1 Berechnung von Gasgemischen	6
2.3.2 Berechnung des Luftbedarfs und der Produktzusammensetzung	8
2.3.3 Berechnung der adiabaten Prozesstemperatur	9
2.3.4 Wasserabscheidung im Abgasstrom	11
2.3.5 Wassereindüsung	12
2.3.6 Eindüsung von flüssigem Methanol/Ethanol	12
2.3.7 Berechnung des Enthalpiestroms und des Brenn-/Heizwertes ..	13
3 Vorstellung des entwickelten Modells	15
3.1 Allgemeingültige Randbedingungen	15
3.2 Variante 1: Vorgemischtes Luft-Brennstoff-Gemisch mit bekannten Tem-	
peraturen	17
3.3 Variante 2: Vorgemischtes Luft-Brennstoff-Gemisch mit unbekannter	
Prozesstemperatur	20
3.4 Variante 3: Brennstoffstrom mit bekanntem Luftverhältnis und bekann-	
ten Temperaturen	24
3.5 Variante 4: Brennstoffstrom mit bekanntem Luftverhältnis bei unbe-	
kannter Prozesstemperatur	27
4 Verifizierung des entwickelten Modells	32
4.1 Brenn- und Heizwertermittlung von Methan	32
4.2 Adiabate Verbrennungstemperatur von Methan	33

4.3	Adiabate Verbrennung von Methanol (Klausuraufgabe)	35
4.4	Verbrennung von Methan (Klausuraufgabe)	36
4.5	Taupunkttemperatur Rauchgas (Übungsaufgabe)	37
4.6	Verbrennung von Erdgas (Übungsaufgabe)	38
4.7	Berechnung einer Brennstoffzelle (Übungsaufgabe)	39
4.8	Verhalten des Berechnungsmodells bei untypischen oder fehlerhaften Vorgabewerten	41
5	Darstellung der Ergebnisse	42
5.1	Bilanzierung einer adiabaten Verbrennungsreaktion	42
5.2	Variation der Brennkammertemperatur	43
5.3	Abhängigkeit des Brennwertes von Temperatur und Luftzahl	46
6	Schlussbetrachtung	48
6.1	Zusammenfassung und Fazit	48
6.2	Kritische Würdigung und Ausblick	49
Literaturverzeichnis		50
A Anhang		51
Erklärung zur selbständigen Bearbeitung		133

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zuordnung absoluter Stoffwerte	3
2.2	Schema des gedanklich dreistufigen Verbrennungsprozesses	3
2.3	Verbrennung mit dem Prinzip der absoluten Stoffwerte	4
2.4	Algorithmus zur Iteration der Prozesstemperatur	10
3.1	Modellübersicht der Grundstruktur	15
3.2	Modellübersicht der Variante 1 des entwickelten Modells	17
3.3	Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 1	18
3.4	Modellübersicht der Variante 2 des entwickelten Modells	21
3.5	Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 2	22
3.6	Modellübersicht der Variante 3 des entwickelten Modells	24
3.7	Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 3	25
3.8	Modellübersicht der Variante 4 des entwickelten Modells	28
3.9	Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 4	29
4.1	Brennstoffzelle aus der Übungsaufgabe 5.9	39
5.1	h - T -Diagramm für die Verbrennung von Methan mit Luft	42
5.2	Thermodynamische Bilanz der Verbrennungsreaktion von reinem Methan mit Luft	43
5.3	Variation der Brennkammertemperatur durch Wassereinspritzung und Luftzahlanpassung	44
5.4	Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom O_2 -Gehalt	45
5.5	Abhängigkeit des Brennwertes von der Rauchgastemperatur	46
5.6	Abhängigkeit des Brennwertes von der Rauchgastemperatur und der Luftzahl	47

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht mit den Reaktionsgleichungen und den stöchiometrischen Koeffizienten enthaltener Ausgangs-/Reaktionsprodukte	8
3.1	Inhalt des Vorgabevektors mit den molaren Massen der ausgewählten chemischen Elemente und Verbindungen [3]	16
A.1	Dampf tabel	53
A.2	Absolute Stoffwerte für C(gr)	55
A.3	Absolute Stoffwerte für CH ₄	58
A.4	Absolute Stoffwerte für CH ₃ OH	61
A.5	Absolute Stoffwerte für CH ₃ OH(fl)	64
A.6	Absolute Stoffwerte für CO	65
A.7	Absolute Stoffwerte für CO ₂	68
A.8	Absolute Stoffwerte für C ₂ H ₆	71
A.9	Absolute Stoffwerte für C ₂ H ₅ OH	74
A.10	Absolute Stoffwerte für C ₂ H ₅ OH(fl)	77
A.11	Absolute Stoffwerte für C ₃ H ₈	78
A.12	Absolute Stoffwerte für C ₄ H ₁₀	81
A.13	Absolute Stoffwerte für H	84
A.14	Absolute Stoffwerte für H ₂	87
A.15	Absolute Stoffwerte für H ₂ O(d)	90
A.16	Absolute Stoffwerte für H ₂ O(fl)	93
A.17	Absolute Stoffwerte für O	94
A.18	Absolute Stoffwerte für OH	97
A.19	Absolute Stoffwerte für O ₂	100
A.20	Absolute Stoffwerte für N	103
A.21	Absolute Stoffwerte für NO	106
A.22	Absolute Stoffwerte für NO ₂	109
A.23	Absolute Stoffwerte für N ₂	112
A.24	Absolute Stoffwerte für S	115
A.25	Absolute Stoffwerte für SO	118
A.26	Absolute Stoffwerte für SO ₂	121
A.27	Absolute Stoffwerte für S ₂	124
A.28	Absolute Stoffwerte für Luft	127

Nomenklatur

Formelzeichen

c_p	spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
h_{mol}	molare Enthalpie	$\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
H_u	Brennwert	$\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
H_o	Heizwert	$\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
\dot{H}	Enthalpiestrom	W
I	Stromstärke	A
k	stöchiometrischer Faktor	[—]
L_{min}	Mindestluftbedarf	$\frac{\text{kmol}_{Luft}}{\text{kmol}_{Brennstoff}}$
L	tatsächlicher Luftbedarf	$\frac{\text{kmol}_{Luft}}{\text{kmol}_{Brennstoff}}$
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
M	molare Masse	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
n	Anzahl der Komponenten im Gemisch	[—]
n	Stoffmenge	mol
\dot{n}	Stoffmengenstrom	$\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
O_{min}	Mindestsauerstoffbedarf	$\frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kmol}_{Brennstoff}}$
O	tatsächlicher Sauerstoffbedarf	$\frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kmol}_{Brennstoff}}$
p	Druck	Pa
P_{el}	elektrische Leistung	W
q	spezifische Wärme	$\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	Gaskonstante eines bestimmten Gases	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
R_m	universelle Gaskonstante	$\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
s_{mol}	molare Entropie	$\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
T	Temperatur	K
U	elektrische Spannung	V
\dot{V}	Volumenstrom	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
w	spezifische Arbeit	$\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
x	Stoffmengenanteil	[—]

λ	Luftzahl, Luftverhältnis	[–]
ϑ	Temperatur	°C
ξ	Massenanteil	[–]
π	partieller Druckanteil	[–]
σ	Volumenanteil	[–]

Indizes

<i>a</i>	Ausgang
<i>B</i>	Brennstoff
<i>d</i>	Dampf
<i>d</i>	dampfförmig
<i>e</i>	Eingang
<i>el</i>	elektrisch
<i>ges</i>	gesamt
<i>fl</i>	flüssig
<i>K</i>	Kondensat
<i>L</i>	Luft
<i>min</i>	Mindest- oder minimal
<i>mol</i>	molar(e)
<i>P</i>	Prozess
<i>RG</i>	Rauchgas
<i>s</i>	Sättigung
<i>U</i>	Umgebung
<i>w</i>	Wasser
0	Normzustand
0	Referenz
τ	Taupunkt

1 Einleitung

Im Rahmen des Lehrgebiets der technischen Thermodynamik bedarf es häufig der Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen. Chemische Energiewandlungsprozesse sind Vorgänge, bei denen eine chemische Reaktion stattfindet und die in den Edukten gespeicherte chemische Energie in eine andere Energieform umgewandelt wird, wie zum Beispiel bei der Verbrennungsreaktion. Der Einsatz eines akademischen Tools kann sehr nützlich sein, um diese Prozesse zeitsparend und effizient zu berechnen. Anhand einer umfassenden Bilanz der Reaktion können thermodynamische Größen wie beispielsweise die entnehmbare Wärmeleistung bestimmt werden. Die verfügbare Wärmeleistung ist eine wichtige Größe, um zum Beispiel bei einer Gastherme die Menge des Wassers zu berechnen, das für die Nutzung im Heizkreislauf eines Mehrfamilienhauses zur Verfügung steht. Eine umfassende Bilanz eines chemischen Energiewandlungsprozesses ist zudem wichtig, um gleichartige Prozesse hinsichtlich ihrer Effizienz vergleichen zu können und den Einfluss einzelner Parameter wie beispielsweise des Eingangsdrucks oder der Eingangstemperatur der Edukte untersuchen zu können. Neben der Bilanzierung einer Gastherme wäre eine variable Nutzung des Berechnungstools auch zur Kalkulation eines Kraftwerks oder einer Brennstoffzelle vorteilhaft. Durch eine flexible Ausgestaltung ergibt sich ein breiter Anwendungsbereich für ein solches Tool.

1.1 Motivation und Hintergrund

Bei der Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen ist die händische Bilanzierung des Prozesses oft zeitintensiv und kompliziert. Je mehr Komponenten auf der Seite der Edukte vorhanden sind, umso aufwändiger wird die gesamte Berechnung. Ein akademisches Tool eignet sich optimal, um die Berechnung zu vereinfachen. Anhand des Tools ist eine einfache Selbstkontrolle bei der Berechnung solcher Prozesse möglich. Ebenso unterstützt es bei der Konzeptionierung neuer Übungs- oder Klausuraufgaben auf dem Gebiet der technischen Thermodynamik.

Ein digitales Berechnungsmodell ermöglicht zudem eine Erweiterung des Aufgabenspektrums. Neben der Verbrennungsreaktion ist es auch die Berechnung weiterer chemischer Energiewandlungsprozesse lehrreich. Hinsichtlich des derzeitigen Interesses an innovativen und erneuerbaren Lösungen für den Energiesektor im Zuge der Norddeutschen Energiewende 4.0, an der sich auch die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg beteiligt [7], könnte beispielsweise auch die Berechnung von Brennstoffzellen oder der Wasserstoffelektrolyse zunehmend an Bedeutung gewinnen. Ein kompaktes Berechnungstool, das eine große Vielfalt an Energiewandlungsprozessen abdeckt, ist somit besonders vorteilhaft, um einen breit gefächerten Anwendungsbezug theoretischer Inhalte aufzuzeigen.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines akademischen Tools zur thermodynamischen Berechnung von stöchiometrischen oder überstöchiometrischen chemischen Energiewandlungsprozessen unter Anwendung des Prinzips der absoluten kalorischen Stoffwerte, welche die chemisch gebundene Energie beinhalten. Die Entwicklungsumgebung des Berechnungsmodells ist auf den Funktionsumfang des Programms Matlab und der Zusatzsoftware Simulink des Herstellers MathWorks festgelegt. Der Funktionsumfang dieses Programms ist für die geplanten Berechnungen optimal geeignet. Anhand der Zusatzsoftware Simulink ist zudem eine weitgehend intuitive Umsetzung der Berechnung möglich.

Neben der Erläuterung der allgemeinen Anforderungen an das Modell und den grundlegenden Gleichungen zur Berechnung der chemischen Energiewandlungsprozesse beinhaltet diese Arbeit weiterhin die Vorstellung des Berechnungstools. Im Rahmen dieser Vorstellung werden der Aufbau, die Funktionalität und die Bedienung des entwickelten Modells erklärt. Zur notwendigen Verifizierung des Modells werden Testfälle beispielsweise anhand von bekannten Übungsaufgaben aus der Aufgabensammlung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt definiert. Ein anschließender Vergleich der erhaltenen Berechnungsergebnisse mit den Musterlösungen ermöglicht eine Verifizierung des entwickelten Tools. Weitere Berechnungsergebnisse des Simulink-Modells wie beispielsweise bei der Bestimmung von Heiz- oder Brennwerten werden anhand von Literaturwerten verifiziert. In verschiedenen grafischen Darstellungen der Ergebnisse soll zudem eine Auswahl der möglichen Veranschaulichungen präsentiert werden. In der folgenden Zusammenfassung wird neben einer abschließenden Beurteilung der Modellqualität auch ein Ausblick über mögliche Weiterentwicklungsfelder des erstellten Berechnungstools gewährt.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel bildet die Basis zur Vorstellung des entwickelten Modells zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen in Kapitel 3. Ebenso dienen die hier erläuterten Grundlagen der anschließenden Verifizierung des Berechnungstools in Kapitel 4.

2.1 Prinzip der absoluten Stoffwerte

Beim Prinzip der absoluten Stoffwerte wird jedem chemischen Element und jeder chemischen Verbindung ein individueller Wert für die spezifische Wärmekapazität c_p , die molare Entropie s_{mol} und die molare Enthalpie h_{mol} in Abhängigkeit von der Temperatur zugeordnet (siehe Abbildung 2.1). Die temperaturabhängigen Stoffwerte wurden ursprünglich über eine empirische Gleichung ermittelt und sind in einschlägigen Tabellenwerken zu finden.

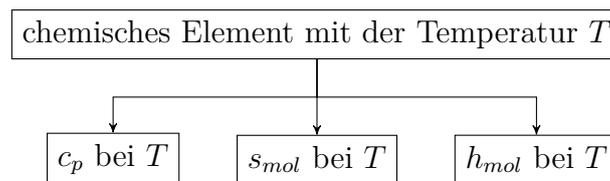


Abbildung 2.1: Zuordnung absoluter Stoffwerte

Mithilfe dieses Prinzips lässt sich die Energetik bei der Verbrennungsreaktion einfacher nachvollziehen als mit der Methode des gedanklich dreistufigen Verbrennungsprozesses. Bei der alternativen Variante wird die Verbrennungsreaktion in drei Stufen unterteilt. Ein Schema des gedanklich dreistufigen Verbrennungsprozesses ist in der Abbildung 2.2 dargestellt.

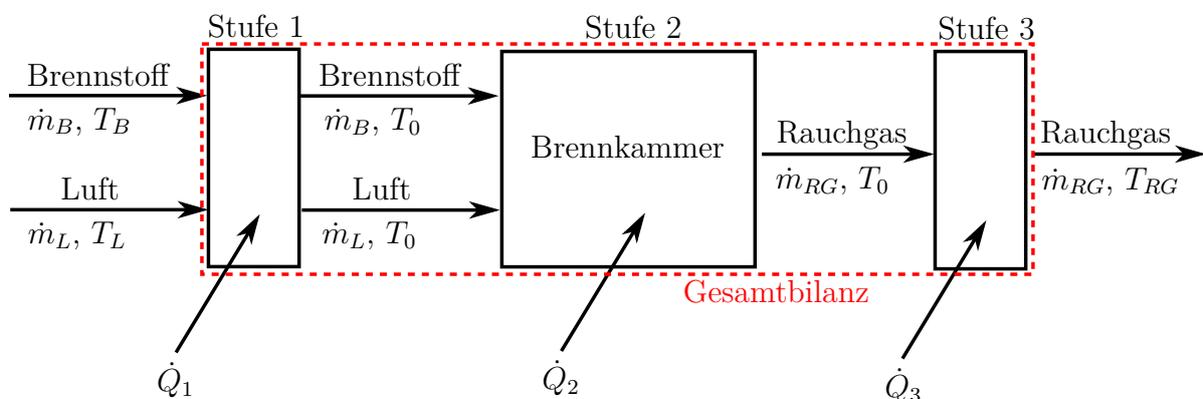


Abbildung 2.2: Schema des gedanklich dreistufigen Verbrennungsprozesses

Die Stufe 1 beinhaltet dabei die Erwärmung oder Abkühlung der Edukte Brennstoff \dot{m}_B und Luft \dot{m}_L auf die Bezugstemperatur T_0 mithilfe des Wärmestroms \dot{Q}_1 . Bei der zweiten Stufe wird dann die stoffliche Wandlung durch die Einbeziehung des Heizwerts bei Bezugstemperatur berücksichtigt. Dabei wird der Wärmestrom \dot{Q}_2 freigesetzt. Abschließend wird bei der dritten Stufe die Erwärmung der Produkte \dot{m}_{RG} von der Bezugstemperatur T_0 auf die Rauchgastemperatur T_{RG} durchgeführt. Dafür wird der Wärmestrom \dot{Q}_3 benötigt. Anschließend lassen sich die Bilanzen der drei Stufen zur Energetik der Verbrennungsreaktion zusammenfassen. Dieses Vorgehen ist notwendig, da die Heizwerte aus der Literatur nur für eine bestimmte Bezugstemperatur T_0 gültig sind.

Im Gegensatz dazu müssen für die Berechnung mit dem Prinzip der absoluten Stoffwerte lediglich die eingehenden Stoffmengenströme des Brennstoffs \dot{n}_B und der Luft \dot{n}_L , die Gemischzusammensetzungen in Stoffmengenanteilen $x_{B,i}$ und $x_{L,i}$ sowie die Temperaturen T_B , T_L und T_{RG} bekannt sein. In der Abbildung 2.3 ist das Schema einer Verbrennung für das Prinzip der absoluten Stoffwerte dargestellt.

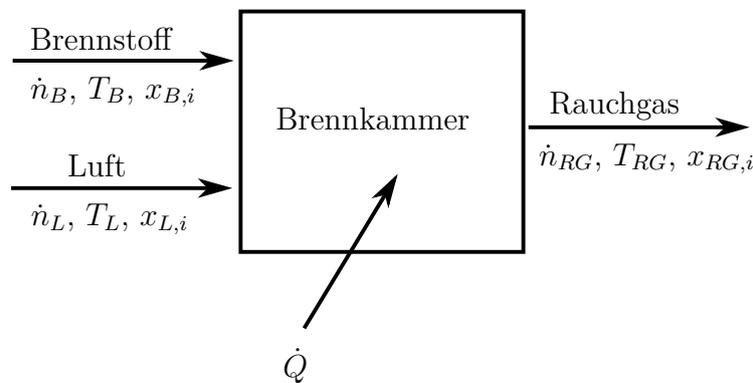


Abbildung 2.3: Verbrennung mit dem Prinzip der absoluten Stoffwerte

Mit einer Bilanz lässt sich die Energetik der gesamten Verbrennung betrachten, da in den Stoffwerten die chemisch gebundene Energie bereits berücksichtigt wird. Ein weiterer Vorteil des genannten Prinzips ist die Möglichkeit, eine energetische Bilanzierung auch für Stoffgemische beispielsweise bei einem Gemisch aus Wasserstoff, Methan, Ethan, Kohlenstoffmonoxid und Schwefeldioxid durchzuführen. Die zuvor genannte dreistufige Berechnung der Verbrennungsreaktion wird komplizierter, da die Literatur nur eingeschränkt Werte für den Heiz- beziehungsweise Brennwert oder die spezifischen Wärmekapazitäten von Stoffgemischen bereitstellt. Der Mischbrennwert und die mittlere spezifische Wärmekapazität bei Bezugstemperatur müssen zuerst aus den Anteilen und den jeweiligen Literaturwerten berechnet werden.

Das Prinzip der absoluten Stoffwerte ist zudem nicht nur auf die Anwendung für die Verbrennung von Stoffen beschränkt, sondern kann auch für weitere chemische Energieumwandlungsprozesse wie beispielsweise die Elektrolyse oder auch die Bilanzierung einer Brennstoffzelle eingesetzt werden. Es müssen lediglich die notwendigen Stoffdaten in der Datenbank hinterlegt sein, um eine Berechnung zu ermöglichen.

2.2 Anforderungen an das Berechnungsmodell

Das geplante Simulink-Modell ermöglicht die Berechnung von stationären chemischen Energiewandlungsprozessen. Dabei werden zunächst gängige Stoffe als Edukte oder auch Produkte berücksichtigt. Diese Auswahl kann jedoch jederzeit erweitert werden. Die folgenden chemischen Elemente und Verbindungen sind bislang mit Stoffwerten in der erstellten Datenbank enthalten:

- Kohlenstoff (C(gr)), Methan (CH₄), Methanol (CH₃OH), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Ethan (C₂H₆), Ethanol (C₂H₅OH), Propan (C₃H₈), Butan (C₄H₁₀)
- atomarer Wasserstoff (H), molekularer Wasserstoff (H₂), Wasser (H₂O)
- atomarer Sauerstoff (O), Hydroxid-Ion (OH), molekularer Sauerstoff (O₂)
- atomarer Stickstoff (N), Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), molekularer Stickstoff (N₂)
- atomarer Schwefel (S), Schwefelmonoxid (SO), Schwefeldioxid (SO₂), molekularer Schwefel (S₂)

Die absoluten Stoffwerte als Berechnungsgrundlage werden mit Hilfe von „NASA Thermo-*build*“ erzeugt. Dies ist ein Online-Portal der NASA (National Aeronautics and Space Administration), mit dem sich für beliebige Elemente und/oder Stoffe Werte generieren lassen. Nach der Auswahl der chemischen Verbindung müssen noch das Temperaturfenster und die Schrittweite definiert werden. Anschließend erhält man die geforderten Daten in Tabellenform.

Das gewählte Temperaturfenster des geplanten Berechnungsmodells erstreckt sich in 50-Kelvin-Schritten von 200 K bis 5000 K. Als besondere Zwischenpunkte sind auch die Werte für 273,15 K als 0 °C-Grenze und 298,15 K als häufig gewählte Bezugstemperatur in der Datenbank aufgeführt. Die Stoffwerte der flüssigen Phasen von H₂O, CH₃OH und C₂H₅OH sind ebenfalls in 50-Kelvin-Schritten im Temperaturbereich von 200 K bis 450 K in der Datenbank vertreten. Auch hier sind die Werte 273,15 K und 298,15 K als zusätzliche Punkte implementiert.

Für alle Berechnungen gilt, dass sich Stickstoff in erster Näherung inert verhält, sodass atomarer (N) oder molekularer Stickstoff (N₂) nicht zu Stickoxiden (NO_x) reagieren. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass sich vorhandene Stickstoffatome auf Seiten der Edukte während der Reaktion zu molekularem Stickstoff verbinden. Auch falls sich auf Seiten der Edukte Hydroxid-Ionen (OH⁻) befinden, werden diese als inert betrachtet.

Weiterhin werden alle Flüssigkeiten als inkompressibel angenommen und Wasserdampf ist bei den Berechnungen als ideales Gas zu behandeln. Ebenso gilt für die Berechnung aller chemischer Energiewandlungsprozesse, dass der Massenstrom in erster Näherung konstant

bleibt.

Bei der Entwicklung des Berechnungstools sind zusätzliche Funktionen zu implementieren, die neben der Berechnung des chemischen Energiewandlungsprozesses auch eine Wasserabscheidung im Abgasstrom und die Eindüsung von flüssigem Wasser oder flüssigem Methanol/Ethanol ermöglichen. Mit diesen Zusatzfunktionen verbreitert sich auch die Anwendbarkeit des Berechnungsmodells.

2.3 Grundlegende Gleichungen zur Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Gleichungen erläutert, die bei der Entwicklung des Berechnungstools Anwendung finden. Die gezeigten Zusammenhänge und Gleichungen bilden die Grundlage aller Berechnungen, die das entwickelte Modell ausführen kann.

2.3.1 Berechnung von Gasgemischen

Die Berechnung des Modells basiert auf molaren Größen. Um molare Größen in der thermodynamischen Berechnung von Gemischen verwenden zu können, werden die Angaben zur Gemischzusammensetzung in Stoffmengenanteilen benötigt. Für Gasgemische gilt allerdings, dass der Stoffmengenanteil x_i einer Komponente i in dem Gemisch gleich dem Druckanteil π_i und gleich dem Volumenanteil σ_i ist:

$$\frac{n_i}{n_{ges}} = \frac{p_i}{p_{ges}} = \frac{V_i}{V_{ges}} = x_i = \pi_i = \sigma_i$$

Um die spezifische Wärmekapazität $c_{p,ges}$ eines Gasgemisches zu ermitteln, wird die folgende Gleichung verwendet:

$$c_{p,ges} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot c_{p,i}) \quad (2.1)$$

x_i ist dabei der Stoffmengenanteil der Komponente i im Gemisch und $c_{p,i}$ die spezifische Wärmekapazität von i , während n hier für die Anzahl der Komponenten im Gemisch steht. Analog gilt für die Ermittlung der molaren Entropie $s_{mol,ges}$ und der molaren Enthalpie $h_{mol,ges}$ des Gemisches:

$$s_{mol,ges} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot s_{mol,i}) \quad (2.2)$$

$$h_{mol,ges} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot h_{mol,i}) \quad (2.3)$$

Ähnlich zur Gleichung (2.1) ist $s_{mol,i}$ die molare Entropie und $h_{mol,i}$ die molare Enthalpie der Komponente i . Falls der vorherrschende Druck p vom Normzustand ($p_0 = 1$ bar) abweicht, muss die berechnete Entropie mithilfe der allgemeinen Gaskonstante R_m korrigiert werden. Der korrigierte Wert für die Entropie ergibt sich dann gemäß:

$$s_{mol,korrigiert} = s_{mol,ges} - R_m \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (2.4)$$

Sollten nur die Massenanteile ξ_i der einzelnen Komponenten gegeben sein, so wird der folgende Zusammenhang benötigt, um die notwendigen Stoffmengenanteile zu berechnen:

$$R_{ges} = \sum_{i=1}^n (\xi_i \cdot R_i) \quad (2.5)$$

R_{ges} ist hier die Gaskonstante des Gemisches und R_i die Gaskonstante der jeweiligen Komponente i . Zudem wird die folgende Relation zur Berechnung genutzt:

$$R_m = R_{ges} \cdot M_{ges} \quad (2.6)$$

Umgestellt nach der molaren Masse des Gemisches M_{ges} und mit der Gleichung (2.5) ergibt sich dann:

$$M_{ges} = \frac{R_m}{\sum_{i=1}^n (\xi_i \cdot R_i)} \quad (2.7)$$

Analog zur Gleichung (2.6) gilt:

$$\begin{aligned} R_m &= R_i \cdot M_i \\ R_i &= \frac{R_m}{M_i} \end{aligned}$$

Eingesetzt in (2.7) erhält man den folgenden Ausdruck:

$$M_{ges} = \frac{R_m}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\xi_i}{M_i}\right) \cdot R_m} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\xi_i}{M_i}\right)} \quad (2.8)$$

Mit der berechneten molaren Masse des Gasgemisches und der nachfolgenden Gleichung können nun die Stoffmengenanteile berechnet werden:

$$x_i = \xi_i \cdot \frac{M_{ges}}{M_i} \quad (2.9)$$

Um hingegen Volumen- oder Stoffmengenanteile in Massenanteile umzurechnen, werden die molaren Massen der einzelnen Komponenten sowie die molare Masse des Gemisches benötigt. Letztere kann dabei mit dem folgenden Ausdruck berechnet werden:

$$M_{ges} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot M_i) \quad (2.10)$$

Der Massenanteil ξ_i der jeweiligen Komponente i ergibt sich dann nach:

$$\xi_i = x_i \cdot \frac{M_{ges}}{M_i} \quad (2.11)$$

Die erläuterten Gleichungen sind im Simulink-Modell für alle Varianten hinterlegt und bilden die Grundlage zur Berechnung aller weiteren Größen.

2.3.2 Berechnung des Luftbedarfs und der Produktzusammensetzung

Für die Berechnung der Produktzusammensetzung musste zunächst für jeden Stoff die Reaktionsgleichung aufgestellt werden, um Aussagen über die Reaktionsprodukte und damit über die Produktzusammensetzung treffen zu können. Zudem sind die chemischen Reaktionsgleichungen wichtig, um den Sauerstoffbedarf des Brennstoffgemisches bestimmen zu können. Die verwendeten Reaktionen sind in der folgenden Tabelle 2.1 zu sehen. Dabei ist in der zweiten Spalte der Koeffizient k_{i,O_2} angegeben, der den Sauerstoffverbrauch der jeweiligen Reaktion widerspiegelt. In den anschließenden Spalten sind die stöchiometrischen Koeffizienten der Produktseite für die chemischen Verbindungen H_2O , CO_2 , SO_2 , NO_2 , N_2 und OH aufgeführt.

Tabelle 2.1: Übersicht mit den Reaktionsgleichungen und den stöchiometrischen Koeffizienten enthaltener Ausgangs-/Reaktionsprodukte

Reaktionsgleichung	O ₂	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	NO ₂	N ₂	OH
$C + O_2 \longrightarrow CO_2$	1	0	1	0	0	0	0
$CH_4 + 2 O_2 \longrightarrow 2 H_2O + CO_2$	2	2	1	0	0	0	0
$CH_3OH + \frac{3}{2} O_2 \longrightarrow 2 H_2O + CO_2$	1.5	2	1	0	0	0	0
$CO + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO_2$	0.5	0	1	0	0	0	0
$C_2H_6 + \frac{7}{2} O_2 \longrightarrow 3 H_2O + 2 CO_2$	3.5	3	2	0	0	0	0
CO ₂	0	0	1	0	0	0	0
$C_2H_5OH + 3 O_2 \longrightarrow 3 H_2O + 2 CO_2$	3	3	2	0	0	0	0
$C_3H_8 + 5 O_2 \longrightarrow 4 H_2O + 3 CO_2$	5	4	3	0	0	0	0
$C_4H_{10} + \frac{13}{2} O_2 \longrightarrow 5 H_2O + 4 CO_2$	6.5	5	4	0	0	0	0
$H + \frac{1}{4} O_2 \longrightarrow \frac{1}{2} H_2O$	0.25	0.5	0	0	0	0	0
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O$	0.5	1	0	0	0	0	0
H ₂ O	0	1	0	0	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0
OH	0	0	0	0	0	0	1
O ₂	0	0	0	0	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0.5	0
$NO + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow NO_2$	0.5	0	0	0	1	0	0
NO ₂	0	0	0	0	1	0	0
N ₂	0	0	0	0	0	1	0
$S + O_2 \longrightarrow SO_2$	1	0	0	1	0	0	0
$S + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow SO_2$	0.5	0	0	1	0	0	0
SO ₂	0	0	0	1	0	0	0
$S_2 + 2 O_2 \longrightarrow 2 SO_2$	2	0	0	2	0	0	0

Zur weiteren Berechnung wird der eingehende Stoffmengenstrom \dot{n}_{ges} gemäß der Stoffmengenanteile x_i in Stoffströme \dot{n}_i der jeweiligen Komponente i aufgeteilt:

$$\dot{n}_i = x_i \cdot \dot{n}_{ges} \quad (2.12)$$

Mit der folgenden Gleichung kann nun aus den stöchiometrischen Faktoren k_{i,O_2} und der gesamten Brennstoffmenge $\dot{n}_{B,ges}$ die benötigte Mindestsauerstoffmenge O_{min} berechnet werden:

$$O_{min} = \frac{\sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \cdot k_{i,O_2})}{\dot{n}_B} \quad (2.13)$$

Die Luftzahl λ kann anschließend folgendermaßen berechnet werden:

$$\lambda = \frac{O}{O_{min}} = \frac{\dot{n}_{O_2} + \frac{1}{2} \cdot \dot{n}_O}{\sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \cdot k_{i,O_2})} \quad (2.14)$$

Für die Komponenten H_2O , CO_2 , SO_2 , NO_2 , N_2 und OH der Produktseite können anhand der stöchiometrischen Faktoren aus der Tabelle 2.1 die Stoffmengenströme $\dot{n}_{RG,i}$ berechnet werden. Dafür findet die folgende Gleichung Anwendung, die hier am Beispiel von CO_2 gezeigt wird:

$$\dot{n}_{RG,CO_2} = \sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \cdot k_{i,CO_2}) \quad (2.15)$$

Für Sauerstoff kann der verbleibende Stoffmengenstrom \dot{n}_{RG,O_2} bestimmt werden durch:

$$\dot{n}_{RG,O_2} = (\lambda - 1) \cdot O_{min} \cdot \dot{n}_{B,ges} = (\lambda - 1) \cdot \sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \cdot k_{i,O_2}) \quad (2.16)$$

Um die jeweiligen Anteile in der Produktzusammensetzung zu ermitteln, wird die folgende Relation benötigt, welche am Beispiel von O_2 dargestellt wird:

$$x_{RG,O_2} = \frac{\dot{n}_{RG,O_2}}{\dot{n}_{RG,O_2} + \dot{n}_{RG,H_2O} + \dot{n}_{RG,CO_2} + \dot{n}_{RG,SO_2} + \dot{n}_{RG,NO_2} + \dot{n}_{RG,N_2} + \dot{n}_{RG,OH}} \quad (2.17)$$

Die Stoffmengenanteile der übrigen Komponenten der Produktseite ergeben sich analog zur Gleichung (2.17).

2.3.3 Berechnung der adiabaten Prozesstemperatur

Soll die adiabate Prozesstemperatur eines Brennstoffes oder eines Stoffgemisches ermittelt werden, so müssen alle Eingangsgrößen (Temperatur, Druck und Zusammensetzung) gegeben sein. Da die chemischen Reaktionen der einzelnen Ausgangskomponenten bekannt sind, kann auch die Produktkonstellation als bekannt vorausgesetzt werden (siehe Kapitel 2.3.2).

Liegt in der Reaktionskammer die adiabate Prozesstemperatur vor, dann gilt für die spezifische Wärme q und die spezifische Arbeit w , die über die Systemgrenzen hinweg ausgetauscht werden:

$$\begin{aligned} q &= 0 \\ w &= 0 \end{aligned}$$

Dementsprechend ergibt sich für die molare Zielenthalpie der folgende Zusammenhang:

$$h_{mol,Ziel} = h_{mol,Edukte} = h_{mol,Produkte} - q - w = \sum_{i=1}^n (x_{RG,i} \cdot h_{mol,i}) \quad (2.18)$$

Es muss demnach die Produkttemperatur gefunden werden, bei der die temperaturabhängigen Enthalpien am Ein- und Ausgang des Reaktionsraums gleich groß sind. Dabei erfolgt die Berechnung der gesuchten Temperatur iterativ. Dafür wird zunächst die spezifische Enthalpie der Edukte berechnet:

$$h_{mol,Edukte} = \frac{\sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \cdot h_{mol,i})}{\sum_{i=1}^n (\dot{n}_i)} \quad (2.19)$$

Als Starttemperatur für die Iteration kann beispielsweise $T_{Start} = T_1 = 298,15$ K gewählt werden. Für diese wird mithilfe der bekannten Produktzusammensetzung die spezifische Enthalpie anhand der Gleichung (2.18) bestimmt. Aus der Differenz zwischen der spezifischen Enthalpie der Edukte $h_{mol,Edukte}$, die der Zielenthalpie $h_{mol,Ziel}$ entspricht, und der Enthalpie der Produkte $h_{mol,Produkte}$ kann mithilfe der spezifischen Wärmekapazität des Produkts der nächste Temperaturwert T_2 zur Annäherung an die Prozesstemperatur bestimmt werden:

$$T_2 = T_1 + \frac{h_{mol,Edukte} - h_{mol,Produkte}}{c_{p,Produkte}} \quad (2.20)$$

Für die Temperatur T_2 wird dann erneut die spezifische Enthalpie der Produkte berechnet, um aus dieser wieder die Enthalpiedifferenz und damit die neue Iterationstemperatur zu bestimmen. Die Iterationsschleife wird so lange durchlaufen, bis die Temperaturdifferenz eine zuvor gewählte Grenze wie zum Beispiel $\Delta T \leq 10^{-2}$ K unterschreitet. Zu diesem Zeitpunkt ist die Iterationstemperatur gleich der adiabaten Prozesstemperatur. Die Iteration folgt dem Schema aus der Abbildung 2.4.

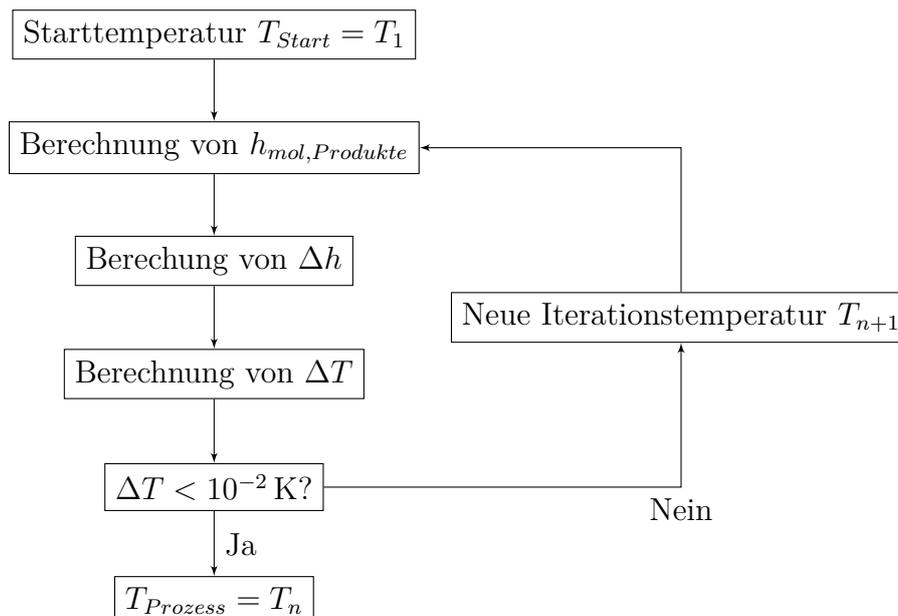


Abbildung 2.4: Algorithmus zur Iteration der Prozesstemperatur

Die Berechnung der Prozesstemperatur kann mithilfe dieser Iteration auch bei nicht adiabaten Bedingungen erfolgen. Dafür müssen in der Gleichung (2.18) statt 0 für die spezifische Arbeit w und die spezifische Wärme q entsprechende Werte eingetragen werden. Dabei gilt, dass eingehende Ströme als positiv und ausgehende Ströme als negativ bilanziert werden. Wird dem Prozess beispielsweise spezifische Wärme entnommen, so ist $q < 0$.

2.3.4 Wasserabscheidung im Abgasstrom

Ist die Abgastemperatur unterhalb des kritischen Punkts von 373,95 °C [2], kann das in der Luft enthaltene Wasser teilweise auskondensieren. Neben der Temperatur ist dabei auch der Partialdruck des Wassers $p_{\text{H}_2\text{O}}$ entscheidend. Dieser lässt sich berechnen mit:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = x_{RG,\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{ges} \quad (2.21)$$

$x_{RG,\text{H}_2\text{O}}$ ist hier der Stoffmengenanteil des Wassers im Produkt und p_{ges} entspricht dem Druck auf der Produktseite. Damit Wasser auskondensiert, muss der Partialdruck des Wassers $p_{\text{H}_2\text{O}}$ größer sein als der temperaturabhängige Sättigungsdruck der Luft p_s , der aus der Dampf tabel abgelesen werden kann. Ein Auszug der Dampf tabel ist im Kapitel A.1 des Anhangs zu finden. Ist diese Voraussetzung erfüllt und unter der Annahme, dass die Luft nach der Wasserabscheidung gesättigt ist, gilt:

$$x_s = \frac{p_s(T_{RG})}{p_{ges}} = \frac{\dot{n}_d}{\dot{n}_{RG,\text{H}_2\text{O}} - \dot{n}_K} \quad (2.22)$$

In diesem Zusammenhang entspricht x_s dem Sättigungsgrad der Luft, \dot{n}_d dem Stoffmengenstrom des dampfförmigen Wassers und \dot{n}_K dem Stoffmengenstrom des flüssigen Kondensats, welches abgeschieden werden soll. Eine Bilanzierung der Stoffmengenströme für die Wasserabscheidung ergibt:

$$\dot{n}_{RG,\text{H}_2\text{O}} = \dot{n}_d + \dot{n}_K \quad (2.23)$$

Der Stoffmengenstrom des auskondensierten Wassers \dot{n}_K kann berechnet werden mit:

$$\dot{n}_K = \frac{\dot{n}_{RG,\text{H}_2\text{O}} - x_s \cdot \dot{n}_{RG,\text{H}_2\text{O}}}{1 - x_s} \quad (2.24)$$

Zur Bestimmung der Produktzusammensetzung nach der Wasserabscheidung wird zunächst der Massenstrom, der die Reaktionskammer verlässt, mithilfe der molaren Masse der Produkte in einen Stoffmengenstrom umgerechnet:

$$\dot{n}_{RG} = \frac{\dot{m}_{RG}}{M_{ges}} \quad (2.25)$$

Anschließend wird dieser anhand der bekannten Stoffmengenanteile aufgeteilt:

$$\dot{n}_{RG,i} = x_i \cdot \dot{n}_{RG} \quad (2.26)$$

Der Stoffmengenstrom des Wassers, der nach der Kondensatabscheidung noch in der Luft enthalten ist, ergibt sich durch Umstellen der Gleichung (2.23):

$$\dot{n}_d = \dot{n}_{RG,H_2O} - \dot{n}_K \quad (2.27)$$

Der jeweilige Volumennanteil $x_{RG,i}$ der Komponente i im Rauchgas kann nun analog zur Formel (2.17) bestimmt werden. Aufgrund der Kondensation von Wasser wird zusätzliche Wärme freigesetzt, die bei der Bilanzierung des chemischen Energiewandlungsprozesses berücksichtigt werden muss. Der zusätzliche Wärmestrom \dot{Q}_K kann berechnet werden mit:

$$\dot{Q}_K = \dot{n}_K \cdot (h_{mol,H_2O(fl)} - h_{mol,H_2O(d)}) \quad (2.28)$$

Die Größen $h_{mol,H_2O(fl)}$ und $h_{mol,H_2O(d)}$ entsprechen hierbei den molaren Enthalpien von flüssigem und dampf-/gasförmigem Wasser bei Prozesstemperatur.

2.3.5 Wassereindüsung

Zur Reduzierung der Reaktionstemperatur kann in den Reaktionsraum flüssiges Wasser eingedüst werden. Eine Wassereinspritzung und damit eine Absenkung der Verbrennungstemperatur kann beispielsweise in Brennkammern von Gasturbinen eingesetzt werden, um die Bildung von Stickoxiden um 50 bis 70 % zu reduzieren [1]. Um die Gemischanteile des eingehenden Luft-Brennstoff-Gemisches durch die Eindüsung von flüssigem Wasser nicht zu beeinflussen und damit die Berechnung eines Zwei-Phasen-Gemisches zu umgehen, wird das flüssige Wasser in einem separaten Enthalpiestrom berücksichtigt. Die Berechnung von Zwei-Phasen-Gemischen ist sehr umfangreich, da Gase und Flüssigkeiten parallel vorliegen und zwischen den Phasen Wechselwirkungen auftreten. Eine Betrachtung solcher Gemische insbesondere die Gemischbildung übersteigen den Rahmen dieser Arbeit, aber es lassen sich Informationen zu Zwei-Phasen-Gemischen in einschlägiger Fachliteratur finden.

Der Enthalpiestrom des flüssigen Wassers \dot{H}_w kann mit der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$\dot{H}_w = \dot{n}_w \cdot h_{mol,w} \quad (2.29)$$

Für die Berechnung ist neben dem Stoffmengenstrom \dot{n}_w auch die temperaturabhängige molare Enthalpie des Wassers $h_{mol,w}$ notwendig. Für die Verdampfung des flüssigen Wassers in der Brennkammer wird ein Teil der frei werdenden Reaktionsenthalpie benötigt, sodass die Verbrennungstemperatur reduziert und zeitgleich die Abgasverluste erhöht werden. Allerdings kann durch eine Kondensation im Abgasstrom eine Rückgewinnung der Verdampfungswärme umgesetzt werden, sodass der Ertrag an Nutzwärme wieder erhöht wird [5].

2.3.6 Eindüsung von flüssigem Methanol/Ethanol

Bei der Berücksichtigung von flüssigem Methanol oder Ethanol in einem chemischen Energiewandlungsprozess wird wie im Teilabschnitt 2.3.1 ein separater Enthalpiestrom

betrachtet, um die Berechnung eines Zwei-Phasen-Gemisches zu umgehen. Die Enthalpieströme $\dot{H}_{\text{CH}_3\text{OH}}$ und $\dot{H}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}$ können analog zur Gleichung (2.29) berechnet werden:

$$\begin{aligned}\dot{H}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)} &= \dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)} \cdot h_{mol,\text{CH}_3\text{OH}(fl)} \\ \dot{H}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)} &= \dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)} \cdot h_{mol,\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}\end{aligned}$$

Neben einer Berücksichtigung der eingehenden Enthalpieströme in der Bilanz müssen die Stoffmengenströme $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ und $\dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ auch bei der Berechnung des Brenn- und Heizwertes Beachtung finden, da diese immer auf die eingehende Brennstoffmenge bezogen werden. Die Brennstoffmenge $\dot{n}_{B,ges}$ setzt sich demnach aus den Stoffmengenströmen des gasförmigen Brennstoffgemisches \dot{n}_B , des flüssigen Methanols $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ und des flüssigen Ethanol $\dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ zusammen:

$$\dot{n}_{B,ges} = \dot{n}_B + \dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)} + \dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)} \quad (2.30)$$

2.3.7 Berechnung des Enthalpiestroms und des Brenn-/Heizwertes

Für die Berechnung des verfügbaren Enthalpiestroms eines chemischen Energiewandlungsprozesses müssen die Zusammensetzungen der Edukte und Produkte sowie die jeweiligen Drücke und Temperaturen bekannt sein. Der verfügbare Enthalpiestrom \dot{H} fasst den Wärmestrom \dot{Q}_P und die elektrische Leistung P_{el} , die dem Prozess entnommen werden können zusammen. Als erster Berechnungsschritt ist die Aufstellung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik für den Energiewandlungsprozess hilfreich:

$$\underbrace{\dot{Q}_P + P_{el}}_{\dot{H}} + \sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \cdot h_{mol,i}) + \dot{H}_w + \dot{H}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)} + \dot{H}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)} = \sum_{i=1}^n (\dot{n}_{RG,i} \cdot h_{mol,i}) \quad (2.31)$$

Der Koeffizient n steht hier für die Anzahl der Komponenten, die im eingehenden gasförmigen Stoffgemisch enthalten sind. Wird zusätzlich flüssiges Wasser oder flüssiges Methanol/Ethanol eingedüst, sind die jeweiligen Enthalpieströme \dot{H}_w , $\dot{H}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ und $\dot{H}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in der Bilanz zu berücksichtigen. Der Ausdruck \dot{n}_i bezeichnet den Stoffmengenstrom der Komponente i der Edukte, während $\dot{n}_{RG,i}$ den Stoffmengenstrom der Komponente i auf der Produktseite widerspiegelt. Die Stoffmengenströme jeder Komponente können anhand der Gleichung (2.12) berechnet werden. Die molaren Enthalpien $h_{mol,i}$ erhält man aus der Interpolation der Datenbankwerte in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur. Dabei wird zunächst die Annahme getroffen, dass das gesamte Produktwasser dampfförmig vorliegt. Löst man die Gleichung (2.31) nach dem verfügbaren Enthalpiestrom \dot{H} auf, so erhält man:

$$\dot{H} = \dot{Q}_P + P_{el} = \sum_{i=1}^n (\dot{n}_{RG,i} \cdot h_{mol,i}) - \sum_{i=1}^n (\dot{n}_i \cdot h_{mol,i}) - \dot{H}_w - \dot{H}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)} - \dot{H}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$$

Liegt die Temperatur der Produkte unterhalb der Taupunkttemperatur T_{tau} wird zusätzlich Kondensationswärme freigesetzt, die mit der Gleichung (2.28) berechnet werden kann. Für die weiterführende Berechnung des Brenn- oder Heizwertes wird noch die Brennstoffmenge $\dot{n}_{B,ges}$ benötigt. Diese kann mithilfe der Gleichung (2.30) berechnet werden. Der

Brennwert kann unter der Annahme, dass das gesamte Produktwasser dampfförmig vorliegt, berechnet werden mit:

$$H_u = \frac{\dot{H}}{\dot{n}_{B,ges}} \quad (2.32)$$

Liegt das gesamte Produktwasser hingegen in flüssiger Form vor, steht neben dem Enthalpiestrom \dot{H} zusätzlich die gesamte Kondensationswärme $\dot{Q}_{K,ges}$ zur Verfügung:

$$\dot{Q}_{K,ges} = \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (h_{mol,\text{H}_2\text{O}(fl)} - h_{mol,\text{H}_2\text{O}(d)}) \quad (2.33)$$

Der Heizwert kann nun anhand der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$H_o = \frac{\dot{H} + \dot{Q}_{K,ges}}{\dot{n}_{B,ges}} \quad (2.34)$$

3 Vorstellung des entwickelten Modells

Unter Betrachtung der in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen wird in diesem Kapitel das Modell zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen vorgestellt. Neben allgemeinen Randbedingungen, die für alle Modifikationen des Berechnungstools gelten, werden auch die Besonderheiten und weiterführende Informationen zur Bedienung und zum Aufbau der einzelnen Varianten erläutert, die individuelle Anwendungsbereiche aufweisen.

3.1 Allgemeingültige Randbedingungen

Alle Varianten sind in der Datei „Simulinkmodell.slx“ gespeichert. Dieses Modell wurde mit der Matlab-Version 2017a erstellt und ist nur mit dieser oder einer aktuelleren Programmversion (2017b, 2018a, ...) anwendbar. Die Beschriftungen aller verwendeten Blöcke entsprechen der Sprache des Programms Matlab und sind damit auf Englisch verfasst. Die Varianten 1 bis 4 können unabhängig voneinander genutzt werden, sodass auch eine parallele Berechnung möglich ist. Eine schematische Übersicht der Grundstruktur aller Varianten des Berechnungstools ist in der Abbildung 3.1 zu sehen.

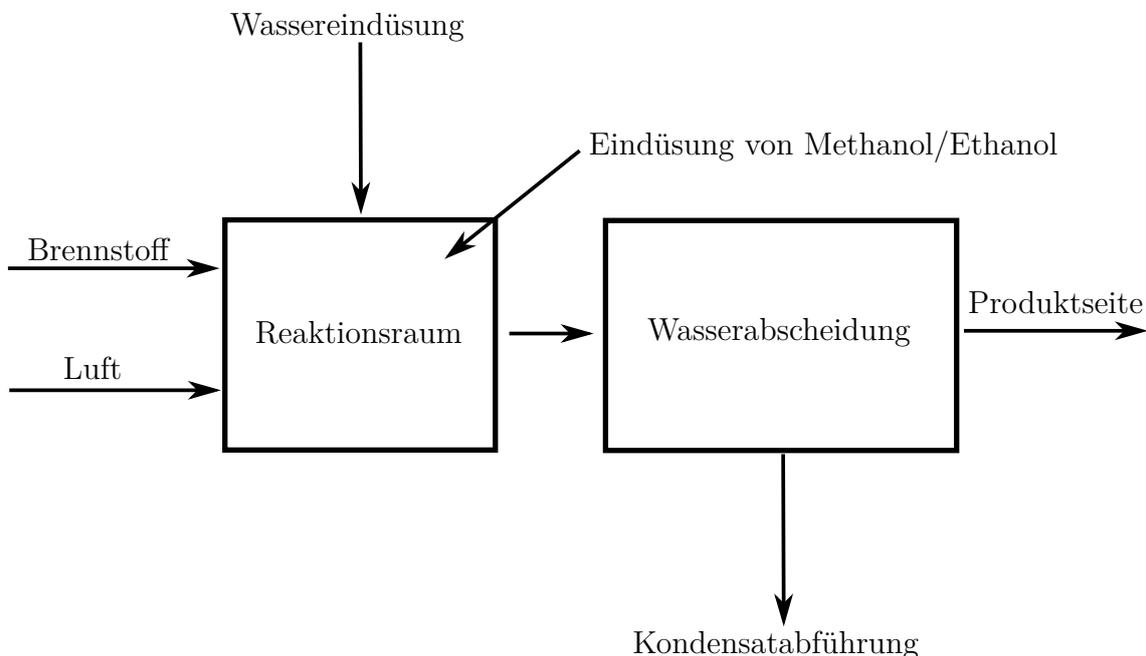


Abbildung 3.1: Modellübersicht der Grundstruktur

Gemeinsam haben alle Modifikationen, dass vor der Nutzung des Simulink-Modells einmalig das Matlab-File „Database.mat“ in den Workspace geladen werden muss. Diese

Datei enthält alle notwendigen Stoffdaten wie beispielsweise die absoluten kalorischen Stoffwerte und erzeugt diejenigen Variablen, die für die einzelnen Berechnungen erforderlich sind. Zu diesen Variablen gehört auch der Vektor, welcher die Werte für die molaren Massen enthält. In der nachfolgenden Tabelle 3.1 sind die gespeicherten molaren Massen der einzelnen Komponenten dargestellt. Dabei sind in der ersten Spalte die jeweilige Spaltennummer, in der zweiten Spalte das chemische Element beziehungsweise die chemische Verbindung und in der dritten Spalte die molare Masse des jeweiligen Elements dargestellt. Die erste Spalte des Vektors (Spaltennummer 1) dient Simulink beim Einlesen der Variable als Zeitstempel. Der Wert in dieser Zelle wird beim Übertragen in Simulink gelöscht, sodass der Vektor auf 23 Werte gekürzt wird, die in der Berechnung benötigt werden.

Tabelle 3.1: Inhalt des Vorgabevektors mit den molaren Massen der ausgewählten chemischen Elemente und Verbindungen [3]

Spaltennummer	chemisches Element/chemische Verbindung	molare Masse in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
1	(Zeitstempel fürs Simulink-Modell)	0
2	C(gr)	12,010
3	CH ₄	16,042
4	CH ₃ OH	32,041
5	CO	28,009
6	CO ₂	44,008
7	C ₂ H ₆	30,068
8	C ₂ H ₅ OH	46,067
9	C ₃ H ₈	44,094
10	C ₄ H ₁₀	58,12
11	H	1,008
12	H ₂	2,016
13	H ₂ O	18,015
14	O	15,999
15	OH	17,007
16	O ₂	31,998
17	N	14,007
18	NO	30,006
19	NO ₂	46,005
20	N ₂	28,014
21	S	32,060
22	SO	48,059
23	SO ₂	64,058
24	S ₂	64,120

3.2 Variante 1: Vorgemischtes Luft-Brennstoff-Gemisch mit bekannten Temperaturen

Diese Variante eignet sich für die Berechnung von vorgemischten Luft-Brennstoff-Gemischen mit bekannter Konstellation und gegebenen Temperaturen am Ein- und Ausgang des Reaktionsraums. Mithilfe des Simulink-Modells lässt sich der gewünschte Energiewandlungsprozess bilanzieren und es liefert unter anderem Erkenntnisse über die Produktzusammensetzung oder den verfügbaren Enthalpiestrom. Eine schematische Übersicht der Variante 1 ist in der Abbildung 3.2 zu sehen. In der Abbildung sind die gegebenen Größen schwarz und die gesuchten Größen rot eingetragen. Die dargestellten Größen werden im weiteren Verlauf des Kapitels erläutert.

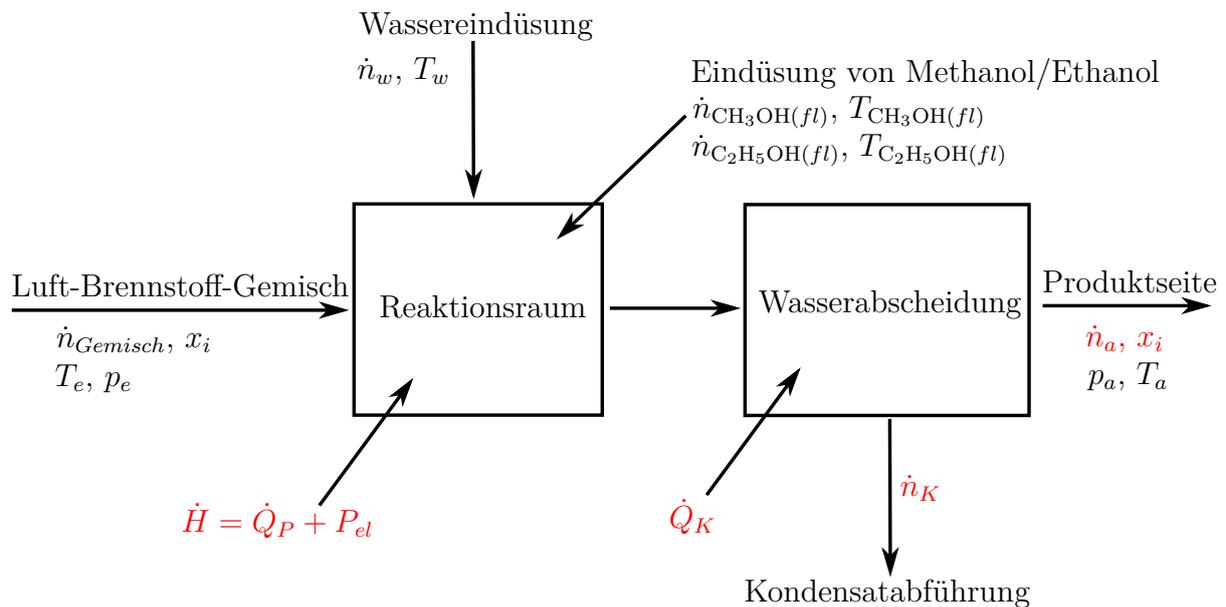


Abbildung 3.2: Modellübersicht der Variante 1 des entwickelten Modells

Neben den Volumenanteilen des Luft-Brennstoff-Gemisches können auch Massenanteile vorgegeben werden. Zudem ist auch die Vorgabe von Massenströmen statt Stoffmengenströmen möglich. Die Zusammensetzung des eingehenden Luft-Brennstoff-Gemisches wird aus dem Workspace ausgelesen. Zur Eingabe der Gemischkonstellation sind die folgenden Variablen vorgesehen:

- Vorgabe von Massenanteilen in:
 - „fuel_composition_mass_v1“
- Vorgabe von Volumenanteilen in:
 - „fuel_composition_volume_v1“

Diese Variablen beinhalten jeweils einen Zeilen-Vektor mit 24 Spalten. Die Reihenfolge der

einzelnen Elemente entspricht der Abfolge wie sie in der Tabelle 3.1 zu sehen ist. Auch bei der Vorgabe der Gemischkonstellation wird der erste Wert des Vektors von Simulink als Zeitstempel interpretiert und beim Einlesen gelöscht. Das Umschalten zwischen Volumen- und Massenanteilen erfolgt mittels einer Schaltfläche, die im Simulink-Modell hinterlegt ist. In der nachfolgenden Abbildung 3.3 ist das Simulink-Modell dieser Variante dargestellt. Die Ziffern 1 bis 11 stehen für Vorgabewerte und die Ziffern 12 bis 30 spiegeln Ergebnisse wider, die jeweils unterhalb der Abbildung erläutert werden. Die Schalter S1 bis S4 ermöglichen das Umschalten zwischen der Vorgabe von Stoffmengenströmen oder Massenströmen während der Schalter S5 den Wechsel zwischen der Vorgabe von Massen- oder Volumenanteilen steuert.

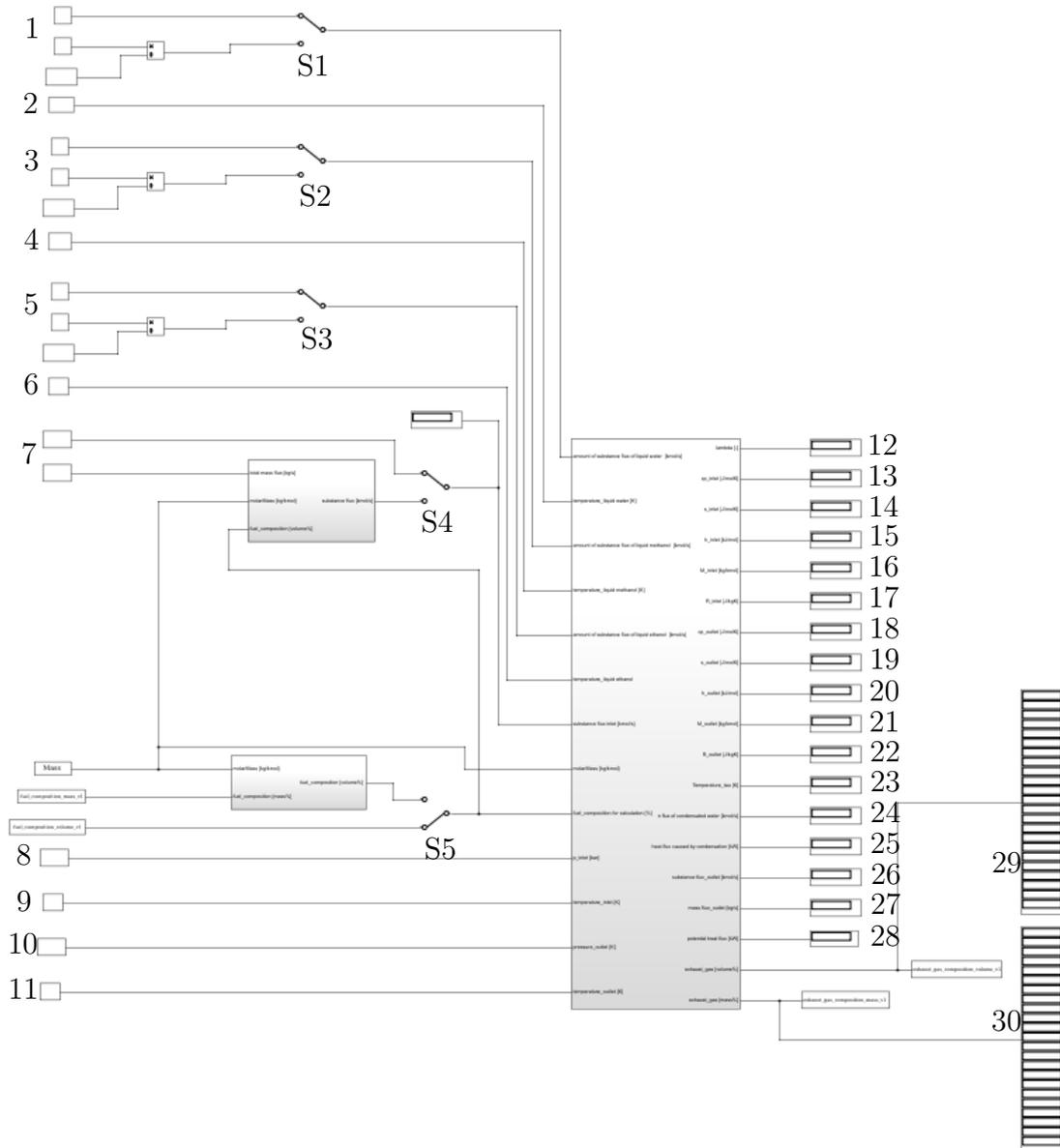


Abbildung 3.3: Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 1

Bei dieser Variante müssen zusätzlich die folgenden Angaben über Konstanten-Felder im Simulink-Modell vorgegeben werden:

1. Stoffmengenstrom des eingedüsten Wassers \dot{n}_w in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_w in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
2. Temperatur des eingedüsten Wassers T_w in K
3. Stoffmengenstrom des eingedüsten Methanols $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
4. Temperatur des eingedüsten Methanols $T_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in K
5. Stoffmengenstrom des eingedüsten Ethanols $\dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
6. Temperatur des eingedüsten Ethanols $T_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in K
7. Stoffmengenstrom des Luft-Brennstoff-Gemisches \dot{n}_{Gemisch} in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_{Gemisch} in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
8. Eingangsdruck des Luft-Brennstoff-Gemisches p_e in bar
9. Eingangstemperatur des Luft-Brennstoff-Gemisches T_e in K
10. Ausgangsdruck der Produkte p_a in bar
11. Ausgangstemperatur der Produkte T_a in K

Mit den zuvor vorgegebenen Daten kann das Simulink-Modell die gewünschten Berechnungen ausführen. Dabei werden folgende Resultate bereitgestellt:

12. Luftzahl λ
13. spezifische Wärmekapazität des Luft-Brennstoff-Gemisches $c_{p,e}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
14. molare Entropie des Luft-Brennstoff-Gemisches $s_{mol,e}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
15. molare Enthalpie des Luft-Brennstoff-Gemisches $h_{mol,e}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
16. molare Masse des Luft-Brennstoff-Gemisches M_e in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
17. Gaskonstante des Luft-Brennstoff-Gemisches R_e in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
18. spezifische Wärmekapazität der Produkte $c_{p,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
19. molare Entropie der Produkte $s_{mol,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
20. molare Enthalpie der Produkte $h_{mol,a}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

21. molare Masse der Produkte M_a in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
22. Gaskonstante der Produkte R_a in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
23. Taupunkttemperatur der Produktseite T_{tau} in K
24. Stoffmengenfluss des abgeschiedenen Kondensats \dot{n}_K in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
25. zusätzlicher Wärmestrom aufgrund von Kondensation \dot{Q}_K in kW
26. Stoffmengenfluss der Produkte \dot{n}_a in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
27. Massenstrom der Produkte \dot{m}_a in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
28. verfügbarer Enthalpiestrom des Prozesses \dot{H} in kW
29. Produktzusammensetzung in Volumenanteilen
30. Produktzusammensetzung in Massenanteilen

Da alle Größen in Pfeilrichtung positiv definiert wurden, stehen negative Werte bei den Ergebnissen \dot{Q}_K und \dot{H} für den Wärmestrom bzw. Enthalpiestrom, der dem Prozess entnommen werden kann.

3.3 Variante 2: Vorgemischtes Luft-Brennstoff-Gemisch mit unbekannter Prozesstemperatur

Diese Variante eignet sich für die Berechnung von vorgemischten Luft-Brennstoff-Gemischen mit bekannter Konstellation bei unbekannter Prozesstemperatur. Mithilfe des Simulink-Modells lässt sich der gewünschte Energiewandlungsprozess bilanzieren und es liefert unter anderem Erkenntnisse über die Prozesstemperatur oder die Produktzusammensetzung. Eine Übersicht der Variante 2 ist in der Abbildung 3.4 zu sehen. In der Abbildung sind die gegebenen Größen schwarz und die gesuchten Größen rot eingetragen. Die dargestellten Größen werden im weiteren Verlauf des Kapitels erläutert.

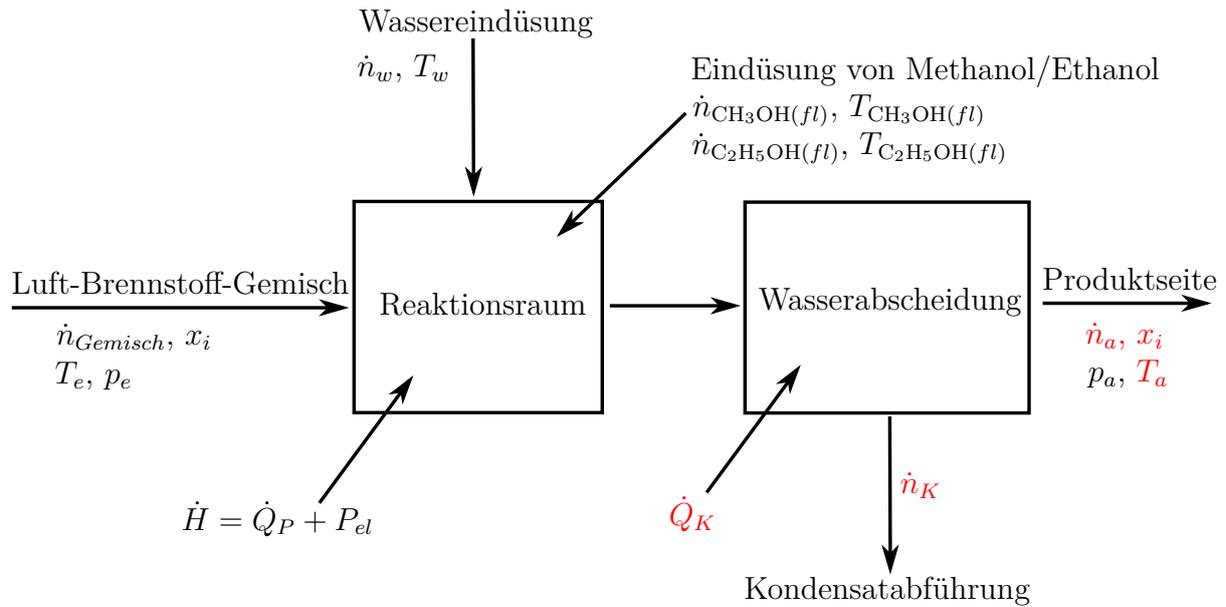


Abbildung 3.4: Modellübersicht der Variante 2 des entwickelten Modells

Neben den Volumenanteilen des Luft-Brennstoff-Gemisches können auch Massenanteile vorgegeben werden. Zudem ist statt der Vorgabe von Stoffmengenströmen auch die Angabe von Massenströmen möglich. Die Zusammensetzung des eingehenden Luft-Brennstoff-Gemisches wird aus dem Workspace ausgelesen. Zur Eingabe der Gemischkonstellation sind die folgenden Variablen vorgesehen:

- Vorgabe von Massenanteilen in:
 - „fuel_composition_mass_v2“
- Vorgabe von Volumenanteilen in:
 - „fuel_composition_volume_v2“

In der nachfolgenden Abbildung 3.5 ist das Simulink-Modell dieser Variante dargestellt. Die Ziffern 1 bis 12 stehen für Vorgabewerte und die Ziffern 13 bis 30 spiegeln Ergebnisse wider, die jeweils unterhalb der Abbildung erläutert werden. Die Schalter S1 bis S4 ermöglichen das Umschalten zwischen der Vorgabe von Stoffmengenströmen oder Massenströmen während der Schalter S5 den Wechsel zwischen der Vorgabe von Massen- oder Volumenanteilen steuert.

Bei dieser Variante sind zusätzlich die folgenden Eingangsparameter bekannt, die als Vorgabewerte in Konstanten-Felder des Simulink-Modells eingetragen werden:

1. Stoffmengenstrom des eingedüsten Wassers \dot{n}_w in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_w in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
2. Temperatur des eingedüsten Wassers T_w in K

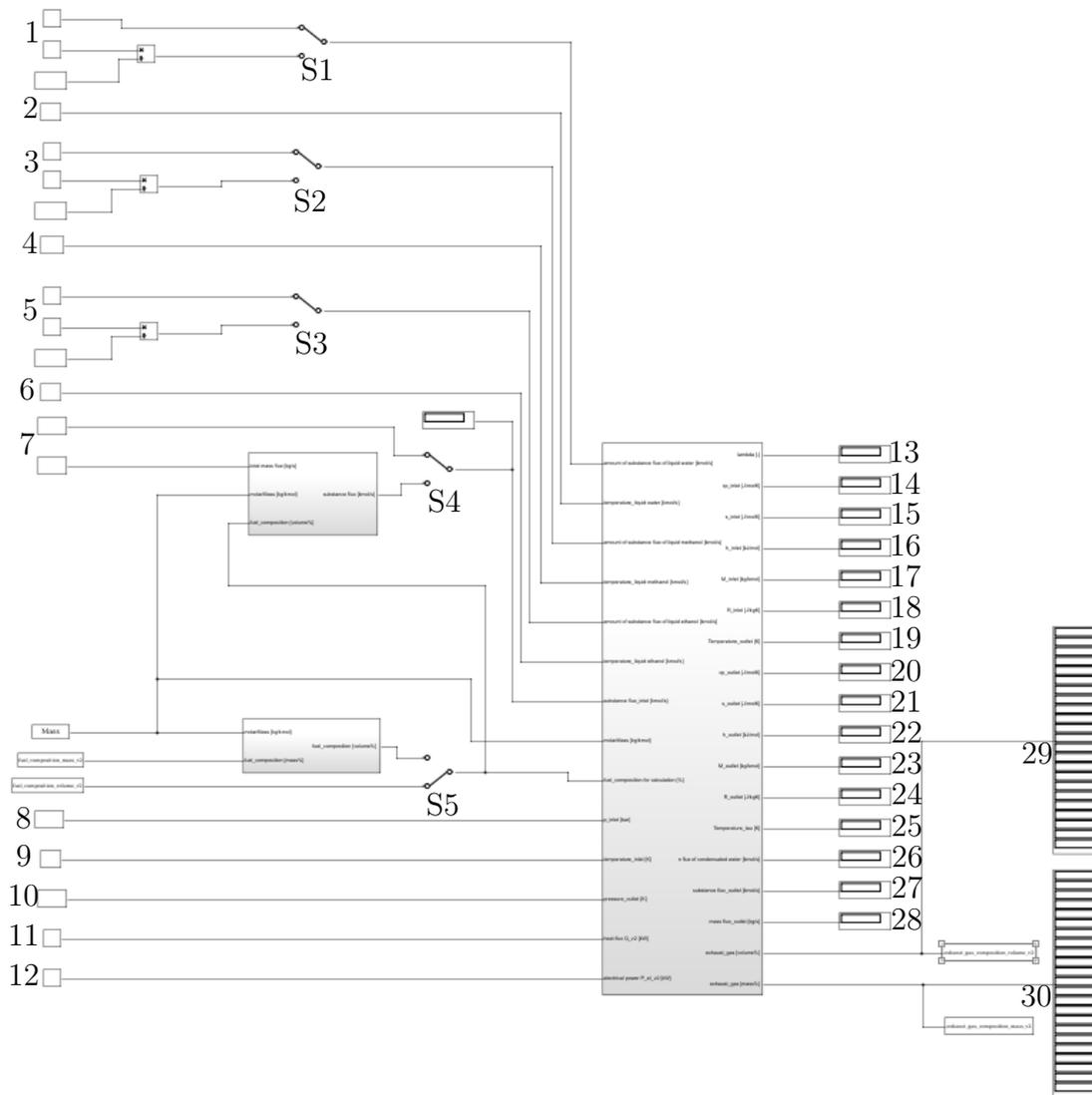


Abbildung 3.5: Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 2

3. Stoffmengenstrom des eingedüsten Methanols $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
4. Temperatur des eingedüsten Methanols $T_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in K
5. Stoffmengenstrom des eingedüsten Ethanol $\dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
6. Temperatur des eingedüsten Ethanol $T_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in K
7. Stoffmengenstrom des Luft-Brennstoff-Gemisches \dot{n}_{Gemisch} in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_{Gemisch} in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
8. Eingangsdruck des Luft-Brennstoff-Gemisches p_e in bar
9. Eingangstemperatur des Luft-Brennstoff-Gemisches T_e in K

10. Ausgangsdruck der Produkte p_a in bar
11. Wärmestrom \dot{Q}_P in kW ($\dot{Q}_P > 0$ Zufuhr von Wärme)
12. elektrische Leistung P_{el} in kW ($P_{el} > 0$ Zufuhr von Leistung)

Nach der Berechnung werden die folgenden Endergebnisse ausgegeben:

13. Luftzahl λ
14. spezifische Wärmekapazität des Luft-Brennstoff-Gemisches $c_{p,e}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
15. molare Entropie des Luft-Brennstoff-Gemisches $s_{mol,e}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
16. molare Enthalpie des Luft-Brennstoff-Gemisches $h_{mol,e}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
17. molare Masse des Stoffgemisches des Luft-Brennstoff-Gemisches M_e in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
18. Gaskonstante des Stoffgemisches des Luft-Brennstoff-Gemisches R_e in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
19. Ausgangstemperatur der Produkte T_a in K
20. spezifische Wärmekapazität der Produkte $c_{p,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
21. molare Entropie der Produkte $s_{mol,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
22. molare Enthalpie der Produkte $h_{mol,a}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
23. molare Masse der Produkte M_a in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
24. Gaskonstante der Produkte R_a in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
25. Taupunkttemperatur der Produktseite T_{tau} in K
26. Stoffmengenfluss des abgeschiedenen Kondensats \dot{n}_K in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
27. Stoffmengenfluss der Produkte \dot{n}_a in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
28. Massenstrom der Produkte \dot{m}_a in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
29. Produktzusammensetzung in Volumenanteilen
30. Produktzusammensetzung in Massenanteilen

3.4 Variante 3: Brennstoffstrom mit bekanntem Luftverhältnis und bekannten Temperaturen

Diese Variante ist für die Berechnung von Brennstoffgemischen geeignet, die unter einem bekannten Luftverhältnis bei bekannten Temperaturen am Ein- und Ausgang des Reaktionsraums energetisch umgesetzt werden sollen. Mithilfe des Simulink-Modells lässt sich der gewünschte Energiewandlungsprozess bilanzieren und es liefert unter anderem Erkenntnisse über die Produktzusammensetzung oder den verfügbaren Enthalpiestrom. Eine Übersicht der Variante 3 ist in der Abbildung 3.6 zu sehen. In der Abbildung sind die gegebenen Größen schwarz und die gesuchten Größen rot eingetragen. Die dargestellten Größen werden im weiteren Verlauf des Kapitels erläutert.

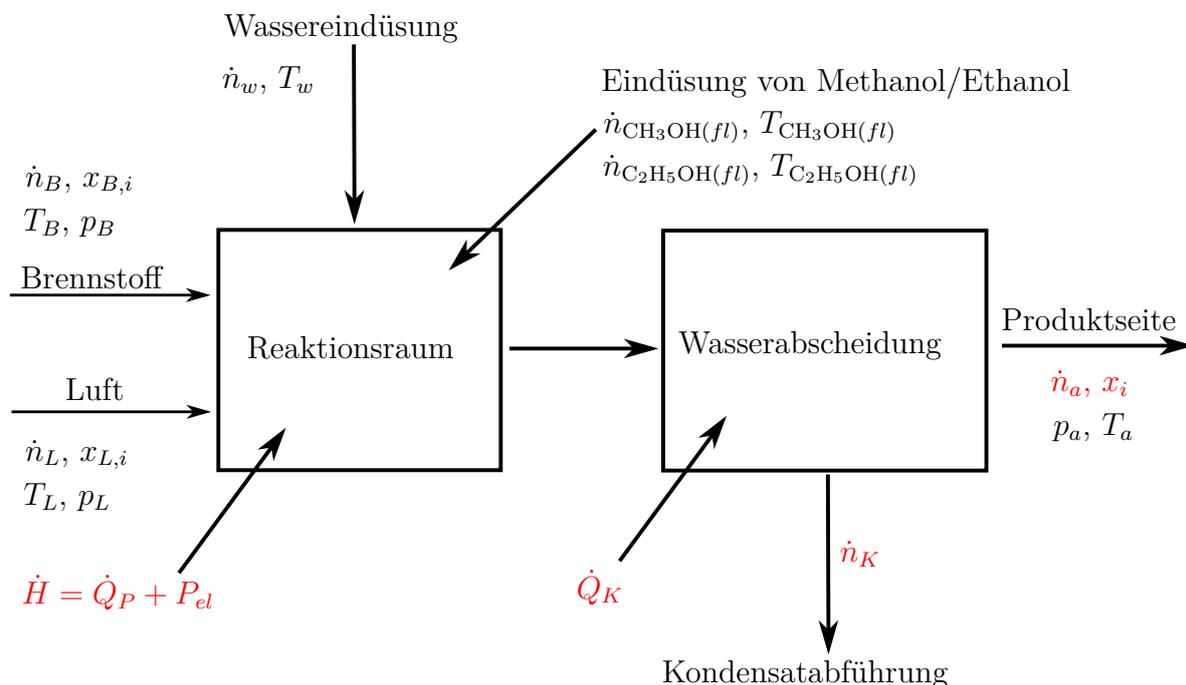


Abbildung 3.6: Modellübersicht der Variante 3 des entwickelten Modells

Im Unterschied zu den vorherigen Varianten werden hier die Brennstoff- und Luftzusammensetzung separat als Variablen im Workspace von Matlab eingegeben, um für die Berechnung ausgelesen werden zu können. Dabei ist entweder die Vorgabe prozentualer Massen- oder Volumenanteile möglich:

- Vorgabe von Massenanteilen in:
 - „fuel_composition_mass_v3“ und
 - „air_composition_mass_v3“
- Vorgabe von Volumenanteilen in:

- „fuel_composition_volume_v3“ und
- „air_composition_volume_v3“

In der nachfolgenden Abbildung 3.7 ist das Simulink-Modell dieser Variante dargestellt. Die Ziffern 1 bis 14 stehen für Vorgabewerte und die Ziffern 15 bis 37 spiegeln Ergebnisse wider, die jeweils unterhalb der Abbildung erläutert werden. Die Schalter S1 bis S4 ermöglichen das Umschalten zwischen der Vorgabe von Stoffmengenströmen oder Massenströmen. Die Schalter S5 und S6 steuern den Wechsel zwischen der Vorgabe von Massen- oder Volumenanteilen für das Brennstoffgemisch und die Luft.

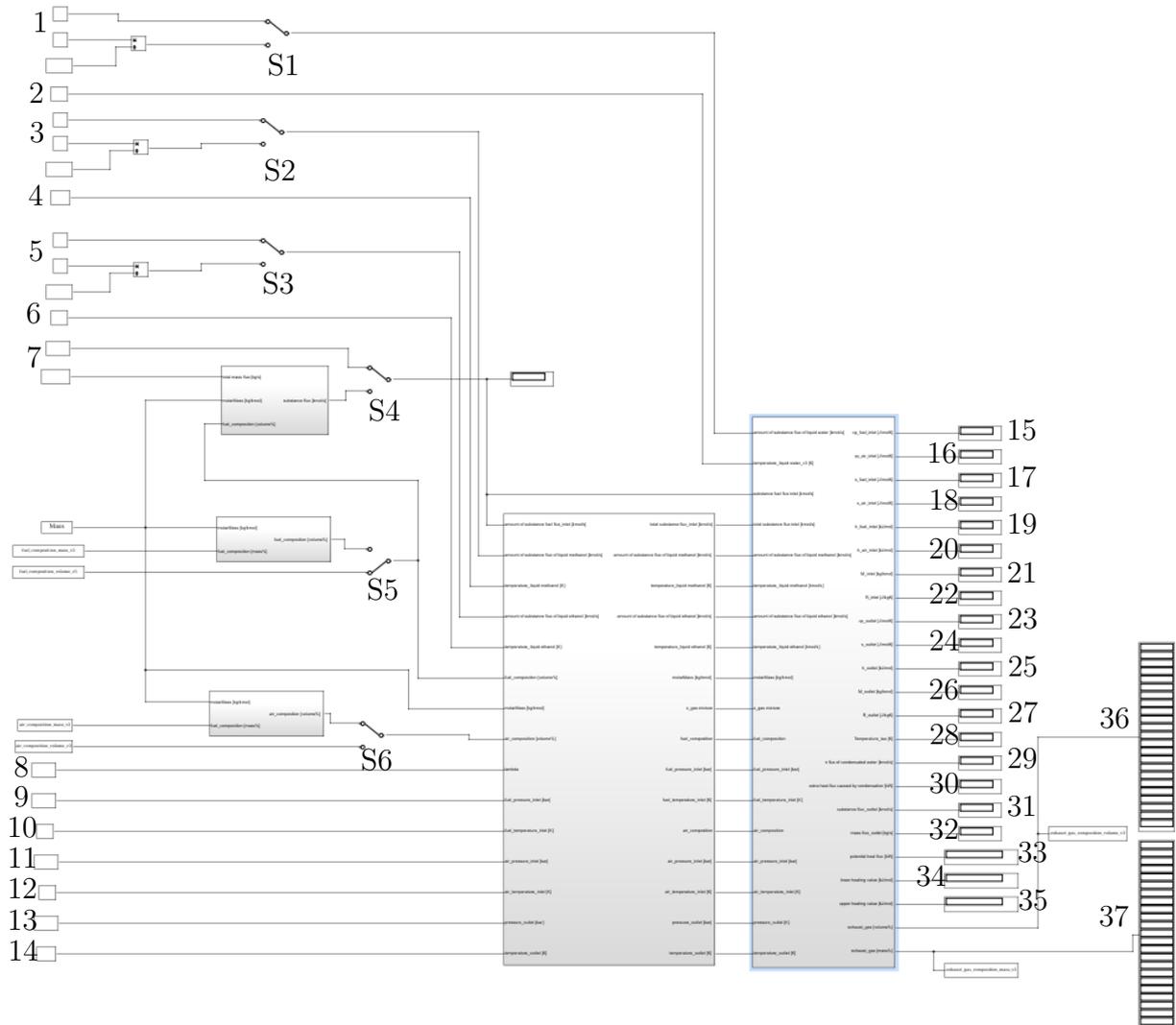


Abbildung 3.7: Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 3

Bei dieser Variante sind für die Vorgabe der folgenden Eingangsgrößen im Simulink-Modell Konstanten-Felder vorhanden:

1. Stoffmengenstrom des eingedüsten Wassers \dot{n}_w in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_w in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
2. Temperatur des eingedüsten Wassers T_w in K

3. Stoffmengenstrom des eingedüsten Methanols $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
4. Temperatur des eingedüsten Methanols $T_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in K
5. Stoffmengenstrom des eingedüsten Ethanol $\dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
6. Temperatur des eingedüsten Ethanol $T_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in K
7. Stoffmengenstrom des Brennstoffgemisches \dot{n}_B in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_B in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
8. Luftzahl λ
9. Eingangsdruck des Brennstoffgemisches p_B in bar
10. Eingangstemperatur des Brennstoffgemisches T_B in K
11. Eingangsdruck der Luft p_L in bar
12. Eingangstemperatur der Luft T_L in K
13. Ausgangsdruck der Produkte p_a in bar
14. Ausgangstemperatur der Produkte T_a in K

Auf Grundlage der vorgegebenen Brennstoffmenge, der Luft-Zusammensetzung, der Menge an eingedüstem Methanol/Ethanol und der gewünschten Luftzahl λ wird der Luftbedarf bestimmt. Die Zusammensetzung des Gemisches aus Luft und gasförmigem Brennstoff wird anschließend berechnet, um mit dieser und den vorgegebenen Temperaturen und Drücken die Berechnung durchzuführen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, werden die Stoffströme des flüssigen Wassers und des flüssigen Methanols/Ethanol separat betrachtet. Als Resultate liefert diese Variante folgende Größen:

15. spezifische Wärmekapazität des Brennstoffgemisches $c_{p,e,B}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
16. spezifische Wärmekapazität der Luft $c_{p,e,L}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
17. molare Entropie des Brennstoffgemisches $s_{mol,e,B}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
18. molare Entropie der Luft $s_{mol,e,L}$ in $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$
19. molare Enthalpie des Brennstoffgemisches $h_{mol,e,B}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
20. molare Enthalpie der Luft $h_{mol,e,L}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

21. molare Masse des Luft-Brennstoff-Gemisches M_e in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
22. Gaskonstante des Luft-Brennstoff-Gemisches R_e in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
23. spezifische Wärmekapazität der Produkte $c_{p,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
24. molare Entropie der Produkte $s_{mol,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
25. molare Enthalpie der Produkte $h_{mol,a}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
26. molare Masse der Produkte M_a in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
27. Gaskonstante der Produkte R_a in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
28. Taupunkttemperatur der Produktseite T_{tau} in K
29. Stoffmengenfluss des abgeschiedenen Kondensats \dot{n}_K in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
30. zusätzlicher Wärmestrom aufgrund von Kondensation \dot{Q}_K in kW
31. Stoffmengenfluss der Produkte \dot{n}_a in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
32. Massenstrom der Produkte \dot{m}_a in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
33. verfügbarer Enthalpiestrom des Prozesses \dot{H} in kW
34. Heizwert des Brennstoffes H_u in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
35. Brennwert des Brennstoffes H_o in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
36. Produktzusammensetzung in Volumenanteilen
37. Produktzusammensetzung in Massenanteilen

Da alle Größen in Pfeilrichtung positiv definiert wurden, stehen negative Werte bei den Ergebnissen \dot{Q}_K und \dot{H} für den Wärmestrom bzw. Enthalpiestrom, der dem Prozess entnommen werden kann.

3.5 Variante 4: Brennstoffstrom mit bekanntem Luftverhältnis bei unbekannter Prozesstemperatur

Diese Variante ist für die Berechnung von Brennstoffgemischen geeignet, die unter einem bekanntem Luftverhältnis bei unbekannter Prozesstemperatur energetisch umgesetzt werden sollen. Mithilfe des Simulink-Modells lässt sich der gewünschte Energiewandlungspro-

zess bilanzieren und es liefert unter anderem Erkenntnisse über die Produktzusammensetzung oder die Prozesstemperatur. Eine Übersicht der Variante 4 ist in der Abbildung 3.8 zu sehen. In der Abbildung sind die gegebenen Größen schwarz und die gesuchten Größen rot eingetragen. Die dargestellten Größen werden im weiteren Verlauf des Kapitels erläutert.

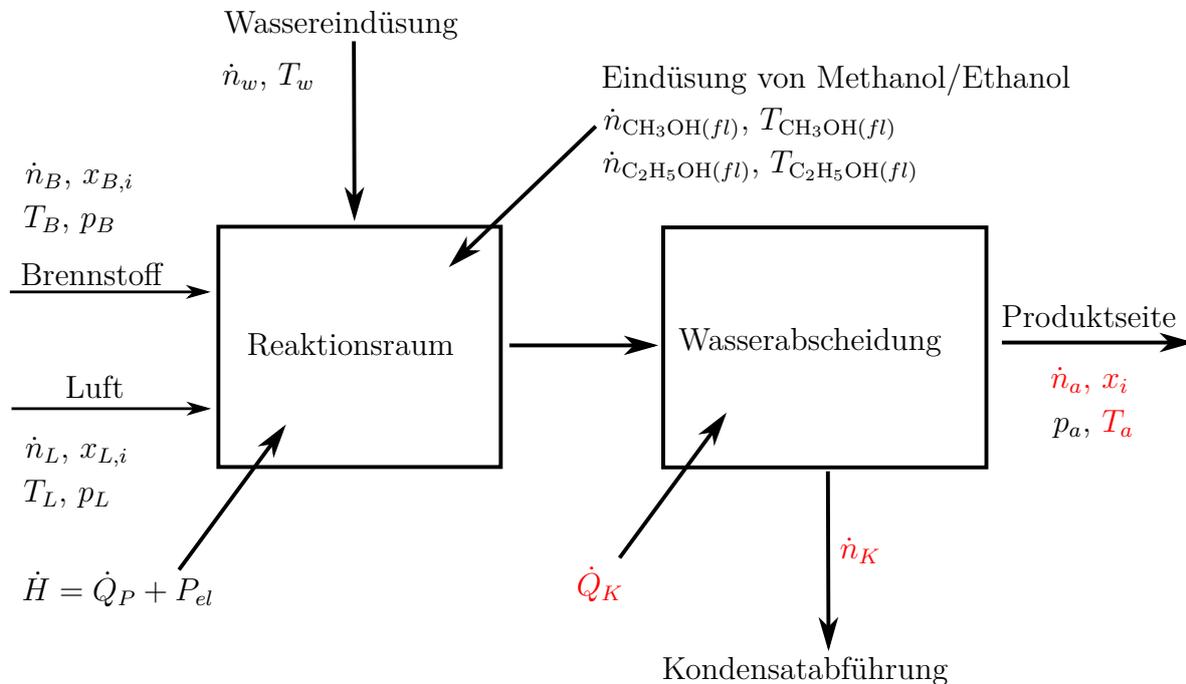


Abbildung 3.8: Modellübersicht der Variante 4 des entwickelten Modells

Die Zusammensetzungen des Brennstoffs und der Luft werden wie bei Variante 3 zuvor separat als Variablen gespeichert und zur Berechnung aus dem Workspace ausgelesen. Dabei können entweder prozentuale Massen- oder aber Volumenanteile vorgegeben werden:

- Vorgabe von Massenanteilen in:
 - „fuel_composition_mass_v4“ und
 - „air_composition_mass_v4“
- Vorgabe von Volumenanteilen in:
 - „fuel_composition_volume_v4“ und
 - „air_composition_volume_v4“

In der nachfolgenden Abbildung 3.9 ist das Simulink-Modell dieser Variante dargestellt. Die Ziffern 1 bis 15 stehen für Vorgabewerte und die Ziffern 16 bis 35 spiegeln Ergebnisse wider, die jeweils unterhalb der Abbildung erläutert werden. Die Schalter S1 bis S4 ermöglichen das Umschalten zwischen der Vorgabe von Stoffmengenströmen oder Massen-

strömen. Die Schalter S5 und S6 steuern den Wechsel zwischen der Vorgabe von Massen- oder Volumenanteilen für das Brennstoffgemisch und die Luft.

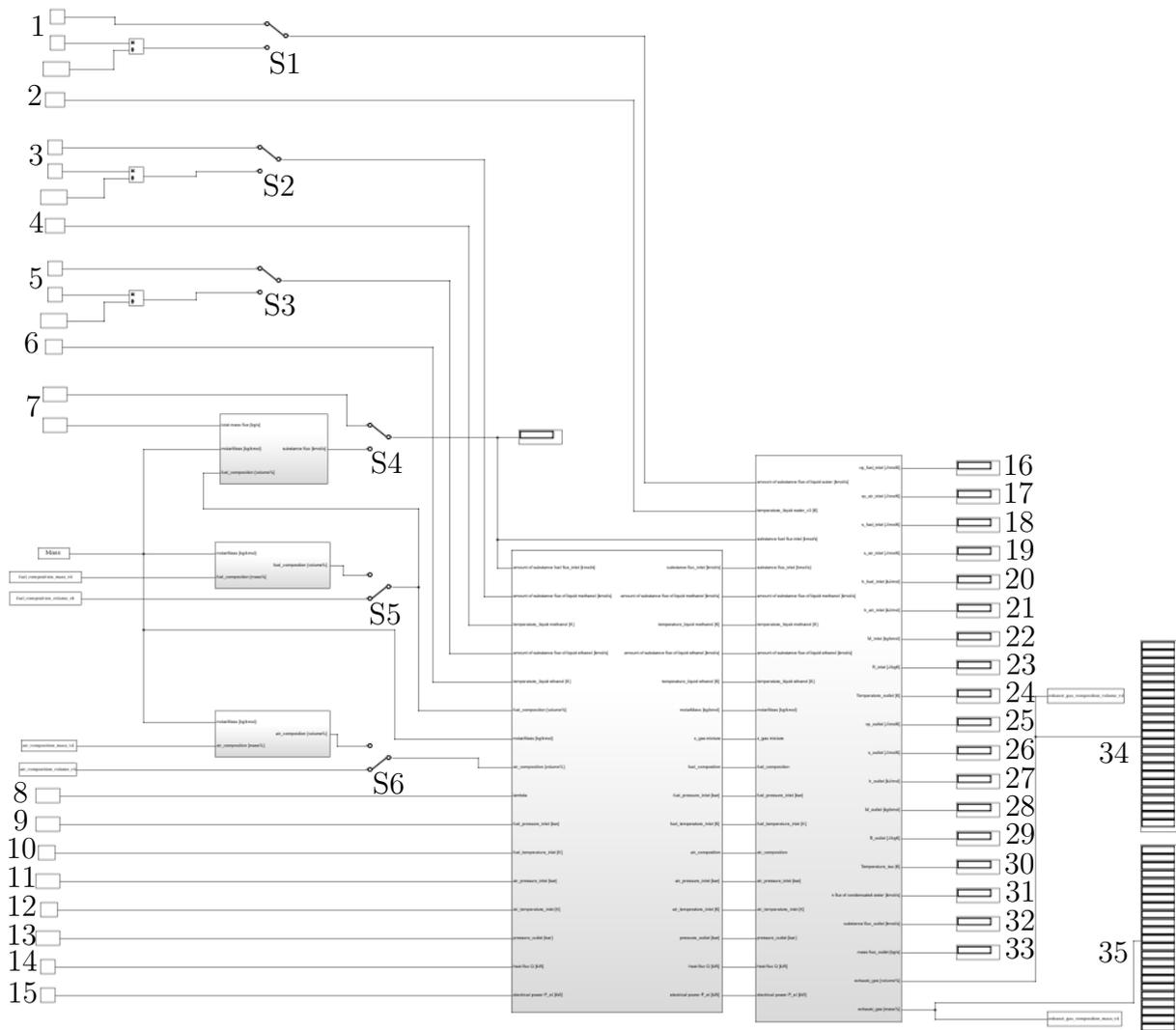


Abbildung 3.9: Übersicht des Simulinkmodells für die Variante 4

Bei dieser Variante sind die folgenden Eingangsparameter bekannt und werden direkt im Simulink-Modell vorgegeben:

1. Stoffmengenstrom des eingedüsten Wassers \dot{n}_w in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_w in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
2. Temperatur des eingedüsten Wassers T_w in K
3. Stoffmengenstrom des eingedüsten Methanols $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
4. Temperatur des eingedüsten Methanols $T_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in K
5. Stoffmengenstrom des eingedüsten Ethanol $\dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom $\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(fl)}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$

6. Temperatur des eingedüsten Ethanol $T_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)}$ in K
7. Stoffmengenstrom des Brennstoffgemisches \dot{n}_B in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ oder Massenstrom \dot{m}_B in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
8. Luftzahl λ
9. Eingangsdruck des Brennstoffgemisches p_B in bar
10. Eingangstemperatur des Brennstoffgemisches T_B in K
11. Eingangsdruck der Luft p_L in bar
12. Eingangstemperatur der Luft T_L in K
13. Ausgangsdruck der Produkte p_a in bar
14. Wärmestrom \dot{Q}_P in kW ($\dot{Q}_P > 0$ Zufuhr von Wärme)
15. elektrische Leistung P_{el} in kW ($P_{el} > 0$ Zufuhr von Leistung)

Auf Grundlage der vorgegebenen Brennstoffmenge, der Luft-Zusammensetzung, der Menge an eingedüstem Methanol/Ethanol und der gewünschten Luftzahl λ wird der Luftbedarf bestimmt. Die Zusammensetzung des Gemisches aus Luft und gasförmigem Brennstoff wird anschließend berechnet, um mit dieser und den vorgegebenen Temperaturen und Drücken die Berechnung durchzuführen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, werden die Stoffströme des flüssigen Wassers und des flüssigen Methanols/Ethanol separat betrachtet. Bei dieser Variante werden die folgenden Größen als Ergebnisse ausgegeben:

16. spezifische Wärmekapazität des Brennstoffgemisches $c_{p,B}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
17. spezifische Wärmekapazität der Luft $c_{p,L}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
18. molare Entropie des Brennstoffgemisches $s_{mol,B}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
19. molare Entropie der Luft $s_{mol,L}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
20. molare Enthalpie des Brennstoffgemisches $h_{mol,B}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
21. molare Enthalpie der Luft $h_{mol,L}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
22. molare Masse des Luft-Brennstoff-Gemisches M_e in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
23. Gaskonstante des Luft-Brennstoff-Gemisches R_e in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
24. Ausgangstemperatur der Produkte T_a in K
25. spezifische Wärmekapazität der Produkte $c_{p,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$

26. molare Entropie der Produkte $s_{mol,a}$ in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
27. molare Enthalpie der Produkte $h_{mol,a}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
28. molare Masse der Produkte M_a in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
29. Gaskonstante der Produkte R_a in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
30. Taupunkttemperatur der Produktseite T_{tau} in K
31. Stoffmengenfluss des abgeschiedenen Kondensats \dot{n}_K in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
32. Stoffmengenfluss der Produkte \dot{n}_a in $\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
33. Massenstrom der Produkte \dot{m}_a in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
34. Produktzusammensetzung in Volumenanteilen
35. Produktzusammensetzung in Massenanteilen

4 Verifizierung des entwickelten Modells

Zur Verifizierung des Modells werden verschiedene Testfälle generiert, um die Richtigkeit der Berechnung nachzuweisen und den Beweis zu erbringen, dass das erstellte Modell zuverlässig zur Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen genutzt werden kann.

4.1 Brenn- und Heizwertermittlung von Methan

Als erster Testfall zur Überprüfung des Berechnungsmodells soll der Heiz- und Brennwert von reinem Methan ermittelt werden. Anschließend wird das Ergebnis zur Verifizierung mit Literaturwerten aus einschlägigen Tabellenwerken verglichen.

Für die Ermittlung des gesuchten Heizwerts wird die Variante 3 des Berechnungstools mit folgenden Eingabeparametern angewendet:

- Eingangstemperatur des Brennstoffes Methan: $T_{e,B} = 298,15 \text{ K}$
- Eingangstemperatur der Luft: $T_{e,L} = 298,15 \text{ K}$
- Eingangsdruck des Brennstoffes Methan: $p_{e,B} = 1,0 \text{ bar}$
- Eingangsdruck der Luft: $p_{e,L} = 1,0 \text{ bar}$
- Ausgangstemperatur der Produkte: $T_a = 298,15 \text{ K}$
- Ausgangsdruck: $p_a = 1,0 \text{ bar}$
- Luftzahl: $\lambda = 1,0$
- Brennstoffzusammensetzung: 100 % CH_4
- Luftzusammensetzung: 100 % O_2

Oben nicht aufgeführte Eingangsparameter werden für die Berechnung gleich null gesetzt. Zusätzlich gilt bei der Bestimmung des Heizwertes, dass das Produktwasser nur dampfförmig vorliegt und somit keine Kondensatbildung auftritt.

Für die Verbrennung von einem Mol Methan berechnet das Simulink-Modell einen Heizwert von $H_u = 802,562 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$. Eine Umrechnung des Heizwertes mithilfe der molaren Masse

von Methan ($M = 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$) ergibt:

$$H_u = 50,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

In der Literatur wird der Heizwert von Methan angegeben mit [4]:

$$H_u = 50,013 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Um den Brennwert von reinem Methan berechnen zu können, wird neben den oben genannten Eingabeparametern das Produktwasser als vollständig kondensiert angenommen. Das Modell berechnet für die Verbrennung von einem Mol Methan einen Brennwert von $H_o = 890,57 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$. Eine Umrechnung des Brennwertes mithilfe der molaren Masse von Methan ($M = 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$) ergibt:

$$H_o = 55,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

In der Literatur ist für den Brennwert von Methan der folgende Wert zu finden [4]:

$$H_o = 55,498 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Es ist klar erkennbar, dass die Abweichungen zwischen den berechneten Werten des Modells und den Literaturwerten minimal sind ($\leq 0,2\%$). Somit lässt sich eine erste Validierung des Berechnungsmodells hinsichtlich der hinterlegten Stoffdaten und der implementierten Methodik zur Berechnung von Heiz- und Brennwerten bestätigen.

4.2 Adiabate Verbrennungstemperatur von Methan

Als weiterer Testfall zur Verifizierung des Modells soll die adiabate Verbrennungstemperatur von Methan bei der Verbrennung mit Luft und reinem Sauerstoff berechnet werden. Anschließend folgt ein Vergleich der Modellwerte mit den Literaturwerten.

Die Berechnung des gesuchten Heizwerts erfolgte mit der Variante 4 des Berechnungstools mit folgenden Eingabeparametern:

- Eingangstemperatur des Brennstoffes Methan: $T_{e,B} = 298,15 \text{ K}$
- Eingangstemperatur der Luft: $T_{e,L} = 298,15 \text{ K}$
- Eingangsdruck des Brennstoffes Methan: $p_{e,B} = 1,0 \text{ bar}$
- Eingangsdruck der Luft: $p_{e,L} = 1,0 \text{ bar}$
- Ausgangsdruck: $p_a = 1,0 \text{ bar}$

- Luftzahl: $\lambda = 1,0$
- Brennstoffzusammensetzung: 100 % CH₄
- Luftzusammensetzung:
 - Verbrennung mit Luft: 79 Volumen-% N₂ und 21 Volumen-% O₂
 - Verbrennung mit reinem Sauerstoff: 100 % O₂

Bei der Verbrennung von Methan mit Luft berechnet das erstellte Simulink-Modell eine adiabate Verbrennungstemperatur von $T_a = 2325$ K. In der Literatur ist für Methan einen Wert von $T_{adiabat} = 2253$ K zu finden [8]. Da die Abweichung des berechneten Wertes zum Literaturwert nur minimal ist ($< 3,5$ %) kann an dieser Stelle die Eignung des Berechnungstools zur Bestimmung der adiabaten Verbrennungstemperatur von Stoffen oder Stoffgemischen bei der Verbrennung mit Luft bestätigt werden.

Bei der Verbrennung von Methan mit reinem Sauerstoff berechnet das Modell eine adiabate Verbrennungstemperatur von $T_a = 5167$ K. Aus der Literatur erhält man hingegen einen Wert von $T_{adiabat} = 3045$ K. Die deutliche Abweichung der beiden Werte lässt sich dahingehend erklären, dass bei Temperaturen ab 2000 K der vollständige Brennstoffumsatz nicht realisiert werden kann. Es stellt sich stattdessen zwischen den Edukten und Produkten ein thermodynamisches Gleichgewicht ein, sodass auch nicht reagierte Ausgangsstoffe vorhanden sind. Hierdurch ist der Energieumsatz und damit die Wärmefreisetzung geringer. Die berechnete Verbrennungstemperatur entspricht demnach der kalorischen Verbrennungstemperatur, da für die Berechnung die Annahme einer vollständigen Verbrennung getroffen wurde. Der Literaturwert hingegen gibt die adiabate Verbrennungstemperatur an, welche sich bei einem Verbrennungsvorgang ohne Wärmeabgabe nach außen und bei einem Reaktionsgleichgewicht zwischen Edukten und Produkten einstellen würde [6].

Im Bereich $T < 2000$ K und bei ausreichende hohen Drücken und Luftüberschuss liegen im Gleichgewichtszustand fast nur die Produkte CO₂ und H₂O vor. In diesem Fall ist keine Gleichgewichtsberechnung und damit keine Korrektur der Temperatur notwendig [9]. Dieser Zusammenhang erklärt, warum die Abweichungen zwischen Berechnungs- und Literaturwert bei der Berechnung der Verbrennung von Methan mit Luft geringer ausfallen.

Das erstellte Berechnungstool ist demnach nur für die Bestimmung von adiabaten Verbrennungstemperaturen bis ca. 2000 K einsetzbar. Bei höheren Temperaturen nimmt der Einfluss des sich einstellenden Reaktionsgleichgewichts stetig zu. Da dieser Effekt in der Berechnung nicht berücksichtigt ist, kann das Modell oberhalb der Temperaturgrenze lediglich für die Berechnung der kalorischen Verbrennungstemperaturen verwendet werden. Zur Bestimmung der adiabaten Verbrennungstemperatur muss eine Korrektur erfolgen, die von dem jeweiligen thermodynamischen Gleichgewicht abhängig ist. Mithilfe der Chemie-Softwares Cantera oder Chemkin kann bei Bedarf der Gleichgewichtszustand berechnet werden [9].

4.3 Adiabate Verbrennung von Methanol (Klausuraufgabe)

Zur weiteren Validierung des Modells wird anhand der Aufgabe 3 aus der Klausur des Moduls „Technische Thermodynamik II“ im Wintersemester 2017/18 von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt ein Testfall generiert. Im Kapitel A.29 des Anhangs ist eine Kopie der Aufgabenstellung zu finden.

Laut Aufgabenstellung soll Methanol in einem adiabaten Verbrennungsprozess stöchiometrisch mit trockener Luft verbrannt werden. Neben der sich ergebenden adiabaten Verbrennungstemperatur muss unter anderem auch die Rauchgaskonzentration bestimmt werden. In einem späteren Aufgabenteil wird zur Reduzierung der Verbrennungstemperatur flüssiges Wasser eingedüst und die neue Brennkammertemperatur berechnet.

Die Aufgabenstellung stellt folgende Eingangsparameter bereit, die als Vorgabewerte für die Variante 4 des Berechnungsmodells eingesetzt werden:

- Massenstrom des Methanols: $\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)} = 2,0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- Massenanteile trockener Luft: $\xi_{\text{O}_2, tr. Luft} = 0,23$, $\xi_{\text{N}_2, tr. Luft} = 0,77$
- Umgebung: $T_U = T_{\text{CH}_3\text{OH}(fl)} = T_{e,L} = 298,15 \text{ K}$, $p_u = p_{e,L} = 1 \text{ bar}$
- Massenstrom des Wassers (Aufgabenteil e): $\dot{m}_w = 0,8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Da in dieser Berechnung kein gasförmiges Brennstoffgemisch benötigt wird, ist der Massen- und Stoffmengenstrom dieses Gemisches gleich null gesetzt. Zudem sind alle anderen Eingangsparameter gleich null zu setzen, die in der obigen Aufzählung nicht aufgeführt sind. Das Simulink-Modell kann für die Berechnung der Aufgabenteile c), d) und e) angewandt werden. Dabei kommt das Berechnungstool auf folgende Ergebnisse:

- Rauchgaskonzentrationen $\xi_{RG,i}$ des Abgases:
 - $\xi_{RG, \text{CO}_2} = 0,1828$ (0,1828)
 - $\xi_{RG, \text{H}_2\text{O}} = 0,1497$ (0,1496)
 - $\xi_{RG, \text{N}_2} = 0,6675$ (0,6676)
 - $\xi_{RG, \text{O}_2} = 0$ (0)
- adiabate Verbrennungstemperaturen:
 - ohne Wassereindüsung: $T_{RG} = 2172 \text{ K} \approx 1899 \text{ }^\circ\text{C}$ (1937,6 °C)
 - mit Wassereindüsung: $T_{RG} = 1928 \text{ K} \approx 1655 \text{ }^\circ\text{C}$ (1747,6 °C)

Die Werte in Klammern sind aus der handschriftlichen Musterlösung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt entnommen und ermöglichen einen direkten Vergleich zur Bewertung der Modellgüte. Wie zu erkennen ist, gibt es bei der Berechnung der Rauchgaszusammensetzung nahezu eine Übereinstimmung zwischen den Modellwerten und der Musterlösung. Bei der Bestimmung der adiabaten Verbrennungstemperaturen mit und ohne Wassereindüsung ergibt sich ein minimaler Unterschied zwischen den Ergebnissen der Berechnungstools und den Werten von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt. Aufgrund der geringen prozentualen Abweichungen von 2 – 5 % kann mithilfe dieses Testfalls dennoch ein Nachweis für eine sehr gute Modellgüte erbracht werden.

4.4 Verbrennung von Methan (Klausuraufgabe)

Zur weiteren Verifizierung des Modells wird anhand der Aufgabe 3 aus der Klausur des Moduls „Technische Thermodynamik II“ im Wintersemester 2014/15 von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt ein Testfall generiert. Im Kapitel A.30 des Anhangs ist eine Kopie der Aufgabenstellung zu finden.

Gemäß der Aufgabenstellung wird Methan mit trockener Luft verbrannt. Dabei sollen unter anderem der Massenstrom der notwendigen Verbrennungsluft, die Stoffmengenanteile des Rauchgases und die Menge des flüssigen Kondensats bestimmt werden. Zusätzlich ist die Wärmemenge zu berechnen, die der Brennkammer bei vorgegebener Rauchgastemperatur entnommen werden kann.

Folgende Werte wurde in der Variante 3 des Berechnungsmodells vorgegeben:

- Massenstrom des Methans: $\dot{m}_{\text{CH}_4} = 10 \frac{\text{g}}{\text{s}}$
- Eintrittstemperatur des Methans: $T_{\text{CH}_4} = 298.15 \text{ K}$
- Eintrittsdruck des Methans: $p_{\text{CH}_4} = 1 \text{ bar}$
- Eintrittstemperatur der Luft: $T_L = 298.15 \text{ K}$
- Eintrittsdruck der Luft: $p_L = 1 \text{ bar}$
- Rauchgastemperatur: $T_{\text{RG}} = T_a = 323.15 \text{ K}$
- Austrittsdruck des Rauchgases: $p_{\text{RG}} = p_a = 1 \text{ bar}$

Das erstellte Berechnungstool stellt folgende Ergebnisse für die gesuchten Größen bereit:

- Massenstrom der Luft: $\dot{m}_{\text{Luft}} = 190,8 \frac{\text{g}}{\text{s}} (191, 1)$
- Rauchgaskonzentrationen $x_{\text{RG},i}$ des Abgases:

$$- x_{RG,CO_2} = 0,0861 \text{ (0,0861)}$$

$$- x_{RG,H_2O} = 0,1722 \text{ (0,1722)}$$

$$- x_{RG,O_2} = 0,0172 \text{ (0,0172)}$$

$$- x_{RG,N_2} = 0,7244 \text{ (0,7246)}$$

- Massenstrom des Kondensats: $\dot{m}_K = 7,247 \frac{g}{s}$ (7,2551)
- verfügbarer Wärmestrom: $\dot{Q}_D = -511,99 \text{ kW}$ (-511,72)

Die Werte in Klammern stammen aus der handschriftlichen Musterlösung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt und ermöglichen einen direkten Vergleich zur Bewertung der Modellqualität. Es ist klar zu erkennen, dass bei allen berechneten Größen die Abweichungen marginal oder sogar gleich null sind. Aufgrund der sehr guten Übereinstimmung von Musterlösung und Berechnungsergebnis lässt sich anhand dieses Testfalls erneut die Validität des erstellten Berechnungsmodells nachweisen.

4.5 Taupunkttemperatur Rauchgas (Übungsaufgabe)

Zur Erstellung dieses Testfalls dient die Übungsaufgabe 5.4 aus der Aufgabensammlung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt als Vorlage. Laut Aufgabenstellung wird reiner Wasserstoff mit trockener Luft bei einem vorgegebenen Luftverhältnis verbrannt. Dafür soll die Zusammensetzung des Rauchgases in Massenanteilen ξ_i und die Taupunkttemperatur ϑ_τ des Rauchgases berechnet werden.

Die notwendigen Vorgabewerte für die Berechnung dieses Testfalls mithilfe der Variante 3 des Berechnungsmodells werden im nachfolgenden aufgezählt:

- Eintrittstemperatur des Wasserstoffs: $T_{H_2} = 298,15 \text{ K}$
- Eintrittsdruck des Wasserstoff: $p_{H_2} = 1,05 \text{ bar}$
- Eintrittstemperatur der Luft: $T_{e,L} = 298,15 \text{ K}$
- Eintrittsdruck der Luft: $p_{e,L} = 1,05 \text{ bar}$
- Luftzusammensetzung: $\xi_{O_2,tr. Luft} = 0,232$, $\xi_{N_2,tr. Luft} = 0,768$
- Luftverhältnis: $\lambda = 3,0$
- Austrittstemperatur des Rauchgases: $T_{RG} = T_a = 500 \text{ K}$
- Austrittsdruck des Rauchgases: $T_{RG} = T_a = 1,05 \text{ bar}$

Die Temperaturen am Ein- und Ausgang sind in der Aufgabenstellung nicht explizit angegeben. Für die Berechnung sind sie sinnvoll beispielsweise entsprechend den obigen Angaben zu wählen. Dabei ist lediglich darauf zu achten, dass im Abgasstrom keine Kondensation auftritt, da sich andernfalls eine veränderte Rauchgaszusammensetzung ablesen lässt. Die Rauchgastemperatur muss demnach höher sein als die Taupunkttemperatur. Oben nicht aufgeführte Eingangsparameter werden für die Berechnung dieses Testfalls gleich null gesetzt.

Für die Taupunkttemperatur berechnet das Tool einen Wert von $\vartheta_\tau = 55,95 \text{ °C}$ (56,06). Des Weiteren ergibt sich eine Rauchgaszusammensetzung von:

- $\xi_{RG,H_2O} = 0,0862$ (0,0862)
- $\xi_{RG,O_2} = 0,1532$ (0,1532)
- $\xi_{RG,N_2} = 0,7606$ (0,7606)

Die Werte in Klammern stammen aus der handschriftlichen Musterlösung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt und ermöglichen einen direkten Vergleich zur Bewertung der Modellgüte. Die Rauchgaszusammensetzungen stimmen exakt überein und bei der Taupunkttemperatur ergibt sich nur eine minimale Abweichung von ca. 0,2%. Die nahezu perfekte Übereinstimmung von Berechnungsergebnissen und Musterlösung bestätigen erneut die sehr gute Modellgüte des entwickelten Berechnungstools.

4.6 Verbrennung von Erdgas (Übungsaufgabe)

Zur Erstellung dieses Testfalls dient die Übungsaufgabe 5.5 aus der Aufgabensammlung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt als Referenz. Laut Aufgabenstellung wird Erdgas mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 1,36$ verbrannt. Für die Verbrennung sind der Mindestsauerstoffbedarf O_{min} , die tatsächliche Luftstoffmenge L und die Zusammensetzung des Rauchgases in Massenanteilen $\xi_{RG,i}$ zu berechnen. Dabei ist die folgende Zusammensetzung des Erdgases gegeben:

- Methan CH_4 : $x_{CH_4} = 0,896$
- Ethan C_2H_6 : $x_{C_2H_6} = 0,012$
- Propan C_3H_8 : $x_{C_3H_8} = 0,006$
- Kohlenstoffdioxid CO_2 : $x_{CO_2} = 0,028$
- Stickstoff N_2 : $x_{N_2} = 0,058$

Zusätzlich wird für die Luft ein Sauerstoffanteil von $x_{O_2} = 0,21$ angenommen, der durch einen Stickstoffanteil von $x_{N_2} = 0,79$ ergänzt wird. Weitere Werte wie beispielsweise die

Eingangstemperaturen und -drücke sowie der Ausgangsdruck können bei $T_e = 298,15 \text{ K}$ und $p_e = 1 \text{ bar}$ belassen werden. Bei der Wahl der Ausgangstemperatur ist darauf zu achten, dass keine Kondensation im Abgasstrom auftritt, da sich andernfalls eine veränderte Rauchgaszusammensetzung ablesen lässt. Die gewählte Temperatur muss demnach höher sein als die Taupunkttemperatur des Rauchgases. Basierend auf den gegebenen Werten berechnet das Modell die nachfolgenden Ergebnisse:

- Mindestsauerstoffbedarf $O_{min} = 1,864 \frac{\text{kmol}_{\text{O}_2}}{\text{kmol}_{\text{B}}} (1,864)$
- tatsächliche Luftstoffmenge $L = 12,0716 \frac{\text{kmol}_{\text{L}}}{\text{kmol}_{\text{B}}} (12,0716)$
- Zusammensetzung des Rauchgases in Massenanteilen $\xi_{RG,i}$:
 - $\xi_{RG,\text{CO}_2} = 0,1161 (0,1161)$
 - $\xi_{RG,\text{H}_2\text{O}} = 0,0911 (0,0911)$
 - $\xi_{RG,\text{O}_2} = 0,0587 (0,0587)$
 - $\xi_{RG,\text{N}_2} = 0,7341 (0,7341)$

Die Werte in Klammern stammen wie zuvor aus der Musterlösung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt. Ein Vergleich aller Resultate liefert für diesen Testfall eine perfekte Übereinstimmung von Berechnung und Musterlösung. Das bestätigt erneut die sehr gute Modellgüte des entwickelten Berechnungstools.

4.7 Berechnung einer Brennstoffzelle (Übungsaufgabe)

Dieser Testfall, der einen anderen chemischen Energiewandlungsprozess statt der Verbrennungsreaktion behandelt, orientiert sich an der Übungsaufgabe 5.9 aus der Aufgabensammlung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt. In der Abbildung 4.1 ist ein Schema der zu berechnenden Brennstoffzelle dargestellt.

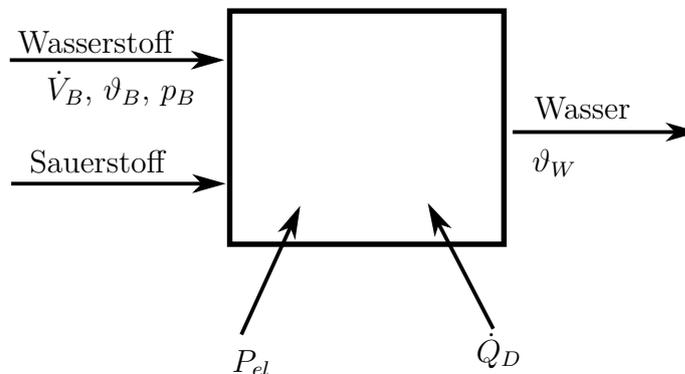


Abbildung 4.1: Brennstoffzelle aus der Übungsaufgabe 5.9

Wasserstoff und Sauerstoff werden der Brennstoffzelle stöchiometrisch mit $p_B = 200 \text{ kPa}$ und $\vartheta_B = 25 \text{ °C}$ zugeführt. Das Reaktionsprodukt Wasser wird im flüssigen Zustand bei $\vartheta_W = 60 \text{ °C}$ abgeführt. Die Brennstoffzelle liefert Gleichstrom mit einer Spannung von $U_{el} = 55 \text{ V}$ bei einer Stromstärke von $I_{el} = 120 \text{ A}$. Der Wasserstoff wird mit einem Volumenstrom von $\dot{V}_B = 2,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ in die Brennstoffzelle geleitet. Dabei sind folgende Größen zu berechnen:

- Massenströme des Wasserstoffs \dot{m}_B , des Sauerstoffs \dot{m}_{O_2} und des Wassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$
- Wärmestrom \dot{Q} zur Kühlung der Zelle

Da für die Berechnung der Brennstoffzelle der Massenstrom des Wasserstoffs benötigt wird, muss dieser zuvor durch eine Handrechnung berechnet werden. Der Massenstrom des Wasserstoffs kann jedoch über die ideale Gasgleichung bestimmt werden:

$$p_B \cdot \dot{V}_B = \dot{m}_B \cdot R_B \cdot T_B \quad (4.1)$$

Da die Gaskonstante des Wasserstoffs zunächst unbekannt ist, muss diese durch die folgende Beziehung aus der Gleichung (2.6) ersetzt werden:

$$R_m = R_B \cdot M_B$$

$$R_B = \frac{R_m}{M_B}$$

Eine Kombination beider Ausdrücke und eine anschließende Auflösung nach der gesuchten Größe ergibt:

$$\dot{m}_B = \frac{p_B \cdot \dot{V}_B \cdot M_B}{R_m \cdot T_B} \quad (4.2)$$

Für den Massenstrom des Wasserstoffs ergibt sich nach Einsetzen der Werte:

$$\dot{m}_B = \frac{200000 \text{ Pa} \cdot \frac{2,3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{8314,4 \frac{\text{J}}{\text{molK}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 1,0309 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Dieser Wert wurde nun gemeinsam mit den oben genannten Vorgaben in die Variante 3 des Simulink-Modells eingegeben. Nach der Berechnung werden folgende Ergebnisse ausgegeben:

- Massenstrom des Sauerstoffs: $\dot{m}_{\text{O}_2} = 8,181 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ($8,247 \cdot 10^{-4}$)
- Massenstrom des Wassers: $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}_B + \dot{m}_{\text{O}_2} = 9,212 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ($9,278 \cdot 10^{-4}$)
- Wärmestrom zur Kühlung: $\dot{Q} = -7,882 \text{ kW}$ ($-7,895$)

Die Werte Klammern stammen aus der handschriftlichen Musterlösung von Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt und ermöglichen einen unmittelbaren Vergleich zur Bewertung der Modellgenauigkeit. Es ist klar zu erkennen, dass bei allen berechneten Größen die Abweichungen nur minimal sind ($\leq 1,0\%$) sind. Aufgrund der guten Übereinstimmung von Musterlösung und Berechnungsergebnis lässt sich auch anhand dieses Testfalls der Nachweis für ein valides Berechnungstool darlegen.

4.8 Verhalten des Berechnungsmodells bei untypischen oder fehlerhaften Vorgabewerten

Sind die vorgegebenen Massen- oder Volumenanteile in der Summe nicht 100%, werden die Anteile relativiert und neu berechnet. Es ergeben sich veränderte Anteile, die dann für die Berechnung verwendet werden.

Ist bei den Varianten 1 und 2 das Luftverhältnis $\lambda < 1$, tritt eine Fehlermeldung auf, dass die Berechnung nicht durchgeführt werden kann. Aufgrund des vorliegenden Luftmangels ist keine vollständige Reaktion möglich und das Berechnungstool unterbricht die Berechnung.

Wenn das Brennstoffgemisch nur aus bereits reagierten oder inerten Gasen wie beispielsweise Stickstoff (N_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) besteht, berechnet das Modell richtigerweise einen Sauerstoffbedarf von null. Zudem wird keine Enthalpie freigesetzt, da die enthaltenen Gase keinen chemischen Energiewandlungsprozess durchlaufen.

5 Darstellung der Ergebnisse

Nach der Vorstellung des Berechnungsmodells in Kapitel 3 und einer umfassenden Verifizierung des Tools in Kapitel 4 werden in diesem Abschnitt Berechnungsergebnisse dargestellt.

5.1 Bilanzierung einer adiabaten Verbrennungsreaktion

Bei der Verbrennung von Methan mit trockener Luft ($\xi_{O_2, tr. Luft} = 0,23$) sind die Edukte zusammengesetzt aus den Komponenten Methan (CH_4), Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2). Bei einer vollständigen Umsetzung der Edukte mit einer Luftzahl von $\lambda = 1$ setzen sich die Produkte aus den Stoffen Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasser (H_2O) und Stickstoff (N_2) zusammen. Das erstellte Berechnungstool kann zur Berechnung dieses chemischen Energiewandlungsprozesses genutzt werden. Als Ergebnisse stehen unter anderem die temperaturabhängigen spezifischen Enthalpien der Edukt- und Produktseite zur Verfügung, wie sie in der Abbildung 5.1 zu sehen sind.

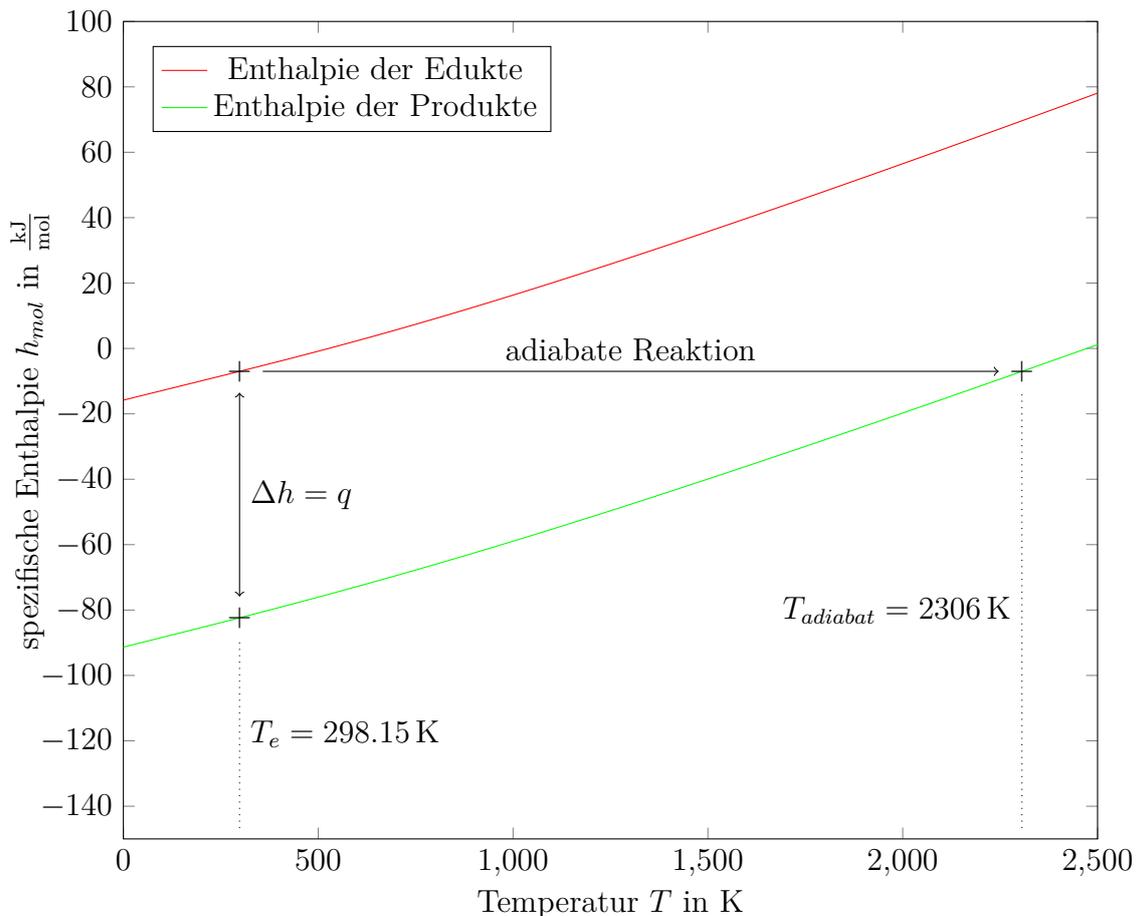


Abbildung 5.1: h - T -Diagramm für die Verbrennung von Methan mit Luft

Neben den spezifischen Enthalpien sind auch die Eingangstemperatur der Edukte T_{inlet} und die adiabate Verbrennungstemperatur $T_{adiabat}$ dargestellt. Wird der Brennkammer weder spezifische Arbeit und Wärme entzogen noch zugeführt, verlässt das Rauchgas die Brennkammer mit einer Temperatur von $T_a = T_{adiabat}$. Wird der Verbrennungsreaktion genau so viel spezifische Wärme entzogen, wie bei der Verbrennung freigesetzt wird, steht die Enthalpiedifferenz $\Delta h = q$ zur Verfügung.

Mithilfe des Berechnungsmodells ist eine vollständige Bilanzierung der Verbrennung inklusive Wasserabscheidung im Abgasstrom möglich. Eine Auswahl der bereitgestellten Ergebnisse wird in der Abbildung 5.2 dargestellt.

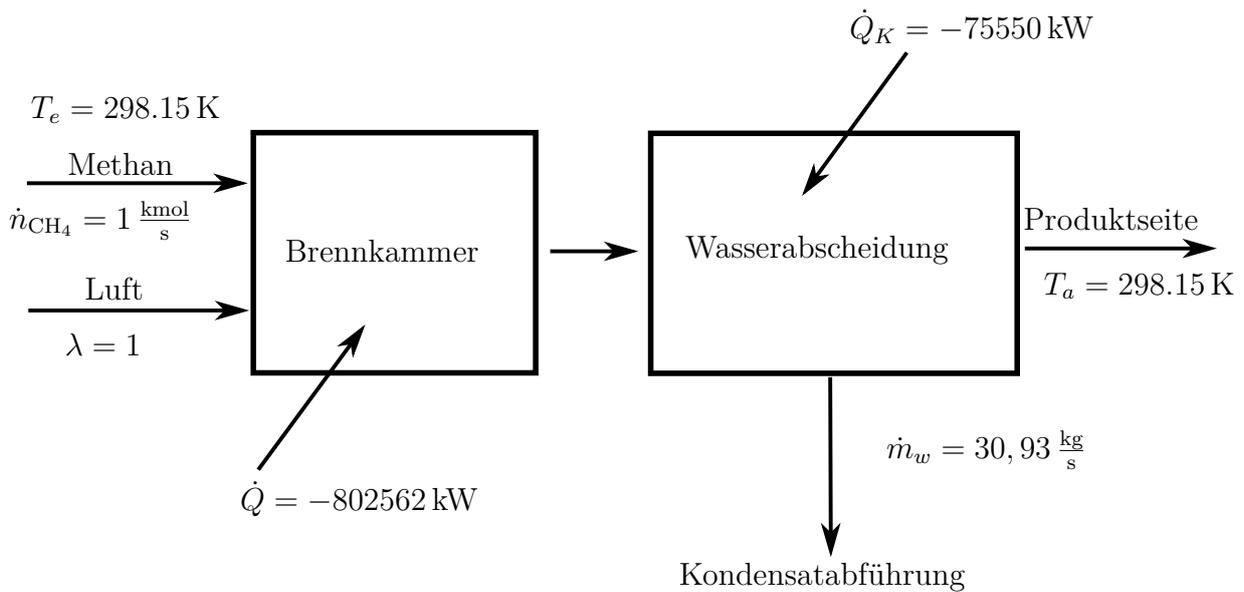


Abbildung 5.2: Thermodynamische Bilanz der Verbrennungsreaktion von reinem Methan mit Luft

In der Brennkammer wird ein Stoffmengenstrom von $\dot{n}_{CH_4} = 1 \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$ mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 1$ verbrannt. Die Edukte Methan und Luft werden der Brennkammer mit einer Temperatur von $T_e = 298.15 \text{ K}$ zugeführt. Ohne die Berücksichtigung von Wärmeverlusten beträgt der nutzbare Wärmestrom $\dot{Q} = -802562 \text{ kW}$, wenn die Temperatur auf der Produktseite $T_a = 298.15 \text{ K}$ entspricht. In diesem Fall liegt die Ausgangstemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur $T_{tau} = 331.8 \text{ K}$ und ein Teil des Produktwassers kondensiert aus. Es muss demnach Kondensat in Höhe von $\dot{m}_w = 30 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ aus dem Abgasstrom abgetrennt werden. Die Kondensation des Produktwassers führt zu einer zusätzlichen Wärmefreisetzung $\dot{Q}_K = -75550 \text{ kW}$ während des Prozesses.

5.2 Variation der Brennkammertemperatur

Mithilfe des Berechnungstools werden in diesem Abschnitt die Möglichkeiten untersucht, um die Brennkammertemperatur bei einer adiabaten Verbrennung mit Luft ($\xi_{O_2, tr. Luft} = 0,23$) zu variieren. Im ersten Schritt wird eine Wassereinspritzung und eine Erhöhung der

Luftzahl λ untersucht, um eine Absenkung der Brennkammertemperatur T zu erreichen. Eine Absenkung der Temperatur ist beispielsweise zur Reduzierung der Emission von Stickoxiden in Gasturbinen wichtig. In der Abbildung 5.3 sind die Auswirkungen auf die Brennkammertemperatur bei einer Variation der Luftzahl λ oder einer möglichen Wassereinspritzung zu sehen.

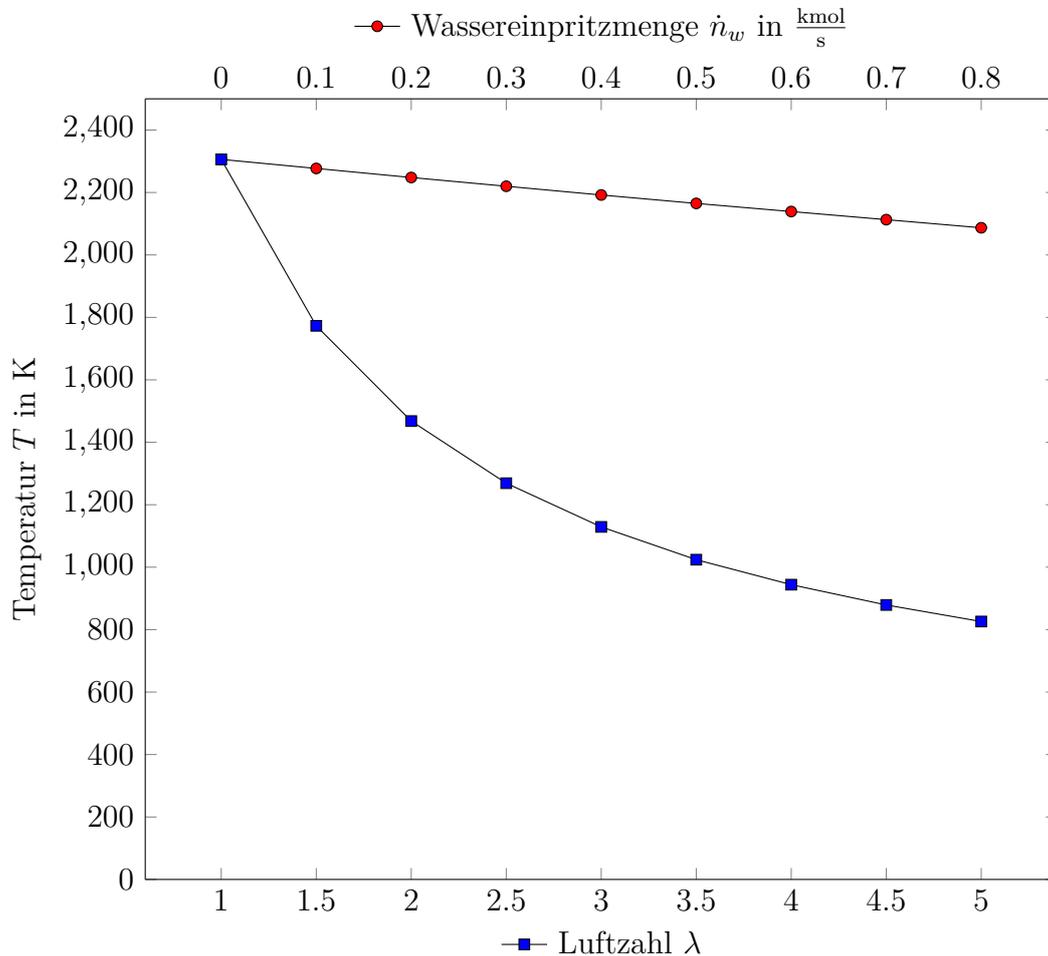


Abbildung 5.3: Variation der Brennkammertemperatur durch Wassereinspritzung und Luftzahlanpassung

Die Brennkammertemperaturen sind bei einer schrittweisen Erhöhung der Luftzahl in blau und bei einer Wassereinspritzung in rot dargestellt. Auf den ersten Blick erscheint die Anpassung der Luftzahl effektiver zur Reduzierung der Brennkammertemperatur. Bei einem Vergleich der jeweiligen Massenströme, die für eine identische Wärmeaufnahme notwendig sind, ist der notwendige Massenstrom des Wassers erheblich geringer. Der Grund dafür ist die relativ hohe Verdampfungsenthalpie des Wassers. Bei einem Vergleich der Wirkungsgrade beider Varianten hat auch hier die Wassereinspritzung Vorteile gegenüber der Luftzahlanpassung. Durch eine Kondensation von Produktwasser im Rauchgas kann die Wärme, welche zuvor für die Verdampfung des Wassers benötigt wird, teilweise zurückgewonnen werden und steht somit wieder als Nutzwärme zur Verfügung [5].

Des Weiteren wird eine mögliche Relation zwischen der kalorischen Verbrennungstemperatur und dem Sauerstoffgehalt der Luft bei der Verbrennung von Methan (CH_4) untersucht.

Bei einem Sauerstoffgehalt von 23 Massenprozent (atmosphärischer Anteil) bis 100 Massenprozent (reiner Sauerstoff) wird auch die Luftzahl variiert. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5.4 dargestellt.

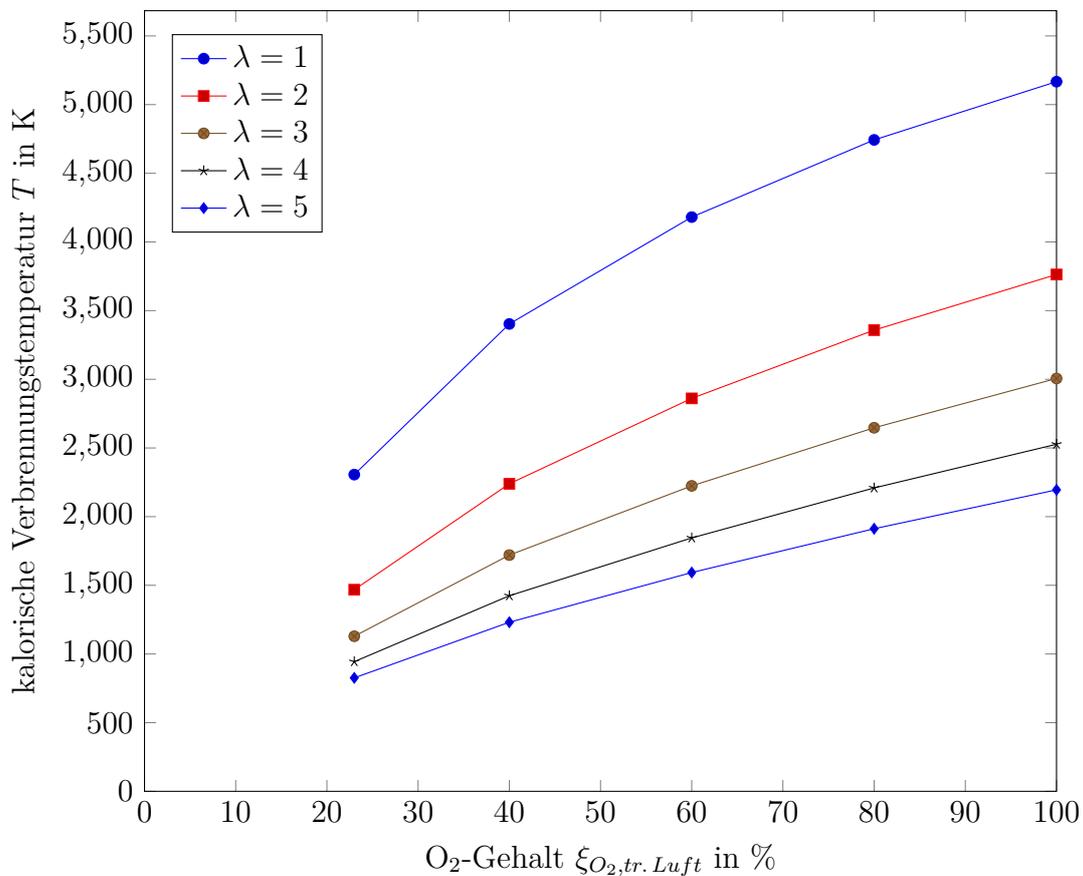


Abbildung 5.4: Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom O₂-Gehalt

In der Abbildung lässt sich eine eindeutige Abhängigkeit der kalorischen Verbrennungstemperatur vom Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft erkennen. Je höher der Sauerstoffanteil bei konstanter Luftzahl ist, umso höher wird die Temperatur. Dieser Zusammenhang lässt sich dahingehend erklären, dass bei steigendem Sauerstoffgehalt weniger Luft für eine vollständige Verbrennung benötigt wird. Es sinkt demnach die Menge an Stickstoff, die einen Teil der Reaktionswärme aufnimmt. Bei gleichbleibender Brennstoffmenge verteilt sich die freiwerdende Wärme dementsprechend auf einen geringeren Stoffstrom, was zu einem Anstieg der Temperatur führt. Wird der Sauerstoffgehalt bei wachsender Luftzahl konstant gehalten, sinkt die kalorische Verbrennungstemperatur. Diese Relation lässt sich mit der überschüssigen Luftmenge erklären, die nicht unmittelbar an der Reaktion beteiligt ist, aber dennoch erwärmt wird. Bei gleichbleibender Brennstoffmenge verteilt sich die freigesetzte Wärme auf eine größere Luftmenge, was zu einer sinkenden Temperatur führt.

5.3 Abhängigkeit des Brennwertes von Temperatur und Luftzahl

Mithilfe des entwickelten Berechnungsmodells wird in diesem Teilkapitel die Temperaturabhängigkeit des Brennwertes H_u und eine Relation zur Luftzahl λ untersucht. Dafür werden zunächst die Brennwerte verschiedener Stoffe bei variierender Rauchgastemperatur T_{RG} berechnet. Die Verbrennung erfolgt mit trockener Luft bei einem Sauerstoffanteil von $\xi_{O_2, tr. Luft} = 0,23$. Die Berechnungsergebnisse sind in der Abbildung 5.5 dargestellt.

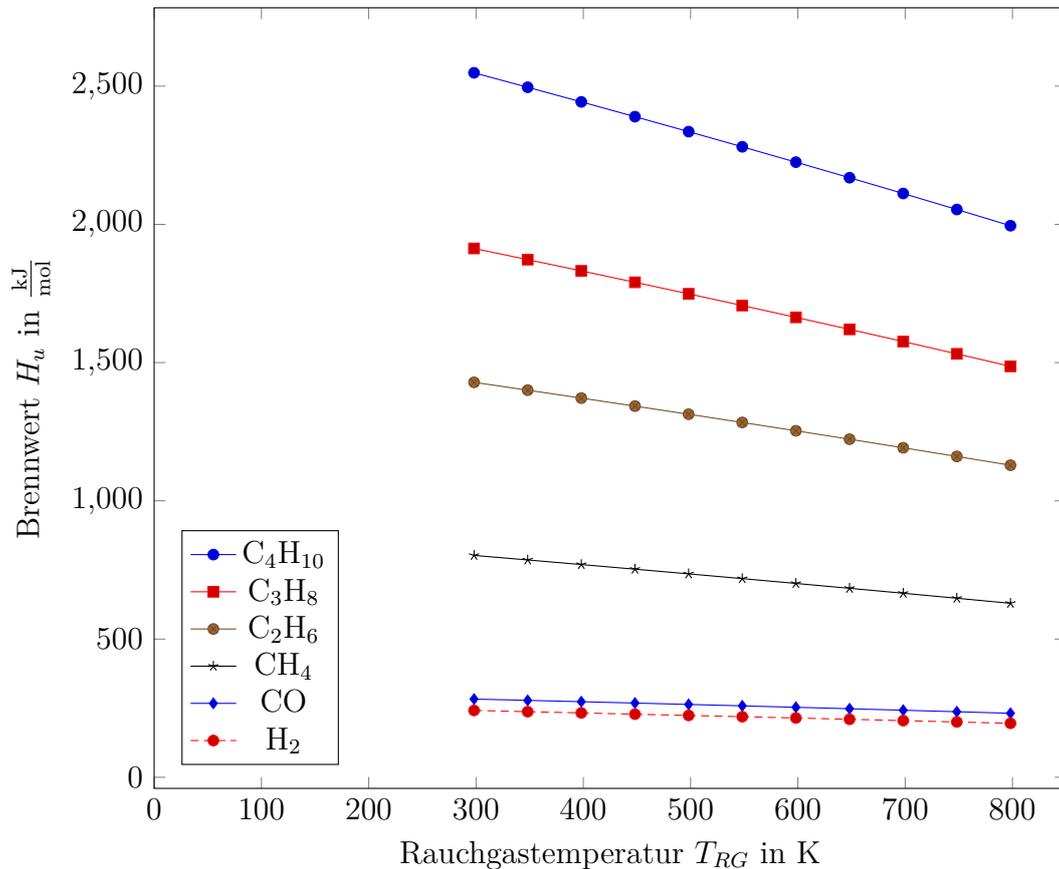


Abbildung 5.5: Abhängigkeit des Brennwertes von der Rauchgastemperatur

In der Abbildung lässt sich für alle gewählten Stoffe eine eindeutige Abhängigkeit des Brennwertes H_u von der Rauchgastemperatur T_{RG} erkennen. Aufgrund der gewünschten höheren Temperatur am Ausgang der Brennkammer kann dem Prozess weniger spezifische Wärme entnommen werden. Die Wärme wird benötigt, um die Produkte auf die vorgegebene Rauchgastemperatur zu erwärmen, was zu einer Reduzierung des Brennwertes führt.

Am Testfall der Verbrennung von Methan (CH_4) mit trockener Luft ($\xi_{O_2, tr. Luft} = 0,23$) wird neben der Temperaturabhängigkeit zusätzlich der Einfluss der Luftzahl auf den Brennwert untersucht. Bei verschiedenen Rauchgastemperaturen T_{RG} werden auch die jeweiligen Luftzahlen variiert. Die Ergebnisse der Berechnung sind in der Abbildung 5.6 aufgetragen.

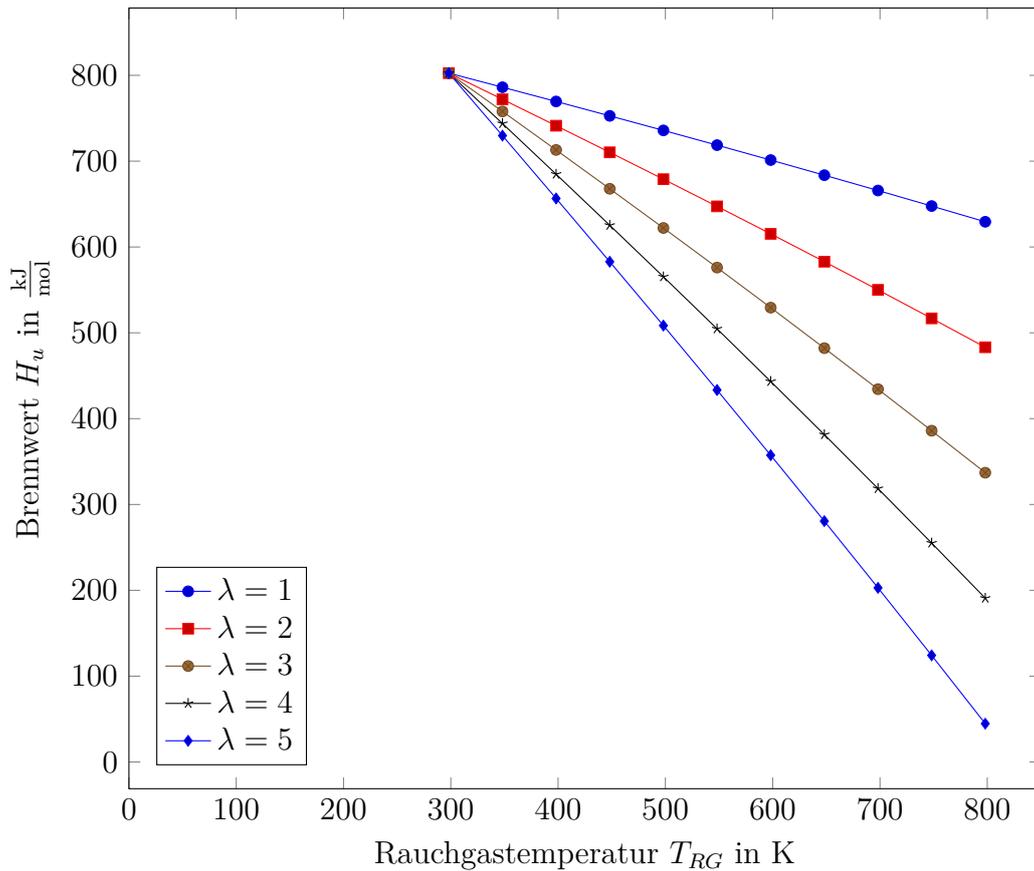


Abbildung 5.6: Abhängigkeit des Brennwertes von der Rauchgastemperatur und der Luftzahl

In der Abbildung lässt sich eine eindeutige Abhängigkeit des Brennwertes H_u von der Rauchgastemperatur T_{RG} und der Luftzahl λ erkennen. Bei steigender Rauchgastemperatur nimmt der Brennwert bei jeder dargestellten Luftzahl ab. Diese Relation lässt sich wie zuvor mit dem steigenden Wärmebedarf erklären, der für die Erwärmung der Produkte auf die vorgegebene Rauchgastemperatur benötigt wird. Bleibt die Temperatur am Brennkammerausgang konstant, nimmt mit steigender Luftzahl der Brennwert ab. Diese Relation lässt sich dahingehend erklären, dass der zusätzliche Luftstrom nicht an der Reaktion beteiligt ist, aber dennoch erwärmt werden muss. Bei gleicher Brennstoffmenge verteilt sich die Wärme auf eine größere Stoffmenge. Je größer die Luftzahl wird, umso größer wird der Wärmebedarf. Aus diesem Grund kann dem Prozess weniger Wärme entnommen werden, was zu einem niedrigeren Brennwert führt. In der Abbildung ist allerdings auch eine Ausnahme zu erkennen. Bei einer Rauchgastemperatur von $T_{RG} = 298,15$ K ist der Brennwert für alle Luftzahlen gleich groß. Diese Besonderheit ist damit zu erklären, dass die Eingangstemperatur der Edukte ebenfalls bei $T_e = 298,15$ K liegt. Da die Temperaturen am Ein- und Ausgang somit gleich groß sind, muss die überschüssige Luftmenge nicht zusätzlich erwärmt werden und es steht der identische Wärmestrom pro Brennstoffmenge zur Verfügung.

6 Schlussbetrachtung

6.1 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel der Arbeit war die Ausarbeitung eines akademischen Tools zur thermodynamischen Berechnung chemischer Energiewandlungsprozesse unter Anwendung des Prinzips der absoluten kalorischen Stoffwerte. Des Weiteren sollten die Ergebnisse des Berechnungsmodells anhand verschiedener Testfälle verifiziert werden, um anschließend eine grafische Darstellung der Resultate zu ermöglichen.

Für die Umsetzung des Ziels wurden zunächst die theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 erläutert. Dazu zählten eine Erklärung des Prinzips der absoluten kalorischen Stoffwerte, die Anforderungen an das Berechnungstool und die fundamentalen Gleichungen zur Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen. Neben der Berechnung von Gasgemischen sind auch Gleichungen zur Berechnung des Luftbedarfs, der Produktzusammensetzung, der adiabaten Prozesstemperatur oder auch zur Wasserabscheidung im Abgasstrom erläutert worden. Weiterführend beinhaltete das Kapitel 3 die Vorstellung des Modells. Diese schloss neben allgemeinen Informationen auch die differenzierte Erläuterung der einzelnen Varianten des Berechnungstools ein. Für jede der vier Varianten zeigten sich eigene Anwendungsbereiche. Neben vorgemischten Luft-Brennstoff-Gemischen können auch Brennstoffgemische mit vorgegebenem Luftverhältnis berechnet werden. Dabei besteht die Möglichkeit, die Prozesstemperatur und damit die Temperatur der Produkte vorzugeben oder diese berechnen zu lassen. Zusätzlich zum gasförmigen Brennstoff oder Luft-Brennstoff-Gemisch kann flüssiges Wasser oder flüssiges Methanol/Ethanol eingedüst werden.

In der anschließenden Verifizierung des Modells wurde anhand verschiedener Testfälle die Modellgüte untersucht. Bei den dargestellten Testfällen weisen die Berechnungsergebnisse des entwickelten Tools im Vergleich zu den Literaturwerten und den Musterlösungen nur geringe Abweichungen auf. Dies lässt auf eine sehr hohe Modellgüte schließen. Das entwickelte Berechnungstool stellt somit ein valides Werkzeug zur Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen dar.

Abschließend konnten mithilfe der Berechnungsergebnisse des entwickelten Modells grafische Darstellungen generiert werden, um verschiedene Sachverhalte zu veranschaulichen. Neben der Temperaturabhängigkeit des Heizwertes konnten auch der Einfluss der Luftzahl und der Wassereinspritzung oder auch des Sauerstoffgehalts der Luft auf die Verbrennungstemperatur aufgezeigt werden.

Aufgrund der verschiedenen Modifikationen des Berechnungsmodells, die unterschiedliche Fragestellungen ermöglichen, ist ein breites Aufgabenspektrum abgedeckt. Die Vielfalt der möglichen Problemstellungen erstreckt sich von der Bilanzierung von Brennstoffzellen über die Brennwertberechnung bis hin zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf die

Prozesstemperatur, um nur eine Auswahl zu nennen. Der Funktionsumfang ermöglicht eine gewisse Langlebigkeit des Berechnungsmodells, da neben der Verbrennungsreaktion von konventionellen Energieträgern auch theoretische Betrachtungen nachhaltiger Energiewandlungsprozesse wie zum Beispiel der Elektrolyse von Wasserstoff in einer Power-to-Gas-Anlage berechnet werden können.

6.2 Kritische Würdigung und Ausblick

Der Fokus des entwickelten Berechnungsmodells liegt auf der Berechnung von gasförmigen Edukten in chemischen Energiewandlungsprozessen. Die bisherige Auswahl an verfügbaren Stoffwerten ist auf 23 gängige chemische Verbindungen oder Elemente festgelegt. Eine Erweiterung der Datenbank ist mit minimalem Aufwand jederzeit realisierbar. Neben der geforderten Wasserabscheidung im Abgasstrom sind auch zusätzliche Elemente wie eine Wassereinspritzung oder die Eindüsung von flüssigem Methanol beziehungsweise Ethanol implementiert worden. Diese Zusatzmodule tragen zu einem breiten Funktionsumfang und einem umfangreicheren Aufgabenspektrum bei, da dies beispielsweise auch die Berechnung flüssiger Brennstoffe (Methanol und Ethanol) ermöglicht. Chemische Energiewandlungsprozesse mit festen Brennstoffen können mit dem entwickelten Berechnungstool nicht bilanziert werden. Über eine alternative Berechnungsweise kann die Zusammensetzung des Rauchgases bei der Verbrennung von festen Brennstoffen berechnet werden, wenn die Massenanteile gegeben und die jeweiligen Komponenten in der Datenbank enthalten sind.

Die Bilanzierung der Entropie ist beim entwickelten Modell zurzeit nicht vorgesehen. Sofern der Bedarf besteht, kann diese Berechnung jedoch jederzeit nachträglich ergänzt werden. Bei der Bilanzierung von Brennstoffzellen ist zu beachten, dass im Modell der Einfluss von Katalysatoren oder Sättigungseffekten nicht enthalten ist. Es lassen sich zudem keine Aussagen über die elektrische Spannung oder die Stromstärke treffen, welche von der Brennstoffzelle bereitgestellt werden. Es wird stattdessen die Höhe des verfügbaren Enthalpiestroms ermittelt.

Bei der Berechnung der adiabaten Verbrennungstemperatur ergaben sich Abweichungen, die mit Gleichgewichtsreaktionen ab einer Temperatur von 2000 K erklärt werden konnten (siehe Kapitel 4.2). Dies führte dazu, dass die Freigabe des Modells für die Berechnung von adiabaten Verbrennungstemperaturen nur bis zu dieser Temperaturgrenze gilt. Diese Gleichgewichtsreaktionen sind bislang nicht in der Berechnung berücksichtigt und stellen somit einen weiteren Ansatz zur Weiterentwicklung des Berechnungsmodells dar. Wird das Berechnungstool mit Applikationen wie Chemkin oder Cantera gekoppelt, können die Temperaturen entsprechend korrigiert werden, da diese Anwendungen die Berechnung des thermodynamischen Gleichgewichts übernehmen [9].

Literaturverzeichnis

- [1] ANDRES, GÜNTER, MAROTT BRONDER, RALF EISENMANN, KARL-HEINZ FOLKERTS, HEINO GROTEHUSMANN, ANDREAS KLEIN, ROLAND KLITSCHER, BERTRAM PHILIPP, MICHAEL REIMANN, BERND SCHURICH, ERNST SPERLING, KURT WAHRHEIT, HELMUT WALK und BERND FELDEN: *Einführung in die Umwelttechnik: Grundlagen und Anwendungen aus Technik und Recht*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2., verbesserte Auflage, 1994.
- [2] BAEHR, HANS DIETER und STEPHAN KABELAC: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen : mit zahlreichen Tabellen*. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 13., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2006.
- [3] BECKER, FRANK-MICHAEL: *Formelsammlung: Formeln, Tabellen, Daten ; Mathematik, Physik, Astronomie, Chemie, Biologie, Informatik ; [bis zum Abitur]*. Duden Paetec Schulbuchverl., Berlin, 2. Aufl., 1. Dr Auflage, 2013.
- [4] CERBE, GÜNTER und BENNO LENDT (Herausgeber): *Grundlagen der Gastechnik: Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung*. Hanser, München, 8., vollständig überarbeitete Auflage, 2017.
- [5] KARL, J.: *Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt*. De Gruyter, 2006.
- [6] KRAMER, C.: *Praxishandbuch Thermoprocess-Technik: Grundlagen - Verfahren / hrsg. von Carl Kramer und Alfred Mühlbauer*. Vulkan-Verlag, 2002.
- [7] NEW 4.0: *Innovationsallianz*. Website, 2018. Abrufbar unter <http://www.new4-0.de/2018/04/23/die-innovationsallianz/>; Eingesehen am 11.07.2018.
- [8] SATTELMAYER, THOMAS: *Verbrennung: Stoffströme und adiabate Flammtemperatur*. Website, 2016. Abrufbar unter https://web.archive.org/web/20140107041710/http://www.td.mw.tum.de/tum-td/de/studium/lehre/thermo_2/vbrsite/vbr.htm; Eingesehen am 10.07.2018.
- [9] SATTELMAYER, THOMAS: *Verbrennung: Stoffströme und adiabate Flammtemperatur: E-Mail*, 12.07.2018.

A Anhang

Anhangsverzeichnis

A.1	Dampftafel	53
A.2	Absolute Stoffwerte für C(gr)	55
A.3	Absolute Stoffwerte für CH ₄	58
A.4	Absolute Stoffwerte für CH ₃ OH	61
A.5	Absolute Stoffwerte für CH ₃ OH(fl)	64
A.6	Absolute Stoffwerte für CO	65
A.7	Absolute Stoffwerte für CO ₂	68
A.8	Absolute Stoffwerte für C ₂ H ₆	71
A.9	Absolute Stoffwerte für C ₂ H ₅ OH	74
A.10	Absolute Stoffwerte für C ₂ H ₅ OH(fl)	77
A.11	Absolute Stoffwerte für C ₃ H ₈	78
A.12	Absolute Stoffwerte für C ₄ H ₁₀	81
A.13	Absolute Stoffwerte für H	84
A.14	Absolute Stoffwerte für H ₂	87
A.15	Absolute Stoffwerte für H ₂ O(d)	90
A.16	Absolute Stoffwerte für H ₂ O(fl)	93
A.17	Absolute Stoffwerte für O	94
A.18	Absolute Stoffwerte für OH	97
A.19	Absolute Stoffwerte für O ₂	100
A.20	Absolute Stoffwerte für N	103
A.21	Absolute Stoffwerte für NO	106
A.22	Absolute Stoffwerte für NO ₂	109
A.23	Absolute Stoffwerte für N ₂	112
A.24	Absolute Stoffwerte für S	115
A.25	Absolute Stoffwerte für SO	118
A.26	Absolute Stoffwerte für SO ₂	121
A.27	Absolute Stoffwerte für S ₂	124
A.28	Absolute Stoffwerte für Luft	127
A.29	Aufgabe 3 Technische Thermodynamik II Wintersemester 2017/18 . . .	130
A.30	Aufgabe 3 Technische Thermodynamik II Wintersemester 2014/15 . . .	131

A.31 Persönliche Mitteilung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmeyer 132

A.1 Dampftafel

Tabelle A.1: Dampftafel

Temperatur T in K	Sättigungsdruck p_s in bar
0,00	0,006112
0,01	0,006117
5,00	0,008726
10,00	0,012282
15,00	0,017057
20,00	0,023392
25,00	0,031697
30,00	0,042467
35,00	0,056286
40,00	0,073844
45,00	0,095944
50,00	0,12351
55,00	0,15761
60,00	0,19946
65,00	0,25041
70,00	0,31201
75,00	0,38595
80,00	0,47415
85,00	0,57867
90,00	0,70182
95,00	0,84609
100,00	1,0142
110,00	1,4338
120,00	1,9867
130,00	2,7026
140,00	3,615
150,00	4,761
160,00	6,1814
170,00	7,9205
180,00	10,026
190,00	12,55
200,00	15,547
210,00	19,074
220,00	23,193
230,00	27,968
240,00	33,467
250,00	39,759
260,00	46,921
270,00	55,028
280,00	64,165

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.1 – Fortsetzung von vorheriger Seite	
Temperatur T in K	Sättigungsdruck p_s in bar
290,00	74,416
300,00	85,877
310,00	98,647
320,00	112,84
330,00	128,58
340,00	146
350,00	165,29
360,00	186,66
370,00	210,43
373,00	218,13
373,946	220,64

A.2 Absolute Stoffwerte für C(gr)

Tabelle A.2: Absolute Stoffwerte für C(gr)

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-1,054
200	5,007	3,074	-0,665
250	6,822	4,385	-0,37
273,15	7,655	5,026	-0,202
298,15	8,528	5,734	0
300	8,592	5,787	0,016
350	10,256	7,238	0,487
400	11,824	8,711	1,04
450	13,286	10,189	1,668
500	14,617	11,659	2,366
550	15,799	13,109	3,127
600	16,835	14,529	3,944
650	17,743	15,913	4,809
700	18,534	17,257	5,716
750	19,224	18,56	6,66
800	19,828	19,82	7,637
850	20,358	21,039	8,642
900	20,826	22,216	9,672
950	21,241	23,353	10,724
1000	21,612	24,452	11,795
1050	21,944	25,515	12,884
1100	22,243	26,543	13,989
1150	22,515	27,538	15,108
1200	22,762	28,501	16,24
1250	22,989	29,435	17,384
1300	23,198	30,341	18,539
1350	23,392	31,22	19,703
1400	23,572	32,074	20,878
1450	23,74	32,904	22,06
1500	23,897	33,712	23,251
1550	24,045	34,498	24,45
1600	24,185	35,263	25,656
1650	24,317	36,01	26,868
1700	24,443	36,737	28,087
1750	24,562	37,448	29,313
1800	24,676	38,141	30,544
1850	24,786	38,819	31,78
1900	24,89	39,481	33,022
1950	24,992	40,129	34,269
2000	25,089	40,763	35,521

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.2 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	25,183	41,384	36,778
2100	25,275	41,992	38,039
2150	25,363	42,587	39,305
2200	25,449	43,172	40,576
2250	25,533	43,744	41,85
2300	25,615	44,306	43,129
2350	25,695	44,858	44,412
2400	25,773	45,4	45,698
2450	25,849	45,932	46,989
2500	25,924	46,455	48,283
2550	25,998	46,969	49,581
2600	26,07	47,475	50,883
2650	26,141	47,972	52,188
2700	26,211	48,461	53,497
2750	26,279	48,943	54,809
2800	26,347	49,417	56,125
2850	26,414	49,884	57,444
2900	26,48	50,344	58,766
2950	26,545	50,797	60,092
3000	26,609	51,244	61,421
3050	26,673	51,684	62,753
3100	26,736	52,118	64,088
3150	26,798	52,547	65,426
3200	26,86	52,969	66,768
3250	26,921	53,386	68,112
3300	26,982	53,798	69,46
3350	27,042	54,204	70,811
3400	27,102	54,605	72,164
3450	27,161	55,001	73,521
3500	27,22	55,392	74,88
3550	27,279	55,779	76,243
3600	27,337	56,161	77,608
3650	27,395	56,538	78,977
3700	27,453	56,911	80,348
3750	27,511	57,28	81,722
3800	27,568	57,645	83,099
3850	27,625	58,006	84,479
3900	27,681	58,362	85,861
3950	27,738	58,715	87,247
4000	27,794	59,065	88,635
4050	27,85	59,41	90,026
4100	27,906	59,752	91,42
4150	27,962	60,091	92,817
4200	28,017	60,426	94,216

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.2 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	28,072	60,758	95,618
4300	28,128	61,087	97,023
4350	28,183	61,412	98,431
4400	28,238	61,735	99,842
4450	28,292	62,054	101,255
4500	28,347	62,37	102,671
4550	28,402	62,684	104,09
4600	28,456	62,995	105,511
4650	28,511	63,303	106,935
4700	28,565	63,608	108,362
4750	28,619	63,91	109,792
4800	28,674	64,21	111,224
4850	28,728	64,508	112,659
4900	28,782	64,803	114,097
4950	28,836	65,095	115,537
5000	28,89	65,385	116,98

A.3 Absolute Stoffwerte für CH₄Tabelle A.3: Absolute Stoffwerte für CH₄

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-84,616
200	33,506	172,676	-77,973
250	34,267	180,225	-76,281
273,15	34,858	183,284	-75,481
298,15	35,691	186,371	-74,6
300	35,76	186,592	-74,534
350	37,956	192,262	-72,693
400	40,618	197,5	-70,731
450	43,542	202,451	-68,627
500	46,585	207,196	-66,374
550	49,654	211,78	-63,968
600	52,691	216,231	-61,41
650	55,66	220,566	-58,7
700	58,543	224,797	-55,845
750	61,329	228,932	-52,848
800	64,013	232,976	-49,714
850	66,592	236,935	-46,448
900	69,066	240,811	-43,056
950	71,429	244,609	-39,544
1000	73,676	248,331	-35,915
1050	75,812	251,978	-32,178
1100	77,849	255,552	-28,336
1150	79,787	259,056	-24,395
1200	81,628	262,49	-20,359
1250	83,375	265,858	-16,233
1300	85,032	269,161	-12,023
1350	86,605	272,4	-7,732
1400	88,098	275,577	-3,364
1450	89,517	278,693	1,077
1500	90,866	281,751	5,587
1550	92,15	284,751	10,163
1600	93,373	287,696	14,801
1650	94,541	290,588	19,499
1700	95,656	293,427	24,254
1750	96,723	296,215	29,064
1800	97,744	298,954	33,926
1850	98,724	301,646	38,837
1900	99,666	304,291	43,797
1950	100,571	306,892	48,803
2000	101,443	309,449	53,854

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.3 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	102,284	311,964	58,947
2100	103,097	314,439	64,082
2150	103,883	316,874	69,256
2200	104,644	319,271	74,47
2250	105,383	321,631	79,721
2300	106,101	323,955	85,008
2350	106,799	326,245	90,33
2400	107,479	328,5	95,687
2450	108,142	330,723	101,078
2500	108,79	332,915	106,501
2550	109,423	335,075	111,957
2600	110,043	337,206	117,443
2650	110,651	339,308	122,961
2700	111,247	341,382	128,508
2750	111,833	343,428	134,085
2800	112,41	345,449	139,691
2850	112,977	347,443	145,326
2900	113,537	349,413	150,989
2950	114,089	351,359	156,68
3000	114,634	353,281	162,398
3050	115,173	355,18	168,143
3100	115,707	357,057	173,915
3150	116,235	358,913	179,714
3200	116,759	360,747	185,538
3250	117,278	362,562	191,389
3300	117,794	364,356	197,266
3350	118,306	366,131	203,169
3400	118,815	367,888	209,097
3450	119,322	369,626	215,05
3500	119,826	371,346	221,029
3550	120,328	373,05	227,033
3600	120,829	374,736	233,062
3650	121,328	376,406	239,116
3700	121,827	378,06	245,194
3750	122,324	379,699	251,298
3800	122,82	381,322	257,427
3850	123,317	382,931	263,58
3900	123,813	384,526	269,758
3950	124,309	386,106	275,961
4000	124,805	387,673	282,189
4050	125,301	389,226	288,442
4100	125,798	390,767	294,719
4150	126,296	392,295	301,022
4200	126,795	393,81	307,349

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.3 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	127,294	395,314	313,701
4300	127,795	396,805	320,079
4350	128,297	398,286	326,481
4400	128,8	399,755	332,908
4450	129,305	401,213	339,361
4500	129,812	402,661	345,839
4550	130,32	404,098	352,342
4600	130,83	405,525	358,871
4650	131,343	406,942	365,425
4700	131,857	408,35	372,005
4750	132,373	409,748	378,611
4800	132,892	411,136	385,242
4850	133,413	412,516	391,9
4900	133,936	413,887	398,584
4950	134,462	415,25	405,294
5000	134,99	416,604	412,03

A.4 Absolute Stoffwerte für CH₃OHTabelle A.4: Absolute Stoffwerte für CH₃OH

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-212,375
200	39,678	223,28	-205,017
250	41,414	232,305	-202,994
273,15	42,561	236,021	-202,022
298,15	44,039	239,81	-200,94
300	44,157	240,083	-200,858
350	47,687	247,147	-198,565
400	51,621	253,769	-196,083
450	55,679	260,083	-193,401
500	59,683	266,158	-190,516
550	63,537	272,028	-187,435
600	67,192	277,715	-184,166
650	70,633	283,231	-180,719
700	73,864	288,585	-177,106
750	76,898	293,785	-173,336
800	79,75	298,84	-169,419
850	82,434	303,756	-165,364
900	84,96	308,54	-161,178
950	87,33	313,198	-156,871
1000	89,539	317,734	-152,448
1050	91,613	322,154	-147,919
1100	93,566	326,461	-143,289
1150	95,401	330,661	-138,564
1200	97,122	334,758	-133,751
1250	98,735	338,756	-128,854
1300	100,247	342,658	-123,879
1350	101,663	346,468	-118,831
1400	102,991	350,19	-113,714
1450	104,235	353,826	-108,533
1500	105,402	357,379	-103,292
1550	106,497	360,854	-97,994
1600	107,525	364,251	-92,643
1650	108,491	367,575	-87,243
1700	109,399	370,827	-81,795
1750	110,253	374,011	-76,304
1800	111,057	377,128	-70,771
1850	111,814	380,181	-65,199
1900	112,528	383,173	-59,59
1950	113,201	386,105	-53,947
2000	113,837	388,979	-48,27

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.4 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	114,438	391,797	-42,563
2100	115,005	394,562	-36,827
2150	115,542	397,274	-31,063
2200	116,05	399,936	-25,273
2250	116,532	402,55	-19,459
2300	116,988	405,116	-13,621
2350	117,421	407,637	-7,76
2400	117,832	410,113	-1,879
2450	118,222	412,547	4,022
2500	118,592	414,939	9,943
2550	118,945	417,291	15,881
2600	119,28	419,604	21,837
2650	119,6	421,879	27,809
2700	119,904	424,117	33,797
2750	120,194	426,32	39,799
2800	120,471	428,488	45,816
2850	120,735	430,623	51,846
2900	120,987	432,725	57,889
2950	121,228	434,795	63,945
3000	121,459	436,835	70,012
3050	121,679	438,844	76,09
3100	121,89	440,825	82,18
3150	122,093	442,776	88,279
3200	122,286	444,701	94,389
3250	122,472	446,598	100,508
3300	122,65	448,469	106,636
3350	122,821	450,315	112,773
3400	122,985	452,136	118,918
3450	123,143	453,932	125,071
3500	123,295	455,705	131,232
3550	123,441	457,455	137,4
3600	123,581	459,183	143,576
3650	123,716	460,888	149,758
3700	123,846	462,572	155,948
3750	123,971	464,236	162,143
3800	124,092	465,879	168,345
3850	124,209	467,501	174,552
3900	124,321	469,105	180,765
3950	124,43	470,689	186,984
4000	124,534	472,255	193,208
4050	124,636	473,803	199,438
4100	124,733	475,333	205,672
4150	124,828	476,845	211,911
4200	124,919	478,341	218,155

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.4 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	125,008	479,82	224,403
4300	125,093	481,282	230,655
4350	125,176	482,729	236,912
4400	125,256	484,16	243,173
4450	125,334	485,576	249,438
4500	125,409	486,976	255,706
4550	125,482	488,363	261,978
4600	125,552	489,734	268,254
4650	125,621	491,092	274,534
4700	125,687	492,436	280,816
4750	125,751	493,766	287,102
4800	125,814	495,084	293,391
4850	125,874	496,388	299,684
4900	125,933	497,679	305,979
4950	125,99	498,958	312,277
5000	126,046	500,224	318,578

A.5 Absolute Stoffwerte für CH₃OH(fl)Tabelle A.5: Absolute Stoffwerte für CH₃OH(fl)

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-257,905
200	70,926	97,594	-246,237
250	74,087	113,681	-242,63
273,15	76,953	120,361	-240,883
298,15	81,08	127,27	-238,91
300	81,431	127,773	-238,76
350	93,563	141,169	-234,407
400	110,969	154,743	-229,314
450	132,122	169,015	-223,246

A.6 Absolute Stoffwerte für CO

Tabelle A.6: Absolute Stoffwerte für CO

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-119,206
200	29,109	186,033	-113,393
250	29,119	192,529	-111,938
273,15	29,127	195,108	-111,264
298,15	29,141	197,66	-110,535
300	29,143	197,84	-110,481
350	29,211	202,337	-109,023
400	29,341	206,245	-107,559
450	29,538	209,712	-106,087
500	29,794	212,837	-104,604
550	30,098	215,69	-103,107
600	30,438	218,324	-101,594
650	30,8	220,774	-100,063
700	31,171	223,07	-98,514
750	31,54	225,233	-96,946
800	31,9	227,28	-95,36
850	32,245	229,225	-93,756
900	32,572	231,077	-92,136
950	32,882	232,847	-90,499
1000	33,179	234,541	-88,848
1050	33,454	236,166	-87,182
1100	33,71	237,729	-85,503
1150	33,948	239,232	-83,811
1200	34,17	240,682	-82,108
1250	34,377	242,081	-80,394
1300	34,569	243,433	-78,671
1350	34,747	244,741	-76,938
1400	34,914	246,008	-75,196
1450	35,069	247,236	-73,447
1500	35,213	248,427	-71,69
1550	35,348	249,584	-69,925
1600	35,475	250,708	-68,155
1650	35,593	251,802	-66,378
1700	35,704	252,866	-64,596
1750	35,808	253,902	-62,808
1800	35,905	254,913	-61,015
1850	35,997	255,898	-59,217
1900	36,083	256,859	-57,415
1950	36,165	257,797	-55,609
2000	36,242	258,714	-53,799

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.6 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	36,315	259,61	-51,985
2100	36,384	260,485	-50,168
2150	36,449	261,342	-48,347
2200	36,511	262,181	-46,523
2250	36,57	263,002	-44,696
2300	36,626	263,807	-42,866
2350	36,68	264,595	-41,033
2400	36,731	265,368	-39,198
2450	36,78	266,126	-37,36
2500	36,826	266,869	-35,52
2550	36,871	267,599	-33,677
2600	36,914	268,315	-31,833
2650	36,955	269,019	-29,986
2700	36,995	269,71	-28,137
2750	37,033	270,389	-26,287
2800	37,07	271,057	-24,434
2850	37,105	271,713	-22,58
2900	37,14	272,359	-20,723
2950	37,173	272,994	-18,866
3000	37,205	273,619	-17,006
3050	37,236	274,234	-15,145
3100	37,266	274,84	-13,283
3150	37,296	275,436	-11,418
3200	37,324	276,024	-9,553
3250	37,352	276,603	-7,686
3300	37,379	277,173	-5,818
3350	37,405	277,736	-3,948
3400	37,43	278,29	-2,077
3450	37,455	278,837	-0,205
3500	37,48	279,376	1,668
3550	37,504	279,907	3,543
3600	37,527	280,432	5,418
3650	37,55	280,95	7,295
3700	37,572	281,461	9,173
3750	37,594	281,965	11,053
3800	37,615	282,464	12,933
3850	37,637	282,955	14,814
3900	37,657	283,441	16,696
3950	37,678	283,921	18,58
4000	37,698	284,395	20,464
4050	37,718	284,864	22,35
4100	37,737	285,326	24,236
4150	37,756	285,784	26,123
4200	37,775	286,236	28,012

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.6 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	37,794	286,683	29,901
4300	37,813	287,126	31,791
4350	37,831	287,563	33,682
4400	37,849	287,995	35,574
4450	37,867	288,423	37,467
4500	37,885	288,846	39,361
4550	37,903	289,265	41,256
4600	37,921	289,679	43,151
4650	37,939	290,089	45,048
4700	37,956	290,495	46,945
4750	37,974	290,897	48,843
4800	37,992	291,295	50,742
4850	38,009	291,689	52,642
4900	38,027	292,078	54,543
4950	38,045	292,465	56,445
5000	38,063	292,847	58,348

A.7 Absolute Stoffwerte für CO₂Tabelle A.7: Absolute Stoffwerte für CO₂

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-402,875
200	32,361	199,969	-396,922
250	34,828	207,453	-395,243
273,15	35,96	210,587	-394,424
298,15	37,135	213,787	-393,51
300	37,22	214,017	-393,441
350	39,387	219,921	-391,525
400	41,325	225,309	-389,506
450	43,062	230,278	-387,396
500	44,624	234,898	-385,203
550	46,038	239,218	-382,936
600	47,323	243,28	-380,601
650	48,493	247,115	-378,206
700	49,561	250,748	-375,754
750	50,538	254,201	-373,251
800	51,432	257,492	-370,701
850	52,25	260,635	-368,109
900	52,999	263,643	-365,478
950	53,683	266,527	-362,81
1000	54,309	269,297	-360,11
1050	54,89	271,961	-357,38
1100	55,42	274,527	-354,622
1150	55,904	277,001	-351,839
1200	56,347	279,39	-349,032
1250	56,755	281,699	-346,205
1300	57,13	283,932	-343,357
1350	57,477	286,095	-340,492
1400	57,798	288,191	-337,61
1450	58,097	290,224	-334,713
1500	58,374	292,199	-331,801
1550	58,632	294,117	-328,876
1600	58,873	295,982	-325,938
1650	59,099	297,797	-322,988
1700	59,31	299,565	-320,028
1750	59,508	301,287	-317,058
1800	59,693	302,966	-314,078
1850	59,868	304,604	-311,089
1900	60,033	306,203	-308,091
1950	60,188	307,764	-305,085
2000	60,335	309,29	-302,072

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.7 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	60,473	310,781	-299,052
2100	60,604	312,24	-296,025
2150	60,728	313,668	-292,992
2200	60,846	315,065	-289,952
2250	60,958	316,434	-286,907
2300	61,065	317,775	-283,857
2350	61,166	319,089	-280,801
2400	61,263	320,378	-277,74
2450	61,355	321,642	-274,675
2500	61,443	322,883	-271,605
2550	61,527	324,1	-268,531
2600	61,608	325,296	-265,452
2650	61,686	326,47	-262,37
2700	61,76	327,624	-259,284
2750	61,832	328,758	-256,194
2800	61,901	329,872	-253,1
2850	61,968	330,968	-250,004
2900	62,033	332,047	-246,904
2950	62,095	333,108	-243,8
3000	62,156	334,152	-240,694
3050	62,215	335,18	-237,585
3100	62,273	336,192	-234,473
3150	62,329	337,189	-231,358
3200	62,385	338,171	-228,24
3250	62,439	339,138	-225,119
3300	62,492	340,092	-221,996
3350	62,544	341,032	-218,87
3400	62,596	341,959	-215,741
3450	62,647	342,873	-212,61
3500	62,697	343,775	-209,477
3550	62,748	344,665	-206,341
3600	62,798	345,543	-203,202
3650	62,848	346,409	-200,061
3700	62,898	347,265	-196,917
3750	62,948	348,109	-193,771
3800	62,998	348,943	-190,622
3850	63,049	349,767	-187,471
3900	63,1	350,581	-184,318
3950	63,151	351,385	-181,161
4000	63,204	352,18	-178,002
4050	63,256	352,966	-174,841
4100	63,31	353,742	-171,677
4150	63,364	354,51	-168,51
4200	63,42	355,269	-165,34

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.7 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	63,476	356,02	-162,168
4300	63,534	356,763	-158,993
4350	63,592	357,497	-155,815
4400	63,652	358,225	-152,633
4450	63,714	358,944	-149,449
4500	63,777	359,656	-146,262
4550	63,841	360,361	-143,072
4600	63,907	361,06	-139,878
4650	63,975	361,751	-136,681
4700	64,045	362,435	-133,48
4750	64,116	363,113	-130,276
4800	64,19	363,785	-127,069
4850	64,265	364,451	-123,857
4900	64,343	365,11	-120,642
4950	64,423	365,764	-117,423
5000	64,505	366,412	-114,2

A.8 Absolute Stoffwerte für C₂H₆Tabelle A.8: Absolute Stoffwerte für C₂H₆

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-95,743
200	42,342	210,554	-88,473
250	47,016	220,482	-86,244
273,15	49,556	224,755	-85,127
298,15	52,501	229,221	-83,852
300	52,725	229,547	-83,754
350	59,01	238,142	-80,962
400	65,458	246,442	-77,851
450	71,808	254,521	-74,418
500	77,916	262,405	-70,674
550	83,712	270,106	-66,632
600	89,173	277,626	-62,308
650	94,303	284,968	-57,72
700	99,121	292,135	-52,883
750	103,65	299,13	-47,813
800	107,914	305,957	-42,523
850	111,929	312,621	-37,025
900	115,707	319,126	-31,334
950	119,248	325,478	-25,459
1000	122,54	331,68	-19,413
1050	125,636	337,734	-13,208
1100	128,539	343,647	-6,853
1150	131,256	349,421	-0,357
1200	133,797	355,061	6,27
1250	136,171	360,572	13,02
1300	138,389	365,956	19,885
1350	140,461	371,219	26,856
1400	142,398	376,362	33,928
1450	144,208	381,391	41,094
1500	145,901	386,309	48,347
1550	147,486	391,119	55,682
1600	148,971	395,825	63,094
1650	150,361	400,431	70,578
1700	151,666	404,939	78,129
1750	152,89	409,353	85,743
1800	154,04	413,677	93,417
1850	155,12	417,912	101,146
1900	156,137	422,063	108,928
1950	157,094	426,131	116,759
2000	157,995	430,12	124,636

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.8 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	158,845	434,031	132,557
2100	159,647	437,869	140,52
2150	160,403	441,634	148,521
2200	161,119	445,33	156,559
2250	161,795	448,959	164,632
2300	162,435	452,522	172,738
2350	163,041	456,022	180,875
2400	163,615	459,46	189,042
2450	164,16	462,84	197,236
2500	164,677	466,161	205,457
2550	165,167	469,427	213,704
2600	165,634	472,639	221,974
2650	166,078	475,798	230,267
2700	166,5	478,907	238,581
2750	166,902	481,966	246,916
2800	167,285	484,976	255,271
2850	167,65	487,94	263,645
2900	167,999	490,859	272,036
2950	168,332	493,734	280,444
3000	168,65	496,566	288,869
3050	168,954	499,356	297,309
3100	169,245	502,106	305,764
3150	169,523	504,816	314,233
3200	169,79	507,488	322,716
3250	170,045	510,122	331,212
3300	170,29	512,72	339,72
3350	170,525	515,283	348,241
3400	170,751	517,811	356,773
3450	170,968	520,305	365,316
3500	171,176	522,767	373,869
3550	171,377	525,196	382,433
3600	171,569	527,594	391,007
3650	171,755	529,962	399,59
3700	171,933	532,3	408,182
3750	172,105	534,609	416,783
3800	172,271	536,89	425,393
3850	172,431	539,143	434,01
3900	172,585	541,369	442,636
3950	172,733	543,568	451,269
4000	172,877	545,742	459,909
4050	173,016	547,89	468,556
4100	173,149	550,014	477,21
4150	173,279	552,114	485,871
4200	173,404	554,19	494,538

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.8 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	173,524	556,243	503,211
4300	173,641	558,273	511,891
4350	173,754	560,281	520,575
4400	173,864	562,267	529,266
4450	173,969	564,233	537,962
4500	174,072	566,177	546,663
4550	174,171	568,101	555,369
4600	174,267	570,005	564,08
4650	174,36	571,89	572,796
4700	174,45	573,755	581,516
4750	174,538	575,601	590,241
4800	174,623	577,429	598,97
4850	174,705	579,239	607,703
4900	174,785	581,032	616,44
4950	174,862	582,807	625,181
5000	174,937	584,564	633,926

A.9 Absolute Stoffwerte für C₂H₅OHTabelle A.9: Absolute Stoffwerte für C₂H₅OH

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-249,492
200	52,235	257,462	-240,679
250	58,284	269,739	-237,922
273,15	61,556	275,041	-236,535
298,15	65,309	280,593	-234,95
300	65,593	280,998	-234,829
350	73,441	291,695	-231,354
400	81,279	302,016	-227,485
450	88,79	312,027	-223,232
500	95,82	321,751	-218,614
550	102,318	331,192	-213,658
600	108,294	340,355	-208,391
650	113,788	349,243	-202,837
700	118,855	357,863	-197,019
750	123,551	366,226	-190,958
800	127,925	374,341	-184,67
850	132,015	382,22	-178,17
900	135,841	389,875	-171,473
950	139,406	397,317	-164,59
1000	142,69	404,552	-157,537
1050	145,78	411,59	-150,324
1100	148,677	418,439	-142,962
1150	151,388	425,108	-135,46
1200	153,923	431,605	-127,826
1250	156,293	437,937	-120,07
1300	158,508	444,111	-112,199
1350	160,578	450,132	-104,222
1400	162,515	456,008	-96,144
1450	164,327	461,743	-87,972
1500	166,024	467,342	-79,713
1550	167,613	472,812	-71,372
1600	169,103	478,158	-62,953
1650	170,5	483,383	-54,463
1700	171,812	488,493	-45,905
1750	173,045	493,491	-37,283
1800	174,204	498,382	-28,601
1850	175,295	503,17	-19,864
1900	176,322	507,859	-11,073
1950	177,289	512,451	-2,233
2000	178,202	516,952	6,655

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.9 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	179,063	521,363	15,587
2100	179,877	525,687	24,56
2150	180,646	529,929	33,574
2200	181,373	534,091	42,624
2250	182,061	538,174	51,71
2300	182,713	542,183	60,83
2350	183,331	546,119	69,981
2400	183,917	549,985	79,162
2450	184,474	553,783	88,372
2500	185,002	557,515	97,609
2550	185,504	561,184	106,872
2600	185,982	564,791	116,159
2650	186,436	568,338	125,47
2700	186,869	571,827	134,803
2750	187,282	575,259	144,156
2800	187,675	578,637	153,53
2850	188,05	581,962	162,924
2900	188,408	585,236	172,335
2950	188,75	588,46	181,764
3000	189,077	591,635	191,21
3050	189,39	594,763	200,672
3100	189,69	597,845	210,149
3150	189,976	600,882	219,64
3200	190,251	603,876	229,146
3250	190,514	606,828	238,665
3300	190,766	609,739	248,197
3350	191,009	612,609	257,742
3400	191,241	615,441	267,298
3450	191,465	618,234	276,866
3500	191,679	620,991	286,444
3550	191,886	623,711	296,034
3600	192,085	626,396	305,633
3650	192,276	629,047	315,242
3700	192,46	631,664	324,86
3750	192,637	634,249	334,488
3800	192,808	636,802	344,124
3850	192,973	639,323	353,769
3900	193,132	641,814	363,421
3950	193,286	644,275	373,082
4000	193,434	646,708	382,75
4050	193,577	649,111	392,425
4100	193,715	651,487	402,107
4150	193,849	653,836	411,796
4200	193,978	656,159	421,492

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.9 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	194,102	658,455	431,194
4300	194,223	660,726	440,902
4350	194,34	662,972	450,616
4400	194,453	665,194	460,336
4450	194,563	667,392	470,062
4500	194,669	669,566	479,792
4550	194,772	671,718	489,528
4600	194,871	673,847	499,27
4650	194,968	675,954	509,016
4700	195,062	678,04	518,766
4750	195,152	680,105	528,522
4800	195,24	682,149	538,281
4850	195,326	684,172	548,046
4900	195,409	686,176	557,814
4950	195,489	688,16	567,586
5000	195,567	690,125	577,363

A.10 Absolute Stoffwerte für C₂H₅OH(fl)Tabelle A.10: Absolute Stoffwerte für C₂H₅OH(fl)

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-301,592
200	89,95	121	-287,192
250	97,609	141,775	-282,53
273,15	103,638	150,669	-280,204
298,15	112,25	160,1	-277,51
300	112,978	160,797	-277,302
350	137,506	179,934	-271,078
400	171,054	200,391	-263,4
450	212,304	222,853	-253,844

A.11 Absolute Stoffwerte für C₃H₈Tabelle A.11: Absolute Stoffwerte für C₃H₈

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-119,421
200	56,084	244,82	-111,004
250	64,397	258,199	-107,999
273,15	68,714	264,088	-106,458
298,15	73,589	270,315	-104,68
300	73,956	270,771	-104,544
350	84,01	282,925	-100,595
400	93,989	294,797	-96,144
450	103,561	306,425	-91,203
500	112,568	317,808	-85,797
550	120,957	328,935	-79,957
600	128,738	339,797	-73,712
650	135,952	350,39	-67,092
700	142,656	360,714	-60,125
750	148,908	370,772	-52,834
800	154,758	380,571	-45,241
850	160,243	390,119	-37,364
900	165,385	399,426	-29,222
950	170,182	408,498	-20,832
1000	174,614	417,341	-12,21
1050	178,783	425,963	-3,374
1100	182,684	434,371	5,664
1150	186,329	442,573	14,89
1200	189,732	450,576	24,293
1250	192,908	458,386	33,859
1300	195,871	466,01	43,58
1350	198,637	473,455	53,443
1400	201,22	480,726	63,44
1450	203,632	487,83	73,562
1500	205,888	494,772	83,801
1550	207,997	501,557	94,149
1600	209,971	508,193	104,598
1650	211,821	514,682	115,144
1700	213,554	521,032	125,779
1750	215,181	527,246	136,497
1800	216,708	533,329	147,295
1850	218,142	539,287	158,167
1900	219,491	545,122	169,108
1950	220,761	550,84	180,114
2000	221,956	556,445	191,183

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.11 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	223,083	561,939	202,309
2100	224,146	567,328	213,49
2150	225,15	572,614	224,723
2200	226,098	577,801	236,004
2250	226,994	582,892	247,332
2300	227,842	587,891	258,703
2350	228,645	592,8	270,115
2400	229,405	597,621	281,566
2450	230,127	602,359	293,055
2500	230,811	607,015	304,578
2550	231,461	611,592	316,135
2600	232,079	616,093	327,724
2650	232,666	620,519	339,343
2700	233,225	624,873	350,99
2750	233,757	629,158	362,665
2800	234,264	633,374	374,365
2850	234,748	637,525	386,091
2900	235,209	641,612	397,84
2950	235,649	645,636	409,611
3000	236,07	649,6	421,404
3050	236,472	653,506	433,218
3100	236,857	657,354	445,051
3150	237,225	661,147	456,903
3200	237,578	664,886	468,774
3250	237,916	668,572	480,661
3300	238,24	672,207	492,565
3350	238,551	675,792	504,485
3400	238,85	679,328	516,42
3450	239,136	682,817	528,37
3500	239,412	686,26	540,333
3550	239,677	689,658	552,311
3600	239,932	693,012	564,301
3650	240,177	696,323	576,304
3700	240,413	699,592	588,318
3750	240,64	702,821	600,345
3800	240,859	706,01	612,382
3850	241,07	709,159	624,431
3900	241,274	712,271	636,489
3950	241,471	715,346	648,558
4000	241,66	718,385	660,636
4050	241,844	721,388	672,724
4100	242,02	724,357	684,82
4150	242,191	727,291	696,926
4200	242,356	730,193	709,039

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.11 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	242,516	733,062	721,161
4300	242,671	735,899	733,291
4350	242,82	738,706	745,428
4400	242,964	741,482	757,573
4450	243,104	744,228	769,725
4500	243,24	746,945	781,883
4550	243,371	749,633	794,049
4600	243,498	752,294	806,22
4650	243,621	754,927	818,398
4700	243,74	757,533	830,582
4750	243,856	760,113	842,772
4800	243,968	762,667	854,968
4850	244,076	765,196	867,169
4900	244,181	767,7	879,375
4950	244,284	770,179	891,587
5000	244,383	772,635	903,804

A.12 Absolute Stoffwerte für C₄H₁₀Tabelle A.12: Absolute Stoffwerte für C₄H₁₀

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-145,019
200	76,392	275,458	-134,324
250	86,877	293,589	-130,252
273,15	92,398	301,521	-128,178
298,15	98,657	309,881	-125,79
300	99,129	310,493	-125,607
350	112,071	326,743	-120,328
400	124,917	342,55	-114,402
450	137,221	357,981	-107,845
500	148,772	373,043	-100,692
550	159,502	387,732	-92,982
600	169,426	402,042	-84,756
650	178,605	415,971	-76,052
700	187,115	429,522	-66,906
750	195,035	442,705	-57,35
800	202,434	455,531	-47,411
850	209,362	468,013	-37,115
900	215,844	480,166	-26,483
950	221,881	492	-15,538
1000	227,439	503,524	-4,303
1050	232,671	514,749	7,202
1100	237,556	525,687	18,959
1150	242,113	536,348	30,952
1200	246,361	546,743	43,165
1250	250,32	556,882	55,583
1300	254,011	566,772	68,192
1350	257,452	576,424	80,98
1400	260,663	585,845	93,934
1450	263,659	595,045	107,043
1500	266,459	604,031	120,296
1550	269,075	612,812	133,686
1600	271,522	621,394	147,201
1650	273,813	629,784	160,835
1700	275,96	637,991	174,58
1750	277,972	646,019	188,429
1800	279,861	653,877	202,375
1850	281,634	661,569	216,413
1900	283,301	669,102	230,537
1950	284,868	676,482	244,741
2000	286,344	683,713	259,022

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.12 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	287,734	690,8	273,374
2100	289,044	697,75	287,794
2150	290,281	704,566	302,278
2200	291,448	711,253	316,821
2250	292,551	717,815	331,421
2300	293,594	724,257	346,075
2350	294,581	730,581	360,78
2400	295,515	736,793	375,532
2450	296,401	742,896	390,331
2500	297,24	748,892	405,172
2550	298,037	754,786	420,054
2600	298,793	760,581	434,975
2650	299,511	766,279	449,933
2700	300,194	771,884	464,925
2750	300,844	777,399	479,951
2800	301,462	782,825	495,009
2850	302,051	788,166	510,097
2900	302,613	793,424	525,214
2950	303,148	798,602	540,358
3000	303,659	803,701	555,528
3050	304,146	808,724	570,723
3100	304,612	813,674	585,942
3150	305,057	818,551	601,184
3200	305,482	823,359	616,448
3250	305,889	828,098	631,732
3300	306,278	832,771	647,036
3350	306,651	837,38	662,36
3400	307,009	841,925	677,701
3450	307,351	846,41	693,06
3500	307,679	850,835	708,436
3550	307,994	855,201	723,828
3600	308,296	859,511	739,235
3650	308,586	863,765	754,657
3700	308,864	867,966	770,094
3750	309,131	872,114	785,544
3800	309,388	876,21	801,007
3850	309,635	880,256	816,482
3900	309,872	884,253	831,97
3950	310,101	888,202	847,469
4000	310,32	892,104	862,98
4050	310,531	895,96	878,501
4100	310,734	899,771	894,033
4150	310,93	903,539	909,575
4200	311,118	907,264	925,126

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.12 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	311,299	910,947	940,686
4300	311,473	914,589	956,255
4350	311,641	918,191	971,833
4400	311,802	921,753	987,419
4450	311,958	925,278	1003,013
4500	312,108	928,764	1018,615
4550	312,252	932,214	1034,224
4600	312,392	935,627	1049,84
4650	312,526	939,005	1065,463
4700	312,655	942,348	1081,093
4750	312,779	945,657	1096,729
4800	312,899	948,933	1112,371
4850	313,015	952,176	1128,018
4900	313,126	955,387	1143,672
4950	313,233	958,567	1159,331
5000	313,337	961,715	1174,995

A.13 Absolute Stoffwerte für H

Tabelle A.13: Absolute Stoffwerte für H

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	211,801
200	20,786	106,418	215,959
250	20,786	111,057	216,998
273,15	20,786	112,897	217,479
298,15	20,786	114,718	217,999
300	20,786	114,846	218,037
350	20,786	118,051	219,077
400	20,786	120,826	220,116
450	20,786	123,275	221,155
500	20,786	125,465	222,195
550	20,786	127,446	223,234
600	20,786	129,254	224,273
650	20,786	130,918	225,312
700	20,786	132,459	226,352
750	20,786	133,893	227,391
800	20,786	135,234	228,43
850	20,786	136,494	229,47
900	20,786	137,682	230,509
950	20,786	138,806	231,548
1000	20,786	139,873	232,588
1050	20,786	140,887	233,627
1100	20,786	141,854	234,666
1150	20,786	142,778	235,706
1200	20,786	143,662	236,745
1250	20,786	144,511	237,784
1300	20,786	145,326	238,824
1350	20,786	146,111	239,863
1400	20,786	146,867	240,902
1450	20,786	147,596	241,941
1500	20,786	148,301	242,981
1550	20,786	148,982	244,02
1600	20,786	149,642	245,059
1650	20,786	150,282	246,099
1700	20,786	150,902	247,138
1750	20,786	151,505	248,177
1800	20,786	152,09	249,217
1850	20,786	152,66	250,256
1900	20,786	153,214	251,295
1950	20,786	153,754	252,335
2000	20,786	154,28	253,374

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.13 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	20,786	154,794	254,413
2100	20,786	155,295	255,453
2150	20,786	155,784	256,492
2200	20,786	156,262	257,531
2250	20,786	156,729	258,571
2300	20,786	157,186	259,61
2350	20,786	157,633	260,649
2400	20,786	158,07	261,688
2450	20,786	158,499	262,728
2500	20,786	158,919	263,767
2550	20,786	159,33	264,806
2600	20,786	159,734	265,846
2650	20,786	160,13	266,885
2700	20,786	160,519	267,924
2750	20,786	160,9	268,964
2800	20,786	161,275	270,003
2850	20,786	161,642	271,042
2900	20,786	162,004	272,082
2950	20,786	162,359	273,121
3000	20,786	162,709	274,16
3050	20,786	163,052	275,2
3100	20,786	163,39	276,239
3150	20,786	163,723	277,278
3200	20,786	164,05	278,317
3250	20,786	164,372	279,357
3300	20,786	164,69	280,396
3350	20,786	165,002	281,435
3400	20,786	165,31	282,475
3450	20,786	165,614	283,514
3500	20,786	165,913	284,553
3550	20,786	166,208	285,593
3600	20,786	166,498	286,632
3650	20,786	166,785	287,671
3700	20,786	167,068	288,711
3750	20,786	167,347	289,75
3800	20,786	167,622	290,789
3850	20,786	167,894	291,829
3900	20,786	168,162	292,868
3950	20,786	168,427	293,907
4000	20,786	168,688	294,947
4050	20,786	168,947	295,986
4100	20,786	169,202	297,025
4150	20,786	169,454	298,064
4200	20,786	169,703	299,104

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.13 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	20,786	169,949	300,143
4300	20,786	170,192	301,182
4350	20,786	170,432	302,222
4400	20,786	170,67	303,261
4450	20,786	170,904	304,3
4500	20,786	171,137	305,34
4550	20,786	171,366	306,379
4600	20,786	171,594	307,418
4650	20,786	171,818	308,458
4700	20,786	172,041	309,497
4750	20,786	172,261	310,536
4800	20,786	172,478	311,576
4850	20,786	172,694	312,615
4900	20,786	172,907	313,654
4950	20,786	173,118	314,693
5000	20,786	173,327	315,733

A.14 Absolute Stoffwerte für H₂Tabelle A.14: Absolute Stoffwerte für H₂

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-8,468
200	27,445	119,409	-2,775
250	28,357	125,641	-1,378
273,15	28,626	128,164	-0,718
298,15	28,836	130,681	0
300	28,849	130,859	0,053
350	29,086	135,327	1,503
400	29,189	139,218	2,96
450	29,231	142,659	4,42
500	29,254	145,74	5,883
550	29,279	148,529	7,346
600	29,318	151,079	8,811
650	29,373	153,427	10,278
700	29,444	155,607	11,748
750	29,53	157,641	13,223
800	29,629	159,55	14,701
850	29,743	161,349	16,186
900	29,873	163,053	17,676
950	30,025	164,672	19,173
1000	30,206	166,217	20,679
1050	30,377	167,695	22,194
1100	30,567	169,112	23,717
1150	30,771	170,475	25,25
1200	30,983	171,789	26,794
1250	31,2	173,058	28,349
1300	31,421	174,286	29,914
1350	31,644	175,476	31,491
1400	31,866	176,631	33,079
1450	32,086	177,753	34,678
1500	32,305	178,845	36,287
1550	32,52	179,908	37,908
1600	32,732	180,943	39,539
1650	32,94	181,954	41,181
1700	33,144	182,94	42,833
1750	33,344	183,904	44,495
1800	33,539	184,846	46,167
1850	33,73	185,767	47,849
1900	33,916	186,669	49,54
1950	34,098	187,553	51,241
2000	34,276	188,418	52,95

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.14 – Fortsetzung von vorheriger Seite			
T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	34,449	189,267	54,668
2100	34,618	190,099	56,395
2150	34,783	190,916	58,13
2200	34,944	191,717	59,873
2250	35,101	192,504	61,624
2300	35,254	193,277	63,383
2350	35,404	194,037	65,15
2400	35,55	194,784	66,924
2450	35,693	195,519	68,705
2500	35,832	196,241	70,493
2550	35,969	196,952	72,288
2600	36,102	197,652	74,09
2650	36,233	198,341	75,898
2700	36,361	199,019	77,713
2750	36,486	199,687	79,534
2800	36,609	200,346	81,361
2850	36,729	200,995	83,195
2900	36,848	201,635	85,034
2950	36,964	202,266	86,88
3000	37,078	202,888	88,731
3050	37,191	203,502	90,587
3100	37,301	204,107	92,45
3150	37,41	204,705	94,318
3200	37,518	205,295	96,191
3250	37,624	205,878	98,069
3300	37,728	206,453	99,953
3350	37,832	207,021	101,842
3400	37,934	207,582	103,736
3450	38,035	208,137	105,635
3500	38,135	208,685	107,54
3550	38,233	209,226	109,449
3600	38,331	209,762	111,363
3650	38,428	210,291	113,282
3700	38,525	210,815	115,206
3750	38,62	211,332	117,134
3800	38,715	211,844	119,068
3850	38,809	212,351	121,006
3900	38,902	212,853	122,949
3950	38,995	213,349	124,896
4000	39,087	213,84	126,848
4050	39,178	214,326	128,805
4100	39,269	214,807	130,766
4150	39,359	215,284	132,732
4200	39,449	215,756	134,702

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.14 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	39,538	216,223	136,677
4300	39,627	216,686	138,656
4350	39,715	217,145	140,639
4400	39,802	217,599	142,627
4450	39,889	218,049	144,619
4500	39,975	218,495	146,616
4550	40,06	218,938	148,617
4600	40,145	219,376	150,622
4650	40,229	219,81	152,631
4700	40,312	220,241	154,645
4750	40,395	220,668	156,663
4800	40,476	221,091	158,684
4850	40,557	221,511	160,71
4900	40,637	221,928	162,74
4950	40,715	222,341	164,774
5000	40,793	222,75	166,812

A.15 Absolute Stoffwerte für H₂O(d)Tabelle A.15: Absolute Stoffwerte für H₂O(d)

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-251,73
200	33,349	175,477	-245,109
250	33,436	182,929	-243,439
273,15	33,494	185,892	-242,664
298,15	33,588	188,829	-241,826
300	33,596	189,037	-241,764
350	33,881	194,236	-240,077
400	34,265	198,784	-238,374
450	34,721	202,846	-236,65
500	35,225	206,529	-234,901
550	35,762	209,912	-233,127
600	36,324	213,047	-231,325
650	36,904	215,978	-229,494
700	37,499	218,734	-227,634
750	38,108	221,342	-225,744
800	38,728	223,821	-223,823
850	39,359	226,188	-221,871
900	39,998	228,456	-219,887
950	40,643	230,636	-217,871
1000	41,291	232,737	-215,823
1050	41,931	234,767	-213,742
1100	42,574	236,732	-211,629
1150	43,213	238,639	-209,485
1200	43,843	240,491	-207,308
1250	44,461	242,294	-205,101
1300	45,065	244,049	-202,862
1350	45,654	245,761	-200,594
1400	46,226	247,432	-198,297
1450	46,781	249,064	-195,972
1500	47,318	250,659	-193,62
1550	47,838	252,219	-191,241
1600	48,34	253,746	-188,836
1650	48,824	255,241	-186,407
1700	49,292	256,705	-183,954
1750	49,742	258,141	-181,478
1800	50,176	259,548	-178,98
1850	50,594	260,928	-176,461
1900	50,996	262,283	-173,921
1950	51,383	263,613	-171,361
2000	51,756	264,918	-168,783

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.15 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	52,114	266,201	-166,186
2100	52,458	267,461	-163,572
2150	52,79	268,699	-160,94
2200	53,108	269,916	-158,293
2250	53,414	271,113	-155,63
2300	53,709	272,291	-152,952
2350	53,992	273,449	-150,259
2400	54,264	274,588	-147,553
2450	54,525	275,71	-144,833
2500	54,777	276,814	-142,1
2550	55,019	277,901	-139,355
2600	55,251	278,972	-136,598
2650	55,475	280,026	-133,83
2700	55,69	281,065	-131,051
2750	55,897	282,089	-128,261
2800	56,097	283,098	-125,462
2850	56,289	284,093	-122,652
2900	56,474	285,073	-119,833
2950	56,652	286,04	-117,005
3000	56,823	286,994	-114,168
3050	56,989	287,934	-111,322
3100	57,149	288,862	-108,469
3150	57,303	289,778	-105,608
3200	57,452	290,682	-102,739
3250	57,597	291,573	-99,862
3300	57,736	292,454	-96,979
3350	57,871	293,323	-94,089
3400	58,002	294,181	-91,192
3450	58,129	295,029	-88,289
3500	58,252	295,866	-85,379
3550	58,372	296,694	-82,464
3600	58,488	297,511	-79,542
3650	58,602	298,318	-76,615
3700	58,712	299,116	-73,682
3750	58,82	299,905	-70,744
3800	58,925	300,685	-67,8
3850	59,028	301,456	-64,851
3900	59,129	302,218	-61,897
3950	59,228	302,972	-58,938
4000	59,325	303,718	-55,974
4050	59,42	304,455	-53,006
4100	59,514	305,185	-50,032
4150	59,606	305,907	-47,054
4200	59,697	306,621	-44,072

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.15 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	59,787	307,328	-41,085
4300	59,875	308,028	-38,093
4350	59,963	308,721	-35,097
4400	60,05	309,407	-32,097
4450	60,136	310,086	-29,092
4500	60,221	310,758	-26,083
4550	60,305	311,424	-23,07
4600	60,389	312,083	-20,053
4650	60,473	312,737	-17,031
4700	60,556	313,384	-14,006
4750	60,638	314,025	-10,976
4800	60,72	314,661	-7,942
4850	60,802	315,29	-4,904
4900	60,883	315,914	-1,862
4950	60,964	316,533	1,185
5000	61,045	317,146	4,235

A.16 Absolute Stoffwerte für H₂O(f)Tabelle A.16: Absolute Stoffwerte für H₂O(f)

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-299,108
200	28,204	31,096	-296,147
250	34,876	38,098	-294,572
273,15 (s)	38,113	41,327	-293,727
273,15 (fl)	76,174	63,332	-287,717
298,15	75,351	69,942	-285,83
300	75,355	70,408	-285,691
350	75,534	82,026	-281,922
400	76,799	92,174	-278,121
450	79,033	101,343	-274,228
500	83,901	109,888	-270,171
550	93,921	118,29	-265,759
600	125,409	127,516	-260,447

A.17 Absolute Stoffwerte für O

Tabelle A.17: Absolute Stoffwerte für O

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	242,45
200	22,734	152,155	246,989
250	22,245	157,172	248,112
273,15	22,07	159,135	248,625
298,15	21,912	161,06	249,175
300	21,901	161,196	249,216
350	21,658	164,553	250,304
400	21,483	167,433	251,382
450	21,354	169,955	252,453
500	21,257	172,2	253,518
550	21,183	174,222	254,579
600	21,125	176,063	255,637
650	21,078	177,752	256,692
700	21,04	179,312	257,745
750	21,009	180,763	258,796
800	20,984	182,118	259,846
850	20,962	183,389	260,895
900	20,944	184,587	261,942
950	20,929	185,719	262,989
1000	20,915	186,792	264,035
1050	20,9	187,812	265,08
1100	20,889	188,784	266,125
1150	20,881	189,713	267,169
1200	20,874	190,601	268,213
1250	20,868	191,453	269,257
1300	20,863	192,271	270,3
1350	20,859	193,059	271,343
1400	20,855	193,817	272,386
1450	20,852	194,549	273,429
1500	20,848	195,256	274,471
1550	20,845	195,94	275,514
1600	20,842	196,601	276,556
1650	20,839	197,243	277,598
1700	20,836	197,865	278,64
1750	20,833	198,469	279,681
1800	20,831	199,055	280,723
1850	20,829	199,626	281,764
1900	20,828	200,182	282,806
1950	20,826	200,723	283,847
2000	20,826	201,25	284,888

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.17 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	20,825	201,764	285,93
2100	20,826	202,266	286,971
2150	20,826	202,756	288,012
2200	20,828	203,235	289,054
2250	20,83	203,703	290,095
2300	20,832	204,161	291,137
2350	20,835	204,609	292,178
2400	20,839	205,047	293,22
2450	20,844	205,477	294,262
2500	20,849	205,898	295,305
2550	20,855	206,311	296,347
2600	20,861	206,716	297,39
2650	20,869	207,114	298,433
2700	20,876	207,504	299,477
2750	20,885	207,887	300,521
2800	20,894	208,263	301,566
2850	20,904	208,633	302,61
2900	20,915	208,997	303,656
2950	20,927	209,355	304,702
3000	20,939	209,706	305,749
3050	20,951	210,053	306,796
3100	20,965	210,393	307,844
3150	20,979	210,729	308,892
3200	20,993	211,059	309,942
3250	21,009	211,385	310,992
3300	21,025	211,706	312,043
3350	21,041	212,022	313,094
3400	21,058	212,334	314,147
3450	21,076	212,642	315,2
3500	21,094	212,945	316,254
3550	21,113	213,244	317,309
3600	21,132	213,54	318,366
3650	21,152	213,831	319,423
3700	21,172	214,119	320,481
3750	21,192	214,404	321,54
3800	21,214	214,684	322,6
3850	21,235	214,962	323,661
3900	21,257	215,236	324,723
3950	21,279	215,507	325,787
4000	21,302	215,775	326,851
4050	21,325	216,04	327,917
4100	21,348	216,301	328,984
4150	21,372	216,56	330,052
4200	21,396	216,816	331,121

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.17 – Fortsetzung von vorheriger Seite			
T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	21,42	217,07	332,191
4300	21,444	217,32	333,263
4350	21,469	217,568	334,336
4400	21,494	217,814	335,41
4450	21,519	218,057	336,485
4500	21,544	218,298	337,562
4550	21,569	218,536	338,64
4600	21,594	218,772	339,719
4650	21,62	219,005	340,799
4700	21,645	219,237	341,881
4750	21,671	219,466	342,964
4800	21,697	219,693	344,048
4850	21,722	219,918	345,133
4900	21,748	220,141	346,22
4950	21,773	220,362	347,308
5000	21,799	220,581	348,397

A.18 Absolute Stoffwerte für OH

Tabelle A.18: Absolute Stoffwerte für OH

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	28,465
200	30,516	171,691	34,319
250	30,126	178,455	35,834
273,15	29,998	181,118	36,53
298,15	29,886	183,74	37,278
300	29,879	183,924	37,333
350	29,714	188,517	38,823
400	29,603	192,477	40,306
450	29,532	195,96	41,784
500	29,495	199,069	43,26
550	29,489	201,88	44,734
600	29,514	204,446	46,209
650	29,57	206,811	47,686
700	29,656	209,005	49,167
750	29,77	211,055	50,652
800	29,913	212,981	52,144
850	30,079	214,799	53,644
900	30,267	216,523	55,152
950	30,47	218,165	56,671
1000	30,682	219,733	58,199
1050	30,897	221,236	59,739
1100	31,124	222,678	61,289
1150	31,359	224,067	62,851
1200	31,597	225,406	64,425
1250	31,835	226,701	66,011
1300	32,07	227,954	67,609
1350	32,302	229,169	69,218
1400	32,528	230,348	70,839
1450	32,749	231,493	72,471
1500	32,964	232,607	74,114
1550	33,173	233,691	75,767
1600	33,374	234,748	77,431
1650	33,57	235,778	79,104
1700	33,759	236,783	80,788
1750	33,941	237,764	82,48
1800	34,117	238,723	84,182
1850	34,288	239,66	85,892
1900	34,452	240,576	87,61
1950	34,611	241,473	89,337
2000	34,765	242,351	91,071

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.18 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	34,913	243,212	92,813
2100	35,057	244,055	94,563
2150	35,196	244,881	96,319
2200	35,33	245,692	98,082
2250	35,461	246,487	99,852
2300	35,587	247,268	101,628
2350	35,71	248,035	103,411
2400	35,829	248,788	105,199
2450	35,944	249,528	106,993
2500	36,057	250,255	108,793
2550	36,166	250,97	110,599
2600	36,272	251,674	112,41
2650	36,376	252,366	114,226
2700	36,477	253,046	116,047
2750	36,576	253,717	117,874
2800	36,672	254,377	119,705
2850	36,767	255,027	121,541
2900	36,859	255,667	123,382
2950	36,949	256,298	125,227
3000	37,038	256,919	127,077
3050	37,124	257,532	128,931
3100	37,209	258,137	130,789
3150	37,293	258,733	132,652
3200	37,375	259,321	134,518
3250	37,456	259,901	136,389
3300	37,535	260,473	138,264
3350	37,613	261,038	140,142
3400	37,69	261,596	142,025
3450	37,766	262,147	143,911
3500	37,84	262,691	145,802
3550	37,914	263,228	147,695
3600	37,987	263,759	149,593
3650	38,058	264,283	151,494
3700	38,129	264,802	153,399
3750	38,199	265,314	155,307
3800	38,268	265,82	157,219
3850	38,336	266,321	159,134
3900	38,404	266,816	161,052
3950	38,471	267,306	162,974
4000	38,536	267,79	164,899
4050	38,601	268,269	166,828
4100	38,666	268,743	168,76
4150	38,729	269,212	170,694
4200	38,792	269,676	172,632

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.18 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	38,854	270,136	174,574
4300	38,915	270,591	176,518
4350	38,975	271,041	178,465
4400	39,035	271,487	180,415
4450	39,093	271,928	182,368
4500	39,151	272,365	184,325
4550	39,208	272,798	186,284
4600	39,264	273,227	188,245
4650	39,319	273,652	190,21
4700	39,373	274,073	192,177
4750	39,426	274,489	194,147
4800	39,478	274,903	196,12
4850	39,529	275,312	198,095
4900	39,579	275,718	200,073
4950	39,628	276,12	202,053
5000	39,675	276,518	204,036

A.19 Absolute Stoffwerte für O₂Tabelle A.19: Absolute Stoffwerte für O₂

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-8,68
200	29,126	193,484	-2,868
250	29,208	199,992	-1,41
273,15	29,274	202,582	-0,733
298,15	29,378	205,149	0
300	29,388	205,331	0,054
350	29,701	209,883	1,531
400	30,115	213,875	3,026
450	30,589	217,449	4,544
500	31,092	220,698	6,086
550	31,598	223,685	7,653
600	32,09	226,456	9,245
650	32,557	229,043	10,861
700	32,99	231,472	12,5
750	33,386	233,762	14,16
800	33,745	235,928	15,838
850	34,069	237,984	17,534
900	34,361	239,939	19,244
950	34,63	241,805	20,969
1000	34,883	243,587	22,707
1050	35,123	245,295	24,457
1100	35,333	246,934	26,219
1150	35,522	248,509	27,99
1200	35,695	250,024	29,771
1250	35,855	251,485	31,56
1300	36,006	252,894	33,356
1350	36,149	254,256	35,16
1400	36,288	255,573	36,971
1450	36,422	256,849	38,789
1500	36,553	258,086	40,613
1550	36,681	259,286	42,444
1600	36,808	260,453	44,281
1650	36,933	261,587	46,125
1700	37,057	262,692	47,975
1750	37,18	263,768	49,831
1800	37,302	264,817	51,693
1850	37,424	265,841	53,561
1900	37,545	266,84	55,435
1950	37,664	267,817	57,315
2000	37,784	268,772	59,202

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.19 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	37,902	269,707	61,094
2100	38,02	270,621	62,992
2150	38,137	271,517	64,896
2200	38,254	272,395	66,805
2250	38,369	273,256	68,721
2300	38,484	274,101	70,642
2350	38,598	274,93	72,569
2400	38,71	275,744	74,502
2450	38,822	276,543	76,44
2500	38,933	277,328	78,384
2550	39,043	278,1	80,334
2600	39,152	278,86	82,289
2650	39,259	279,606	84,249
2700	39,366	280,341	86,215
2750	39,471	281,065	88,185
2800	39,575	281,777	90,162
2850	39,678	282,478	92,143
2900	39,78	283,169	94,129
2950	39,88	283,85	96,121
3000	39,98	284,521	98,117
3050	40,078	285,183	100,119
3100	40,175	285,835	102,125
3150	40,27	286,479	104,136
3200	40,365	287,114	106,152
3250	40,458	287,74	108,173
3300	40,549	288,359	110,198
3350	40,64	288,969	112,228
3400	40,729	289,572	114,262
3450	40,817	290,167	116,301
3500	40,904	290,755	118,344
3550	40,99	291,336	120,391
3600	41,074	291,91	122,443
3650	41,157	292,477	124,498
3700	41,239	293,037	126,558
3750	41,32	293,591	128,622
3800	41,4	294,139	130,69
3850	41,478	294,681	132,762
3900	41,556	295,217	134,838
3950	41,632	295,746	136,918
4000	41,707	296,271	139,001
4050	41,781	296,789	141,089
4100	41,854	297,302	143,179
4150	41,926	297,81	145,274
4200	41,997	298,313	147,372

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.19 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	42,066	298,81	149,474
4300	42,135	299,302	151,579
4350	42,203	299,79	153,687
4400	42,269	300,273	155,799
4450	42,335	300,751	157,914
4500	42,4	301,224	160,032
4550	42,464	301,693	162,154
4600	42,526	302,157	164,279
4650	42,588	302,617	166,407
4700	42,649	303,073	168,537
4750	42,709	303,525	170,671
4800	42,769	303,972	172,808
4850	42,827	304,416	174,948
4900	42,884	304,855	177,091
4950	42,941	305,291	179,237
5000	42,997	305,723	181,385

A.20 Absolute Stoffwerte für N

Tabelle A.20: Absolute Stoffwerte für N

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	466,483
200	20,786	145,003	470,64
250	20,786	149,641	471,679
273,15	20,786	151,482	472,16
298,15	20,786	153,302	472,68
300	20,786	153,431	472,718
350	20,786	156,635	473,758
400	20,786	159,41	474,797
450	20,786	161,859	475,836
500	20,786	164,049	476,876
550	20,786	166,03	477,915
600	20,786	167,839	478,954
650	20,786	169,502	479,994
700	20,786	171,043	481,033
750	20,786	172,477	482,072
800	20,786	173,818	483,112
850	20,786	175,079	484,151
900	20,786	176,267	485,19
950	20,786	177,391	486,23
1000	20,786	178,457	487,269
1050	20,782	179,471	488,308
1100	20,78	180,438	489,347
1150	20,78	181,361	490,386
1200	20,78	182,246	491,425
1250	20,782	183,094	492,464
1300	20,784	183,909	493,503
1350	20,786	184,693	494,542
1400	20,787	185,449	495,582
1450	20,789	186,179	496,621
1500	20,79	186,884	497,661
1550	20,791	187,565	498,7
1600	20,792	188,226	499,74
1650	20,792	188,865	500,779
1700	20,792	189,486	501,819
1750	20,792	190,089	502,859
1800	20,792	190,674	503,898
1850	20,791	191,244	504,938
1900	20,791	191,799	505,977
1950	20,791	192,339	507,017
2000	20,791	192,865	508,056

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.20 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	20,791	193,378	509,096
2100	20,792	193,879	510,135
2150	20,793	194,369	511,175
2200	20,794	194,847	512,215
2250	20,797	195,314	513,255
2300	20,8	195,771	514,294
2350	20,804	196,219	515,335
2400	20,808	196,657	516,375
2450	20,814	197,086	517,415
2500	20,821	197,506	518,456
2550	20,829	197,919	519,497
2600	20,838	198,323	520,539
2650	20,849	198,72	521,581
2700	20,86	199,11	522,624
2750	20,874	199,493	523,667
2800	20,889	199,869	524,711
2850	20,905	200,239	525,756
2900	20,923	200,603	526,802
2950	20,942	200,961	527,849
3000	20,964	201,313	528,896
3050	20,987	201,659	529,945
3100	21,012	202,001	530,995
3150	21,039	202,337	532,046
3200	21,068	202,669	533,099
3250	21,098	202,996	534,153
3300	21,131	203,318	535,209
3350	21,166	203,636	536,266
3400	21,203	203,95	537,325
3450	21,242	204,26	538,386
3500	21,283	204,566	539,45
3550	21,326	204,868	540,515
3600	21,371	205,166	541,582
3650	21,418	205,462	542,652
3700	21,468	205,753	543,724
3750	21,52	206,042	544,799
3800	21,573	206,327	545,876
3850	21,629	206,61	546,956
3900	21,688	206,889	548,039
3950	21,748	207,166	549,125
4000	21,81	207,44	550,214
4050	21,875	207,711	551,306
4100	21,941	207,98	552,401
4150	22,01	208,246	553,5
4200	22,081	208,51	554,602

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.20 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	22,154	208,772	555,708
4300	22,228	209,031	556,818
4350	22,305	209,289	557,931
4400	22,384	209,544	559,048
4450	22,464	209,798	560,17
4500	22,547	210,049	561,295
4550	22,631	210,299	562,424
4600	22,717	210,546	563,558
4650	22,804	210,793	564,696
4700	22,893	211,037	565,838
4750	22,984	211,28	566,985
4800	23,076	211,521	568,137
4850	23,17	211,76	569,293
4900	23,265	211,999	570,454
4950	23,361	212,235	571,62
5000	23,459	212,471	572,79

A.21 Absolute Stoffwerte für NO

Tabelle A.21: Absolute Stoffwerte für NO

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	82,092
200	30,444	198,724	88,318
250	30,059	205,473	89,829
273,15	29,942	208,13	90,524
298,15	29,862	210,748	91,271
300	29,858	210,933	91,327
350	29,835	215,532	92,818
400	29,957	219,522	94,312
450	30,187	223,063	95,816
500	30,494	226,259	97,332
550	30,853	229,182	98,866
600	31,24	231,883	100,418
650	31,638	234,399	101,99
700	32,032	236,758	103,582
750	32,413	238,981	105,193
800	32,774	241,084	106,823
850	33,11	243,082	108,47
900	33,423	244,983	110,133
950	33,714	246,798	111,812
1000	33,991	248,534	113,505
1050	34,244	250,199	115,211
1100	34,476	251,798	116,929
1150	34,689	253,335	118,658
1200	34,886	254,815	120,397
1250	35,067	256,243	122,146
1300	35,234	257,622	123,904
1350	35,389	258,955	125,669
1400	35,533	260,244	127,443
1450	35,666	261,493	129,223
1500	35,79	262,705	131,009
1550	35,906	263,88	132,801
1600	36,014	265,022	134,599
1650	36,116	266,132	136,403
1700	36,21	267,211	138,211
1750	36,3	268,262	140,024
1800	36,383	269,286	141,841
1850	36,462	270,284	143,662
1900	36,537	271,257	145,487
1950	36,607	272,207	147,316
2000	36,674	273,135	149,148

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.21 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	36,737	274,041	150,983
2100	36,797	274,927	152,821
2150	36,854	275,794	154,663
2200	36,909	276,642	156,507
2250	36,961	277,472	158,353
2300	37,01	278,285	160,203
2350	37,058	279,081	162,054
2400	37,104	279,862	163,908
2450	37,147	280,627	165,765
2500	37,189	281,378	167,623
2550	37,23	282,115	169,484
2600	37,269	282,838	171,346
2650	37,307	283,549	173,211
2700	37,343	284,246	175,077
2750	37,378	284,932	176,945
2800	37,413	285,606	178,815
2850	37,446	286,268	180,686
2900	37,478	286,92	182,559
2950	37,51	287,561	184,434
3000	37,54	288,191	186,31
3050	37,57	288,812	188,188
3100	37,6	289,423	190,067
3150	37,628	290,025	191,948
3200	37,656	290,618	193,83
3250	37,684	291,202	195,713
3300	37,711	291,777	197,598
3350	37,738	292,345	199,485
3400	37,764	292,904	201,372
3450	37,79	293,456	203,261
3500	37,816	293,999	205,151
3550	37,841	294,536	207,043
3600	37,866	295,065	208,935
3650	37,891	295,588	210,829
3700	37,916	296,104	212,724
3750	37,941	296,613	214,621
3800	37,965	297,115	216,518
3850	37,99	297,612	218,417
3900	38,014	298,102	220,317
3950	38,039	298,587	222,219
4000	38,063	299,065	224,121
4050	38,088	299,538	226,025
4100	38,112	300,006	227,93
4150	38,137	300,468	229,836
4200	38,162	300,925	231,744

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.21 – Fortsetzung von vorheriger Seite			
T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	38,187	301,377	233,652
4300	38,212	301,823	235,562
4350	38,238	302,265	237,474
4400	38,263	302,702	239,386
4450	38,29	303,135	241,3
4500	38,316	303,563	243,215
4550	38,343	303,986	245,132
4600	38,37	304,406	247,049
4650	38,398	304,821	248,969
4700	38,426	305,231	250,889
4750	38,455	305,638	252,811
4800	38,484	306,041	254,735
4850	38,514	306,44	256,66
4900	38,544	306,835	258,586
4950	38,575	307,227	260,514
5000	38,607	307,614	262,444

A.22 Absolute Stoffwerte für NO₂Tabelle A.22: Absolute Stoffwerte für NO₂

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	23,985
200	34,485	225,928	30,683
250	35,75	233,755	32,438
273,15	36,413	236,949	33,273
298,15	37,177	240,171	34,193
300	37,235	240,401	34,262
350	38,858	246,262	36,164
400	40,514	251,559	38,148
450	42,13	256,425	40,215
500	43,659	260,943	42,36
550	45,077	265,172	44,579
600	46,374	269,151	46,865
650	47,548	272,91	49,214
700	48,603	276,473	51,618
750	49,548	279,859	54,072
800	50,392	283,084	56,571
850	51,147	286,162	59,11
900	51,823	289,105	61,685
950	52,432	291,924	64,291
1000	52,982	294,627	66,927
1050	53,476	297,224	69,588
1100	53,924	299,723	72,274
1150	54,332	302,129	74,98
1200	54,703	304,449	77,706
1250	55,043	306,689	80,45
1300	55,355	308,854	83,21
1350	55,642	310,949	85,985
1400	55,907	312,977	88,774
1450	56,153	314,943	91,576
1500	56,383	316,851	94,389
1550	56,597	318,703	97,214
1600	56,8	320,503	100,049
1650	56,991	322,254	102,893
1700	57,172	323,958	105,747
1750	57,345	325,618	108,61
1800	57,512	327,236	111,482
1850	57,672	328,814	114,361
1900	57,827	330,354	117,249
1950	57,979	331,858	120,144
2000	58,126	333,328	123,047

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.22 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	58,271	334,765	125,957
2100	58,414	336,171	128,874
2150	58,556	337,547	131,798
2200	58,696	338,895	134,729
2250	58,835	340,215	137,668
2300	58,974	341,51	140,613
2350	59,113	342,78	143,565
2400	59,252	344,026	146,524
2450	59,391	345,249	149,49
2500	59,531	346,45	152,463
2550	59,672	347,63	155,443
2600	59,814	348,79	158,431
2650	59,956	349,931	161,425
2700	60,1	351,053	164,426
2750	60,245	352,157	167,435
2800	60,392	353,244	170,451
2850	60,54	354,314	173,474
2900	60,689	355,369	176,505
2950	60,839	356,407	179,543
3000	60,991	357,431	182,589
3050	61,145	358,44	185,642
3100	61,3	359,436	188,703
3150	61,456	360,418	191,772
3200	61,614	361,387	194,849
3250	61,773	362,344	197,933
3300	61,933	363,288	201,026
3350	62,094	364,22	204,127
3400	62,257	365,142	207,236
3450	62,421	366,052	210,353
3500	62,586	366,951	213,478
3550	62,752	367,84	216,611
3600	62,919	368,719	219,753
3650	63,087	369,588	222,903
3700	63,256	370,447	226,062
3750	63,426	371,297	229,229
3800	63,596	372,139	232,404
3850	63,767	372,971	235,588
3900	63,939	373,795	238,781
3950	64,111	374,611	241,982
4000	64,283	375,418	245,192
4050	64,456	376,218	248,41
4100	64,63	377,01	251,638
4150	64,803	377,794	254,873
4200	64,977	378,571	258,118

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.22 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	65,151	379,341	261,371
4300	65,325	380,104	264,633
4350	65,499	380,861	267,904
4400	65,673	381,61	271,183
4450	65,847	382,353	274,471
4500	66,021	383,09	277,768
4550	66,194	383,82	281,073
4600	66,367	384,545	284,387
4650	66,54	385,263	287,71
4700	66,713	385,976	291,041
4750	66,885	386,683	294,381
4800	67,057	387,384	297,73
4850	67,228	388,08	301,087
4900	67,399	388,77	304,452
4950	67,569	389,455	307,827
5000	67,738	390,135	311,209

A.23 Absolute Stoffwerte für N₂Tabelle A.23: Absolute Stoffwerte für N₂

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-8,67
200	29,107	179,986	-2,857
250	29,11	186,481	-1,402
273,15	29,116	189,06	-0,728
298,15	29,124	191,61	0
300	29,125	191,79	0,054
350	29,165	196,282	1,511
400	29,249	200,181	2,971
450	29,388	203,634	4,437
500	29,582	206,74	5,911
550	29,826	209,57	7,396
600	30,109	212,177	8,894
650	30,422	214,6	10,407
700	30,754	216,866	11,937
750	31,094	218,999	13,483
800	31,434	221,017	15,046
850	31,768	222,933	16,626
900	32,09	224,758	18,223
950	32,4	226,501	19,835
1000	32,696	228,171	21,462
1050	32,977	229,773	23,104
1100	33,242	231,313	24,76
1150	33,491	232,796	26,428
1200	33,724	234,227	28,109
1250	33,943	235,608	29,8
1300	34,147	236,943	31,503
1350	34,339	238,235	33,215
1400	34,518	239,488	34,936
1450	34,685	240,702	36,666
1500	34,842	241,88	38,405
1550	34,989	243,025	40,15
1600	35,127	244,138	41,903
1650	35,256	245,221	43,663
1700	35,377	246,275	45,429
1750	35,491	247,303	47,201
1800	35,599	248,304	48,978
1850	35,7	249,281	50,76
1900	35,795	250,234	52,548
1950	35,885	251,165	54,34
2000	35,97	252,075	56,136

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.23 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	36,051	252,964	57,937
2100	36,127	253,833	59,741
2150	36,199	254,684	61,549
2200	36,267	255,517	63,361
2250	36,333	256,333	65,176
2300	36,395	257,132	66,994
2350	36,454	257,916	68,815
2400	36,51	258,684	70,639
2450	36,564	259,437	72,466
2500	36,615	260,176	74,296
2550	36,664	260,902	76,128
2600	36,711	261,614	77,962
2650	36,756	262,314	79,799
2700	36,8	263,002	81,638
2750	36,841	263,677	83,479
2800	36,881	264,341	85,322
2850	36,92	264,994	87,167
2900	36,957	265,637	89,014
2950	36,993	266,269	90,862
3000	37,027	266,891	92,713
3050	37,061	267,503	94,565
3100	37,093	268,106	96,419
3150	37,124	268,7	98,274
3200	37,155	269,285	100,131
3250	37,184	269,861	101,99
3300	37,213	270,429	103,85
3350	37,241	270,989	105,711
3400	37,268	271,541	107,574
3450	37,294	272,085	109,438
3500	37,32	272,622	111,303
3550	37,345	273,151	113,17
3600	37,37	273,674	115,038
3650	37,394	274,189	116,907
3700	37,417	274,698	118,777
3750	37,44	275,201	120,649
3800	37,462	275,697	122,521
3850	37,484	276,187	124,395
3900	37,506	276,671	126,27
3950	37,527	277,148	128,145
4000	37,548	277,621	130,022
4050	37,569	278,087	131,9
4100	37,589	278,548	133,779
4150	37,609	279,004	135,659
4200	37,629	279,455	137,54

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.23 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	37,648	279,9	139,422
4300	37,667	280,34	141,305
4350	37,687	280,776	143,189
4400	37,706	281,207	145,074
4450	37,724	281,633	146,959
4500	37,743	282,055	148,846
4550	37,762	282,472	150,734
4600	37,781	282,885	152,622
4650	37,799	283,293	154,512
4700	37,818	283,698	156,402
4750	37,837	284,098	158,293
4800	37,856	284,494	160,186
4850	37,874	284,886	162,079
4900	37,893	285,275	163,973
4950	37,913	285,66	165,868
5000	37,932	286,041	167,764

A.24 Absolute Stoffwerte für S

Tabelle A.24: Absolute Stoffwerte für S

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	270,513
200	23,388	158,392	274,849
250	23,71	163,656	276,028
273,15	23,719	165,756	276,577
298,15	23,674	167,832	277,17
300	23,669	167,978	277,214
350	23,477	171,614	278,393
400	23,232	174,733	279,561
450	22,98	177,455	280,716
500	22,742	179,863	281,859
550	22,527	182,021	282,99
600	22,338	183,972	284,112
650	22,173	185,754	285,225
700	22,031	187,392	286,33
750	21,908	188,907	287,428
800	21,801	190,318	288,521
850	21,707	191,636	289,608
900	21,624	192,875	290,692
950	21,551	194,042	291,771
1000	21,49	195,146	292,847
1050	21,443	196,193	293,92
1100	21,398	197,19	294,991
1150	21,355	198,14	296,06
1200	21,316	199,048	297,127
1250	21,281	199,917	298,192
1300	21,251	200,751	299,255
1350	21,226	201,553	300,317
1400	21,205	202,324	301,378
1450	21,19	203,068	302,438
1500	21,179	203,786	303,497
1550	21,172	204,481	304,555
1600	21,17	205,153	305,614
1650	21,172	205,804	306,673
1700	21,178	206,436	307,731
1750	21,187	207,05	308,79
1800	21,2	207,647	309,85
1850	21,215	208,229	310,91
1900	21,234	208,795	311,972
1950	21,255	209,346	313,034
2000	21,278	209,885	314,097

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.24 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	21,304	210,411	315,162
2100	21,332	210,924	316,228
2150	21,361	211,427	317,295
2200	21,392	211,918	318,364
2250	21,425	212,399	319,434
2300	21,458	212,87	320,506
2350	21,493	213,332	321,58
2400	21,529	213,785	322,656
2450	21,566	214,229	323,733
2500	21,604	214,665	324,812
2550	21,642	215,094	325,893
2600	21,68	215,514	326,976
2650	21,72	215,928	328,061
2700	21,759	216,334	329,148
2750	21,799	216,734	330,237
2800	21,838	217,127	331,328
2850	21,878	217,514	332,421
2900	21,918	217,894	333,516
2950	21,958	218,269	334,613
3000	21,997	218,639	335,712
3050	22,036	219,003	336,813
3100	22,075	219,361	337,915
3150	22,114	219,715	339,02
3200	22,152	220,063	340,127
3250	22,19	220,407	341,235
3300	22,227	220,746	342,346
3350	22,264	221,081	343,458
3400	22,3	221,411	344,572
3450	22,336	221,737	345,688
3500	22,371	222,058	346,806
3550	22,405	222,376	347,925
3600	22,439	222,689	349,046
3650	22,472	222,999	350,169
3700	22,504	223,305	351,293
3750	22,536	223,607	352,419
3800	22,567	223,906	353,547
3850	22,597	224,201	354,676
3900	22,626	224,493	355,807
3950	22,654	224,782	356,939
4000	22,682	225,067	358,072
4050	22,709	225,349	359,207
4100	22,735	225,627	360,343
4150	22,76	225,903	361,48
4200	22,785	226,176	362,619

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.24 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	22,809	226,446	363,759
4300	22,832	226,713	364,9
4350	22,854	226,977	366,042
4400	22,875	227,238	367,185
4450	22,896	227,497	368,329
4500	22,916	227,752	369,475
4550	22,935	228,006	370,621
4600	22,954	228,257	371,768
4650	22,972	228,505	372,916
4700	22,989	228,751	374,065
4750	23,006	228,994	375,215
4800	23,022	229,235	376,366
4850	23,037	229,474	377,517
4900	23,052	229,71	378,67
4950	23,066	229,944	379,823
5000	23,08	230,176	380,976

A.25 Absolute Stoffwerte für SO

Tabelle A.25: Absolute Stoffwerte für SO

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-4,038
200	29,28	210,111	1,849
250	29,633	216,678	3,321
273,15	29,876	219,312	4,01
298,15	30,176	221,941	4,76
300	30,2	222,128	4,816
350	30,87	226,833	6,343
400	31,56	231	7,903
450	32,22	234,756	9,498
500	32,826	238,183	11,125
550	33,367	241,337	12,78
600	33,842	244,261	14,46
650	34,257	246,987	16,163
700	34,618	249,539	17,885
750	34,934	251,939	19,624
800	35,213	254,202	21,378
850	35,461	256,345	23,145
900	35,685	258,378	24,923
950	35,886	260,313	26,713
1000	36,066	262,158	28,512
1050	36,246	263,922	30,32
1100	36,406	265,612	32,136
1150	36,555	267,234	33,96
1200	36,695	268,793	35,791
1250	36,83	270,293	37,629
1300	36,962	271,74	39,474
1350	37,092	273,138	41,326
1400	37,222	274,489	43,183
1450	37,352	275,798	45,048
1500	37,481	277,066	46,919
1550	37,611	278,297	48,796
1600	37,741	279,493	50,68
1650	37,871	280,657	52,57
1700	38,001	281,789	54,467
1750	38,131	282,893	56,37
1800	38,26	283,969	58,28
1850	38,389	285,019	60,196
1900	38,517	286,044	62,119
1950	38,643	287,046	64,048
2000	38,769	288,026	65,983

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.25 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	38,893	288,985	67,925
2100	39,015	289,924	69,872
2150	39,135	290,843	71,826
2200	39,254	291,744	73,786
2250	39,371	292,628	75,751
2300	39,485	293,494	77,723
2350	39,598	294,345	79,7
2400	39,708	295,179	81,683
2450	39,816	295,999	83,671
2500	39,921	296,805	85,664
2550	40,025	297,596	87,663
2600	40,125	298,375	89,667
2650	40,224	299,14	91,675
2700	40,32	299,893	93,689
2750	40,414	300,633	95,707
2800	40,505	301,362	97,73
2850	40,594	302,08	99,758
2900	40,681	302,787	101,79
2950	40,766	303,483	103,826
3000	40,848	304,169	105,866
3050	40,929	304,845	107,911
3100	41,007	305,511	109,959
3150	41,083	306,168	112,011
3200	41,157	306,815	114,067
3250	41,23	307,454	116,127
3300	41,3	308,084	118,19
3350	41,369	308,705	120,257
3400	41,436	309,319	122,327
3450	41,502	309,924	124,401
3500	41,566	310,522	126,477
3550	41,629	311,112	128,557
3600	41,69	311,695	130,64
3650	41,75	312,27	132,726
3700	41,808	312,838	134,815
3750	41,866	313,4	136,907
3800	41,922	313,955	139,002
3850	41,978	314,503	141,099
3900	42,032	315,045	143,199
3950	42,086	315,581	145,302
4000	42,139	316,111	147,408
4050	42,191	316,635	149,516
4100	42,243	317,153	151,627
4150	42,293	317,665	153,741
4200	42,344	318,172	155,857

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.25 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	42,394	318,673	157,975
4300	42,443	319,169	160,096
4350	42,493	319,66	162,219
4400	42,542	320,146	164,345
4450	42,59	320,627	166,473
4500	42,639	321,103	168,604
4550	42,687	321,575	170,737
4600	42,736	322,041	172,873
4650	42,784	322,504	175,011
4700	42,832	322,962	177,151
4750	42,88	323,415	179,294
4800	42,929	323,864	181,439
4850	42,977	324,309	183,587
4900	43,026	324,751	185,737
4950	43,074	325,188	187,89
5000	43,123	325,621	190,044

A.26 Absolute Stoffwerte für SO₂Tabelle A.26: Absolute Stoffwerte für SO₂

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-307,358
200	36,38	233,058	-300,549
250	38,115	241,361	-298,687
273,15	38,94	244,773	-297,795
298,15	39,842	248,222	-296,81
300	39,909	248,468	-296,736
350	41,707	254,756	-294,696
400	43,432	260,439	-292,567
450	45,035	265,649	-290,354
500	46,489	270,47	-288,066
550	47,789	274,963	-285,708
600	48,938	279,172	-283,289
650	49,948	283,13	-280,817
700	50,831	286,864	-278,297
750	51,604	290,398	-275,735
800	52,282	293,751	-273,138
850	52,879	296,939	-270,508
900	53,407	299,976	-267,851
950	53,876	302,877	-265,169
1000	54,291	305,651	-262,464
1050	54,663	308,309	-259,74
1100	54,996	310,86	-256,999
1150	55,295	313,311	-254,241
1200	55,565	315,67	-251,47
1250	55,81	317,944	-248,685
1300	56,033	320,137	-245,889
1350	56,237	322,255	-243,082
1400	56,425	324,304	-240,266
1450	56,598	326,287	-237,44
1500	56,758	328,209	-234,606
1550	56,906	330,072	-231,764
1600	57,044	331,881	-228,916
1650	57,174	333,638	-226,06
1700	57,295	335,347	-223,198
1750	57,409	337,01	-220,331
1800	57,516	338,628	-217,458
1850	57,617	340,206	-214,579
1900	57,714	341,743	-211,696
1950	57,805	343,244	-208,808
2000	57,892	344,708	-205,916

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.26 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	57,975	346,139	-203,019
2100	58,055	347,537	-200,118
2150	58,131	348,904	-197,213
2200	58,205	350,241	-194,305
2250	58,276	351,55	-191,393
2300	58,345	352,832	-188,477
2350	58,411	354,087	-185,559
2400	58,476	355,317	-182,636
2450	58,538	356,524	-179,711
2500	58,6	357,707	-176,783
2550	58,659	358,868	-173,851
2600	58,718	360,008	-170,917
2650	58,775	361,127	-167,979
2700	58,831	362,226	-165,039
2750	58,886	363,306	-162,096
2800	58,94	364,367	-159,151
2850	58,994	365,411	-156,202
2900	59,047	366,438	-153,251
2950	59,099	367,447	-150,298
3000	59,151	368,441	-147,341
3050	59,202	369,419	-144,382
3100	59,253	370,382	-141,421
3150	59,303	371,331	-138,457
3200	59,353	372,265	-135,491
3250	59,403	373,186	-132,522
3300	59,453	374,093	-129,551
3350	59,502	374,987	-126,577
3400	59,551	375,869	-123,6
3450	59,601	376,739	-120,621
3500	59,65	377,597	-117,64
3550	59,699	378,443	-114,657
3600	59,748	379,279	-111,67
3650	59,797	380,103	-108,682
3700	59,846	380,917	-105,691
3750	59,896	381,721	-102,697
3800	59,945	382,514	-99,701
3850	59,995	383,298	-96,703
3900	60,044	384,073	-93,702
3950	60,094	384,838	-90,698
4000	60,144	385,594	-87,692
4050	60,194	386,342	-84,684
4100	60,245	387,081	-81,673
4150	60,295	387,811	-78,659
4200	60,346	388,534	-75,643

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.26 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	60,397	389,248	-72,625
4300	60,449	389,955	-69,603
4350	60,501	390,654	-66,58
4400	60,553	391,346	-63,553
4450	60,605	392,03	-60,524
4500	60,658	392,708	-57,493
4550	60,711	393,378	-54,459
4600	60,765	394,042	-51,422
4650	60,818	394,699	-48,382
4700	60,873	395,35	-45,34
4750	60,927	395,994	-42,295
4800	60,982	396,633	-39,247
4850	61,038	397,265	-36,197
4900	61,094	397,891	-33,143
4950	61,15	398,512	-30,087
5000	61,207	399,127	-27,028

A.27 Absolute Stoffwerte für S₂Tabelle A.27: Absolute Stoffwerte für S₂

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	119,468
200	30,463	215,62	125,509
250	31,52	222,529	127,058
273,15	32,009	225,341	127,793
298,15	32,505	228,166	128,6
300	32,541	228,368	128,66
350	33,404	233,451	130,309
400	34,107	237,959	131,998
450	34,675	242,01	133,718
500	35,133	245,688	135,464
550	35,507	249,055	137,23
600	35,816	252,158	139,013
650	36,078	255,035	140,811
700	36,305	257,717	142,62
750	36,509	260,229	144,441
800	36,697	262,591	146,271
850	36,875	264,822	148,11
900	37,046	266,934	149,958
950	37,214	268,942	151,815
1000	37,377	270,855	153,68
1050	37,532	272,682	155,552
1100	37,692	274,432	157,433
1150	37,856	276,111	159,322
1200	38,022	277,725	161,219
1250	38,187	279,281	163,124
1300	38,352	280,782	165,037
1350	38,515	282,232	166,959
1400	38,675	283,636	168,889
1450	38,832	284,996	170,826
1500	38,985	286,315	172,772
1550	39,134	287,596	174,725
1600	39,279	288,84	176,685
1650	39,42	290,051	178,653
1700	39,555	291,23	180,627
1750	39,686	292,379	182,608
1800	39,813	293,498	184,596
1850	39,934	294,591	186,589
1900	40,051	295,657	188,589
1950	40,163	296,699	190,594
2000	40,271	297,717	192,605

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.27 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	40,374	298,713	194,621
2100	40,473	299,687	196,643
2150	40,567	300,641	198,669
2200	40,658	301,574	200,699
2250	40,744	302,489	202,734
2300	40,827	303,385	204,774
2350	40,907	304,264	206,817
2400	40,982	305,126	208,864
2450	41,055	305,972	210,915
2500	41,125	306,802	212,97
2550	41,191	307,617	215,028
2600	41,255	308,418	217,089
2650	41,317	309,204	219,153
2700	41,376	309,977	221,22
2750	41,433	310,737	223,291
2800	41,487	311,484	225,364
2850	41,541	312,219	227,439
2900	41,592	312,941	229,518
2950	41,642	313,653	231,598
3000	41,691	314,353	233,682
3050	41,738	315,043	235,768
3100	41,785	315,722	237,856
3150	41,83	316,391	239,946
3200	41,875	317,05	242,039
3250	41,92	317,699	244,134
3300	41,964	318,34	246,231
3350	42,008	318,971	248,33
3400	42,051	319,594	250,431
3450	42,095	320,208	252,535
3500	42,139	320,814	254,641
3550	42,182	321,412	256,749
3600	42,227	322,002	258,859
3650	42,271	322,585	260,972
3700	42,317	323,161	263,086
3750	42,362	323,729	265,203
3800	42,409	324,29	267,322
3850	42,456	324,845	269,444
3900	42,504	325,393	271,568
3950	42,553	325,935	273,695
4000	42,603	326,47	275,823
4050	42,654	327	277,955
4100	42,707	327,524	280,089
4150	42,76	328,042	282,226
4200	42,814	328,554	284,365

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.27 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	42,87	329,061	286,507
4300	42,927	329,563	288,652
4350	42,985	330,059	290,8
4400	43,044	330,551	292,95
4450	43,105	331,038	295,104
4500	43,167	331,52	297,261
4550	43,23	331,997	299,421
4600	43,294	332,47	301,584
4650	43,36	332,938	303,75
4700	43,426	333,402	305,92
4750	43,494	333,862	308,093
4800	43,563	334,318	310,269
4850	43,633	334,77	312,449
4900	43,704	335,218	314,633
4950	43,776	335,662	316,82
5000	43,849	336,102	319,01

A.28 Absolute Stoffwerte für Luft

Tabelle A.28: Absolute Stoffwerte für Luft

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
0	0	0	-8,775
200	29,034	187,221	-2,978
250	29,055	193,701	-1,526
273,15	29,073	196,275	-0,853
298,15	29,102	198,822	-0,126
300	29,105	199,002	-0,072
350	29,202	203,496	1,386
400	29,355	207,404	2,849
450	29,563	210,873	4,322
500	29,821	214,001	5,807
550	30,117	216,857	7,305
600	30,442	219,491	8,819
650	30,785	221,941	10,349
700	31,135	224,235	11,897
750	31,484	226,395	13,463
800	31,825	228,438	15,046
850	32,153	230,378	16,645
900	32,467	232,224	18,261
950	32,765	233,988	19,892
1000	33,05	235,676	21,537
1050	33,32	237,295	23,196
1100	33,571	238,851	24,869
1150	33,805	240,348	26,553
1200	34,023	241,792	28,249
1250	34,227	243,185	29,955
1300	34,419	244,531	31,671
1350	34,598	245,833	33,397
1400	34,767	247,095	35,131
1450	34,926	248,317	36,873
1500	35,076	249,504	38,623
1550	35,218	250,657	40,381
1600	35,352	251,777	42,145
1650	35,479	252,867	43,916
1700	35,6	253,928	45,693
1750	35,715	254,961	47,476
1800	35,825	255,969	49,264
1850	35,929	256,952	51,058
1900	36,029	257,911	52,857
1950	36,124	258,848	54,661
2000	36,216	259,764	56,47

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.28 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
2050	36,303	260,66	58,283
2100	36,387	261,535	60,1
2150	36,468	262,393	61,921
2200	36,546	263,232	63,747
2250	36,621	264,054	65,576
2300	36,694	264,86	67,409
2350	36,764	265,65	69,245
2400	36,831	266,424	71,085
2450	36,897	267,184	72,928
2500	36,96	267,931	74,775
2550	37,022	268,663	76,624
2600	37,081	269,382	78,477
2650	37,139	270,089	80,332
2700	37,195	270,784	82,191
2750	37,25	271,467	84,052
2800	37,303	272,139	85,916
2850	37,354	272,799	87,782
2900	37,405	273,45	89,651
2950	37,454	274,089	91,523
3000	37,502	274,719	93,396
3050	37,548	275,34	95,273
3100	37,594	275,95	97,151
3150	37,638	276,552	99,032
3200	37,682	277,145	100,915
3250	37,725	277,73	102,8
3300	37,766	278,306	104,688
3350	37,807	278,875	106,577
3400	37,847	279,435	108,468
3450	37,886	279,988	110,362
3500	37,924	280,533	112,257
3550	37,962	281,071	114,154
3600	37,998	281,603	116,053
3650	38,035	282,127	117,954
3700	38,07	282,645	119,856
3750	38,105	283,156	121,761
3800	38,139	283,661	123,667
3850	38,173	284,16	125,575
3900	38,206	284,652	127,484
3950	38,238	285,139	129,395
4000	38,27	285,62	131,308
4050	38,302	286,096	133,222
4100	38,333	286,566	135,138
4150	38,364	287,031	137,056
4200	38,394	287,491	138,974

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

Tabelle A.28 – Fortsetzung von vorheriger Seite

T in K	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	s_m in $\frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$	h_m in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
4250	38,424	287,945	140,895
4300	38,453	288,395	142,817
4350	38,483	288,84	144,74
4400	38,511	289,28	146,665
4450	38,54	289,715	148,591
4500	38,568	290,146	150,519
4550	38,596	290,572	152,448
4600	38,624	290,994	154,379
4650	38,652	291,412	156,311
4700	38,679	291,825	158,244
4750	38,706	292,235	160,179
4800	38,733	292,64	162,114
4850	38,76	293,042	164,052
4900	38,787	293,439	165,991
4950	38,814	293,833	167,931
5000	38,841	294,223	169,872

A.29 Aufgabe 3 Technische Thermodynamik II Wintersemester 2017/18

Aufgabe 3)

(25 Punkte)

Methanol (CH_3OH) wird in einem adiabaten Verbrennungsprozess stöchiometrisch mit trockener Luft verbrannt, siehe Abbildung 3 (links). Der zugeführte Massenstrom des Methanols beträgt $\dot{m}_B = 2,0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$.

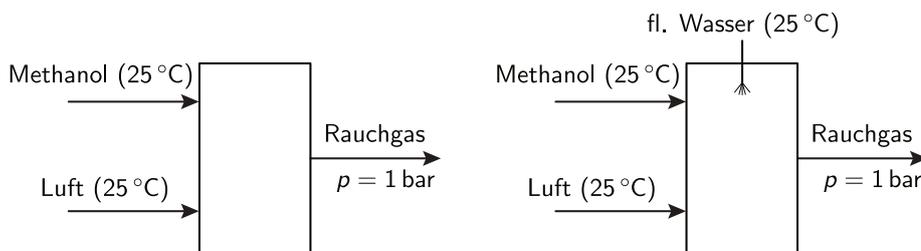


Abbildung 3: links: ohne Wassereindüsung, rechts: mit Wassereindüsung

Gegebene Größen:

- Heizwert Methanol $H_U(\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}) = 19,9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$
 - spezifische Wärmekapazität Methanol: $c_B = 2470 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
 - Massenteile trockener Luft: $\xi_{\text{O}_2, \text{tr. Luft}} = 0,23$, $\xi_{\text{N}_2, \text{tr. Luft}} = 0,77$
 - Umgebung: $\vartheta_U = 25^\circ\text{C}$, $p = 1 \text{ bar}$
 - Wasserdampf darf als ideales Gas und fl. Wasser als inkompressibel behandelt werden
 - Kinetische und potentielle Energien sind zu vernachlässigen
- a) Führen Sie eine Elementaranalyse des Brennstoffs durch, d.h. ermitteln Sie die Massenanteile c , h , o .
 - b) Berechnen Sie den Mindestsauerstoffbedarf o_{min} und den Luftbedarf l für den verwendeten Brennstoff!
 - c) Berechnen Sie die Rauchgaskonzentrationen $\xi_{\text{RG}, i}$ des Abgases!
 - d) Welche adiabate Verbrennungstemperatur stellt sich ein? Gehen Sie davon aus, dass die spezifische Wärmekapazität des Abgases für diesen Fall $\overline{c_{p, \text{RG}}}|_{\vartheta_0}^{\vartheta_{\text{ad}}} = 1383,2 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ beträgt.

Um die adiabate Verbrennungstemperatur zu reduzieren, wird die Brennkammer umgebaut und eine Wassereindüsung installiert, siehe Abbildung 3 (rechts). Es wird nun $\dot{m}_W = 0,8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ flüssiges Wasser (25°C) während der Verbrennung eingedüst. Der Gesamtdruck im Rauchgas beträgt weiter 1 bar, die Kammer ist nach wie vor adiabatisch.

- e) Welche neue adiabate Verbrennungstemperatur stellt sich ein? Gehen Sie davon aus, dass die spezifische Wärmekapazität des Abgases mit der Zusammensetzung aus c) für diesen Fall $\overline{c_{p, \text{RG}}}|_{\vartheta_0}^{\vartheta_{\text{ad}}} = 1361,5 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ beträgt. Überlegen Sie sich davon ausgehend ein geeignetes Ersatzmodell, das die Wassereindüsung energetisch berücksichtigt.

Es gilt: $c_{p, l} = 1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$, $c_{p, d} = 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$, $c_{p, f} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$, $\Delta h_{v, 0} = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

A.30 Aufgabe 3 Technische Thermodynamik II Wintersemester 2014/15

Aufgabe 3)

(8,10,7,10,1 Punkte)

In einer Brennkammer wird Methan (CH_4) mit atmosphärischer, trockener Luft (Zusammensetzung der trockenen Luft: $\xi_{\text{O}_2, \text{Luft}} = 0,23$, $\xi_{\text{N}_2, \text{Luft}} = 0,77$ bzw. $x_{\text{O}_2, \text{Luft}} = 0,2072$, $x_{\text{N}_2, \text{Luft}} = 0,7928$) überstöchiometrisch ($\lambda = 1,1$) verbrannt.

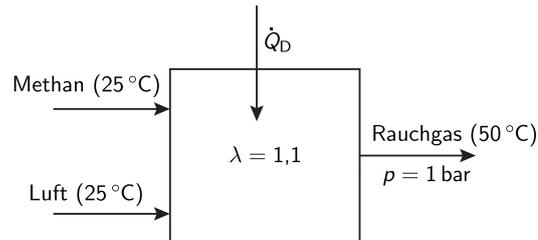


Abbildung 2: Darstellung des Verbrennungsprozesses

Brennstoff:

- $\dot{m}_B = \dot{m}_{\text{CH}_4} = 10 \frac{\text{g}}{\text{s}}$
- $\vartheta_B = \vartheta_0 = 25 \text{ °C}$
- $H_U(\vartheta_0) = 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$

Luft:

- $\vartheta_L = \vartheta_0 = 25 \text{ °C}$
- Wassergehalt $x = 0 \frac{\text{kg}_W}{\text{kg}_{\text{tr.L.}}}$
- $p = 1 \text{ bar}$

Rauchgas:

- $\vartheta_{\text{RG}} = 50 \text{ °C}$
- $p = 1 \text{ bar}$
- $p_{s, \text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{RG}}) = 0,1235 \text{ bar}$

- Welcher Luftbedarf l in $\frac{\text{kg}_{\text{tr.L.}}}{\text{kg}_B}$ ist für die beschriebene Verbrennung erforderlich? Wie groß ist der erforderliche Massenstrom \dot{m}_l der Luft? (**Notfallwert** für die weiteren Berechnungen: $\dot{m}_l = 190 \frac{\text{g}}{\text{s}}$)
- Berechnen Sie die Zusammensetzung des entstehenden Rauchgases in Stoffmengenanteilen $x_{\text{RG}, i}$.
- Welcher Massenstrom \dot{m}_K des bei der Verbrennung entstehenden Wassers liegt in flüssiger Form vor? Berechnen Sie dazu zunächst, welchen Stoffmengenstrom Wasserdampf das Rauchgas aufnehmen kann! (**Notfallwert** für die weiteren Berechnungen: $\dot{m}_K = 6,4 \frac{\text{g}}{\text{s}}$)
- Welcher Wärmestrom \dot{Q}_D wird bei dem beschriebenen Verbrennungsprozess der Brennkammer insgesamt entnommen? Die Verdampfungsenthalpie von Wasser beträgt $\Delta h_v(\vartheta_{\text{RG}}) = 2382 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$. Für das Rauchgas können Sie mit einer mittleren spezifischen Wärmekapazität von $\bar{c}_p|_{25 \text{ °C}}^{50 \text{ °C}} = 1,105 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ rechnen.
- Wie groß ist der Wirkungsgrad $\eta = \frac{|\dot{Q}_D|}{\dot{m}_B H_U}$?

Für die molaren Massen der Elemente gilt: $M_C = 12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, $M_H = 1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, $M_O = 16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, $M_N = 14 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

A.31 Persönliche Mitteilung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmeyer

Laack, Moritz

Von: Laack, Moritz
Gesendet: Sonntag, 15. Juli 2018 19:56
An: Sattelmeyer, Thomas
Betreff: AW: Verbrennung: Stoffströme und adiabate Flammentemperatur

Sehr geehrter Herr Prof. Dr.-Ing. Sattelmeyer,

ich danke Ihnen für die näheren Angaben zur der Thematik des sich einstellenden Gleichgewichtszustand bei der Verbrennungsreaktion. Auf Grundlage Ihrer Ausführungen konnte ich weiterführende Literatur finden, die mir bei meiner Bachelorarbeit zum Thema „Anwendung des Prinzips der absoluten Enthalpien und Entropien zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen“ sehr weiterhilft.

Nochmals vielen Dank, dass Sie sich die Zeit genommen, um meine Fragen zu beantworten.

Mit freundlichen Grüßen

Moritz Laack

Von: Sattelmeyer, Thomas <sattelmayer@td.mw.tum.de>
Gesendet: Donnerstag, 12. Juli 2018 13:17
An: Laack, Moritz <moritz.laack@haw-hamburg.de>
Betreff: Re: Verbrennung: Stoffströme und adiabate Flammentemperatur

Sehr geehrter Herr Laack,

welche Spezies in welchen Konzentrationen jeweils in den Verbrennungsprodukten auftreten, wird unabhängig von der erreichten Temperatur immer vom thermodynamischen Gleichgewicht bestimmt. Wenn die chemische Zusammensetzung der Reaktanden bekannt ist, lassen sich die Konzentrationen aller Spezies berechnen. Um bei Bedarf den Gleichgewichtszustand zu berechnen, nutzt man zum Beispiel Cantera oder Chemkin oder ...

Im Bereich $T < 2000\text{K}$ und bei ausreichend hohen Drücken und Luftüberschuss liegen im thermodynamischen Gleichgewicht fast nur CO_2 und H_2O als Verbrennungsprodukte vor. Das ist also eine Art Sonderfall, bei dem man ohne Gleichgewichtsberechnung auskommt.

Mit freundlichen Grüßen

Sattelmeyer

Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmeyer
Lehrstuhl fuer Thermodynamik
TU-Muenchen
Boltzmannstrasse 15
D-85748 Garching
Tel.: + 49 89 289 16210
Fax.: + 49 89 289 16218
E-Mail: sattelmayer@td.mw.tum.de
Homepage: <http://www.td.mw.tum.de>

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Laack

Vorname: Moritz

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Anwendung des Prinzips der absoluten Enthalpien und Entropien zur thermodynamischen Berechnung von chemischen Energiewandlungsprozessen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

17.09.2018

Datum

Unterschrift im Original