
Bedienanleitung für das Rechenprogramm "Zustandsänderung_Ideales_Gas"

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, März 2013

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	2
1 Allgemeine Hinweise zum Rechenprogramm	2
1.1 Laden und Start des Rechenprogramms	2
1.2 Bearbeitung des Programmlistings	3
1.3 Beispielabarbeitung	3
2 Berechnung der Zustandsänderungen	3
3 Beispiel_1: Vergleichsprozess eines Verbrennungsmotors	4

Wichtige Hinweise:

Alle in diesem Bericht und dem zugehörigen Rechenprogramm enthaltenen Angaben, Daten, Berechnungsverfahren usw. wurden vom Autor mit bestem Wissen erstellt und sorgfältig geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen, deshalb erfolgen alle Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung und Garantie des Autors. Er übernimmt keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen und Einspeicherung sowie Verarbeitung in elektronischen Systemen, die über die Eigennutzung hinausgehen, sowie für Übersetzungen und Mikroverfilmungen.

Das vorgestellte Berechnungsmodell ist als Testfassung zu verstehen. Alle Interessierten sind eingeladen, an der Weiterentwicklung mitzuwirken.

Viel Erfolg bei der Anwendung!

Vorbemerkung

Die thermodynamischen Grundlagen zur Berechnung idealer Gase finden sich in allen gängigen Büchern zur technischen Thermodynamik.

Die Zusammenstellung der Berechnungsgleichungen kann auch dem Download

[Thermodynamische Grundlagen für stationäre Prozesse – Reversible Zustandsänderungen des idealen Gases](#)

entnommen werden.

1 Allgemeine Hinweise zum Rechenprogramm

Das Rechenprogramm wurde in der Programmierumgebung [MICROSOFT VISUALBASIC.NET STANDARD](#) entwickelt. Erfolgt die Programmabarbeitung in der Programmierumgebung, sind mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar. Ersatzweise kann auch [Visual Basic 2010 Express](#) verwendet werden. Die bisherige Programmanwendung lief unter dem Betriebssystem Microsoft Windows XP mit Service Pack 1.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetafeln – bewirkt hätten, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu MICROSOFT WORD hergestellt.

(Allgemeine Hinweise zur Installation und Handhabung meiner Programme sowie zur verwendeten Bildschirmeinstellung sind [hier](#) zu finden.)

1.1 Laden und Start des Rechenprogramms

Die komprimierte Datei "[Gas.zip](#)" ist in ein eigenes Verzeichnis (Ordner) auf die Festplatte zu kopieren und zu entpacken. Im genannten Ordner befinden sich:

- [Ideales_Gas](#) (Rechenprogramm)
- [Beispiel_1](#) (Vergleichsprozess eines Verbrennungsmotors)

Die Programmabarbeitung kann generell auf zweierlei Weise erfolgen.

I. Beispielhafte Abarbeitung ohne Entwicklungsumgebung:

Ordner "[Ideales_Gas](#)" öffnen ⇒ Datei "[bin](#)" öffnen ⇒ "[Ideales_Gas.exe](#)" Doppelklick

II. Beispielhafte Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

[Visual Basic.NET](#) starten ⇒ Menüleiste "[Datei](#)" ⇒ "[Öffnen](#)" ⇒ "[Projekt](#)" Einfachklick
⇒ Ordner "[Ideales_Gas](#)" auswählen ⇒ "[Ideales_Gas.sin](#)" Doppelklick
⇒ Menüleiste "[Debuggen](#)" Einfachklick ⇒ "[Starten](#)" Einfachklick

Zu Beginn wird in einem Fenster ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben! Ist das Beispiel noch nicht vorhanden, so muss der Ordner dafür **vorher** angelegt werden.

1.2 Bearbeitung des Programmlistings

Im Ordner "Ideales_Gas" zeigt Form 1 den Quellcode mit nachfolgenden Inhalten:

Eingabe, Grobprüfung mit Datenspeicherung, Berechnung und Ausgabe einschließlich Druck sowie Diagrammdarstellung.

Die Form 1 kann mit Hilfe des Projektmappen-Explorers geöffnet werden. Aus den darin enthaltenen Programmlistings sind alle inhaltlichen Details – gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen – ersichtlich.

1.3 Beispielabarbeitung

1. **START** drücken und Beispiel mit Pfad und Ordner eingeben.
2. Eventuell vorhandenes Beispiel **LADEN** oder Zahleneingabe gemäß Beschreibung auf der Bedienoberfläche vornehmen.
3. **EINGABE prüfen/speichern** aktivieren. Eventuell festgestellte Fehler durch veränderte oder ergänzende Eingaben beseitigen und erneut den Eingabebutton betätigen. Alle Eingabedaten können überschrieben werden.
4. **RECHNEN** drücken.
5. Eventuell **DRUCK** der Eingaben und Ergebnisse mit WORD und **ZEICHNEN** des Diagramms in der Bedienoberfläche bewirken.

Die Gestaltungen der **Bedienoberfläche, des Ausdrucks und der Grafik** sind dem beigefügten Beispiel zu entnehmen.

2 Berechnung der Zustandsänderungen

Es können Prozesse mit **maximal 10 Zustandspunkten** bearbeitet werden.

Zunächst sollte die Berechnung der Zustandsänderungen schrittweise, d. h. von Zustandspunkt zu Zustandspunkt erfolgen.

Es sind stets zwei Größen, die den **Ausgangspunkt** der Zustandsänderung eindeutig kennzeichnen, einzugeben. Beispielsweise:

- Druck p und spezifisches Volumen v oder Druck p und Temperatur T oder aber Temperatur T und spezifische Entropie s usw.

Die Eingabe von Temperatur T und der spezifischen Enthalpie h kennzeichnet den Zustandspunkt nicht, da beim idealen Gas h und T direkt verknüpft sind ($h = c_p T$).

Nach Fixierung des Ausgangspunktes muss unter **AZÄ** die **Art der Zustandsänderung** eingegeben werden. Dies sind:

- p für Isobare, T für Isotherme, v für Isochore, s für Isentrope und h für Isenthalpe, die einen Drosselvorgang kennzeichnet. Für eine polytrope Zustandsänderung ist unter AZÄ ein n einzutragen und gleichzeitig in der Spalte n die Größe des Polytropenexponenten zu vermerken (z. B. 1,8).

Schließlich ist noch die Begrenzung der beabsichtigten Zustandsänderung für p , T oder v anzugeben. Z. B.:

- $T = 300\text{ °C}$ oder $p = 6\text{ bar}$ usw. (Siehe auch Hinweis auf Seite 10!)

Aktivieren von **EINGABE prüfen/speichern** und danach **RECHNEN** komplettiert den nächsten Zustandspunkt.

Selbstverständlich kann nach jedem Berechnungsschritt die Zustandsänderung im Diagramm verfolgt werden. Dazu ist die Diagrammauswahl p-v oder T-s Diagramm vorzunehmen. Das Aktivieren von **ZEICHNEN** zeigt ein entsprechendes Bild. Durch Überschreiben der minimalen und maximalen Achswerte sowie der Achsteilungen wird nach Drücken von **EINGABE prüfen/speichern** und **ZEICHNEN** das Bild aktualisiert.

Der geübte Nutzer kann selbstverständlich auch mit einer Eingabe mehrere Zustandsänderungen – beispielsweise einen kompletten Kreisprozess – in einem Rechengang nachbilden.

3 Beispiel_1: Vergleichsprozess eines Verbrennungsmotors

Es wird nachfolgend ein Beispiel aus ELSNER. N.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Band 1. Berlin: Akademie-Verlag 1993, ISBN 3-05-501390-5, Seite 468ff. nachgerechnet.

Ein Vergleichsprozess mit dem Arbeitsmittel Luft als ideales Gas zeichnet sich durch folgende Eckdaten aus:

- $1 \rightarrow 2$ isentrope Verdichtung $\{p_1 = 1\text{ bar (abs)}, T_1 = 20\text{ °C}, \text{Verdichtungsverhältnis } V_1/V_2 = 8\}$
- $2 \rightarrow 3$ polytrop Wärmezufuhr $\{n = 10, T_3 = 2000\text{ K}\}$
- $3 \rightarrow 4$ isentrope Entspannung $\{V_4 = V_1\}$
- $4 \rightarrow 1$ isochore Wärmeabfuhr

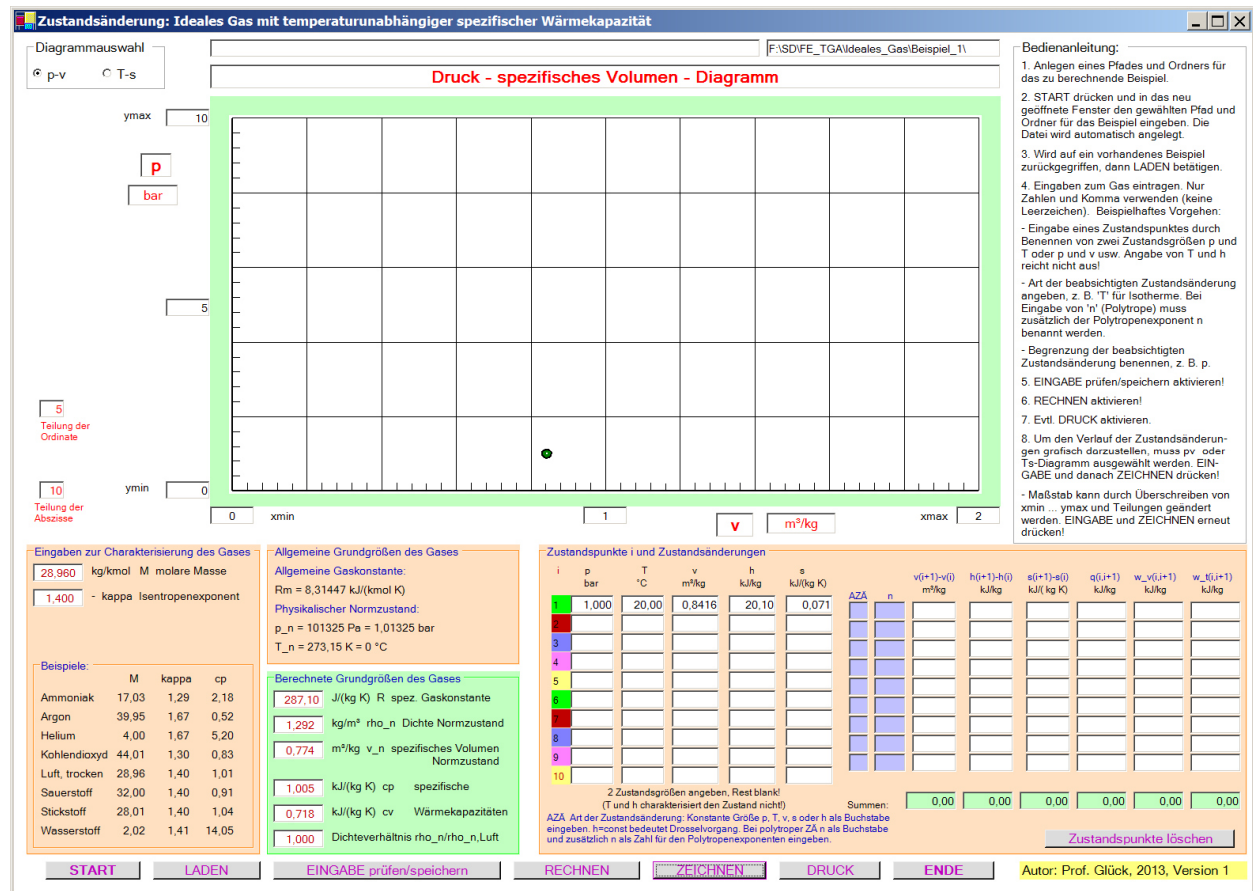
Lösung:

Eingaben zur Charakterisierung des Gases

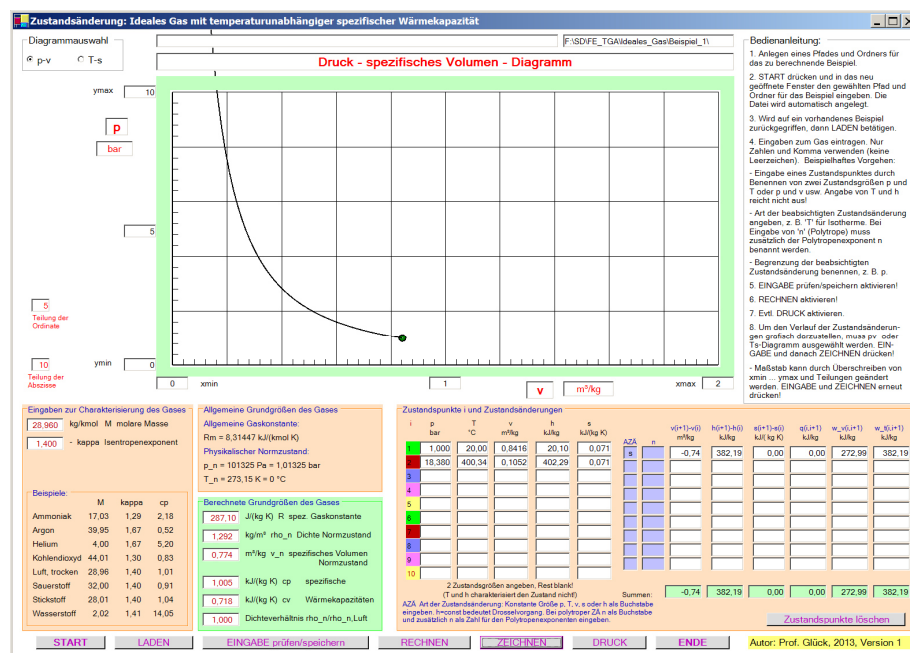
Eingabe: molare Masse, Isentropenexponent $\rightarrow$ **EINGABE prüfen/speichern** $\rightarrow$ **RECHNEN**

Berechnung des Zustandes zu Beginn des Kreisprozesses (Startpunkt)Eingabe für i = 1: Druck $p_1 = 1$ bar(abs), $T_1 = 20$ °C

→ EINGABE prüfen/speichern → RECHNEN → ZEICHNEN

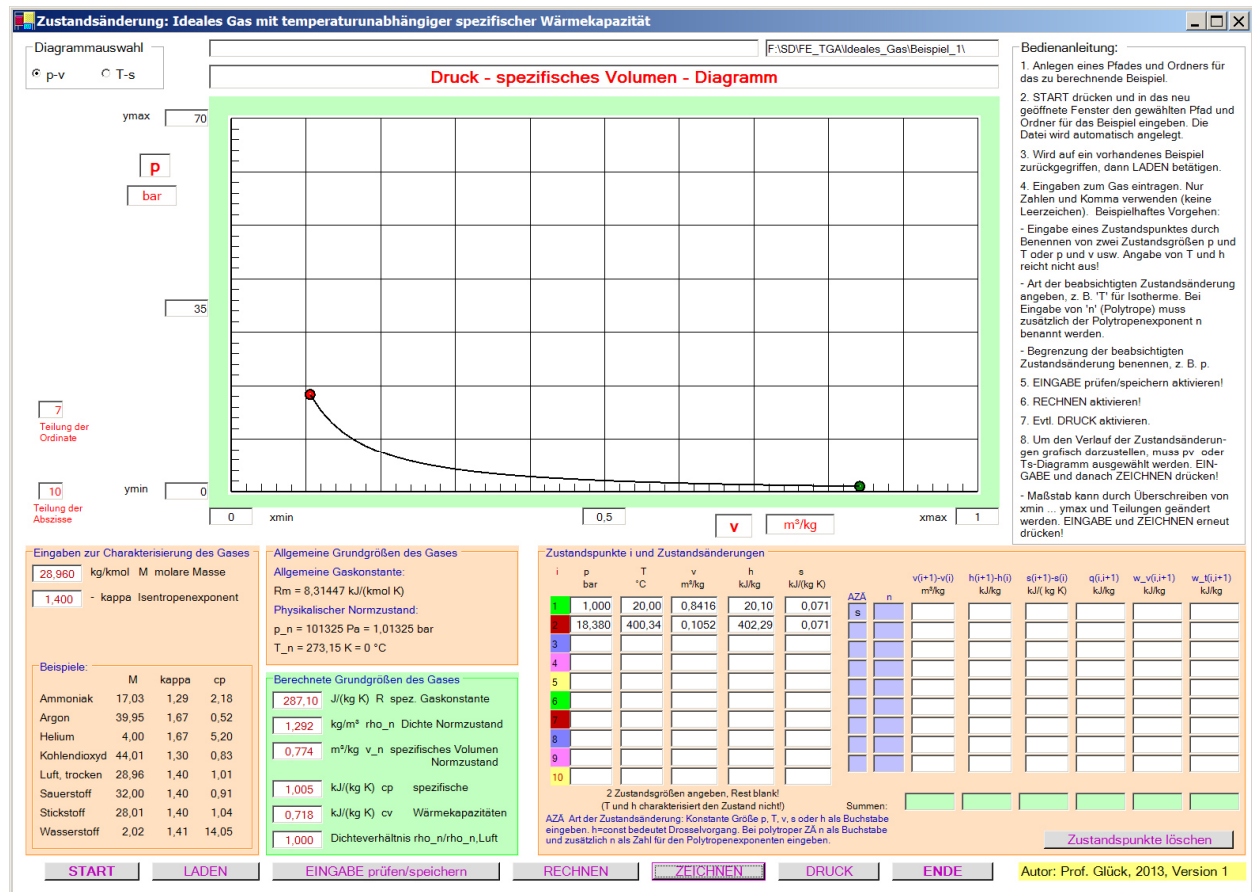
**1. Isentrope Verdichtung auf 1/8 des Volumens (Verdichtungsverhältnis $V_1/V_2 = 8$)**Eingabe: AZÄ₁ = s, $v_2 = v_1 / 8 = 0.1052$ m³/kg

→ EINGABE prüfen/speichern → RECHNEN → ZEICHNEN



Diagrammänderung:

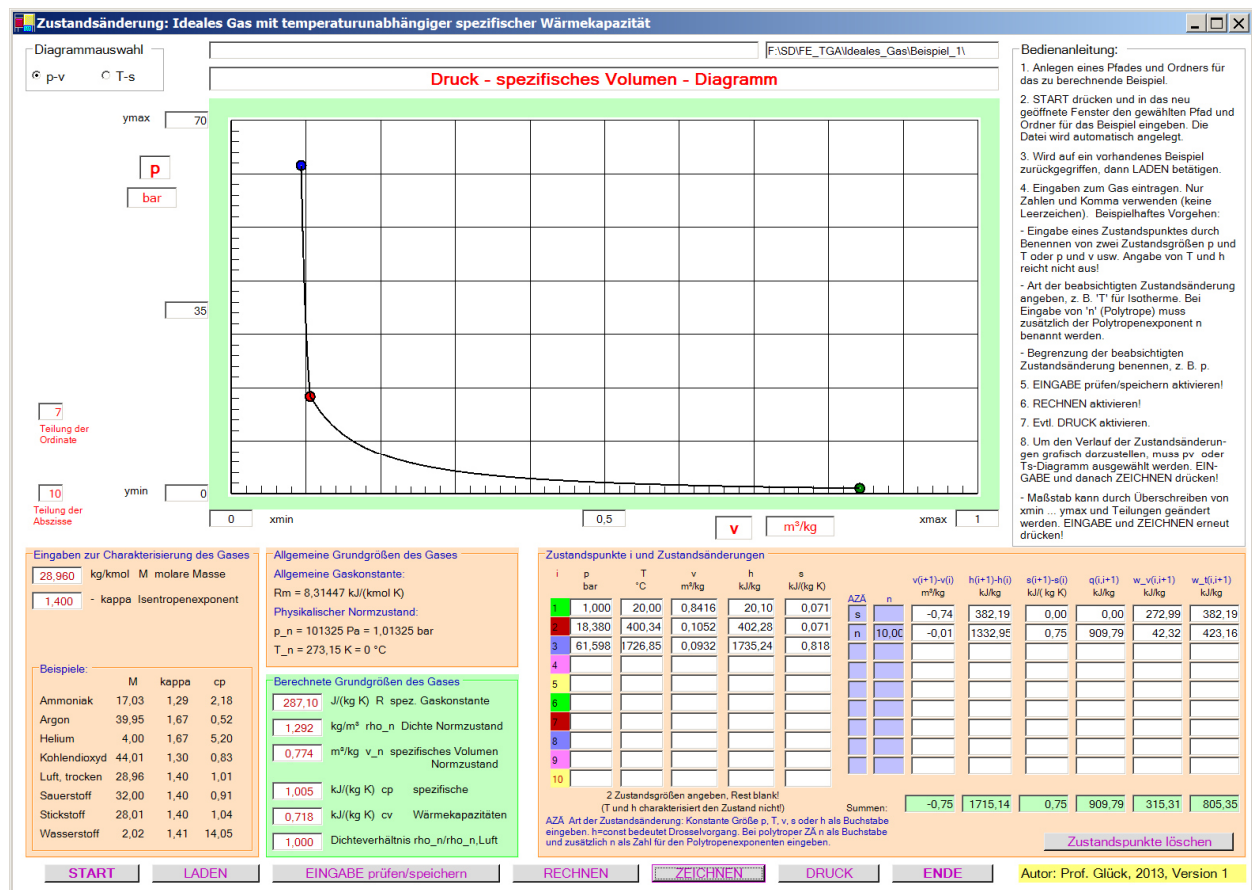
Eingabe: ymax = 70, Teilung Ordinate = 7, xmax = 1 → EINGABE prüfen/speichern → ZEICHNEN



2. Polytrope Wärmezufuhr auf die maximal zulässige Temperatur 2000 K

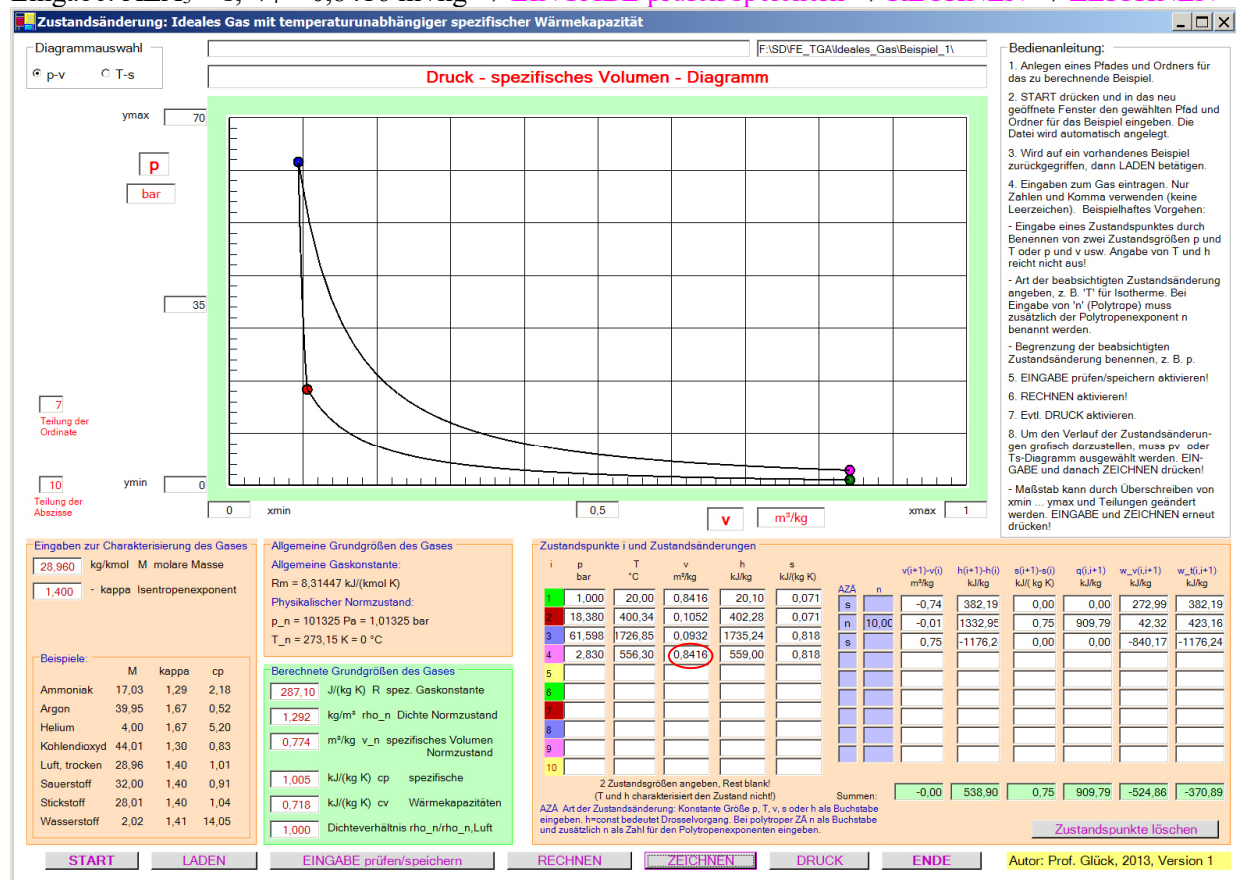
Eingabe: AZÄ₂ = n, n₂ = 10, T₃ = 1726,85 °C

→ EINGABE prüfen/speichern → RECHNEN → ZEICHNEN



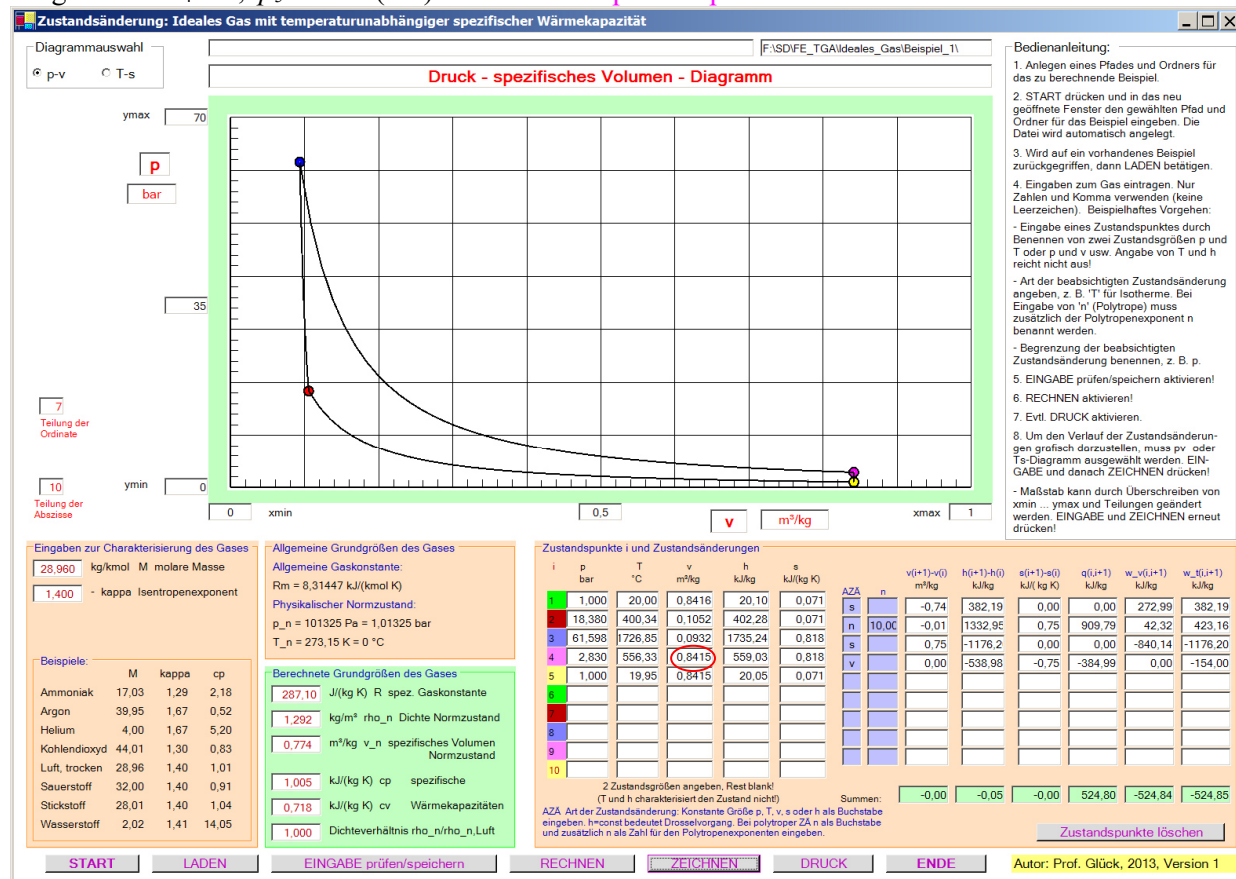
3. Isentrope Entspannung auf das Ursprungsvolumen

Eingabe: $AZ\ddot{A}_3 = s$, $v_4 = 0,8416 \text{ m}^3/\text{kg}$ → EINGABE prüfen/speichern → RECHNEN → ZEICHNEN

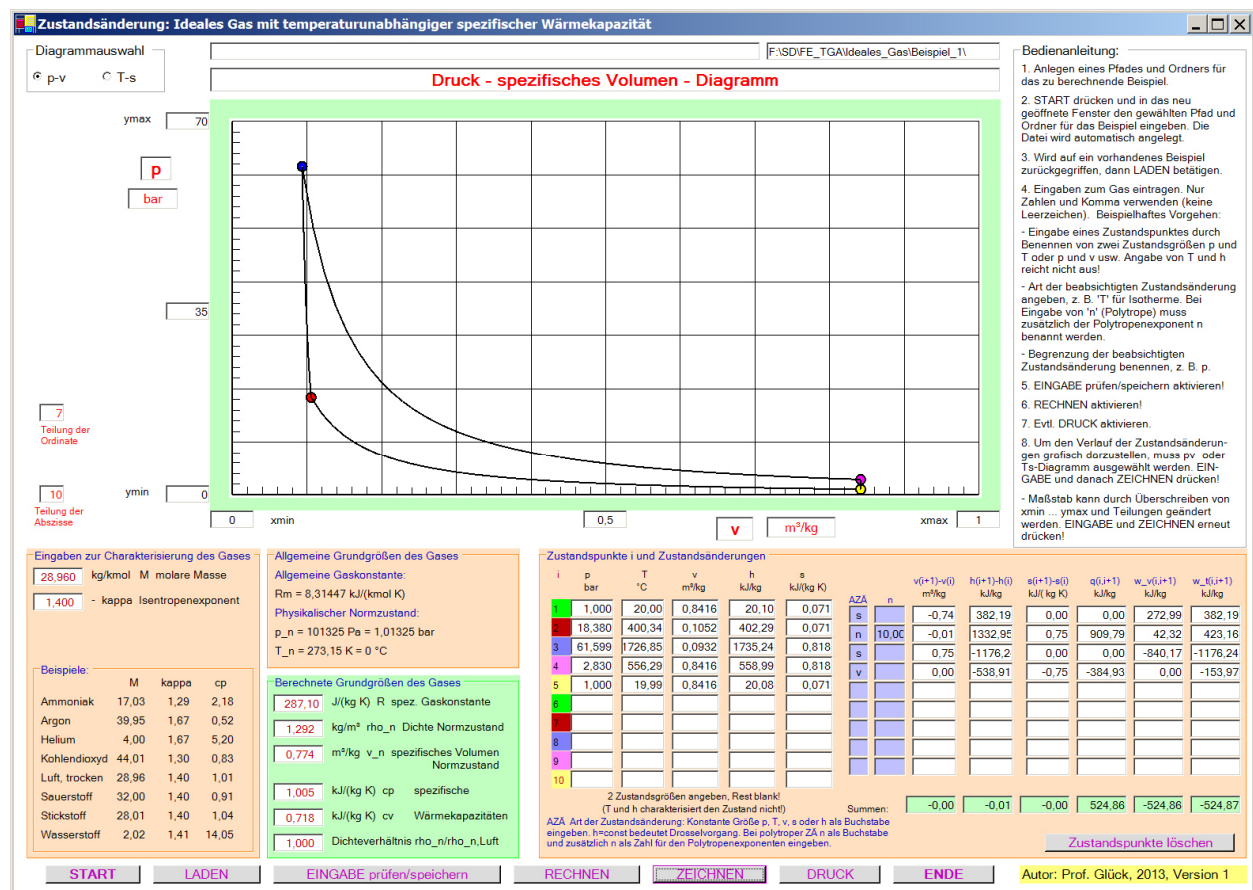
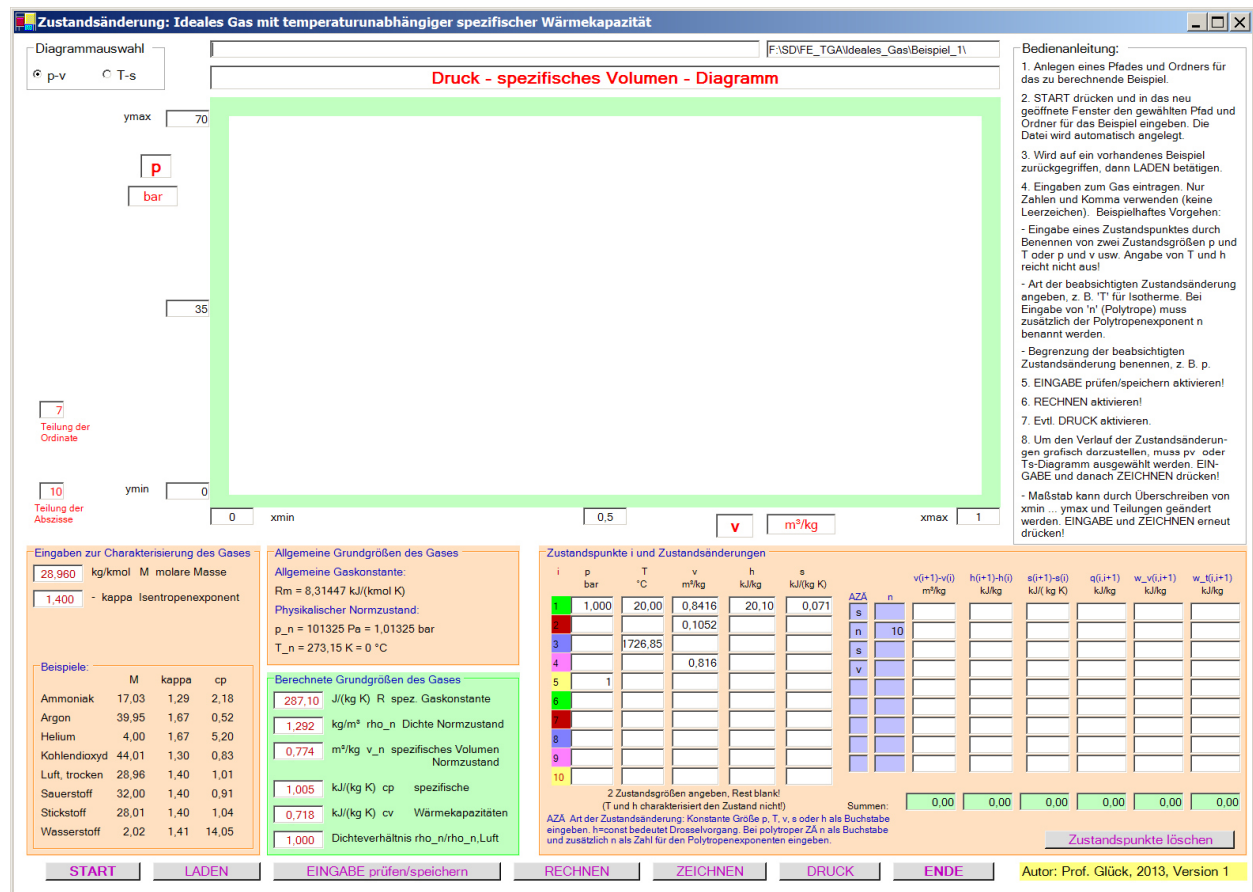


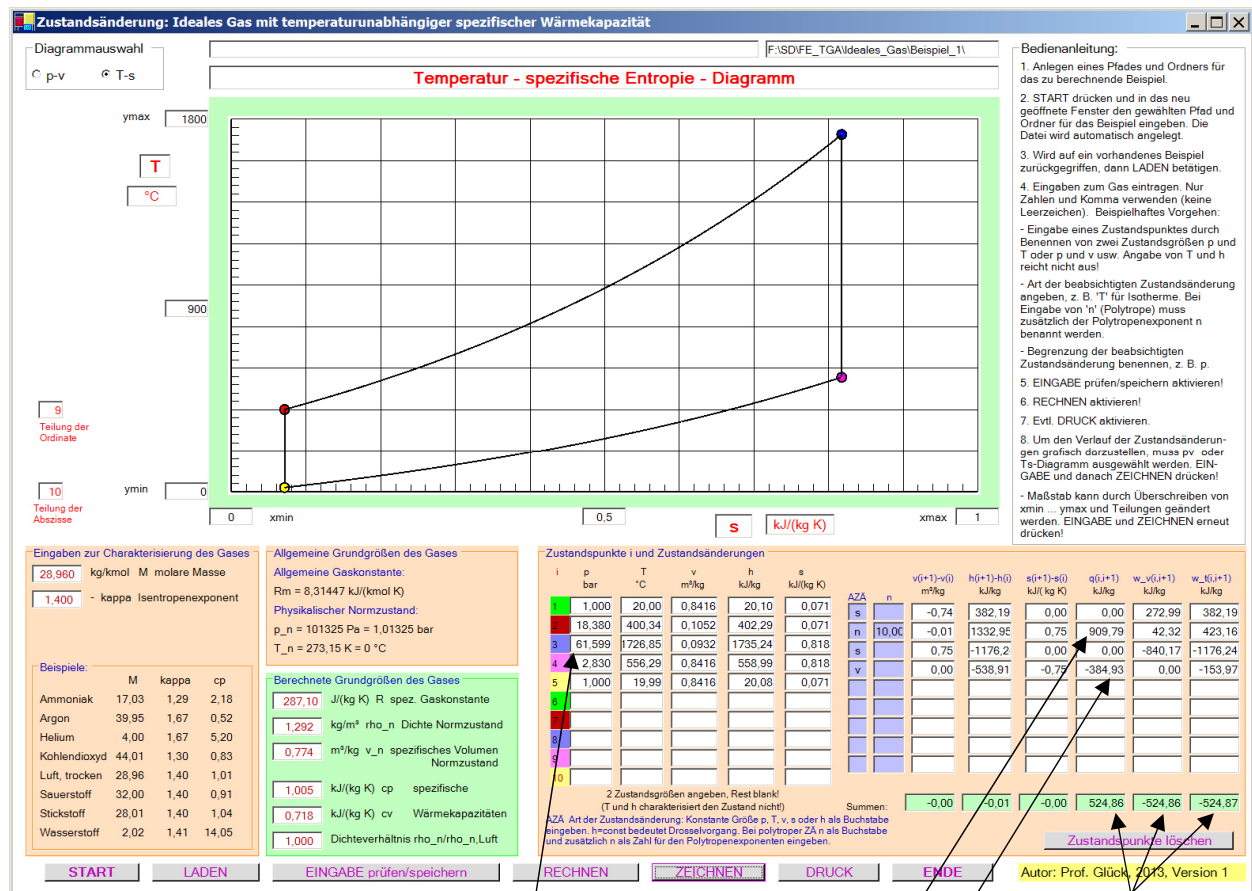
4. Isochore Wärmeabfuhr (Auspuffen auf Atmosphärendruck)

Eingabe: $AZ\ddot{A}_4 = v$, $p_5 = 1 \text{ bar(abs)}$ → EINGABE prüfen/speichern → RECHNEN → ZEICHNEN



Hinweis: Man kann auch die einzelnen Zustandsänderungen mit den begrenzenden Eckparametern nach der Berechnung des Startpunktes komplett eingeben und anschließend aktivieren: → **EINGABE prüfen/speichern** → **RECHNEN** → **ZEICHNEN**



Darstellung im T,s -SchaubildEingabe: $y_{\max} = 1800$, Teilung Ordinate = 9 $\rightarrow$ EINGABE prüfen/speichern $\rightarrow$ ZEICHNEN

Im Originalbeispiel (ELSNER) wurden errechnet:

$$p_{\max} = 61,6 \text{ bar}$$

$$q_{zu} = 910,2 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{ab} = 385,2 \text{ kJ/kg}$$

$$w_v = q_{zu} - q_{ab} = 525 \text{ kJ/kg}$$

Erzeugen einer Tabelle in MS-Word

→ DRUCK

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\IDEALES_GAS\BEISPIEL_1\

Zustandsänderung des idealen Gases mit temperaturunabhängiger spezifischer Wärmekapazität:

Eingaben zur Charakterisierung des Gases:

Molare Masse M 28,960 kg/kmol
 Isentropenexponent kappa 1,400
 Allgemeine Grundgrößen des Gases:
 Allgemeine Gaskonstante Rm 8,31447 kJ/(kmol K)
 Physikalischer Normzustand p_n 1,01325 bar = 101325 Pa
 T_n 0 °C = 273,15 K

Berechnete Grundgrößen des Gases:

Spezielle Gaskonstante R 287,10 J/(kg K)
 Normzustand Dichte rho_n 1,292 kg/m³
 spezifisches Volumen v_n 0,774 m³/kg
 Spezifische Wärmekapazität cp 1,005 kJ/(kg K)
 Spezifische Wärmekapazität cv 0,718 kJ/(kg K)
 Dichteverhältnis rho_n/rho_n,Luft 1,000

Betrachtete Zustandspunkte und Zustandsänderungen:

i	p	T	v	h	s	ZÄ	n	dv	dh	ds	q	w_v	w_t
-	bar	°C	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kgK)	-	-	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kgK)	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
1	1,00	20,00	0,8416	20,10	0,071	s		-0,74	382,19	0,00	0,00	272,99	382,19
2	18,38	400,34	0,1052	402,29	0,071	n	10,00	-0,01	1332,95	0,75	909,79	42,32	423,16
3	61,60	1726,85	0,0932	1735,24	0,818	s		0,75	-1176,24	0,00	0,00	-840,17	-1176,24
4	2,83	556,29	0,8416	558,99	0,818	v		0,00	-538,91	-0,75	-384,93	0,00	-153,97
5	1,00	19,99	0,8416	20,08	0,071								
Summe aller Zustandsänderungen:								-0,00	-0,01	-0,00	524,86	-524,86	-524,87

Zustandsgrößen h und s sind bei T = 0 °C und p = 1 bar null gesetzt!

ZÄ Zustandsänderung: p Isobare, T Isotherme, v Isochore, h Isenthalpe, s Isentrope, n Polytrope

Die Zustandsänderung sowie die davon rechts stehenden Ergebnisse gelten stets von i zu i+1

dv Volumenänderung, dh Enthalpieänderung, ds Entropieänderung, q Wärme, w_v Volumenänderungsarbeit, w_t technische Arbeit

Hinweis:

Die Zwischen- und Endergebnisse in den Monitor- und Drucktabellen weisen mitunter geringe Unterschiede auf. Dies ist auf Rundungsungenauigkeiten und auf unterschiedliche Berechnungswege verbunden mit "schleifenden Schnitten" zurückzuführen.

Die unterschiedlichen Rechnungswege entstehen beispielsweise dann, wenn

- für die Begrenzung der Zustandsänderung (siehe Seite 4, oben) mehr als ein Parameter (z. B. bei einer isentropen Zustandsänderung **p und T**) benannt werden.
- noch alte Werte einer früheren Berechnung in der Tabelle stehen.

Es wird dann nach einem programminternen Schlüssel **ein** Wert von den gegebenen Möglichkeiten ausgewählt.

Auf Seite 7 ist ein Beispiel gekennzeichnet. Der eingegebene Wert $v_4 = 0,8416 \text{ m}^3/\text{kg}$ wurde zunächst zur Berechnung der isentropen Zustandsänderung von $i = 3$ zu $i = 4$ als Begrenzung verwendet und daraus p_4 und T_4 bestimmt. Bei einer späteren Nachrechnung des Zustandes 4 ist dann v_4 erneut, jedoch in Abhängigkeit von den vorhandenen p_4 und T_4 zu $v_4 = 0,8415 \text{ m}^3/\text{kg}$ berechnet worden.

In analoger Weise sind auch die Unterschiede bezüglich der Endtemperatur $T_5 \neq 20,00 \text{ °C}$ zu er-