

Clusterteam Solar 4. Juni 2019

Wärmepumpen – Rückgrat & Achillesferse der Energiewende



Warum heute gängige Wärmepumpen ineffizient sind – und wie sich das ändern kann

Christian Schmidt-Gütter | 04.06.2019 | Leipzig
Freier Ingenieur
<https://www.schmidt-guetter.de>

Inhalt

- 1. Bedeutung von Wärmepumpen**
2. Physikalischer Überflug
3. Ein Blick in die Zukunft



Wärmepumpen heute

- Dezentral zum Heizen und Kühlen
- (Fern-)Wärmegewinnung (zentral)
- Prozesswärmebereitstellung
- Adapter für „kalte“ Wärmenetze
- Thermospeicher (z.Z. nur Strom => Wärme)
- Unterstützung bei Netzintegration fluktuierender erneuerbarer Energien
- Zukünftig weitere Anwendungen ?



Wärme-Transformator ?

- ...ja, aber:
- Anpassung nicht beliebig
==> benötigt externe „Edel-Energie“
- Theoretischer Wirkungsgrad / Arbeitszahl:

– Als Motor:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

– Als Wärmepumpe:

$$AZ = \frac{1}{\eta} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$



Arbeitszahl konkret (1)

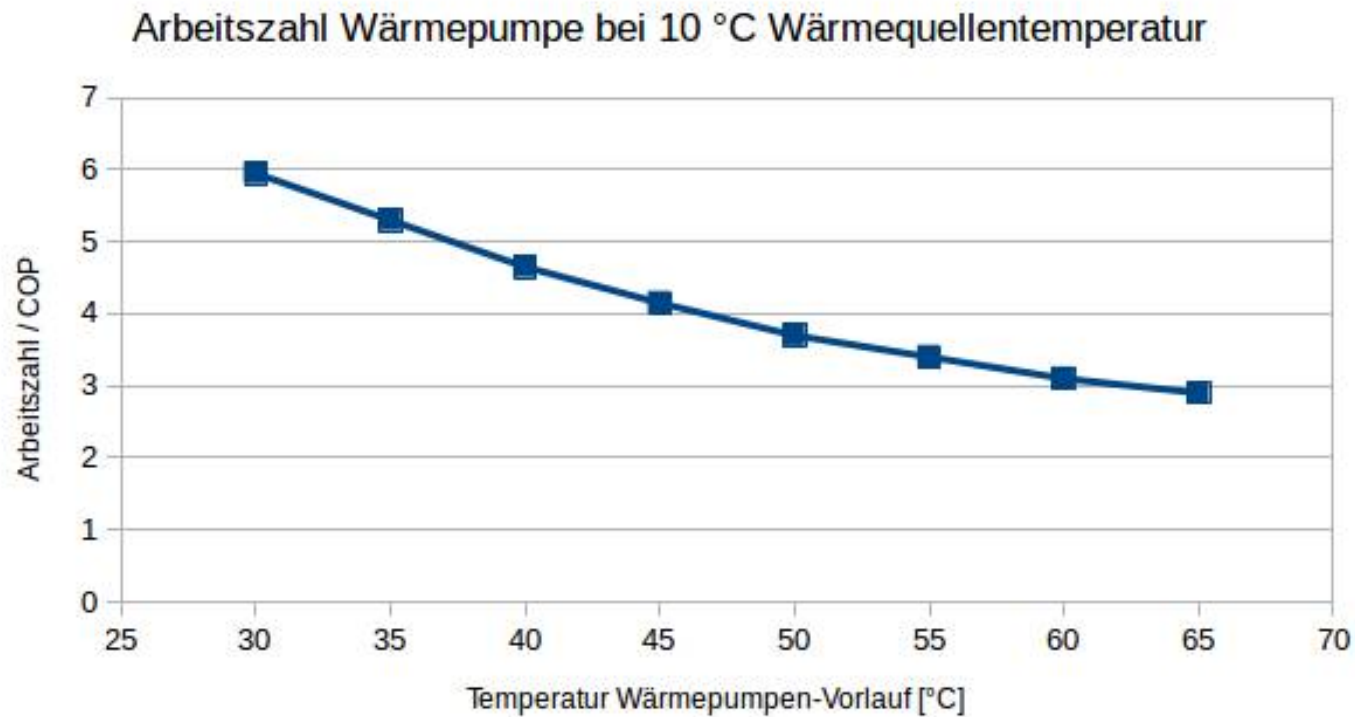
Theoretische Wirkungsgrade und Arbeitszahlen als Funktion von Delta-T (Basis: 10 °C):

Basistemperatur 2 (T2)		10 °C	
...in Kelvin:		283,16	
Höhere Temp. T1 [K]	Delta-T	Wirk.-grad	Arbeitszahl
293,16	10	3,41%	29,32
303,16	20	6,60%	15,16
313,16	30	9,58%	10,44
50 °C 323,16	40	12,38%	8,08
333,16	50	15,01%	6,66
343,16	60	17,48%	5,72
353,16	70	19,82%	5,05
363,16	80	22,03%	4,54
100 °C 373,16	90	24,12%	4,15
383,16	100	26,10%	3,83
393,16	110	27,98%	3,57



Arbeitszahl konkret (2)

Arbeitszahl-Katalogversprechen der Wärmepumpen-Hersteller:



Daten-Quelle:
HLH Bd. 70
(2019) Nr. 5-Mai
Artikel:
„Wohnquartiere
energetisch neu
aufgestellt“

Wo geht die Energie „verloren“...?



Inhalt

1. Bedeutung von Wärmepumpen

2. Physikalischer Überflug

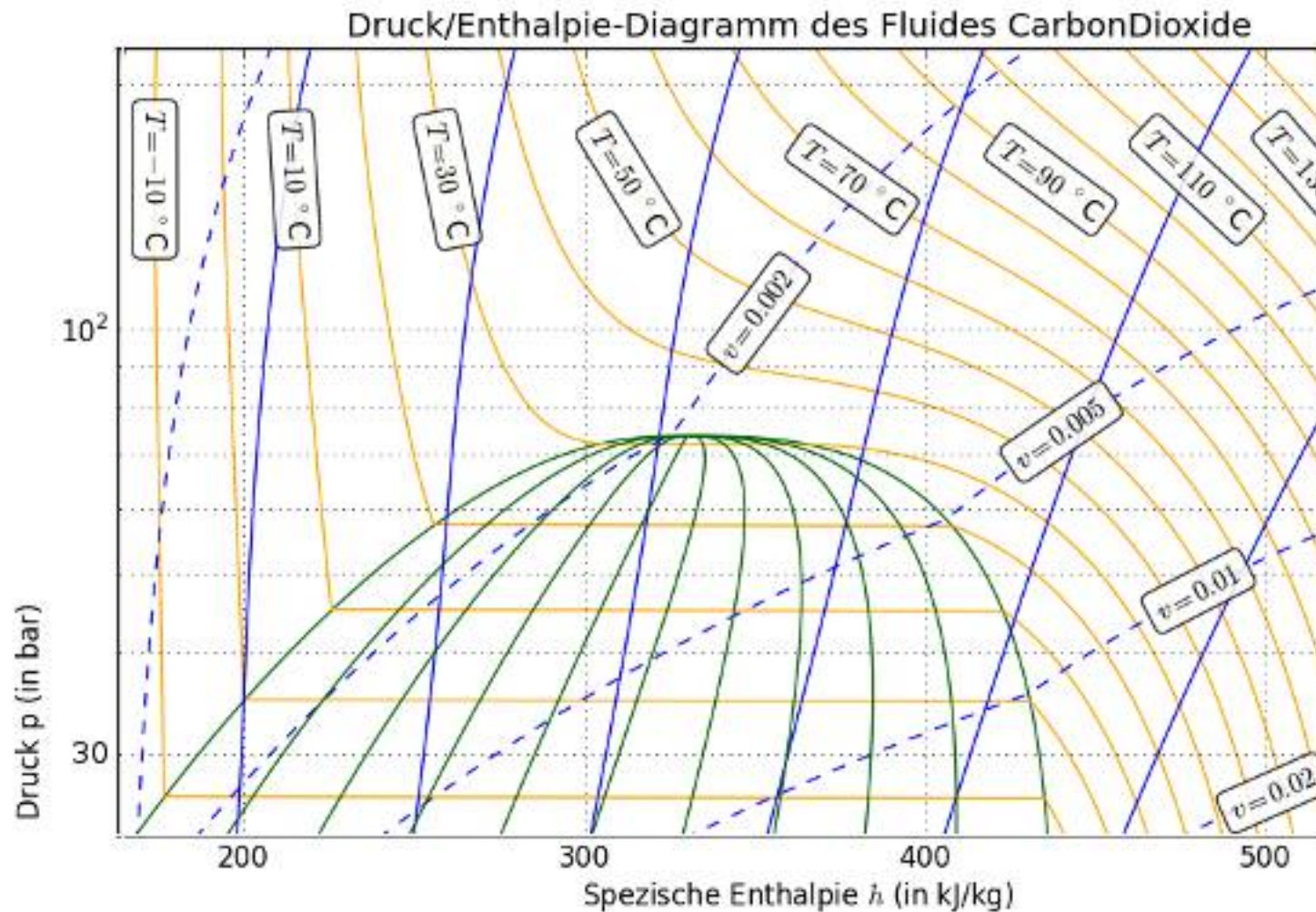
Bitte anschnallen !

3. Ein Blick in die Zukunft



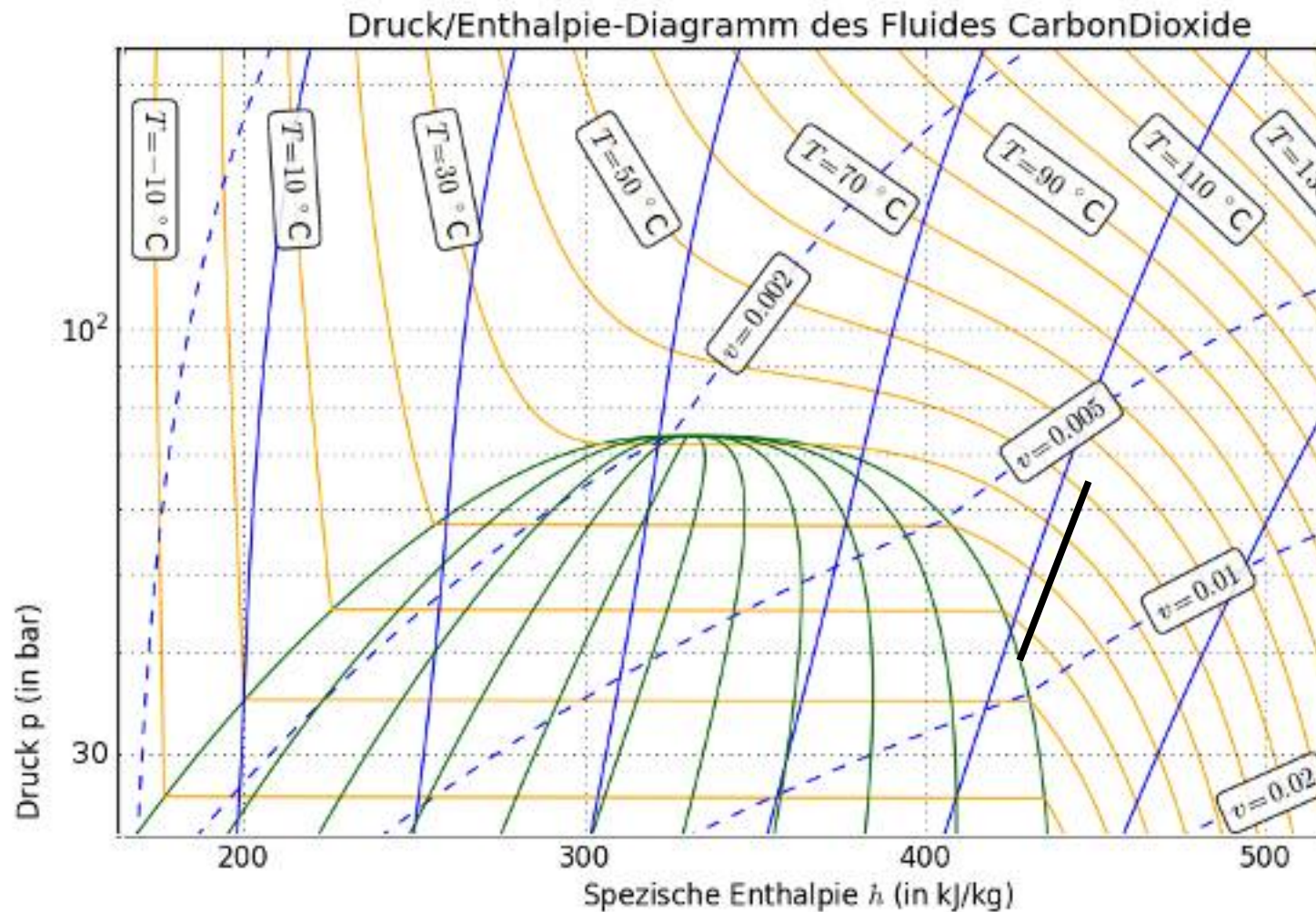
Normaler WP-Kreisprozess

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch:



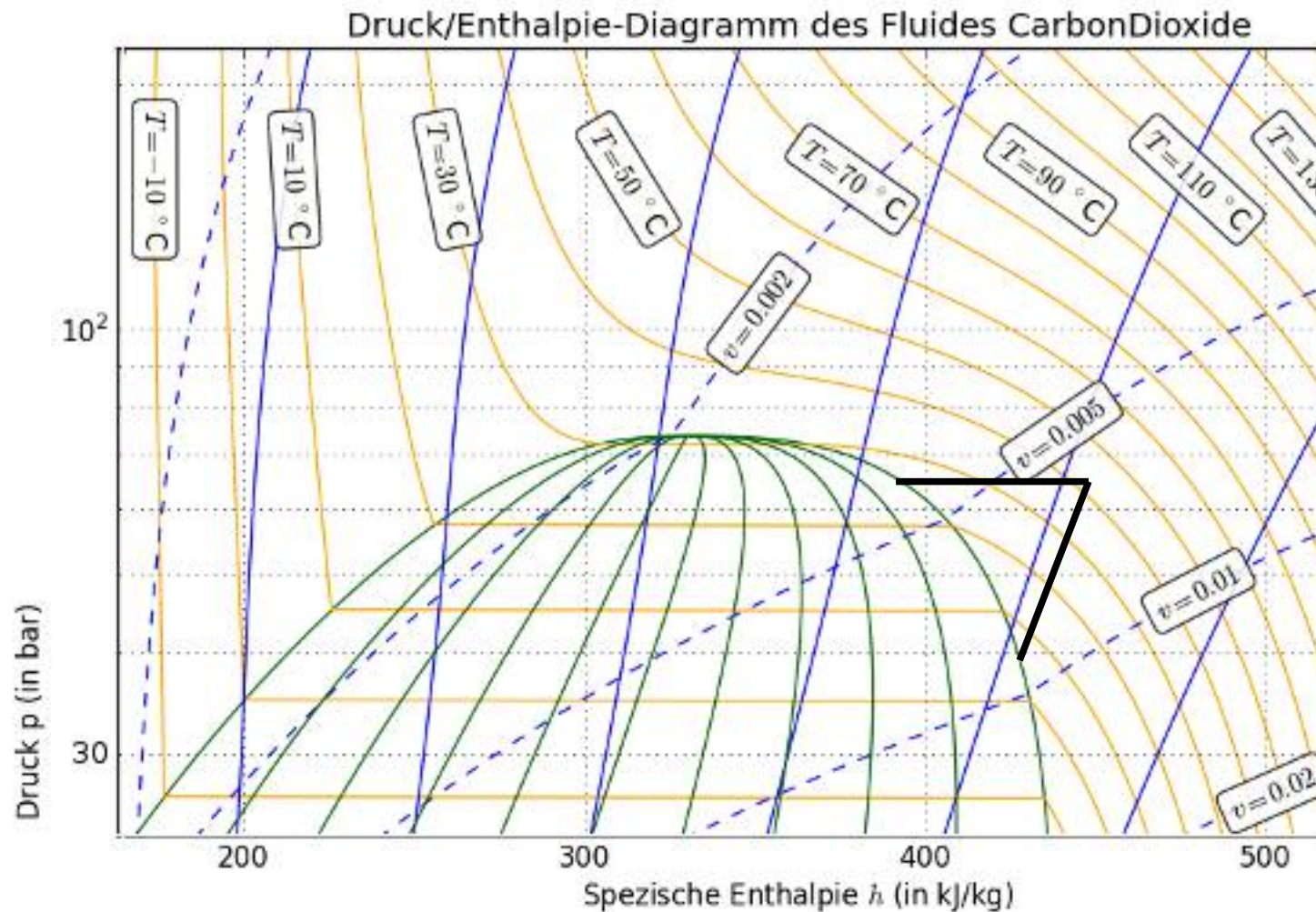
Normaler WP-Kreisprozess

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch:



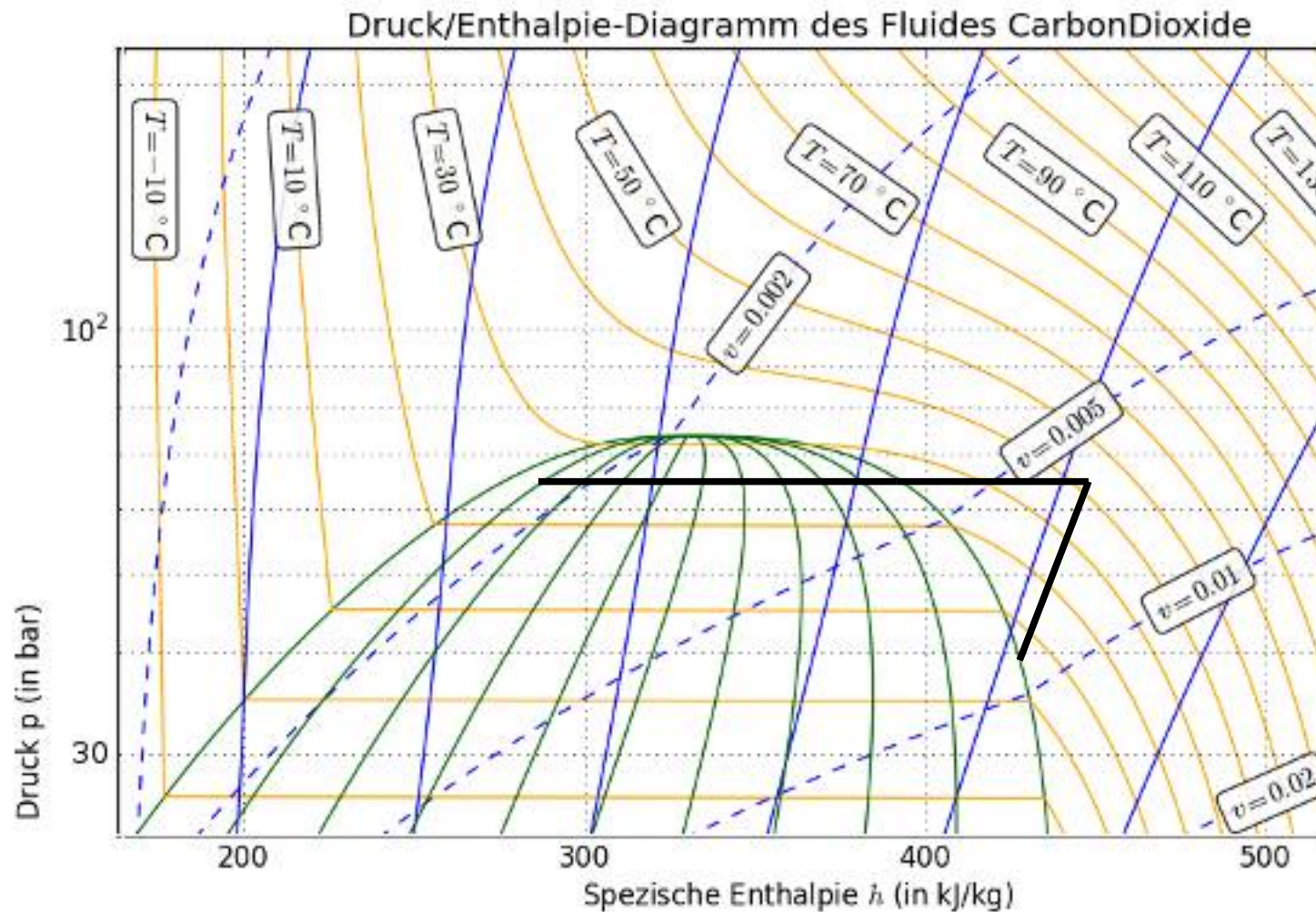
Normaler WP-Kreisprozess

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch:



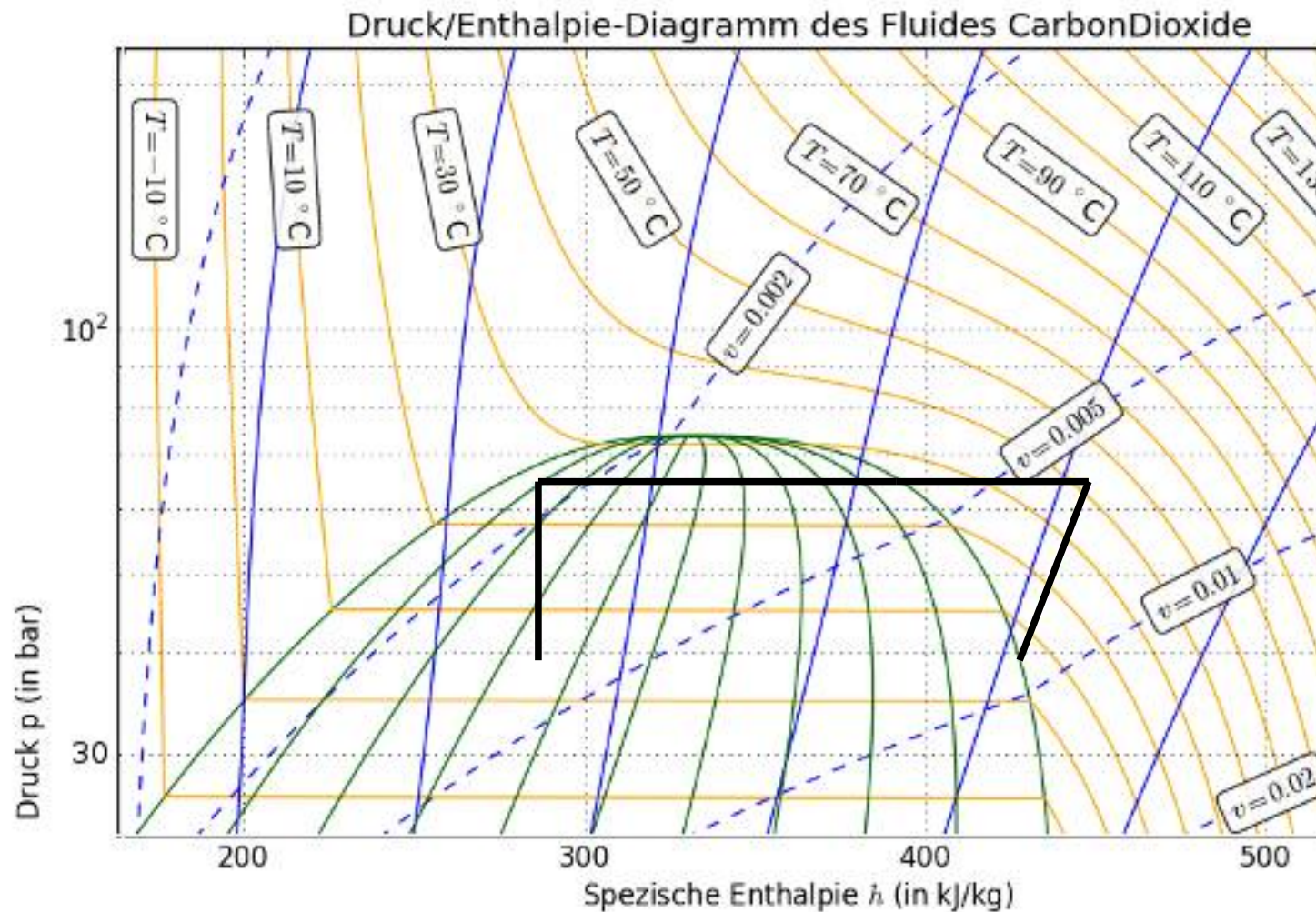
Normaler WP-Kreisprozess

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch:



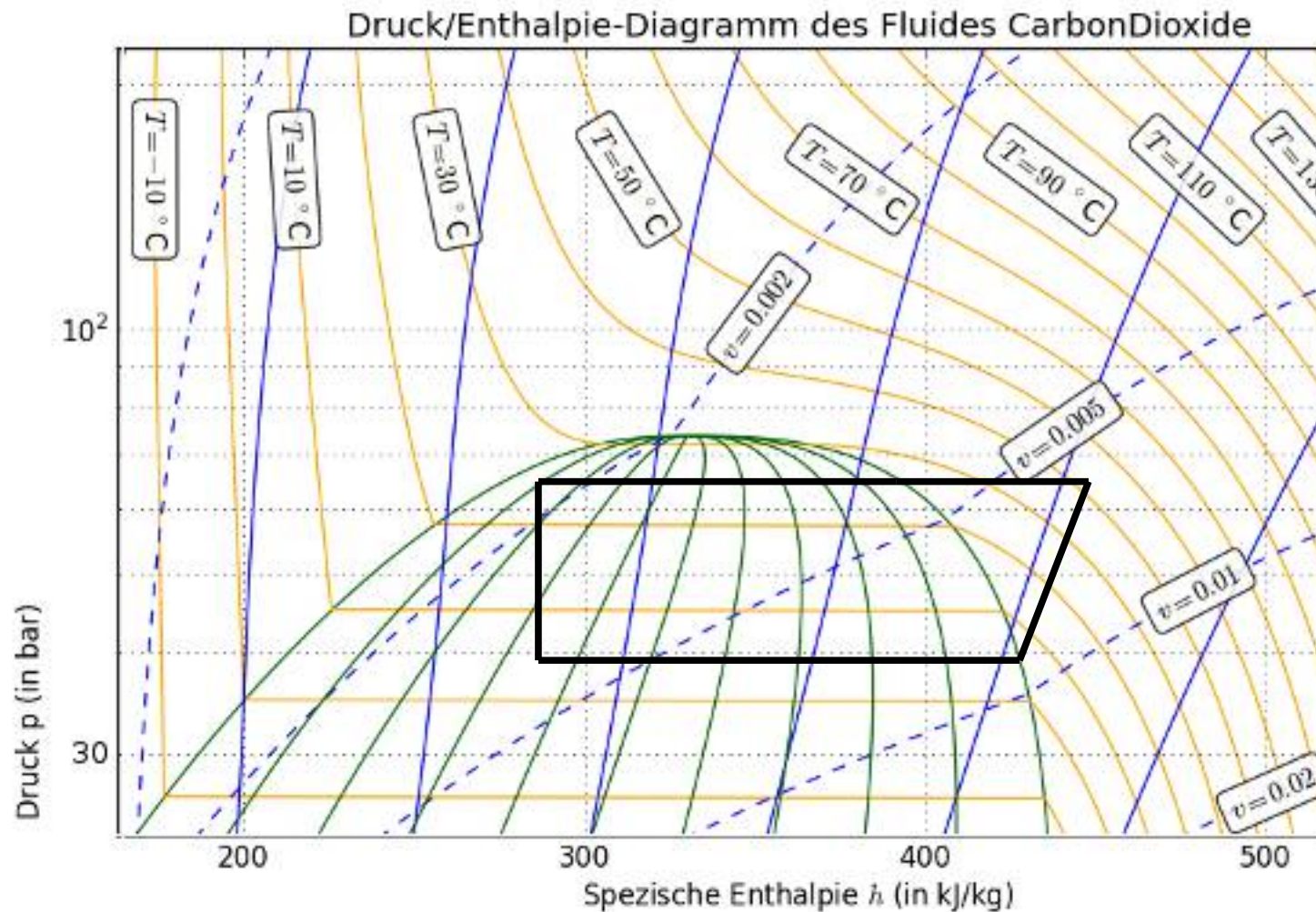
Normaler WP-Kreisprozess

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch:



Normaler WP-Kreisprozess

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch:



Normaler WP-Kreisprozess (2)

(CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch)

- Anwendung z.B. Auto-Klimaanlage



Normaler WP-Kreisprozess (2)

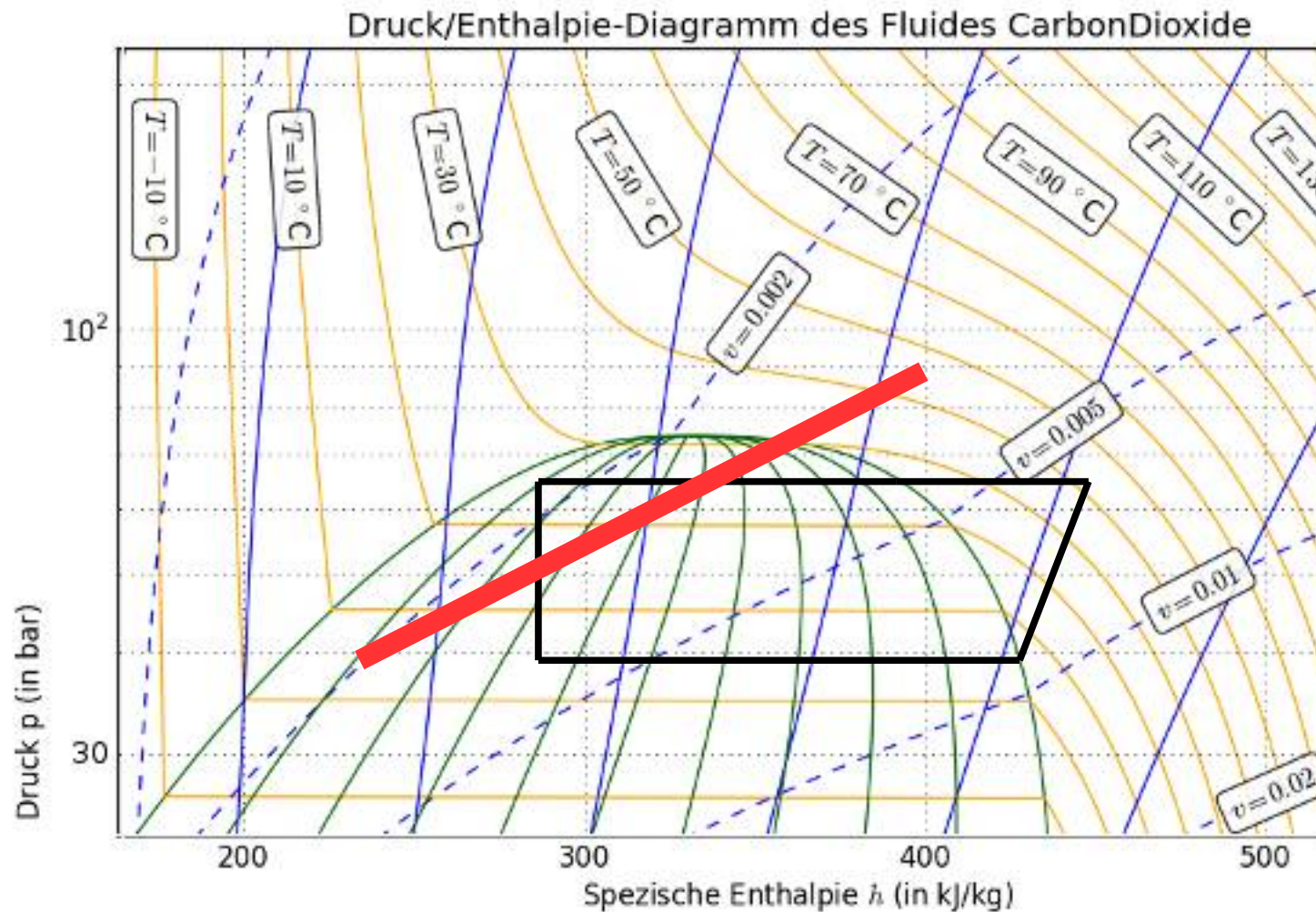
(CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, subkritisch)

- Anwendung z.B. Auto-Klimaanlage
- Wirkprinzip der meisten heutigen WP



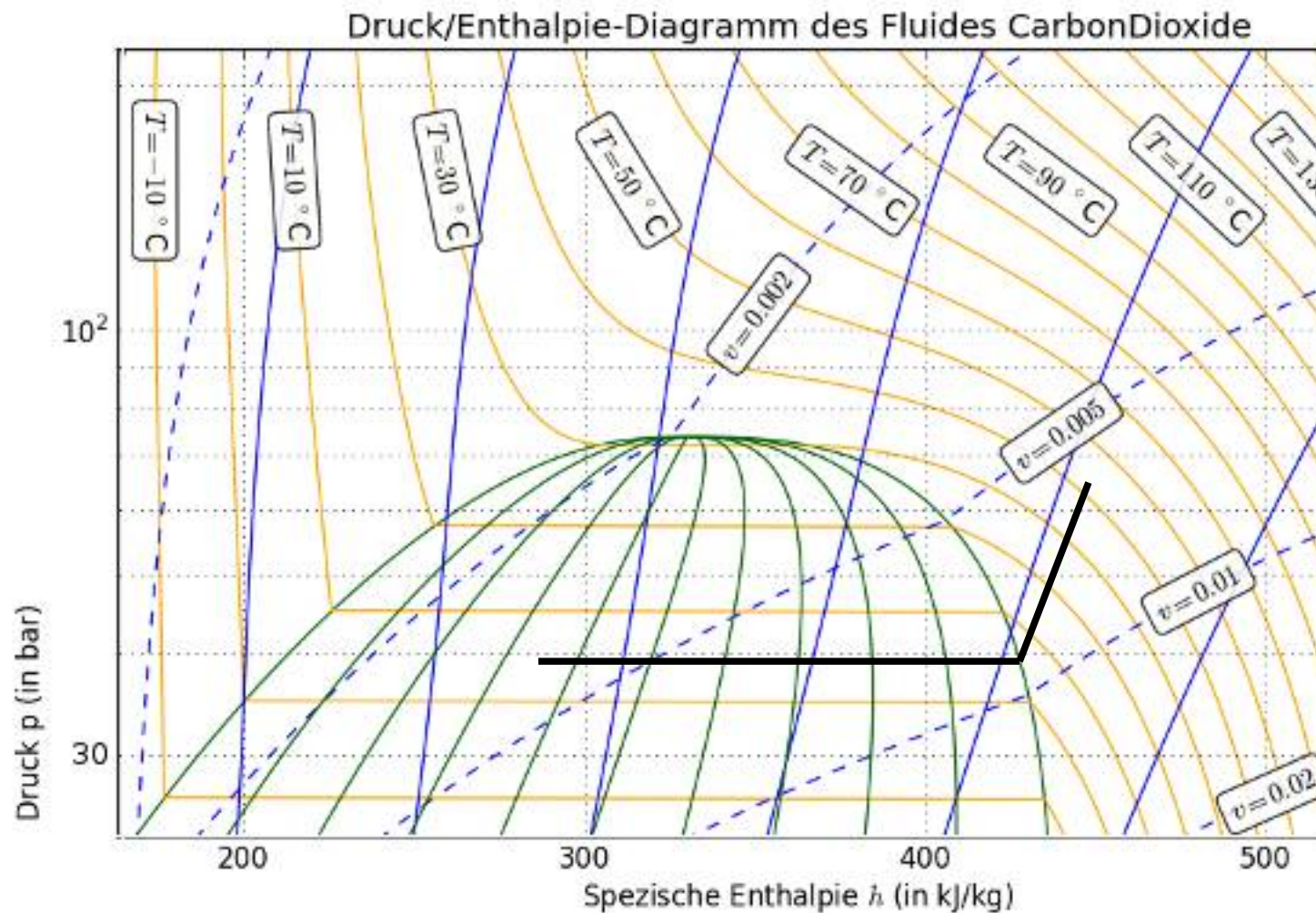
Transkritischer WP-Kreisprozess (1)

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, transkritisch:



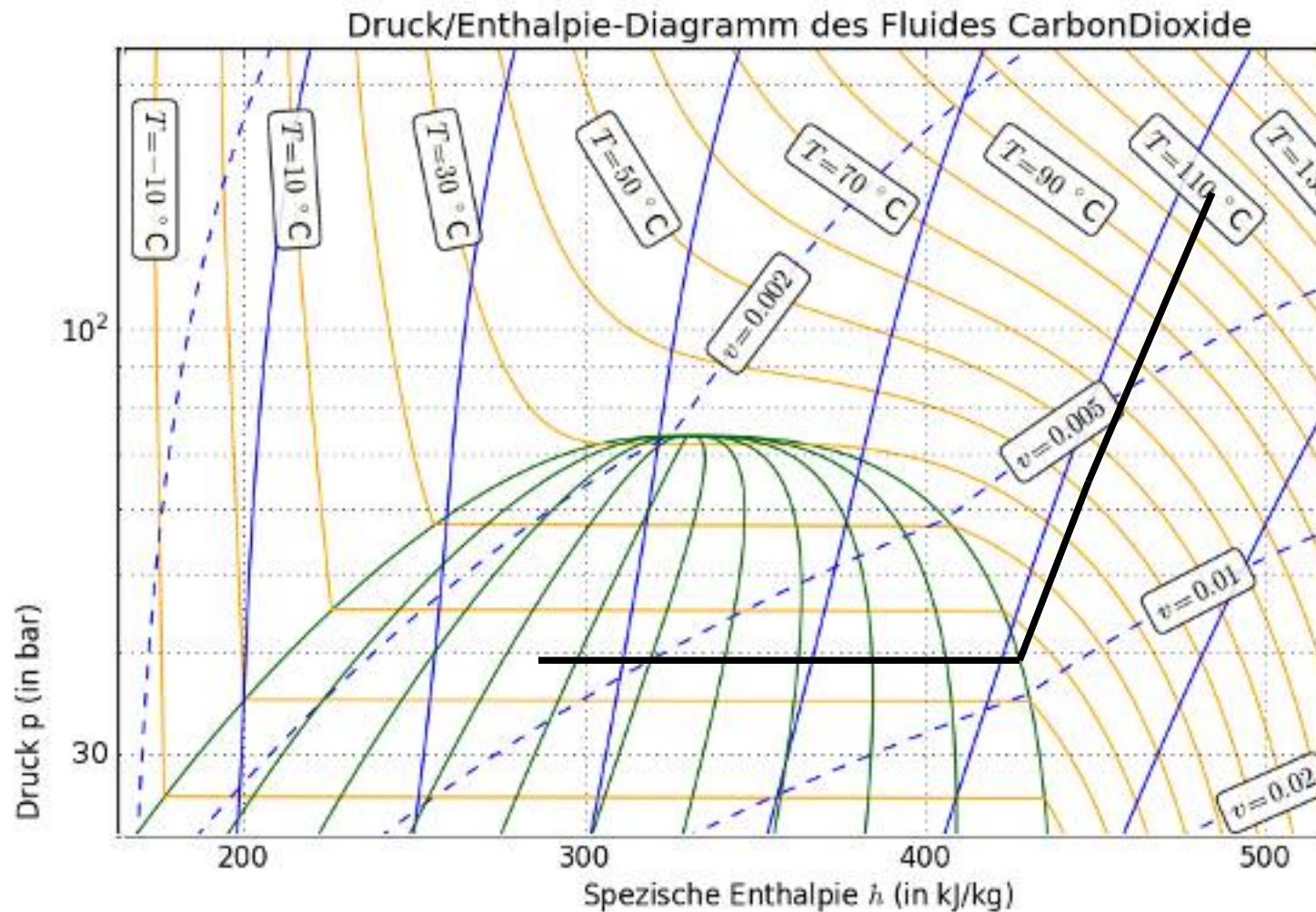
Transkritischer WP-Kreisprozess (1)

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, transkritisch:



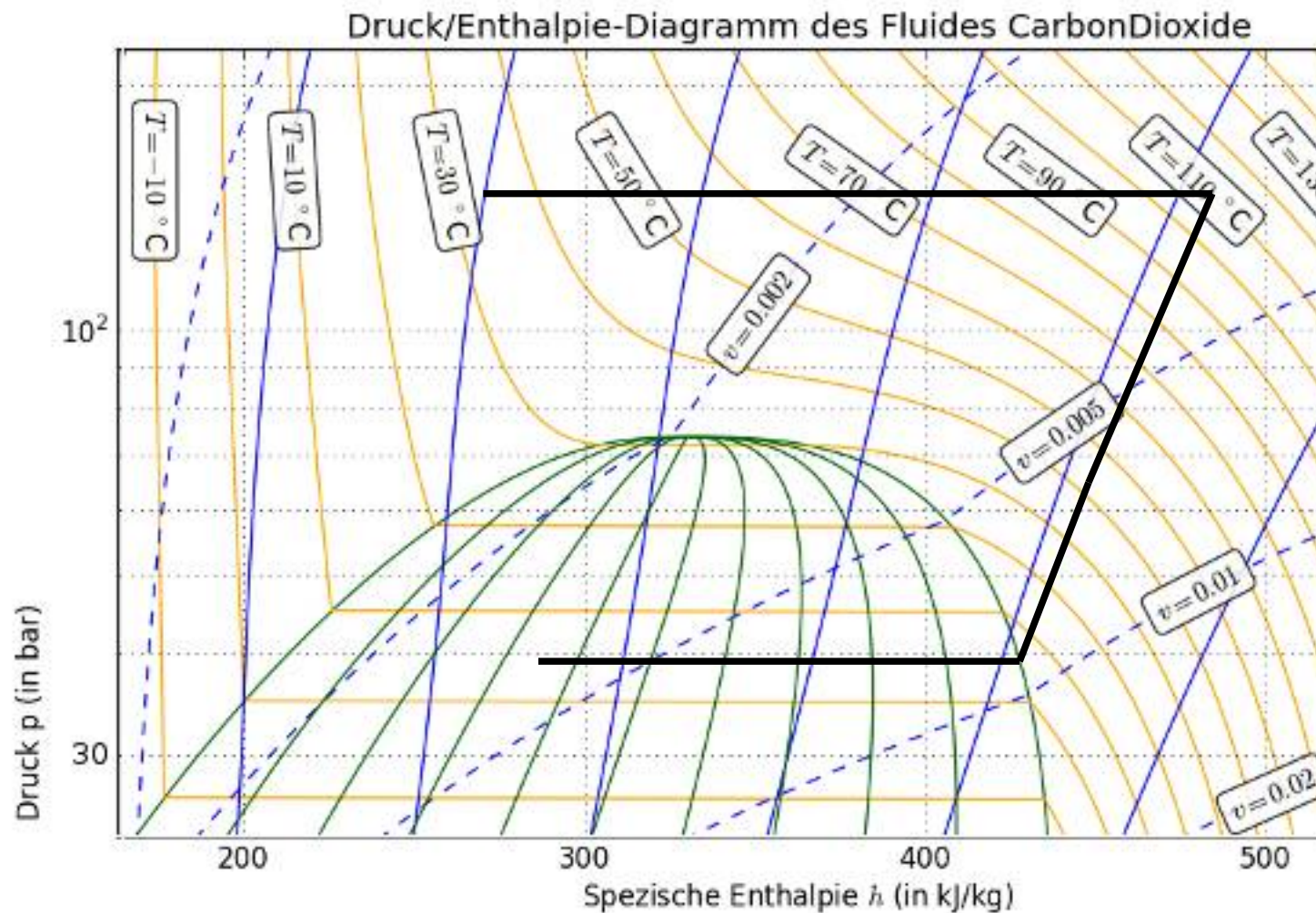
Transkritischer WP-Kreisprozess (1)

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, transkritisch:



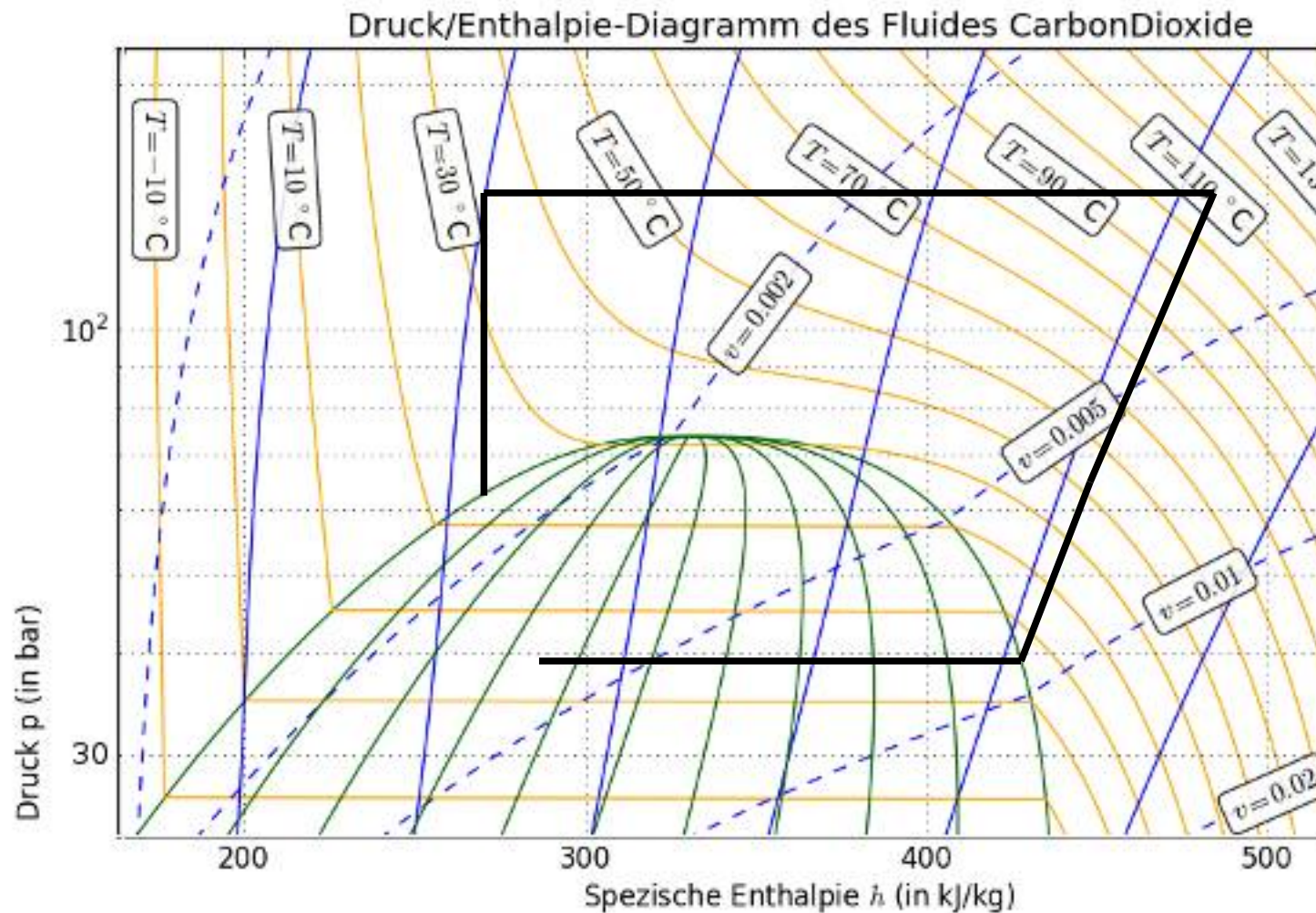
Transkritischer WP-Kreisprozess (1)

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, transkritisch:



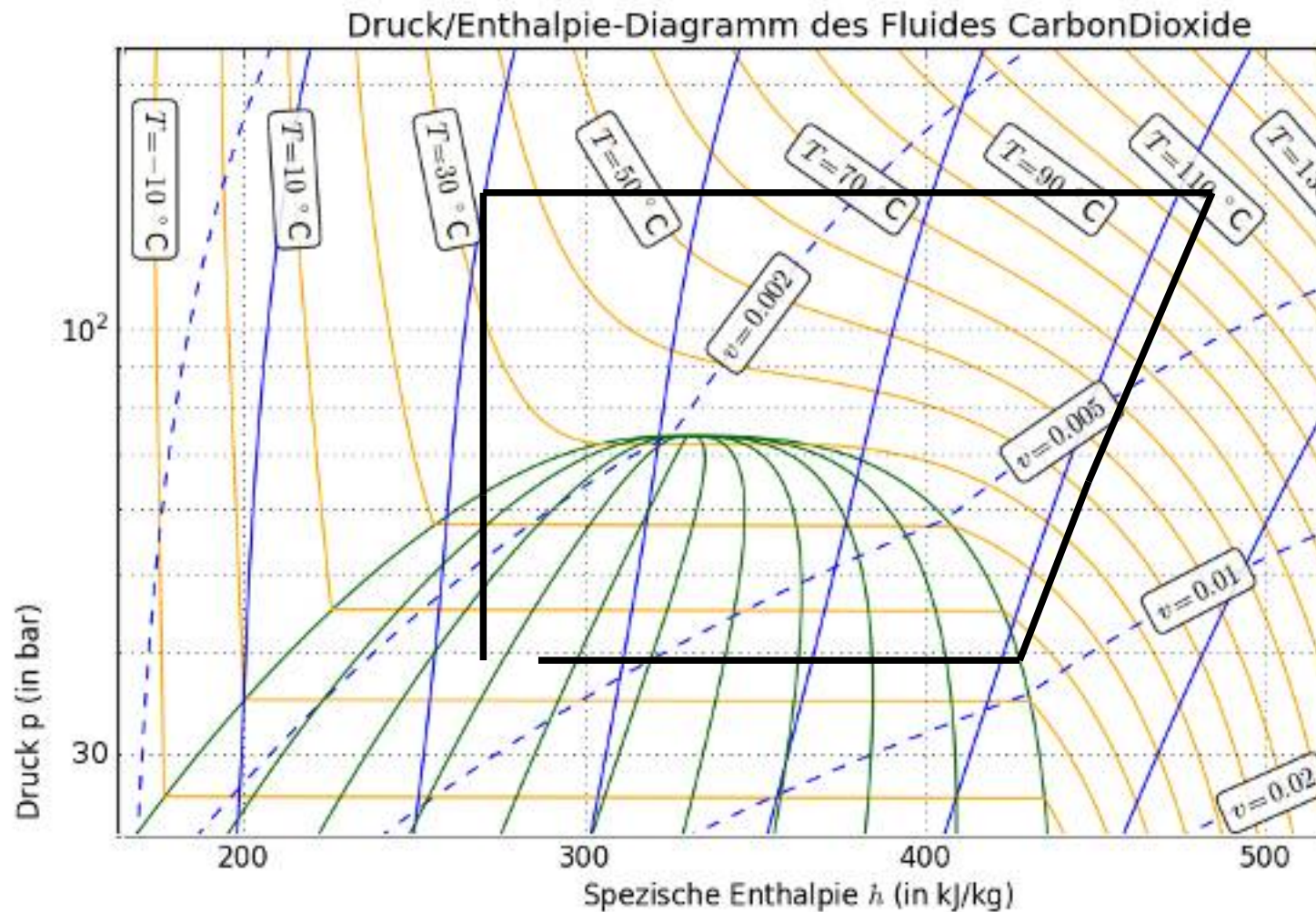
Transkritischer WP-Kreisprozess (1)

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, transkritisch:



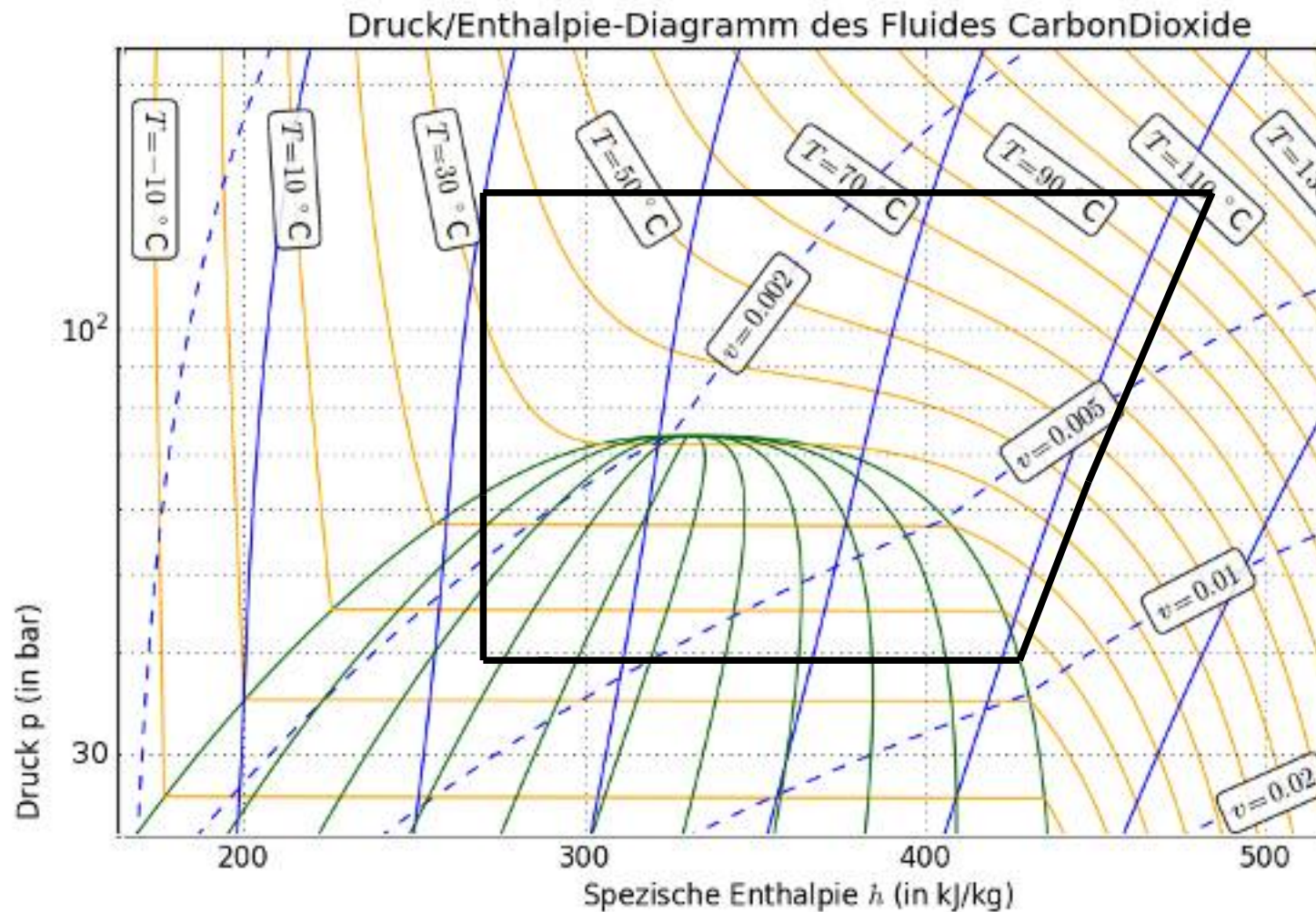
Transkritischer WP-Kreisprozess (1)

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, transkritisch:



Transkritischer WP-Kreisprozess (1)

CO₂-Wärmepumpenkreisprozess, transkritisch:



Transkritischer CO₂-WP- Kreisprozess (2)

- Wirkprinzip z.B. von Thermea-
Wärmepumpen



Transkritischer CO₂-WP- Kreisprozess (2)

- Wirkprinzip z.B. von Thermea-Wärmepumpen
- Werbung mit Arbeitszahlen von 4..6
(Bei Exkursion gesehen: 2)



Transkritischer CO₂-WP- Kreisprozess (2)

- Wirkprinzip z.B. von Thermea-Wärmepumpen
- Werbung mit Arbeitszahlen von 4..6
(Bei Exkursion gesehen: 2)
- **Problem:** Extreme Temperaturspreizung von 30 .. 80 (!) Grad erforderlich – sonst starker Einbruch bei Arbeitszahl



Transkritischer CO₂-WP- Kreisprozess (2)

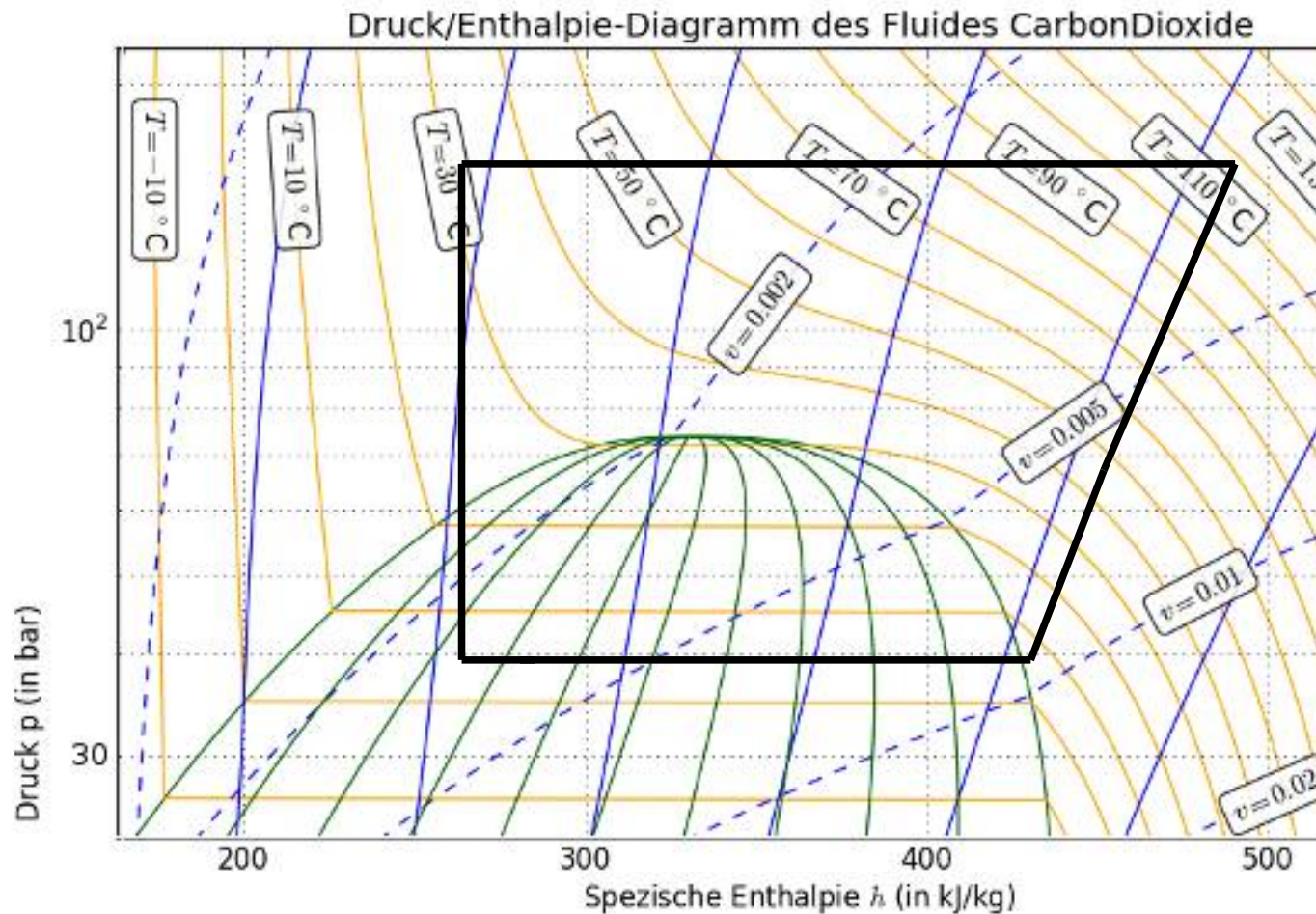
- Wirkprinzip z.B. von Thermea-Wärmepumpen
- Werbung mit Arbeitszahlen von 4..6
(Bei Exkursion gesehen: 2)
- **Problem:** Extreme Temperaturspreizung von 30 .. 80 (!) Grad erforderlich – sonst starker Einbruch bei Arbeitszahl
- **Vorteil:** Potential für bessere Arbeitszahlen als subkritische Maschinen



Transkritischer Prozess (1)

Analyse: Potential & Grenzen

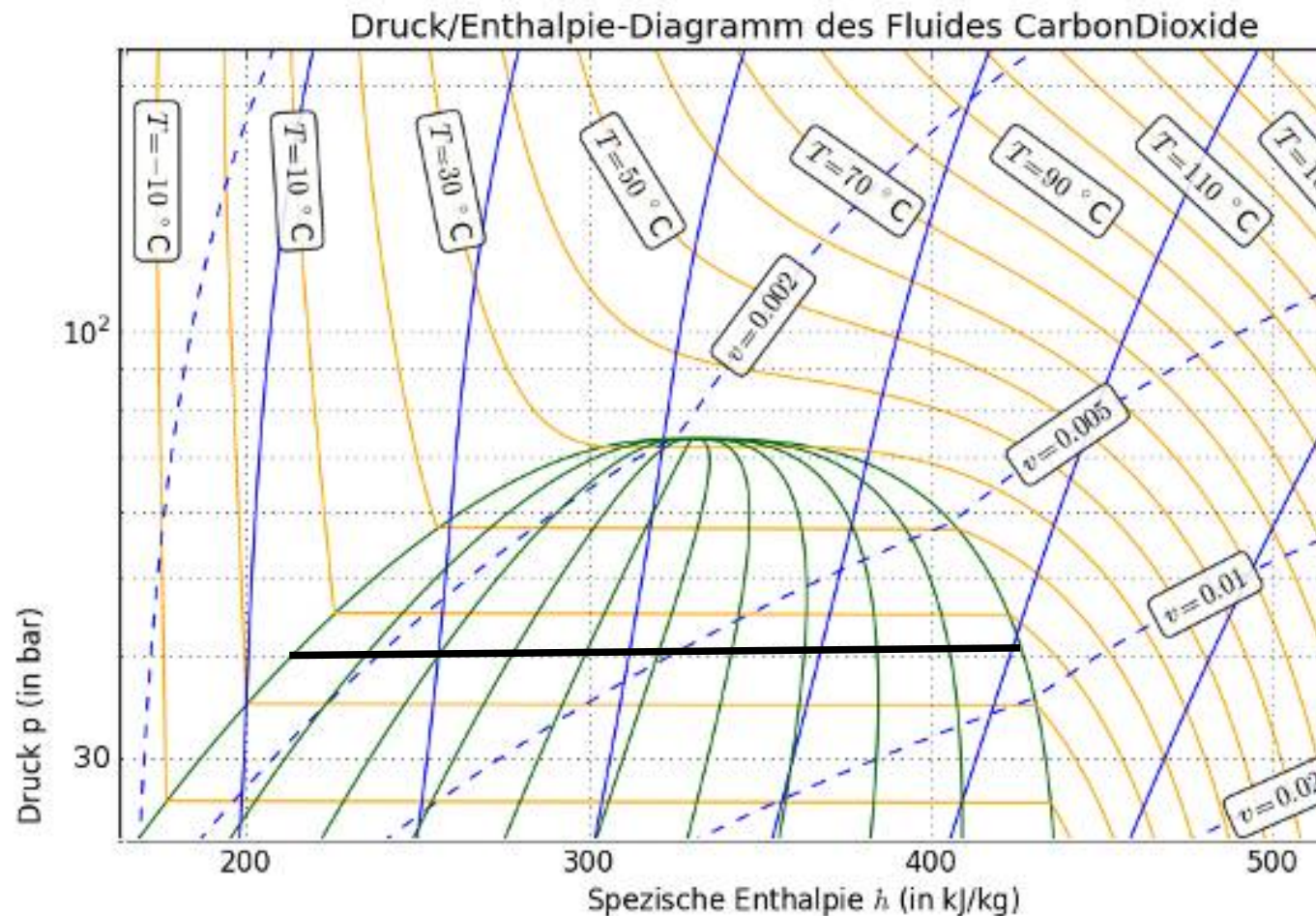
Zur Erinnerung:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

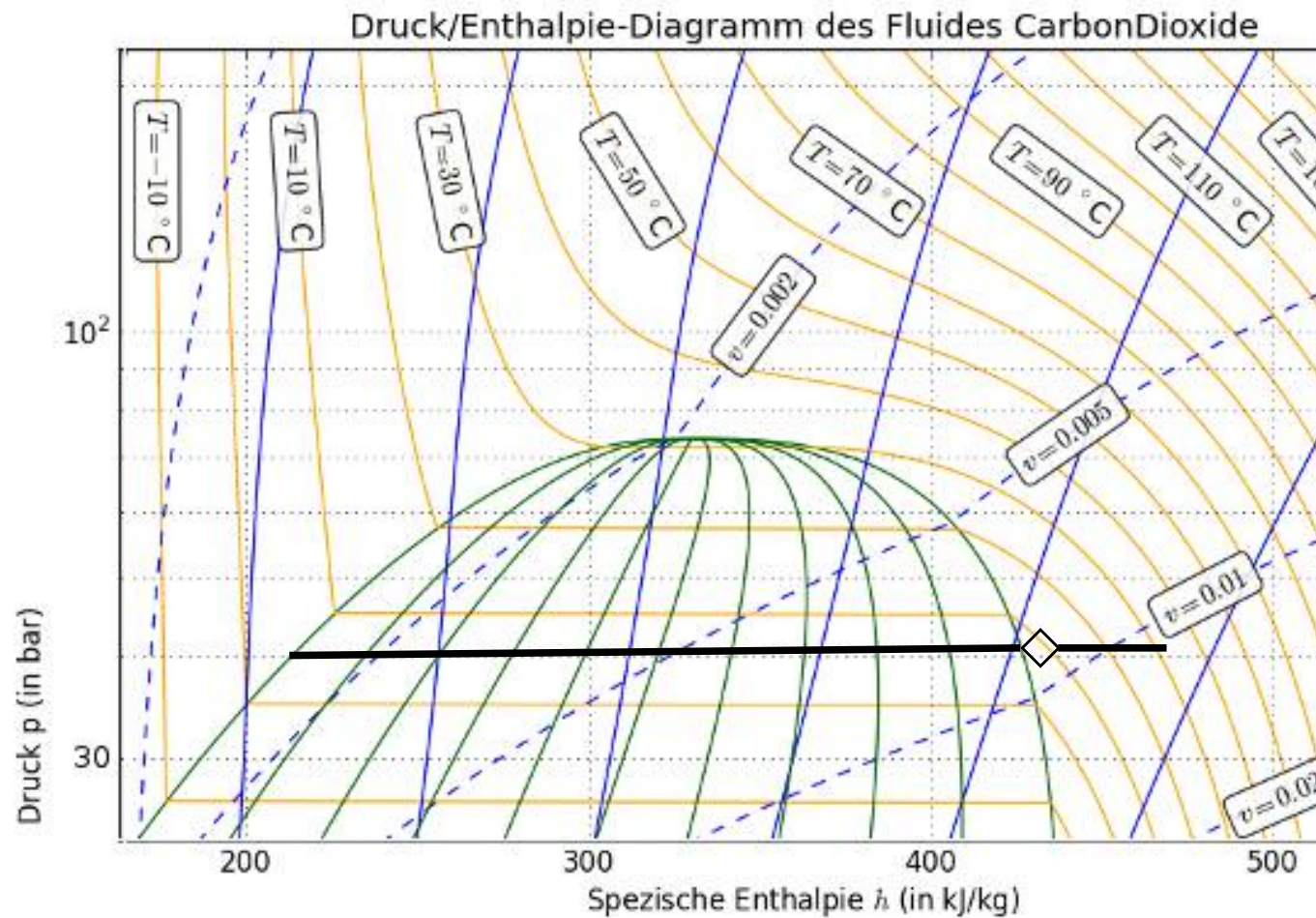
Vollständig optimierter Prozess:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

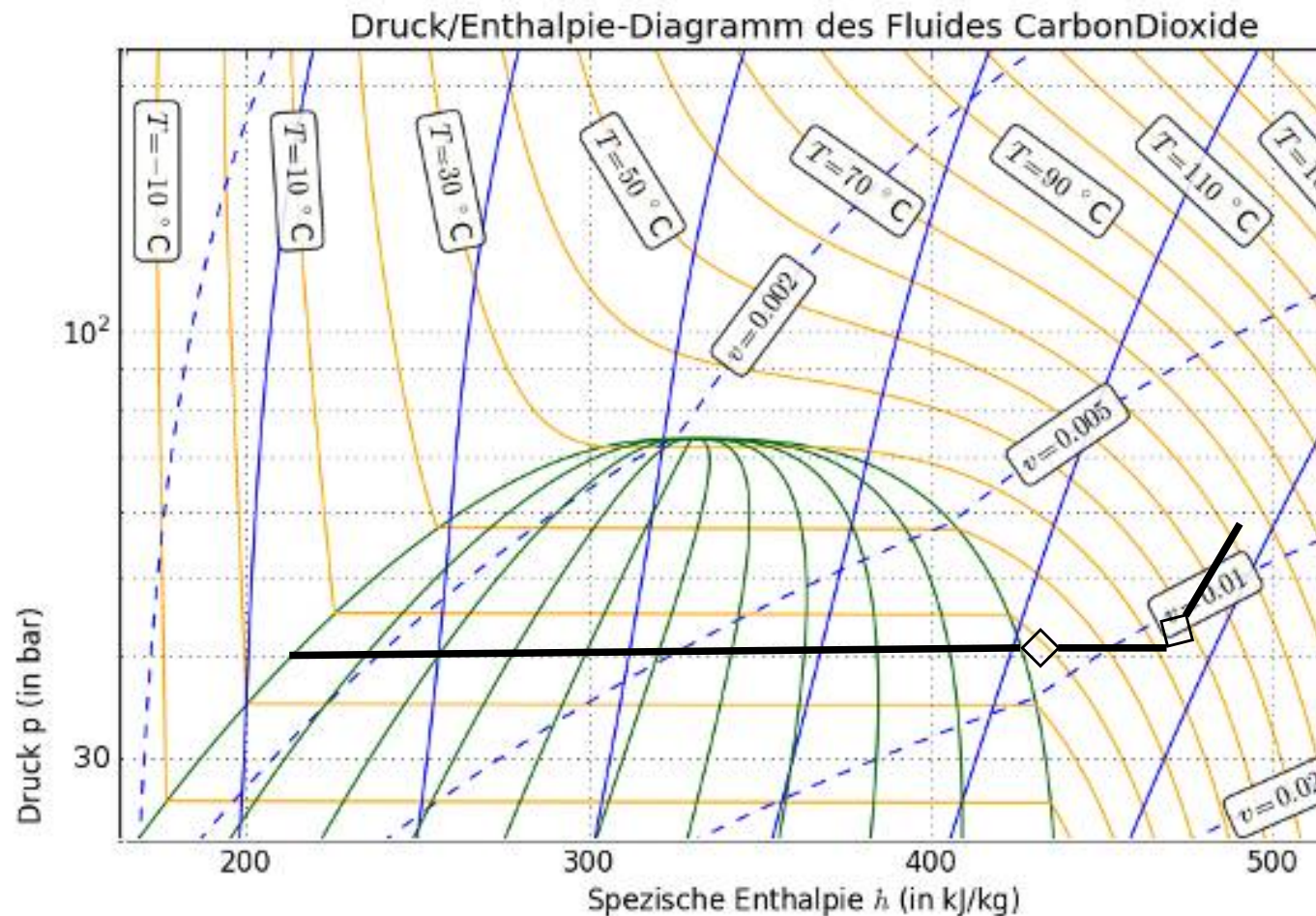
Vollständig optimierter Prozess:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

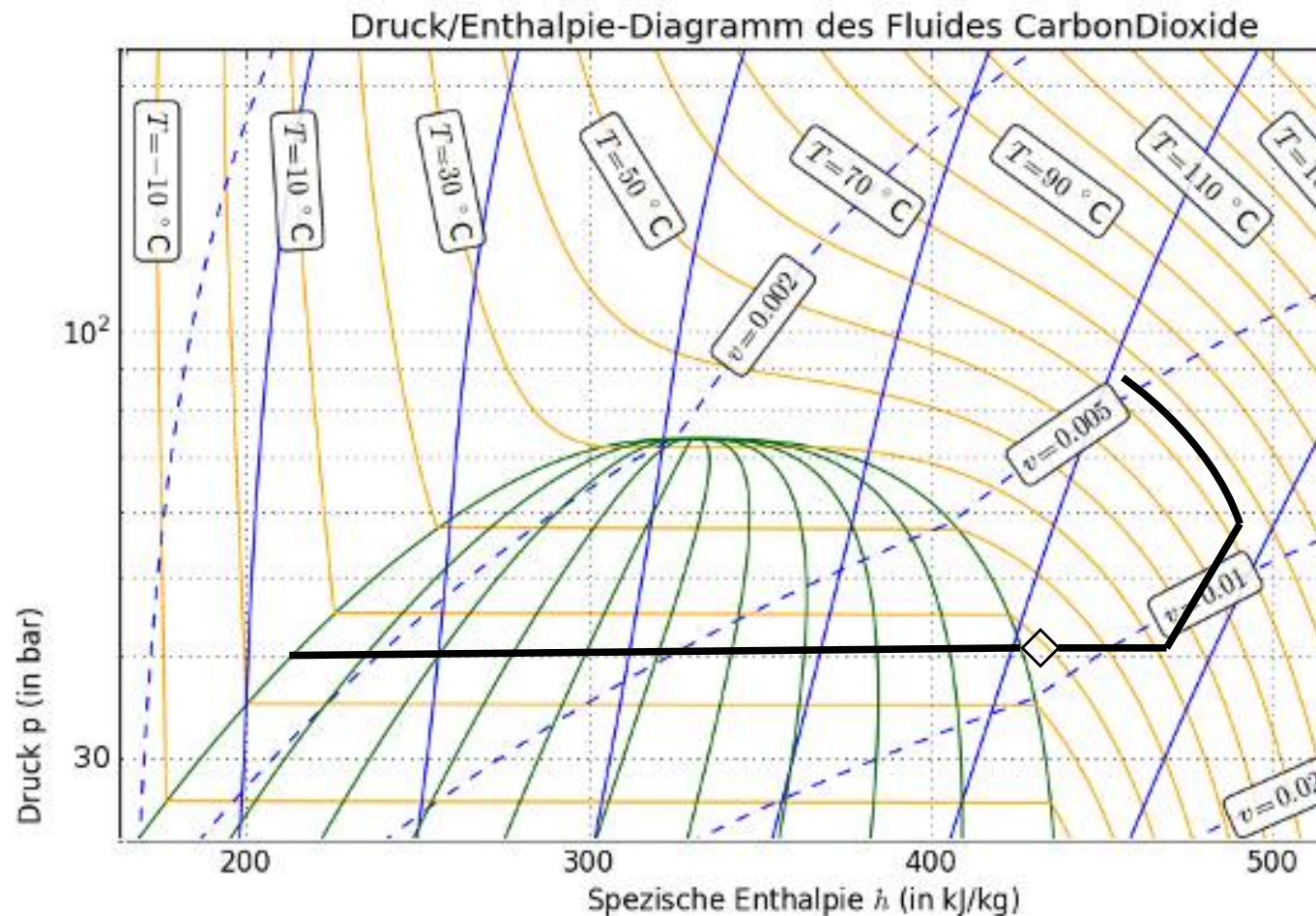
Vollständig optimierter Prozess:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

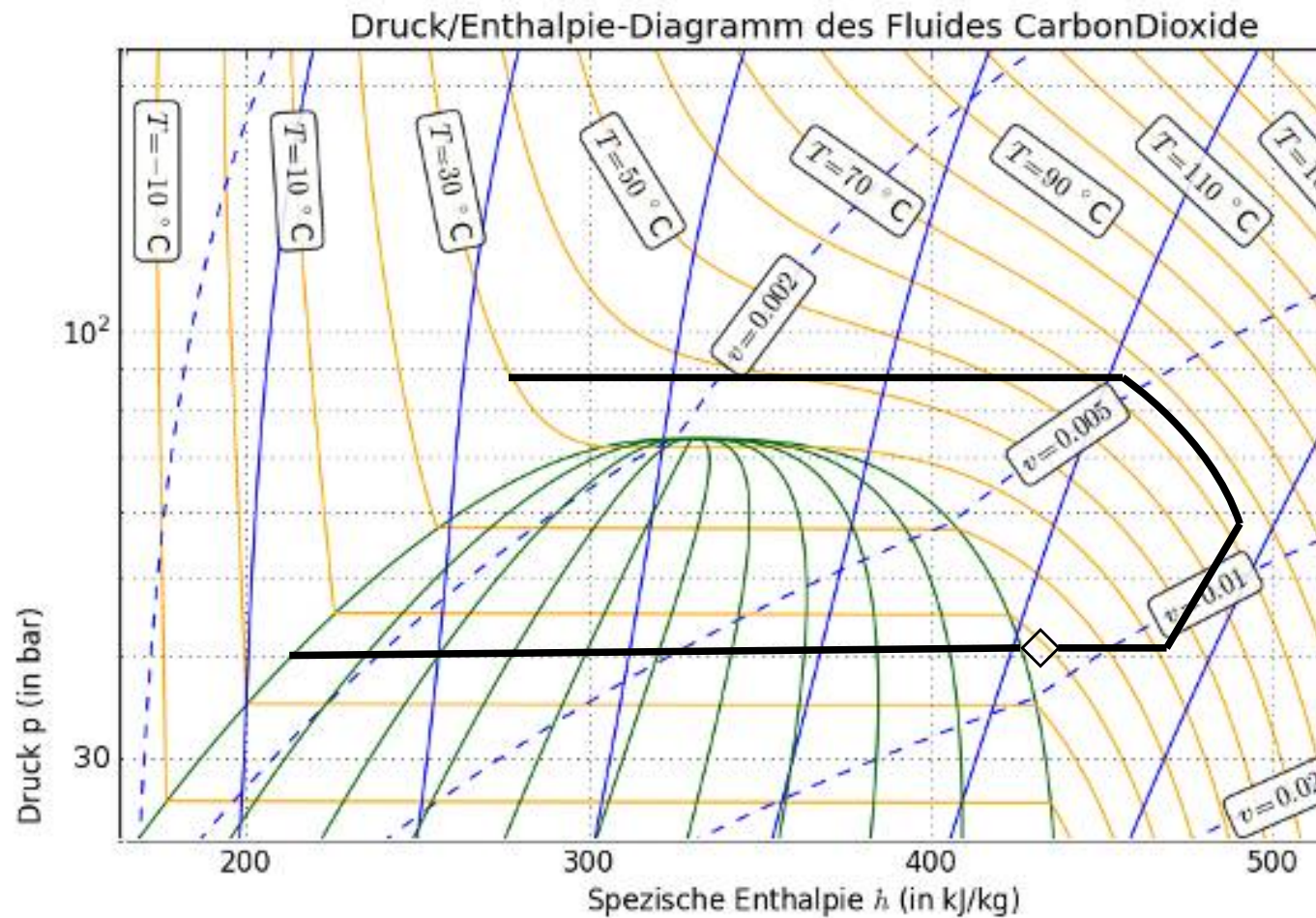
Vollständig optimierter Prozess:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

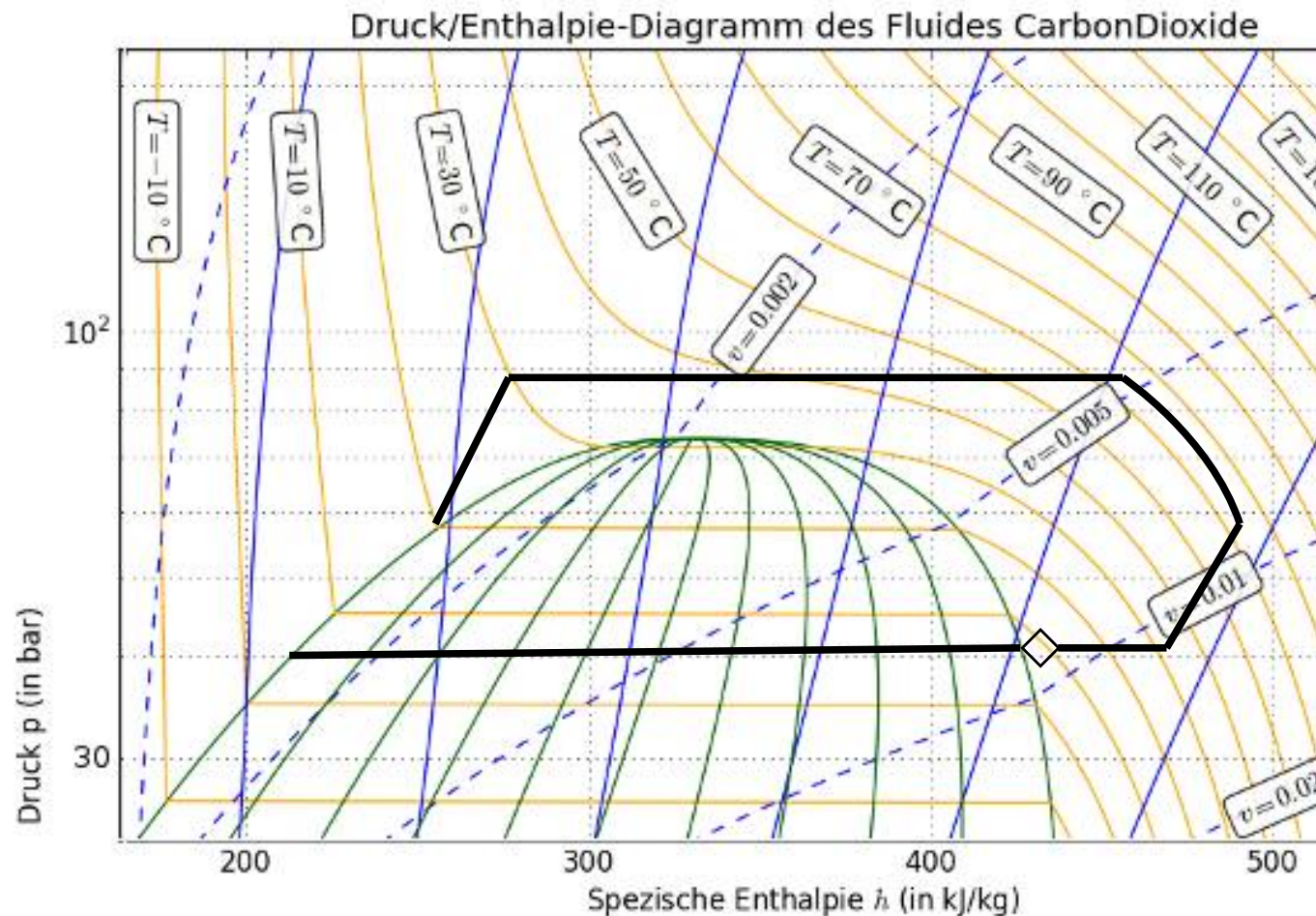
Vollständig optimierter Prozess:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

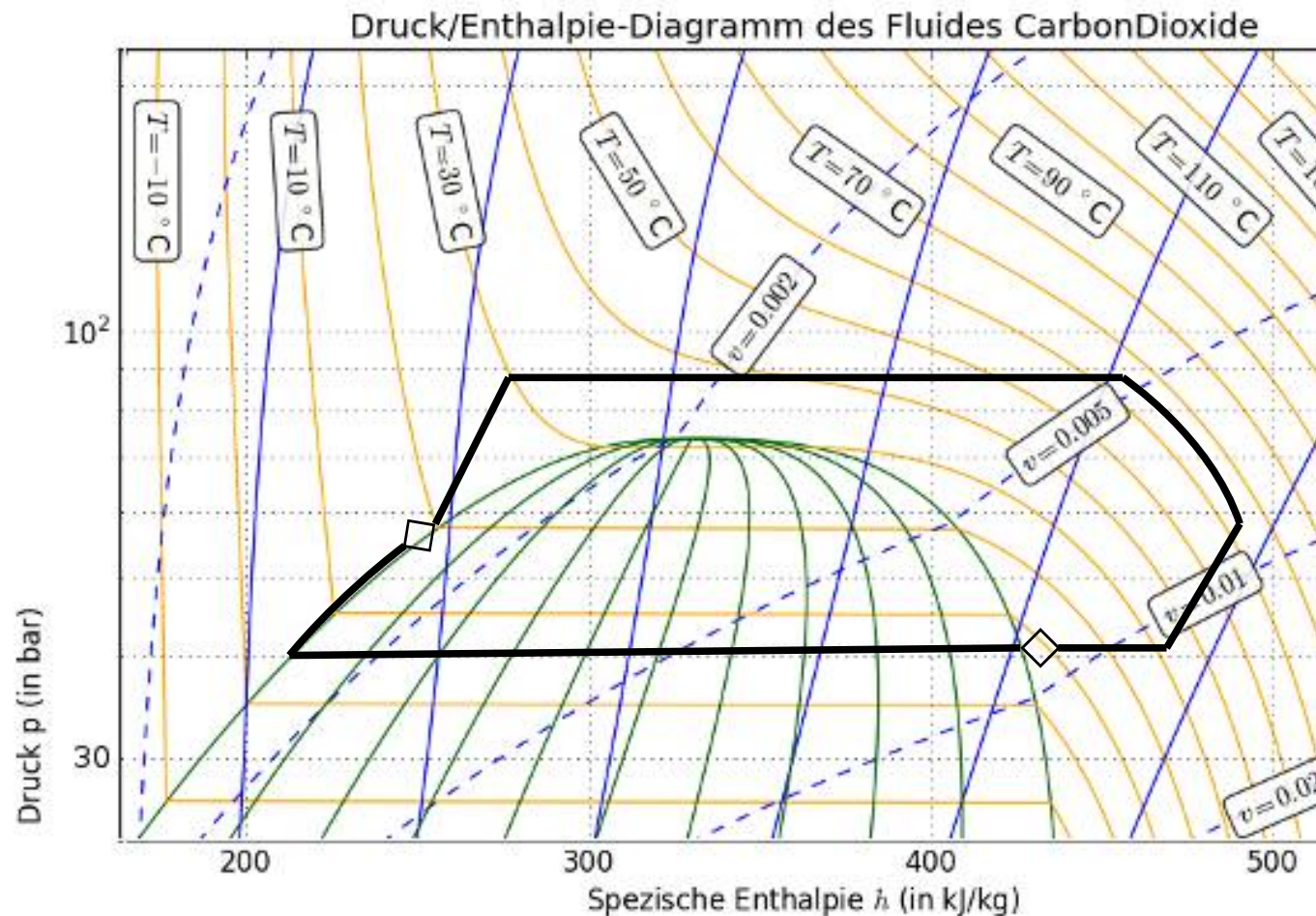
Vollständig optimierter Prozess:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

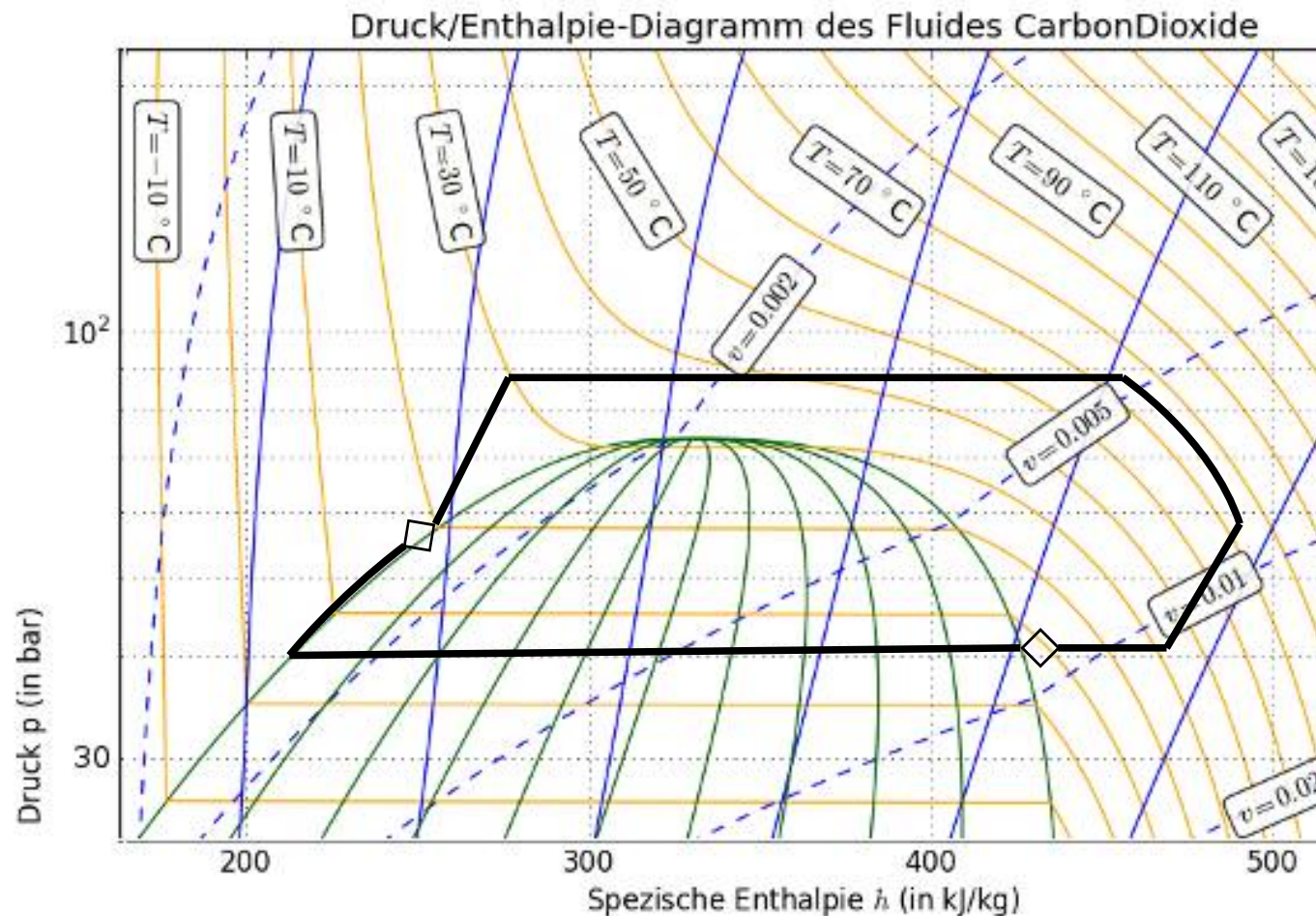
Vollständig optimierter Prozess:



Transkritischer Prozess (2)

Analyse: Potential & Grenzen

Vollständig optimierter Prozess:



7 Phasen
(statt 4) !



Transkritischer Prozess (3)

Analyse: Potential && Grenzen

...aber:

- ...sehr hohe Komplexität
==> extremer technischer Aufwand
- ...ca. 20% werden dennoch „verschenkt“:
==> Kältemittel bzw. der untere Teilprozess ist „schuld“

Lösung: Reiner Gasprozess
(mit zweifach isothermer Prozessführung)

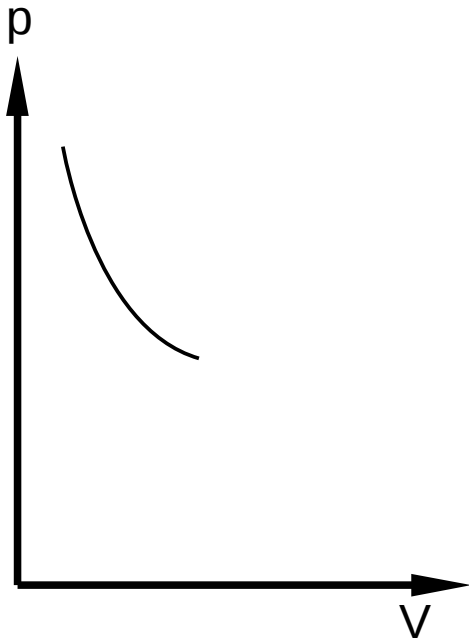


Effiziente Gas-Kreisprozesse

- Entscheidend ist isotherme Prozessführung bei Wärmeabgabe und -aufnahme (ohne Enthalpie-Änderung)
 - Impliziert variablen Druck und ggf. hohe Verdichtungsverhältnisse
- Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832)
==> „Carnot-Prozess(e)“



Carnot-Prozesse

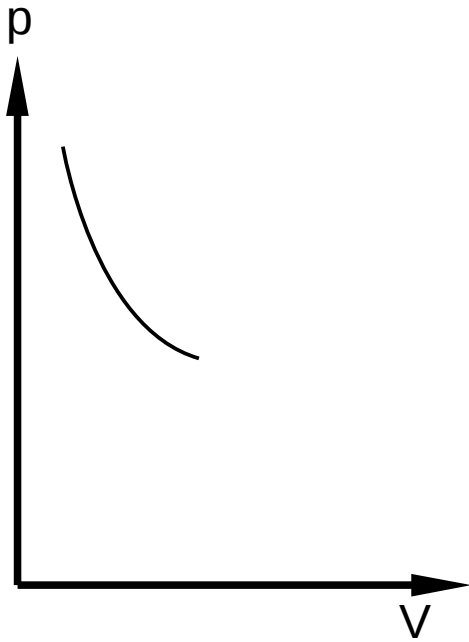


Carnot-Prozesse

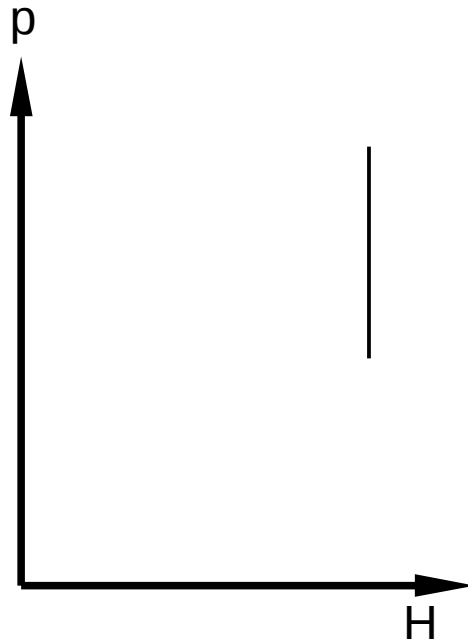
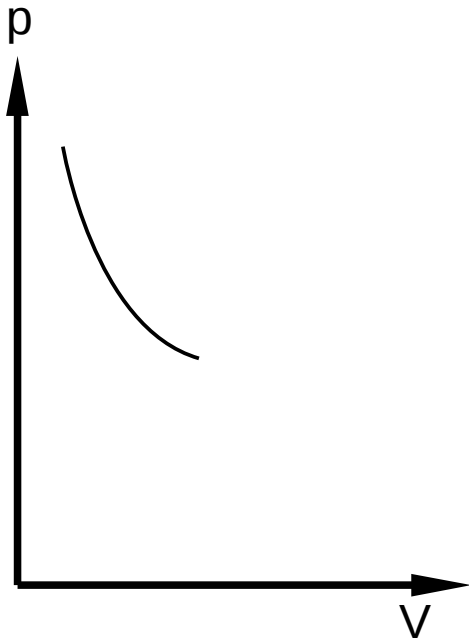
Unsichtbar:

- x Übertragene Wärme
- x Temperatur des Arbeitsgases

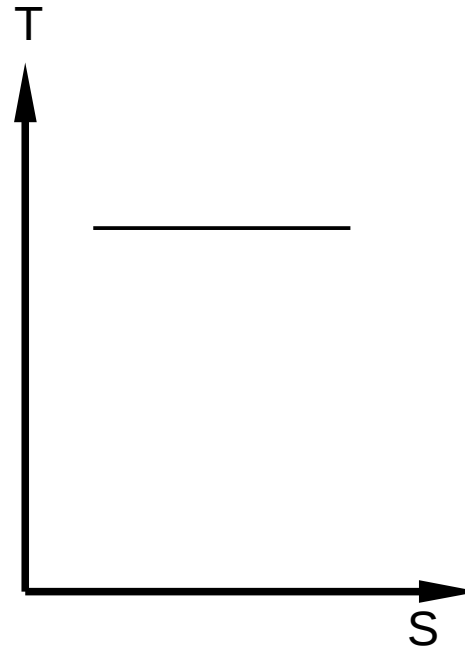
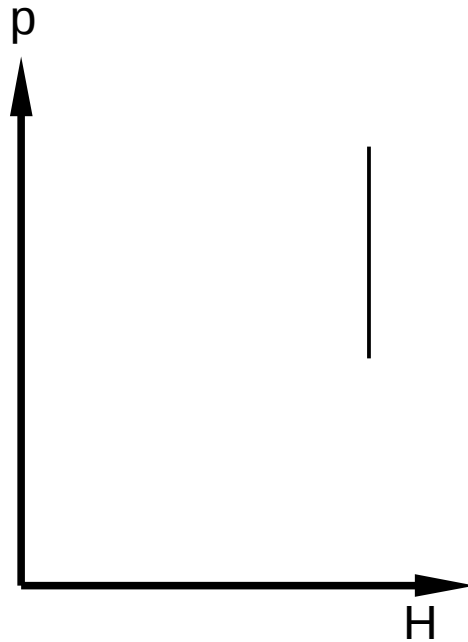
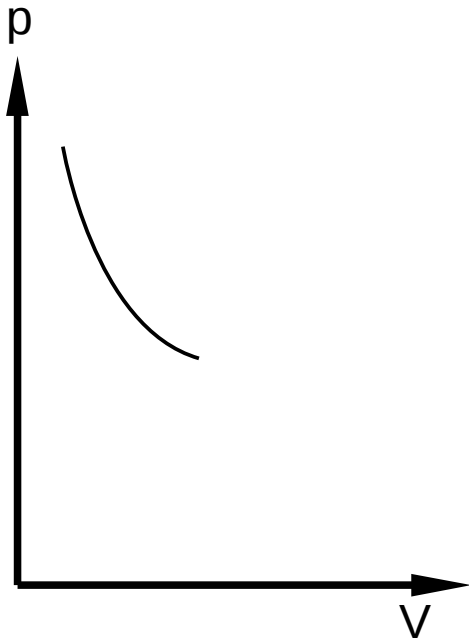
! Zwei von 6 Zustandgrößen sind frei wählbar, Rest ergibt sich !



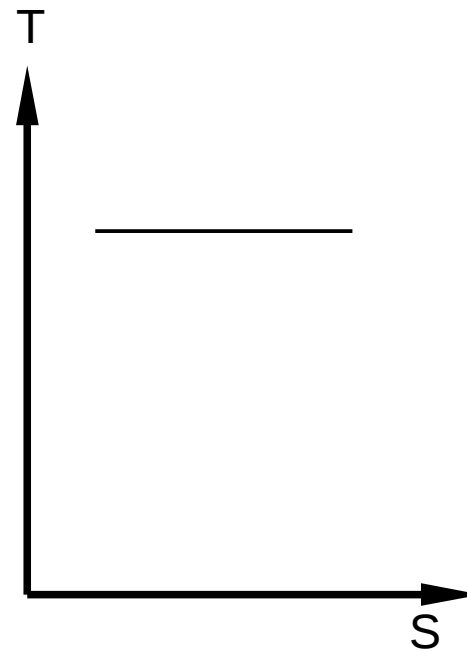
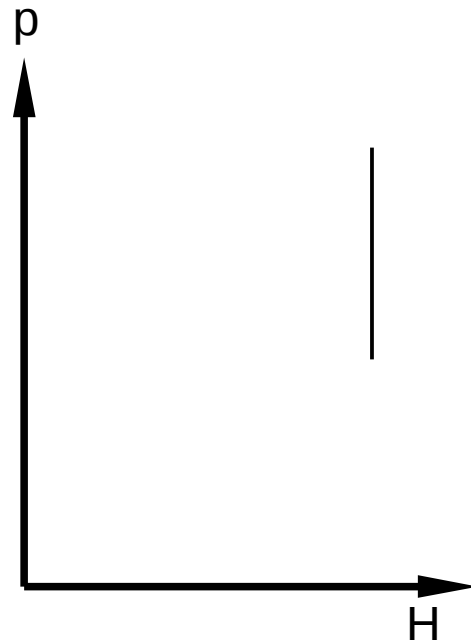
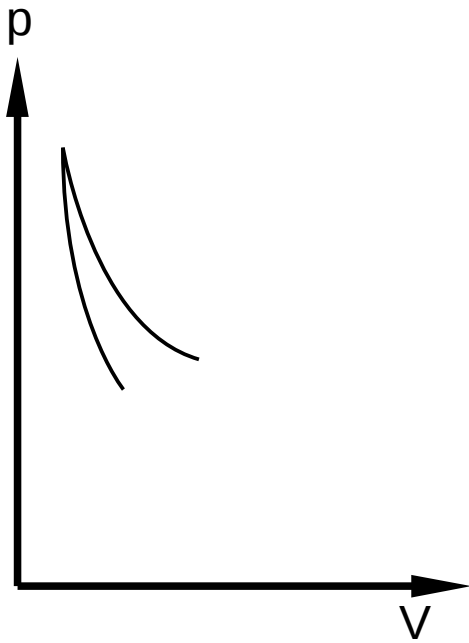
Carnot-Prozesse



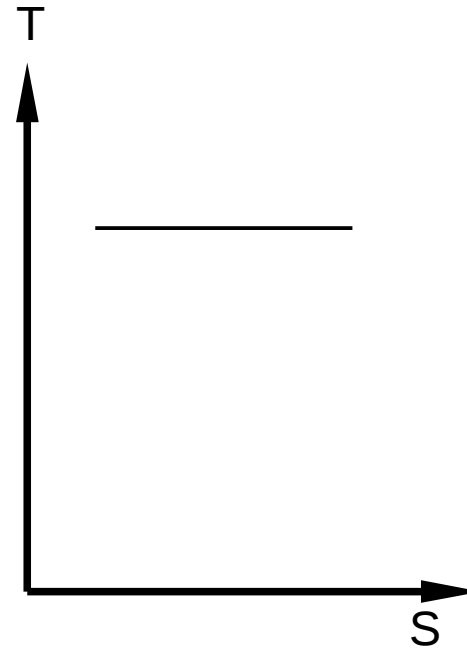
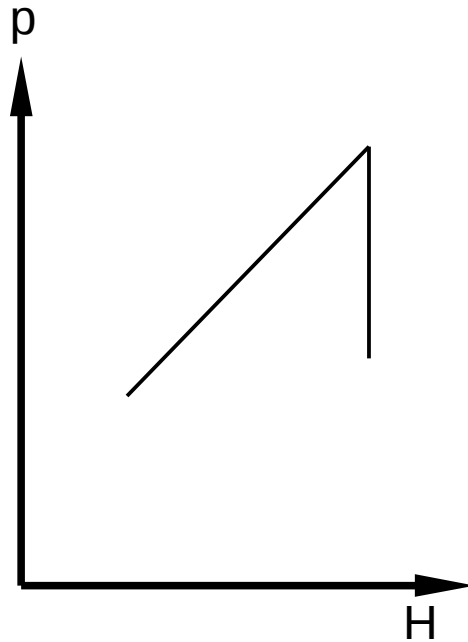
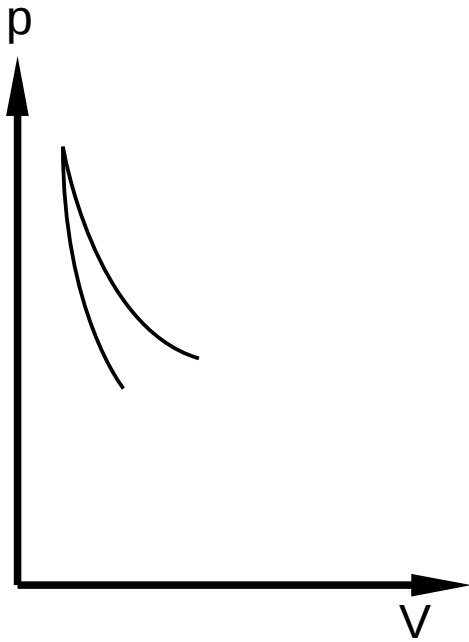
Carnot-Prozesse



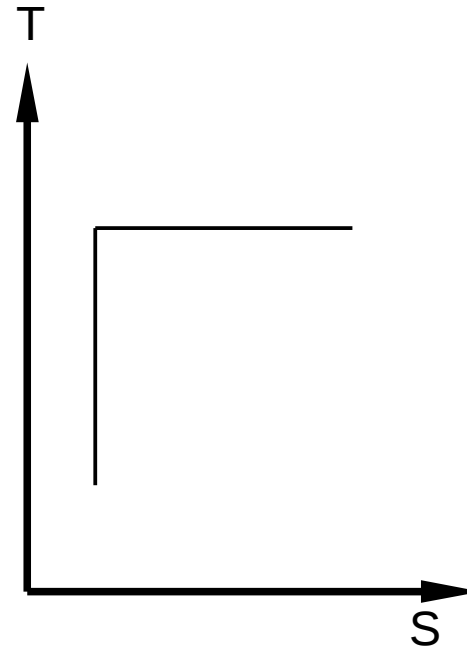
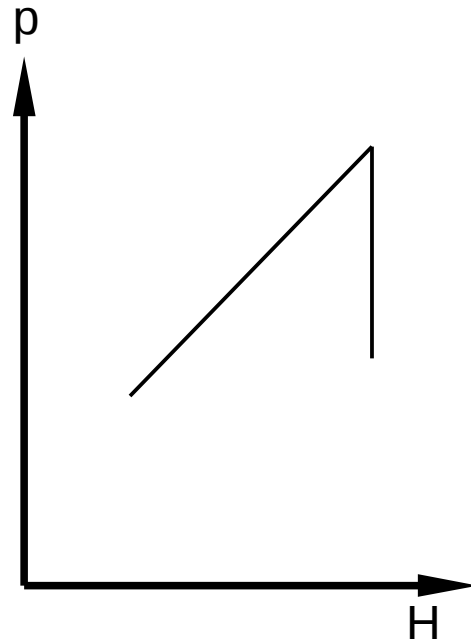
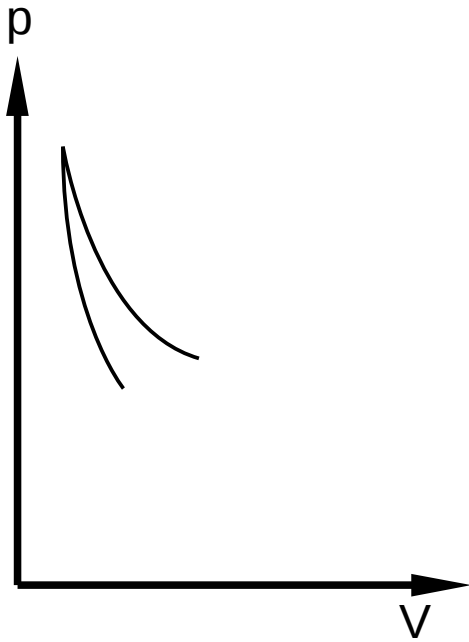
Carnot-Prozesse



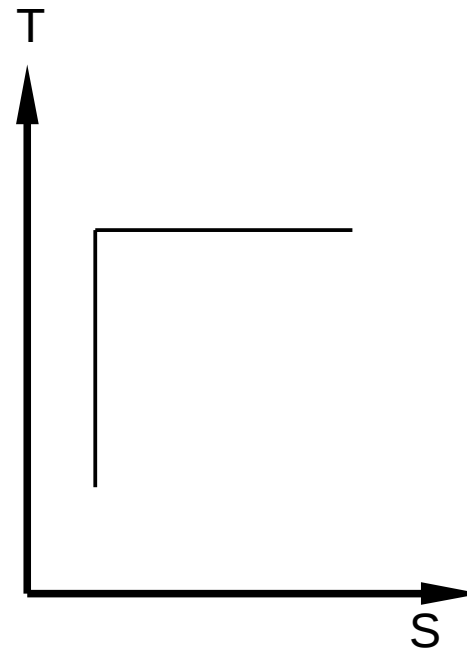
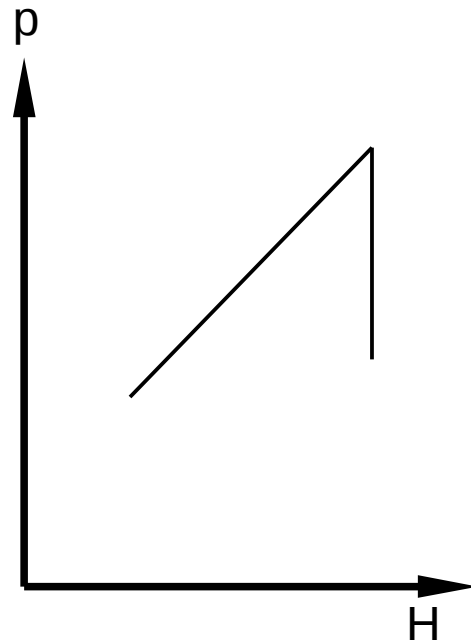
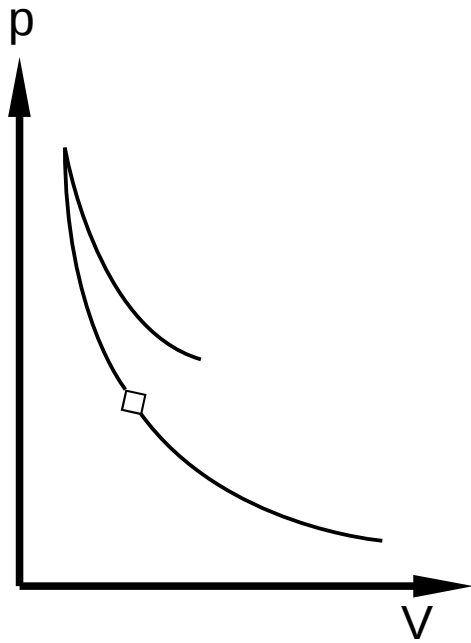
Carnot-Prozesse



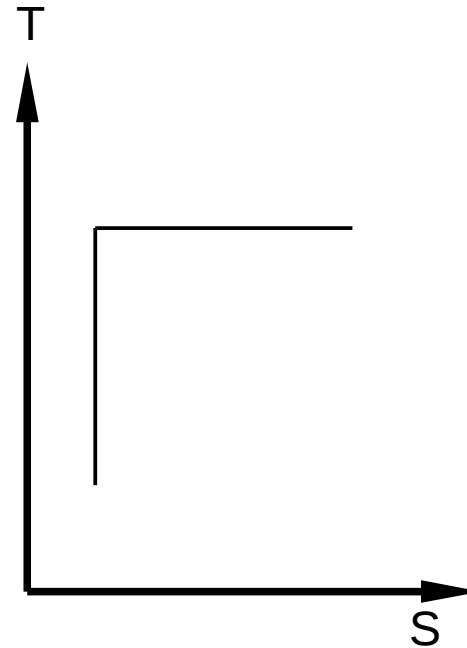
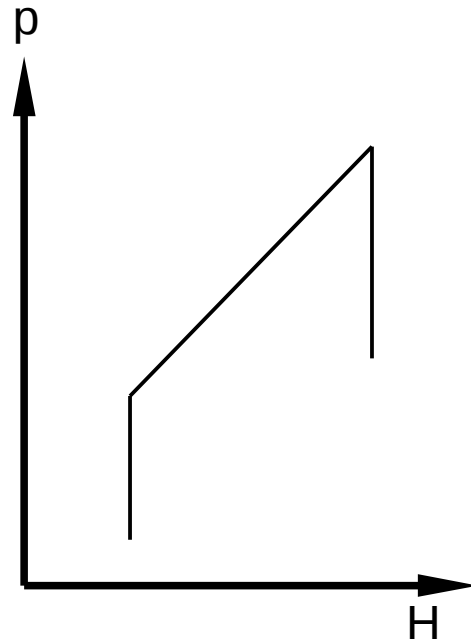
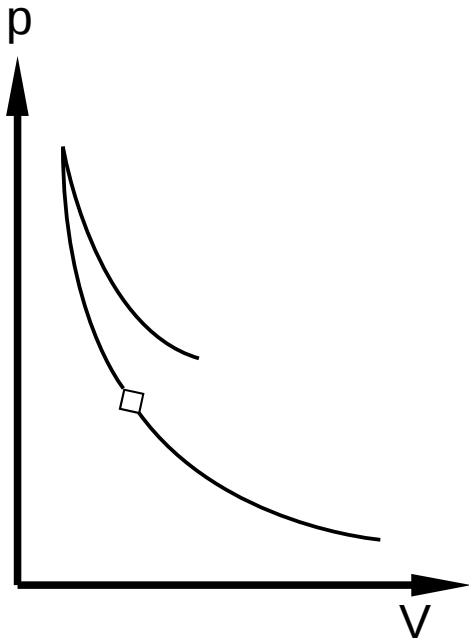
Carnot-Prozesse



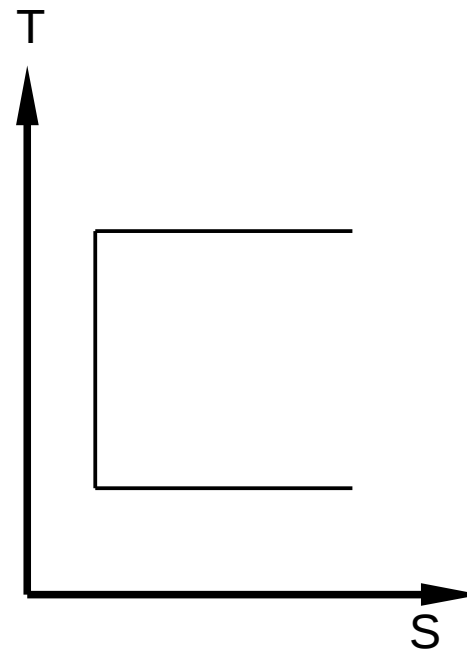
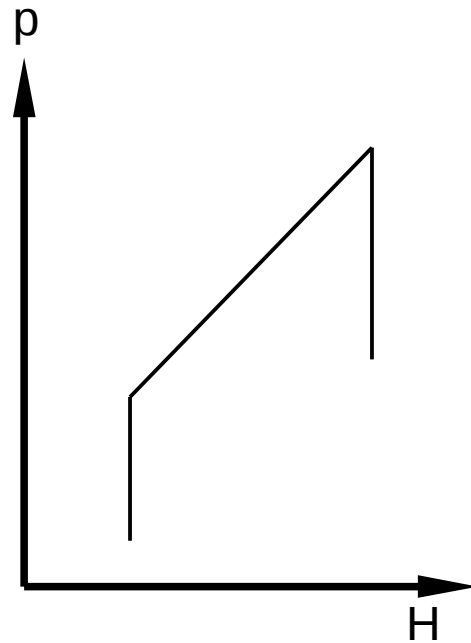
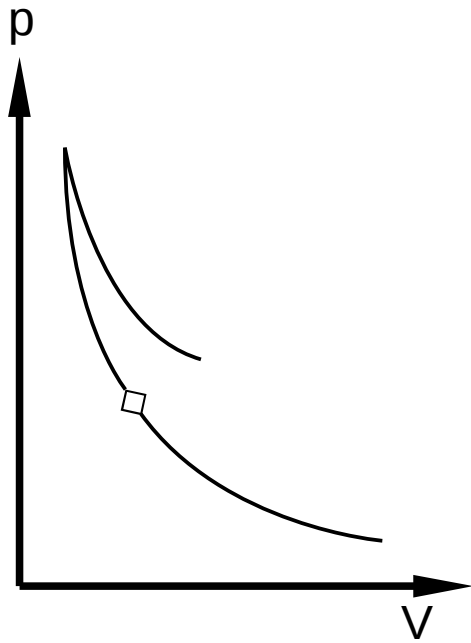
Carnot-Prozesse



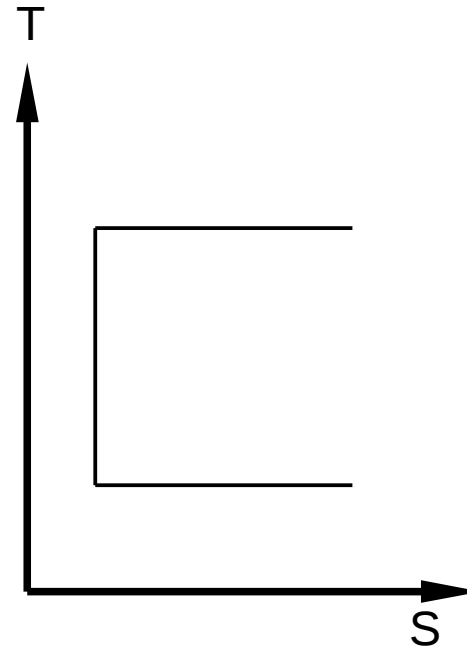
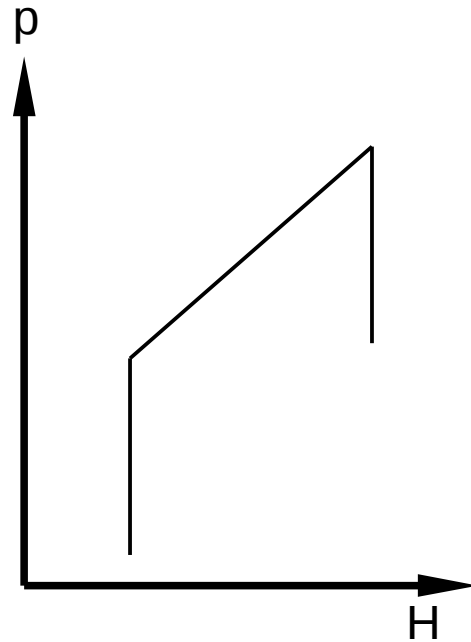
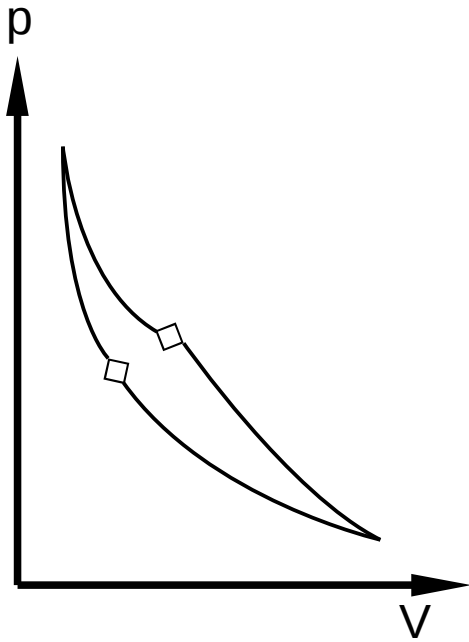
Carnot-Prozesse



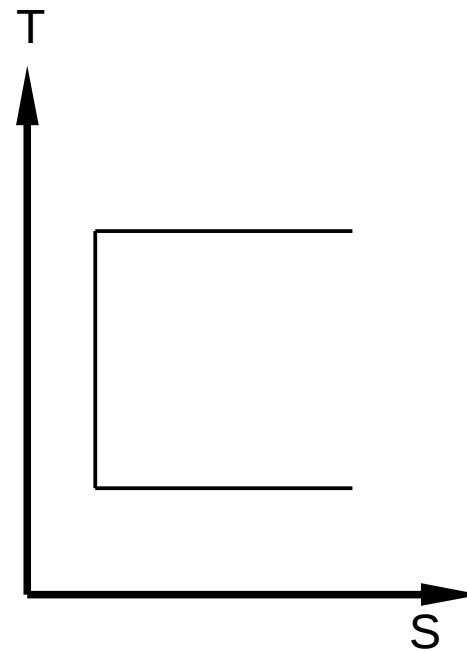
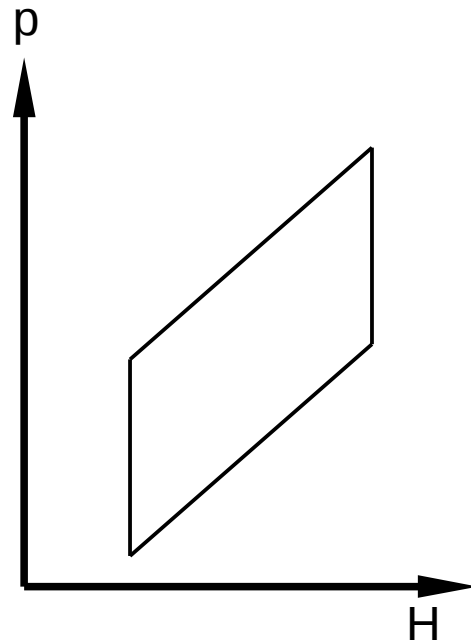
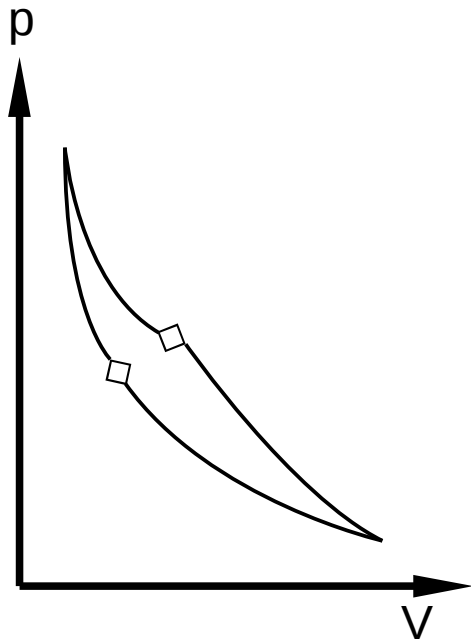
Carnot-Prozesse



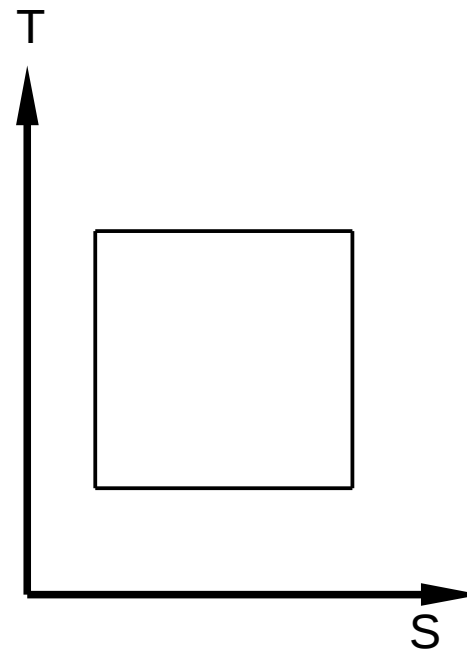
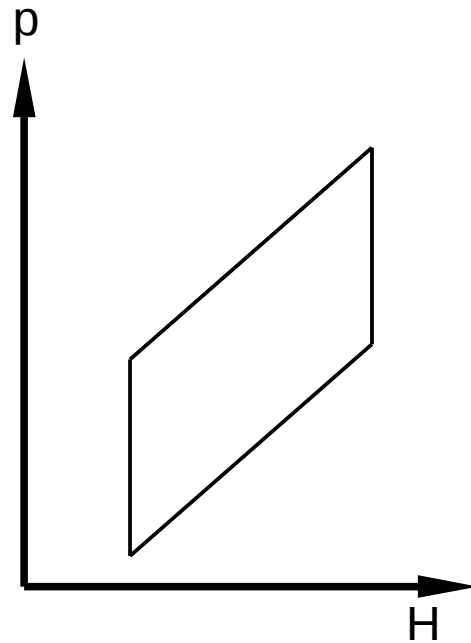
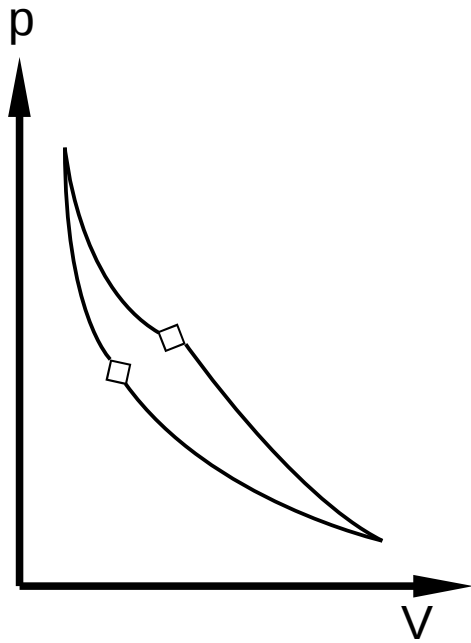
Carnot-Prozesse



Carnot-Prozesse



Carnot-Prozesse



Carnot-Prozesse (2)

Die Urform des Carnot-Prozesses hat verschiedene Nachteile:

- Niedrige Leistungsdichte
- Vergleichsweise hohe Drücke
- Die Arbeit der adiabaten Entspannungs-Phase muss für die adiabate Kompressions-Phase gespeichert & genutzt werden

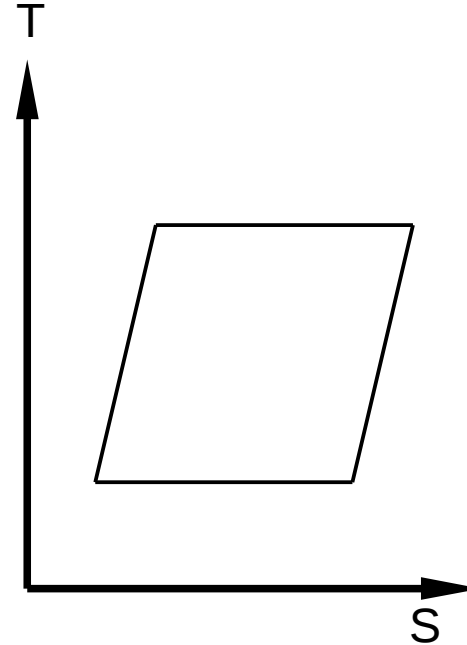
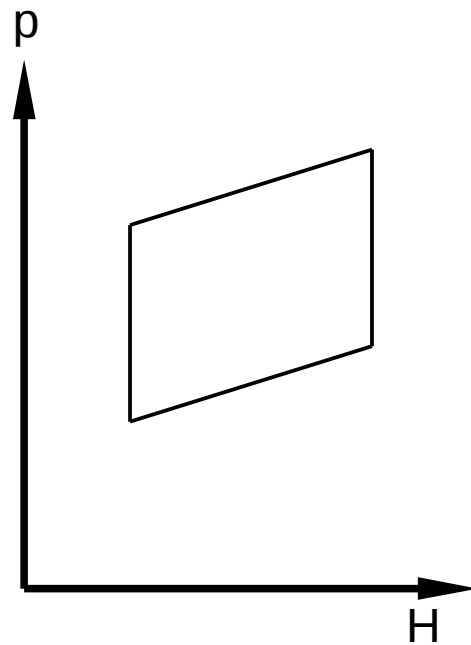
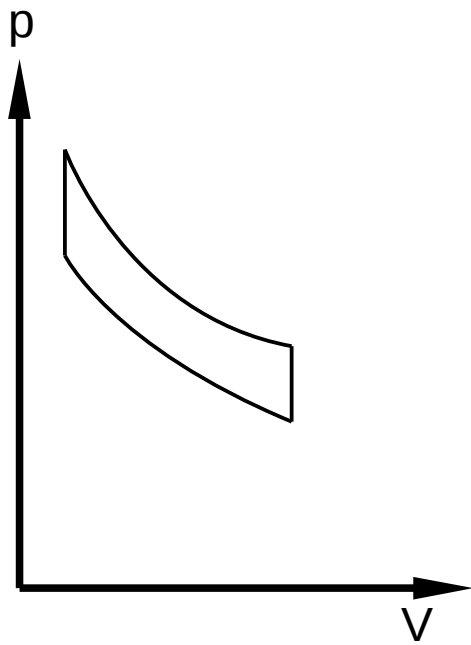
==> Ungeeignet für technische Nutzung

(ausgenommen Sonder-Anwendungen, z.B. für kleine Delta-T)



Carnot-Variationen (1)

Stirling- & Ericsson-Prozesse



Anm.: Statt der hier gezeigten isochoren Änderung kann man auch isobar arbeiten – muss dann aber u.U. Wärme austauschen und (wenig) Arbeit zwischenspeichern.



Carnot-Variationen (2)

Vorteile gegenüber Carnot-Original:



Carnot-Variationen (2)

Vorteile gegenüber Carnot-Original:

- Höhere Leistungsdichte möglich
(vergleichbar mit transkritischem CO₂-Kreisprozess)



Carnot-Variationen (2)

Vorteile gegenüber Carnot-Original:

- Höhere Leistungsdichte möglich
(vergleichbar mit transkritischem CO₂-Kreisprozess)
- Leichte Änderung der Temperatur, nur
(Gegenstrom-)Wärmetauscher



Carnot-Variationen (2)

Vorteile gegenüber Carnot-Original:

- Höhere Leistungsdichte möglich
(vergleichbar mit transkritischem CO₂-Kreisprozess)
- Leichte Änderung der Temperatur, nur
(Gegenstrom-)Wärmetauscher
- Flexibel bzgl. Arbeitspunkt & Spreizung



Carnot-Variationen (2)

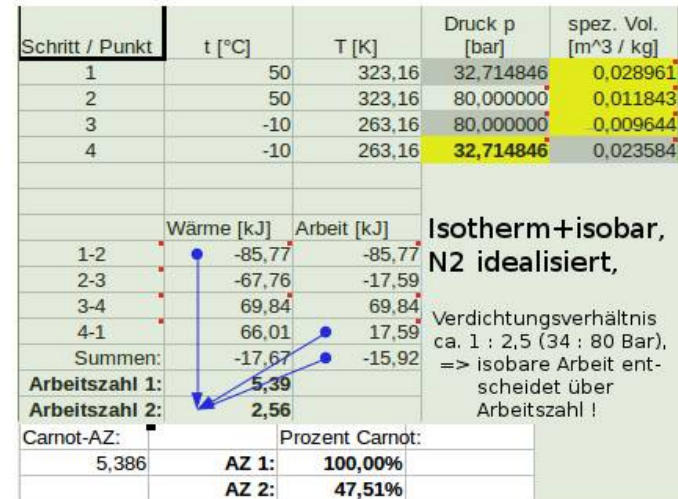
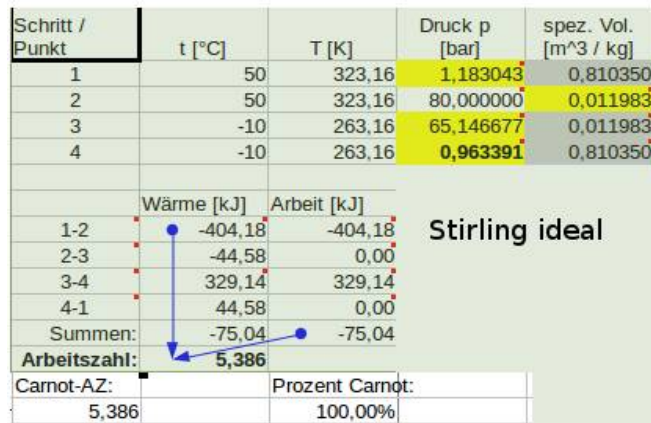
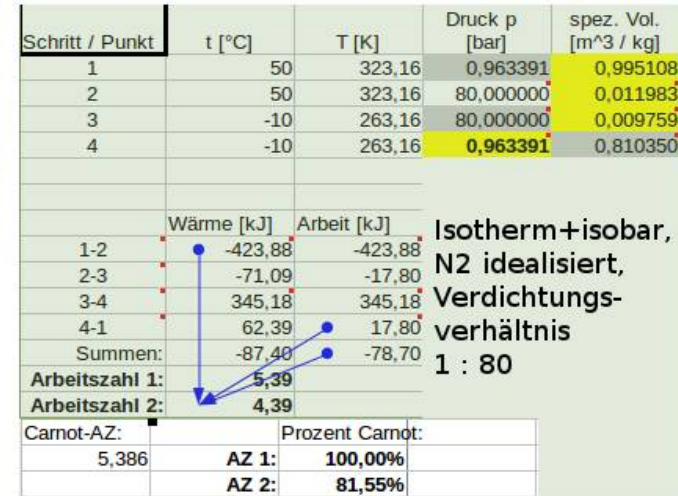
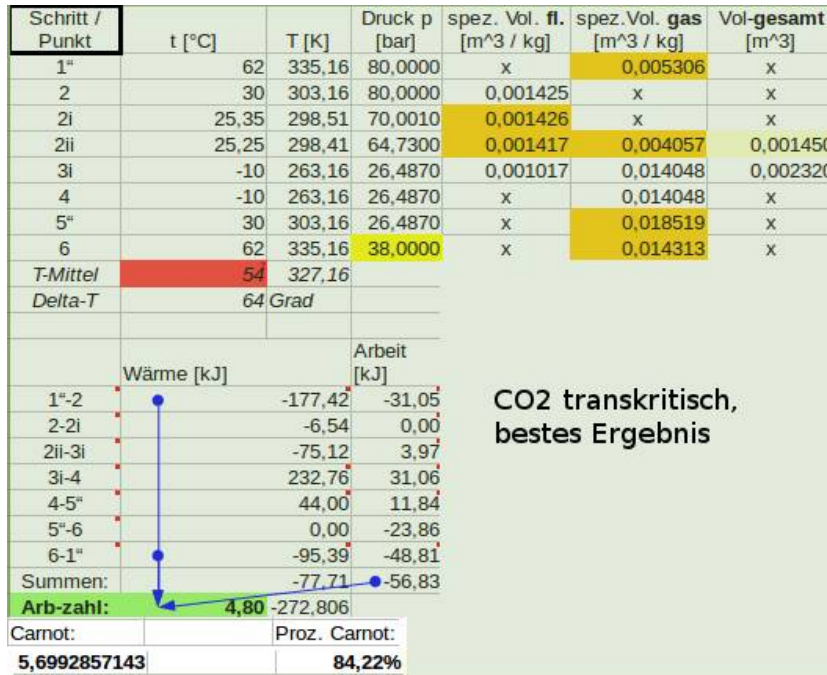
Vorteile gegenüber Carnot-Original:

- Höhere Leistungsdichte möglich
(vergleichbar mit transkritischem CO₂-Kreisprozess)
- Leichte Änderung der Temperatur, nur
(Gegenstrom-)Wärmetauscher
- Flexibel bzgl. Arbeitspunkt & Spreizung
- Es gibt bereits industrielle Umsetzungen



Carnot-Variationen (3)

Berechnungsbeispiele



Inhalt

1. Bedeutung von Wärmepumpen
2. Physikalischer Überflug
- 3. Ein Blick in die Zukunft**



Neue Anwendungsfelder (1)

für effiziente Wärmekraftmaschinen

Bestandsaufnahme:

Gas-Kreisprozesse der „Carnot-Klasse“:

- Reversibler Betrieb für
- kleine Delta-T von z.B. 30° mit
- $AZ > 10$ sowie
- $\eta > 10\%$

==> Spielraum für neue Anwendungen,
z.B. saisonale Energiespeicher



Neue Anwendungsfelder (2)

Saisonale Energiespeicher

Ausgangslage:

→ Erdspeicher können saisonal Wärme speichern, aber

- Sehr groß (für Effizienz)
- „Impedanzproblem“:
 - ==> Speichertemperatur 10 – 30 Grad
 - ==> Nachfrage bei 30 – 60 Grad



Neue Anwendungsfelder (2)

Saisonale Energiespeicher

Ausgangslage:

- Erdspeicher können saisonal Wärme speichern, aber
 - Sehr groß (für Effizienz)
 - „Impedanzproblem“:
 - ==> Speichertemperatur 10 – 30 Grad
 - ==> Nachfrage bei 30 – 60 Grad
- Solarzellen nutzen nur 7 – 20 % der eingestrahlten Leistung
 - Rest Wärme bei ca. 40 – 70 Grad
 - ...aber zur falschen Zeit.



Neue Anwendungsfelder (3)

Saisonale Energiespeicher

Szenario-Vorschlag:

- Frühjahr – Hochsommer:
Solare Abwärme umwandeln + einspeichern
(erhöht elektrischen Wirkungsgrad)



Neue Anwendungsfelder (3)

Saisonale Energiespeicher

Szenario-Vorschlag:

- Frühjahr – Hochsommer:
Solare Abwärme umwandeln + einspeichern
(erhöht elektrischen Wirkungsgrad)
- Herbst: Gespeicherte Wärme direkt nutzen
(Ggf. um wenige Grad anheben)



Neue Anwendungsfelder (3)

Saisonale Energiespeicher

Szenario-Vorschlag:

- Frühjahr – Hochsommer:
Solare Abwärme umwandeln + einspeichern
(erhöht elektrischen Wirkungsgrad)
- Herbst: Gespeicherte Wärme direkt nutzen
(Ggf. um wenige Grad anheben)
- Winter: „Thermischer Widder“
 - Gespeicherte Wärme gegen Außenfrost in mechanische Arbeit umwandeln...
 - ...damit Wärmepumpe antreiben



Ok: Ist noch „Zukunftsmusik“.



Und wo ist der Haken...?



Und wo ist der Haken...?

→ Historische Gründe

- technisch einfacher
- mangelndes Effizienzstreben
- Herkunft: Kältetechnik
==> Andere Anforderungen!



Und wo ist der Haken...?

- Historische Gründe
 - technisch einfacher
 - mangelndes Effizienzstreben
 - Herkunft: Kältetechnik
 - ==> Andere Anforderungen!
- Ungelöstes technisches Problem



Carnot-Prozesse: Problem

Für alle Kreisprozesse der Carnot-Familie gilt
(heutiger Stand der Technik):



Carnot-Prozesse: Problem

Für alle Kreisprozesse der Carnot-Familie gilt (heutiger Stand der Technik):

→ Isotherme Zustandsänderung gelingt nicht (ausreichend gut).

==> Innovation & Erfindergeist gefragt



Pioniere gesucht

Lösungen für isotherme Prozesse:

- Eigenes Patent DE_4225791A1
 - entwickelt für langsamlaufende stationäre solarthermische Anlagen
 - abgelaufen & heute frei verfügbar



Pioniere gesucht

Lösungen für isotherme Prozesse:

- ➔ Eigenes Patent DE_4225791A1
 - entwickelt für langsamlaufende stationäre solarthermische Anlagen
 - abgelaufen & heute frei verfügbar
- ➔ Heute: Neue Ideen für industrietaugliche Lösungen



Pioniere gesucht

Lösungen für isotherme Prozesse:

- Eigenes Patent DE_4225791A1
 - entwickelt für langsamlaufende stationäre solarthermische Anlagen
 - abgelaufen & heute frei verfügbar
- Heute: Neue Ideen für industrietaugliche Lösungen
- Suche Kooperationspartner für weitere Entwicklung



Funktioniert nicht ?



Funktioniert nicht ?

„Alle sagten: Es geht nicht. Da kam einer, der das nicht wusste und der es einfach tat.“

Goran Kikic (*1975)



Funktioniert nicht ?

„Alle sagten: Es geht nicht. Da kam einer, der das nicht wusste und der es einfach tat.“

Goran Kikic (*1975)

→ Gilt für jede Erfindung



Funktioniert nicht ?

„Alle sagten: Es geht nicht. Da kam einer, der das nicht wusste und der es einfach tat.“

Goran Kikic (*1975)

- Gilt für jede Erfindung
- Hier: Es gibt sogar ein halb funktionierendes Beispiel: Meerwasser-Wärmepumpe in Norwegen (Drammen)



Funktioniert nicht ?

„Alle sagten: Es geht nicht. Da kam einer, der das nicht wusste und der es einfach tat.“

Goran Kikic (*1975)

- Gilt für jede Erfindung
- Hier: Es gibt sogar ein halb funktionierendes Beispiel: Meerwasser-Wärmepumpe in Norwegen (Drammen)

==> Man muss „nur“ auf diesem Weg weitergehen...

###



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Christian Schmidt-Gütter,

Email: chr@schmidt-guetter.de

Tel./Mobil: +49 163 2336646

Web: <https://www.schmidt-guetter.de>

