

OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

Luftfilteranlagen zur Reinigung von Raumlufth

zur Bekämpfung der Ausbreitung des Corona
Virus in geschlossenen Räumen

Florian Jacob

Kontakt: florian.jacob@ovgu.de

8. April 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Stand der Technik	2
2.1	Bedeutung von Ethen und Propen	2
2.2	Erzeugung durch Steamcracken	2
3	Die Rektifikation von Stoffgemischen	5
3.1	Funktionsweise Rektifikationskolonne	5
3.2	Aufbau einer Rektifikationskolonne	5
3.3	Arten von Einbauten	6
4	Auslegung der Kolonne	9
4.1	Gegebene Werte	9
4.2	Kostenabwägung der Kolonnenböden	9
5	Berechnungsgrundlagen	11
5.1	Ergebnis der Matlab Berechnungen	13
5.2	Zusammenfassung	15
6	Literaturverzeichnis	16
7	Abbildungsverzeichnis	17
8	Tabellenverzeichnis	18

1 Einführung

Im Rahmen dieser Projektarbeit werden zwei Rektifikationskolonnen zur Auftrennung von Ethan/Ethen (C2) und Propan/Propen (C3) Gemischen ausgelegt und vorgestellt.

Die zu trennenden Stoffe entstehen als Produkte des Steamcracking-Prozesses, bei dem langkettige Kohlenwasserstoffe in Gegenwart von Wasserdampf in kurzkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden. Je nach Betriebsbedingungen beim Steamcracking kann die Zusammensetzung der entstehenden Produkte variieren. Eine beispielhafte Zusammensetzung zeigt Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1: Beispielhafte Zusammensetzung der Produkte beim Steamcracking

Produkt	Symbol	Anteil
Wasserstoff	H ₂	1
Methan	CH ₄	15
Ethan	C ₂ H ₆	4
Ethen	C ₂ H ₄	29
Ethin	C ₂ H ₂	0,5
Propan	C ₃ H ₈	1
Propen	C ₃ H ₆	17
Butadien	C ₄ H ₆	4,5
Buten	C ₄ H ₈	4,5
Butan	C ₄ H ₁₀	0,5
Pyrolysebenzin	C _n H _m	19
Kohlenmonoxid	CO	100-1000 ppm
Kohlendioxid	CO ₂	30-500 ppm
Rückstand	-	3,5

2 Stand der Technik

2.1 Bedeutung von Ethen und Propen

Ethylen und Propylen sind einer der wichtigsten petrochemischen Ausgangsstoffe. Im Jahr 2019 wurden 5.022 kT Ethylen und 4.490 kT Propylen in Deutschland verbraucht. [1] Diese Primärchemikalien wurden vor allem zur Herstellung von Kunststoffen weiterverarbeitet. Einige Anwendungsbeispiele können Abbildung 2.1 gelesen werden.

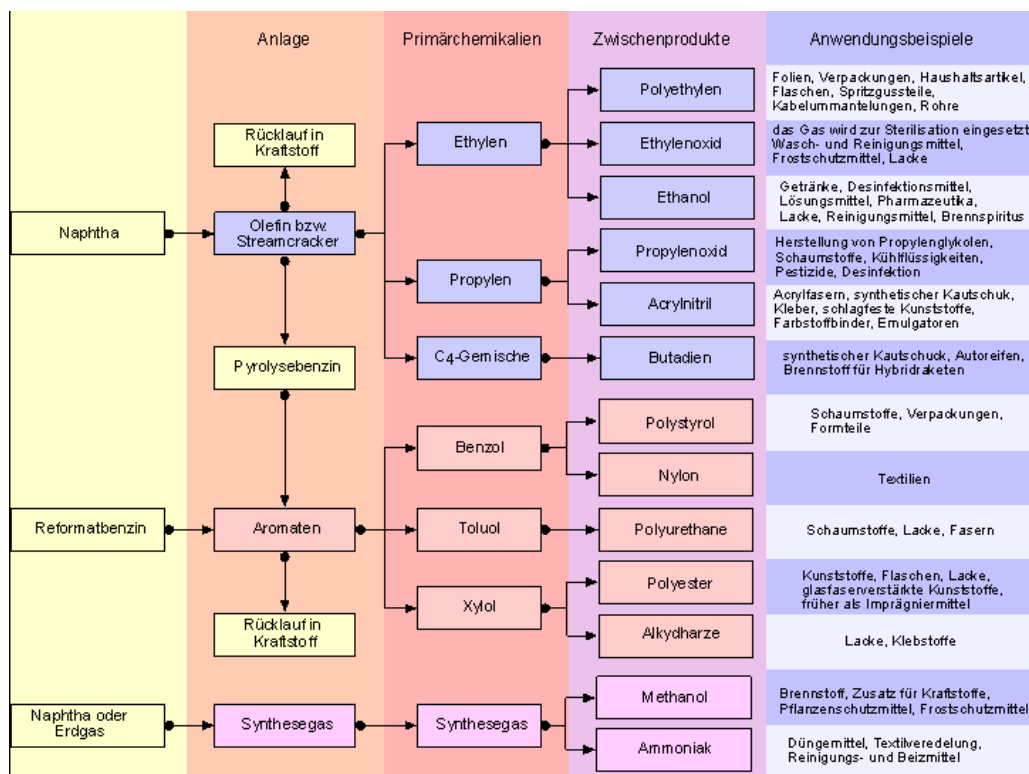


Abbildung 2.1: Anwendungsbeispiele der Petrochemie [2]

2.2 Erzeugung durch Steamcracken

Beim Steamcracken werden große Kohlenwasserstoffe, wie Naphta, thermisch zu kurzkettigeren Ketten gespalten. Folgende Schritte bilden dieses thermische Trennungsv erfahren.

1. Spaltöfen: Das Naphtha wird mit Wasserdampf auf 600°C vorerhitzt. Der Spaltvorgang findet dann in einer Rohrschlange bei 800-850°C statt.

2. Quencher: Das Spaltgas wird schlagartig auf 400°C abgekühlt und zusätzlich wird mit Quenchöl die Temperatur auf 200°C .
3. Waschturm: Das Gas wird stufenweise abgekühlt, zur Trennung von Pyrolyseöle, Prozesswasser und Teile des Pyrolysebenzins.
4. Rohgasvorbereitung: Das Rohgas muss von möglichen Giften und korrosiven Stoffen gereinigt werden, damit die Rektifikationsschritte effektiv stattfinden können und damit die Anlage möglichst lange hält. Als erstes wird es auf 15 bar verdichtet und CO_2 und H_2S werden mit Natronlauge in der Säurewäsche entfernt. Nach einer anschließenden Verdichtung auf 33 bar, werden Wasserdampfreste über Molekularsiebe auskondensiert. Das Gemisch erreicht dabei eine Temperatur von bis zu – 60°C.
5. Destillationskolonne: Das Gas wird in Einzelverbindungen getrennt. Dabei werden die Ethen- und Propenfraktionen getrennt.
6. Abschließend, werden die Alkine extrahiert (Ethenfraktion) bzw. Hydriert (Propylenfraktion). Dessen Verteilung und Menge hängt von dem Rohstoff, dem Druck und die Temperatur ab.
7. Im letzten Schritt werden mittels Rektifikation die Zielprodukte, Alkene, von den Alkanen getrennt. Die Alkane werden dann zurück zum Anfang des Prozesses geschickt. [3]

Diese Methode zur Gewinnung der Hauptbestandteile der Kunststoffproduktion ist seit Jahrzehnten etabliert. Jedoch ist die fossile Herkunft des Rohstoffes und die große CO_2 Mengen die dabei entstehen, einen Grund für die Optimierung und Ersetzung dieser Prozesse. Einige Prominente Entwicklung zur Optimierung des Steamcracken Prozesses sind:

- Verringerung des Brennstoffbedarfs durch Keramikbeschichtung der Rohrwände, was die Verkokung vermindert. [4]
- Verbesserung der Stofftrennung, z.B. durch Membranverfahren
- Senkung der Betriebstemperatur durch einsetzen von Katalysatoren
- Carbon Capture Technologien zur Verringerung der ausgestoßenen Emissionen [5]

Alternative Möglichkeiten zur Gewinnung der Alkene sind:

- Chemisches Recyclen von Kunststoffabfällen
 - Müllverbrennung: Es wird thermische Energie wieder gewonnen und es entsteht CO_2 und H_2 . Diese Gase können dann zu Methan synthetisiert werden, welches wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist, wieder zu Propen verarbeitet werden kann.
 - Gasifizierung: Ähnlich wie bei der Mull Verbrennung, können die entstandene Flüchtige (H_2 und CO) als Synthesegas für die Kunststoffherstellung verwendet werden.
 - Pyrolyse: Die Polymere werden in dessen Ursprungspolymeren wieder zersetzt, um neu eingesetzt zu werden.

- Katalytische Verfahren [5]

Die explizite Herstellung von Propen wurde, durch dessen Hauptrolle in der wachsenden Kunststoff-industrie, in den letzten Jahrzehnten gründlich erforscht. Für die „On-Purpose“-Route der Propen Her-stellung, gibt es die klassische oben erwähnte Methode, welche auf fossile Brennstoffe basiert. Jedoch werden Alternative basierend auf nachhaltigen Rohstoffen entwickelt. Eine Schematische Darstellung wurde in der Dissertation [3] erstellt und ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

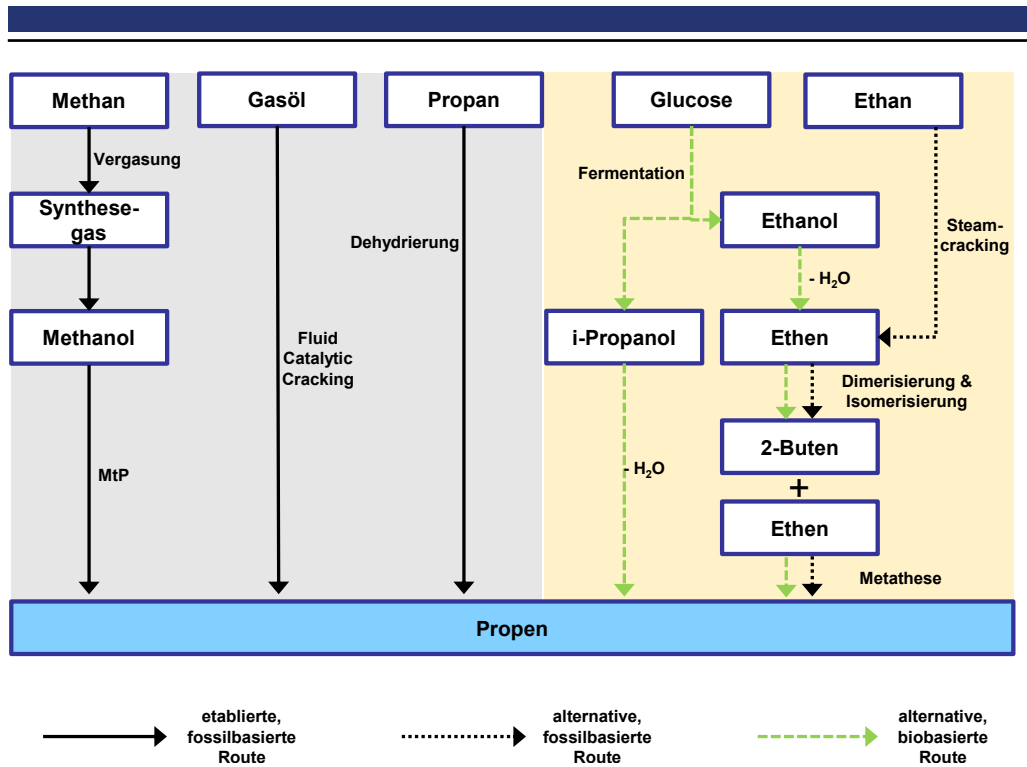


Abbildung 2.2: Methoden zur Synthese von Propen [3]

3 Die Rektifikation von Stoffgemischen

Zur Trennung der Gemische wird die Rektifikation genutzt, welche auf dem Prinzip der Destillation beruht. Hierbei wird die unterschiedliche Flüchtigkeit der Stoffe zur Trennung ausgenutzt. Die Rektifikation findet in meist sehr hohen Kolonnen statt, da die Trennung auf den einzelnen Böden in der Kolonne stattfindet, von denen eine Vielzahl für den Trennprozess benötigt wird.

3.1 Funktionsweise Rektifikationskolonne

Das zu trennende Flüssigkeitsgemisch wird der Kolonne zugeführt und dort zum Sieden gebracht. Der erzeugte Dampf bewegt sich in der Kolonne aufwärts, verlässt sie am Kopf und wird kondensiert. Ein Teil des Kondensates wird als Kopfprodukt abgeführt. Der andere Teil fließt als Rücklauf in die Kolonne zurück und bewegt sich als flüssige Gegenphase abwärts.

Auf seinem Weg zum Kopf erfährt das im Sumpf erzeugte Dampfgemisch durch Austauschböden oder Packungen in der Kolonne einen intensiven Wärme- und Stoffaustausch mit der Flüssigphase.

Zur Intensivierung der beschriebenen Wärme- und Stoffübergänge enthalten Rektifikationskolonnen Einbauten, wie z. B. Böden, Füllkörperkolonnen und geordnete Packungen, die die Kontaktzeit zwischen den Phasen verlängert und eine hohe Turbulenz der angrenzenden Phasenschichten bewirken.

Dabei kondensieren die schwerer flüchtigen Komponenten der Dampfphase und reichern die Flüssigphase an. Gleichzeitig sorgt die freiwerdende Kondensationswärme für die Verdampfung der leichter flüchtigen Komponenten in der Flüssigphase.

Aufgrund dieser Vorgänge in der Kolonne erhöht sich der Gehalt der Dampfphase an leichter flüchtigen Komponenten vom Sumpf bis zum Kopf der Kolonne. Der Gehalt der Flüssigphase an schwerer flüchtigen Komponenten nimmt in der Gegenrichtung vom Kopf der Kolonne bis zum Sumpf zu.

Sollen Flüssigkeitsgemische aus mehreren Komponenten (>2) in möglichst reine Stoffe getrennt werden, so werden hierfür mehrere Rektifikationskolonnen benötigt.

3.2 Aufbau einer Rektifikationskolonne

Das Flüssigkeitsgemisch wird auf einer bestimmten Höhe zwischen dem Sumpf und dem Kopf der Kolonne eingespeist. Der Zulauf unterteilt die Kolonne in den Verstärkungs- und den Abtriebsteil. Die Temperatur des zugeführten Gemisches liegt oft am Siedepunkt der Mischung.

Flüssigkeit rieselt über die Einbauten nach unten, wobei sie an der leichterflüchtigen Komponente verarmt und der Gehalt der schwererflüchtigen Komponenten zunimmt. Im Sumpf wird ein Teil

des herunter strömenden Konzentrats als schwerflüchtige Fraktion aus der Kolonne entnommen. Ein anderer Teil wird durch eine Heizung verdampft.

Der verdampfte Anteil steigt als Brüden in der Kolonne auf und reichert sich im Austausch mit der herabströmenden Flüssigkeit mit der leichtflüchtigen an. Die leichtflüchtigen Brüden werden am Kopf der Kolonne aus dieser abgezogen und im Kondensator verflüssigt.

Ein Teil wird als leichtflüchtige Fraktion aus dem System abgezweigt, ein anderer Teil wird als Rücklauf oben in die Kolonne gegeben. Dieser Rücklauf ist notwendig, um einen Stoffaustausch zwischen der Dampfphase und herabströmender Phase zu ermöglichen und damit eine Anreicherung zu erzielen.

3.3 Arten von Einbauten

Die prinzipielle Kolonne gliedert sich durch ihre Einbauten in die Packungskolonne sowie die Bodenkolonne. Charakteristisch für die Bodenkolonnen sind die jeweils eingebauten Böden: Glockenboden, Siebboden, Ventilboden und Tunnelboden, welche in Abbildung 1 veranschaulicht sind.

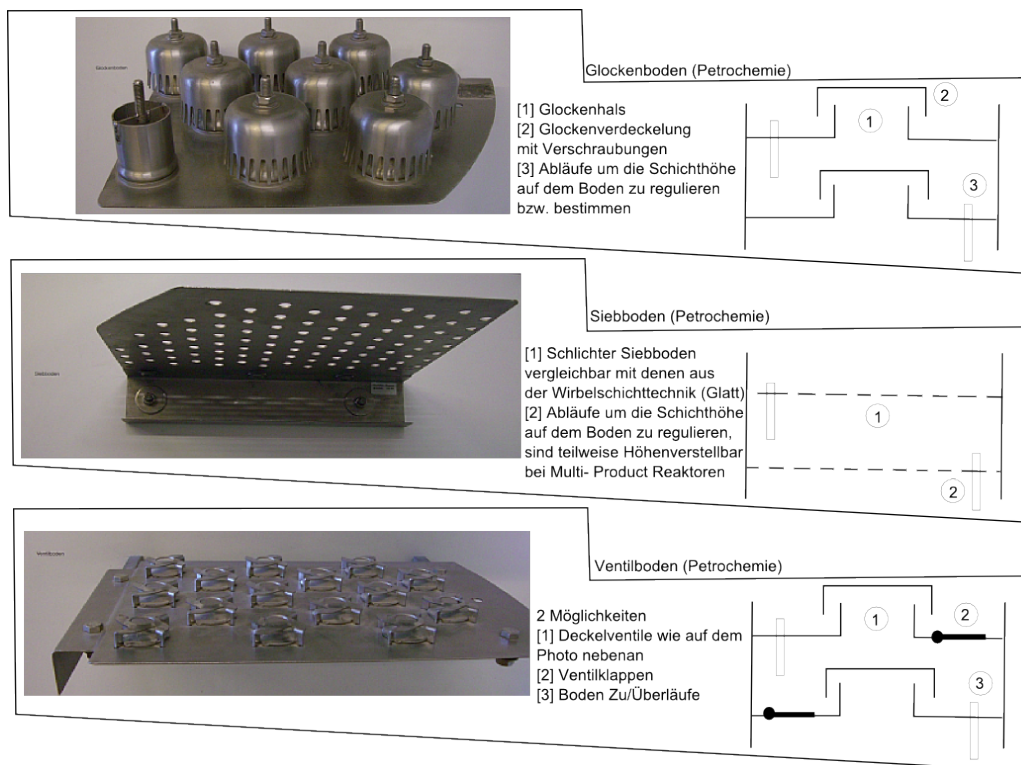


Abbildung 3.1: Bodeneinbauten [6]

Der Glockenboden erhält seinen Zulauf durch einen Zulaufstutzen, der die Flüssigphase über die gesamte Fläche verteilt. Mittels des Ablaufstutzens wird die Flüssigphase in den folgenden Boden geleitet. Die Dampfphase tritt über die Glockenhäse, auch als Kamin bezeichnet, ein und gelangt durch eingelassene Schlitze fein verteilt in die Flüssigphase. Dabei wird diese aufgewirbelt und am herabfließen gehindert, wodurch eine Sprudelschicht ausgebildet wird, in der der Stoffaustausch stattfindet. Bautechnisch befindet sich neben dem Einlaufstutzen ein Einlaufwehr, welches die Höhe der

Flüssigkeitsschicht definiert. Der verhältnismäßig aufwendige und kostenintensive Aufbau gewährleistet jedoch auch bei schwankenden Dampflasten einen effektiven Einsatz. Tunnelböden besitzen das gleiche Funktionsprinzip wie die eben beschriebenen Glockenböden. Anstelle der vielen Glocken befinden sich hier nur wenige langgestreckte Tunnel mit Schlitzten am Boden. Die einfachste Bauform ist der Siebboden. Dieser besteht aus einer Lochplatte, über die die Flüssigkeit strömt. Der aufsteigende Dampf verhindert ein Abfließen der Flüssigphase durch die Löcher. Auch in diesem Fall wird dabei eine Sprudelschicht ausgebildet. Durch Schwankungen der Dampflast kann stellenweise die Flüssigphase über die Löcher abfließen und der Trenneffekt bricht zusammen. Die Grundlage der Ventilböden stellt das Siebbodenprinzip dar. Durch die Dampflast werden die Klappdeckel nach oben gedrückt und ermöglichen, dass die Dampfphase in die Flüssigphase eindringen kann. Sinkt die Dampflast, verschließen sich die Deckel, wodurch die Flüssigphase daran gehindert wird, durch die Löcher abfließen zu können. [7], [8],[9]

Packungskolonnen, als zweite grundlegende Kolonnenart, gewährleisten einen kontinuierlichen Stoffaustausch über eine Schüttung von Füllkörpern bzw. eine strukturierte Anordnung von Gaze/Blechen. Allgemein findet bei den Packungskolonnen, im Vergleich zu den Bodenkolonnen, kein stufenweiser Stoffaustausch statt. Weiterhin ist eine Gleichgewichtseinstellung nicht erwünscht, da darüber hinaus keine weitere Trennung stattfinden würde. Die Füllkörperschicht liegt auf einem Rost auf und ist in den meisten Fällen nicht bis ganz oben gefüllt. Die abnehmende Befüllung zum Kopfteil hin, soll die Ausbildung einer Beruhigungszone gewährleisten, in der sich die vom Dampf mitgerissenen Flüssigkeitstropfen abscheiden lassen. Packungskolonnen haben seltener Probleme mit der Dampfverteilung, da dieser sich in den freien Zwischenräumen ausbreitet. Wesentlich problematischer ist die Flüssigphasenverteilung. Diese muss über den gesamten Querschnitt verteilt werden sowie gleichzeitig über die gesamte Kolonne erhalten bleiben. Mit dem Durchlaufen der Schüttungen ist eine Randgängigkeit der Flüssigphase zu beobachten. Dies bedeutet, dass sich die Flüssigphase mit zunehmender Strecke an der Kolonnenwand sammelt. Die aufsteigende Gasphase hingegen durchströmt die Kolonne als Zentralstrom und der Stoffaustausch wird über den geminderten Kontakt stark gehemmt. Um diesem Phänomen entgegenzuwirken, kommen Flüssigkeitssammler und -verteiler zum Einsatz. Zusätzlich werden in den Packungskolonnen Wandabweiser eingebaut, die die Flüssigphase in der Kolonne wieder neu verteilen sollen. Füllkörper in einer regellosen Schüttung werden als ungeordnete Packung bezeichnet. Die Bandbreite der Form der einzelnen Körper ist in Abbildung 3.2 auszugsweise dargestellt.

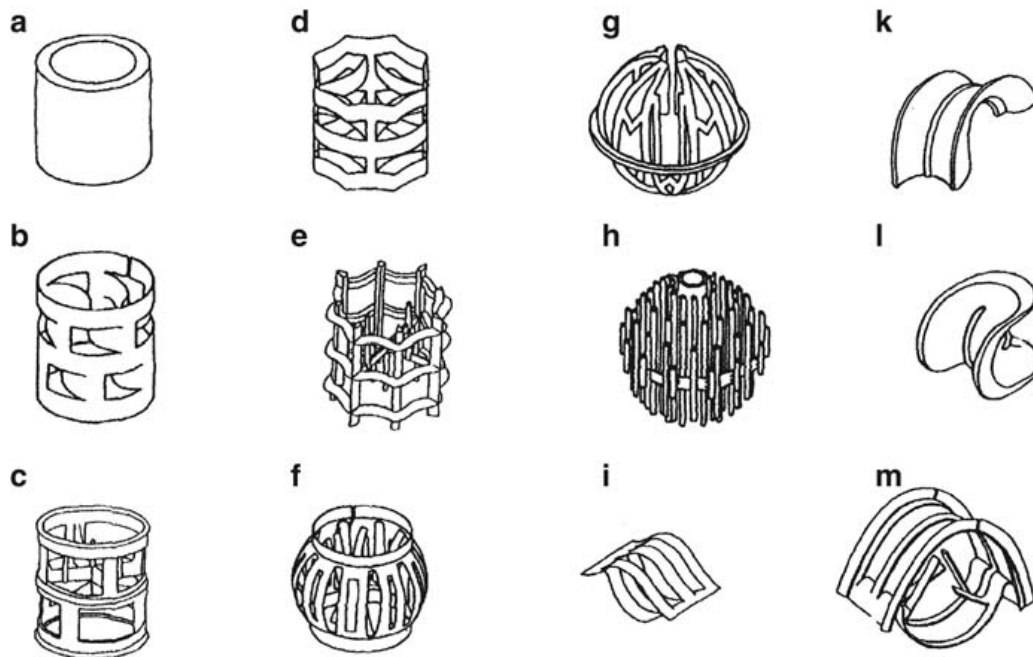


Abbildung 3.2: Fullkörperformen (M = Metall, P = Kunststoff, K = Keramik); a Raschig-Ring (M,K), b Pall-Ring (M), c Pall-Ring (P), d VSP-Fullkörper (M), e VSP-Fullkörper (P), f Top-Pak (M), g Hackette (P), h Igel-Fullkörper (P), i Interpack-Sattel (M), k Novalox-Sattel (P), l Berl-Sattel(K), m Intalox-Sattel (M) [10]

Als Material finden Metall, Glas, Keramik, und Kunststoff Anwendung. Für eine Intensivierung des Dampfphasen-Flüssigphasen-Kontaktes sowie einer Vergrößerung der Oberfläche sind die Seitenflächen der einzelnen Körper vielseitig aufgebrochen. Kriterien für die Materialauswahl der Füllkörper sind:

- Temperaturbeständigkeit,
- Korrosionsbeständigkeit,
- gute Benetzbarkeit sowie
- geringe Anschaffungskosten.

Für geordnete Packungen werden Metallgewebe oder Bleche gefaltet, gewickelt oder eine Kombination aus beiden Verfahren angewendet. Im Vergleich zu der ungeordneten Packung kann die Dampf- und Flüssigphase viel intensiver gelenkt werden. Diese Intensivierung bewirkt einen verbesserten Kontakt, der den Stoffaustausch optimiert. [7], [8],[9]

4 Auslegung der Kolonne

4.1 Gegebene Werte

Komponente 1: Ethan

Komponente 2: Ethen

Einlaufkonz der 1. Komponente: $x_{1,\text{in}} = 1/8$

Sumpfkonz der 1. Komponente: $x_{1,\text{S}} = 0.001$

Kopfkonz der 1. Komponente: $x_{1,\text{K}} = 0.999$

Komponente 1: Propen

Komponente 2: Propan

Einlaufkonz der 1. Komponente: $x_{1,\text{in}} = 1/18$

Sumpfkonz der 1. Komponente: $x_{1,\text{S}} = 0.001$

Kopfkonz der 1. Komponente: $x_{1,\text{K}} = 0.999$

4.2 Kostenabwägung der Kolonnenböden

Da genaue Daten zu den Kosten schwer oder nur nach Anfrage auf ein Fertigungsangebot erhalten werden können, müssen für die Auslegung allgemeine Angaben genutzt werden. Für den Vergleich wurde hierfür [11] herangezogen. Die für die Abwägung genutzte Tabelle ist in Tabelle 4.1 zu sehen. Da die zu trennenden Stoffgemische keine speziellen Anforderungen aufweisen, sollten sie ein möglichst günstiges Verhältnis von Verstärungsverhältnis zu relativen Kosten besitzen, da das die Betriebskosten und die Anschaffungskosten minimiert. Eine sehr gute Option ist hier der Regensiebboden, da er nur die Hälfte eines Glockenbodens kostet und gleichzeitig ein ähnlich hohes Verstärungsverhältnis besitzt. Einziger Nachteil ist der eingeschränkte Arbeitsbereich. Da der Prozess aber relativ kontinuierlich läuft, sollte das keine weiteren Probleme erzeugen. Auch der Druckverlust ist im Verhältnis zu den anderen Böden sehr günstig, was auch Kosten im Betrieb und in der Auslegung bei der Druckfestigkeit spart.

Tabelle 4.1: Vergleich verschiedener Kolonnenböden, entnommen aus [11]

Bodentyp	Arbeitsbereich V_{min}/V_{max}	Verstärkungsverhältnis (85 % max Last)	Verstärkungsverhältnis (im Gesamtbe- reich)	Flexibilität	Druckverlust (85 % max Last)	Kosten zogen auf Glockenböden	Gewicht / Bo- denfläche
Glockenboden (+)	4 bis 5	0.8	0.6 bis 0.8	80	4.5 bis 8.0	1	900 bis 1400
Tunnelboden (+)	3 bis 4	0.6 bis 0.7	0.55 bis 0.65	50	5.0 bis 8.5	0.8	800 bis 1400
Thormann-Boden	4 bis 6	0.85	0.7 bis 0.9	80	4.5 bis 6.0	0.8	400 bis 700
Ventilboden (Koch)	5 bis 8	0.8	0.7 bis 0.9	80	4.5 bis 6.0	0.7	400 bis 700
Ventilboden (Glitsch) (+)	5 bis 8	0.8	0.7 bis 0.9	80	4.0 bis 6.0	0.7	400 bis 700
Siebboden (-)	2 bis 3	0.8	0.7 bis 0.8	55	3.0 bis 5.0	0.7	300 bis 400
Kittel-Boden	2 bis 3	0.8	0.7 bis 0.8	40	2.0 bis 5.0	0.6	300 bis 500
Regensiebboden (+)	2 bis 3	0.75	0.6 bis 0.8	10	3.0 bis 4.0	0.5	300 bis 500
Turbogrid-Boden (+)	1.5 bis 2.5	0.7	0.6 bis 0.8	10	2.5 bis 4.0	0.5	300 bis 500

Flexibilität - jener Teil des Arbeitsbereichs, in dem das Verstärkungsverhältnis nur $\pm 15\%$ schwankt

(+) Boden arbeitet gut bei verschmutzten Flüssigkeiten

(-) Boden arbeitet schlecht bei verschmutzten Flüssigkeiten

V_{max} : Gas-(Dampf-)belastung an der oberen Grenze des Arbeitsbereichs

V_{min} Gas-(Dampf-)belastung an der unteren Grenze des Arbeitsbereichs

5 Berechnungsgrundlagen

Das McCabe-Thiele-Verfahren ist eine grafische Methode zur Bestimmung der Anzahl an benötigten Trennstufen. Dabei werden, anhand der Mengenbilanz, Geraden in ein Gleichgewichtsdiagramm eingezeichnet, woraus ein Stufensystem gebildet wird. Die Anzahl der benötigten Trennstufen kann anschließend durch zählen der eingezeichneten Stufen bestimmt werden. Anwendbar ist dieses Verfahren ausschließlich bei binären Stoffsystemen. [12]

Folgende Annahmen werden dabei getroffen:

- Die Enthalpien werden vernachlässigt
- Vernachlässigung wird der Einfluss von kinetischen und potenziellen Energien
- Adiabater Betrieb der Kolonnen
- Die bei der Kondensation freigewordene Wärme wird vollständig für die Verdampfung genutzt
- Druckabfall über der Kolonne wird als konstant angenommen
- Es verdampft die verhältnismäßig gleich hohe Energiemenge wie bei der Kondensation
- Molare Dampf und Flüssigkeitsströme bleiben unverändert längs eines Säulenabschnittes [12].

Eine Rektifiziersäule kann in einen Verstärkungsteil und einen Abtriebsteil unterteilt werden. Dabei werden im Verstärkungsteil mehrheitlich der flüchtigere Stoff angesammelt, wobei im Abtriebsteil Stoff mit hohen Siedetemperaturen angereichert werden [12].

Anhand der aufgestellten Annahmen, kann nun die Verstärkersäule wie folgt bilanziert werden:

Molstrombilanz

$$\dot{n}_D = \dot{n}_F + \dot{n}_P \quad (5.1)$$

Stoffmengenbilanz

$$\dot{n}_D \cdot y = \dot{n}_F \cdot x + \dot{n}_P \cdot x_P \quad (5.2)$$

Energiebilanz

$$\dot{n}_D \cdot h_D = \dot{n}_F \cdot h_F + \dot{n}_P \cdot h_P + \dot{Q}_K \quad (5.3)$$

Mit der Stoffmengenbilanz kann nun Verstärkungsgerade bestimmt werden:

Rücklaufverhältnis

$$\nu = \frac{\dot{n}_F}{\dot{n}_P} = \frac{x_P - y}{y - x} \quad (5.4)$$

Verstärkungsgerade

$$y = \frac{\nu}{\nu + 1} \cdot x + \frac{1}{\nu + 1} \cdot x_P \quad (5.5)$$

Nun wird die Abtriebssäule bilanziert, bei der die gleichen Bedingungen wie bei der Verstärkungsgerade gelten: Molstrombilanz

$$\dot{n}_F = \dot{n}_D + \dot{n}_S \quad (5.6)$$

Stoffmengenbilanz

$$\dot{n}_F \cdot x = \dot{n}_D \cdot y + \dot{n}_S \cdot x_S \quad (5.7)$$

Energiebilanz

$$\dot{n}_F \cdot h''_F + \dot{Q}_B = \dot{n}_D \cdot h'_D + \dot{n}_S \cdot h'_S \quad (5.8)$$

Woraus wie folgt die Abtriebsgerade bestimmt:

$$y = \frac{\nu}{\nu - 1} \cdot x + \frac{1}{\nu - 1} \cdot x_S \quad (5.9)$$

Zur Bestimmung der Trennstufen werden beide Geraden eingezeichnet. Dabei schneidet die Verstärkungsgerade den Punkt (1/1) und die Abtriebsgerade den Punkt (0/0) im Gleichgewichtsdiagramm. An dem Schnittpunkt der Geraden werden nun mehrfach abwechselnd waagrechte oder senkrechte Linien gezogen, die an dem Schnittpunkt mit der Gleichgewichtskurve oder den eingezeichneten geraden Stufenweise fortlaufend eingezeichnet werden. [12]

5.1 Ergebnis der Matlab Berechnungen

Für Ethan/Ethen:

- Temperatur Kopf: $-58.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ Temperatur Sumpf: $-39.14\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Stufenzahl Kopf: 18 Stufenzahl mit Einberechnung des Wirkungsgrads: 24
- Stufenzahl Sumpf: 19 Stufenzahl mit Einberechnung des Wirkungsgrads: 26
- Kühlung Kopf: 12.1 MW Heizung Sumpf: 8.8 MW
- Kolonnendurchmesser: 5.0287 m
- Wehrlänge: 3.6543 m
- Segmenthöhe: 0.78699 m
- Wehrbelastung: 18.9062 l/(sm)
- Wehrüberlaufhöhe: 20.0842 mm
- Bodenabstände: 420.1116 mm \rightarrow gewählt 500 mm

\rightarrow Kolonnenhöhe: 18.5 m ungefähre jährliche Energiekosten (22.2 ct/kWh im Großhandel [13]): 40 Mio. €

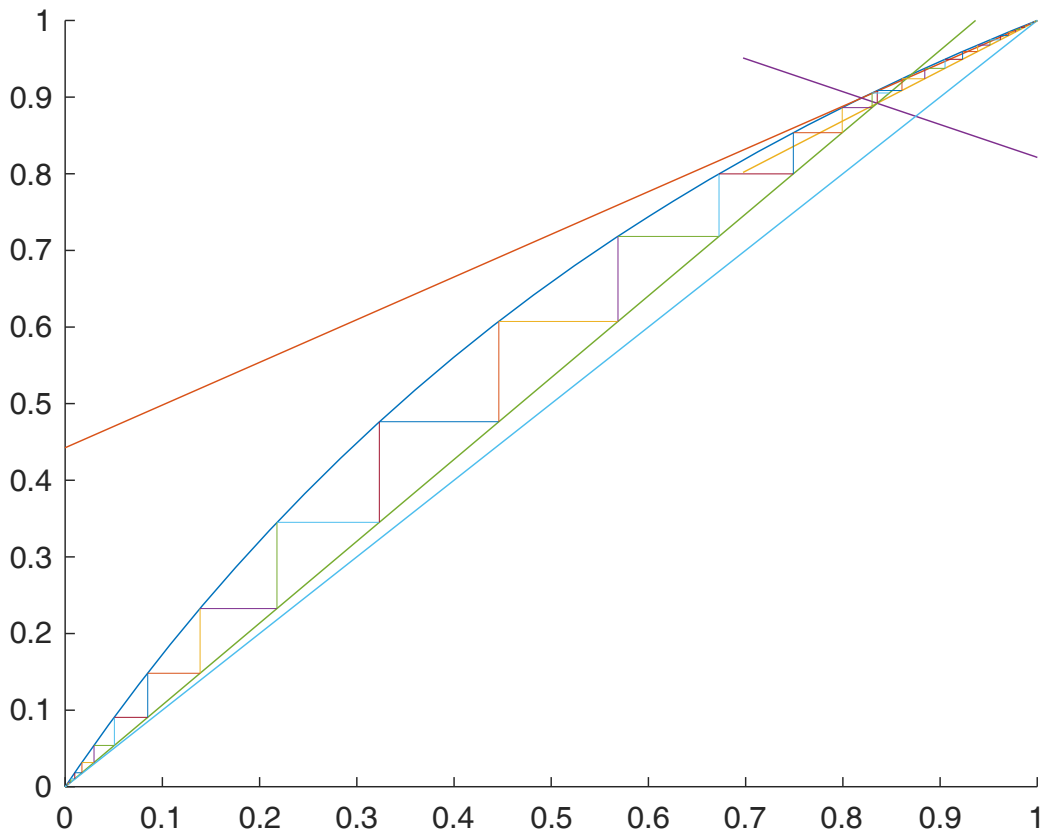


Abbildung 5.1: Kolonne für die Trennung des C2 Schnitts

Für Propan/Propen:

- Temperatur Kopf: 35.8914 °C
- Temperatur Sumpf: 43.986°C
- Stufenzahl Kopf: 51 Stufenzahl mit Einberechnung des Wirkungsgrads: 68
- Stufenzahl Sumpf: 62 Stufenzahl mit Einberechnung des Wirkungsgrads: 83
- Kühlung Kopf: 20.83 MW Heizung Sumpf: 20.99 MW
- Kolonnendurchmesser: 11.1057 m
- Wehrlänge: 8.0705 m
- Segmenthöhe: 1.738 m
- Wehrbelastung: 26.3125 l/(sm)
- Wehrüberlaufhöhe: 25.0358 mm
- Bodenabstände: 440.1608 mm → gewählt 500 mm

→ Kolonnenhöhe: 56.5 m ungefähre jährliche Energiekosten (22.2 ct/kWh im Großhandel [13]): 100 Mio. €

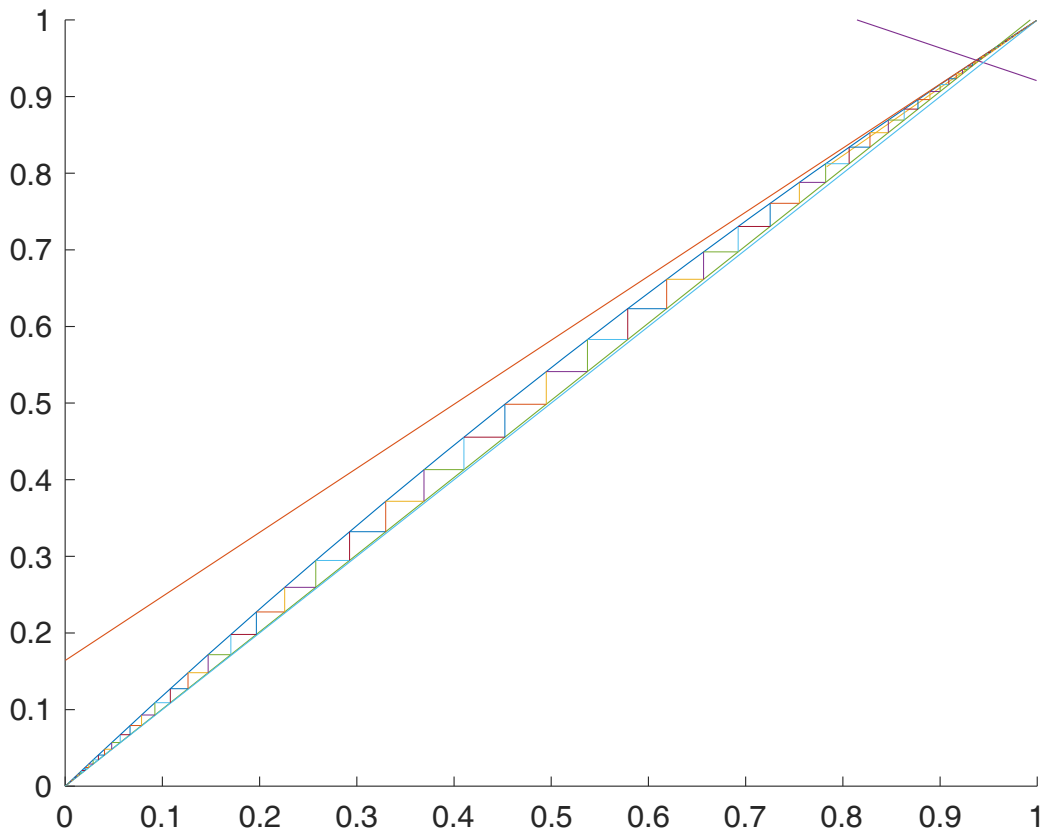


Abbildung 5.2: Kolonne für die Trennung des C3 Schnitts

5.2 Zusammenfassung

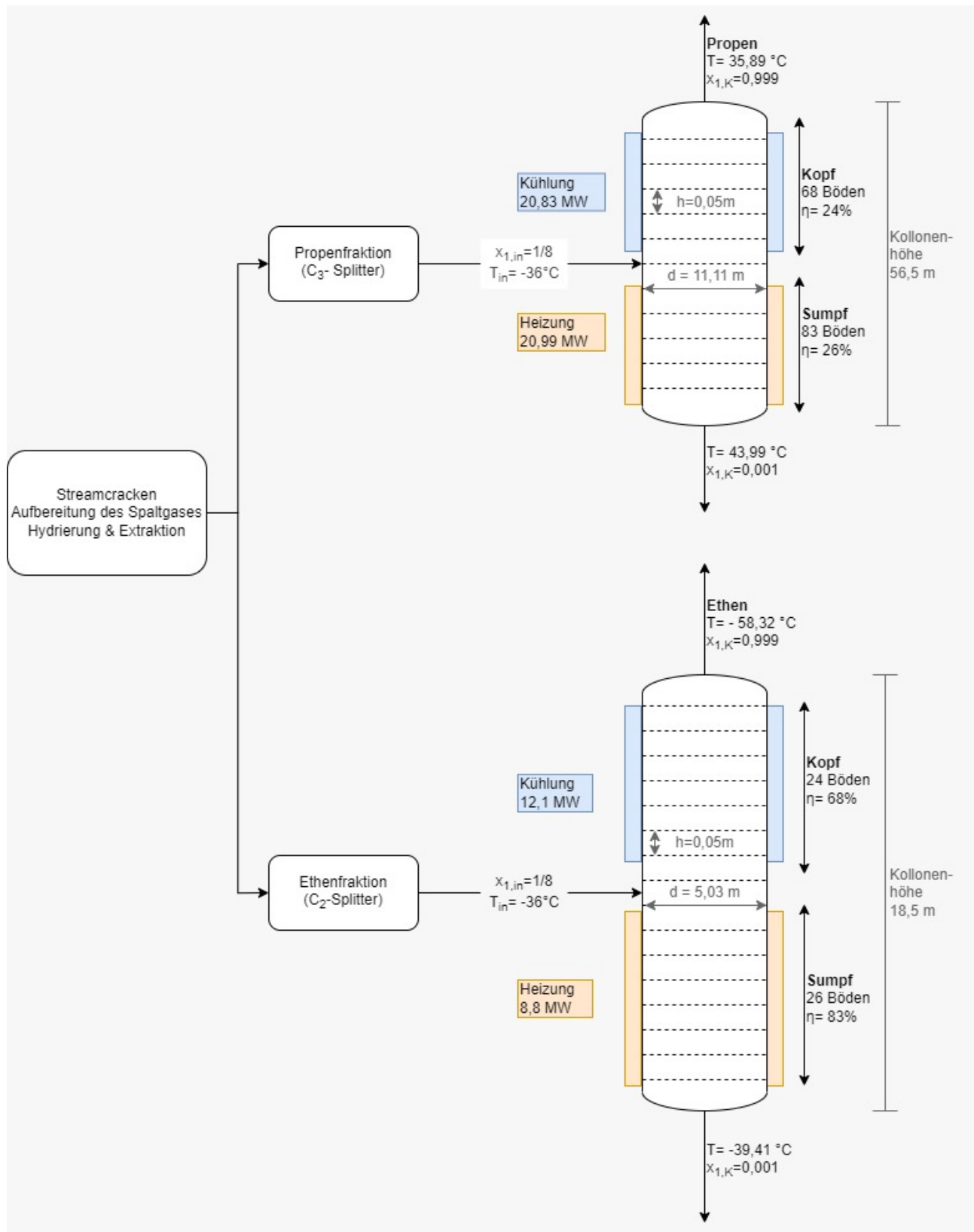


Abbildung 5.3: Graphische Darstellung der Kolonnen

6 Literaturverzeichnis

- [1] M.Hohmann. Verbrauch von Ethylen und Propylen zur Produktion von Polymeren in Deutschland in den Jahren 2018 und 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1284394/umfrage/verbrauch-von-petrochemikalien/>, 17. 01 2022.
- [2] A. Kuhlmann, E. Medra, M. Necke, and F. Rößner. Erdöl-Aufarbeitung. <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/erdoel/aufarbeitung/aufarbeitung.vlu.html>, 01.03.2022.
- [3] M. F. Weinkraut. Selektive hydrierung von propin an palladiumbasierten scill-katalysatoren. dissertation- selektive hydrierung von propin an palladiumbasierten scill-katalysatoren, 2019.
- [4] Tao Ren. Petrochemical from oil, natural gas, coal and biomass. energy use, economics and innovation, Mar 2009.
- [5] C. Schneider. Technologiebericht 6.4 Low-carbon undressourceneffiziente Industrie innerhalb des Forschungsprojekt TF_Energiewende, 2018.
- [6] Rektifikation (verfahrenstechnik). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1284394/umfrage/verbrauch-von-petrochemikalien/>, 02.03.2022.
- [7] Rektifikation: Funktion und Aufbau von Rektifikationsanlagen. <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/rektifikation/aufbau/aufbau.vlu.html>, 02.03.2022.
- [8] A. Brehm. Praktikum der technischen chemie - rektifikation. <http://www.gmehling.chemie.uni-oldenburg.de/Praktikum/Rektifikation.pdf>, 02.03.2022.
- [9] M. Schneider. Destillationskolonnen (rektifikationskolonnen). <http://www.verfahreningenieur.de/Destillationskolonnen.html>, 02.03.2022.
- [10] Peter Grassmann, Fritz Widmer, and Hansjörg Sinn, editors. *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*. De Gruyter, 2011.
- [11] Axel Schönbucher. *Destillation, Rektifikation*, pages 352–517. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2002.
- [12] A. Sievers. Thermische verfahrenstechnik 2. Skript zur Vorlesung, 02.03.2022.
- [13] Strompreisentwicklung. <https://strom-report.de/strompreise/strompreisentwicklung/>, 30.03.2022.

7 Abbildungsverzeichnis

2.1	Anwendungsbeispiele der Petrochemie [2]	2
2.2	Methoden zur Synthese von Propen [3]	4
3.1	Bodeneinbauten [6]	6
3.2	Fullkörperformen (M = Metall, P = Kunststoff, K = Keramik); a Raschig-Ring (M,K), b Pall-Ring (M), c Pall-Ring (P), d VSP-Fullkörper (M), e VSP-Fullkörper (P), f Top- Pak (M), g Hackette (P), h Igel-Fullkörper (P), i Interpack-Sattel (M), k Novalox-Sattel (P), l Berl-Sattel(K), m Intalox-Sattel (M) [10]	8
5.1	Kolonne für die Trennung des C2 Schnitts	13
5.2	Kolonne für die Trennung des C3 Schnitts	14
5.3	Graphische Darstellung der Kolonnen	15

8 Tabellenverzeichnis

1.1	Beispielhafte Zusammensetzung der Produkte beim Steamcracking	1
4.1	Vergleich verschiedener Kolonnenböden, entnommen aus [11]	10