Anorganische Experimentalchemie

Dr. Magdalena Rusan

Stoffe und Stofftrennung

24.10.2025

Stoffe und Stofftrennung

Chemie

↓

Lehre von den Stoffen

↓

Charakterisierung, Zusammensetzung und Umwandlung von Stoffen

Beziehung zwischen:

Struktur		Reaktivität
Atome, Moleküle, Verbindungen	⟷	Energetik, Kinetik, Mechanismen

Stoffe und Stofftrennung

Chemie ist die Lehre von den Stoffen und Stoffänderungen

Physik ist die Lehre von den Zuständen und Zustandsänderungen.

Ein Stoff hat physikalische Eigenschaften (z. B. Dichte; Glanz und elektrische Leitfähigkeit von Fe) und chemische Eigenschaften (z. B. Rosten von Fe).

Versuche: Magnesium vs. Platin,
Zucker + H_2SO_4
Fe + O_2

Ein chemischer Vorgang ist mit einer Umwandlung verknüpft (chemische Reaktion); es entsteht ein neuer Stoff mit neuen charakteristischen Eigenschaften.

Stoffe und Stofftrennung

Einteilung und Trennung von Stoffen

Reine Stoffe sind Verbindungen (Kohlendioxid - CO_2, Wasser - H_2O, Methan - CH_4) und Elemente [Helium - He, (Di)Wasserstoff - H_2, (Di)Sauerstoff-O_2, weißer Phosphor - P_4].

Ein heterogenes Gemisch besteht erkennbar aus unterschiedlichen Phasen,
z.B. Granit (Feldspat, Quarz, Glimmer)

Quarz

- besteht erkennbar aus unterschiedlichen Teilen (heterogen)
- Phase: abgegrenzte Menge eines einheitlichen Stoffes
- Heterogenes Gemisch besteht aus mehreren Phasen mit deutlichen Phasengrenzen

Ein homogenes Gemisch erscheint durch und durch einheitlich, es bildet eine Phase, zum Beispiel Luft, Zuckerlösung oder eine Kupfer-Zink-Legierung (Messing).

- einheitliches (homogenes) Erscheinungsbild
- flüssige und feste homogene Gemische: Lösungen
- z.B. Salzwasser, Legierungen, Luft

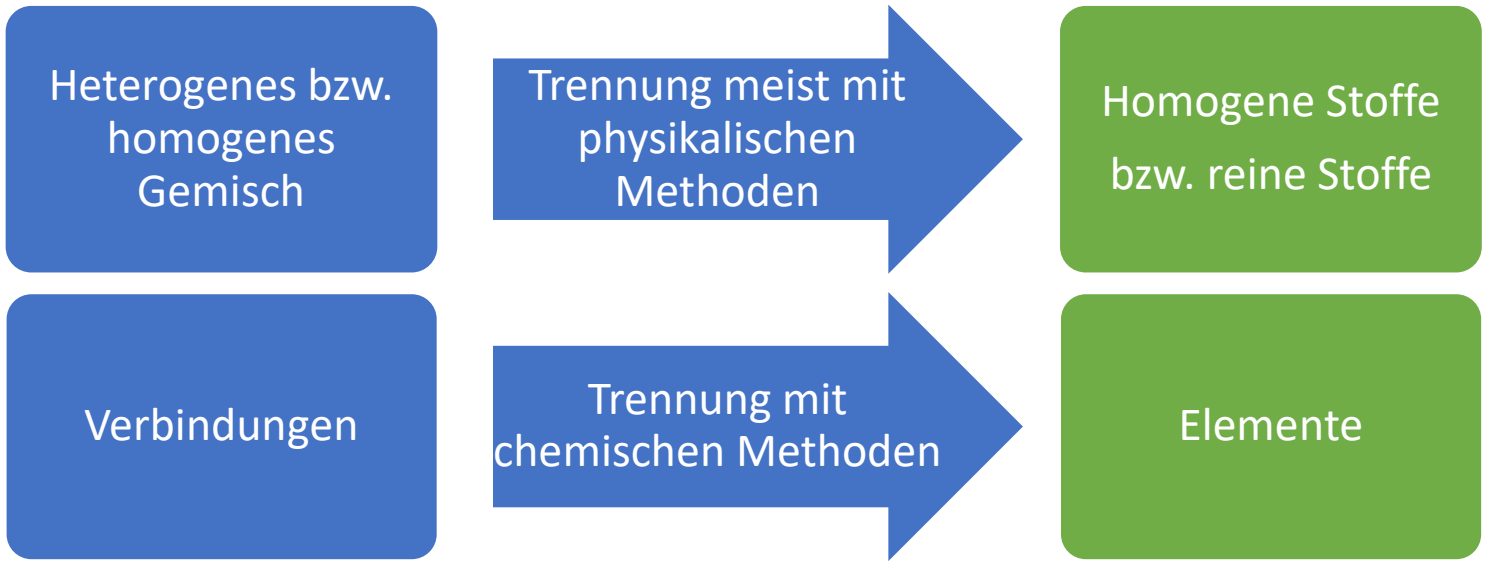
Flüssige und feste homogene Gemische nennt man Lösungen.

Versuche: Messing

Stoffe und Stofftrennung

Trennung von Gemischen und Stoffen

Heterogene und homogene Gemische können mit Hilfe physikalischer Methoden getrennt werden, während zur Trennung der in Verbindungen enthaltenen Elemente chemische Methoden notwendig sind.



Physikalische Trennmethoden:

- **Filtration** ⇨ unterschiedliche **Löslichkeit**
- **Kristallisation** ⇨ unterschiedliche **Löslichkeit**
- **Destillation** ⇨ unterschiedliche **Flüchtigkeit**
- **Sublimation** ⇨ unterschiedliche **Flüchtigkeit**
- **Chromatographie** ⇨ unterschiedliche **Adsorption**
- **Zentrifugation** ⇨ unterschiedliche **Dichte**

Chemische Reaktionen:
z.B. thermische Zersetzung

Versuche: Eisen und Sand Trennung

Stoffe und Stofftrennung

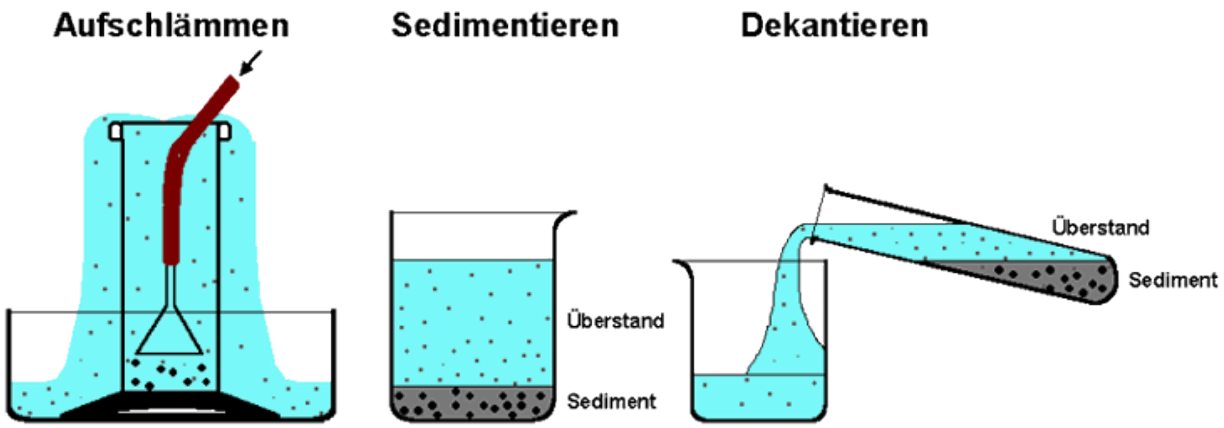
Heterogene Gemische

Aggregatzustand der Phasen	Bezeichnung	Beispiele	Verfahren zur Phasentrennung
fest + fest	**Gemenge**	Sand + Salz, Granit	Sortieren, Sieben, Flotation Scheidung nach Dichte, elektromagnetische Trennung, Extraktion
fest + flüssig	**Suspension**	Malerfarbe, Schlamm, Butter	Sedimentieren + Dekantieren, Zentrifugieren, Filtrieren
flüssig + flüssig	**Emulsion**	Milch, Emulsion-EX (z.B. Centra Gold; Exan, Senatel)	Dekantieren, Zentrifugieren,
fest + gasförmig	**Aerosol**	Rauch	Sedimentieren, Filtrieren elektromagnetische Trennung
flüssig + gasförmig	**Aerosol, Nebel**	Schaum	Sedimentieren

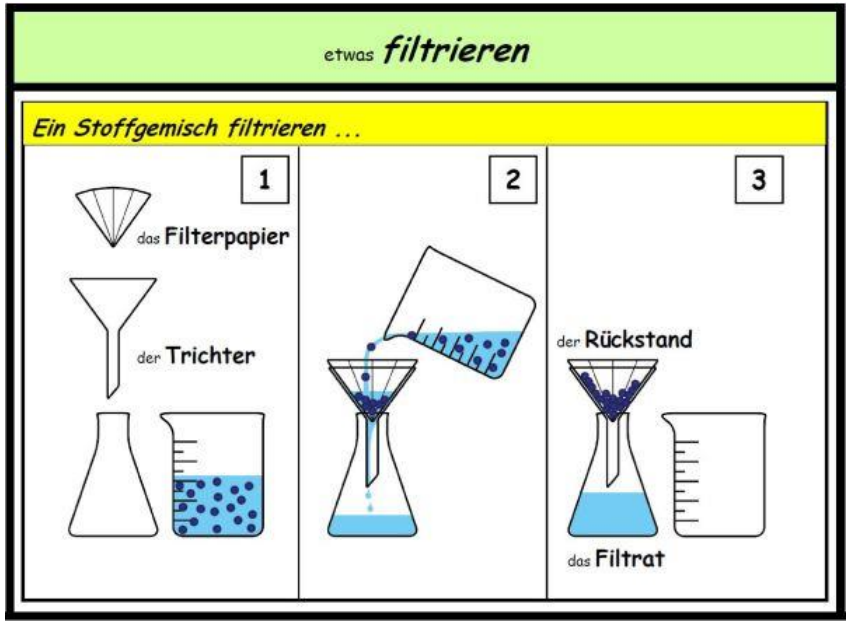
Gase sind immer vollständig mischbar und bilden deswegen stets ein Einphasensystem.

Stoffe und Stofftrennung

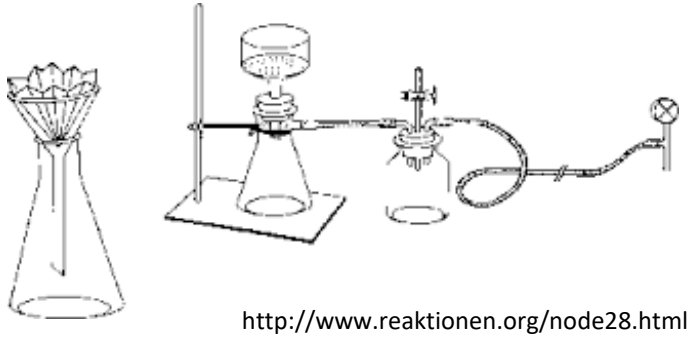
- **Sortieren**: Feste Phasen → Sortieren nach Farbe, Teilchengröße, magnetischen Eigenschaften etc.
- **Sedimentieren** und **Dekantieren**: Suspensionen, Emulsionen
- **Filtrieren**: Abtrennen fester Stoffe von Flüssigkeiten und Gasen



https://www.seilnacht.com/versuche/dekant.html



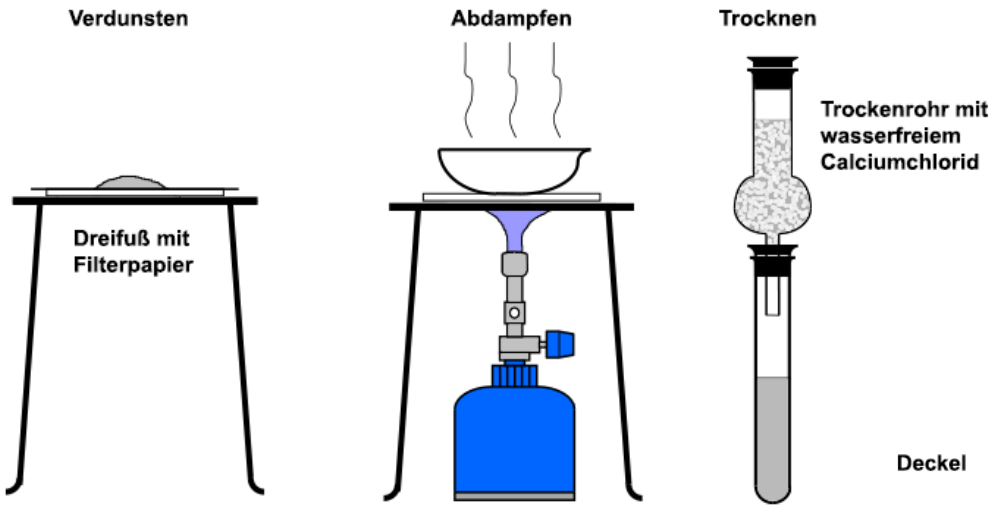
https://www.uni-due.de/prodaz/spiel_stoffgemische_trennverfahren.php



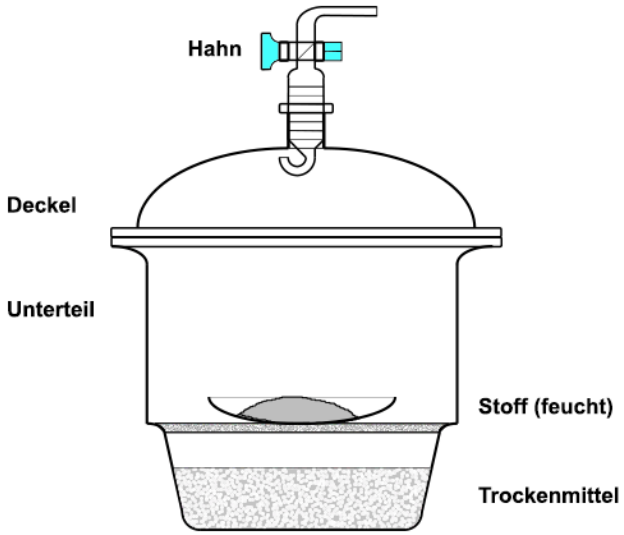
http://www.reaktionen.org/node28.html

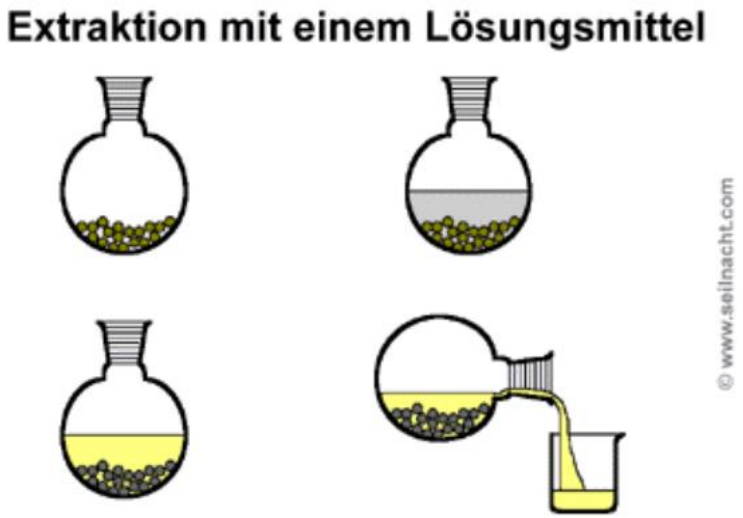
Stoffe und Stofftrennung

- **Extraktion**: Gemenge mit unterschiedlichen Löslichkeiten der Phasen
- **Abdampfen und Trocknen**: Eine Phase ist leichter verdampfbar



https://www.seilnacht.com/versuche/trocknen.html





https://www.seilnacht.com/versuche/trocknen.html

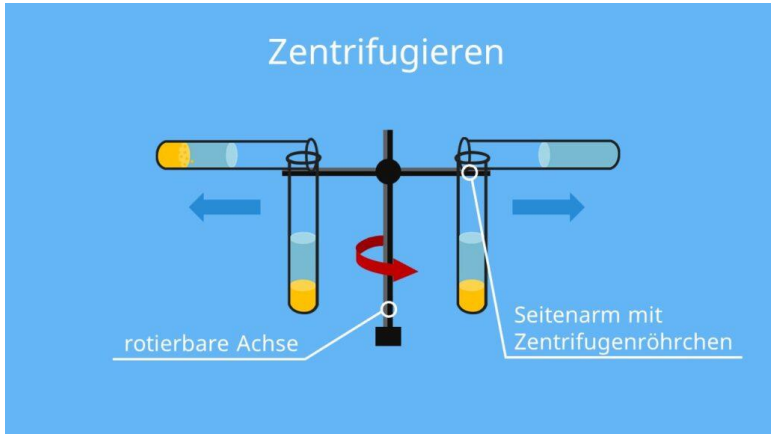
Stoffe und Stofftrennung

- **Zentrifugieren:** Trennung von Stoffgemischen mithilfe der Zentrifugalkraft

  - Massenträgheit wird ausgenutzt
  - Stoffgemische mit zwei oder mehreren Phasen durch den Einsatz von Fliehkräften getrennt:

    → direkt abhängig von der **Zentrifugalkraft, der Masse, der Winkelgeschwindigkeit und dem Abstand** des Körpers von der Drehachse

  - Partikel oder Medien mit höherer Dichte wandern aufgrund der höheren Trägheit nach außen → Bestandteile mit niedrigerer Dichte werden verdrängt und gelangen dadurch zur Mitte



https://studyflix.de/chemie/trennverfahren-3960

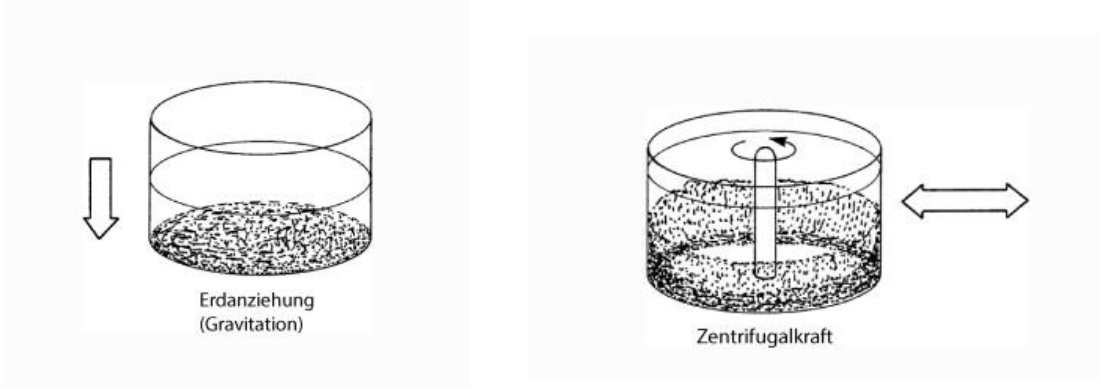
Stoffe und Stofftrennung

https://de.wikipedia.org/wiki/Zentrifuge

- Die Zentrifugalbeschleunigung a_z eines Körpers in einer Zentrifuge als Wirkung der Zentrifugalkraft ist vom Abstand r des Körpers von der Drehachse und von der Winkelgeschwindigkeit ω abhängig.
- Sie steigt linear mit dem Abstand im Zentrifugiergutraum von der Drehachse. Außerdem steigt sie quadratisch mit der Winkelgeschwindigkeit bzw. der Drehzahl n

$$a_Z = r\,\omega^2 = 4\pi^2 r\,n^2 .$$

Die Winkelgeschwindigkeit ist in der Physik eine vektorielle Größe, die angibt, wie schnell sich ein Winkel mit der Zeit um eine Achse ändert.



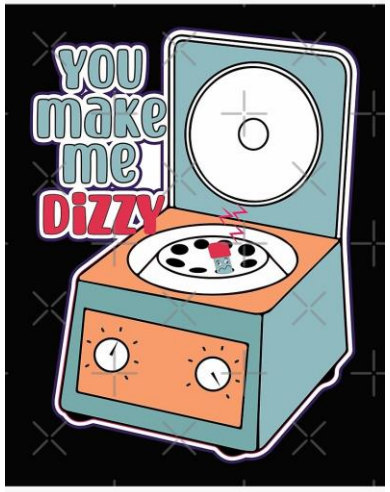
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-0970-2_14

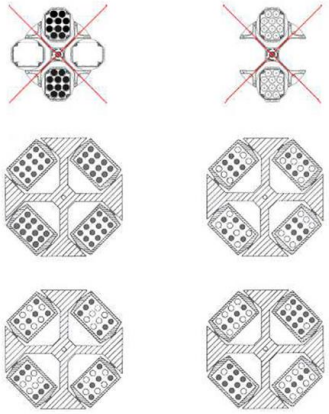
https://www.seilnacht.com/versuche/zentrif.html

Stoffe und Stofftrennung

Bei allen Zentrifugiervorgängen ist die Größe der auftretenden *Zentrifugalbeschleunigung* $b = r\omega^2$ (r = Trommelradius, ω = Winkelgeschwindigkeit) von großer Bedeutung. Das Verhältnis der Zentrifugalbeschleunigung zur Erdbeschleunigung $b/g = T$ wird als *Trennfaktor* oder *Zentrifugenzahl* bezeichnet. T gibt daher an, um wieviel die Trennwirkung im Zentrifugalfeld größer ist als unter Wirkung der Erdschwerkraft.

https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/zentrifugieren/10088





https://www.omnilab.de/sicheres-zentrifugieren-die-8-haeufigsten-fehler-vermeiden/

https://prpmed.de/de/prp/zentrifuge-medifuge-cgf

SCHUTZMASSNAHMEN UND VERHALTENSREGELN

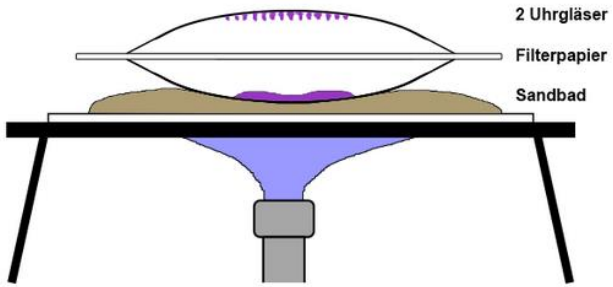
- Vor Arbeitsbeginn Maschine auf betriebssicheren Zustand überprüfen.
- Vor dem Betrieb sind Rotor, Zentrifugenbecher/-röhrchen und deren Verschlüsse einer Sichtprüfung auf Korrosionsfreiheit und Unversehrtheit und passenden Sitz zu überprüfen.
- Ausschließlich Rotoren und Zentrifugenbecher/-röhrchen verwenden, die für den Betrieb der Zentrifuge zugelassen sind.
- Zulässige Beladung und Drehzahl dürfen nicht überschritten werden.
- Verunreinigungen im Rotor unverzüglich beseitigen.
- Infektiöses Material darf nur mit Schraubdeckel und Dichtung zentrifugiert werden.
- Laborkittel, Schutzbrille, Einweghandschuhe tragen.
- Rotor gleichmäßig beladen zur Vermeidung von Unwucht. Die Massen zweier gegenüber einzusetzender Zentrifugenbecher + Füllung dürfen sich bei Ultrazentrifugen um höchstens 0,1 %, bei langsameren Zentrifugen um höchstens 0,5 % unterscheiden. Bei spürbarer Unwucht während des Betriebs Zentrifuge abschalten.
- Sicherheitsabstand zu allen rotierenden Geräteteilen einhalten.
- Besondere Vorsicht mit langen Haaren und lose herabhängenden Kleidungsstücken.

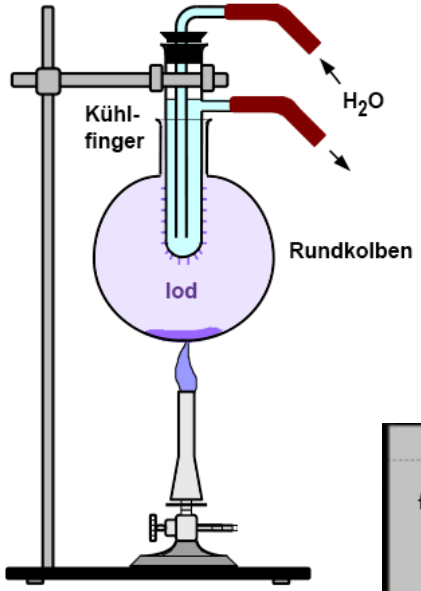
Stoffe und Stofftrennung

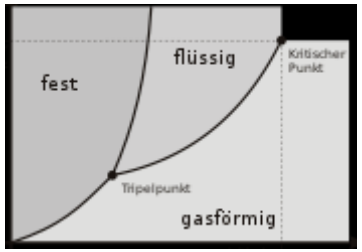
- **Sublimation**: direkte Überführung eines Feststoffes in die Gasphase

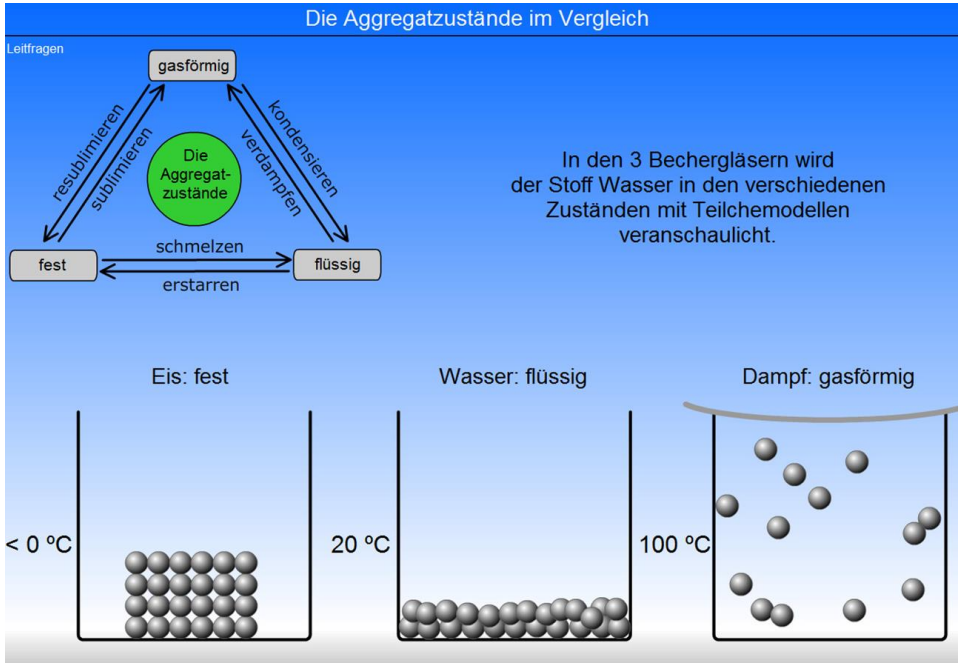
  z.B. Bor, Kohlenstoff und Arsen, aber auch organische Verbindungen wie zum Beispiel Campher gehen bei Erhitzung unter Normaldruck direkt in Gasform über

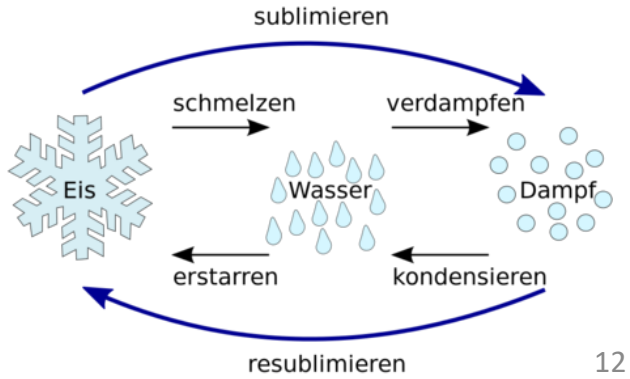
Iod, Trockeneis (bei – 78,5 °C gefrorenes Kohlenstoffdioxid), Arsen oder Campher sublimieren











https://www.seilnacht.com/versuche/sublim.html

Stoffe und Stofftrennung

Rauch

Entstehung von Rauch

Nebel: flüssige Partikel in der Luft
Rauch: feiner Feststoffpartikel in der Luft
→ Partikel im Bereich von 10^{-5} – 10^{-9} m
→ größere Schwebeteilchen → Staub

Möglichkeiten zur Raucherzeugung:

- Dispersion fester oder flüssiger Partikel
- **Rekondensation von verdampftem Material**

Funktionsweise der Rauchmischung

Grundprinzip:

Reaktion zwischen Oxidations- und Reduktionsmittel liefert Energie in Form von Wärme

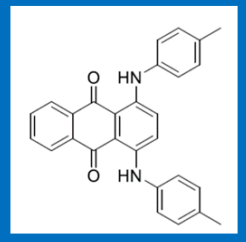
Verdampfen des Farbstoffs (reine Phasenänderung)

Gasförmiger Farbstoff kühlt nach verlassen der Reaktionszone ab und kondensiert

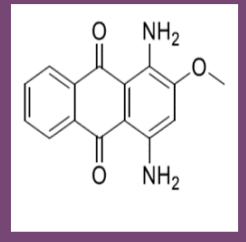
Entstehung von Rauch

colored smoke:

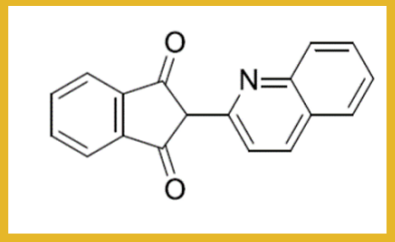
$KClO_3$	oxidizer	35%
sugar	fuel	20%
Dyes	colorant	40-50%
$NaHCO_3$	coolant	2%



solvent green 3 (blau)



solvent violet 47 (violett)



solvent yellow 33 (gelb)

Stoffe und Stofftrennung

Homogene Gemische

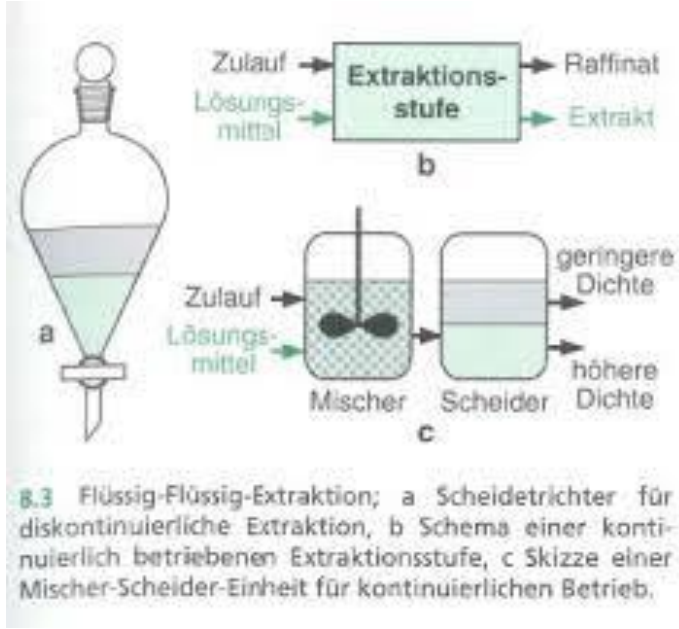
Trennung einer flüssigen Lösung durch Extraktion:

Entfernung eines gelösten Stoffes durch Lösen in einer Flüssigkeit (Lösungsmittel), die mit der anderen nicht mischbar ist

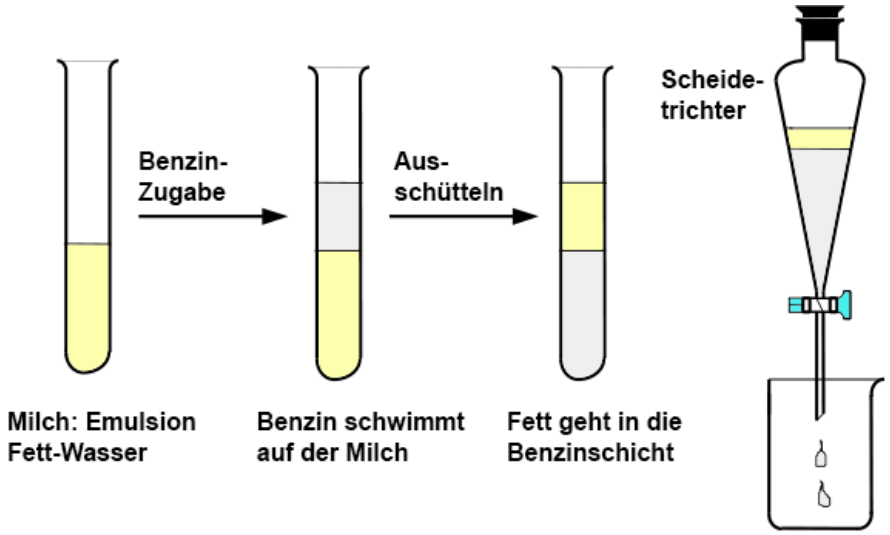
z.B. Trennung von Iodwasser durch Ausschütteln mit organischem Lösemittel (Diethylether) und anschließender Abscheidung im Scheidetrichter

Wenn keine Trennung mehr möglich: Reinstoff

Reinstoff: scharfer Siedepunkt, charakteristischer Schmelzpunkt, charakteristische Dichte, Farbe und Geruch, bestimmte Kristallform und Löslichkeit



8.3 Flüssig-Flüssig-Extraktion; a Scheidetrichter für diskontinuierliche Extraktion, b Schema einer kontinuierlich betriebenen Extraktionsstufe, c Skizze einer Mischer-Scheider-Einheit für kontinuierlichen Betrieb.



https://www.seilnacht.com/versuche/extrah.html

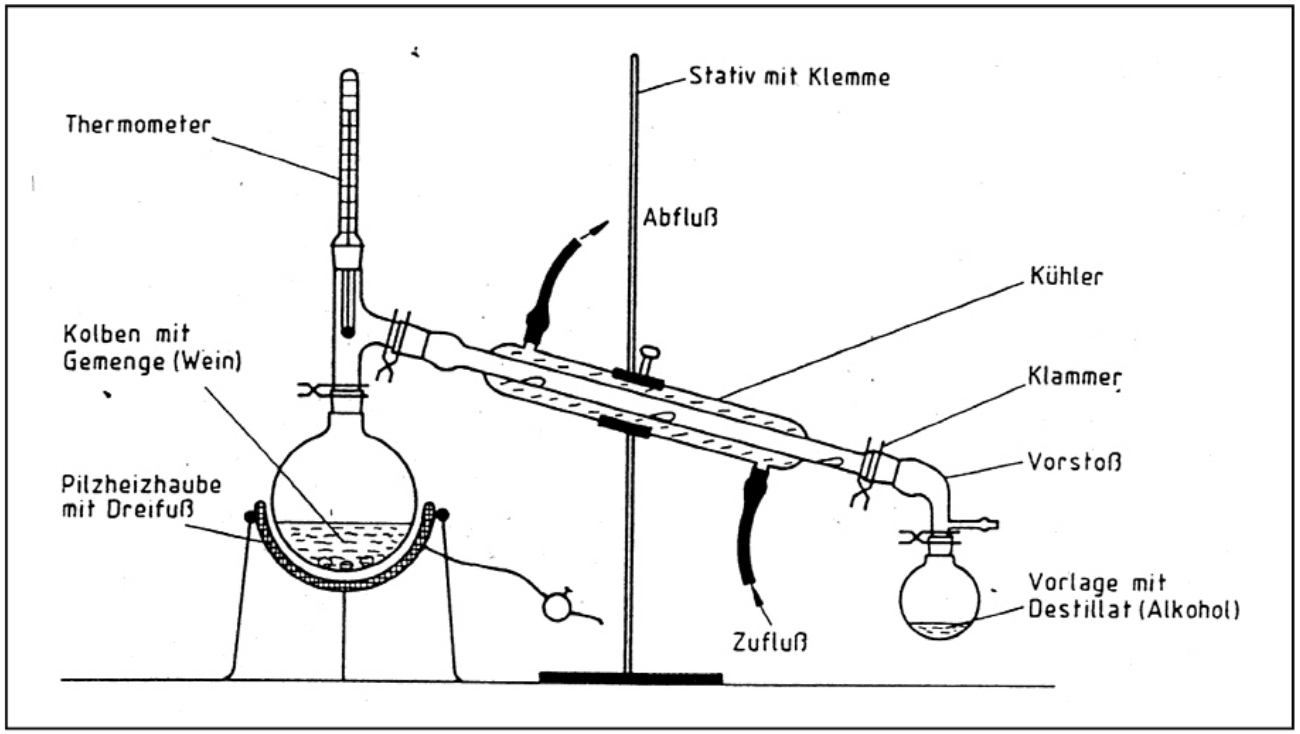
Versuch: Iod-Extraktion

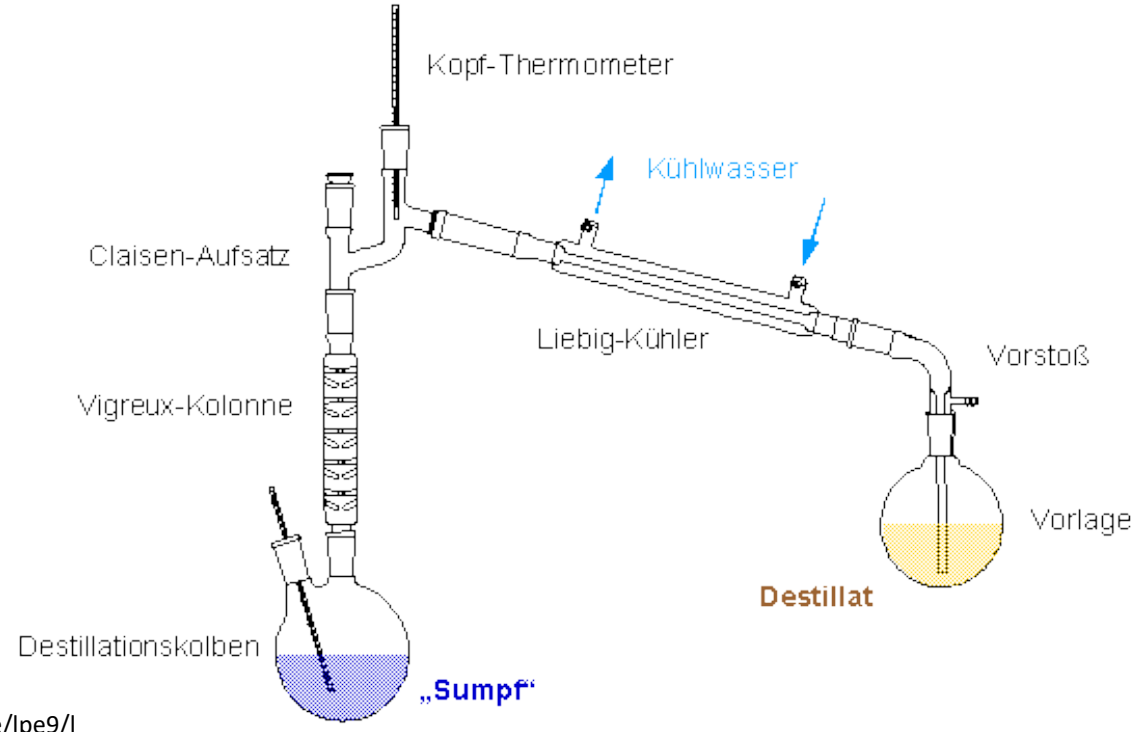
https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physikalische_chemie/folien_vorlesung_5_6.pdf

Stoffe und Stofftrennung

Destillation

Trennung von homogenen Gemischen (Einphasensysteme, Lösungen) zum Beispiel durch Destillation: Abtrennung der Komponente mit dem niedrigeren Siedepunkt durch Verdampfen





https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/berufliche-bildung/ernaehrungslehre/unterrichtsmaterialien/handreichungen/handreichung_ernaehrung_und_chemie/eingangsklasse/lpe9/lpe0902

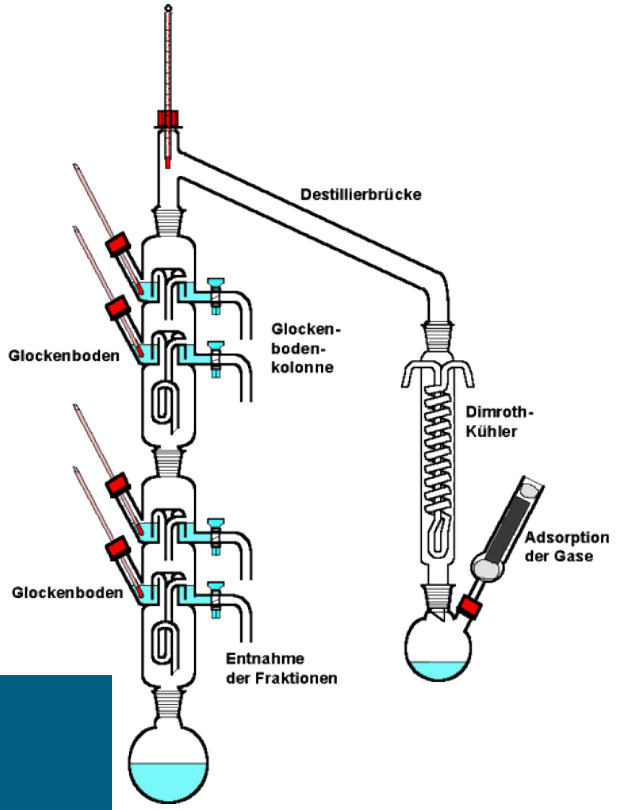
Stoffe und Stofftrennung

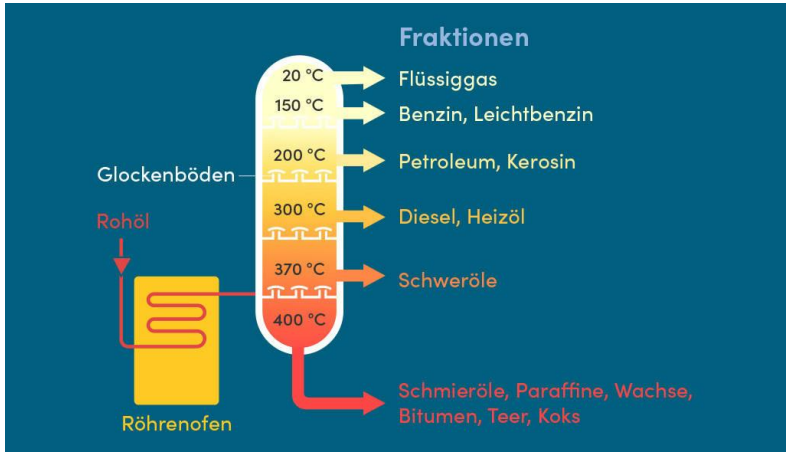
- Beim langsamen Erwärmen von Stoffgemischen erreichen nicht alle Bestandteile zur gleichen Zeit den Siedepunkt.
- Substanzen mit tiefem Siedepunkt sieden zuerst. Diese Stoffe entweichen deshalb als gasförmige Bestandteile, während die höher siedenden Bestandteile zurückbleiben.
- Durch Kühlung des entweichenden Gases erreicht man, dass dieses kondensiert. → Das so gewonnene Destillat besteht nun mehrheitlich aus nur noch einer Substanz.

In der Praxis erreicht man meist nur durch ein mehrmaliges Destillieren reine Stoffe. Auch Wein, welcher fast nur aus Wasser und Alkohol besteht, kann durch einmalige Destillation nicht in Wasser und Alkohol zerlegt werden. Das Kondensat besteht je nach Verfahren aus 40 – 80 % Alkohol.

https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/berufliche-bildung/ernaehrungslehre/unterrichtsmaterialien/handreichungen/handreichung_ernaehrung_und_chemie/eingangsklasse/lpe9/lpe0902

https://www.seilnacht.com/versuche/destill.html



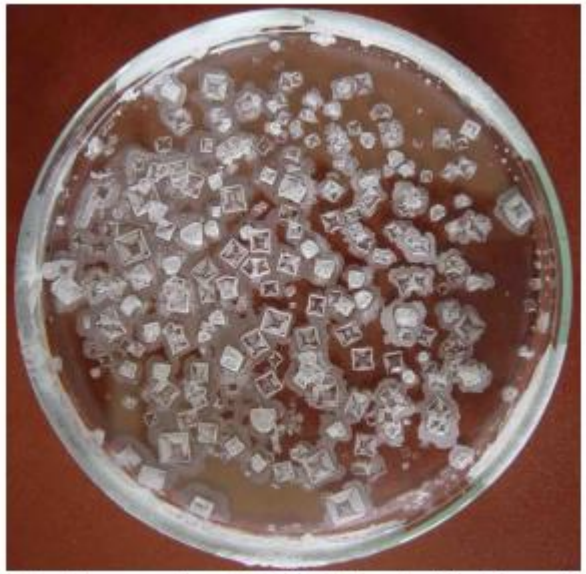


https://www.sofatutor.com/chemie/videos/erdoel-und-die-fraktionierte-destillation

Stoffe und Stofftrennung

Kristallisation

Gelöste, in reinem Zustand feste Stoffe können auskristallisiert werden, in dem man die Löslichkeit des Stoffes vermindert, z.B. Abkühlen.



http://www.chemiedidaktik.uni-oldenburg.de

www.blogsicilia.eu

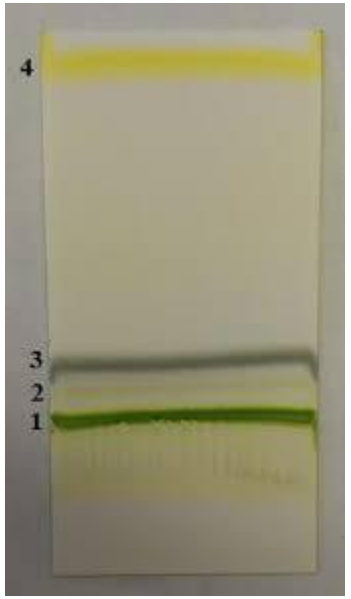
Kristallisation: Ausscheidung gelöster Stoffe durch Kristallisation (Änderung der Löslichkeit durch Temperaturänderung, Volumenänderung etc.)

Stoffe und Stofftrennung

Chromatographie

http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/experimente/Kinder/101_chromatographie.htm

http://www.kupke-chemie-physik.de/hauptseiten/experimentieragarchiv/papierchromatographie/papierchromatographie.html



http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/material/11-12/V11-270.pdf

Definition: Chromatographie ist ein physikalisch-chemisches Trennverfahren, bei dem die zu trennenden Substanzen zwischen zwei Phasen verteilt werden, von denen eine, die ***stationäre Phase***, festliegt, während die andere, ***die mobile Phase***, sich in einer Richtung bewegt.

Stoffe und Stofftrennung

Zur Trennung benötigt man also drei Medien:

- stationäre Phase
- mobile Phase
- Probe

stationäre Phase (feststehend):

- Festkörper oder hochviskose Flüssigkeit, die sich in einem Rohr (Säule) befindet oder auf einem Festkörper (Träger) aufgezogen ist
- auf die stationäre Phase wird die Probe, entweder direkt oder in einem Lösungsmittel gelöst, aufgetragen

Stoffe und Stofftrennung

mobile Phase (beweglich):

- Flüssigkeit oder Gas, die über die stationäre Phase hinwegströmt und dabei mehr oder weniger stark die verschiedenen Bestandteile der Probe mitnimmt
- wird kontinuierlich auf die stationäre Phase gegeben, solange die Trennung läuft
- die stationäre Phase hält die Bestandteile der Probe mehr oder weniger stark zurück
- ein Stoff, der weniger stark zurückgehalten wird, wandert schneller über die stationäre Phase
- ein Stoff, der stärker festgehalten wird, wandert langsamer über die stationäre Phase

Durch die Kombination von stationärer und mobiler Phase lässt sich nahezu jedes Trennproblem lösen.

Anschließend an die Trennung lassen sich die Substanzen qualitativ über die Laufzeit und quantitativ mittels verschiedener Detektoren bestimmen.

Stoffe und Stofftrennung

Unterteilt man die Chromatographie:

nach **Aggregatzustand** der **mobilen Phase:**

flüssig: Flüssigkeitschromatographie – Liquid Chromatographie (LC)

gasförmig: Gaschromatographie (GC) (1951: James & Martin)

nach **Anordnung** der **stationären Phase:**
(technische Ausführung der stationären Phase)

Dünnschichtchromatographie (DC)

Säulenchromatographie

nach **Art** des **überwiegenden Trennungsvorgangs:**

- Adsorptionschromatographie
- Verteilungschromatographie
- Austauschchromatographie
- Ausschlusschromatographie

Stoffe und Stofftrennung

Systematik

Einteilungsmöglichkeiten nach verschiedenen Gesichtspunkten:

- Aggregatzustände der beiden Phasen
- apparative Trenntechnik
- grundlegender Trennmechanismus
- relative Polarität von mobiler und stationärer Phase

Apparative Trenntechnik

- Papierchromatographie
- Dünnschichtchromatographie (DC)
- Säulen-Flüssig-Chromatographie
- Gas-Chromatographie

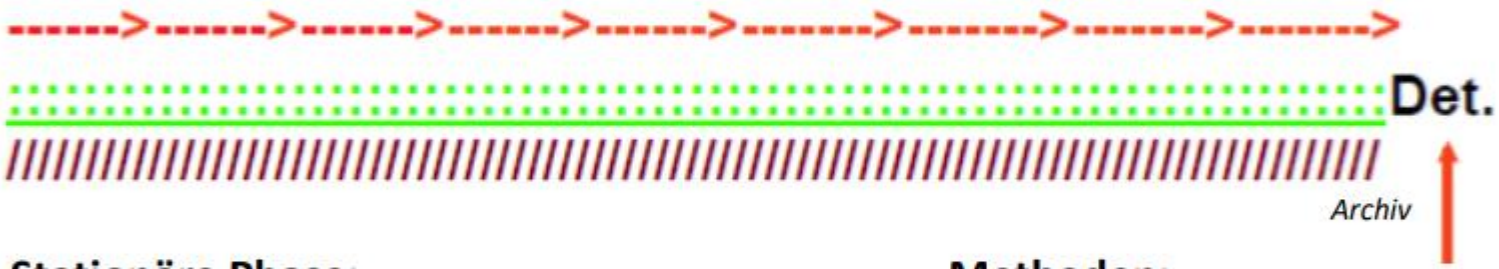
Trennmechanismus

- Adsorptionschromatographie: klassische Form der Flüssigkeitschromatographie. Verwendung stationärer Phasen mit polarer Oberfläche (Kieselgel oder Aluminiumoxid)
- Verteilungschromatographie: heute am häufigsten eingesetzte Methode; weitere Unterteilung in Flüssig-Flüssig-Chromatographie und Chr. an chemisch gebundenen Phasen

Stoffe und Stofftrennung

Mobile Phase:
Gas
Lösungsmittel
Laufmittel

Wechselwirkung:
Adsorption
Desorption



Stationäre Phase:
Kieselgel
Cellulose
Aktivkohle
Ionentauscher

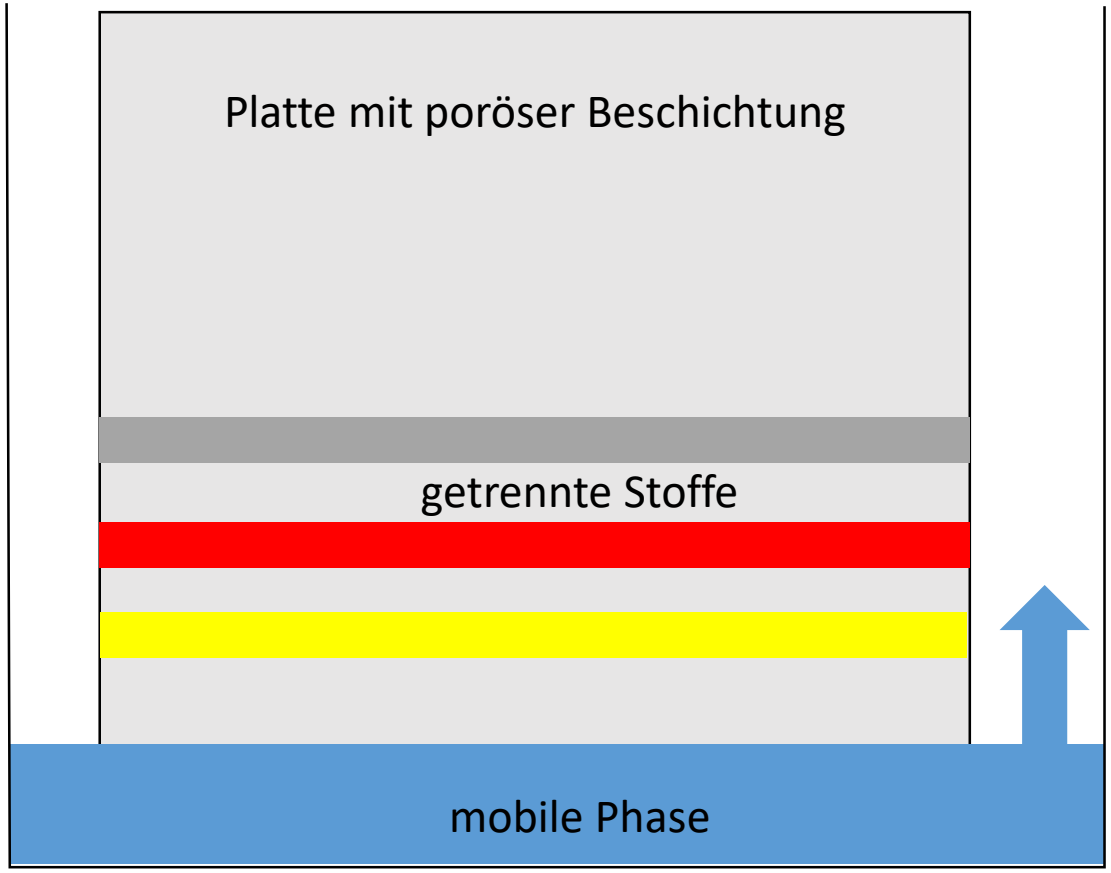
Methoden:
Säulenchromatographie
Dünnschichtchromatographie
Papierchromatographie
Flüssigchromatographie (HPLC)
Gaschromatographie (GC)

Quelle: Prof. Ivanovic-Burmazovic

Stoffe und Stofftrennung

Dünnschicht-chromatographie

Prinzip der Adsorption (Haftung)



Stoffe und Stofftrennung

Dünnschichtchromatographie (DC)

- Weiterentwicklung der Papierchromatographie mit größerer Anwendungsbreite, da keine Beschränkung auf wäßrige Lösungsmittelsysteme
- geringer apparativer Aufwand
- relativ hohe Leistungsfähigkeit bei der Trennung kleinster Mengen
- sehr niedrige Nachweisgrenzen
- breite Variabilität der stationären Phase
- Trennung sowohl hydrophiler als auch lipophiler Substanzen möglich, auch präparativ

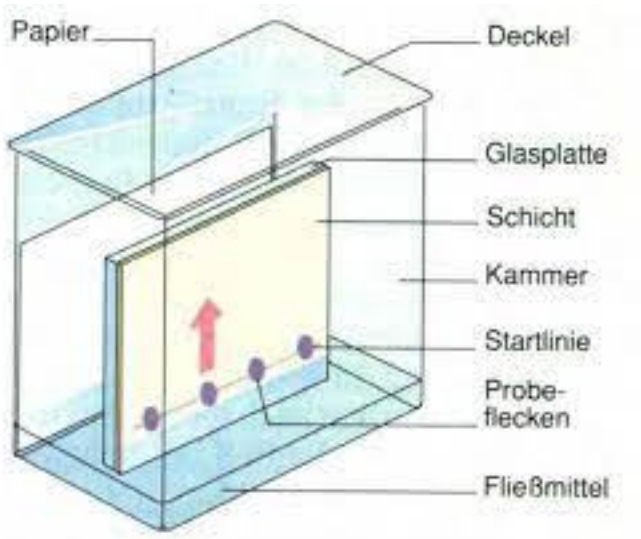
Möglichkeiten:

- Verwendung von „DC-Platten“ aus Glas oder „DC-Folien“ aus Aluminium oder Kunststoff
- Für analytisches Arbeiten ist eine ca. 250 µm (Glasplatte)/ 200 µm (Aluplatte) dicke Schicht von im Mittel 10-12 µm großen Sorbenzien-Partikeln zusammen mit einem polymeren Trägermaterial aufgetragen

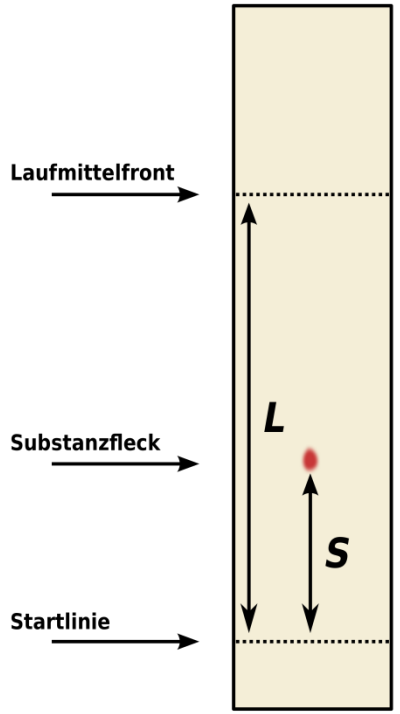
Stoffe und Stofftrennung

Sorbenzien:

- Kieselgel, klassisch oder chemisch modifiziert (silanisiert, CN, diol , NH etc.)
- Aluminiumoxid
- Cellulose
- Kieselguhr



- Probe wird punktförmig mit Kapillare auf Platte aufgetragen
- Kapillarkräfte bewirken Aufsteigen der mobilen Phase
- Kapillarwirkung: Probe wird nach oben gezogen
- Je nach Stärke der Wechselwirkung werde die Einzelsubstanzen unterschiedlich schnell „mitgerissen“
- Erlangung von Vorinformationen für Säulenchromatographie



R_f = Weg der Substanz/Weg der mobilen Phase

http://www.klichi.uni-muenster.de/examate/Kannenberg_Chromatographie_Massenspektrometrie_Folien.pdf

Stoffe und Stofftrennung

Säulenchromatographie

z.B. MeOH, CH_2Cl_2, Benzol

©Alexiots

Prinzip der Adsorption (Haftung)

z.B. Al_2O_3, SiO_2

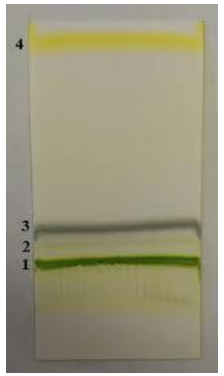
Stoffe und Stofftrennung

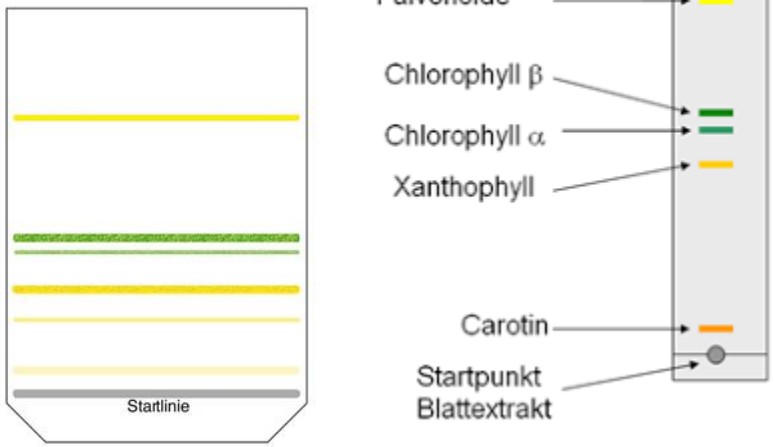
1903: M. Tswett: Auftrennung der Farbstoffe des Blattgrüns auf mit einem Absorbens (Calciumcarbonat) gefüllten Trennsäulen

Auftrennung von Blattfarbstoffen:

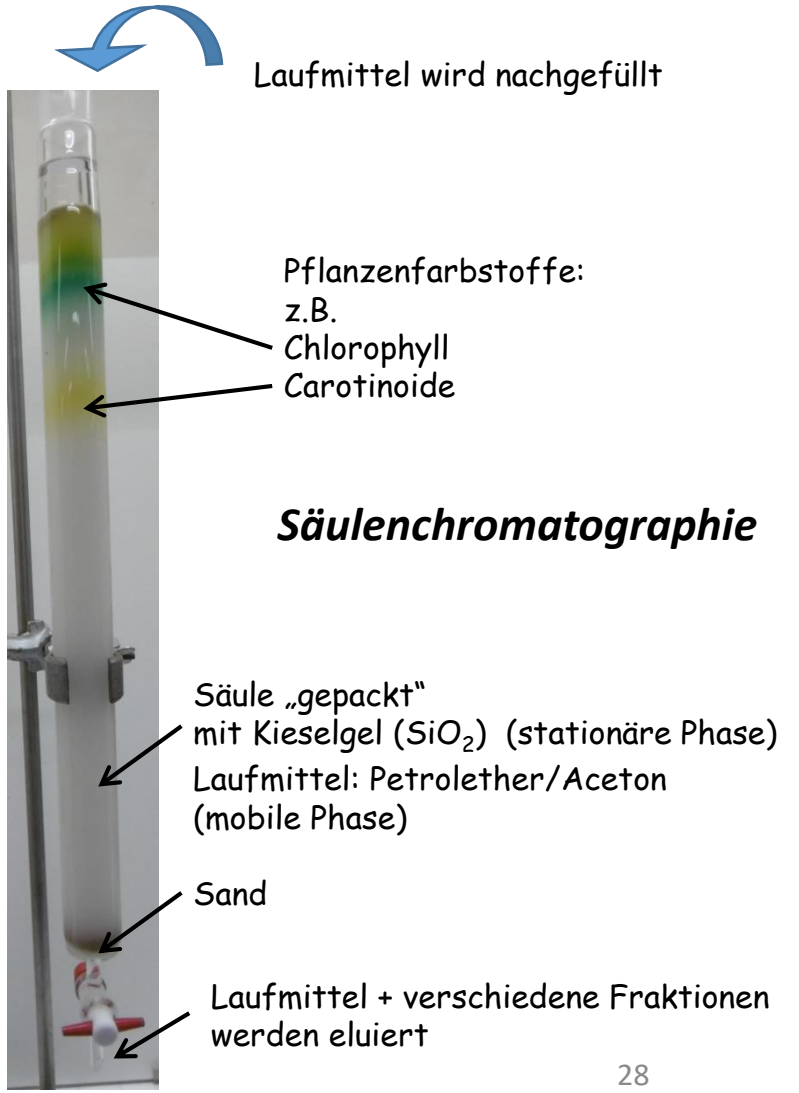
Blatt in Isopropanol zerreiben. Die Farbstoffe werden im Lösungsmittel gelöst.

Dünnschichtchromatographie:





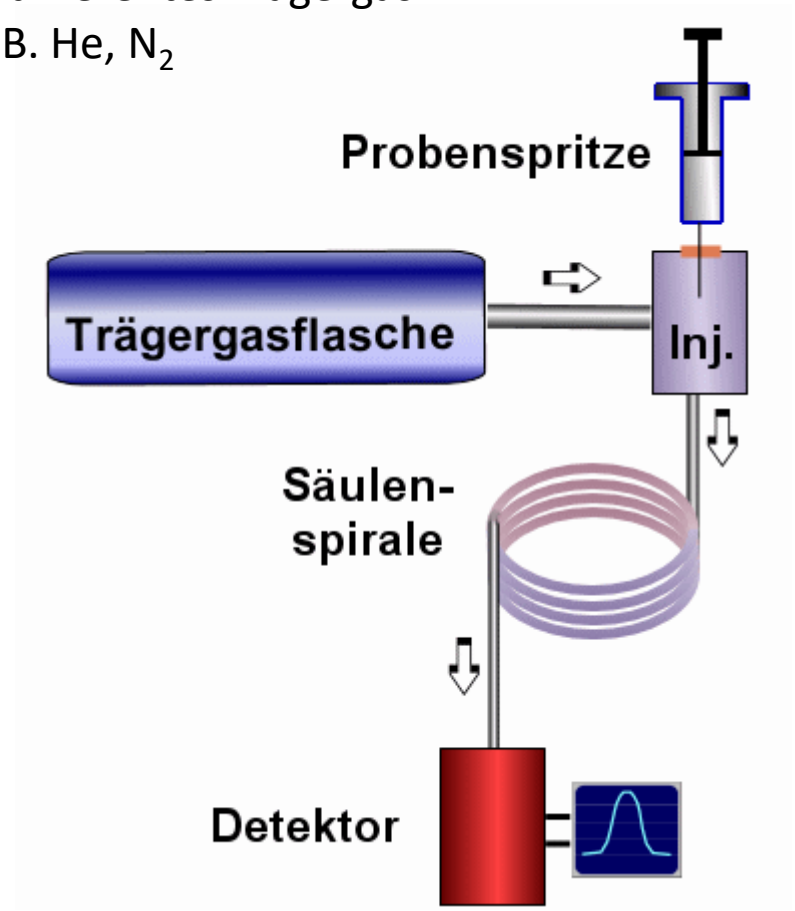
https://www.chids.de/dachs/praktikumsprotokolle/PP0268gewinnung_extraktion_blattfarbstoffe_gruppe12.pdf
https://hlfs.schule.at/fileadmin/DAM/Gegenstandsportale/HLFS/Chlorophyll-DC-Chromatographie.pdf



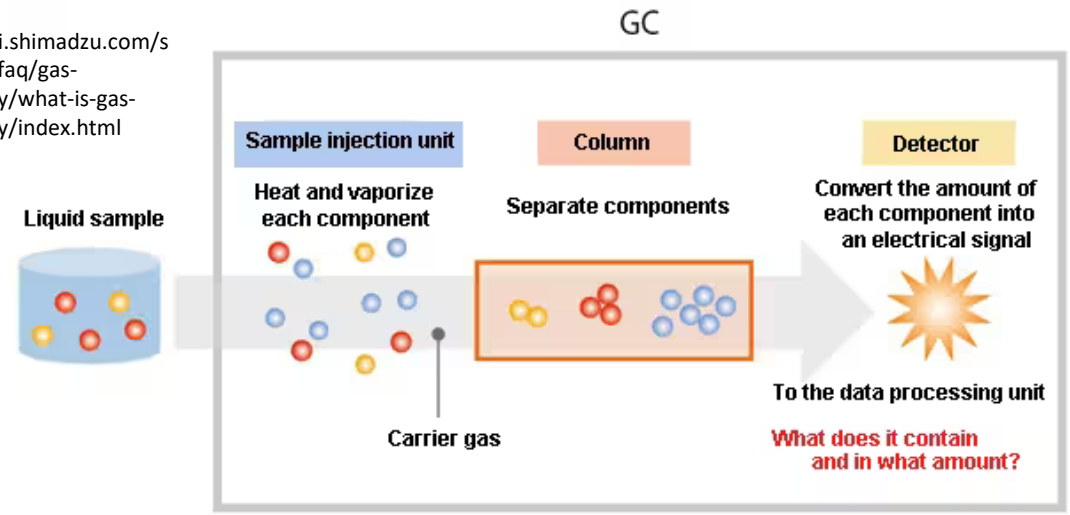
Stoffe und Stofftrennung

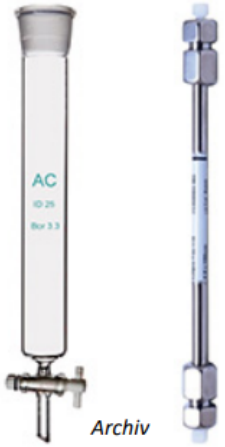
Gaschromatographie

Indifferentes Trägergas
z.B. He, N_2



https://www.ssi.shimadzu.com/service-support/faq/gas-chromatography/what-is-gas-chromatography/index.html





Säulenchromatographie (**LC**) mit Glassäulen im Niederdruckbereich vs. **HPLC** mit Metallsäulen im Hochdruckbereich

HPLC: High Performance Liquid Chromatography

- Auftrennung, Identifizierung und Quantifizierung
- Auch für nicht flüchtige Verbindungen

Quelle: Prof. Ivanovic-Burmazovic

Stoffe und Stofftrennung

Trennung von Lösungen durch Fällungsreaktionen

Triebkraft ist die Schwerlöslichkeit einer Verbindung in einem bestimmten Lösungsmittel.

Prominente Vertreter von schwerlöslichen Verbindungen:

Silberhalogenide (AgCl, AgBr, AgI)
Schwermetallsulfide (PbS, HgS)
Sulfate ($BaSO_4$, $PbSO_4$)
Chromate ($BaCrO_4$, $PbCrO_4$)

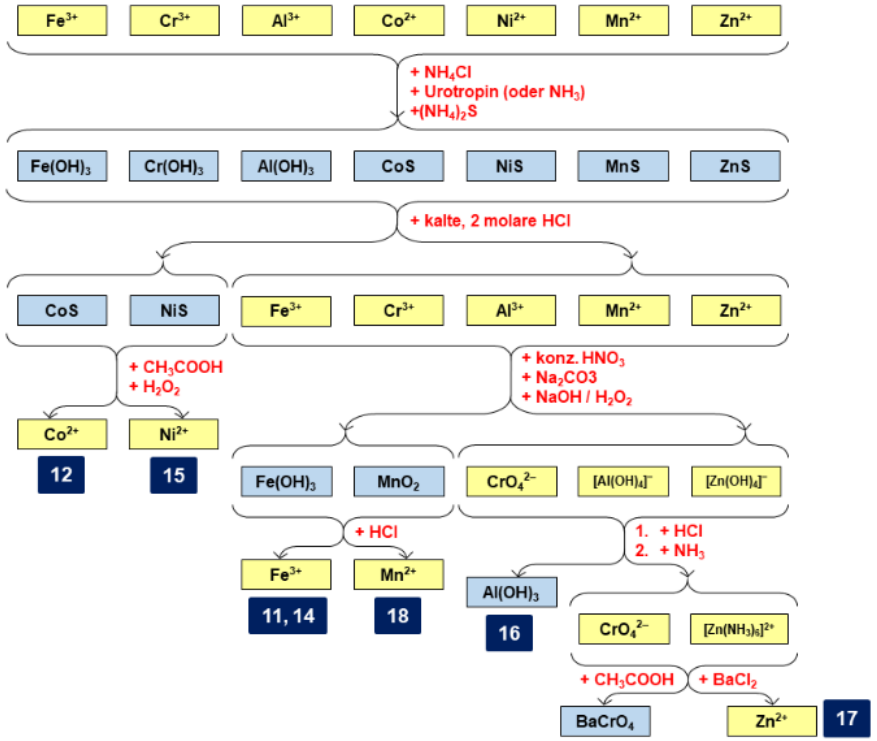


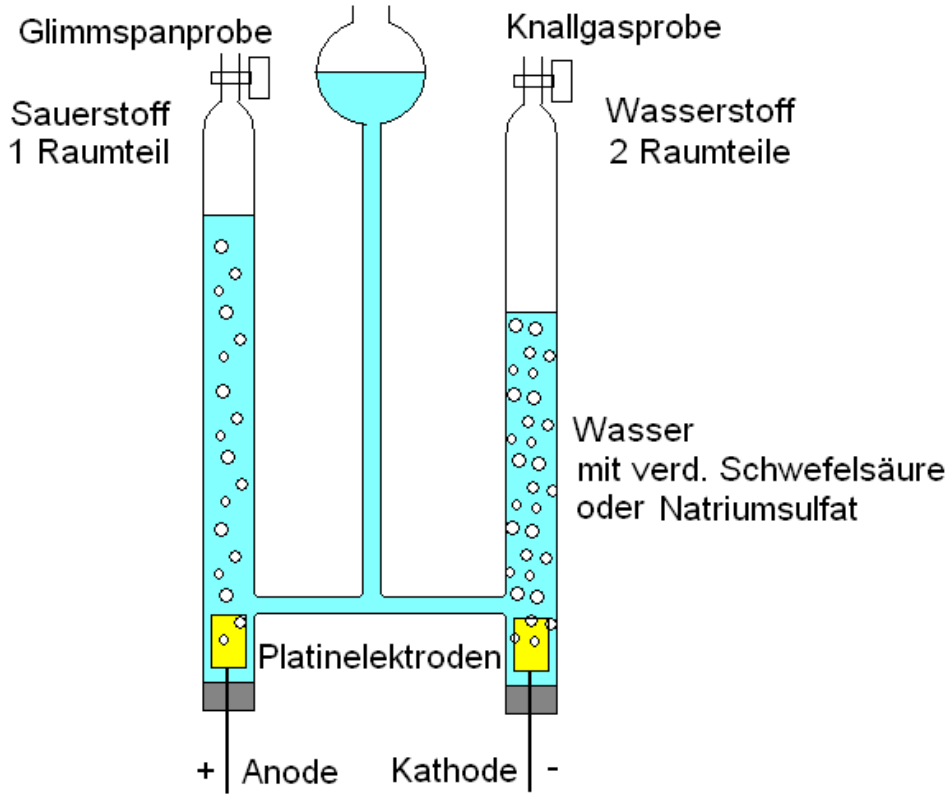
Abbildung 9: Übersicht über den Trennungsgang der Kationen der $(NH_4)_2S$-Urotropin-Gruppe.

https://www.schuelerforschung.de/wp-content/uploads/2019/12/Ionenlotto.pdf

Stoffe und Stofftrennung

Zerlegung von Verbindungen

a) Elektrolyse von Wasser



b) Thermolyse

z.B. $HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$

500°C: $O_2 + 2\ BaO \rightarrow 2\ BaO_2$

700°C: $2\ BaO_2 \rightarrow 2\ BaO + O_2$

c) Photolyse

$AgCl \rightarrow Ag + ½\ Cl_2$

Stoffe und Stofftrennung

Übersicht

Heterogene Gemische	Homogene Gemische
Sortieren	Extraktion
Sedimentieren und Dekantieren	Kristallisation
Extraktion	Destillation
Filtrieren	Chromatographie
Abdampfen und Trocknen	Elektrophorese

Quelle: Prof. Ivanovic-Burmazovic