

**Landeshauptstadt
Hannover**



Schulbiologiezentrum



„Bioethanol“ in der Schule: Vom Acker in den Tank?

(1. Teil: Ethanolgewinnung)

September 2011

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum



Impressum:

Titel: **Bioethanol in der Schule
Vom Acker in den Tank?**

Arbeitshilfe September 2011

Verfasser: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info

Inhalt:

„Bioethanol“ in der Schule
Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais an der Tankstelle?

Vorwort.....	1
Bioethanol / Produktion von Bioethanol.....	3
Hinweise zu den Arbeitsblättern.....	4
„Grüne Solarzellen“ : Pflanzen stellen ihre Nahrung selbst her.....	4
Herstellung von Rübensaft und (optional) Zucker aus Zuckerrüben.....	4
Ein möglicher Einstieg: Sprengstoff Stärke oder „Power von der Sonne“.....	5
Die „Ethanolkerze“.....	6
Schritte zur Herstellung von Ethanol.....	7
Extraktion von Stärke aus Kartoffeln.....	7
Stärkegehalt der Kartoffel bestimmen.....	9
Energieverbräuche bei der Bioethanolherstellung messen.....	9
Abfallstoffe und Umweltbelastung (BSB-Wert).....	10
Herstellung von Malz zur enzymatischen Verzuckerung von Stärke.....	12
Alternative zum Mälzen: Isolierung von Amylase zur Stärkeverzuckerung.....	13
Einmischen und Rasten (Verzuckerung von Stärke).....	14
Messen des Zuckergehalts.....	15
Chemische Verzuckerung von Stärke: Saure Hydrolyse.....	16
Zuckertest: Fehling, Glucose-Teststäbchen, Refraktometer, Saccharometer.....	17
Vergärung des Zuckers zu Ethanol.....	18
Hefe kultivieren und selektieren.....	20
Siedepunkte von Wasser und Ethanol feststellen.....	21
Destillation zu brennbarem Ethanol.....	21
Messen des Alkoholgehalts.....	23
Absolutierung (100%iges Ethanol).....	23

Im Text mit * bezeichnete Materialien
sind im Schulbiologiezentrum Hannover erhältlich bzw. ausleihbar

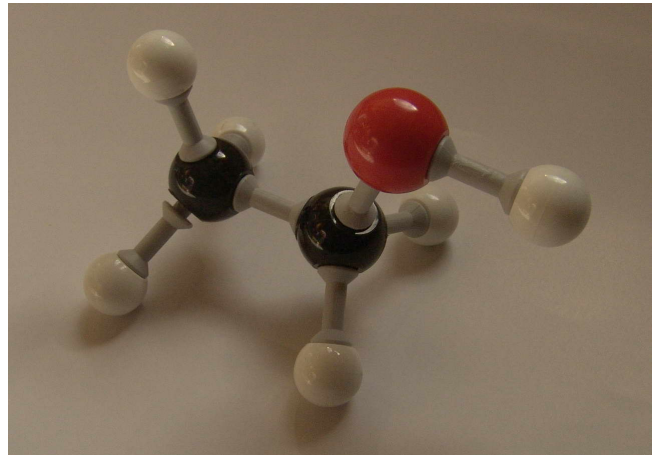
Anhang: Arbeitsblätter

„Bioethanol“ in der Schule

Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais an der Tankstelle?



Kartoffeln speichern Sonnenenergie für ihre "Kinder"



„Ethy“, das Ethanolmolekül

- Kartoffeln und Mais enthalten Stärke.
- Stärke enthält Sonnenenergie.
- Keimende Pflanzen verwandeln Stärke in Zucker.
- Zucker enthält Sonnenenergie.
- Hefepilze vergären Zucker zu Alkohol.
- Alkohol enthält Sonnenenergie.
- Mit Alkohol (natürlich nur im Tank!) kann man Auto fahren.

„Für die jährliche Ernährung eines Menschen genügt der Ertrag von 1000 m² Ackerfläche, für den entsprechenden Treibstoffbedarf eines US-amerikanischen Autos würde man dagegen 30000 m² benötigen. Ein Auto fräße also 30 Menschen die Nahrung weg!“
(zitiert nach RENNEBERG, Biotechnologie für Einsteiger, Spektrum-Verlag 2007).

Machen wir uns nichts vor:

Wir Deutschen leben auf einem fast ebenso hohen Niveau wie die Amerikaner. Wir sollten die „Schuld“ nicht nur bei den Anderen suchen...

Vorwort

Bioethanol ist nachwachsender Treibstoff vom Acker.

Prinzipiell ist Bioethanol CO₂-neutral und damit „klimafreundlich“: Im Idealfall wird jedes bei der Bioethanol-Verbrennung entstehende Kohlenstoffdioxidmolekül bei der Photosynthese der grünen Pflanze der Atmosphäre entzogen und geht auch wieder in diesen Prozess ein.

Das unterscheidet „nachwachsende“ Energieträger von „fossilen“ Treibstoffen wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Letztere sind zwar auch durch Photosynthese entstanden und auch sie enthalten der Atmosphäre entzogenes CO₂. Bei ihrer „Produktion“ vergingen aber viele Millionen Jahre, während unsere technisierten, auf großem Fuße lebenden Kulturen das Ergebnis in wenigen Jahrzehnten „verheizen“. Dies hat einen entsprechenden „ökologischen Fußabdruck“ zur Folge:

Die nachweisbare Steigerung der CO₂-Konzentration führt möglicherweise zu schwerwiegenden Konsequenzen für den globalen Wärmehaushalt der Erde.

Bioethanol erscheint unter diesem Blickwinkel als umweltfreundliche, nachhaltige weil nachwachsende Energiequelle: Grüne Energiepflanzen „zapfen“ praktisch unendlich lange die Sonne an und produzieren „solaren“ Treibstoff für eine mobile Welt von Morgen.

Eine versöhnliche Aussicht, oder?

Gibt es auch Schattenseiten dieser „Neuen grünen Welt“?

Gelten „nur“ klimatische und auf die Verfügbarkeit von Ressourcen gerichtete Aspekte?

Welche ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Folgen hat der überall zu beobachtende Wandel der Landwirtschaft von der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zum Treibstofflieferanten?

Sind die Folgen nur lokal, auf den eigenen Erfahrungshorizont und persönliche Sichtweisen bezogen oder haben sie globale Dimensionen? Und: Haben wir „Reichen“ die gleichen Interessen wie die „Armen“ in der so genannten „Dritten Welt“ oder die vielleicht nicht ganz so armen unmittelbaren Nachbarn?

Die notwendige Diskussion über den „richtigen Weg“ ist eine pragmatische und ethische zugleich. Sie muss denen näher gebracht werden, die Entwicklungen der so oft bemühten „Welt von Morgen“ zu tragen haben. Sie muss individuelle Ansprüche mit den Notwendigkeiten eines friedlichen, sozialen und globalen Miteinanders in Übereinstimmung bringen.

Es gibt engagierte Befürworter, die sich in Wort und Tat ebenso engagierten Klimaschutzzielen verpflichtet fühlen und massive Kritiker, die mögliche ökologische Schäden in den Vordergrund stellen und das Bioethanol-Programm für einen Ersatz in der EU wegfallender bzw. über alle Mitgliedsländer neu verteilter Agrarsubventionen halten. Wer hat Recht?

Was man nicht weiß, muss man glauben: Leider werden die Diskussionen nur zu oft vom Glauben und weniger von gelassener Sachkenntnis bestimmt.

Um sich an diesbezüglichen Entscheidungen beteiligen zu können, bedarf es – vor jeder ethischen oder politischen Positionseinnahme – eines „gesunden“ Fachwissens. Nur durch den fachlich fundierten „Durchblick“ entsteht „Gestaltungskompetenz“, nur so lassen sich unabhängige, „reife“ Köpfe schaffen, die nicht Mehrheiten und Moden hinterherlaufen, sondern die Tragweite ihrer individuellen Handlungen im sozialen Kontext hinterfragen können und diese gegebenenfalls mit ihrer selbst entwickelten (!) Ethik verändern. Mit steigender Fachkompetenz erhöht sich auch die Fähigkeit, Nachhaltigkeit fördernde Ideen überzeugend vorzutragen und Skepsis zu begegnen.



Im Rahmen der „**Bildung für Nachhaltige Entwicklung**“ haben wir den aufgrund fachlicher Abwägungen selbst entscheidenden und von sozialer und globaler Empathie geprägten Menschen im Blick: Einen Menschen, der seinen eigenen Standpunkt entwickelt und ihn durch Wissen und Handeln zu vertreten weiß.

Das Projekt „Bioethanol“ entstand in Zusammenarbeit zwischen mehreren hannoverschen Einrichtungen: Dem Schulbiologiezentrum, dem Schul-LAB der IGS-Mühlenberg, der Wilhelm-Raabe-Schule (Biotechnisches Labor) und der Berufsbildenden Schule 6 mit dem „Motoren-LAB“. Die vier Einrichtungen widmen sich dabei unterschiedlichen, miteinander aber stark verzahnten Aspekten. Sie reichen von der Biologie, der Landwirtschaft, der „grünen“ Gentechnik über die Physik und Chemie von Treibstoffen bis zur technischen Nutzung in Verbrennungsmotoren oder der Stromgewinnung.

Zielgruppe des Unterrichtsprojekts ist der 9. und 10. Jahrgang der allgemeinbildenden Schulen. Einzelne weiterführende Themen greifen auch in die Jahrgänge 11 und 12 hinaus, z.B. stöchiometrische Berechnungen zur CO₂-Bilanz.

Das Thema „Bioethanol“ deckt die im Folgenden - (auszugsweise) - aufgelisteten - niedersächsischen curricularen Vorgaben (Kerncurricula, KC) bzw. Rahmenrichtlinien (RRL) der Hauptschulen, Realschulen, Gymnasien und Integrierten Gesamtschulen ausgewiesenen fachlichen Inhalte und Kompetenzbereiche ab.

Großen Wert legen wir auf Kompetenzen wie Versuchsplanung, -durchführung, -auswertung und -kritik, Protokollieren der Abläufe und Ergebnisse, gemeinsames und arbeitsteiliges Arbeiten und die kreative Weiterentwicklung der hier vorgestellten Versuche.

Da viele angesprochene Aspekte nur in Schulprojekten und Wahlkursen, nicht aber im Regelunterricht zu verwirklichen sind, haben wir eine Auswahl möglicher Facharbeitsthemen für das Seminafach der Sekundarstufe II angeführt. Schülerinnen und Schüler mit diesen und ähnlichen Themen können nach Absprache, und soweit es unsere Zeitkontingente erlauben vom Schulbiologiezentrum betreut.

Das Bioethanol-Projekt entstand im Laufe eines Jahres und wurde in Teilschritten mit Schülerinnen und Schülern verschiedener Schularten umgesetzt, zuletzt im Rahmen des hannoverschen „November der Wissenschaft“.

Das Projekt ruht auf den Schultern vieler Menschen, die mit guten Ideen zum Gelingen beigetragen haben.

Mein besonderer Dank geht an die Kolleginnen und Kollegen des Schulbiologiezentrum und der IGS Mühlenberg, die mich in vielen Fachfragen mit Rat und Tat unterstützt haben, und mir Mut gemacht haben das Projekt weiterzuführen. Besonders danke ich Dagmar Grott für ihr scharfes und unerbittliches Auge beim Korrekturlesen.

Diese Arbeitshilfe beschreibt die biotechnischen Schritte der Alkoholerzeugung „vom Acker in den Tank“. Weitergehende Aspekte, wie die Verbrennungseigenschaften, Energie- und CO₂-Gehalte, wird in einer folgenden Arbeitshilfe des Schul-LABs beschrieben.

Ingo Mennerich
Schulbiologiezentrum, September 2011



Bioethanol:

Ab 1. Januar 2011 wurde der dem Benzin obligatorisch beigemischte Ethanolanteil von bisher 5% (E05) auf 10% (E10) erhöht. Die Umstellung hat heftige Diskussionen ausgelöst und viele Fragen aufgeworfen: Welche Motoren sind E10-tauglich, welche nicht? Wie entwickeln sich der Spritpreis und der Spritverbrauch? Ist Bioethanol wirklich umweltfreundlich? Ist es tatsächlich CO₂-neutral? Welche Folgen hat die Bioethanol-Produktion für die Landschaft, die Qualität der Böden und die Artenvielfalt? In den führenden Bioethanol-Ländern Brasilien, das auf eine jahrzehntelange Geschichte der zuckerrohrbasierten Alkohol-Nutzung zurückblickt, und den USA, wo ein guter Teil der Maisproduktion zum Autofahren genutzt wird, lassen sich die positiven und die negativen Aspekte studieren und gegeneinander abwägen.

In Deutschland schlug die Einführung fehl. Nur wenige Autofahrer entschlossen sich zum Griff nach der E10-Zapfpistole. Die Gründe dafür sind vielfältig und reichen von der Angst vor Motorschäden und dem Preis über ökologische Bedenken bis zur im Ausland oft beschriebenen „german angst“. Regiert die Vernunft oder die Hysterie?

Wir hoffen hier, mit unserem Projekt Teile der nächsten Autofahrergeneration zum Nachdenken und zur Abwägung anregen zu können.

Produktion von Bioethanol:

Die Herstellung von Bioethanol gleicht im Wesentlichen der Herstellung von trinkbaren Alkoholika, beispielsweise Bier und Korn, allerdings muss zum Einsatz in Kraftfahrzeugen je nach Motorentyp eine Alkoholkonzentration von 96 - 100 % erreicht werden.

Ausgangsstoff ist pflanzlicher, durch Photosynthese („Sonnenenergie“) erzeugter Zucker. Als Quelle dienen einerseits Pflanzen mit hohem Zuckergehalt, z.B. die Zuckerrübe oder Zuckerrohr, andererseits stärkehaltige Pflanzen wie Mais und andere Getreide sowie Kartoffeln, deren Stärke zu Zucker zurückverwandelt werden muss. Als zukünftige, heute aber noch sehr teure Alternative gilt die Verzuckerung von cellulose- und ligninhaltigen Stoffen, etwa Holz und Stroh.

Der in Wasser gelöste Zucker (Saccharose) wird von Hefen (Saccharomyces-Arten) zu niedrigprozentigem Ethanol vergoren und anschließend durch Destillation in mehreren Schritten auf maximal mögliche 96% aufkonzentriert. Das Ergebnis entspricht dem durch Destillation nicht abtrennbare Zusatzstoffe ungenießbar gemachten Brennsprit und dem in Brasilien in den 1970er Jahren verwendeten Kraftstoff E100, der trotz des etwa 4%igen Restwassergehalts in dafür geeigneten Motoren (Ethanol- und Flex-Motoren) verbrannt werden kann. In der EU vertriebene Benzin-Ethanol-Gemische enthalten in einem Zusatzverfahren auf 100% aufkonzentriertes Bioethanol, E10 beispielsweise 10%.

Der Herstellungsprozess enthält mehrere energieaufwändige Schritte (z.B. Maschineneinsatz, Transport, Destillation), die gegen den Energiegehalt des Ethanols aufgerechnet werden müssen. Solche Rechnungen sind auch in Bezug auf die Produktion von CO₂ notwendig.



Hinweise zu den Arbeitsblättern:

„Grüne Solarzellen“: Pflanzen stellen ihre Nahrung selbst her



Unser Leben gründet sich auf die Photosynthese grüner Pflanzen. Sie sind in der Lage, mit Hilfe der Strahlungsenergie der Sonne aus einfachen anorganischen Stoffen wie Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) energiereiche organische Stoffe wie den Zucker Glucose ($C_6H_{12}O_6$) zu machen. Die grüne Pflanze stellt – anders als wir – ihre Nahrung also selbst her. Wir dazu nicht Befähigte, ob Vegetarier oder über den Umweg „Gras-Kuh“, leben von dieser Nahrung.

Zucker ist wasserlöslich und im wässrigen Milieu der Zelle kein geeigneter (lagerfähiger) Reservestoff. Zucker würde die Zelle osmotisch durch Wasseraufnahme zum Platzen bringen. Daher wird Zucker in (wasserunlösliche) Stärke verwandelt.

Stärke ist ein kettenartig aus Hunderten von Zuckerbausteinen (Glucose bzw. aus zwei Glucosemolekülen zusammengesetzte Saccharose) aufgebautes, schraubenförmig gedrehtes Riesenmolekül (ein Polysaccharid). Stärke lässt sich leicht mit Jodlösung (Lugol'scher Lösung) nachweisen: Jod wird in die Schraubenwindungen eingelagert und absorbiert rotes, gelbes und grünes, aber kaum blaues und violettes Licht. Ist die Probe stärkehaltig, färbt sie sich blauviolett. Im Schulbiologiezentrum erhalten Sie Pflanzen mit panaschierten Blättern, beispielsweise Pelargonium-Arten, Buntnesseln (Coleus, Plectranthus) oder die Streifenlilie („Grünlilie“, Chlorophytum). Nur ein Teil der Blattzellen dieser panaschierten Pflanzen ist chlorophyllhaltig, grün und zur Photosynthese fähig. Damit ist auch nur dort Stärke nachweisbar.



Ein abgepflücktes, vorher der Sonne ausgesetztes Blatt wird in wenig heißem Ethanol (Brennspiritus) entfärbt. Das geschieht am besten in einem, im Wasserbad erwärmten, geschlossenen Gefäß (Würstchenglas mit Schraubdeckel). Während das ursprünglich teilweise grüne Blatt gänzlich weiß wird, färbt sich der Brennspiritus grün. Die (ethanolische) Chlorophylllösung ist übrigens gut für (einfache) Chromatographie und Spektroskopie geeignet (s. Arbeitshilfen „Experimente zur Photosynthese“ und „Licht und Farbe“).

Wenn das entfärbte, weiße Blatt mit (verdünnter) Jodlösung überdeckt wird, färben sich nur die vorher grünen und stärkehaltigen Areale blauviolett.



Der Versuch ist vielfältig abwandelbar: So kann man im Hellen und Dunkeln gehaltene Blätter vergleichen, den Stärkegehalt morgens und abends untersuchen oder Blattareale zu verschiedenen Zeiten und unterschiedlich lange mit schwarzen Pappstreifen, Schablonen oder gar Fotonegativen abdecken.

Herstellung von Rübensaft und (optional) Zucker aus Zuckerrüben

Die **Zuckerrübe** (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *altissima*) ist eine **zweijährige** durch langjährige Züchtung aus nur wenig Zucker enthaltenden Wildformen erzeugte Kulturpflanze: Die heute noch an der westlichen Nordsee und am Atlantik wachsende Wild-Beete, *Beta vulgaris* subsp. *maritima*) gilt als ihre „Urmutter“. Der natürliche Lebenszyklus der Kulturform wird im ersten Jahr durch die Ernte abgebrochen, d.h. sie kommt unter normalen Anbaubedingungen nicht zur Blüte.



Die Zuckerrübe wird im Frühjahr ausgesät. Im ersten Jahr bildet sie nur grüne Blätter. Sie verwandeln Sonnenenergie in Zucker (Photosynthese).

Der Zucker wird im Herbst und Winter in der unterirdisch durch Verdickung der Wurzel entstehenden Rübe gespeichert. Im Frühjahr des zweiten Jahres würde die Pflanze – ließe man sie weiter wachsen - die so gespeicherte Sonnenenergie nutzen, um einen etwa 1,5 m hohen, im Sommer blühenden, Samen bildenden und erneut Sonnenlicht einfangenden grünen Spross zu bilden.

Nahe (Kultur-)Verwandte der Zuckerrübe sind: Rote Bete, Futterrübe, Mangold

Zur Herstellung von 1 l Bioethanol werden 7,9 kg Zuckerrüben oder 1,5 m² Anbaufläche gebraucht.

Der Zuckergehalt heutiger Hochzuchtrüben liegt bei 17% (Wildform 4%).

Zum Herauslösen des Zuckers säubern wir die Rübe, zerschneiden sie in Viertel und zerkleinern sie mit einer Kartoffelreibe (Oberflächenvergrößerung und mechanische Öffnung der Zellen). Die Schnitzel werden unter ständigem Rühren in Wasser erhitzt. Wird eine elektrische, an eine Steckdose anschließbare Herdplatte* benutzt, lässt sich der Energieverbrauch mit einem Leistungsmessgerät* in Wattstunden (Wh) ermitteln und mit gegen den Energiegehalt des gewonnenen Zuckers aufrechnen. Dabei gilt: 1 Wattstunde (Wh) = 3600 Wattsekunden (Ws) = 3600 Joule (J) = 3,6 Kilojoule (kJ). Zucker (Saccharose) enthält 16,8 kJ pro g.

Beim Eindampfen steigt die Zuckerkonzentration, die durch Dichtemessung oder (einfacher) durch Messung mit dem Refraktometer* bestimmt werden kann. Die Schnitzel werden durch Oxidation grau, was sich durch Zugabe von Antioxidantien (z.B. Zitronensaft) verringern lässt.

Der Zuckergehalt der Restflüssigkeit sollte zwischen 10 und 15% liegen. Ein weiteres Eindampfen würde (einsichtig!) einen unverhältnismäßig hohen Energieverbrauch zur Folge haben. Die zur Vergärung eingesetzte Hefe ist mit 10 – 15% Zuckergehalt durchaus zufrieden.

Die Herstellung kristallinen Zuckers lässt sich ansatzweise durch langsames Einkochen (brennt leicht an!) demonstrieren, alternativ und energiesparend (!) indem man den Zuckersirup dünn auf einen flachen Teller gießt. Nach einigen Tagen ist das Wasser verdunstet, zurück bleibt ein klebriger dicker Saft (Melasse) in dem kleine Zuckerkristalle eingelagert sind. Sie von der Melasse abzutrennen und zu reinigen erfordert großen, in der Schule nicht zu bewerkstellenden Aufwand (zentrifugieren, chemische Behandlung)

Ein möglicher Einstieg: Sprengstoff Stärke oder „Power von der Sonne“



Ziehen Sie diskret eine kleine Tüte aus Ihrer Hemdtasche, schütteln Sie das darin enthaltene weiße Pulver auf einen Taschenspiegel und schieben Sie es mit einer Scheckkarte (oder einem Objektträger) zu einer „Bahn“ zusammen. Entzünden Sie dann einen Gasbrenner und stellen ihn so ein, dass Sie eine rauschende, farblose Flamme erhalten. Nehmen Sie dann ein „silbernes“ Röhrchen zur Hand. Statt sich aber, wie jetzt erwartet, das Pulver in die Nase zu ziehen, blasen es in die Flamme hinein. Mit etwas Übung erzeugen eine Meterhohe aber kurzlebige Stichflamme. Das machen Ihre Schülerinnen und Schüler gerne nach und können das auch relativ gefahrlos tun!

Wir haben dieses Pulver, das offensichtlich doch kein Rauschmittel ist, „SOLENERGIX®“ genannt. Der Geruch des verbrannten „SOLENERGIX“-Pulvers bringt allerdings die Wahrheit an den Tag: Es ist Mehl. Und Mehl ist Stärke.

Stärke ist geballte chemisch gebundene Sonnenenergie, entstanden durch die Photosynthese grüner Pflanzen und ein Stoff, der uns in Form von Brötchen, Keksen, Pizza- und Tortenböden, Spagetti und Lasagne am „Laufen“ erhält, so wie das Benzin ein Auto mit Ottomotor.

Achten Sie darauf, dass das Mehl fein und trocken ist, je feiner desto besser. Allerdings wird feines Mehl auch leichter feucht und muss daher besser getrocknet werden. Geben Sie es eine halbe Stunde auf ein Backblech, stellen Sie den Umluftherd auf 30 – 35° C ein und schon werden Sie zum erfolgreichen „Feuerbläser“...



Aber so „harmlos“ dieser kleine Versuch auch erscheinen mag:
Die wahrscheinlich durch einen Kabelbrand ausgelöste gewaltige **Mehlstaubexplosion** in der Rolandmühle in Bremen im Jahre 1979 brachte das gesamte Gebäude dieses Industriebetriebes zum Einsturz.

Zucker brennt, wenn man den Trick kennt...

Wenn man den gleichen Versuch statt mit Mehl mit Puderzucker wiederholt, fällt das Ergebnis eher dürrtig aus. Zündet man einen Zuckerwürfel an, wird flüssig und karamellisiert, brennt aber nicht. Im Internet und in Lehrbüchern stößt man immer wieder auf den Hinweis, man möge Zigarettenasche auf den Würfel streuen, die dann eine „katalytische“, die Entzündungstemperatur herabsetzende Funktion habe. Tatsächlich benötigt Saccharose (Rübenzucker) eine hohe Aktivierungsenergie, um die in ihr enthaltene Energie freizugeben. Es gibt aber noch einen zweiten, vielleicht wichtigeren Aspekt. Damit der Zucker großflächig mit Sauerstoff in Kontakt treten kann, muss man ihm eine große Oberfläche verleihen. Insofern ist Puderzuckerstaub schon ein guter Ansatz. Als noch viel besser hat sich folgendes Rezept erwiesen:

Hüllen Sie einen Zuckerwürfel in etwas Zellstoffwatte und halten Sie ihn mit einer Tiegelzange über eine feuerfeste Porzellanschale (Brennschale). Wenn Sie die Watte anzünden, verbrennen die Fäden aufgrund ihrer großen Oberfläche sehr schnell und heftig. Zellstoffwatte besteht aus Cellulose und diese besteht, wie die Stärke, aus Zuckerbausteinen (Glucose bzw. der aus zwei Glucosemolekülen zusammengesetzten Cellubiose). Sie enthält also, wie die Stärke und der Zucker, eine geballte Ladung Sonnenenergie. Nur sind ihre Zuckerbausteine etwas anders miteinander verbunden, was zu geradlinigen statt schraubig gedrehten Molekülketten führt.

Ist die Watte verbrannt und zu Asche geworden, wirkt sie wie ein den Würfel einhüllender Docht. Jetzt brennt auch der Zucker! Aber Achtung: Brennender Zucker und Haut verschmelzen inniglich, Unvorsichtigkeit kann zu **schweren Brandverletzungen** führen!

Auf so ganz nebenbei eingeführte Cellulose wird man später noch einmal zurückkommen: Cellulose kann man chemisch durch Säure- und Wärmebehandlung oder durch Enzyme (Cellulasen) in Zucker verwandeln, der sich zu Ethanol vergären lässt. Dieser Prozess ist noch nicht massentauglich, weil im Verhältnis zum Ertrag (noch) zu teuer. Einige Aspekte der Holzverzuckerung und -vergärung lassen sich aber schon im Schulversuch zeigen.

Die „Ethanolkerze“



Stärke und Zucker brennen zwar, damit eine Suppe zu kochen gelingt aber nicht. Flüssiges Ethanol, aus Stärke und Zucker gewonnen, dagegen lässt sich gut dazu verwenden. So entsteht ein kleiner, mit dem Stövchen unter einem Fondue-Gerät vergleichbarer „Ethanol-Brenner“:

Eine kleine, gläserne Flasche (Kondensmilch, z.B. Bärenmarke) wird zu 4/5 mit Brennspritus gefüllt. Dann wird ein aus Watte gedrehter, nicht zu langer (!) „Docht“ in den Flaschenhals geschoben. Sobald sich der Docht mit Brennspritus vollgesogen hat, kann er angezündet werden. Der dabei sinkende Ethanolspiegel liefert einen ersten Ansatz darüber nachzudenken, wie eine solche „Kerze“ funktioniert und wie lange eine Füllung vorhalten wird. Dass das Gefäß explodieren könnte, muss man nicht befürchten, dazu ist das Luft-Ethanolgemisch über Flüssigkeit zu „fett“.

„Ethanol-Kanone“: Zündfähiges Ethanol-Luftgemisch

Dieses einfache, aber sehr motivierende Demonstrationsexperiment kann bei Einhaltung von Vorsichtsmaßnahmen auch von Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden.

In einer mit einem Plastik-Schnappverschluss ausgestatteten Pappdose wird ein geeignetes Luft-Ethanol-Gemisch zur Explosion gebracht.



Gut geeignet und leicht beschaffbar sind z.B. Chipsdosen der Marke „Pringles“ oder „JA“ (REWE), da der leichte (!) Deckel hinreichend, aber nicht zu fest schließt. Die Verletzungsgefahr beim Absprengen des leichten (!) Deckels ist gering.

Aus Sicherheitsgründen sollten (in Schülerhand) keine Gefäße aus Glas oder Metall verwendet werden!



Die „**Ethanol-Kanone**“ wird am unteren Ende (Boden!) seitlich mit einem Loch versehen. Hier wird später das Gemisch aus Luft und wenigen (!) Tropfen Brennspritus mit einem Stabfeuerzeug oder einem langen Streichholz entzündet. Ein in kleine Stücke geschnittener **Weinkorken** dient beim kräftigen Schütteln der gleichmäßigen Verteilung des Ethanols und der Erwärmung (Reibung!) des Doseninhalts. Ethanolgas selbst ist etwa 1,6 mal schwerer als Luft und würde sonst einen „Teppich“ am Boden des Gefäßes bilden. Das flüssige Ethanol sollte sich über eine möglichst große Oberfläche (Boden, Wände, Korkoberfläche) verteilen, damit möglichst viel davon in die Dampfphase übergehen kann.

Für das Experiment reichen einige Tropfen Brennspritus.

Die unteren und oberen **Zündgrenzen** von Ethanol-Luftgemische liegen zwischen 3,3 und 19% (Vol.). Das heißt, dass zu „magere“ und zu „fette“ Gemische nicht zur Explosion kommen.

Optimalen Gemischen kann man sich experimentell, durch Ausprobieren mit genau abgemessenen Mengen Ethanol in stets neuen, trockenen Dosen oder durch Berechnung (Stöchiometrie) nähern. Das Thema „optimale Verbrennung“ bietet das Schul-LAB für höhere Klassen (z.B. Chemie-LKs) an. Die Gemischoptimierung wirkt sich unmittelbar auf die Leistung eines Verbrennungsmotors aus: Es sollte nie mehr und auch nie weniger Treibstoff in den Verbrennungsprozess gegeben werden als mit dem Treibstoff reagierende Sauerstoffmoleküle vorhanden sind. Das Motoren-LAB der BBS6 beschäftigt sich sehr ausführlich mit der Optimierung dieser Vorgänge (Lambda-Sonde zur Abgasoptimierung).

Schritte zur Herstellung von Ethanol

Extraktion von Stärke aus Kartoffeln



Kartoffeln bestehen zu etwa 80% aus Wasser, etwa 15% Kohlenhydraten und 2% Ballaststoffen (Rohfaser). Beim Reiben und Auspressen von Kartoffeln, etwa um Kartoffelpuffer herzustellen, fällt viel Flüssigkeit an. Der Boden der Restflüssigkeit ist schnell mit einer weißen, klebrigen Schicht aus Stärke bedeckt.

Die Abbildung links zeigt die ausgepresste, einige Zeit stehen gelassene Flüssigkeit mit den entsprechenden Sedimentschichten: Am Boden die Stärke, darüber gelbliche Faserstoffe (Zellwandreste) und darüber das noch von Trübstoffen gefärbte Wasser, auf dem sich eiweißreicher Schaum gebildet hat. Wenn man das Glas ganz voll füllt, unterbleibt das übliche Schwarzwerden an der Luft.

Wenn man die ungeschälten, dann geschälten und schließlich die in die Schale geriebenen Kartoffeln wiegt, kann man die Gewichtsanteile nach gründlichem Abpressen und Wiegen der Flüssigkeit gut abschätzen.

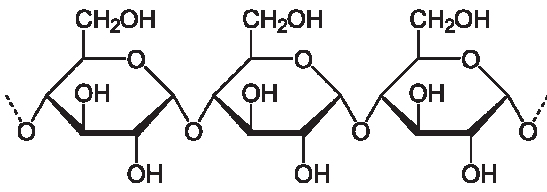
Stärke ist der im Gegensatz zu Zucker wasserunlösliche Reservestoff vieler Pflanzen.

Den Inhalt des links abgebildeten Glases haben wir übrigens 2,5 Stunden lang bei 140°C und 3 bar Druck im Autoklaven (Dampfdrucktopf) erhitzt. Die danach abgefilterte Flüssigkeit war braun, deutlich viskoser als Wasser, etwas klebrig, reagierte deutlich mit

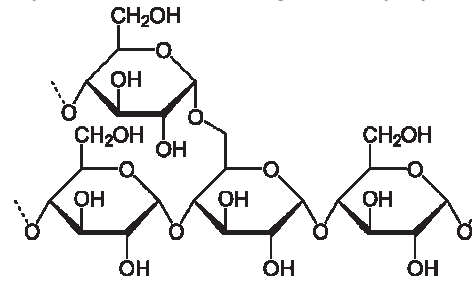


Fehling (s. „Zuckertest“) und enthielt refraktometrisch etwa 12 % Zucker. Sie ließ sich z.T. mit Hefe vergären (leichter Alkoholgeruch), wonach die Fehling-Probe negativ ausfiel.

Stärke ist eine Mischung aus unverzweigten Amylose- und verzweigten Amylopektin-Molekülen.



Amylose (WIKIMEDIA)

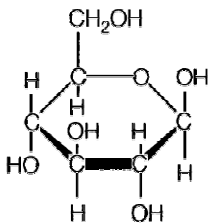


Amylopektin (WIKIMEDIA)



Stärke
Ausschnitt
(Modell)

Amylose und Amylopektin sind langkettige, schraubig gedrehte Polysaccharide, die durch Verknüpfung (glykosidische Bindungen) von mehreren hundert Zuckermolekülen (Glucose $C_6H_{12}O_6$) entstehen.



Die Summenformel lautet also $(C_6H_{12}O_6)_n$. Bei der so genannten Kondensationsreaktion (Zucker \rightarrow Stärke) wird Wasser abgegeben. Die Reaktionsgleichung ist



Stärke lässt sich auf chemischem Wege (Säure, Wärme) auf biologische Weise durch Enzyme (Amylase) in Zuckermoleküle zurückverwandeln wobei die glykosidischen Bindungen unter H_2O -Aufnahme gelöst werden. Stärke lässt sich über diesen Umweg zu Ethanol vergären.

Stärke ist mit Jodlösung* (Lugol'sche Lösung) nachweisbar und führt zu einer blauviolettten Färbung. Die in den Zellen enthaltene Stärke ist in so genannten Amyloplasten (Stärkekörnern) eingelagert. Unter dem Mikroskop* betrachtete Dünnschnitte roher Kartoffeln oder frisch extrahierte Stärke lassen erkennen, dass die Amyloplasten aus mehreren Schichten bestehen. Schwach (!) konzentrierte Jodlösung hebt die Schichtung hervor.

Die Extraktion der Stärke folgt im Prinzip der Herstellung von Kartoffelpuffern (Reibekuchen)

- Kartoffeln schälen mit der Reibe zu „Kartoffelbrei“ (Reibsel) verarbeiten
- Kartoffelreibsel in Sieb geben und vorsichtig auspressen
- Rest mit Baumwolltuch auspressen bis kein Wasser mehr austritt
- Reibsel (Presskuchen / Rohfaser) in Messgefäß geben
- Wässrigen Anteil im Behälter auffangen und in Messzylinder geben
- Stärke sedimentieren lassen (Wasser muss klar sein!)

Das Verhältnis der getrennten Bestandteile (Wasser, Rohfaser, Stärke) lässt sich mit Messzylindern und einer Waage bestimmen. Kartoffeln bestehen durchschnittlich aus etwa 80% aus Wasser und 15% aus Kohlenhydraten (Stärke als Reservestoff und Cellulose als Gerüstsubstanz = Rohfaser), der Rest entfällt auf Eiweiß (Proteine) und Mineralstoffe.

Nach einer (optionalen) vergleichenden Prüfung des Stärkegehalts verschiedener Kartoffelsorten kann die Stärke enzymatisch verzuckert werden.



Stärkegehalt der Kartoffeln bestimmen

Fest- und weichkochende Kartoffeln unterscheiden sich durch verschiedene Rohfaser- und Stärkeanteile. Zur Ethanolherstellung eignen sich naturgemäß besonders stärkereiche



Kartoffelsorten. Je nach Stärkegehalt variiert die Dichte, also das Verhältnis zwischen Masse (Gewicht in Gramm) und Volumen (cm^3) der Kartoffel(n).

In der landwirtschaftlichen Praxis kommt die „**Stärkewaage**“ zum Einsatz: Dabei wird eine große Masse Kartoffeln, z.B. (genau!) 5 kg abgewogen, in einen Drahtkorb gegeben, ins Wasser getaucht und dabei erneut gewogen (Hängewaage). Beim Eintauchen wird der Korb ganz leicht:

Folgendes Experiment ist hilfreich zum Verständnis: Wenn ein mit Wasser gefülltes, dünnes und leichtes Gefäß ins Wasser getaucht wird, geht sein Gewicht auf Null zurück!

Die Kartoffeln werden je nach Stärke- und Faseranteil etwas schwerer sein als das von ihnen verdrängte Wasser, ihr Gewicht wird also nicht ganz auf Null fallen. Typische Werte für 5 kg Kartoffeln liegen zwischen 200 und 700 g.

Das Gewicht der getauchten Kartoffeln ist ein Maß für ihren Stärkegehalt. Der Wert wird in einer Tabelle abgelesen.

Das hier vorgeschlagene, vereinfachende Verfahren ist aufgrund der geringen Masse einer oder weniger Kartoffeln ungenauer als die „Stärkewaage“. Der Durchschnitt aus vielen Einzelmessungen ergibt aber brauchbare Ergebnisse. Benötigt werden verschiedene Kartoffelsorten, eine Waage mit mindestens einer Nachkommastelle und (bei Gruppenarbeit) mehrere **Überlaufgefäße**. Ein zylindrisches Überlaufgefäß besitzt im oberen Drittel ein schräg nach unten zeigendes Überlaufrohr. Das Gefäß wird mit Wasser gefüllt, wobei sich der Pegel von selbst einstellt. Ein in das Gefäß gegebener Gegenstand verdrängt ein bestimmtes Wasservolumen, das mit einem unter das Überlaufrohr gehaltenen Messzylinder aufgefangen wird. Das Volumen des Gegenstandes und das Volumen des verdrängten Wassers sind identisch.

Die Kartoffel wird geschält, gewogen und vorsichtig (!) in das vorbereitete Überlaufgefäß gelegt. Der Quotient aus **Masse** (Gewicht) der Kartoffel und dem **Volumen** des verdrängten Wassers (cm^3) ist die **Dichte**.

Beispiel:

Gewicht 160 g und Volumen 150 ml (= 150 cm^3) = Dichte $1,067 \text{ g / cm}^3$

→ Stärkegehalt (lt. Tabelle Arbeitsblatt) etwa 11%.

Energieverbräuche bei der Bioethanolherstellung messen



Um aus Zuckerrüben oder Kartoffeln brennbares „Bioethanol“ zu machen, muss je nach Verfahren unterschiedlich viel Energie eingesetzt werden, meist in Form von elektrischem Strom (Heizplatten beim Rasten, Heizhauben bei der Destillation). Eine Möglichkeit, die Energieverbräuche der einzelnen Arbeitsschritte und später die Gesamtenergiebilanz zu bestimmen ist, ein **Steckermessgerät*** zwischen Steckdose und Verbraucher zu schalten. Dieses misst die Zeit, die Leistungsaufnahme des Verbrauchers (in Watt, W) und die umgesetzte Energie (in Wattstunden, Wh). Daraus lassen sich auch die Kosten berechnen: Eine Kilowattstunde Strom ($1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh}$) kostet etwa 0,25 €. 1 Wh entspricht 3600 Wattsekunden (Ws) oder 3600 Joule (3,6 kJ). Der Energiegehalt reinen Ethanols liegt bei 21 Megajoule (MJ) pro Liter (etwa 28 MJ /kg).



Beim Destillieren entstehen wenige Milliliter Alkohol-Wassergemisch von etwa 50 % Ethanolanteil. Hier lässt sich später bilanzieren, wie viel Energie in den Prozess hineingesteckt worden ist und wie groß der „Output“ ausfällt. Industrielle Verfahren erzielen natürlich bessere Bilanzen. Dennoch bleibt die Frage: Lohnt sich die Herstellung ökologisch und wirtschaftlich eigentlich? Wenn Sie gleich zu Beginn des Projekts die Energiebilanz thematisieren, werden Ihre Schülerinnen und Schüler möglicherweise eine ganze Reihe von Sparvorschlägen haben: Kochen mit Deckel, Warmhalten in der Thermoskanne u.v.a.m. .

Abfallstoffe und Umweltbelastung (BSB-Wert)

Bei der industriellen Ethanolherstellung fallen pro Liter Ethanol zwischen 10 und 15 Liter Reststoffe an. Diese werden als **Schlempe** bezeichnet. Dazu kommen etwa 100 l **Waschwasser**, die z.B. bei der Säuberung der Rohstoffe (Zuckerrohr, Zuckerrüben, Kartoffeln, Maiskolben usw.) entstehen. Nach RENNEBERG (Biotechnologie für Einsteiger, Spektrum-Verlag 2007) fällt bei einer Bioethanol-Anlage mit einer Tagesleistung von 150000 Litern eine Abwassermenge an, die einer Stadt mit 600000 Einwohnern entspricht. Alle diese Rückstände belasten ungeklärt das Abwasser. Schlempe entsteht auf mehreren Stufen des Produktionsprozesses: Bei der **Stärkegewinnung** aus Kartoffeln und Mais bzw. der **Zuckerextraktion** aus Zuckerrohr und Zuckerrüben fallen nicht genutzte Reststoffe an: Proteine, Fette (Lipide), Nukleinsäuren, Polysaccharide. Nach dem Verzuckerungsprozess der stärkehaltigen Rohstoffe wird nur das zuckerhaltige Filtrat zur Vergärung weiterverwendet, der restliche Feststoffanteil muss entsorgt werden. Die Schlempe bildet ein ideales Substrat für darauf spezialisierte Bakterien, die dann zu einer starken **Sauerstoffzehrung** in den belasteten Gewässern führen. Schlempen gehören zu den umweltbelastendsten Stoffen aus industriellen Abläufen. In Brasilien hat dies in der Nähe von Bioethanol-Anlagen zum vorübergehenden Zusammenbruch der Trinkwasserversorgung geführt. Schlempen enthalten noch viel **Energie**: Um die Gesamt-Energiebilanz der Bioethanolherstellung zu optimieren, müssen Technologien entwickelt werden, die dieses Energiepotential nutzen. Gleichzeitig müssen Verfahren vorhanden sein, um die nicht nutzbaren Reststoffe umweltneutral entsorgen zu können.

In der **Schule** bieten sich folgende Untersuchungsmethoden und Verfahren an: Bestimmung des **BSB**-Wertes von mit Roh- bzw. Dünnschlempen belasteten „Abwässern“. Mit „BSB“ ist der **biochemische Sauerstoffbedarf** gemeint, also der Sauerstoffverbrauch innerhalb eines bestimmten Zeitraums, z.B. in der Abwassertechnologie übliche 7 Tage (**BSB₇**). Das Verfahren besteht aus folgenden, hier nur kurz skizzierten Schritten: Die Abwasserprobe wird verdünnt, mit Luft bis zur O₂-Sättigung versetzt (Aquarienpumpe* und Sprudelstein*) und ihr O₂-Gehalt mit einer geeigneten **Sauerstoffelektrode*** gemessen. Dann wird das Gefäß verschlossen und bei gleicher Temperatur (!) 7 Tage lang verdunkelt gehalten. Nach Ablauf der Frist wird der O₂-Gehalt erneut gemessen. Die Differenz ist der BSB₇-Wert, z.B. bei 25 mg/Liter O₂ am ersten Tag und 10 mg/l O₂ am 7. Tag gleich BSB₇ 15 mg O₂.

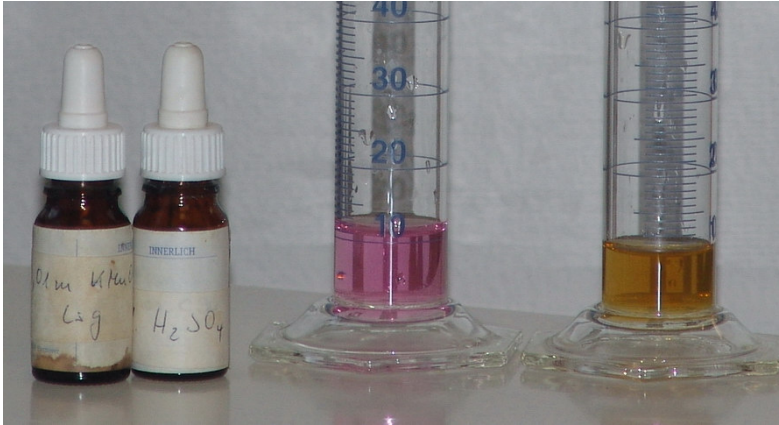
Der **biologische Sauerstoffbedarf** lässt sich zeitverkürzend und einfach mit **Kaliumpermanganat** innerhalb einer Stunde feststellen:

BSB₅-Test mit Kaliumpermanganat

Der BSB₅-Test mit Kaliumpermanganat KMnO₄ zeigt innerhalb kurzer Zeit an, wie viel Sauerstoff im Laufe von 5 Tagen durch biologische Aktivität verbraucht wurde. Für den Test brauchen Sie fünf Tropfen verdünnte Schwefelsäure H₂SO₄ (Konzentration nicht wichtig!) und drei Tropfen 0,01 molarige Kaliumpermanganatlösung KMnO₄.



Die KMnO_4 -Lösung können Sie selbst herstellen, indem Sie 1,58 g festes KMnO_4 in 1 Liter destilliertem Wasser auflösen. Da Sie nur wenig Wasser brauchen, lösen Sie besser nur 0,158 g in 100 ml. Das Molgewicht von KMnO_4 ist 158 g/mol (mehr zum Thema „Molgewicht“ weiter unten). Kaliumpermanganat wurde lange Zeit als äußerliches Desinfektionsmittel und in schwacher Konzentration zum Gurgeln bei Entzündungen des Mundraumes empfohlen. Es ist laut Gefahrstoffverordnung gesundheitsschädlich, allerdings von **geringer Toxizität**. Kaliumpermanganat ist aufgrund seiner Oxidationswirkung extrem **gewässerschädlich!**



Vorgehensweise:

Probenwasser (unverdünnt) mit 5 Tropfen verdünntem H_2SO_4 versetzen, dann 3 Tropfen (rote) KMnO_4 -Lösung dazugeben. Die Geschwindigkeit, mit der sich das rötliche Gemisch entfärbt, ist ein Maß für den Sauerstoffbedarf innerhalb von 5 Tagen:

		BSB ₅ -Wert in mg/l
Entfärbung	sofort	50 mg/l O ₂
	nach wenigen Minuten	30 mg/l O ₂
	durch Aufkochen	20 – 30 mg/l O ₂
	durch Aufkochen und Stehen lassen	12 - 20 mg/l O ₂
	findet nicht statt	< 12 mg/l O ₂

Zum Vergleich der BSB₅ von Gewässern und eine Zuordnung zu den Gewässergüteklassen (I – IV)

Saprobiologischer Gewässerzustand (Güteklasse)

		BSB ₅ -Wert in mg/l
oligosaprob	I	0,2
β-mesosaprob	II	2 – 4
α-mesosaprob	III	4-10
polysaprob	IV	>10

Durch kontrolliertes Mischen des Probenwassers mit un- oder vorbelastetem Teichwasser kann man die Folgen der Einleitung gekläarter und ungeklärter Abwässer nachvollziehen.

Der gemessene Kaliumpermanganat-Verbrauch oder -Index fällt höher aus als der tatsächliche BSB-Wert. Das liegt daran, dass dabei auch oxidierbare Stoffe (z.B. Stickstoffverbindungen) erfasst werden, die biologisch nicht abbaubar sind.



Mögliche Diskussionsergebnisse zur Verwertung und Deponie könnten Folgendes beinhalten.

- Verfahren zur Trennung der Rohschlempe in feste und flüssige Bestandteile durch Dekantieren und Zentrifugieren
- Trocknung und Pressen der festen Bestandteile („Dickschlempe“)
- Untersuchung der Brennbarkeit
- Bestimmung des Energiegehaltes (Kalorimetrie)

- Aufbereitung als protein- und fettreiches Futtermittel (?)
- Verwertung als Dünger (?)
- Versäuerung der flüssigen Fraktion („Dünnschlempe“) mit dem Ziel der Methanisierung, also dem Einsatz in Biogasanlagen
- Einsatz der aus diesem Biogas gewonnenen Energie zur Destillation und Rektifikation des Ethanols (Kreislaufwirtschaft)
- Klärung der Reststoffe durch Bakterien (anaerobe und aerobe Abwasserbehandlung)
- Untersuchung als Kompostiereigenschaften der Rohschlempe bzw. verschiedener Fraktionen

Herstellung von Malz zur enzymatischen Verzuckerung von Stärke

Getreidesamen enthalten wasserunlösliche Stärke (Mehl), die im Laufe der Keimung durch Enzyme (Amylasen) in Zucker verwandelt werden. Die Amylasen des gekeimten Getreides brechen die glykosidischen Bindungen zwischen den Zuckereinheiten auf.

Ein klassischer Schulversuch ist die Verzuckerung von Stärkekleister durch (Amylasen enthaltenden) Speichel. Ein Bissen Brot sollte nach langem Kauen süß schmecken und nach dem Ausspucken keine Jodreaktion (Stärkeprobe), dafür aber eine positive Fehling-Reaktion (Zuckernachweis) zeigen. Dazu passt eine Geschichte aus den Tropen: Eine ganze Dorfgemeinschaft spuckt in einen warmen Sud aus Wasser und zerkleinertem, stärkereichem Gemüse (Bataten, Yams, Kartoffeln). Dann wird der Topf verschlossen. Nach einigen Wochen feiert das Dorf ein rauschendes Fest: Aus dem Sud ist ein alkoholisches Getränk geworden.

Ein einfacher Versuch zeigt, wie Getreide auf ganz natürliche Weise vergärt: Einige keimfähige (!) Getreidesamen werden mit etwas Wasser in ein fest verschließbares Glasgefäß (Schraubdeckelglas, Bierflasche mit Bügelverschluss) gegeben. Das Wasser darf die Samen kaum bedecken. Sie quellen, saugen dabei einen Teil des Wassers auf, keimen und geben CO₂ ab. Bei der Keimung



„verbrauchen“ sie den im Glas vorhandenen Sauerstoff. Jetzt erzeugen die natürlichen, überall präsenten Hefen unter anaeroben (sauerstofffreien) Bedingungen Alkohol. Beim Öffnen des Glases entweicht das bei der Gärung entstandene CO₂ mit mehr oder weniger starkem Druck. Im Glas wird es deutlich (und unangenehm) nach Alkohol riechen.

Diese „wilden“ Hefen und Bakterien erzeugen daneben allerdings auch eine Vielzahl anderer, sehr übelriechender Stoffe.

Da Hefen keine Stärke vergären, muss vorher eine Verzuckerung stattgefunden haben. Die enzymatische Verzuckerung durch im Getreidesamen gebildete Amylase ist ein notwendiger Teil des

Keimprozesses und wird in Form des „Mälzens“ seit alters her zur Erzeugung alkoholischer Getränke genutzt. Wir folgen bei der Herstellung von „Bioethanol“ weitgehend dem Brauprozess der unter besseren, hygienischen Bedingungen zum überall bekannten Bier führt. Viele Begriffe sind dem Brauereiwesen entlehnt.

Das im Folgenden beschriebene „Mälzen“ des Getreides ist ein „Küchenrezept“, das zeitaufwändig ist und nicht immer zufrieden stellende Ergebnisse liefert.



Alternativ kann man Braumalz im Brauereifachhandel kaufen, in kleineren Mengen kostenlos im Schulbiologiezentrum beziehen oder selbst aus Getreide isolierte Amylase (siehe unten!) verwenden. Die einzelnen Arbeitsschritte entnehmen Sie bitte dem Arbeitsblatt.

Als Grundlage empfehlen wir keimfähige Gerste (Braugerste). Frisch geerntete (reife!) Gerste muss nach der Ernte ein mehrwöchiges Ruhestadium durchlaufen um keimfähig zu werden. Gerste aus vielen Bioläden hat sich trotz anderslautender Deklaration als nicht geeignet erwiesen (Fäulnis-, Schimmelbildung). Wir haben die Gerste im Herbst (nach der Keimruhe) vom Bauernhof bezogen. Sie keimt auch nach einem Jahr noch zuverlässig

Als Keimgefäß eignen sich z.B. dünne Klarsichtdosen* mit Deckel (Lebensmittelverpackungen). Die Gerstensamen werden, vollständig mit Wasser bedeckt, zum **Quellen** gebracht. Nach 24 Stunden wird das Wasser abgegossen. Danach müssen die keimenden Samen luftig (Sauerstoffzufuhr, CO₂-Abfuhr) und feucht gelagert werden. Wichtig beim Mälzen ist zur **Vermeidung von Fäulnis**, dass das (wenige!) Wasser regelmäßig (mindestens einmal täglich) ausgetauscht wird und die Keimlinge dabei gespült werden. Saugfähiges Haushaltspapier als Bodenbelag mindert den Wasserverlust, hat sich aber insofern nicht bewährt, weil es mit den Keimwurzeln verfilzt und den Wasseraustausch erschwert. Schütteln Sie die Keimlinge mindestens einmal pro Tag gut durch.

Nach etwa 5 Tagen sind die Keimlinge grün geworden. Die Samen enthalten jetzt Amylase und Zucker und können zu lagerfähigem **Malz** verwandelt werden.

Das dazu notwendige Schwelken und Abdarren erfolgt im Umluftherd.

Beim **Schwelken** - das möglichst lange (mindestens eine Stunde) und bei langsam, auf maximal 50° C steigenden Temperaturen erfolgen sollte - werden die Keimlinge abgetötet und ihnen Wasser entzogen. Prüfen Sie also bitte, ob das Malz wirklich ganz (!) trocken ist. Restfeuchtigkeit zerstört die Amylasen beim anschließenden Darren. Das **Darren** bei 100 – 120° C führt zur Bildung von hellem (100° C) oder dunklem (120° C) Malz. So entstehen helle und dunkle Biersorten. Die Reste der Keimlinge werden "abgeschlagen", indem man das Malz zwischen den Händen reibt und die abgelösten leichten Teile durch leichtes Pusten entfernt.

Ob der im Getreidesamen (hoffentlich) enthaltene Zucker karamellisiert ist, zeigt die Geschmacksprobe.

Das auf diese Weise in der Küche hergestellte Malz war geschmacklich angenehm und meistens, aber leider nicht immer, zur Verzuckerung von Kartoffelstärke geeignet.

In der Brauerei wird das Malz zur Oberflächenvergrößerung und leichteren Abgabe von Enzymen geschrotet, ist dann aber nicht so lange haltbar.

Alternative zum Mälzen: Isolierung von Amylase zur Stärkeverzuckerung

Amylasen lassen sich relativ leicht aus keimendem Getreide (Gerste) herauslösen. Lassen Sie dazu, wie oben beim „Mälzen“ beschrieben, Gerstensamen* etwa einen Tag lang mit Wasser bedeckt quellen. Gießen Sie dann das Wasser vollständig ab und spülen Sie die Samen im Sieb unter Leitungswasser gut durch. Geben Sie die feuchten Samen in ein Gefäß, z.B. eine transparente Klarsichtdose*, verdeckeln Sie die Dose und stellen Sie sie an einen zimmerwarmen, hellen, aber nicht direkt besonnten Ort. Nach jeweils einem Tag spülen Sie erneut. Nach 4 – 5 Tagen haben sich grüne Keimlinge entwickelt.

Diese werden in einer Reibschale* mit dem Mörser* unter etwas Wasserzugabe fein zerrieben. Eine Prise feiner Quarzsand (Baumarkt) hilft beim mechanischen Aufschließen der Zellen. Anschließend geben Sie den wässrigen Überstand in eine Handzentrifuge* und schleudern ihn einige Minuten lang gleichmäßig und kräftig durch. Die nach Abtrennung fester Restbestandteile mehr oder weniger klare Flüssigkeit enthält die bei der Keimung im Samen gebildete Amylase.

Dies lässt sich leicht demonstrieren: Wenn Sie einer stark verdünnten Stärkesuspension („Stärkekleister“) einige Tropfen mit destilliertem Wasser verdünnte (!) Jodlösung zusetzen, färbt sie sich schwach (!) violett. Geben Sie jetzt die Amylase enthaltende Flüssigkeit hinzu, wird die violette Stärkesuspension nach einiger Zeit vollständig entfärbt. Der Kontrollversuch ohne Amylase bleibt unverändert violett.



Der Nachweis des neu entstandenen Zuckers erfolgt mit Fehling'scher Lösung (siehe „Zuckertest“) und wird beim Erhitzen zu einer mehr oder weniger kräftigen Rotfärbung des Lösungsgemisches führen.

Die selbst hergestellte Amylase-Lösung ist nach unseren Erfahrungen im Schulbiologiezentrum gekühlt mehrere Wochen haltbar und hat in vielen Fällen kostensparend käufliche Amylase ersetzen können.

Die Amylase-Isolierung und -Verwendung ist ein leicht durchzuführender Einstieg in das Wesen der Enzyme: Nur Stärkemoleküle werden verzuckert (Substratspezifität) und dies geschieht nur unter optimalen Temperatur- und pH-Bedingungen. Wir benutzen einstellbare Babyflaschenwärmer für vergleichende Versuche die zeigen, dass die Temperatur die Reaktion bis zu einem bestimmten Optimum (etwa 45°C) beschleunigt. Ähnliches lässt sich in unterschiedlich sauren Milieus durchführen (Zugabe von Essig).

Stellt man kurzfristig größere Mengen von frischen, nur noch zu mörsernden Gerstenkeimlingen bereit, lässt sich der Prozess der Stärkeverzuckerung auch ohne gekauftes oder selbst hergestelltes Malz durchführen. Es reicht dann, der Stärkelösung die zerkleinerten und gequetschten Keimlinge hinzuzufügen.

Dies geschieht zeit- und energiesparend sogar bei niedrigeren, als beim Bierbrauen typischen Temperaturen. Der unten beschriebene, mindestens 24 Stunden erfordernde Prozess des Rastens der Maische bei verschiedenen und hohen Temperaturen (60 – 75°C) kann im Idealfall entfallen.

Einmaischen und Rasten (Verzuckerung von Stärke)

Beim **Einmaischen** und **Rasten** wird Stärke enzymatisch verzuckert. Die im Folgenden beschriebenen Arbeitsschritte entstammen dem Brauprozess, der, wie oben geschildert, bei Verwendung von frischen Gerstenkeimlingen stark verkürzt werden kann.

Die **Stärke** stammt entweder aus den aufbereiteten Kartoffeln, aus Mais oder anderen Getreidearten. Mais ist die Grundlage der Ethanolherstellung in den USA, die 55% und zusammen mit Brasilien (Zuckerrohr) fast 90% der Welt-Bioethanolproduktion erzeugen. In den USA fuhren 2009 über 8 Millionen mit Flex-Motoren ausgestattete (mehrere Treibstoffarten vertragende) Fahrzeuge mit E85. In den USA wurde 2010 etwa 1/3 der Maisernte in Bioethanol verwandelt.

Schlagzeilen machte die „Tortilla-Krise“: So soll das Grundnahrungsmittel Maismehl auf dem mexikanischen Markt durch die konkurrierende Verwendung als Bioethanol-Rohstoff für die arme Landbevölkerung unbezahlbar geworden sein. Ein Weltbank-Bericht formulierte 2009: *...large increases in biofuels production in the United States and Europe are the main reason behind the steep rise in global food prices.*

Als Rohstoff im Schulversuch lassen sich neben Kartoffeln (siehe oben!) entweder Maiskolben zerkleinern oder (zeitsparender!) Polenta (Maisgries) verwenden. Mais sollte, z.B. im Schulgarten, als (Getreide)-Pflanze gezeigt und die Konsequenzen des Maisanbaus für die lokale / globale Agrar-, Wirtschafts- und Sozialstruktur besprochen werden. Das gilt natürlich auch für die anderen Rohstofflieferanten, wenngleich die Kartoffel in Europa nur in geringerem Umfang zu Bioethanol verarbeitet wird.

Mais ist ein „Starkzehrer“ mit hohem Düngebedarf. Der Anbau führt ohne Kulturwechsel langfristig zu starken Veränderungen der Boden- und Artenstruktur. Ein in den Zeitungen immer wieder auftauchendes Thema ist die Zunahme der Wildschweinpopulationen und die Abnahme des Bruterfolgs von Vögeln in Deutschland.

Polenta und/oder Kartoffelmehl wird im Verhältnis 1:4 mit geschrotetem Braumalz vermischt und mit der vierfachen Wassermenge langsam (!) unter Rühren erhitzt. Der optimale pH-Wert für die Amylasen im Braumalz liegt bei 4,5. Da die Maische meist basischer ist, sollte sie mit etwas Essig auf den entsprechenden Wert gebracht werden. Dies ist mit pH-Teststreifen zu kontrollieren.



Die im (gekauften) Braumalz enthaltenen, Stärke abbauenden Enzyme haben Temperaturoptima zwischen 60 und 75 °C. Die β -Amylase bevorzugt 62 °C, die α -Amylase 75 °C.

Beim Bierbrauen werden die Braukessel unter Energieeinsatz langsam auf die entsprechenden Werte gebracht. Die Maische muss zweimal „rasten“, d.h. die Temperatur wird für jeweils längere Zeit plateauartig auf den entsprechenden Niveaus gehalten. Im Schulbiologiezentrum verwenden wir für das Rasten zeit- und energiesparend gut isolierte Thermoskannen*.

Die danach verzuckerte Maische wird in ein sauberes Leinentuch (Küchenhandtuch) gegeben und vorsichtig ausgepresst. Das Filtrieren nennt man in der Brauereisprache „Läutern“ („er ging geläutert aus diesem Erlebnis heraus...“), das Filtrat „Würze“.

Die Qualität der „Würze“ wird mit einem Tropfen verdünnter (!) Jodlösung überprüft. Wenn keine nennenswerte Violettfärbung mehr auftritt, ist die Stärke durch die Amylasen vollständig verzuckert worden. Hier darf man nicht zu penibel sein: Jodlösung reagiert noch auf sehr geringe Stärkekonzentrationen.



Um wilde Hefen daran zu hindern, unerwünschte Stoffwechselprodukte (Methanol, Fuselstoffe) zu produzieren, sollte die Würze aufgeköcht (sterilisiert) werden. Hier empfiehlt sich ein Autoklav*, ersatzweise ein Dampfdrucktopf, mit dem die Würze (ohne zu kochen) auf Temperaturen über 100 °C gebracht werden kann. Da wir keinen trinkbaren Alkohol herstellen, reicht das Aufkochen im normalen Topf. Die sterile Würze sollte süß schmecken (Fingerprobe!) und, länger zwischen den Fingern zerrieben, klebrig sein.

Messen des Zuckergehalts

Der Zuckergehalt lässt sich mit dem **Refraktometer*** oder durch „**Spindeln**“ bestimmen.

Refraktometer:



Ein Tropfen Würze, in das Refraktometer* gebracht, reicht aus, die Dichte zu bestimmen: Dichtere (z.B. zuckerhaltigere) Flüssigkeiten brechen das Licht stärker als weniger dichte. Das ins Refraktometer einfallende gebrochene Licht (Sonne) wird auf eine Skala projiziert, von welcher der Zuckergehalt ablesbar ist.

Foto: Refraktometer
Fernando G., Wikimedia Commons,
GNU-Lizenz zur freien Dokumentation

Spindeln:

Die Technik des Spindelns beruht auf dem unterschiedlichen Auftrieb in unterschiedlich dichten Flüssigkeiten. Je höher der Zuckergehalt, desto höher die Dichte der Flüssigkeit und desto größer der Auftrieb eines Messkörpers. Professionelle Messgeräte, so genannte **Aräometer***, bestehen aus einem geschlossenen, röhrenförmigen und mit einer geeichten Skala versehenen Glasgefäß, dessen unteres Ende flaschenartig verdickt ist und Bleikugeln beinhaltet.

Aräometer lassen sich leicht selbst herstellen:

Unsere einfachen, leicht selbst herstellbaren „Aräometer“ (Spindeln) bestehen aus einem dicken transparenten Trinkhalm, Sand und Knetmasse als Beschwerung und einer einfachen nicht geeichten „Skala“ aus Millimeterpapier.



Die Skala, die z.B. die Zahlen 0 – 10 tragen kann, wird in den (transparenten) Trinkhalm eingeführt und durch einen zweiten dünnen Trinkhalm gestützt. Achten Sie darauf dass das „Aräometer“ mit so viel Sand beschwert ist, dass es senkrecht eingetaucht im Wasser stehen kann.

Statt die Dichte der Würze in g/cm^3 zu messen (was mit dem Aräometer später nachgeholt werden kann) wird die Konzentration mit selbst herstellbaren Zuckerlösungen verglichen. Dazu werden jeweils ein, zwei, drei, vier und fünf Zuckerwürfel in die jeweiligen Messzylinder gegeben und mit Wasser auf 100 ml aufgefüllt. Ein Zuckerwürfel hat eine Masse von etwa 3 g.

Wenn die selbstgebaute „Spindel“ genau so tief in die „Würze“ eintaucht wie in die Lösung mit 4 Zuckerwürfeln, enthält die Würze 16 g Zucker auf 100 ml.

Chemische Verzuckerung von Stärke: Saure Hydrolyse



Alternativ zur enzymatischen Verzuckerung lässt sich Stärke auch chemisch unter hohen Temperaturen in Zuckerbausteine aufspalten. Dazu ist allerdings unter Schulbedingungen ein erheblicher, sehr auf die Gesamtbilanz drückender Energieaufwand nötig.

Hier wird deutlich was Enzyme bewirken: Sie erniedrigen die zur Reaktion erforderliche Aktivierungsenergie weit unter das natürliche Niveau, so dass die Stärke-Hydrolyse schon bei „normalen“ Temperaturen ablaufen kann. In unserem Bioethanol-Projekt verfolgen wir beide Wege und vergleichen die Vor- und Nachteile.

Die natürlichste Methode zur chemischen Verzuckerung von Kartoffelstärke kann die „Resteverwertung“ bei der Kartoffelpufferbereitung sein. Geben Sie nach dem Reiben die aus dem Tuch herausgedrückte, stärkereiche Flüssigkeit

in ein Schraubdeckelglas. Dieses sollte möglichst ganz aufgefüllt werden um die Oxidation (das Schwarzwerden) zu vermeiden. Der Glasinhalt kann komplett zur chemischen Verzuckerung verwendet werden.

Fehlt die Zeit dazu, kann man natürlich auch käufliche Kartoffelstärke verwenden. Während der Hydrolyse sollte man besprechen, wie viel nutzbare Energie von der Stärke über den Zucker in Ethanol überführt wird und wie hoch der Energieeinsatz ist, um Stärke in Ethanol zu verwandeln. Kartoffelstärke hat einen Energiegehalt von 1402 kJ/100g oder 14 MJ/kg.

Ethanol liegt bei 28 MJ/kg (21 MJ/l). Dieser scheinbare Widerspruch führt zur Frage, wie viel Kilogramm Zucker bzw. Ethanol lässt sich aus einem Kilogramm Stärke herstellen?

Die Hydrolyse und ein Gärtest lassen sich in der Küche durchführen. Die Zutaten sind leicht beschaffbar, einige Tropfen Salzsäure* (es soll aber auch mit anderen Säuren funktionieren!), Natriumbikarbonat (Natriumhydrogencarbonat, z.B. Kaisers Natron), pH-Teststreifen* und Backhefe.

Die Stärke wird langsam in warmes Wasser eingerührt und zwar gerade so viel, dass sich keine Klumpen (Kleister) bilden. Kochen Sie die Stärkelösung unter Zugabe einiger Tropfen Salzsäure (HCl) auf (ggf. Schutzbrille!). Dabei bildet sich Stärkekleister:

Stärke ist in kaltem Wasser nahezu unlöslich, nimmt bei Erwärmung viel Wasser auf (quillt) und nimmt eine geleeartige, kolloidale Form an, die bei Abkühlung zu einer puddingartigen Masse wird.

Sollte die Stärke zu stark verkleistern und drohen anzubrennen, geben Sie heißes Wasser dazu oder nehmen Sie den Kleister mit einem Löffel heraus. Sie können ihn später wieder hinzufügen und durch Rühren auflösen. Je mehr Stärke gelöst ist, desto mehr Zucker kann entstehen. Durch die Erwärmung lösen sich die Stärkekörner auf, so dass die Stärke nur noch in molekularer Form vorhanden ist.



Kochen Sie die Stärke eine Stunde lang oder sogar länger! Ersetzen Sie den Wasserverlust durch heißes Wasser bevor etwas anbrennt. Die lang einwirkenden hohen Temperaturen, d.h. die vielen mit steigender Temperatur energiereicheren Stöße der Wassermoleküle brechen die Stärke auf. Sie zerfallen zunächst in kürzere Ketten, dann in Vielfach-, Doppel- und schließlich Einfachzucker. Glucose ist ein solcher „Einfachzucker“. Dieser Prozess dauert lange und zeigt, dass die Evolution die Stärke zu einem sehr stabilen Reservestoff herausselektiert hat.

Parallel zur Verzuckerung nimmt der Stärkegehalt ab, was durch wiederholte Proben mit verdünnter Jodlösung und Schmecken überprüft wird.

Je länger hohe Temperaturen wirken, desto mehr gärfähige Glucose wird entstehen.

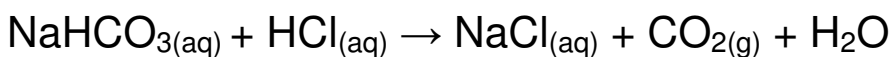
Viel Zeit und Energie sparen Sie mit einem Dampfdrucktopf oder einem Autoklaven* der nach dem selben Prinzip arbeitet, aber ein Manometer zur Drucküberwachung und ein Thermometer besitzt.

Eine Stunde Kochzeit bei 140°C und 3 bar Druck gaben sehr gute Ergebnisse.

Der Nachteil dabei ist, dass der Verzuckerungsvorgang erst am Ende kontrolliert werden kann.



Nach dem Abkühlen wird der durch das HCl niedrige pH-Wert der Stärkelösung mit in Wasser gelöstem Natronpulver (Natriumhydrogencarbonat, z.B. Kaiser´s Natron) auf etwa pH 5 gebracht.



Als Reaktionsprodukte entstehen gewöhnliches Salz (Natriumchlorid), Kohlenstoffdioxid und Wasser.

Die gering konzentrierte Salzsäure in der Flüssigkeit ist ungefährlich. Auch ein Schmecktest vor der Neutralisation birgt keine Gefahr. Natron ist ein altes Hausmittel.

Zuckertest: Fehling, Glucose-Teststäbchen, Refraktometer, Saccharometer

Zucker klebt (Stärkekleister leider auch!): Zerreiben Sie einen Tropfen zwischen den Fingern (dabei verdunstet das Wasser): Fühlt sich das klebrig an?



Ein klassischer chemischer Test ist die **Fehling-Reaktion**: Fehling´sche Lösung besteht aus zwei Komponenten, der hellblauen Fehling-I- und der wasserklaren (ätzenden) Fehling-II-Lösung. Jeweils einige wenige Milliliter werden in der Reihenfolge Fehling-II / Fehling-I in ein Reagenzglas gegeben und das dunkelblaue Gemisch mit etwas der auf Zucker zu testenden Lösung über einer Kerzenflamme erhitzt. Achtung: Fehling´sche Lösung neigt zu **Siedeverzug**, also nicht aufkochen, sonst kann es herausschießen, **Schutzbrille** tragen und Reagenzglasöffnung in eine „ungefährliche“ Richtung halten. Ist Zucker vorhanden, wird die Lösung rötlich (bei geringer Konzentration nur grün oder gelb).

Mit Fehling´scher Lösung lassen sich nur **reduzierende Zucker** nachweisen. Ohne hier auf Details eingehen zu können: Malzzucker (Maltose) ist ein reduzierender Doppelzucker (Disaccharid), das nicht reduzierende Disaccharid Saccharose (Rohrzucker) dagegen zeigt keine Fehling-Reaktion. Bei der sauren Hydrolyse wird die Bindung zwischen nicht reduzierenden

Doppelzuckern gelöst. Die entstehenden Monosaccharide Glucose (Traubenzucker) und Fructose (Fruchtzucker) reagieren auf Fehling positiv.



Fehling'sche Lösung ist ein wässriges Gemisch aus (hydratisiertem) hellblauem Kupfersulfat CuSO_4 (Kupfervitriol) und alkalischer (und ätzender!) Kaliumnatriumtartrat-Lösung mit dem Anion der Weinsäure (Tartrat). Die Verbindung aus Tartrat und Kupferionen ist tiefblau. Sind reduzierende Zucker vorhanden, wird rötliches Kupferoxid (Cu_2O) ausgeschieden.

Einfacher kann man **Glucose-Teststäbchen** (aus der Apotheke) verwenden (z.B. Diabur Test 5000 zum Preis von etwa 6 –8 € für 50 Teststäbchen.). Hier sollte die Farbe des Messfeldes zwischen dunkelgrün und blau liegen (>5 nmol/l Zucker)

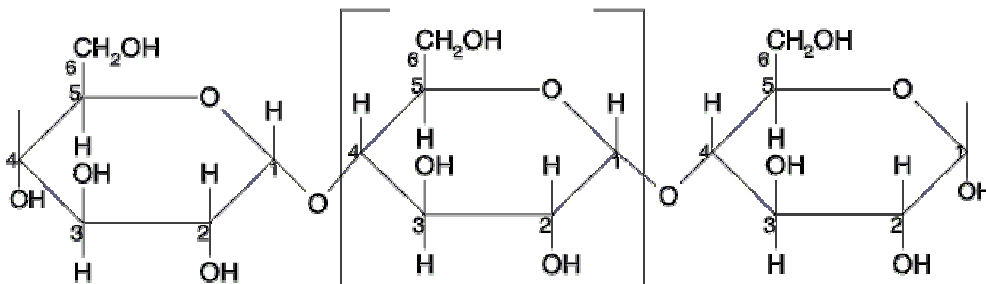
Die Nagelprobe allerdings ist der Gärungstest: Ist wirklich hinreichend vergärbarer Zucker entstanden? Hefe aus dem Supermarkt „verarbeitet“ nicht jeden Zucker und bei der sauren Hydrolyse entscheidet neben der Kochzeit der Zufall, ob längere oder kürzere Bausteine entstehen (Mono-, Di- und Oligosaccharide).



Mit einem Gärungssaccharometer* lässt sich der Erfolg quantifizieren. Das Gerät wurde bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts erfunden, um den Zuckergehalt im Harn festzustellen.

Das Saccharometer wird vollständig mit der mit etwas Hefe versetzten Flüssigkeit gefüllt. Sind (vergärbare) Zucker vorhanden, bildet die Hefe CO_2 , das nach oben steigt. Die CO_2 -Entwicklung ist proportional zum Zuckergehalt und an der Skala ablesbar.

Einfacher kann man die „ausgekochte“ und hoffentlich (!) verzuckerte Stärkelösung mit Hefe in ein verschließbares Gefäß geben und abwarten, ob sich Blasen und Schaum an der Oberfläche bilden. Wenn nicht, war die Kochzeit zu kurz!



Ausschnitt aus der Formel eines Stärkemoleküls nach HAWORTH

Vergärung des Zuckers zu Ethanol



Im nun folgenden Arbeitsschritt vergärt Hefe den Zucker zu Ethanol.

Dies lässt sich durch ein einfaches, bereits oben beschriebenes Experiment zeigen:

Geben Sie einige Gerstensamen in ein Schraubdeckelgefäß und fügen dann so viel Wasser hinzu, dass die Samen gerade bedeckt sind. Durch das Quellen wird so viel Wasser aufgesogen, dass Luft an die Samen gelangt. Den Überstand gießen Sie ab. Bei der Keimung wird Sauerstoff (O_2) verbraucht und Kohlenstoffdioxid (CO_2) erzeugt. Da CO_2 schwerer ist als die anderen Luftbestandteile, legt es sich im geschlossenen Gefäß wie eine Decke über die Keimlinge. Ideale Voraussetzungen für die alkoholische Gärung: Zucker ist durch die bei der Keimung entstandenen Amylasen hinreichend vorhanden, wilde Hefen sind überall präsent und es gibt keinen Sauerstoff, der die Hefen zu einem „normalen“ Stoffwechsel veranlassen könnte.



Sie nehmen den physiologischen „Notausgang“ und überleben solange, bis ihr eigenes Stoffwechselprodukt (Ethanol) sie umbringt.

Hefe (*Saccharomyces cerevisiae*) ist ein einzelliger, zu den Schlauchpilzen (Ascomyceten) gehörender lebender Organismus, dessen Verwandte als „Wildhefen“ praktisch überall zugegen sind und z.B. liegen gelassenes Obst spontan vergären.

Wer Zugang zu einer Brauerei hat, kann mit speziellen (Reinzucht-) Brauhefen experimentieren, die eine höhere Alkoholtoleranz aufweisen als die im Supermarkt im Kühlregal erhältliche Backhefe.

Zur Herstellung von Bioethanol in der Schule reicht die preiswerte Backhefe (15 ct / Block) völlig aus. Unter sauerstoffreichen Bedingungen verstoffwechseln Hefen den Zucker wie Pflanzen, Tiere und der Mensch auch, d.h. sie bauen ihn unter Sauerstoffverbrauch vollständig zu Wasser (H₂O) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) ab. In anaerober Umgebung nehmen Hefen einen anderen, **Gärung** genannten Weg: Zuckermoleküle werden in mehreren Schritten enzymatisch unter Abgabe von 2 Molekülen CO₂ zu zwei Ethanol-Molekülen „halbiert“. Der Energiegewinn aus der Gärung ist für die Hefe relativ gering, da das Endprodukt noch viel Energie enthält. Außerdem führt die steigende Ethanol-Konzentration zum „Selbstmord“ der Hefe.

Das **Ansetzen der Hefe** ist einfach: Die aus dem Kühlschrank entnommene Hefe wird mit lauwarmem Wasser und etwas Zucker vermischt und gut durchgerührt. Während sich die Hefe „akklimatisiert“ und „in Gang kommt“, werden einige Tropfen des Ansatzes näher untersucht.

Dass Hefe ein **Lebewesen** ist, zeigt sich unter dem **Mikroskop***. Zwar ist sie unbeweglich aber man kann ihr mit etwas Geduld zusehen, wie sie sich vermehrt: In nicht zu stark konzentrierter, gut durchgerührter Zuckerlösung „sprossen“ die runden Zellen, wobei sich knospenartige Auswüchse bilden, die sich nach einiger Zeit ablösen. Das geschieht, experimentell nachprüfbar, nur in Gegenwart von Zucker und Sauerstoff, d.h. unter energetisch günstigen Umständen.

Die Hefesuspension sollte daher vor dem Mikroskopieren kräftig gerührt werden oder einige Zeit mit einer Aquarienpumpe belüftet werden. Hefe beim „Ausatmen“ zu beobachten gelingt allerdings nicht, da das CO₂ in gelöster Form und damit unsichtbar abgeschieden wird. Nach einiger Zeit bilden sich unter dem Deckglas spontan und ohne kleinere „Vorgänger“ kleine Bläschen, die schlagartig zu größeren Blasen zusammenfließen. Die beobachtete, spontane Blasenbildung wirft eine Reihe physikalischer Fragen auf, z.B. die Frage nach der kleinsten möglichen Blase. Kleine Blasen haben eine relativ zum Volumen größere Oberfläche („Haut“) als größere Blasen. Eine mögliche Erklärung: Kleine Blasen müssen dem Außendruck des Wassers einen entsprechend größeren Binnendruck entgegensetzen. Das setzt der Minimalgröße Grenzen.

Der Hefeansatz wird zur geläuterten (filtrierten) Würze, z.B. in eine Flasche (Bierflasche mit Bügelverschluss) gegeben und mit einem Gäraufsatz* („Gärröhrchen“) versehen. Das mit Wasser gefüllte Gärröhrchen garantiert den Luftabschluss, lässt aber das Gärungs-CO₂ entweichen.

Wenn kein Gärröhrchen vorhanden ist, muss die Flasche leicht geöffnet bleiben: Im Schulbiologiezentrum explodierte eine (versehentlich) verschlossene Flasche, wobei der Flaschenhals 10 m weit geschleudert wurde! Die Splitter der zerborstenen Flasche verteilten sich auf den ganzen Raum. Öffnen Sie Flaschen mit gärendem Inhalt also nur vorsichtig!

Der Gäraufsatz erlaubt den Gärfortschritt durch Zählen der Bläschen pro Zeiteinheit zu erfassen, eine **Tabelle** anzulegen und die Werte in ein **Diagramm** zu überführen.

Die **Hauptgärung** dauert je nach Temperatur 4 – 6 Tage. Danach sinkt die Zahl der Bläschen pro Zeiteinheit wieder ab. Die wochenlange Nachgärung trägt zwar zur „Reifung“ bei, erhöht den Ethanol-Gehalt aber nicht wesentlich. Das Produkt sollte alkoholisch riechen und keinen Zucker mehr enthalten. Die Frage, ob man das „Bier“ trinken kann, lässt sich grundsätzlich mit „Ja“ beantworten, mit den Einschränkungen natürlich, dass es hygienisch „sauber“ sein muss, dass Bier ein Rauschmittel ist und dass unser „Bier“ durch das Fehlen von Hopfen (Bitterstoffe) geschmacklich kaum an Bier erinnert. Hopfen, genauer die weiblichen Blüten der Hopfenpflanze, dienen übrigens auch als Konservierungsmittel. Unser „Bier“ ist nicht lagerfähig und kippt durch wilde Gärungsprozesse und Bakterienbefall schnell um.



Eine vorzeig- und trinkbare Alternative (wenn man schon „alle Sinne“ im Sinn hat...) ist ein 3 – 5 Tage lang mit Bäckerhefe zu durchaus schmackhaftem „Apfel-Krätzer“ vergärender Apfelsaft, vergleichbar mit einem Federweißen. In kühler Umgebung und bei langsamer Gärung entsteht ein „Cidre“.

Der **Alkoholgehalt** lässt sich wieder durch das Aräometer* oder durch Spindeln ermitteln. Ethanol hat mit $0,79 \text{ g / cm}^3$ eine geringere Dichte als Wasser (1 g / cm^3). Das Aräometer taucht in Ethanol tiefer (!) ein als in Wasser.

Ein aus der Aluminiumschale herausgelöstes Teelicht (Paraffin) schwimmt (z.B. im Messzylinder) auf dem Wasser, sinkt in reinem Ethanol (Brennspiritus) aber auf den Grund.

Die Dichte von Ethanol-Wassergemischen verläuft je nach Ethanol-Konzentration zwischen diesen Extremen.

Selbst hergestellte, definierte Gemische dienen als Vergleichslösungen. Dabei ist zu beachten, dass der im Vergleich zu teurem, nahezu 100%igem Ethanol preiswerte Brennspiritus nur maximal 96% Ethanol enthält, was das präzise Messen ungenau macht.

Der Erfolg der Gärung misst sich aber nicht an Nachkommastellen!

Ethanol lässt sich statt durch lebende Hefezellen mit einer aus Hefe gewonnenen **zellfreien Presslösung** herstellen. Diese Lösung enthält alle in der Hefe enthaltenen Enzyme (in der Summe Zymasen genannt). Mit diesem Experiment zeigte der spätere Nobelpreisträger Eduard Buchner 1897, dass nicht die Hefen, sondern die in ihr enthaltenen Enzyme für die alkoholische Gärung verantwortlich sind.

Versuchsweise sei empfohlen, dieses **historische Experiment** zu wiederholen und einen motivierenden und vielleicht auch die Philosophie berührenden Einstieg in das Thema „Enzyme“ zu wagen: Was ist Leben?

Dazu wird Hefe mit Hilfe von feinem Quarzsand und Kieselgur (fossile Diatomeenschalen) mit einem Mörser zu einem feinen Brei zerstoßen. Den so mechanisch aufgeschlossenen und zerstörten Zellen (Kontrolle Mikroskop!) wird etwas destilliertes Wasser hinzugegeben. Dann wird der Saft mit einem feinen Leinentuch und viel Kraft ausgetrieben. Der Presssaft, in eine Zuckerlösung gegeben, sollte zügig in Gärung übergehen!

Hefe kultivieren und selektieren

Hefe liegt in praktischen und billigen Päckchen im Kühlregal jedes Supermarkts. Die wenigsten nehmen Hefe beim Einkauf als etwas Lebendiges wahr und würden dann vielleicht sogar davor zurückschrecken. Ein reizvoller Neben aspekt des Bioethanol-Projekts kann die Kultivierung und Vermehrung der Backhefe sein.

Unter Sauerstoffzufuhr (Aquarienpumpe mit Sprudelstein) gehaltene Hefe verstoffwechselt Zucker genauso wie wir es tun, d.h. durch Glykolyse und den Zitronensäurezyklus ohne Alkoholbildung. Als Nährstoff wäre Haushaltszucker auf die Dauer zu einseitig, Eiweiß und Mineralien können entweder durch Pepton- oder Caseinlösung hinzugegeben werden oder man gibt etwas Malzpaste dazu. Man kann aber auch Malz (auch selbst erzeugtes) fein mörsern, durch Aufkochen sterilisieren und filtrieren.

Backhefe kann man auch auf sterilen Agarböden in Petrischalen wachsen lassen. Hier sollte man für Pilze geeigneten Sabouraud-Agar verwenden. Später kann man mit der steril gemachten (ausgeglühten) Impföse einzelne Zellen oder Zellgruppen vom dünnen Randbereich der Kolonien abnehmen und auf ein neues Medium übertragen.

Ausblick: Herstellung von „Reinzuchthefen“

Ob es in der Schule möglich ist, bestimmte, etwa salz- und alkoholtolerantere Hefelinien herauszuzüchten ist fraglich. Das Thema Selektion muss wahrscheinlich theoretisch behandelt werden. Prinzipiell muss man die Hefezellen herausselektieren, die trotz hoher und für die Mehrheit tödlicher Konzentration im Medium überleben.

Besonders bei der bereits angerissenen Holz-, also Celluloseverzuckerung wird es unter Umständen notwendig, die Salz- und Schwefeltoleranzen anzuheben.



Durch Neutralisation von HCl durch NaOH entsteht Salz (NaCl). Bei der Stärkeverzuckerung ist die Konzentration gering, wenn aber, wie gesondert beschrieben, Cellulose (Holz) verzuckert werden soll, muss mit hochkonzentrierter Schwefelsäure (H₂SO₄) und zur Neutralisation mit ebenso konzentrierter Lauge (NaOH) gearbeitet werden. Die dann Natriumsulfat Na₂(SO₄) enthaltende Lösung wird entsprechend salzig und Sulfate hemmen den Gärprozess.

Wahrscheinlich ist der enzymatische Weg der Holzverzuckerung durch Cellulose abbauende Cellulasen doch der bessere.

Cellulasen lassen sich aus holzabbauenden Pilzen isolieren.

Siedepunkte von Wasser und Ethanol feststellen

Unter Standarddruckverhältnissen siedet Wasser bei 100 °C, Ethanol bei 78 °C. Gerne, aber falsch, wird der Siedepunkt als die Temperatur bezeichnet, bei dem ein Stoff aus der flüssigen in die gasförmige Phase überwechselt. Falsch insofern, als das Wasser und Ethanol schon bei erheblich niedrigeren Temperaturen verdunsten.

Richtig wäre zu formulieren: Flüssiges Wasser bzw. Ethanol verharren bei Energiezufuhr so lange auf dem Siedepunkt bis sie vollständig in die Gasphase übergegangen sind. Erst dann steigt die Temperatur über den Siedepunkt hinaus. Heißt: Flüssiges Wasser kann, bei Standarddruck, 100 °C nicht überschreiten.

Um 1 kg Wasser von 15 °C auf 100 °C zu erhitzen, wird etwa 356 kJ Energie gebraucht (1000g x 4,186 J x 85 K = 355810 J = 355,81 kJ). Das entspricht etwa 0,1 kWh (1 kWh = 3600 kJ = 3,6 MJ). Zum vollständigen Verdampfen ist aber fast das 6fache dieser Energie erforderlich, denn: Beim Phasenübergang wird (zusätzliche) Verdampfungsenergie benötigt, um die Anziehungskräfte (Wasserstoffbrücken) zwischen den Molekülen zu lösen. Diese so genannte Abtrennarbeit beträgt 2088 kJ / kg Wasser, entsprechend 0,58 kWh. Erst wenn allen Wassermolekülen so viel Energie zugefügt wurde, dass sie sich aus dem Verband (den wir flüssig nennen) lösen und sie die Wasseroberfläche durchbrechen können, steigt die Temperatur über 100 °C.

Für Ethanol gilt entsprechendes, da aber die Anziehungskräfte zwischen den Molekülen deutlich geringer sind, ist auch weniger Abtrennarbeit notwendig.

Welche Temperatur erreicht (flüssiges) Ethanol maximal?

Im Experiment geben wir 50 ml Ethanol in einen Erlenmeyerkolben, befestigen diesen an einem Stativ und erhitzen das Ethanol im Wasserbad. Mit Hilfe zweier Digitalthermometer werden die Ethanol- und Wassertemperaturen aufgenommen, in eine Tabelle eingetragen und in ein Diagramm übersetzt. Das Ergebnis: Die Ethanol-Temperatur verharrt bei 78 °C bis es vollständig verdampft ist, steigt dann (gasförmig) auf die, durch das umgebende Wasser definierte Temperatur von etwa 100 °C.

Um die Geruchsbelästigung (und Gesundheitsgefahren) zu vermindern, verdampft das Ethanol in ein langes Rohr, kondensiert bei sinkenden Temperaturen und fällt zurück in den Kolben.

Dieser Aufbau entspricht in den Grundzügen schon einem Destillierapparat.

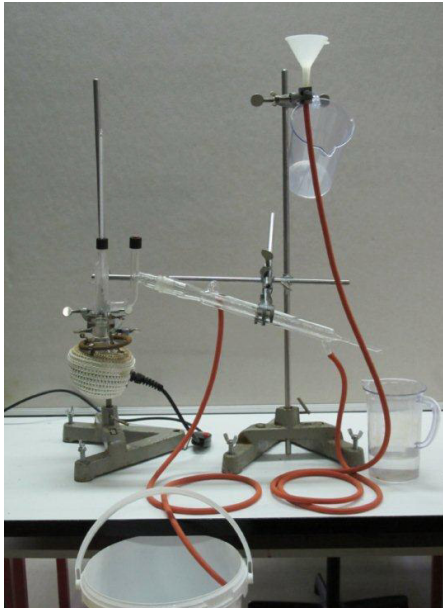
Destillation zu brennbarem Ethanol

Unser selbst hergestelltes „Bier“ mit einem Alkoholgehalt von etwa 6 % brennt im Versuch nicht. Hochprozentiges, brennfähiges Ethanol erhalten wir durch Destillieren, umgangssprachlich „Brennen“ genannt. Dabei werden die unterschiedlichen Siedepunkte des Wassers (100 °C) und des Ethanols (78 °C) ausgenutzt. Das in geringen Mengen als natürliches Gärprodukt entstehende giftige (!) Methanol siedet bereits bei 65 °C.

Die klassische „Destille“ besteht aus einem, mit einer regelbaren Heizhaube umschlossenen Rundkolben. Das gasförmige Ethanol steigt auf und wird in einem Kühler (z.B. Liebig-Kühler) unter die Siedetemperatur heruntergekühlt und als Flüssigkeit aufgefangen.



Das vielleicht noch einmal (mit einem Kaffeefilter) von Trübstoffen befreite „Bier“ wird im Rundkolben des Destillationsgeräts langsam erhitzt. Einige zugefügte Siedesteinchen verhindern das Aufschäumen und Überschlagen des „Bieres“.



Beim Brennen verdampfen als erstes die Alkohole (Methanol und Ethanol) und laufen, flächig und ohne Tropfen zu bilden, zurück in den Rundkolben, um dann bei steigender Temperatur, wie gewünscht, im Kühler zu kondensieren. Der Kühler wird an eine Wasserstrahlpumpe angeschlossen (Durchflusskühler) oder „per Hand“ über einen Trichter durchgespült.

Das in die so genannte Vorlage (Glasbecher) tropfende Destillat sollte, auf den Finger gebracht, scharf nach Alkohol riechen und scharf schmecken. Dabei ist zu beachten, dass die ersten Tropfen wahrscheinlich giftiges Methanol enthalten. Kontrollieren Sie laufend die Temperatur des „Bieres“ im Kolben und die Temperatur des Kühlereingangs. Ideal ist es, die Temperatur im Kolben auf etwa 95°C und den Kühlereingang etwas oberhalb von 78°C zu halten. Sollten sich am Eingang des Kühlers Tropfen bilden, bestehen diese aus Wasser! Nur Wasser hat eine „Haut“ und bildet Tropfen. Dadurch wird das Destillat „verwässert“. Nehmen Sie in diesem Falle die Temperatur etwas zurück!



Die **Brennbarkeit** des Destillats lässt sich auf einem flachen Teller überprüfen. Das Ethanol sollte rückstandslos mit bläulicher Flamme abbrennen. Brennt es nicht, liegt die Konzentration unter 50%. Ein einfaches Demonstrationsexperiment zeigt, wie ein Destilliergerät funktioniert. Bier, Wein oder unser „Selbstgebräutes“ wird in einem Glaskolben unter Hinzugabe einiger Siedesteine erhitzt. Der Ethanoldampf steigt in ein, auf den Kolben aufgesetztes Glasrohr und läuft (typisch) flächig, (nicht tropfenförmig) zurück. Etwas später, bei steigender Temperatur kann der (unsichtbare) Dampf an der Mündung des Glasrohrs entzündet („abgefackelt“) werden. In die Öffnung geschobene Eisenwolle nimmt einen Teil der Wärme auf und verhindert dadurch ein Zurückschlagen der Flamme in das Glasrohr (Rückschlagsicherung).



Das so gewonnene, brennbare Destillat enthält immer noch viel Wasser, das schrittweise durch erneutes Destillieren abgetrennt werden kann. Dabei wird deutlich, dass das Produkt „Bioethanol“ nur noch einen Bruchteil des ursprünglichen „Bier“-Volumens ausmacht und dass beim Destillieren viel **Energie** verbraucht wird. Möglicherweise viel mehr Energie als das Destillat enthält!

Wird eine elektrische Heizhaube verwendet, lässt sich der „Stromverbrauch“ mit einem **Leistungsmessgerät** in Wattstunden (Wh) messen (1 Wh = 3600 Ws = 3600 J).

Der Energiegehalt von Ethanol liegt bei 25 Megajoule (MJ) pro Liter, bei geringeren Mengen und geringerer Konzentration entsprechend geringer.

Beispiel: Wird beim „Brennen“ (idealerweise) aus 100 ml „Bier“ 30 ml 50%iges Ethanol gewonnen, enthält das Destillat 15 ml Ethanol mit einem „Brennwert“ von 375 KJ ($25000000 \text{ J} / 1000 \text{ ml} \times 15 \text{ ml} = 375000 \text{ J} = 375$

KJ). Das entspricht nach Division durch 3600 rund 104 Wattstunden (Wh), die als „Output“ gegen den Energieverbrauch bei der Destillation aufgerechnet werden müssen.



In großindustriellen Anlagen wird die Energiebilanz positiver ausfallen. Prinzipiell aber muss die auch CO₂ erzeugende Energieinvestition bei der Aufkonzentrierung des Ethanol vom ökologisch-energetischen Vorteil des Bioethanols abgezogen werden.

In **Brasilien** wird die Bioethanolherstellung vielfach durch herstellungsimmanente, energiereiche Abfälle („Bagasse“) „befeuert“, so dass die Bilanz gegen Null geht oder sogar positiv wird, indem in den Bagasse-beheizten Dampfkraftwerken Elektrizität erzeugt wird.

Messen des Alkoholgehalts

Die **Alkoholkonzentration** wird mit selbst hergestellten definierten Vergleichslösungen bestimmt. Dazu wird die Masse („Gewicht“) mehrerer unterschiedlich konzentrierter Ethanol-Wassergemische gemessen, z.B. jeweils 10 ml 0 – 100%iger in 10er oder 20er Schritten abgestufte Lösungen. Dann werden 10 ml des Destillats ausgewogen und der Wert in die vorherigen Ergebnisse eingereiht. Zeitsparend kann man den Wert auch in der **Tabelle** (Arbeitsblatt) ablesen.

Brennbar ist Ethanol ab einer Konzentration von über 50%. Ethanol verbrennt mit einer ruhigen, manchmal kaum sichtbaren und nicht rußenden blauen Flamme.

Absolutierung (100%iges Ethanol)

Wasser siedet nach Lehrbuch bei 100°C und Ethanol bei 78°C. Der Übergang von der flüssigen in die gasförmige Phase beginnt aber bereits bei tieferen Temperaturen: Sonst gebe es keinen Regen auf der Erde (weil es keine Verdunstung gäbe!) und Alkohol würde, bei Zimmertemperatur, nicht in unsere Nase steigen. Das heißt:

Bei der Destillation des Ethanol-Wassergemisches gelangt immer ein, von der Temperatur abhängiger Wasseranteil in den Kühler. Da die Siedepunkte nahe beieinander liegen, reißt der siedende Alkohol stets verdunstendes Wasser mit.

Der Wasseranteil lässt sich durch mehrfaches Destillieren reduzieren, aber aufgrund hier nicht im Detail darstellbarer physikalischer Gründe nicht vollständig eliminieren. Der Schlüsselbegriff heißt „**Azeotrop**“:

Ein Ethanol-Wassergemisch bildet bei 95,6% Ethanol- und 4,4% Wassergehalt ein so genanntes Azeotrop, bei dem beide Komponenten den gleichen Siedepunkt haben und destillativ nicht mehr zu trennen sind. Der in den Kühler aufsteigende Dampf enthält dann genauso viel Wasser wie die flüssige Phase.

Motoren vertragen nur 100%iges Ethanol:

Elektrisch unpolares Benzin und polares Wasser vermischen sich nicht, das dichtere („schwerere“) Wasser würde im Tank und im Leitungssystem nach unten sinken und den Motor absterben lassen. Das gleiche würde geschehen, wenn man wasserhaltiges Bioethanol mit Benzin vermischt. Benzinmotoren verkraften also nur wasserfreie Bioethanolanteile. Bitte verwenden Sie auf keinen Fall (!) das selbst hergestellte Bioethanol als Benzinzusatz!

Wasserfreies Ethanol kann durch **Absolutierung** gewonnen werden, industriell durch (ternäre) azeotrope **Rektifikation**. Dabei wird ein dritter Stoff (Benzol oder besser Cyclohexan) hinzugefügt, was den Siedepunkt des Ethanol/Benzol/Wassergemisches auf etwa 64°C sinken lässt und ermöglicht, das Wasser leichter „herauszuschleppen“. Ethanol und Benzol können durch Destillation sauber getrennt werden, so dass 100%iges Ethanol entsteht. Die Rektifikation ist umständlich und in der Schule kaum durchführbar, zeigt aber auch in theoretischer Betrachtung, dass der Energieaufwand bei der Ethanolherstellung sehr groß ist.

Viele brasilianische Autos fahren mit „restwasserverträglichen“ Alkoholmotoren, die 96%iges Ethanol verbrennen oder mit Flex-Motoren, die wahlweise mit Benzin, Benzin/Ethanol-Gemischen oder mit 96%igem Ethanol fahren.



ARBEITSBLÄTTER

„Grüne Solarzellen“: Aus Sonnenlicht wird Nahrung

Herstellung von Rübensaft und (optional) Zucker

Extraktion von Stärke aus Kartoffeln

Stärkegehalt der Kartoffeln bestimmen

Wie viel Abfall fällt bei der Herstellung an? Was geschieht damit?

Wie stark werden Gewässer durch Bioethanol-Herstellung belastet?

Herstellung von Malz aus Gerstensamen, Stärke verzuckern

Amylase extrahieren und testen

Einmaischen und Rasten (Stärke verzuckern)

Läutern, Sterilisieren, Zuckergehalt messen, Jodprobe

„Bierspindel“ (Aräometer) Zuckergehalt der Würze

Hefe und Gärung Verwandlung Zucker → Alkohol

Hefevermehrung, gärende Hefe unter dem Mikroskop

Destillation (1): Alkohol „abfackeln“

Destillation (2): „Schnaps brennen“

Bestimmung der Siedepunkte von Ethanol und Wasser

Alkoholgehalt des Destillats



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Sonnenenergie – Photosynthese – Zucker und Stärke



„Grüne Solarzellen“: Aus Sonnenlicht wird Nahrung

Grüne Pflanzen erzeugen ihre Nahrung selbst (Photosynthese) Dazu brauchen sie Sonnenenergie, CO₂, Wasser und den grünen Blattfarbstoff Chlorophyll.

Bei der Photosynthese entsteht Zucker (Glucose) der in Stärke

eingebaut wird. Stärke lässt sich mit Jodlösung nachweisen. Chlorophyll löst sich in (heißem) Alkohol (Ethanol).

Material:

- „Panaschierte“ Pelargonie o.ä. (grün-weiße Blätter)
- Ethanol (Brennspiritus) zum Entfärben
- Glas mit Schraubdeckel (Würstchenglas)
- Wasserkocher
- Thermohandschuh
- Petrischale(n)
- Jodlösung (Lugol'sche Lösung)
- Pipette
- Pinzette

So gehst du vor:

- Pflücke ein Blatt ab.
- Lege es in das Glas und bedecke es mit Brennspiritus.
- Schraube das Glas fest zu
- Gib Wasser in den Wasserkocher.
- Stelle das Glas in das Wasser.
- Bringe das Wasser zum Kochen.
- Lasse es etwa 10 Minuten lang stehen.

Notiere deine Beobachtungen:

Wie hat sich das Ethanol verändert? _____

Wie hat sich das Blatt verändert? _____

So machst du weiter:

- Lege das Blatt in die Petrischale und bedecke es mit Jodlösung

Wie verändert sich das Blatt jetzt? _____

Wie erklärst du diese Veränderung? _____



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Rübensaft und (optional) Zucker aus Zuckerrüben

Herstellung von Rübensaft und Zucker

Material

- 1 große Zuckerrübe
- Große Schale, Schälmesser, Reibe
- Wasserkocher, Wasser
- Herdplatte, Topf
- Filtereinsatz, Filtertüte(n)

Rübenschnitzel herstellen und auskochen

- Rübe schälen und mit der Reibe dünne Schnitzel herstellen
- Schnitzel in Topf geben, mit kochendem Wasser übergießen
- Aufkochen und unter Rühren (!) köcheln lassen
- Wasser dabei langsam verdampfen lassen
- Von Zeit zu Zeit mit dem Refraktometer Zuckergehalt überprüfen

Zuckergehalt prüfen

- 1 Tropfen Rübensaft in **Refraktometer** geben und Messwert ablesen (Vorgehensweise vom Lehrer erklären lassen!)

Rübensaft filtern

- 10 – 15%igen Rübensaft abgießen und filtern
- Erneut Zuckergehalt prüfen

Zucker herstellen (Option)

- Etwas mehrfach gefilterten (klaren!) Rübensaft mit Gasbrenner im Becherglas vollständig einkochen
- **Tipp:** Vorher 1 Tropfen unter Mikroskop geben und Wasser verdunsten lassen

Information:

Die Zuckerrübe (*Beta vulgaris*) ist eine **zweijährige** Kulturpflanze. Sie wird im Frühjahr ausgesät. Im ersten Jahr bildet sie nur grüne Blätter. Sie wandeln Sonnenenergie in Zucker (Photosynthese). Der Zucker wird im Herbst und Winter in der unterirdisch heranwachsenden Rübe gespeichert. Im Frühjahr des zweiten Jahres wird die so gespeicherte Sonnenenergie genutzt um eine etwa 1,5 m hohe, im Sommer blühende und Samen bildende Pflanze zu bilden.

Nahe **Verwandte** der Zuckerrübe sind: Wild-Bete (wächst an der Nordsee, wilde Ausgangsform der gezüchteten Kulturformen: Rote Bete, Futterrübe, Mangold)

Zur Herstellung von **1 l Bioethanol** werden 7,9 kg Zuckerrüben oder 1,5 m² Anbaufläche gebraucht.



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Stärke aus Kartoffeln gewinnen

Extraktion von Stärke aus Kartoffeln

Material

- Kartoffeln
- große Schale, Schälmesser, Reibe
- großes Sieb, Baumwolltuch (Babywindel)
- Messbecher, Messzylinder
- Mikroskop, Objektträger, Deckglas, Rasierklinge, Jodlösung

Stärkegewinnung

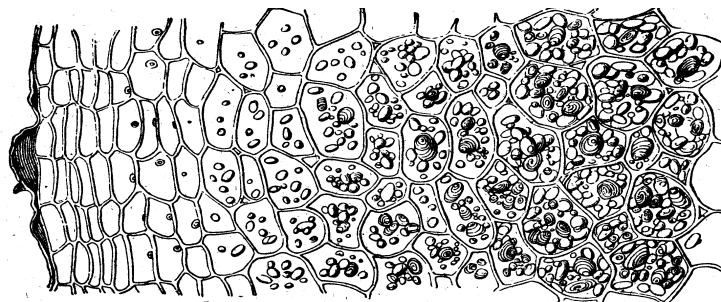
- Kartoffeln schälen mit der Reibe zu „Kartoffelbrei“ (Reibsel) verarbeiten
- Kartoffelreibsel in Sieb geben und vorsichtig auspressen
- Rest mit Baumwolltuch auspressen bis kein Wasser mehr austritt
- Reibsel (Presskuchen / Rohfaser) in Messgefäß geben
- Wasser im Behälter auffangen und in Messzylinder geben
- Stärke sedimentieren lassen (Wasser muss klar sein!)
- Rohfaser-, Wasser- und Stärkeanteil abschätzen

Volumenanteile:

Reibsel	_____ %	Die Stärke sinkt zu Boden (sedimentiert).
Wasser	_____ %	Nach dem vorsichtigen (!) Abgießen des Wassers (dekantieren) bleibt die Stärke zurück.
Stärke	_____ %	Sie wird auf einer großen flachen Unterlage ausgebreitet und getrocknet (Sonne, Umluftherd)

Kartoffelstärke unter dem Mikroskop:

Stelle mit der Rasierklinge (Vorsicht!) dünne Schnitte der rohen Kartoffel her und mikroskopiere sie. Gib verdünnte Jodlösung dazu. Mikroskopiere auch die extrahierte Stärke.





Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Stärkegehalt von Kartoffeln

Stärkegehalt der Kartoffeln bestimmen

Bestimme das Gewicht, das Volumen und die Dichte von Kartoffeln und ermittle daraus den Stärkegehalt.

- Schäle 5 Kartoffeln und bestimme ihr genaues Gewicht
- Tauche sie vollständig in ein mit Wasser gefülltes Messgefäß und miss das Volumen des verdrängten Wassers (Wasserstand vor und nach dem Eintauchen)
- Berechne die Dichte (Gewicht in g / Volumen in cm³)
- Lies den Stärkegehalt in der Tabelle ab.

Gewicht: _____ g

Volumen: _____ cm³

Dichte: _____ g / cm³

Dichte	Stärke %	Dichte	Stärke %	Dichte	Stärke %
1,0493	7,4	1,0834	14,7	1,1198	22,5
1,0504	7,6	1,0846	14,9	1,1211	22,7
1,0515	7,8	1,0858	15,2	1,1224	23
1,0526	8,1	1,0870	15,4	1,1236	23,3
1,0537	8,3	1,0881	15,7	1,1249	23,5
1,0549	8,6	1,0893	15,9	1,1261	23,8
1,0560	8,8	1,0905	16,2	1,1274	24,1
1,0571	9,0	1,0917	16,4	1,1286	24,3
1,0582	9,3	1,0929	16,7	1,1299	24,6
1,0593	9,5	1,0941	17,0	1,1312	24,9
1,0604	9,7	1,0953	17,2	1,1325	25,2
1,0616	10,0	1,0965	17,5	1,1338	25,4
1,0627	10,2	1,0977	17,7	1,1351	25,7
1,0638	10,5	1,0989	18,0	1,1364	26,0
1,0650	10,7	1,1001	18,2	1,1377	26,3
1,0661	11,0	1,1013	18,5	1,1390	26,6
1,0672	11,2	1,1025	18,7	1,1403	26,8
1,0684	11,5	1,1038	19,0	1,1416	27,1
1,0695	11,7	1,1050	19,3	1,1429	27,4
1,0707	11,9	1,1062	19,5	1,1442	27,7
1,0718	12,2	1,1074	19,8	1,1455	28,0
1,0730	12,4	1,1086	20,1	1,1468	28,2
1,0741	12,7	1,1099	20,3	1,1481	28,5
1,0753	12,9	1,1111	20,6	1,1494	28,8
1,0764	13,2	1,1123	20,8	1,1507	29,1
1,0776	13,4	1,1136	21,1	1,1521	29,4
1,0787	13,7	1,1148	21,4	1,1534	29,6
1,0799	13,9	1,1161	21,7	1,1547	29,9
1,0811	14,2	1,1173	21,9	1,1561	30,2
1,0822	14,4	1,1186	22,2	1,1574	30,5

Tabellenwerte: <http://www.pflanzenbau.rlp.de> (Auszug)



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Abfall bei der Produktion

Verwendung und Entsorgung der Reststoffe

Wie viel Abfall fällt bei der Herstellung an?

Was geschieht damit?

Gib alle (!) flüssigen und festen Reststoffe die bei der Bioethanol-Herstellung anfallen in den bereitgestellten Eimer.

- Bestimme Masse (Gewicht) und Volumen:

_____ g, _____cm³

- Bestimme Masse und Volumen des Endprodukts (Bioethanol):

_____ g, _____cm³

- Ermittle das Verhältnis von Reststoffen und Endprodukt: _____

- Trenne die flüssigen von den festen Bestandteilen!

Überlege Möglichkeiten der Weiterverwendung und Entsorgung:

Für weiterführende Projekte:

Das kannst du auch noch untersuchen:

- Veränderung der Reststoffe nach ein paar Tagen und Wochen.
- Veränderungen mit und ohne Anwesenheit von Sauerstoff
- Veränderungen bei unterschiedlichen Temperaturen
- Verwendung der Reststoffe als Dünger



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Gewässerbelastung

Wie stark werden Gewässer durch Bioethanol-Herstellung belastet?

- Organische Abfälle enthalten noch Energie.
- Die Energie wird von Bakterien, Einzellern und Pilzen genutzt.
- Diese Organismen bauen die Abfälle zu einfachen Stoffen ab.
- Es entstehen z.B. CO_2 , H_2O , Methan CH_4 und einfache Alkohole.
- In Kläranlagen werden Bakterien zur Reinigung eingesetzt.
- Bei dieser „biologischen Reinigung“ wird viel Sauerstoff verbraucht.
- Je mehr verwertbare Energie in den Abfällen enthalten ist, desto stärker vermehren sich die Bakterien und desto größer der Sauerstoffverbrauch.
- In Kläranlagen führt man den Sauerstoff künstlich zu.
- Dort wo dies nicht geschieht führt der Sauerstoffverbrauch zu Sauerstoffmangel und zum „Umkippen“ des Gewässers (Massensterben von Pflanzen und Tieren).

Miss den biologischen Sauerstoffbedarf (BSB) des flüssigen Abfalls:

BSB₅-Test mit Kaliumpermanganat

(Der BSB₅-Test misst, wie viel Sauerstoff pro Liter in 5 Tagen verbraucht würde)

Material:

- Verdünnte Schwefelsäure H_2SO_4 (ätzend, Schutzbrille!)
- 0,01 molarige Kaliumpermanganatlösung KMnO_4
(0,01 mol/l \Rightarrow 1,58 g KMnO_4 in 1 Liter destilliertem Wasser lösen)

Testverfahren: Gib in 10 ml Probenwasser 5 Tropfen H_2SO_4 .

Dann füge 3 Tropfen rote KMnO_4 -Lösung hinzu und beobachte die Farbveränderung.

		BSB ₅ -Wert in O_2 mg/l
Entfärbung	• sofort	50 mg/l O_2
	• nach wenigen Minuten	30 mg/l O_2
	• durch Aufkochen	20 – 30 mg/l O_2
	• durch Aufkochen und stehen lassen	12 - 20 mg/l O_2
	• findet nicht statt	< 12 mg/l O_2

BSB₅ der Probe: _____. Teste auch Leitungswasser! BSB₅: _____



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Mälzen der Gerste

Herstellung von Malz aus Gerstensamen Stärke verzuckern

Langzeitexperiment: Keimung und Darren 5 – 6 Tage

Material

- 50 g keimfähige Gerste (vom Bauern) oder reife Gerstensamen vom Acker (Samenruhe mindestens 2 Monate!)
- Transparenter Kunststoffbecher mit Deckel
- 2 – 3 Blatt Toilettenpapier
- Etwas Wasser
- Backofen
- Mörser

Aussaat

- Boden des Bechers mit Toilettenpapier bedecken
- Etwas Wasser hinzugeben
- Gerstensamen gleichmäßig auf Papier verteilen
- Deckel aufsetzen

Mälzen

- Nach 24 Stunden überschüssiges Wasser abgießen
- Gerstensamen bei etwa 18°C keimen lassen
- Täglich lüften (Deckel aufmachen!), ggf. Wasser hinzugeben
- Samen durch leichtes Klopfen auf den Becherboden durchmischen (sonst Schimmel- und Fäulnisbildung!)
- Ausbildung von mehreren Wurzeln und kurzem grünen Keim

Darren

- Nach 5 – 6 Tagen im Backofen bei 50°C trocknen („Schwelken“) dann bei 100 –120°C „abdarren“: Malz wird dabei je nach heller oder dunkler
- Abgestorbene Keimlinge entfernen, Malz sollte süß („karamellig“) schmecken

Schroten

- Trockenes (!) Malz grob schroten (Mühle) oder mit Mörser leicht andrücken

Alternativ: Malz im Brauereifachhandel kaufen



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Stärkeverzuckerung, Amylase isolieren und testen

Amylase extrahieren und testen

Material:

- Trockene bzw. gekeimte **Gerstensamen**, alternativ: **Braumalz**
- **Mörser** und **Reibschale**
- Reagenzgläser
- Wasserbad mit einstellbarer Temperatur
- Wasser
- **Jodlösung**: Jod-Kaliumjodidlösung (stark verdünnt), Stärkenachweis
- **Fehling'sche Lösung** I und II (Zuckernachweis)

Gerste quellen und keimen lassen

- Lasse Gerstensamen 24 Stunden in Wasser quellen
- Gieße das Wasser ab und bringe sie 3 – 4 Tage lang im geschlossenen Gefäß zum Keimen

Amylase isolieren

- Zerreiße die Gerstenkeime mit etwas Wasser (**Mörser**)
- Gieße das Wasser ab und schleudere es in der **Zentrifuge**
- Gib den wässrigen Überstand in ein Probegefäß
- Es enthält **Amylase**

Amylase „zerschneidet“ Stärkemoleküle: Verzuckerung

- Gib eine Messerspitze Stärke in ein Reagenzglas
- Fülle das Reagenzglas mit Wasser. Gut schütteln!
- Schütte die Hälfte der Lösung weg und ersetze sie durch Wasser
- Wiederhole den Vorgang

- Gib einen Tropfen Jodlösung in ein Reagenzglas
- Fülle es mit Wasser auf
- Gib etwas verdünnte Jodlösung in die Stärkelösung

- Die Lösung färbt sich _____

- Füge Amylaselösung hinzu
- Erwärme die Lösung im Wasserbad auf etwa 70 °C

- Die blaue Lösung färbt sich _____

bitte wenden!

Zuckertest

- Mische etwas Fehling´sche Lösung I mit II
- Gib das Lösungsgemisch zur entfärbten Stärkelösung hinzu
- Setze eine Schutzbrille auf
- Erwärme es über der Ethanolflamme (Achtung: Siedeverzug!)

- Das Lösungsgemisch färbt sich _____

- Stärke hat sich durch _____ in Zucker verwandelt

INFO:

Stärkemoleküle bestehen aus mehreren Tausend aneinandergelinkten **Zuckermolekülen**. Das Stärkemolekül bildet „Schleifen“: Gibt man **Jodlösung** hinzu, werden die Jodatome in diese Schleifen eingelagert. Dies färbt Stärke **blau**.

Die **Enzyme α - und β -Amylase** wirken wie chemische Scheren: Sie zerschneiden die langen Stärkemolekül in kurze Ketten aus wenigen Zuckermolekülen und schließlich zu Doppel- oder Einfachzuckern.

Dadurch werden die „Schleifen“ zerstört. Die Jodatome werden frei und die blau gefärbte Stärke **entfärbt** sich.

Mit einem Gemisch aus **Fehling´scher Lösung I und II** lässt sich Zucker nachweisen: Gibt man etwas Fehling´sches Lösungsgemisch in eine durch Amylase verzuckerte Stärkelösung und erwärmt sie färbt sie sich **rot**.

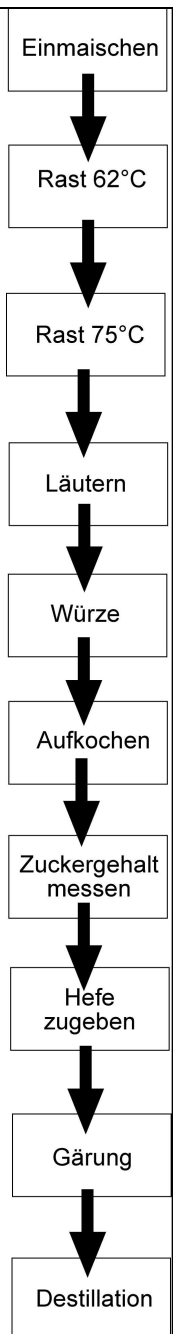
Unterbleibt die Rotfärbung gibt es diese Möglichkeiten:

- Die Amylase ist nicht vorhanden oder unwirksam
- Die Amylase-Lösung ist zu heiß geworden



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Stärkeverzuckerung, alkoholische Gärung und Destillation



Einmaischen und Rasten (Stärke verzuckern)

Maische

- 100 g Maisgries (Polenta)
- 25 g Braumalz (Gerstenmalz)
- 500 ml Leitungswasser

Maische auf optimalen pH-Wert einstellen

- pH-Wert messen (Teststreifen): _____
- Mit Essig auf pH 4,5 ansäuern (Teststreifen)

Erhitzen

- Im Topf unter Rühren langsam auf 62 °C bringen

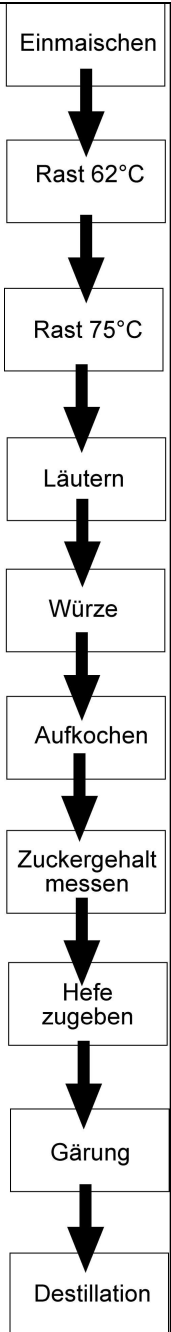
Rasten

- Heiße Maische in Thermoskanne füllen
- Maltoserast: 60 Minuten (β -Amylase)
- Im Topf unter Rühren langsam auf 75 °C bringen
- In Thermoskanne geben
- Dextrinrast: 60 Minuten (α -Amylase)
- Geschmacks- und Fingerprobe: positiv / negativ



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Stärkeverzuckerung, alkoholische Gärung und Destillation



Läutern, Sterilisieren, Zuckergehalt messen, Jodprobe

Läutern und Sterilisieren

- Würze durch Küchentuch geben (filtrieren)
- Geläuterte Würze aufkochen (keimfrei machen)
- schnell abkühlen lassen
- Kleine Menge Treber aufbewahren (Jodprobe!)
- Restlichen Treber in mit 70° heißem Wasser aufgießen
- In Thermoskanne zurückgeben

Zuckergehalt messen:

- Refraktometer: ___ g / 100 ml
- Aräometer: ___ g / 100 ml
- „Bierspindel“: ___ g / 100 ml

Jodprobe

Würze: positiv / negativ

Treber: positiv / negativ



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Stärkeverzuckerung, alkoholische Gärung und Destillation

„Bierspindel“ (Aräometer) (Zuckergehalt der Würze)

Materialien

- dicker Trinkhalm (transparent)
- Knetmasse
- Millimeterpapier (Skala)
- dünner Trinkhalm (als Stütze der Skala)
- Bleistift, Schere

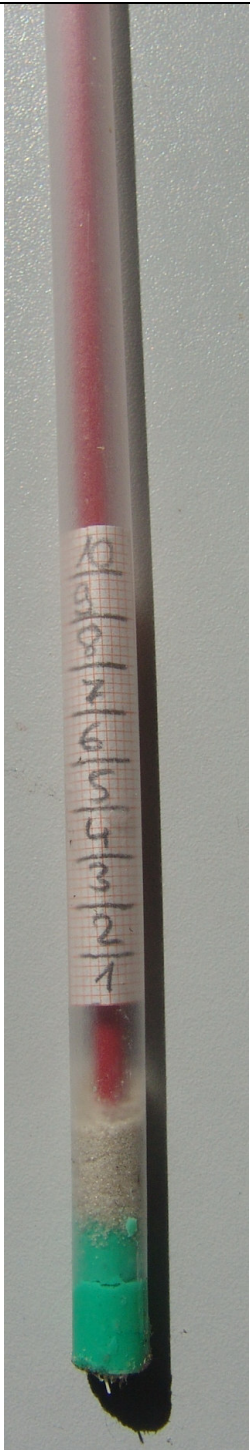
Herstellung

- Dicken Trinkhalm unten mit Knetmasse abdichten
- Millimeterpapier (20 x 1 cm) zurechtschneiden
- Skala (1 – 20) auftragen (Bleistift)
- Skala in Trinkhalm einführen (dünner Trinkhalm als Stütze)
- Unteres Ende mit etwa 10 cm³ Knetmasse beschweren (Aräometer muss in Standzylinder passen und schwimmen!)

Messung des Zuckergehalts

- Wässrige Lösungen mit jeweils 0, 6 und 12 g
- Zucker/100ml herstellen (etwa 0, 2 und 4 Zuckerwürfel)
- Zuckergehalt mit dem Refraktometer kontrollieren
- Eintauchtiefen des „Aräometers“ notieren
- Mit 100 ml geläuterter, abgekühlter Würze vergleichen

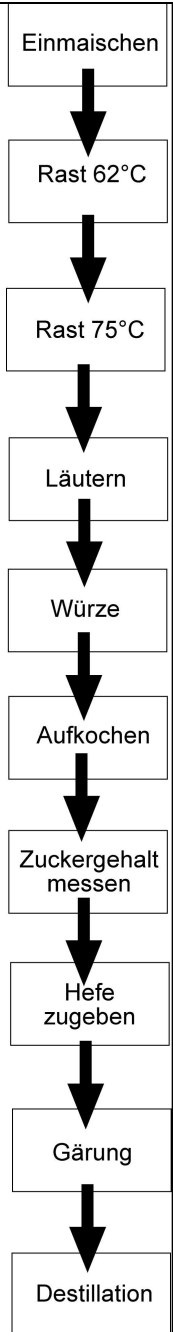
Zuckergehalt der Würze: _____ g / 100 ml





Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

Stärkeverzuckerung, ► alkoholische Gärung und Destillation



Hefe und Gärung (Verwandlung Zucker → Alkohol)

Hefe ansetzen

- 1 cm³ Backhefe und 2 Zuckerwürfel in 30 ml lauwarmes Wasser geben (Messbecher)
- Hefeansatz belüften (rühren)

Würze mit Hefe versetzen

- Auf 30 °C abgekühlte Würze in Flasche füllen
- Hefeansatz hinzugeben
- An warmen Platz stellen (30 °C)

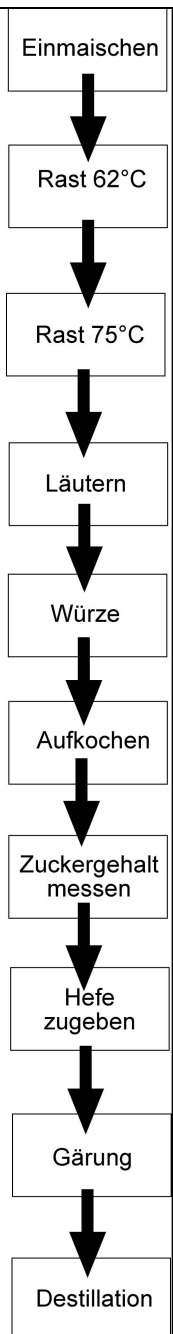
Gärung

- Gärröhrchen vorbereiten und auf Flasche setzen
- Gasbildung (CO₂) protokollieren: Blasen pro Minute
- Tabelle in Diagramm übersetzen



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

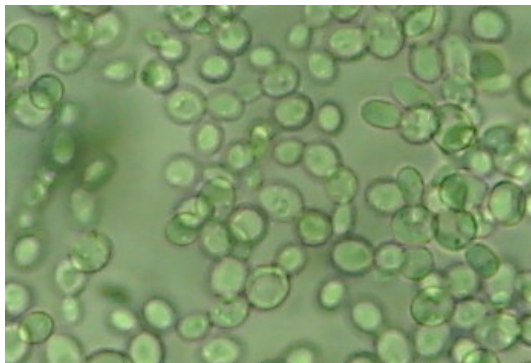
Stärkeverzuckerung, ► alkoholische Gärung und Destillation



Hefevermehrung, gärende Hefe unter dem Mikroskop

Hefe mikroskopieren

- Messerspitze Backhefe und etwas Zucker in eine Tasse lauwarmes Wasser geben
- Hefeansatz belüften (rühren!)
- Beim Mikroskopieren auf Zellvermehrung (Teilungsstadien) achten:



Massenvermehrung:

Hefezellen vermehren sich in sauerstoffreicher Umgebung ungeschlechtlich (vegetativ) durch Sprossung: Dabei bilden sie zunächst kleine Auswüchse die heranwachsen und sich dann als „Tochterzelle“ von der „Mutterzelle“ ablösen.

Hefe erzeugt Kohlenstoffdioxid

- Gärende, d.h. unter sauerstoffarmer Umgebung lebende Hefezellen unter das Mikroskop bringen (mit Deckglas!)
- Auf Luftblasen (Kohlenstoffdioxid) achten!

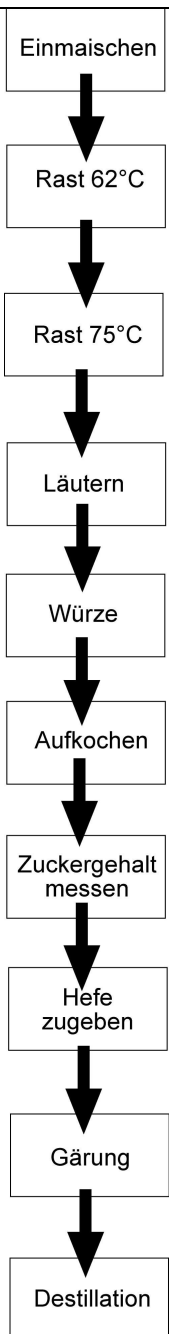
Beobachtungen:

- Kann man Hefezellen beim Atmen beobachten?
- Wie klein sind die kleinsten Luftblasen?
- Wie wird eine Luftblase „geboren“?



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

Stärkeverzuckerung, alkoholische Gärung und ► Destillation (1)



Alkohol „abfackeln“

„Bier“ brennt!

- „Bier“ in Rundkolben geben
- Glasrohr mit Stopfen auf Rundkolben setzen
- „Bier“ mit Heizgerät zum Sieden bringen
- Achte darauf, wie Ethanol bzw. Wasser kondensiert
- Ethanoldampf an der Mündung des Glasrohrs entzünden



INFO:

Ethanol siedet bei 79°C, Wasser bei 100°C. Daher siedet und verdampft zunächst der Alkohol und steigt in gasförmigem Zustand in das Glasrohr. Solange das Glasrohr noch kühl ist (< 79°C) kondensiert das Ethanol im Rohr und läuft zurück in den Rundkolben. Sobald die Temperatur des Glasrohrs 79°C übersteigt, kann der Alkohol nicht mehr kondensieren und tritt in Gasform aus dem Rohr. Dort kann er entzündet werden.

Rückschlagsicherung:

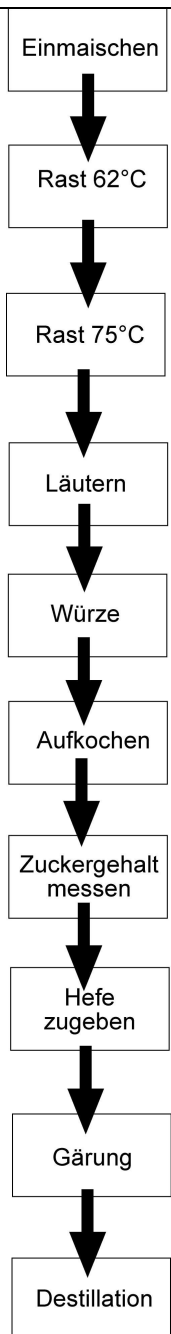
Die Eisenwolle nimmt durch Erwärmung einen Teil der Energie der Flamme auf, kühlt das nachfolgende Gas ab und verhindert dadurch ein Zurückschlagen der Flamme in den Kolben.

- Wie lange brennt die Flamme? _____ Sekunden
- Wodurch wird sie erstickt? _____



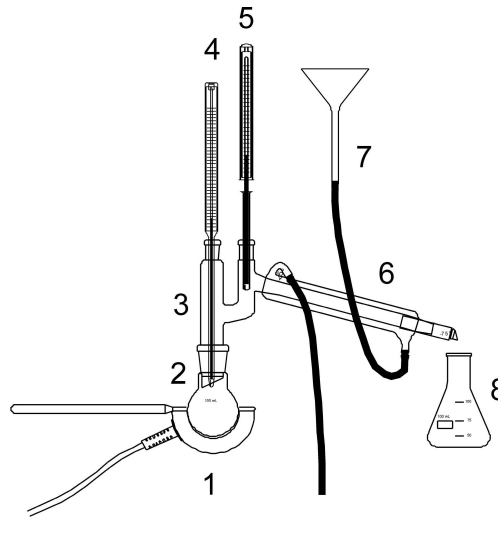
Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

Stärkeverzuckerung, alkoholische Gärung und ► Destillation (2)



„Schnaps brennen“

Destillationsgerät



- 1 Heizung
- 2 Rundkolben
- 3 Destillieraufsatz
- 4 Thermometer
- 5 Thermometer
- 6 Kühler
- 7 Kühlwasserzufluss
- 8 Vorlage (Destillat)

Destillieren

Ethanol siedet bei 78 °C, Wasser bei 100 °C.

Rundkolben zur Hälfte mit vergorenem Saft oder selbsterzeugtem „Bier“ füllen, Siedesteinchen hinzugeben, in Destillationsgerät einsetzen, Thermometer einbauen und Gärprodukt mit Heizhaube auf Temperatur > 78 °C und < 100 °C bringen. Entscheidend ist die Temperatur am Eingang in den Kühler. Der Kühler muss ständig mit kaltem Wasser gefüllt sein (ggf. über Trichter nachfüllen)

- Siedepunkt Ethanol: _____ °C
- Siedepunkt Methanol: _____ °C
- „Vorlauf“ und „Nachlauf“ nicht auffangen („verwerfen“)

Messung des Alkoholgehalts:

Dichte Wasser: 1,000 g / ml

Dichte Ethanol: 0,790 g / ml

Dichte des Destillat: _____ g / cm³



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

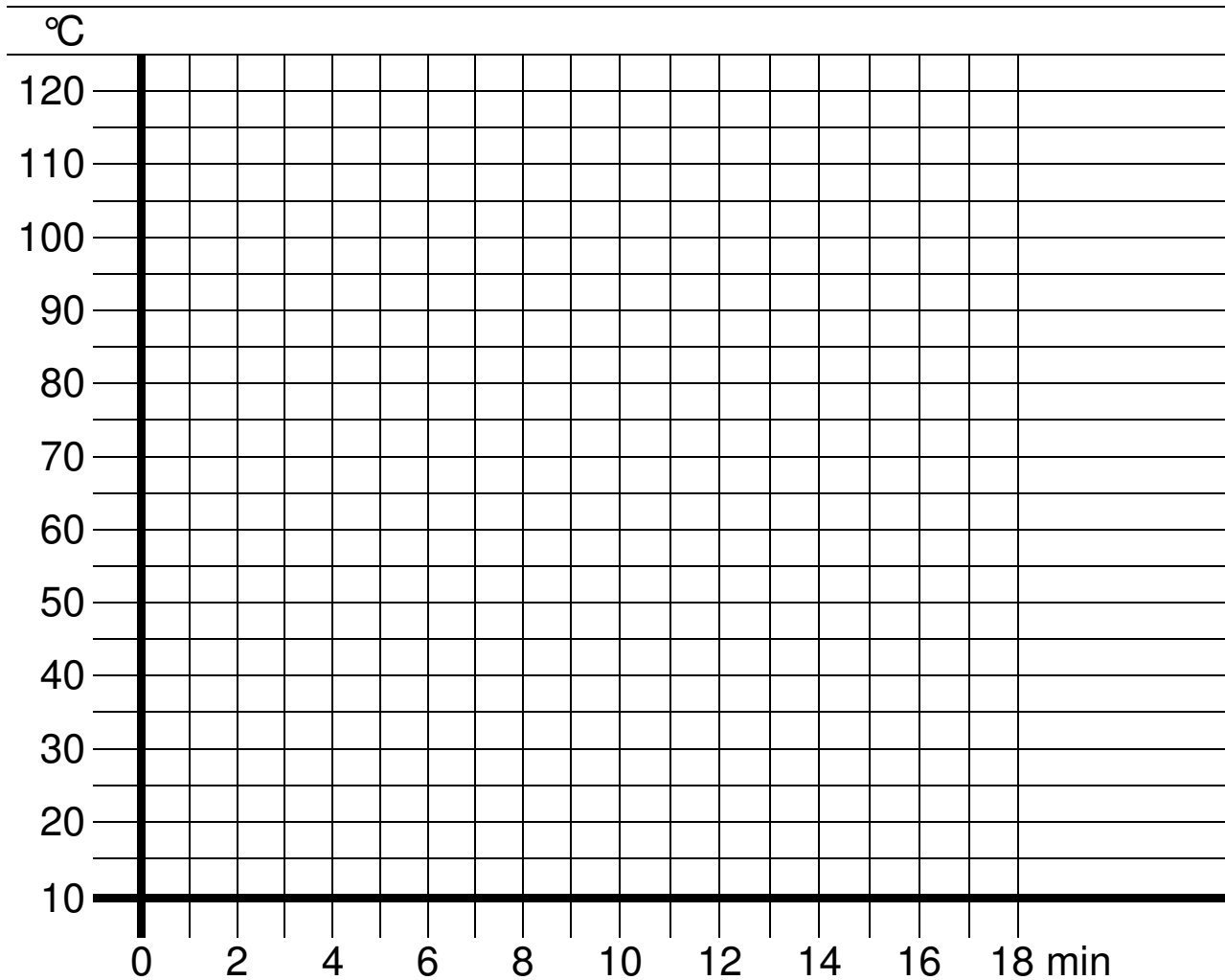
► Siedepunkte Wasser und Ethanol

Bestimmung der Siedepunkte von Ethanol und Wasser

Materialien

- Herdplatte, Kochtopf, Wasser
- Erlenmeyerkolben, Ethanol (Brennspiritus), Stativ
- 2 Thermometer und Uhr

- Gib etwas Ethanol in den Erlenmeyerkolben und erhitze es im Wasserbad
- Achte darauf, dass das Thermometer in das Ethanol taucht
- Notiere im Abstand von 1 min die Temperatur des Wassers und des Ethanols
- Übertrage die Werte in den Graphen (Benutze verschiedene Farben!)





Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

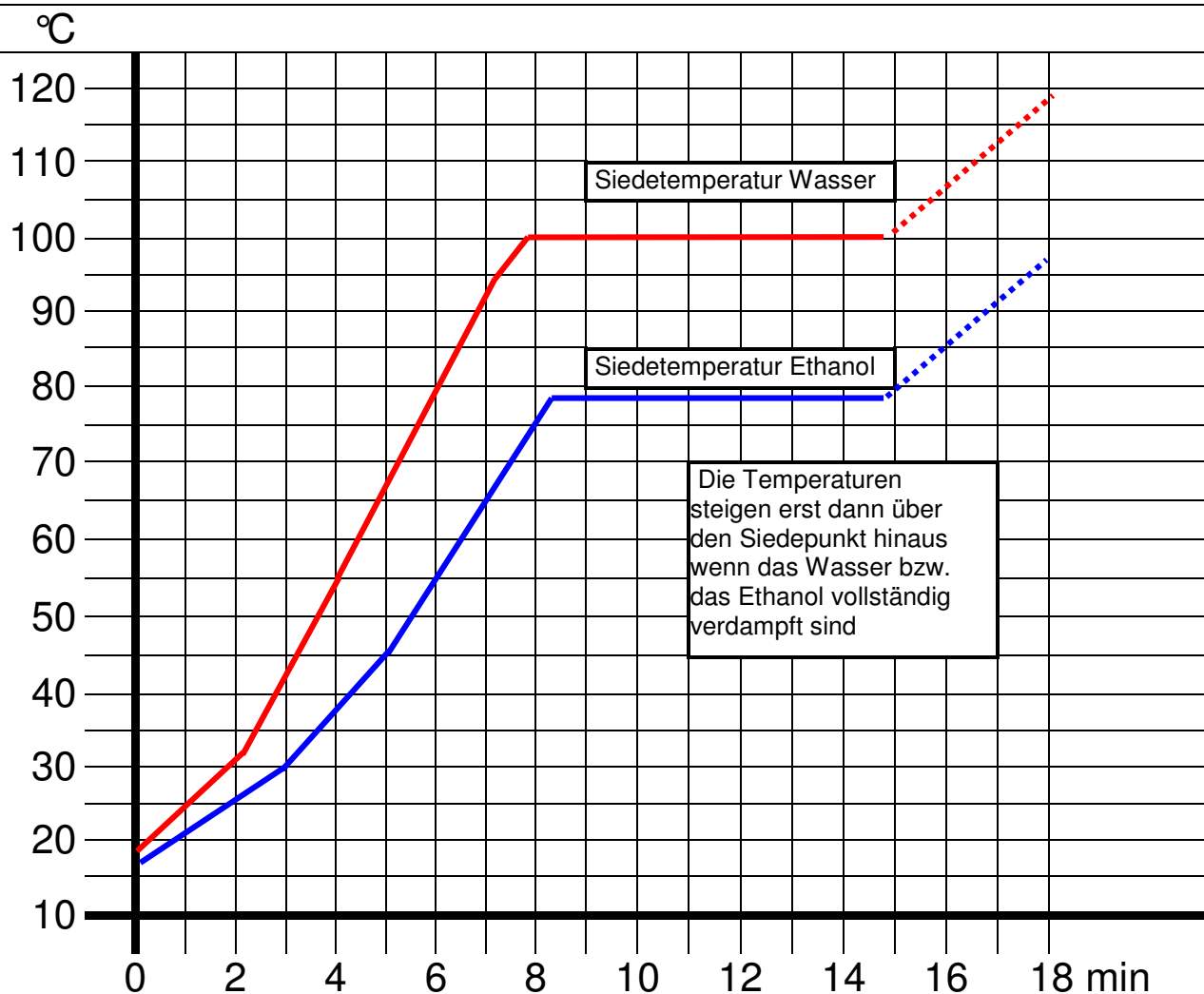
► Siedepunkte Wasser und Ethanol **LÖSUNG**

Bestimmung der Siedepunkte von Ethanol und Wasser

Materialien

- Herdplatte, Kochtopf, Wasser
- Erlenmeyerkolben, Ethanol (Brennspiritus), Stativ
- 2 Thermometer und Uhr

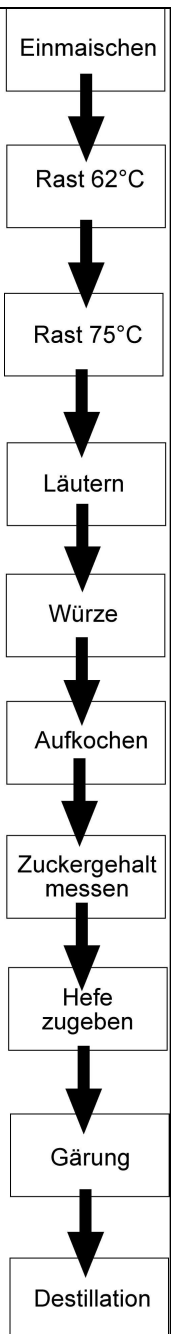
- Gib etwas Ethanol in den Erlenmeyerkolben und erhitze es im Wasserbad
- Achte darauf, dass das Thermometer in das Ethanol taucht
- Notiere im Abstand von 1 min die Temperatur des Wassers und des Ethanols
- Übertrage die Werte in den Graphen (Benutze verschiedene Farben!)





Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

Stärkeverzuckerung, alkoholische Gärung und ► Destillation



Alkoholgehalt des Destillats

Info:

Dichte Wasser: 1,00 g / ml

Dichte Ethanol: 0,79 g / ml

- Dichte des Destillats: _____ g / cm³

Messung des Alkoholgehalts (Näherung!)

- Aus Wasser und Brennspritus (Ethanol) Lösungen mit unterschiedlicher Konzentration herstellen
- Dichte durch Wägen feststellen (auf „Tara“ achten!)

• 10% Ethanol → _____ g / cm³

• 20% Ethanol → _____ g / cm³

• 30% Ethanol → _____ g / cm³

• 40% Ethanol → _____ g / cm³

• 50% Ethanol → _____ g / cm³

• 60% Ethanol → _____ g / cm³

• 70% Ethanol → _____ g / cm³

• 80% Ethanol → _____ g / cm³

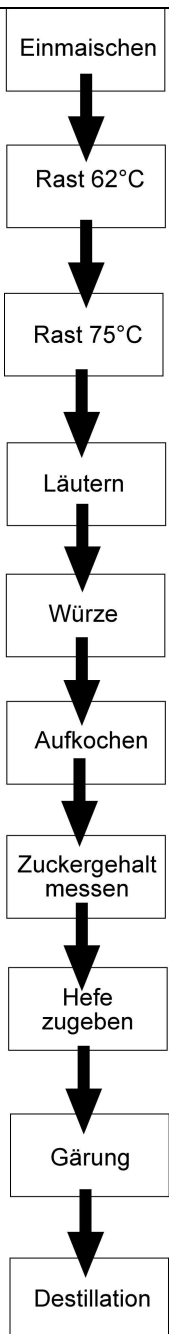
• 90% Ethanol → _____ g / cm³

Vermutlicher **Alkoholgehalt des Destillats:** _____%



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

Stärkeverzuckerung, alkoholische Gärung und ► Destillation **LÖSUNG**



Alkoholgehalt des Destillats

Info:

Dichte Wasser: 1,00 g / ml

Dichte Ethanol: 0,79 g / ml

- Dichte des Destillats: _____ g / cm³

Messung des Alkoholgehalts (Näherung!)

- Aus Wasser und Brennsprit (Ethanol) Lösungen mit unterschiedlicher Konzentration herstellen
- Dichte durch Wägen feststellen (auf „Tara“ achten!)
- 10% Ethanol → 0,99 g / cm³
- 20% Ethanol → 0,97 g / cm³
- 30% Ethanol → 0,96 g / cm³
- 40% Ethanol → 0,95 g / cm³
- 50% Ethanol → 0,93 g / cm³
- 60% Ethanol → 0,91 g / cm³
- 70% Ethanol → 0,89 g / cm³
- 80% Ethanol → 0,86 g / cm³
- 90% Ethanol → 0,83 g / cm³

Vermutlicher **Alkoholgehalt des Destillats:** _____ %



Vom Acker in den Tank (Bioethanol)

► Destillation : Dichte und Alkoholgehalt

Dichte und Alkoholgehalt des Destillats

Ethanol-Wasser-Gemische								
Dichte(20) [g/ml]	Gew%- Ethanol	Vol%- Ethanol	Dichte(20) [g/ml]	Gew%- Ethanol	Vol%- Ethanol	Dichte(20) [g/ml]	Gew%- Ethanol	Vol%- Ethanol
1,00000	0	0	0,94662	35	41,9	0,87158	69	76,0
0,99813	1	1,3	0,94473	36	43,0	0,86920	70	76,9
0,99629	2	2,5	0,94281	37	44,1	0,86680	71	77,8
0,99451	3	3,8	0,94086	38	45,2	0,86440	72	78,6
0,99279	4	5,0	0,93886	39	46,3	0,86200	73	79,5
0,99113	5	6,2	0,93684	40	47,4	0,85958	74	80,4
0,98955	6	7,5	0,93479	41	48,43	0,85716	75	81,2
0,98802	7	8,7	0,93272	42	49,51	0,85473	76	82,1
0,98653	8	10,0	0,93062	43	50,6	0,85230	77	83,0
0,98505	9	11,2	0,92849	44	51,6	0,84985	78	83,8
0,98361	10	12,4	0,92636	45	52,6	0,84740	79	84,6
0,98221	11	13,6	0,92421	46	53,7	0,84494	80	85,4
0,98084	12	14,8	0,92204	47	54,7	0,84245	81	86,2
0,97948	13	16,1	0,91986	48	55,8	0,83997	82	87,1
0,97816	14	17,3	0,91766	49	56,8	0,83747	83	87,9
0,97687	15	18,5	0,91546	50	57,8	0,83496	84	88,7
0,97560	16	19,7	0,91322	51	58,8	0,83242	85	89,5
0,97431	17	20,9	0,91097	52	59,8	0,82987	86	90,2
0,97301	18	22,1	0,90872	53	60,8	0,82729	87	91,0
0,97169	19	23,3	0,90645	54	61,8	0,82469	88	91,8
0,97036	20	24,5	0,90418	55	62,8	0,82207	89	92,5
0,96901	21	25,7	0,90191	56	63,8	0,81942	90	93,2
0,96763	22	26,9	0,89962	57	64,8	0,81674	91	94,0
0,96624	23	28,1	0,89733	58	65,8	0,81401	92	94,7
0,96483	24	29,2	0,89502	59	66,8	0,81127	93	95,4
0,96339	25	30,4	0,89271	60	67,7	0,80848	94	96,1
0,96190	26	31,6	0,8904	61	68,6	0,80567	95	96,7
0,96037	27	32,7	0,88807	62	69,6	0,8028	96	97,4
0,95880	28	33,9	0,88574	63	70,5	0,79988	97	98,1
0,95717	29	35,1	0,88339	64	71,5	0,79688	98	98,7
0,95551	30	36,2	0,88104	65	72,4	0,79383	99	99,3
0,95381	31	37,4	0,87869	66	73,3	0,79074	100	100,0
0,95207	32	38,5	0,87632	67	74,2			
0,95028	33	39,6	0,87396	68	75,1			
0,94847	34	40,7						