



Gäraktivität von Hefen

Welche Zuckerarten vergären sie?
Gärungsintensität: Wie rasch gären sie?

BrauLabor 23
Gäraktivität

Klassische
Versuche zur
Hefegärung

Aufwand: mittel	Material: mittel	Zeit: mittel	Experimenttyp: forschendes Experimentieren	Anspruch: gering
---------------------------	----------------------------	------------------------	--	----------------------------

Einführung

Bei den folgenden Versuchen geht es “nur” ums Kennen lernen einiger wichtiger Stoffwechseleigenschaften von Hefen und nicht um direkt beim Brauprozess verwendbare Techniken/Nachweisverfahren o.ä.

Die Fähigkeit der Hefen, verschiedene Zuckerarten zu Kohlenstoffdioxid CO_2 (“Kohlensäure”, Kohlendioxid) und Alkohol (Ethanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) umwandeln zu können, wird von den Menschen schon seit Jahrtausenden bei der Bier-, Wein-, Sekt- sowie Brotherstellung genutzt.

Zum Aufbau von Zellsubstanz (= **Anabolismus**, Baustoffwechsel) muss die Hefezelle Energie bereitzustellen, welche sie nur aus dem Abbau energiereicher hochmolekularer Nährstoffe gewinnen kann (= **Katabolismus**, Energiestoffwechsel/Betriebsstoffwechsel). Beim Abbau der hochmolekularen energiereichen Nährstoffe zu niedermolekularen energieärmeren Stoffen (= **Dissimilation**), nutzbar für Bau- und Energiestoffwechsel) wird Energie freigesetzt, die in Form der universellen biologischen Energie (“biologisches Benzin”) **ATP** (Adenosin**tr**iphosphat) kurzfristig gespeichert werden kann. Hefen zeichnen sich dadurch aus, dass sie über zwei Formen von Dissimilation verfügen: 1. mit Sauerstoff O_2 , also aerob, Prozess = Atmung; 2. ohne Sauerstoff, also anaerob, Prozess = Gärung. Unter aeroben Bedingungen produzieren Hefen aus unterschiedlichen Zuckerarten wie dem Einfachzucker Traubenzucker (Glukose) oder dem Zweifachzucker Haushaltszucker (Saccharose = Glukose-Fruktose) Kohlenstoffdioxid CO_2 und Wasser H_2O sowie 38 ATP. Unter anaeroben Bedingungen setzen sie den Zucker zu CO_2 und Alkohol $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ sowie 2 ATP um.

Gärung = anaerober Zucker-Stoffwechsel der Hefe

Es gibt verschiedene Gärungstypen, wobei die Umsetzung verschiedener Zuckerarten in CO_2 und verschiedene Produkte wie Alkohol, Buttersäure oder Essigsäure erfolgen kann. Die alkoholische Gärung kann wie folgt vereinfacht dargestellt werden:

Traubenzucker (Glukose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) $\xrightarrow{\text{Hefe}}$ Ethanol ($2 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) + Kohlenstoffdioxid (2CO_2) + Energie (2 ATP).

Der Alkohol ist noch sehr energiereich, kann aber von Hefezellen nicht weiter genutzt werden und wird daher ausgeschieden. Aerob kommen sie auf 19x mehr Energieeinheiten, also 38 ATP, aerob nur auf 2 ATP; daher müssen sie anaerob sehr viel mehr Glukose umsetzen, um ihren Energiebedarf zu decken. Der produzierte Alkohol ist aber auch für Hefen sehr giftig und spätestens ab 16% tödlich

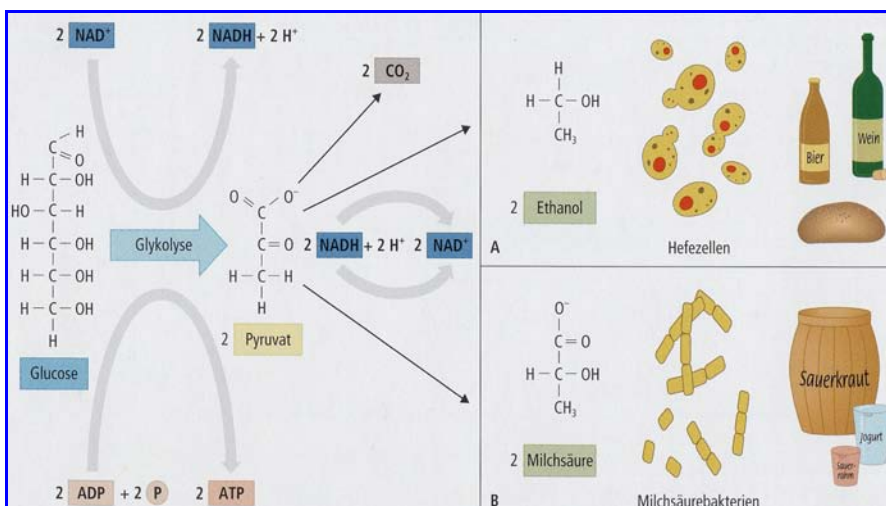


Abb. 1. Gärungen [Quelle: Jaenicke, 2004]

Es gibt verschiedene Gärungen. A: alkoholische Gärung, B: Milchsäuregärung. Ausgangsstoff C_6 -Traubenzucker (Glukose) wird im Stoffwechselweg der Glykolyse abgebaut zu 2 C_3 -Körper (= Pyruvat). Dabei werden 2 Energieeinheiten (= 2ATP) gewonnen sowie **Wasserstoff** auf einen H-Träger (= NAD^+) zwischengespeichert (= $\text{NADH}/2\text{H}^+$). **Alkoholische Gärung:** aus C_3 -Pyruvat unter CO_2 -Abspaltung und 2 $\text{NADH}/2\text{H}^+$ -Verbrauch bildet sich Alkohol (Ethanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). **Milchsäuregärung:** unter $\text{NADH}/2\text{H}^+$ -Verbrauch entsteht der C_3 -Körper Milchsäure $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$.

Daher stoppt der Gärungsvorgang von selbst, auch wenn noch vergärbare Zucker vorhanden sind!



Bei den folgenden Versuchen geht es um 1. den qualitativen Nachweis der Vergärbarkeit von unterschiedlichen Zuckern [S. 2-6], 2. den quantitativen Nachweis der Vergärbarkeit von Zuckern, also um die Gärintensität (Geschwindigkeit/Gärverlauf und Produktmengen [S. 7-10]).



Kernwissen für Braupraxis: Grundlagen zur alkoholische Gärung

Hefezellen können mit Sauerstoff aerob und ohne Sauerstoff anaerob Energie gewinnen, wobei die alkoholische Gärung aus dem Zuckerabbau nur wenige biologische Energieeinheiten (= 2 ATP) sowie die Abfallprodukte Kohlenstoffdioxid CO_2 und Ethanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ produzieren kann. Die ausgeschiedenen Stoffe sind für den Menschen interessant (\rightarrow Rezenz des Bieres, Alkohol), aber eigentlich auch die Hefebiomasse (Geläger nach Hauptgärung, Hefe-Ernte für \rightarrow kurzfristig: erneute Anstellhefe, längerfristig: Lagern der Hefe z.B. in isotonischer Kochsalzlösung für spätere Wiederverwertung).



Mit diesen grundlegenden einfachen Versuchen soll auch der Heimbrauer einen Einblick in den Stoffwechsel von Hefen bekommen. Dazu ist die qualitative Fragestellung, also die Frage nach den geeigneten Gärzuckern ("Was sind vergärbare Zuckerarten?") und die quantitative Fragestellung nach der Dynamik (Geschwindigkeit, Gärverlauf, Produktionsmenge am Bsp. CO_2) in einfachen Versuchsanordnungen geeignet.

Materialien

Glaswaren/Geräte/ andere Materialien	Gärgefässe: z.B. n+2 33-cL-Bierflaschen oder n+2 kleine 200 mL Erlenmeyerkolben [EMK] (n = Anzahl zu vergärender Zuckerarten), Waage, Spatellöffel oder Teelöffel, Gärröhrchen (Gärungssaccharometer) nach Einhorn: Abb. 18 (Info), Timer, evtl. Wärmeschrank (oder Wasserbad, Thermometer 0-50 °C, bzw. Backofen), Kühlschrank, Auffanggefäß für Gärröhrchen (z.B. kleine Plastikwanne, Tablett, grosse Glaspetrischale). Glasgefässe für 2. quantitativen Versuch: Reagenzgläser oder kleine Bechergläser/Glasgefässe wie kleine Konfitürengläser oder auch Plastikbecherchen, Messzylinder (geeignet für 10, 25 und 100 mL)
Verbrauchsmaterial	wasserfester Faserschreiber, Trichter, kleine farbige Luftballons
Chemikalien	verschiedene Zuckerarten: Haushaltszucker (Saccharose), Traubenzucker (Glukose), Fruchtzucker (Fruktose), Malzzucker (Maltose), Milchzucker (Laktose), Leitungswasser, eiskaltes Wasser (Wasser im Kühlschrank, oder Eiswasser)
Biologische Objekte	Bäckerhefe (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>) als Frischhefewürfel [FH], n Trockenhefebeutel* [TH] (n = je nach Anzahl untersuchter Zuckerarten), oder irgend eine Bierhefe sofern genügend Biomasse vorhanden (ebenfalls <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , aber andere Stämme), vgl. Abb. 3. *: Hefebeutel enthalten je nach Hersteller 7 - 9 g Trockenhefe TH, wobei 7 g TH ca. 21 g Frischhefe entsprechen

Durchführung

Versuchsansatz I: Qualitativ - Welche Zuckerarten kann die Hefe nutzen?

Wichtig: Je nach Anzahl der verfügbaren Zuckerarten die Anzahl der 33cL-Bierflaschen als Versuchsgefässe festlegen. Bei weniger Zuckerarten als vorgeschlagen nur die entsprechende Anzahl Bierflaschen bereit stellen.

Minimalvorschlag: 1 Traubenzucker, 2 Haushaltszucker, 3 Stärke sowie 4 Kälteansatz.



Die möglichen Versuchsansätze (cf. Abb. 2) mit 5 Zuckerarten sind in Abb. 4 und Tab. I zusammen gestellt.

Stärke ist auch eine Art Zucker, nämlich ein Vielfachzucker (= Polysaccharid), bestehend aus linearen (Amylose, 1'000 - 4'500 Glucosemoleküle) und verzweigten Glukose-Einheiten (Amylopektin, ca. 50'000-110'000 Glukose-Moleküle).

Abb. 2. Versuchsansatz Vergärbarkeit von Zucker.

Material: Hefe (Trockenhefe oder Frischhefe, cf. Abb. 3), Zucker, Löffel/Spatel, Bierflasche, Trichter, Messzylinder, Luftballon.



Abb. 3. Hefeformen. Backhefen gibt es als **Trockenhefen (TH)** in Beuteln zu meist 7g oder 9 g oder als **Frischhefen (FH)** in Würfel-form. 7 g Trockenhefen entsprechen ca. 21 g Frischhefen, 1 Hefewürfel also 2 Trockenhefebeutel.



Abb. 4. Versuchsansätze zur Vergärbarkeit von verschiedenen Zuckerarten
Materialien: pro Zuckerart 1 Bierflasche und 1 Luftballon, (nicht abgebildet: Kontrollansatz Hefe ohne Zucker, Kälteansatz) 1 Trockenhefebeutel pro Versuchsansatz, 5 Zuckerarten: Saccharose, Glukose, Fruktose, Maltose, Stärke.

Gäransatz	1 Traubenzucker 20 °C	2 Traubenzucker* 0 °C oder 4 °C	3 Haushaltszucker 20 °C	4 Fruchtzucker 20 °C	5 Malzzucker 20 °C	6 Stärke 20 °C	7 Kontrollansatz (ohne Zucker)
Leitungswasser	100 mL	100 mL*	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL
1, 2: Glukose	2.5g	2.5g	--	--	--	2 mL*	--
3: Saccharose	--	--	2.5g	--	--	--	--
4: Fruktose	--	--	--	2.5g	--	--	--
5: Maltose	--	--	--	--	2.5g	--	--
6: Stärke	--	--	--	--	--	2.5g	--
1-7: Hefe	TH bzw. 20g FH	TH bzw. 20g FH	TH bzw. 20g FH	TH bzw. 20g FH	TH bzw. 20g FH	TH bzw. 20g FH	TH bzw. 20g FH

Tab. 1. Gäransätze mit verschiedenen Zuckerarten sowie Kälte- und Kontrollansatz. Laktoseansatz separat durchgeführt (cf. Abb. 10).
*: Kälteansatz mit Eiswasser ansetzen, Inkubation anschließend im Eisbad (= 0 °C) oder im Kühlschrank (= 4 °C).

Versuchsdurchführung “Vergärbarkeit von unterschiedlichen Zuckern”:

I. Zuckerzugabe:

In jeden Behälter der verschiedenen Gäransätze inkl. Kontrolle werden 2.5 g der jeweiligen Zuckerart mit Hilfe eines Trichters zugefügt (cf. Abb. 2)



2. Hefedosierung:

TH: In die entsprechende Anzahl 33 cL-Bierflaschen/EMK je einen Trockenhefebeutel (i.d.R. 7 g) mit Hilfe eines Trichters einfüllen

FH: jeweils genau die Hälfte eines Hefewürfels (i.d.R. 21 g) in die 33 cL-Bierflaschen/EMK einbringen

3. Wasserzugabe:

- jeweils 100 mL Wasser, im Idealfall ca. 35 °C warm mit 100-mL-Messzylinder abmessen und in die Gärgefäße einschütten
- Hefen im warmen Wasser zunächst ca. 5 min stehen lassen und dann durch Schütteln sanft aufrühren, bis eine homogene Hefesuspension entsteht

4. Gäransätze starten und Bebrütung:

- über die Mündung eines jeden mit einer Nummer (entsprechend der Tab. 1) oder mit "Namensschildchen" bezeichneten Gäransatzes (Bierflasche oder Erlenmeyerkolben) wird ein vollständig entleerter Luftballon gestreift
- der Kälteversuch kann in einem Eisbad oder auch im Kühlschrank durchgeführt werden
- mit einem Timer die Zeit registrieren (z.B. 5 min, 15 min, 30 min, 60 min - Dauer je nach Umgebungstemperatur)
Modifikation des Versuchsansatzes: in einem warmen Wasserbad (z.B. 35-40 °C) können konstantere Umgebungsbedingungen und raschere Gärgeschwindigkeiten erzielt werden: cf. Abb. 5.

5. Beobachtungen:

- in definierten Zeitintervallen (z.B. 5 min, 15 min, 30 min, 60 min) die Luftballone vergleichend beobachten und festhalten, z.B.
 - ▶ fotografisch (vgl. Abb. 4)
 - ▶ ungefähre Ballondurchmesser
 - ▶ in Worten (erstes Anzeichen einer Gasbildung, schwach gebläht, stark gebläht [oder mit +-Zeichen: +/ ++/ +++])

6. Auswertung:

- Zuckerarten: Welcher Zucker kann von Backhefen vergärt werden?
- Kontrollansatz: Wieso braucht es einen Kontrollansatz ohne Zucker (bzw. Gärsubstrat)?
- Temperatureinfluss: Was zeigt der Kälteansatz?



Hinweise zur Erklärung der beobachtbaren Verstoffwechslung verschiedener Kohlenhydrate (Einfachzucker, Doppelzucker, Vielfachzucker)

- ▶ Einfachzucker (Monosaccharide) sind: Glukose [Glu], Fruktose [Fru]
- ▶ Doppelzucker (Disaccharide) sind: Saccharose (= Glu-Fru), Maltose (= Glu-Glu), Laktose (Milchzucker = Galaktose [Gal] [Schleimzucker] + Glukose [Glu])
- ▶ Polysaccharide (Vielfachzucker) sind: Stärke (= Glu-Glu-Glu- - -1000-4500 - - - | -- | -50'000-110'000 --| - Glu; aus **Amylose** [Stärkemehl, wasserlöslich, lange Glukoseketten mit spiraliger Struktur, ca. 20-30% der pflanzlichen Stärke] und [**Amylopektin**, wasserunlöslich, ca. 70-89%, dank Seitenketten bäumchenartige Struktur]
- ▶ Verstoffwechslung der Kohlenhydrate im anaeroben Zucker-Stoffwechsel der Hefe (= alkoholische Gärung):
Einfachzucker können direkt in den Stoffwechsel des Zuckerabbaus (Glukoseabbau = Glykolyse) und der anschließenden eigentlichen aeroben Gärstoffwechselwegen eingeschleust werden → rasche Verstoffwechslung, messbar z.B. an der CO₂-Produktion (cf. Abb. 1)

Doppelzucker müssen zunächst mit Hilfe spezifischer Enzyme in die Einfachzucker gespalten werden, z.B. Saccharose in Glukose und Fruktose mittels dem Enzym Saccharase (syn. Invertase [[Info 1](#), [Info 2](#)]). Laktose könnte durch das Enzym Lactase in seine beiden Zuckereinheiten Gal und Glu gespalten werden, allerdings fehlt dieses Enzym den Back- bzw. Bierhefen *Saccharomyces cerevisiae* (cf. Abb. 10).

Die Hefe kann also nur gewisse Doppelzucker abbauen, z.B. den Haushaltszucker und die Maltose (Malzzucker).

Vielfachzucker kann die Hefe nicht enzymatisch in die Doppel- und Einfachzuckereinheiten der Maltose und Glukose abbauen: dazu braucht es eben die Enzyme des Gerstenmalzes, die **Amylasen!**

Stärke ist einer der wichtigsten Reservestoffe in pflanzlichen Zellen und wird vor allem aus Kartoffeln, Getreide und Mais gewonnen. Sowohl im Mais- und Getreidekorn sind in der die Stärkespeicher (= Endosperm) umhüllenden Schicht (= Perikarp) stärkespaltende Amylasen zu finden (cf. Abb. S. 11, Fig. 1 [hier](#)). In Getreidemehl oder im Stärkeprodukt Maizena (Maismehl) ist also immer auch zwangsläufig eine "Verunreinigung" an Amylasen zu finden. Diese relativ geringen Enzymmengen spalten also unter geeigneten Bedingungen ebenfalls Stärke in vergärbare Zuckereinheiten, aber natürlich viel langsamer als bei der Keimung der Pflanzen, die dann rasch und viel Zucker für den Aufbau des Pflanzenkörpers sowie den dazu notwendigen Energiestoffwechsel brauchen.

- **Temperatur:** hat einen entscheidenden Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeiten chemischer Reaktionen, so auch auf den Stoffwechsel als Kette von hinter einander geschalteten biochemischen Reaktionen - die Enzyme sind die temperaturabhängigen Katalysatoren!



Abb. 5. Hefegärung nach 5 min (30 °C im Wasserbad).

CO₂-Produktion bei der alkoholischen Gärung (= anaerober Zucker-Stoffwechsel der Hefe) wird im Füllgrad von Luftballons sichtbar gemacht. Gärintensität: Fruktose > Glukose > Saccharose.



Abb. 6. Hefegärung nach 10 min (30 °C im Wasserbad).

CO₂-Produktion: Fruktose > Glukose > Saccharose > Maltose.

Fruktose wird am raschesten verstoffwechselt, bei Maisstärke keine Reaktion sichtbar, Kontrolle ebenfalls keine Reaktion.





Abb. 7. Hefegärung nach 15 min (30 °C im Wasserbad).

Deutlich wird erkennbar, dass die Gärung mit den Einfachzuckern Fruktose und Glukose am raschesten abläuft, bei den Doppelzuckern Maltose [Glu-Glu] aber deutlich rascher verstoffwechselt wird als Saccharose [Fru-Glu].



Abb. 8. Hefegärung nach 60 min (30 °C im Wasserbad).

Nach längerer Inkubationsdauer wird auch bei **Maisstärke** eine schwache CO₂-Produktion sichtbar: stärkeabbauende Maisamylasen haben für die Hefe vergärbare Zuckereinheiten (Maltosen u.a.) bereit gestellt (cf. auch "Hinweise zur Interpretation > Stärke").

Kontrollansatz: zeigt deutlich, dass 1. zur Gärung Zuckersubstrate notwendig sind (ohne Zucker keine CO₂-Bildung), 2. dass offenbar kaum Zuckerspeicher in der Hefe vorhanden sind, die mobilisiert werden können.



Abb.10. Hefegärung: Laktoseansatz (30 °C) und Glukose-Kälteansatz. Nach 60 min zeigen beide Ansätze keine CO₂-Gasbildung, d.h. Gärung hat nicht stattgefunden.



Abb. 9. Hefegärung, Kälteansatz (Eiswasser). Nach 30 min: keine Anzeichen einer CO₂-Bildung.

Versuchsansatz 2: Quantitativ - Wie rasch erfolgt die Hefegärung und welche CO₂-Volumenmengen werden produziert?



Während im qualitativen Versuchsansatz I die Frage nach der Vergärbarkeit unterschiedlicher Zuckerarten im Mittelpunkt stand, geht es beim quantitativen Versuchsansatz um die Frage nach Gärgeschwindigkeit bzw. Produktmengen pro Zeiteinheit und das möglichst visuell. Diese Fragestellung kann mit dem klassischen Gärröhrchen nach Einhorn (Abb. 11) anschaulich beantwortet werden.

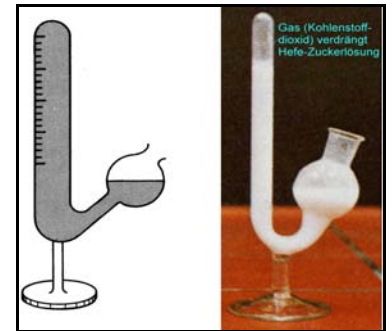


Abb. 11: Gärröhrchen nach Einhorn.

Das durch den Gärprozess entstehende Kohlenstoffdioxid CO₂ verdrängt die Hefe-Zuckerlösung und kann dadurch sichtbar gemacht und volumetrisch bestimmt werden.

1. Zuckerlösungen vorbereiten: Abb. 12

In die je nach Anzahl zu untersuchender Zuckerarten (= n) entsprechende Anzahl Reagenzgläser oder kleine Bechergläser bzw. Glasgefäße löst man jeweils 2 g der Zuckerart in 10 mL Wasser (cf. Tab. 2)

2. Hefesuspension ansetzen

Ca. 6 g Frischhefe oder 2 g Trockenhefen in 25 mL warmes Leitungswasser einbringen, ca. 5 min warten und dann sanft durchmischen

3. Gäransätze:

In n nummerierte Gefäße pipettiert man die auf die nachherige Versuchstemperatur gebrachten Lösungen (cf. Abb. 13) nach folgendem Schema (Tab. 2):

Gäransatz	1 Glukose [G]	2 Saccharose [S]	3 Zucker nach Wahl, z.B. Fruktose [F]	4 Kälteansatz mit Glukose
Leitungswasser	10 mL	10 mL	10 mL	12 mL
Glukoselösung	2 ml	--	--	2 mL*
Saccharoselösung	--	2 mL	--	--
Zuckerart X	--	--	2 mL	--
Hefesuspension	5 mL	5 mL	5 mL	5 mL

Tab. 2. Mögliche Versuchsansätze zur quantitativen Abschätzung der alkoholischen Hefegärung

*eiskaltes Wasser für den Kälteansatz



Abb. 12. Material für quantitative Gärversuche.

Becherglas (BG) mit Leitungswasser, Thermometer, BG mit Zuckerlösung, Hefesuspension, Gärröhrchen, Messzylinder und/ oder Messpipette.



Abb. 13. Konditionierung an die Versuchsbedingungen.

Sämtliche Lösungen (Hefesuspension, Fruktose [F]- und Glukose- [L]-Lösungen) in ein "Wasserbad" mit leicht über der im jeweiligen Versuchsansatz liegenden Gärtemperatur (z.B. 30 °C) äquilibrieren lassen.

4. Gähröhrchen beschicken: Abb. 14

Die Hefe-Zuckersuspensionen der verschiedenen Ansätze pipettiert man unter Schrägstellen des Gähröhrchens so in den offenen kugeligen Schenkel ein, dass der Messschenkel mit der 0.2-mL-Volumenskala luftblasenfrei und vollständig mit der Hefesuspension gefüllt ist



5. Bebrütung: Abb. 15

- Die Versuchsansätze werden - bei längerer Versuchsdauer - anschliessend in einem Auffanggefäss (z.B. Kunststoffwanne, cf. Abb. 16) in einen Wärmeschrank (bzw. Backofen/ über der Heizung/ ohne Wanne beschwert in einem Wasserbad) bei 35 °C oder einfach in warmer Zimmertemperatur hingestellt, Temperatur messen
- Kälteansatz: in einen Kühltank oder in Eiswasser stellen, Temperatur messen



Abb. 14. Einfüllen der Hefe-Zuckerlösung in das Gähröhrchen nach Einhorn.

Die Versuchslösung wird zunächst in den Bauchteil des offenen Schenkels eingefüllt, dann wird das Gähröhrchen nach links gekippt und der geschlossene Schenkel **vollständig** gefüllt.

6. Beobachtungen:

Je nach Ansatz werden die Gähröhrchen periodisch (z.B. je nach Zuckerart und Temperatur alle 5 oder alle 10 min) kontrolliert:

- Bei welchem Zucker bilden sich ab welchem Zeitpunkt erste Gasbläschen?
- Wieviel Gas hat sich absolut und pro Zeitabschnitt gebildet?



Abb. 15. Bebrütung zweier Gäransätze im Brutschrank.

Das Glukose [G]- und das Fruktose [F]-Gähröhrchen werden im Minibrutschrank (oder einer entsprechenden warmen Umgebung) bei der gewünschten Gärtemperatur gehalten und nach bestimmten Zeitabständen (z.B. 5, 10, 15, 30 min) wird das produzierte CO₂- Gasvolumen protokolliert.



Abb. 16. Auffangwanne bei längerer Versuchsdauer.

Das bei der Gärung entstehende CO₂ verdrängt im geschlossenen Schenkel die Hefe-Zuckersuspension und wird von der Wanne aufgefangen.



Abb. 17. Fast am Ende des Gärversuches mit Glukose [G] und Fruktose [F] nach 28 min bei 30 °C bei fast identischen CO₂-Volumina (G: 8.3 mL, F 6.9 mL)

Bsp. Resultate [30 °C, Zuckerarten: Glukose und Fruktose]:

5 min:	G wenige Gasbläschen	F kaum Gasbläschen
10 min:	G 0.8 mL	F 0.5 mL
15 min:	G 3.0 mL	F 1.8 mL
20 min:	G 5.0 mL	F 3.6 mL
25 min:	G 6.8 mL	F 5.8 mL
30 min:	G 8.8 mL	F 8.2 mL

Nach anfänglich langsamem Start holt die F-Gärung rasch auf und holt die Glukose-Gärung volumenmässig ein.

7. Auswertung:

- grafische bzw. tabellarische Darstellung der Gasproduktion der verschiedenen Ansätze
- Interpretation der unterschiedlichen Versuchsansätze: 1 Zuckerarten, 2 Gärintensität als mL/Zeiteinheit, 3 Temperatureinfluss
- Warum muss eine gärende Zelle, um zu gleich viel Energie wie eine atmende Zelle zu kommen, einen viel schnelleren Stoffwechsel betreiben?
- Warum vermehren sich Hefezellen praktisch nur unter aeroben Bedingungen, also mit O₂-Belüftung?
- Wieso muss man nach dem Sud die Anstellwürze belüften, währenddem später in der Gärphase oder Abfüllphase/ Nachgärung der Luftsauerstoff sogar verpönt ist?

**Schlussfolgerungen aus Gärversuchen mit Bezug zum Bierbrauen:**

1. **Vergärung Einfachzucker:** Glukose und Fruktose werden rasch vergärt,
2. **Vergärung Doppelzucker:** Neben Maltose, das im Maischeprozess hauptsächlich anfällt, wird auch der Haushaltszucker und andere Saccharose-Zuckersorten wie Rohrzucker, Kandiszucker u.ä. z.B. für die Nachgärung in Flaschen problemlos vergärt.
Reihenfolge Gärgeschwindigkeit (vereinfacht): Glukose > Maltose > Saccharose > Fruktose.
3. **Vielfachzucker:** Stärke als Vielfachzucker kann von der Hefe nicht genutzt werden, dazu braucht es die in der Maische primär aus dem Gerstenmalz aktivierten Enzyme (Amylasen). Die wenigen stärke-spaltenden Amylase-Enzyme in den Stärkeprodukten wie Getreidemehl, Maismehl, Kastanienmehl u.ä. alleine sind zu langsam, um in vernünftiger Zeit vergärbare Zuckermengen aus der Stärke abzuspalten.
4. **Temperatur:** Die Temperatur ist ganz kritisch für die Enzymaktivierung und vor allem für eine adäquate Reaktionsgeschwindigkeit der Enzyme. Die Richtlinien für Maischetemperaturen und Zeitdauer der verschiedenen Phasen müssen daher beachtet werden (cf. auch [Info](#)).

Anmerkungen zu den verschiedenen Vergärungsgeschwindigkeiten Glukose vs. Fruktose**Mögliche Erklärungen:**

1. **Transportmechanismus:** Glukose und Fruktose müssen zunächst aus dem Umgebungsmedium in die Hefezelle aufgenommen werden, was durch das gleiche Membrantransportsystem (Glukose-Fruktose-Carrier) erfolgt. Die Bevorzugung von Glukose ist durch eine kompetitive Hemmung des Zuckercarriers seitens der Glukose über die Fruktose-Aufnahme erklärbar.
2. **Glukose-Abbau via Glykolyse bis zum C3-Pyruvat** braucht 10 Abbauschritte (= 10 Enzyme), ab Fruktose nur 8 Abbauschritte. Da Hefen aber aufgrund der Anzuchtmedien meist "**glucophil**" sind, sind die "Startenzymmengen" auf Glukose adaptiert. Wenn aber nur Fruktose angeboten wird, muss zunächst der Enzymset auf Fruktose adaptiert werden.
Beispiel/Auswirkung: bei der alkoholischen Gärung von Traubenmost/Wein, der Glucose und Fructose in gleichen Teilen enthält, wird bevorzugt die Glucose abgebaut. Eine Restsüße entsteht, weil nicht aller Zucker zu Alkohol abgebaut worden ist, und der Grossteil des verbliebenen Zuckers ist Fruktose.

Anhang: Gefäße für qualitative und quantitative Gärversuche



Abb. 18. Versuchsgefäße für allgemeine Gärversuche.

Qualitative Versuche: Gefäße mit einem Volumen von 200 bis 500 mL und einer Öffnung, über die ein Luftballon gestülpt werden kann, z.B. 33 cL-Bierflasche, Erlenmeyerkolben.

Quantitative Versuche: Gärröhrchen (Gärsaccharimeter) nach Einhorn, Volumenskala 0-8.0 mL, 0.2 mL genau (cf. Einschub Schenkelbild); Reagenzglas mit durchbohrtem Gummistopfen und Glasröhrchen, z.B. mit selbstgefertigter 2.0 mL-Eichung (aus 5mL oder 10-mL-Messzylinder jeweils 1.0 oder 2.0 mL Wasser ins RG giessen mit wasserfestem Faserschreiber markieren).