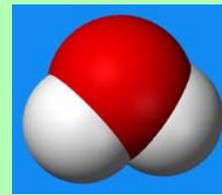




Bestimmung des gelösten Sauerstoffs

DO Dissolved Oxygen - gelöster Sauerstoff O₂

LODO Low Dissolved Oxygen Brewing



BrauLabor 10
Physik/Chemie

Sauerstoff_{gel}
wichtig für
Hefevermehrung
bei Gärbeginn

Aufwand: mittel	Material: mittel-hoch	Zeit: gering	Experimenttyp: Auswertung von Messungen	Anspruch: mittel
---------------------------	---------------------------------	------------------------	---------------------------------------------------	----------------------------

Einführung

Sauerstoff hat im gesamten Brauwesen ein Janusgesicht: Luftsauerstoff wird sowohl bei der Keimung im Mälzprozess wie auch bei der Hefeanzucht und Anstellung der Anstellwürze zur Hefevermehrung zwingend benötigt. Bei allen übrigen Phasen im Brauprozess wie Fermentationen, Abfüllung und Lagerung des Bieres bis zum Verkauf in Flaschen höchst unerwünscht.

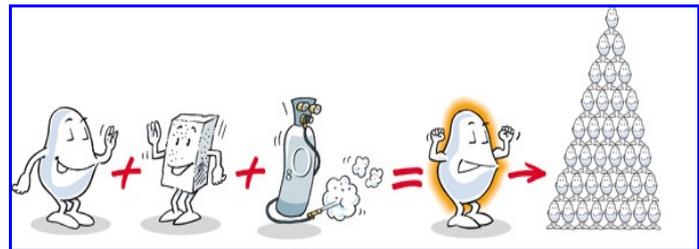


Abb. 1. "Janusgesicht" des Sauerstoffs im Brauwesen. [\[Quelle\]](#)

Höchst unerwünscht im Kontakt mit Bier und Bierinhaltsstoffen (Abb. 2), zwingend notwendig für Hefewachstum und Vermehrung beim Anstellen der Bierwürze (= aerober Stoffwechsel).

Wozu braucht es beim Brauen den "gefürchteten" Sauerstoff nicht?

"Infektionsgefahr" mit Sauerstoff (O₂-

Eintrag). Sauerstoff und die dadurch in Gang gesetzten Oxidationsvorgänge ist für die meisten Profibrauer höchst unerwünscht. Kontakt mit Sauerstoff O₂ aus der Luft (O₂-Gehalt 20.95 Vol.-%) kann überall der gesamten Braukette stattfinden, beim Sud, in die noch warme Bierwürze, bei der Fermentation, beim Abfüllen, im Kopfteil der Flasche und Flaschenhals und sogar während Lagerung in den Flaschen über den Kronkorken- oder Bügelverschluss.

Hauptursachen:

- ▶ warme/heisse Maische bis Abkühlung Anstellwürze (engl. "hot-side aeration" HSA: chemische Bindung des Luftsauerstoffs durch Oxidationsvorgänge, [Info](#)): zu starke Turbulenzen durch Rührung oder Plätschern der warmen* Maische, Langzeiteinwirkung (*: nahe dem Siedepunkt ist praktisch kein O₂ mehr in der Würze gelöst, dafür ist die Reaktionsgeschwindigkeit RG von Oxidationen sehr hoch: bei 80°C 3 mg O₂/L pro Stunde, bei 45 °C nur 1.2 mg O₂/L . h; bei tiefer Temperatur löst sich O₂ besser, dafür ist die RG langsam → die "Gefahrenzone" ist der heikle Temperaturbereich dazwischen, optimal um ca. 40-60 °C)
- ▶ kalte Würze (engl. "cold-side aeration" CSA: physikalische Bindung/Lösung des Luftsauerstoffs): wirksam ab etwa < 40 °C. In der ersten Phase, der Wachstums- und Vermehrungsphase der Hefen braucht es dringend Sauerstoff, aber ab der eigentlichen Fermentationsphase (Hauptgärung) ist Sauerstoff nachteilig. CSA bezieht sich auf die "O₂-Attacken" ab Beginn der Fermentationsphase auf Bierinhaltsstoffe (cf. Oxidationsmechanismen).
- ▶ Oxidationsmechanismen: das sind autooxidative Reaktionen gemäss der "Gleichung" Substanz S + O₂ → oxidierte Substanz
Beispiele:
 - Ethanol 2 CH₃CH₂OH (C₂H₅OH) + Sauerstoff O₂ (14'000 ppm) → Acetaldehyd 2 CH₃CHO (C₂H₄O) + 2 H₂O (25 ppm)
 - Aldehyde 2 RCHO + O₂ → Säuren 2 RCO₂H, Bsp. Acetaldehyd 2 CH₃CHO + O₂ (25 ppm) → Essigsäure 2 CH₃COOH (175 ppm)
 - Hopfenalphasäuren + O₂ (10 ppm) → Valeriansäure (Pentansäure) C₅H₁₀O₂ und Buttersäure (Butansäure) C₄H₈O₂ (1-2 ppm)
 - Hopfenöle + O₂ (10 ppm) → verschiedene O-tragende Verbindungen; oxidierte Hopfenkomponenten → "käsig" Geschmacksempfindungen
 - ungesättigte Fettsäuren aus Heisstrob + O₂ → Olein- und Linolsäure.
- ▶ Abfüllung: kritisch sind die O₂-Zumischungen beim Abfüllverfahren von Flaschen oder Kegs und den Restgaszonen in der Flasche (Kopfraum der Flasche, Flaschenhals: 1 mL Luft = 0.28 mg O₂/L)

Auswirkungen auf Geschmack/Geruch.

Die schädliche Einwirkung auf das Bier äussert sich u.a. als Fehl aroma und wird mit vielfältigen Begriffen umschrieben wie abgestandener fader Geschmack, lederig, **papierartig/pappig**, **feuchter Karton**, katzig, stachelbeerig, Sherry-artig, faulendes Gemüse, streng.

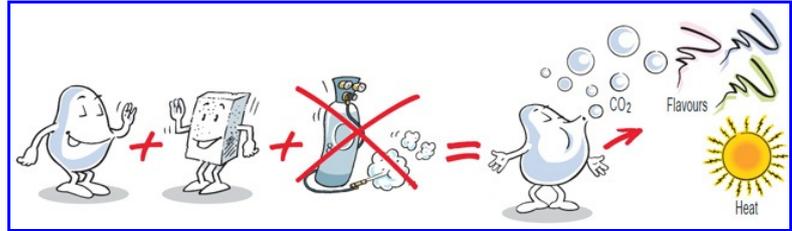


Abb. 2. Für den Gärstoffwechsel braucht die Hefe keinen Sauerstoff = anaerober Stoffwechsel. [Quelle]

Vermeidung von unerwünschtem Sauerstoff. wichtig

Entlang des gesamten Brauprozesses kann auch der Heimbrauer einen unnötigen O₂-Eintrag ins Biermedium und Folgeoxidationen vermeiden bzw. wenigstens reduzieren. Dazu gehören folgende Massnahmen:

Brauingredienzien:

- ▶ **Malzschrotung:** grob Schrotten, möglichst frisch geschrotetes Malzmaterial einsetzen, in geschlossenem Malzfass aufbewahren
- ▶ Brauwasser: evtl. Sulfatgehalt erhöhen durch Zugabe von Calciumsulfat (Braugips, CaSO₄) bis 150 mg/L für Lager (, bis 300 mg/L für Ales (obergärige Biere)
- ▶ **Aufbereitung Brauwasser:** kaltes Brauwasser kann gelösten Sauerstoff von 2 - 8 mg O₂/L* enthalten, während 5 Minuten abgekochtes und knapp unter Einmischtemperatur abgekühltes (und zugedecktes) Wasser für den unmittelbar folgenden Brauprozess verwenden (< 1 mg O₂/L). Sanft (= nicht plätschernd) einfüllen, z.B. mit Siphon (*: ergibt ca. 30 ppm O₂ pro kg Maischemalz
- ▶ Einsatz von viel Hopfen, dunklen Malzen und Caramalzen
- ▶ **Melanoidine** und **Polyphenole** entfalten reduzierende Eigenschaften und können so Oxidationsvorgänge in Würze und Bier einschränken → rezeptspezifische Erfahrungswerte bei Maische und Sud einhalten (pH-Werte, Temperaturen, Kochzeiten)

Brauprozess:

- ▶ "Low-Oxygen-Brewing" (LOB)-Systeme bzw. Braukomponenten für Maische- und Kühlprozesse einsetzen (z.B. Speidel Low-Oxygen-Brewing-Set: Schwimmdeckel als Abdeckung für Sudkessel, [Info](#))
- ▶ Malz einfüllen: vorsichtig einfüllen (z.B. Speidel Braumeister: mit umgekehrter Edelstahlhaube) und nur gering einrühren, starkes Schäumen vermeiden
- ▶ **Maische:** zu starke Durchmischung (mit Pumpen, Kochlöffel) mit Luftkontakt vermeiden, möglichst zugedeckt arbeiten (Braumeister: mit Schwimmdeckel und/oder Edelstahlhaube)
- ▶ Anschwänzen bzw. Nachgiessen*: nur mit abgekochtem, auf 78 °C abgekühltem zugedecktem Frischwasser (oder Anschwänzen gar weglassen) *Variante Braumeister: Treberschicht im Malzrohr mit CO₂ begasen und abdecken
- ▶ Abkühlen: möglichst rasch bis knapp über Anstelltemperatur abkühlen und dann in Hauptgärbehälter umfüllen (hier die Tipps bei "Umfüllvorgänge" nicht beachten, da die Anstellhefen O₂ benötigen!)
- ▶ Behälter: immer mit möglichst gefüllten Gärbehältern, Fässern und Flaschen arbeiten (keine Gasphasen mit Luft-O₂!)

Gärungen

- ▶ **Belüftung Anstellwürze:** Phase I-3 der Hauptgärung (cf. "Brauwasser" [hier](#) > "2.11. Kenngrösse 10 gelöster Sauerstoff" > Abb. 35) → hier braucht es zwingend Sauerstoff für Wachstum und Vermehrung der Anstellhefen, welche sehr rasch O₂ aufnehmen und verstoffwechseln, bevor eine chemische Oxidation stattfindet!
- ▶ Nachgärung: in Bierflaschen mit natürlicher Karbonisierung mittels Hefen, Bierflaschen mit Kronkorken verschliessen (cf. Flaschenverschluss)
- ▶ Nachgärung nicht in grossem Gärtank durchführen und erst anschliessend mit CO₂-Druckflasche karbonisieren
- ▶ **Umfüllvorgänge:** beim Umfüllen bzw. Absaugen mit Siphon/Heber vom Primärgärbehälter in andere Behälter zum Stopfen und/oder in Abfüllbehälter zur Nachgärung bzw. Flaschenfüllung unbedingt mit Schlauch arbeiten - nie Bierwürze oder Bier "plätschern" lassen; Schläuche bzw. Siphonsysteme müssen fest sitzen, um keine Luft mit Sauerstoff zu ziehen und sollten bis zum Boden des Zielgefässes reichen; evtl. Zielgefässe vor dem Umfüllen mit CO₂ beschicken (→ Verdrängung von Luft-O₂) ([Info](#): Avoiding Oxidation > There)

Verarbeitung von Jungbier/Bier inkl. Lagerung

- ▶ Abfüllen: Verkleinerung des Volumens im Kopfraum und Flaschenhals durch maximale Füllmenge

- ▶ Abfüllen: Abfüllen der Bierflaschen unter CO₂-Spülung, z.B. mit der BeerGun (Info 1, Info 2)
- ▶ **Flaschenverschluss:** Bierflaschen mit Kronkorken verschliessen, optimal: Sauerstoff-absorbierende Kronkorken verwenden (O₂-absorbierende Kronkorkeneinlage, feucht aktiv, cf. z.B. [hier](#))
- ▶ Flaschenverschluss: Bügelverschluss mit Gummidichtung (O₂-permeabel) eher meiden, insbes. bei längerer Lagerung
- ▶ Lagerung: Bier nach abgeschlossener Karbonisierung möglichst kalt (0 °C bis < 10 °C) und unter Ausschluss von Licht lagern
- ▶ Lagerung/Konsumation: Bier möglichst frisch trinken, bevor sich die oxidativen bierschädigenden Reaktionen bemerkbar machen (aber: zuviel trinken kann sich auch schädigend auswirken!)



Für weiter gehende Informationen/Tipps: cf. "Methods of the low oxygen brewhouse" [hier](#) und "LODO" [hier](#).

Wozu braucht es denn beim Brauen doch den Sauerstoff?

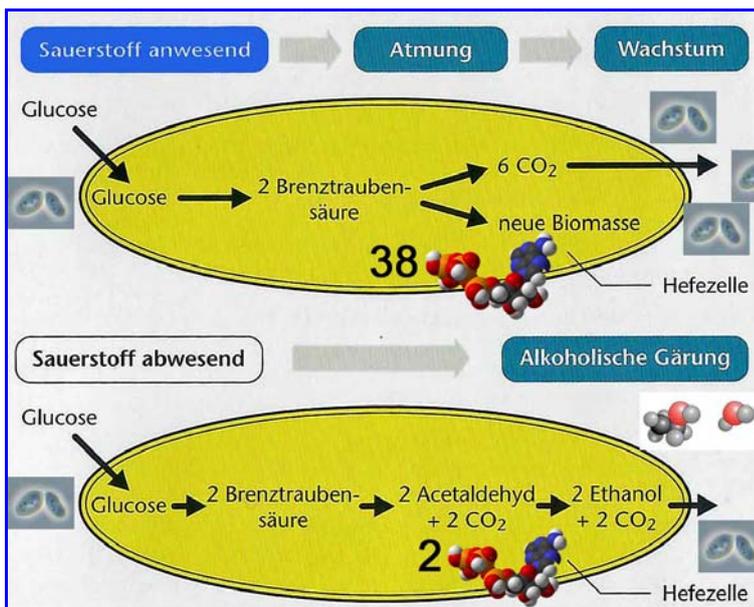


Abb. 3. Der vielseitige Stoffwechsel der Hefen.

Hefen können einen energieeffizienten aeroben Stoffwechsel betreiben (Atmer, oben) und mit einem energieineffizienten "Notstoffwechsel" ohne Sauerstoff (Gärung, unten) überleben, sich aber nicht vermehren.

Glukose verbraucht als in dessen Gegenwart (= Pasteur-Effekt). Die Hefen benötigen unter anaeroben Bedingungen mehr Zuckermoleküle, um die Energieverluste zu kompensieren! Wichtig aber für den Brauer ist zu wissen, dass die "Nährlösung" Bierwürze nach dem Sud, also die sog. Anstellwürze zunächst mit Sauerstoff angereichert werden muss, um den Anstellhefen geeignete Vermehrungsbedingungen zu ermöglichen. Die O₂-Abhängigkeit des Wachstums- und der Vermehrung sind unter "Brauwasser" [hier](#) > 2.11. Kenngröße 10: Der gelöste SAUERSTOFFGEHALT (z.B. der Anstellwürze)" insbesondere unter Abb. 35 detaillierter beschrieben.

Belüftungsverfahren: Wie bringt man nun den Sauerstoff in die Bierwürze?

Der zum Hefewachstum und Vermehrung notwendige Sauerstoff kann auf ganz verschiedene Weise ins Anzuchtmedium gebracht werden, sei es für ein Nährmedium für Anstellhefen oder für die Anstellwürze zur anschliessenden Hauptgärung. Die gebräuchlichsten Verfahren sind in Tab. 1 zusammengestellt. Wyeast empfiehlt eine O₂-Konzentration von 12 - 15 ppm (cf. Video 1).

Abb. 4. Belüftungsmöglichkeit. Eine einfache und gute Möglichkeit des Sauerstoffeintrags in die Bierwürze ist die Belüftung mittels Aquariumpumpe über Sterilfilter, Silikonschlauch und Belüftungsstein.



Erwünschte physikalische Anreicherung mit Sauerstoff in der Anstellwürze.

Hefen sind Stoffwechselspezialisten. Sie können mit Sauerstoff leben, also als **Atmer oder Aerobier** Stoffwechsel betreiben, also Energie- und Baustoffwechsel betreiben. In Gegenwart von Luftsauerstoff gedeihen Hefen prächtig, sie veratmen Zucker wie Glukose (Traubenzucker) oder Maltose (Malzucker) und gewinnen dabei genügend Energie (38 ATP-Energieeinheiten pro 1 Molekül Glukose, cf. Abb. 2 oben) die sie zum Wachsen und Aufbau neuer Zellen (Vermehrung) nutzen.

Fehlt aber Sauerstoff z.B. durch Stoppen der Luftzufuhr, so schalten die Hefezellen ihren Stoffwechsel auf die Notmassnahme Gärung um: Hefen sind also ebenso **Gärer oder Anaerobier**. Der Notstoffwechsel Gärung hilft ihnen, lebensfeindliche Zeiten zu überstehen, obwohl das energetisch ungünstig ist (pro 1 Molekül Traubenzucker resultieren nur gerade 2 ATP-Moleküle, cf. Abb. 2 unten). Louis Pasteur entdeckte 1861, dass Hefe ohne Sauerstoff mehr

Belüftungsmethode	Dauer	messbare O ₂ -Konzentration [ppm]	Quelle, Kommentar
Schütteln des Gärbehälters mit wenig Luft-O ₂	1 min - max. 5 min	2.7 bis max. 4	White, C. et al, Yeast. Brewers Publ. Colorado (2010); Video 1
Schütteln des Gärbehälters mit reinem O ₂	45 sec	≥ 10	einfachste Methode
Würze plätschernd umgiessen		≤ 4	gute Methode
mit Bierrührkelle an Bohrmaschine Luft-O ₂	5 min	8	mikrobiologisch heikel
mit Bierrührkelle an Bohrmaschine Luft-O ₂	5 min	8	cf. Video 2
Begasung mit reinem O ₂ mit Belüfungsstein, 1 L/min. Vorsicht vor Überdosierung → zu starke Hefevermehrung, Fehleraromabildung	30 sec/ 1 min/2 min	5.1 9.2 14.1	beste Methode cf. Video 3 Begasung aber vor Hefezugabe O ₂ -Bestimmung unentbehrlich!
Aquariumpumpe mit Edelstahl-Belüfungsstein via 0.2 µm Sterilfilter	5 - max. 15 min empfohlen 10-15 min	≤ 8 - 9	gute zuverlässige Methode, längere Belüfungszeiten bringen nicht mehr O ₂ in die Würze

Tab. 1. Belüftungsverfahren von Hefemedien insbes. Anstellwürzen.

Konzentrationsangaben beziehen sich auf ein Volumen von 20 Liter Bierwürze.

[Info](#)**Nachweisprinzip von DO - gelöstem Sauerstoff:**

O₂-Messung mittels membranbedeckter Messzelle: Diese Messung erfolgt mittels einer polarographischen Membranmesszelle nach Clark ([Info](#)). Dabei verwendet man Gold oder Platin für die Kathode (Arbeits-elektrode) und Silber/Silberchlorid für die Anode (Gegenelektrode, Abb. 5). Die Membranfolie besteht aus 10 bis 25 µm dickem PTFE (Polytetrafluorethylen) oder PE (Polyethylen).

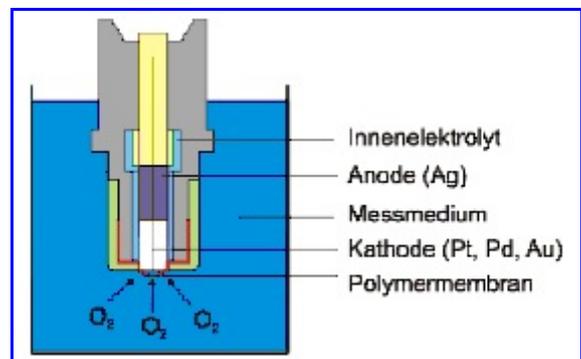
Nach Anlegen einer definierten negativen Polarisationsspannung an das 2 Elektroden-system wird an der Arbeitselektrode des Sensors O₂ reduziert. Dabei fließt ein **Diffusionsgrenzstrom**, der proportional dem O₂-Partialdruck im gasförmigen oder flüssigen Medium ist.

Bei der Sauerstoffbestimmung werden entsprechend Glch. 1 in einem

alkalischen Medium OH⁻-Ionen gebildet bzw. in einem **sauren Medium nach Glch. 2 H⁺-Ionen verbraucht:**



Im allgemeinen wird in alkalischer Lösung gearbeitet, so dass Gleichung 1 gültig ist.

Abb.5. Amperometrischer O₂-Sensor.[\[Quelle\]](#)

Kernwissen für Braupraxis: SAUERSTOFF gelöst sowohl BIERSCHÄDIGEND als auch notwendig für HEFEVERMEHRUNG

Hohe Sauerstoffwerte beeinflussen einerseits die Qualität des Bieres und seine Geschmacksstabilität sehr negativ (Fehleraromen wie pappiger Geschmack). Andererseits wird für eine zügige Gärung eine ausreichend hohe Zahl an vitalen Hefezellen benötigt, die normalerweise durch Anstellhefen in einer gut belüfteten Anstellwürze von einem O₂-Gehalt von > 8 mg O₂/L bereit gestellt wird. Die zeitabhängige Belüftung kann mit Luftsauerstoff oder reinem Sauerstoff erfolgen.

Elektrochemische O₂-Messung mittels membranbedeckter Messzellen: Der Sauerstoff wird an der Kathode einer Messzelle bei einer bestimmten Polarisationsspannung reduziert, der dabei entstehende Strom wird gemessen und ist dem Partialdruck des Sauerstoffs und damit dem Sauerstoffgehalt direkt proportional.



Die Belüftung von Anstellbierwürze ist eine notwendige Voraussetzung für die aerobe Hefevermehrung, bevor die Gärung beginnen kann. Mit verschiedenen Belüftungsverfahren kann eine ausreichende bis optimale O_2 -Konzentration erreicht werden, die mit einem O_2 -Messgerät periodisch überprüft werden sollte. Für sauerstoffarmes Brauen kann die gleiche Messtechnik bei den verschiedenen heiklen Brauphasen eingesetzt werden, um einem evtl. unerwünschten O_2 -Transfer auf die Spur zu kommen.



Materialien

Glaswaren/Geräte/ andere Materialien	Extech ExStik DO600 Messgerät für Gesamtsauerstoff inkl. Temperatur (Info , Datenblatt , Video , Manual) [Bezugsquelle z.B. Brouwland]
Verbrauchsmaterial	siehe Testsets bzw. Anleitung Braulabor 3 und 4
Chemikalien	Elektrolytlösung DO600 -EL, evtl. Natriumsulfat Na_2SO_3 (5%-Lösung), dest. bzw. ention. Wasser
Untersuchungsobjekte	Brauwasser (z.B. frisch ab Wasserhahn, abgekocht), Würzelösungen (z.B. Anstellwürze vor und nach der Belüftung), Bier nach Abfüllung frisch und älter

Bestimmung des Gelöstsauerstoff

I. Das Messgerät EXTECH ExStik DO600 Abb. 5, 6

cf. [Datenblatt](#)



Abb. 5. Messgerät DO600 inkl. Zubehör.

Elektrolytlösung, Elektrodenkappe, Messstick mit schwarzer Elektrode (untere Hälfte "Dissolved Oxygen Module" mit Anode und Kathode bestückt taucht in Elektrolyt des Membrankappenbehälters ein), Ersatz-Membrankappe (in Schutzbehälter).

Maximale Displayanzeige neben Gerät eingeblendet.

Das Messgerät zur Bestimmung des gelösten Sauerstoffs wird mit trockener Elektrode geliefert inkl. Ersatzmembran (als Membrankappe) und Elektrolytlösung (cf. Abb. 5).

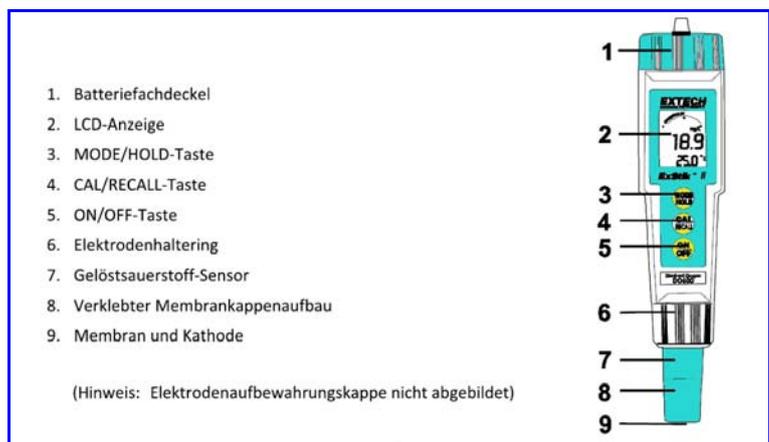


Abb. 6. Messgerät für Gelöstsauerstoff EXTECH ExStik DO600.

Das Messgerät muss

- ▶ vor der ersten Messung vorbereitet werden: 1. Stromversorgung mit 4 CR2032-Lithium-Ionenbatterien, 2. Mindestens 3-minütige Polarisierung der Elektrode (auch bei längerer Lagerung [> 7 Tage] notwendig), cf. Bedienungsanleitung [Info](#), 3. weitere empfohlene Einstellungen:
 - Wahl der Temperatureinheiten [$^{\circ}C$], Messeinheiten [(% Sättigung), mg O_2/L , ppm]

- Höhenausgleich in Fuss [ft], Umrechnung Meter → Fuss cf. [hier](#)
- evtl. automatische Ausschaltfunktion deaktivieren.
- ▶ vor jeder Messung kalibriert werden
- ▶ weitere Funktionen wie Salzgehaltsausgleich, Speicherung Messwerte u.a., sind im [Datenblatt](#) zu finden.



Allgemeiner Hinweis: Das Messgerät reagiert relativ träge → mit Geduld messen!

2. Kalibrierung des ExStik DO600

Die Kalibrierung des Messgerätes sollte jeweils vor einer Messperiode durchgeführt werden:

1. Elektrodenkappe: vor der Kalibrierung zunächst entfernen
2. Messgerät mit **ON/OFF-Taste** auf ON stellen
2. Taste **MODE/HOLD** drücken & gedrückt halten, bis auf dem Display unten rechts **%** erscheint
4. Polarisierung: 2-3 Minuten warten, bis die Elektrode vollständig polarisiert ist → d.h. stabile Anzeige abwarten (z.B. 89.3 → 91.1 → 93.2)
5. Elektrodenkappe: Schwamm mit dest./ention. Wasser (oder weichem Leitungswasser) leicht anfeuchten (nicht durchtränken, es darf kein Wasser sichtbar sein), Elektrodenmembran kontrollieren ob sauber und trocken (vorsichtig: Membran nicht berühren), Elektrodenkappe wieder auf Elektrode stecken
6. Abwarten, bis sich der angezeigte Messwert stabilisiert (Bsp. 104.8)
7. Taste **CAL/RECALL** drücken & gedrückt halten, bis Anzeige "**CAL**" im unteren Display erscheint sowie → blinkende Displayanzeige "**101.7**" und "**SA**" (erscheint SA nicht → es muss erneut kalibriert werden!)
8. am Ende des Kalibriervorgangs erscheint "**End**" → Messgerät bereit zum normalen **Messmodus**.

Hinweis: für Messungen sehr niedriger Sauerstoffwerte sollte in einer "Null-Sauerstoff-Kalibrierlösung" kalibriert werden, z.B. in 5% Natriumsulfit-Lösung Na_2SO_3 → bei stabilem Messwert Taste **CAL/RECALL** drücken bis "**CAL**" erscheint.

3. Messungen des Gelöstsauerstoffs

3.1. Vorbereitungen am Messgerät

1. Kalibration: ist das Messgerät ist frisch kalibriert (empfehlenswert: jeweils vor einer Messreihe das Gerät kalibrieren, mindestens innerhalb des gleichen Tages) → dann gleich zu 3.2., Pkt. 8 gehen
2. Elektrodenkappe: abnehmen und Elektrodenschwamm mit dest./ention. Wasser leicht anfeuchten (nicht durchtränken), dann wieder Elektrode mit der Elektrodenkappe abdecken
3. Taste ON/OFF drücken → aktiviert den automatischen Kalibrierungsprozess
4. Ausschaltfunktion: **automatische Ausschaltfunktion** ist zu **deaktivieren**: bei eingeschaltetem Gerät kurz Taste **CAL/RECALL** drücken, dann sofort beide Tasten **MODE/HOLD & ON/OFF** drücken & gedrückt halten, bis → "**OFF**" auf dem Display erscheint
5. Messeinheiten: **MODE/HOLD** Taste drücken & gedrückt halten → bis im Display unten rechts "**%**" sowie eine Zahl grösser 100.X erscheint
6. Taste **ON/OFF** zum Einschalten drücken → "**ON**" : 1. Display wird aktiviert und → 2. automatischer Kalibrierungsprozess beginnt
7. warten, bis sich die Sonde polarisiert hat (10 Minuten bis zu 2 Stunden, bis die Messwerte nicht mehr auf- und abschwanken und → Messung sollte ca. **101.7%** (Sättigung) anzeigen)
Hinweis: sollte Gerät nicht 101.7% anzeigen, muss neu kalibriert werden.

3.2. O₂-Gehaltsmessungen durchführen

8. Messeinheit: gewünschte Messeinheit wählen (i.d.R. mg O₂/L bzw. ppm) durch Drücken & gedrückt halten der Taste **MODE/HOLD** bis → **mg/L** bzw. **ppm** im Display erscheint

9. Elektrodenkappe: abnehmen

10. Messung:

- schwarze Elektrode in die zu messende Probe stellen
- durch sanftes Herumrühren sämtliche Luftbläschen von der Membranoberfläche entfernen (optisch kontrollieren)
- Elektrode soweit eintauchen lassen, dass die Probenflüssigkeit nicht den Elektrodenring (Abb. 1, Nr. 6) erreicht
- idealerweise Probe konstant bewegen (z.B. Messgerät einspannen sodass Elektrode in Messflüssigkeit eintaucht, Probe auf Magnetrührer sanft rühren lassen)
- Messgerät solange in Probe belassen, bis stabiler Messwert angezeigt wird (zunächst muss Temperaturausgleich zwischen Elektrode und Flüssigkeit erfolgen: cf. Temperaturanzeige im Display; Stabilisierungszeit variiert zwischen 10 sec und 5 min)

11. Protokoll bzw. Speicherung

- Messwerte entweder schriftlich protokollieren, oder
- Messwerte speichern: Taste **MODE/HOLD** drücken
 - im unteren Display: Anzeige Speicherplatznummer und Messwert
 - im Hauptdisplay: gespeicherter Messwert
 - Gerät zeigt "**HOLD**": Gerät bleibt im HOLD-Modus
 - HOLD-Modus in Messmodus verlassen: **MODE/HOLD** erneut drücken
 - nach Messung erneut **MODE/HOLD** drücken: neue Messung speichern etc., max. 25 Speicherungen möglich

12. Auswertung/Interpretation

Hinweis: Auflösung des Messgerätes 0.01 ppm/ mg/L, 0.1 °C

- Vergleich gemessener Werte mit Werteangaben in Tab. I

- Werte aus Literatur [ppm]:

Brauwasser	2-8 ppm
Brauwasser 5 min gekocht	≤ 1 ppm
In der Stammwürze	8-17 ppm, wobei Werte um 8-10 ppm als günstig bewertet werden, zu hohe O ₂ - Werte führen zu hoher Hefebiomasse, was das Volumen an nutzbarem Bier verkleinert
Fermentation	< 0.01 ppm
Helles Bier	< 0.05 ppm
Flaschenbier	0.02 - 0.05 ppm = 20 - 50 ppb (parts per billion)
Dosenbier	0.03 - 0.06 ppm = 30 - 60 ppb
	ppb = 1 x 10 ⁻⁹ = 0.000 000 001 = 10 ⁻³ ppm
Altes Bier: mit herkömmlichem Kronkorken diffundieren 1 bis 2 ppb O ₂ pro Tag in die Flasche	
Bsp. 3 Monate altes Bier: O ₂ -Eintritt von bis zu 180 ppb = 0.18 ppm	

durch Nachgärung in Flasche karbonisiertes Bier ± 0.01 ppm

durch Flaschen-CO₂ aufkarbonisiertes Bier* enthält je nach Reinheitsgrad des CO₂ zuviel Sauerstoff z.B. bei 1.0 g CO₂/L 0.4 mg/L. Bsp. Carbagas [Aligal](#) Drink 2: 99.9% CO₂, O₂ ≤ 30 ppm.



Anhang: Typische Messungen des gelösten Sauerstoffgehaltes



A1. Messung Gelöstsauerstoff.
frisches Leitungswasser, $T = 18.5\text{ °C}$,
 $DO = 4.78\text{ mg O}_2/\text{L}$.



A2. Messung Gelöstsauerstoff.
gestandenes dest. Wasser, $T = 19.2\text{ °C}$,
 $DO = 4.64\text{ mg O}_2/\text{L}$.



A3. Messung Gelöstsauerstoff.
abgekochtes Trinkwasser, $T = 22.0\text{ °C}$,
 $DO = 1.71\text{ mg O}_2/\text{L}$.



A4. Messung Gesamtsauerstoff.
belüftetes Trinkwasser, $T = 19.1\text{ °C}$, $DO = 7.90\text{ mg O}_2/\text{L}$.



A5. Messung Gesamtsauerstoff.
Maisbier Ribelgold, Brauerei Sonnenbräu.
 $T = 10.9$, $DO = 0.38\text{ mg O}_2/\text{L}$ (gekauft am
25.11.2018, Haltbarkeitsdatum 14.06.2019 \rightarrow
geschätztes Alter ca. 4 Monate, Bügelflasche \rightarrow
Diffusion mind. 0.2-0.3 ppm).

