Inhaltsverzeichnis

[1 Einleitung 2](#__RefHeading___Toc211_2824216699)

[2 Grundlagen und Stand der Technik 3](#__RefHeading___Toc213_2824216699)

[2.1 Gärung im Bierbrauprozess 3](#__RefHeading___Toc215_2824216699)

[2.2 Gärprozesssteuerung in Industrie- und Kleinbrauerei 5](#__RefHeading___Toc217_2824216699)

[2.3 Maschinelles Lernen 5](#__RefHeading___Toc253_1255286230)

[2.3.1 Lernverfahren 7](#__RefHeading___Toc257_1255286230)

[2.3.1.1 Supervised Learning 7](#__RefHeading___Toc580_809448145)

[2.3.1.2 Unsupervised Learning 7](#__RefHeading___Toc582_809448145)

[2.3.1.3 Reinforcement Learning 7](#__RefHeading___Toc584_809448145)

[2.3.2 Algorithmen und Modelle 8](#__RefHeading___Toc259_1255286230)

[2.3.3 Neuronale Netze 8](#__RefHeading___Toc564_2419670913)

[2.4 Fermentationssteuerung in anderen Bereichen 8](#__RefHeading___Toc566_2419670913)

[2.4.1 Einsatz von maschinellen Lernen 8](#__RefHeading___Toc251_1255286230)

[3 Optimierung der Gärsteuerung 9](#__RefHeading___Toc412_4199667450)

[3.1 Schwäche der manuellen Gärsteuerung 9](#__RefHeading___Toc414_4199667450)

[3.2 Vorhersage des Gärverlaufs durch maschinelles Lernen 9](#__RefHeading___Toc416_4199667450)

[4 Umsetzung der KI-Gärsteuerung 10](#__RefHeading___Toc231_2824216699)

[4.1 Aufbau des Systems 10](#__RefHeading___Toc261_1255286230)

[4.1.1 Sensorik 10](#__RefHeading___Toc263_1255286230)

[4.1.2 Aktorik 10](#__RefHeading___Toc265_1255286230)

[4.1.3 Software – Werkzeuge und Resourcen 10](#__RefHeading___Toc267_1255286230)

[4.2 Datenverarbeitung 10](#__RefHeading___Toc269_1255286230)

[4.2.1 Datenaufnahme 10](#__RefHeading___Toc271_1255286230)

[4.2.2 Datenaufbereitung 10](#__RefHeading___Toc273_1255286230)

[4.2.3 Datenvisualisierung 10](#__RefHeading___Toc275_1255286230)

[4.3 Training des Systems 10](#__RefHeading___Toc239_2824216699)

[4.3.1 Ausgewähltes Lernverfahren 10](#__RefHeading___Toc277_1255286230)

[4.3.2 Auswahl der Trainings- und Testdaten 10](#__RefHeading___Toc279_1255286230)

[4.3.3 Training des ML Modells 10](#__RefHeading___Toc604_1255286230)

[4.3.4 Prüfung mittels Testdaten 10](#__RefHeading___Toc606_1255286230)

[5 Ergebnisse 11](#__RefHeading___Toc367_2155268015)

[5.1 Vergleich der Trainingsergebnisse 11](#__RefHeading___Toc369_2155268015)

[5.2 Erprobung der KI-Gärsteuerung 11](#__RefHeading___Toc371_2155268015)

[5.2.1 Ergebnis 11](#__RefHeading___Toc373_2155268015)

[5.2.2 Diskussion 11](#__RefHeading___Toc592_809448145)

[5.2.2.1 Messungenaugigkeit am Durchflussmesser 11](#__RefHeading___Toc586_809448145)

[5.2.2.2 Extraktabbau in der Angärphase 11](#__RefHeading___Toc588_809448145)

[5.2.2.3 Löslichkeitsverhalten von CO2 in Bier 11](#__RefHeading___Toc590_809448145)

[6 Fazit 12](#__RefHeading___Toc247_2824216699)

[6.1 Zusammenfassung 12](#__RefHeading___Toc249_2824216699)

[6.2 Ausblick 12](#__RefHeading___Toc251_2824216699)

# Einleitung

# Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt einen elementaren Überblick, aus dem sich die Fragestellung dieser Arbeit ergibt. Dabei werden zuerst die Grundlagen der klassischen Gärung und die dabei ablaufenden chemischen Vorgänge erläutert. Anschließend wird beschrieben, wie die Steuerung des Gärprozesses in Brauereien verschiedener Größenordnungen heutzutage stattfindet. Nachdem im dritten Abschnitt dieses Kapitels ein Rundumblick über das aktuell stark diskutierte Thema des Maschinellen Lernens gegeben wurde, folgen zum Ende Beispiele, wie Fermentationen anderer Stoffe gesteuert werden können. Dabei wird vor allem auf Ansätze eingegangen, die schon die Vorteile der künstlichen Intelligenz erprobt haben.

## Gärung im Bierbrauprozess

Unter dem Begriff der Gärung versteht sich im allgemeinen ein Prozess, wobei Mikroorganismen organische Stoffe abbauen. Anders als viele chemische Reaktionen, die beispielsweise durch hohe Temperaturen provoziert werden, laufen Gärungsprozesse langsam und in für den Menschen gewöhnlichen Temperaturen ab. Häufig sind die aus der Gärung entstammenden Endprodukte entscheidend für die Namensgebung. So liegt es nahe, dass es sich im Prozess des Bierbrauens um alkoholische Gärung handelt. Die Mikroorganismen sind in diesem Fall Enzyme der Hefe, die die organischen Stoffe, hier Zucker, in die Endprodukte, Alkohol und Kohlenstoffdioxid (CO2), zerlegt.

Während der alkoholischen Gärung finden komplexe Stoffumwandlungen statt, die kurz dargestellt aber nicht näher betrachtet werden. Für diese Arbeit ist hauptsächliche das CO2 als Endprodukt von Bedeutung.

Im Brauprozess des Bieres ist der Gärvorgang der entscheidende Punkt, an dem aus der Würze das Bier wird. Die Würze ist das Produkt nach den Hauptschritten des Maischens und des Würzekochens. Während des Maischens wird geschrotetes Malz mit Wasser vermischt. In verschiedenen Temperaturstufen lösen sich im Malz Enzyme, die die im Malz enthaltene Stärke zu Zuckern spalten. Für die sogenannten Rasten werden unterschiedliche Temperaturen angefahren, um wiederum verschiedene Enzyme zu aktivieren. Das Würzekochen ist der Prozessschritt, in dem der Hopfen mit ins Spiel kommt. In der Würzepfanne wird das Zwischenprodukt kräftig aufgekocht und mit dem Hopfen versetzt. Dabei lösen sich Harze, Bitterstoffe, Öl und Gerbstoffe aus dem Hopfen, was im fertigen Bier durch bittere aber auch aromatische Geschmäcker zu erkennen ist.

In der Würze enthaltene Zucker werden verschieden gut vergoren. So werden Mehrfachzucker als erstes von der Hefe vergoren. Es liegt also nahe, dass die Würzebeschaffenheit ein Kriterium für die Geschwindigkeit der Umsetzung während der Gärung ist. Daneben spielen aber auch andere Faktoren eine Rolle. So sind beispielsweise verschiedene Heferassen aufgrund ihrer genetischen Eigenschaften unterschiedlich schnell in ihrem Stoffwechselprozess. Aber auch die Kontaktfläche zwischen den Hefezellen und den Zuckern ist ausschlaggebend. Eine Erhöhung der Hefemenge bringt entsprechend auch eine Erhöhung der Umsetzungsgeschwindigkeit mit sich. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch durch Bewegung erzeugen. Ein Umpumpen beispielsweise sorgt ebenso für mehr Kontakt zwischen der Würze und den Hefezellen. Für die genannten Punkte sind je nach Biersorte und je nach Hersteller meist recht konkrete Vorgaben vorhanden. Es gibt jedoch auch noch Einflussfaktoren, die der Brauer eigenständig noch während der Gärung anpasst. Je nach Aktivität der Hefezellen, kann er die Temperatur und den Druck entsprechend einstellen. Erhöhte Gärtemperaturen lassen die Hefe deutlich schneller arbeiten als niedrige. Durch erhöhten Druck hingegen, verbleibt mehr gebildeter CO2 im Bier gelöst, was den Gärprozess verlangsamt.

Der französische Chemiker und Physiker Joseph Louis Gay-Lussac fässt mit seiner aufgestellten Formel die Anfangs- und Endprodukte der alkoholischen Gärung zusammen:

(1.1)

Wie schon genannt werden aus einem Teil Zucker zwei Teile Alkohol, genauer Ethanol, und zwei Teile Kohlenstoffdioxid. Dies ist allerdings nur ein sehr pauschaler Ausdruck, für das, was während der Gärung passiert.

Der Stoffwechsel der Hefe ist ein sehr komplexer Prozess, an dessen Ende die genannten Endprodukte stehen. In **Abbildung XY** sieht man ein Schema, das die alkoholische Gärung deutlich detaillierter beschreibt.

**ABBILDUNG XY**

Das Schema beruht auf der Formel nach Embden-Meyerhof-Parnas, benannt nach den Entdeckern der Glykolyse. Während mehrerer stofflicher Umwandlungen entwickeln sich dabei auch Gärungsnebenprodukte, die gleichzeitig zu gewissen Teilen auch wieder abgebaut werden. Die Nebenprodukte der Gärung sind im fertigen Endprodukt, dem Bier, ebenso entscheidend für den Geschmack wie die gelösten Hopfenbestandteile aus dem Würzekochen.

Im Folgenden wird auf einige Nebenprodukte eingegangen und dargestellt, wie die Bildung dieser Im Gärverlauf begünstigt oder auch gehemmt werden können. Genauso werden Abbaumaßnahmen für die Gärungsnebenprodukte aufgezeigt.

**GÄRUNGSNEBENPRODUKTE**

Es zeigt sich somit, dass es zahlreiche Einflussfaktoren gibt, die für die optimale Gärungstemperatur und den optimalen Gärungsdruck eine Rolle spielen. Das bedeutet nun für den Brauer, dass er nach bestem Wissen und Gewissen in jedem Zeitpunkt neu entscheiden muss, wie er die entsprechenden Werte anpasst. Hierbei ist das Ziel die Gärung insgesamt möglichst schnell ablaufen zu lassen, was aus rein wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist, ohne aber ungewollte Geschmäcker in das Bier zu bringen. Der Brauer muss sich hier vor allem auf seinen eigenen Erfahrungsschatz berufen.

## Gärprozesssteuerung in Industrie- und **Klein**brauerei

## Maschinelles Lernen

Die Begriffe Künstliche Intelligenz sowie Maschinelles Lernen sind heutzutage jedem einem Begriff und wirken für viele als etwas neues. Immer wieder wird auch kontrovers über sie diskutiert. Tatsächlich existieren Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz schon seit Jahrzehnten. Dass wir erst in den letzten Jahren so viel damit zu tun haben, ist wahrscheinlich dem geschuldet, dass das Moor’sche Gesetz weiter bestand hat. Die Verarbeitung und Speicherung von großen Datenmengen wird immer günstiger während die zur Verfügung stehende Rechenleistung immer weiter steigt.

Es soll hier ein Überblick über die drei bekannten Lernverfahren des Maschinellen Lernens geben werden. Diese Lernverfahren beruhen auf jeweils eigenen Konzepten, für welche es wiederum eigene mathematische Algorithmen gibt. Von diesen Algorithmen werden ebenfalls einige vorgestellt, bevor es eine Erläuterung der sogenannten Neuronalen Netze, die bei diesem Thema ebenfalls eine große Rolle spielen, gibt.

Bevor es aber tiefer in diese Unterkapitel eingestiegen werden kann, folgt zunächst eine kurze Abgrenzung der beiden Begrifflichkeiten Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass das Maschinelle Lernen ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz ist. Es lohnt sich daher als erstes einen Blick auf die Überkategorie zu werfen. Anhand der Begrifflichkeit lässt sich schon ableiten, dass es sich um ein intelligentes Wesen oder technischer ausgedrückt, um ein technisches System handeln muss. Dieses System wiederum sollte offenbar künstlich erschaffen worden sein.

Bei der Intelligenz handelt es sich um kognitive Fähigkeiten, die wir Menschen und im Laufe unseres Lebens eigenständig aneignen. Dabei handelt es sich beispielsweise um das Lernen, wobei Informationen aufgenommen und verarbeitet werden oder um das Schlussfolgern, wobei entsprechende Informationen ausgewertet werden. Auch das Vergleichen der eigenen Ergebnisse mit anderen Quellen und das Erkennen von Zusammenhängen ist Teil dieser Intelligenz. Dies lässt sich mithilfe von Simulationen recht gut durch Computern nachstellen. Doch auch ist es Teil der menschlichen Intelligenz die gerade ausgewerteten Informationen zu verstehen und ein Bewusstsein für sie zu schaffen. Da ein Computer auf rein mathematische Weise arbeitet, ist dieser Teil der menschlichen Intelligenz nicht realisierbar.

Zusammengefasst arbeitet jedes System der Künstlichen Intelligenz einen strikten Prozess ab. Dabei wird ein Ziel definiert, wozu relevante Daten verarbeitet werden. Durch Erfassen weiterer Daten können mathematische Algorithmen einen geeigneten Zusammenhang zwischen dem Ziel und den Eingangsdaten erkennen und so durch angepasste Aktionen einem gewünschten Ergebnis nahe bringen.

Wie angesprochen ist das Maschinelle Lernen ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz. Das Menschliche Lernen soll hierbei so nachgeahmt werden, dass sich das System in zukünftigen unbekannten Bedingungen zurecht findet. Ein intuitives Lernen, wie es der Mensch kann, ist hier nicht möglich. Das System benötigt also zunächst sehr große Datenmengen, um überhaupt sinnvolle Ergebnisse zu erzielen. Ist diese Datenmenge aber vorhanden und das System entsprechend trainiert, so sind Systeme deutlich effizienter im Treffen von Vorhersagen als Antwort auf eine Problemstellung als wir Menschen. Das Maschinelle Lernen nutzt dafür unterschiedliche Techniken. Statistische Analysen der Daten sind dabei genauso möglich wie die Suche nach Analogien oder der Anwendung von Logik. Auch das Nachahmen des menschlichen Gehirns mittels neuronaler Netze ist dabei eine mögliche Technik. Das System wird dabei während des Trainings solange angepasst, bis ein ausreichend genaues Ergebnis gefunden ist. Dies funktioniert indem die Daten zuvor in Trainings- und Testdaten aufgeteilt werden. Anhand der Trainingsdaten sucht der Algorithmus nach einem geeigneten mathematischen Modell, das den Zusammenhang der Daten beschreibt. Mithilfe der Testdaten wird anschließend die Genauigkeit des Modells getestet, indem das gefundene Modell auf die Eingabedaten angewandt wird.

### Lernverfahren

Für das Training beziehungsweise für das Finden eines passenden mathematischen Modells wird im Maschinellen Lernen typischerweise eines der drei folgenden Lernverfahren angewandt. Als Entwickler eines ML-Systems sollte man sich schon frühzeitig im Klaren sein mit was für Datensätzen man arbeitet und was das Ziel seiner Arbeit ist, um das richtige Lernverfahren zu wählen.

#### Supervised Learning

Bei diesem Lernverfahren, das übersetzt überwachtes Lernen heißt, ist entscheidend, dass im vorhandenen Datensatz Eingabe- und Ausgabedaten vorhanden sind. Als Eingang lässt sich ein Vektor **x** annehmen, während wir als Ausgabe meist ein Skalar y vorliegen haben. Üblicherweise liegen am Eingang mehr als eine Variable vor, so dass sich aus mathematischer Sicht ein Vektor ergibt. Möglich ist natürlich auch ein Ausgang mit mehr als einer Variable. Es wird von Daten der Form

(2.1)

ausgegangen. Für den gesamten Datensatz ergibt sich somit eine Eingangsmatrix **X** und ein Ausgangsvektor **y**:

(2.2)

Während des Trainings wird nun durch den gewählten Algorithmus ein Modell erstellt, das ein Hypothese findet, die den noch unbekannten Zusammenhang zwischen **y** und **X** ideal darstellt.

(2.3)

Das Ziel dieser Lernmethode können zum einen Regressionsprobleme als auch Klassifikationsprobleme sein. Bei Regressionsproblemen wird als Ausgabe ein numerischer Wert gesucht, wobei ein Klassifikationsproblem nach einer Zuordnung sucht. Die Variable ist hier eher qualitativer Natur und kann beispielsweise aus Klassennamen oder Schlagwörtern bestehen.

#### Unsupervised Learning

#### Reinforcement Learning

### Algorithmen und Modelle

### Neuronale Netze

## Fermentationssteuerung in anderen B**ereichen**

### Einsatz von maschinellen Lernen

# **Optimierung der Gärsteuerung**

## Schwäche der manuellen Gärsteuerung

## **Vorhersage des Gärverlaufs durch maschinelles Lernen**

# Umsetzung der KI-Gärsteuerung

## **Aufbau des** Systems

### Sensorik

### Aktorik

### Software – Werkzeuge und Resourcen

## **Datenverarbeitung**

### Datenaufnahme

### Datenaufbereitung

### Datenvisualisierung

## Training des Systems

### Ausgewähltes Lernverfahren

### **Auswahl der Trainings- und Testdaten**

### Training des ML Modells

### **Prüfung mittels** Testdaten

# Ergebnisse

## **Vergleich der Trainingsergebnisse**

## Erprobung der KI-Gärsteuerung

### Ergebnis

### Diskussion

#### Messungenaugigkeit am Durchflussmesser

#### Extraktabbau in der Angärphase

#### Löslichkeitsverhalten von CO2 in Bier

# Fazit

## Zusammenfassung

## Ausblick