



Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Vorgelegt von: DI Rainer Stütz

Gutachter: DI Jens Luckart, Dr. Michael Zepf

Erstellungszeitraum: 07.12.2024 – 08.03.2025

Abgabedatum: 30.03.2025



Abstract

This thesis examines how digitalization and artificial intelligence (AI) can be used in beer production to enhance quality, efficiency, innovation potential, and especially beer diversity. The focus is on four hypotheses:

1. With today's technology, the quality of beer can be optimized through complete control of all known parameters.
2. The sensory profile and its creation can be monitored and controlled using modern technology.
3. Changes in ingredients or processes can be compensated so that the sensory profile is maintained.
4. With the right knowledge and technology, any desired beer can be specifically designed and produced.

The thesis compares the historical development of beer production and information technology, explains key concepts of digitalization and AI, and analyzes for each step of beer production the relevant parameters, their digital measurability, as well as the opportunities and limitations of digitalization.

The results show that almost all analytical parameters can now be digitally recorded—though often only with considerable technical and financial effort, especially in the malting and brewhouse processes. Sensory analysis remains a challenge, as it is subjectively influenced. AI can, based on structured and high-quality data, detect process deviations, suggest recipe adjustments, and develop new beers and beer styles.

Every brewery can already start digitalization in small steps today, in order to collect essential data points and thus lay the foundation for future AI applications.

The thesis concludes with an assessment of feasibility and costs: digitalization and AI offer significant added value but require high investments. The use of AI is particularly promising when analytical and sensory data are systematically combined.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Karin Stütz sowie meinen Kindern Kira & Yanik Stütz. Ohne eure Unterstützung, Geduld und das Verständnis für die vielen investierten Stunden wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ihr habt mir den nötigen Rückhalt und Freiraum gegeben, um mich voll und ganz auf dieses Projekt konzentrieren zu können. Besonders hervorheben möchte ich, dass meine Frau die Abschlussarbeit mehrfach sorgfältig gelesen und mit wertvollem Feedback bereichert hat, während meine Kinder mit vielen kreativen Vorschlägen und Ideen insbesondere bei der Gestaltung der Diagramme einen wichtigen Beitrag geleistet haben.

Ebenso möchte ich mich bei meinen Bierbuddies Cindy Elsenbast, Stefan Pfurtscheller, Kurt Gächter und Alexander Graf bedanken. Die gemeinsame Zeit in den Kursen, die anregenden Diskussionen und eure kritischen wie auch motivierenden Rückmeldungen zu dieser Arbeit haben nicht nur zum Gelingen beigetragen, sondern auch für viele schöne und inspirierende Momente gesorgt. Danke für eure Freundschaft und die vielen gemeinsamen Stunden – im Kurs und beim Bier.

Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Michael Zepf und DI Jens Luckart für die Zulassung und Unterstützung dieser doch eher ungewöhnlichen Arbeit beim Institute of Masters of Beer. Ihre Offenheit für innovative Ansätze und ihr Vertrauen in mein Thema haben diese Abschlussarbeit erst ermöglicht.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Ausgangssituation und Hypothesen.....	2
3	Geschichte und Begriffsbestimmungen.....	5
3.1	Von zufälligen Entdeckungen zur Genauigkeit der Digitalisierung.....	5
3.2	Begriffsbestimmungen und Erklärungen der Informationstechnologie	10
4	Lösungsansatz.....	18
4.1	Untersuchung der Hypothesen	18
4.2	Nutzung von Fallbeispielen im Prozessschritt (Kapitel 5).....	18
4.3	Nutzung von Fallbeispielen im gesamten Untersuchungsraum (Kapitel 6)	18
4.4	Realisierbarkeit und Kostendarstellung im Jahre 2025 (Kapitel 7).....	18
5	Fallbeispiele der Digitalisierung in den einzelnen Prozessschritten	20
5.1	Prozessschritt Getreideanbau und -ernte am Beispiel der Gerste (Hordeum vulgare).....	20
5.2	Prozessschritt Mälzen.....	37
5.3	Prozessschritt Maischen.....	57
5.4	Prozessschritt Würzebereitung	67
5.5	Prozessschritt Gärung.....	83
5.6	Prozessschritte Filtration, Stabilisierung und Abfüllung.....	95
5.7	Prozessschritt Sensorische Analyse – Biersensorik	101
6	Fallbeispiele der künstlichen Intelligenz im gesamten Untersuchungsraum	105
6.1	Vorbereitung der Daten für künstliche Intelligenz.....	105
6.2	Entwicklung einer künstlichen Intelligenz mittels Deep Learning	107
6.3	Was kann die künstliche Intelligenz vorhersagen?	109
7	Realisierbarkeit und Kostendarstellung.....	111
7.1	Realisierbarkeit.....	111
7.2	Kostendarstellung	124
8	Fazit und Ausblick.....	138
9	Literaturverzeichnis	140

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prozessschritte zur Validierung der Hypothesen.....	4
Abbildung 2:	Zeitstrahl der Bier und Informatik Innovationen ausgehend von der Neuzeit.....	9
Abbildung 3:	Historischer Vergleich der Errungenschaften von Bierproduktion und Informationstechnologie	10
Abbildung 4:	iSpindel Aufzeichnungen einer Gärung.....	12
Abbildung 5:	Boolesche Logik vs. Fuzzy Logic	15
Abbildung 6:	Aufbau der Gerste	20

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Abbildung 7: RhoC 5 Radiometriesensor von Medusa Radiometrics.....	32
Abbildung 8: Querschnitt des Gerstenkorns.....	38
Abbildung 9: Teilchengröße Pflungstädter Plansichter	65
Abbildung 10: Prinzipdarstellung des Whirlpooleffekts	74
Abbildung 11: Aufbau einer Hefezelle.....	83
Abbildung 12: Technische Architektur für die Datenvorbereitung.....	106
Abbildung 13: Einzelner Datensatz für ein Bier.....	107
Abbildung 14: 3 vereinfachte Datensätze für 3 Biere.....	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Errungenschaften der Bierproduktion	6
Tabelle 2: Errungenschaften der Informatik.....	8
Tabelle 3: Identifizierte Parameter der Sommer- oder Wintergerste.....	20
Tabelle 4: Identifizierte Parameter der Terroir - Bodenverhältnisse	24
Tabelle 5: Identifizierte Parameter der Terroir - Klimaverhältnisse.....	24
Tabelle 6: Identifizierte Parameter der Aussaat	24
Tabelle 7: Identifizierte Parameter der Fruchtfolge.....	25
Tabelle 8: Identifizierte Parameter der Gerstensorte.....	28
Tabelle 9: Vollständigkeit der Parameter im Gerstenanbau und der -ernte.....	28
Tabelle 10: Digitale Messeinheiten des Parameters Art der Gerste.....	29
Tabelle 11: Digitale Messeinheiten des Parameters Felddauer.....	30
Tabelle 12: Digitale Messeinheiten der Parameter Bodentyp, Ausgangsmaterial, Gründigkeit, Durchlässigkeit, Humusform, Bodenarten, Horizonte, Humusgehalt, Kalkgehalt.....	31
Tabelle 13: Digitale Messeinheiten der Parameter Bodenverdichtung, vertikale Bioporen, Wasserhältnisse, Durchlässigkeit	32
Tabelle 14: Digitale Messeinheiten der Parameter ph-Wert des Substrats, Salzgehalt, Macronährstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, Eisen, Mangan, Kupfer, Zink, Bor, Chlorid	33
Tabelle 15: Digitale Parameter der Parameter Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit	34
Tabelle 16: Digitale Parameter der Parameter Aussaatmenge und Aussaattiefe.....	34
Tabelle 17: Digitale Messeinheiten der Parameter Gerste wiederholt angebaut, Vorfrucht passend..	35
Tabelle 18: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Pflanzenbauliche Eigenschaften der Gerste	36
Tabelle 19: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Qualitätseigenschaften der Gerste	37
Tabelle 20: Zusammensetzung der Gerste	37
Tabelle 21: Identifizierte Parameter der Qualitätseigenschaften der Gerste.....	39
Tabelle 22: Identifizierte Parameter beim Weichen.....	41
Tabelle 23: Identifizierte Parameter beim Keimen.....	46
Tabelle 24: Identifizierte Parameter beim Trocknen (Darren).....	48
Tabelle 25: Vollständigkeit der Parameter im Mälzen	48
Tabelle 26: Digitale Messeinheiten für Parameter Rohproteingehalt im Malz & löslicher Stickstoff....	49
Tabelle 27: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Cytolyse: Friabilimeter, Beta- Glucanengehalt & Viskosität.....	50
Tabelle 28: Digitale Messeinheiten für den Parameter Diastatische Kraft	51
Tabelle 29: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Sonstige Enzyme: Würzefarbe, Dimethylsulfid (DMS).....	51
Tabelle 30: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Reinigen, Sortieren und Lagern	52

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Tabelle 31: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Weichen.....	54
Tabelle 32: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Amylolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau beim Keimen.....	55
Tabelle 33: Digitale Messeinheiten für Melanoidin.....	56
Tabelle 34: Digitale Messeinheiten für Malzfarbe.....	56
Tabelle 35: Identifizierte Parameter der Malzschrotung.....	58
Tabelle 36: Mehrstufige Infusion.....	58
Tabelle 37: Dekoktionsverfahren - Dreimaischverfahren.....	58
Tabelle 38: Identifizierte Parameter der Maische.....	62
Tabelle 39: Identifizierte Parameter beim Abläutern.....	63
Tabelle 40: Vollständigkeit der Parameter beim Maischen.....	64
Tabelle 41: Digitale Messeinheiten für die Verteilung der Partikelgrößen im Malzschrot.....	65
Tabelle 42: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe KH, NKH & Gesamthärte.....	66
Tabelle 43: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Konzentration der Maische, Malztyp, Malzmenge.....	66
Tabelle 44: Digitale Messeinheit für Parameter Extraktgehalt.....	67
Tabelle 45: Identifizierte Parameter der Würzekochung.....	74
Tabelle 46: Identifizierte Parameter bei der Trubabscheidung (Whirlpool).....	75
Tabelle 47: Identifizierte Parameter in der Würzekühlung.....	76
Tabelle 48: Vollständigkeit der Parameter in der Würzebereitung.....	77
Tabelle 49: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Würzeanalyse.....	78
Tabelle 50: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Hopfung.....	80
Tabelle 51: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Aromenanalyse.....	80
Tabelle 52: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Trubabscheidung (Whirlpool).....	82
Tabelle 53: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Würzekühlung.....	82
Tabelle 54: Digitale Messeinheiten der Würzebelüftung.....	83
Tabelle 55: Identifizierte Parameter der Hefegabe.....	86
Tabelle 56: Identifizierte Parameter der Gärung.....	90
Tabelle 57: Vollständigkeit der Parameter in der Gärung.....	91
Tabelle 58: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Hefegabe.....	92
Tabelle 59: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Hefecharakteristika.....	93
Tabelle 60: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Gärverlauf.....	95
Tabelle 61: Identifizierte Parameter der Filtration.....	97
Tabelle 62: Identifizierte Parameter der Stabilisierung.....	98
Tabelle 63: Vollständigkeit der Parameter in der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung.....	99
Tabelle 64: Digitale Messeinheiten der Filtration.....	100
Tabelle 65: Digitale Messeinheiten für die Stabilisierung.....	100
Tabelle 66: Identifizierte Parameter Sensorische Analyse Sehen.....	101
Tabelle 67: Identifizierte Parameter Sensorische Analyse Riechen.....	101
Tabelle 68: Identifizierte Parameter Sensorische Analyse Schmecken und Tasten.....	103
Tabelle 69: Vollständigkeit der Parameter in der sensorischen Analyse.....	104
Tabelle 70: Annäherung an die Datenmenge eines theoretischen Datensatzes.....	108
Tabelle 71: Realisierbarkeit im Prozessschritt Getreideanbau und -ernte.....	113
Tabelle 72: Realisierbarkeit im Prozessschritt Mälzen.....	116
Tabelle 73: Realisierbarkeit des Prozessschritts Maischen.....	117
Tabelle 74: Realisierbarkeit des Prozessschritts Würzebereitung.....	119
Tabelle 75: Realisierbarkeit des Prozessschritts Gärung.....	121
Tabelle 76: Realisierbarkeit des Prozessschritts Filtration, Stabilisierung und Abfüllung.....	122

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Tabelle 77: Realisierbarkeit des Prozessschritts Sensorische Analyse	123
Tabelle 78: GPT-4 Modell Kenngrößen	123
Tabelle 79: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Getreideanbau und -ernte	126
Tabelle 80: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Mälzen	129
Tabelle 81: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Maischen	130
Tabelle 82: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Würzebereitung	132
Tabelle 83: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Gärung	134
Tabelle 84: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Filtration, Stabilisierung und Abfüllung	135
Tabelle 85: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Sensorische Analyse	136
Tabelle 86: Initiale Kostenabschätzung für die Entwicklung einer Künstlichen Intelligenz für Bierproduktion	137
Tabelle 87: Annahmen zur ersten Kostenschätzung	137

1 Einleitung

Im September 2024 war es so weit, ich musste mich entscheiden welches Thema ich zur Abschlussarbeit für das Master of Beer Programm ausarbeiten will. Als Informatiker habe ich mich in den letzten 10 Jahren hauptsächlich mit Digitalisierung beschäftigt und dabei zahlreiche Großunternehmen unterstützt Messpunkte zu identifizieren und diese für einen Zweck zu nutzen.

Die Idee dieses Thema aufzugreifen, kam beim Master of Beer Seminar „Holzfasslagerung“ im Stiegl-Gut Wildshut mit Jens Luckart, Kursleiter, und Markus Trinker, Kreativ-Braumeister Stieglbrauerei, als Gastredner. Markus Trinker zeigte uns den Lagerkeller für die Holzfassreifung in einem alten, zufällig gefundenen Tunnel. Über die Frage, wie bzw. ob man weiß, wie lange die Biere hier liegen müssen, um genau den gewünschten Geschmack vom Fass und der Vorbelegung zu erhalten, wurde geantwortet „Durch die Erfahrung der Brauer, aber nicht jedes Fass wird gleich gut oder überhaupt gut“ (Markus Trinker).

Aufgrund dieser Aussage begann ich zu überlegen, wie man Informationen aus dem Fass digitalisieren kann und darüber hinaus, wie man diese weiter nutzen kann. Aufgrund eines zu dieser Zeit aktuellen Projekts mit dem Thema Künstliche Intelligenz (KI) habe ich noch im selben Kurs mit Jens Luckart das Thema Digitalisierung und KI in der Bierproduktion angesprochen.

Nach einigen Wochen der Nachforschung habe ich festgestellt, dass es sehr wenig Information zum Thema Digitalisierung in der Bierproduktion gibt. Weltweit arbeiten zahlreiche Unternehmen und Forschungszentren daran, aber die Informationen werden öffentlich in erster Linie zum Vergleich genutzt. Einen automatisierten Nutzen dieser Informationen, wie die Abbildung des gesamten Produktionsprozesses, konnte ich im Internet nicht finden. Mit einer KI über den gesamten Bier-Produktionsprozess, sollte es möglich sein, Biere zu entwickeln, die den Geschmack des Trinkers treffen. Diese KI soll es ermöglichen, eine Vielfalt von Bieren zu kreieren. Qualitätssicherung und Wiederholbarkeit wird damit realisierbar ist aber als Biersommelier für mich eher zweitrangig.

Aus diesem Grund habe ich die Struktur der Abschlussarbeit in Absprache mit Doemens abgestimmt und eine Freigabe für die Durchführung dieser Arbeit erhalten.

2 Ausgangssituation und Hypothesen

Während der Ausbildung und als Diplom Biersommelier hat man unzählige Führungen durch Brauereien, Hopfenanbauunternehmen, Hopfenbanken, Gerste-, Weizen- und verschiedenste Kornbauern, Mälzereien, Brauereianlagenhersteller, Brauereiausrüstungshersteller, Holzfasshersteller und -händler, und Unternehmen, die im Bereich Bierproduktion tätig sind. In allen genannten Bereichen gibt es Unternehmen mit teilweise Jahrhunderte alten bis hin zu top modernen Geräten, um das Bier zu produzieren. Die Biere, die zum Vertrieb oder zur Verkostung freigegeben werden, sind üblicherweise das Beste, das die Brauer und ihre Zulieferer erzeugen können.

Nichtsdestotrotz kommt es vor, dass ein Sud oder ein Bier nicht die gewünschte Qualität, oder nicht eine vom Brauer gewünschte Eigenschaft erreicht. Es stellt sich die Frage, wie kann ein über Jahrtausende entwickelter Prozess immer noch zu Fehlern führen, die nicht von einem offensichtlichen, erklärbaren, meist menschlichen Versagen herrühren.

1. *Problemannahme Testzeitpunkt:* Bei den Führungen durch die verschiedenen Unternehmen im Bereich Bierproduktion sahen wir immer zahlreiche Qualitätskontrollen, sensorische Tests und Laboruntersuchungen und diverse andere Testverfahren. Doch jeder dieser Tests gilt nur für den Moment der Entnahme der Probe und schon nicht mehr zum Zeitpunkt der Durchführung des Tests, da diese durchgeführt werden, während der aktuelle Produktionsschritt weiterläuft.
2. *Problemannahme Vollständigkeit des Gesamtbildes:* Alle Tests und Messkriterien einzeln betrachtet, decken immer nur eine Perspektive auf den Inhalt des jeweiligen Prozessschritts ab. Mit einer Aussage über die enthaltenen Grad Plato kann zum Beispiel keine Aussage über den Geschmack, die Schaumstabilität oder die Farbe des Bieres im jeweiligen Zustand getroffen werden. Um ein vollständiges Bild zu erhalten, müssten alle Bestandteile zum jeweiligen Zeitpunkt und Prozessschritt identifiziert, gemessen und gemeinschaftlich betrachtet werden.
3. *Problemannahme Vollständigkeit des Wissens:* Seit Louis Pasteur 1857 die Hefe identifiziert hat, wurde der Gärprozess chemisch bis ins letzte Detail analysiert. Alle bekannten Gärprodukte und Gärnebenprodukte, der derzeit bekannten Hefen, sind identifiziert und können bestimmt werden. Aber die Hefezucht entwickelt sich laufend weiter und die Hefen werden in Richtungen gezüchtet, die man heute noch nicht kennt. Das beste Beispiel ist die neueste Hefe von Carlsberg, die sehr wenig bis keinen Alkohol während der Gärung erzeugt. (Carlsberg Group, 2019). Ein zweites Beispiel ist der Hopfen am Feld, der jährlich unterschiedlichen Wachstumsbedingungen hat, wie z.B. ein hoher Anteil von Bestäubung oder Krankheiten. Jeder Faktor beeinflusst die Hopfenqualität. Die Hopfenqualität wird durch Hopfenbanken wie z.B. BarthHaas gemessen und jährlich bewertet. Was muss verändert werden, um die Hopfenqualität von einem Jahr mit der Hopfenqualität eines anderen Jahres zum selben Biergeschmack zu bringen? Gibt es Möglichkeiten diesen Hopfenqualitätsunterschied mittels anderer Prozessschritte, anderer Zutaten auf gleicher Geschmacksebene zu halten? Ist dieses Wissen bereits vorhanden oder ist die Kompensation ausschließlich durch die Erfahrung der Brauer möglich?

Die oben angeführten Problemannahmen werden in dieser schriftlichen Arbeit für einzelne Prozessschritte, von der Züchtung der Gerste bis hin zur Abfüllung durchleuchtet und mit den heutigen technischen Möglichkeiten der Digitalisierung und künstlichen Intelligenz betrachtet, um für folgende Hypothesen eine Aussage treffen zu können:

Hypothese 1:

Die durchgängige, vollständige Kontrolle aller bekannten Parameter mit der heutigen Technologie kann die Qualität des Bieres in der Brauerei optimieren.

Hypothese 2:

Das sensorische Gesamtbild und dessen Herstellung kann mit heutiger Technologie kontrolliert und überwacht werden.

Hypothese 3:

Bei Veränderung der Zutaten oder des Prozesses kann das sensorische Gesamtbild des Bieres mit heutiger Technologie bewahrt werden.

Hypothese 4:

Mit dem entsprechenden Wissen über den Bierproduktionsprozess und der heutigen Technologie kann ein beliebiges Bier entworfen und hergestellt werden.

Um die oben angeführten Hypothesen zu validieren, werden folgende Prozessschritte betrachtet:

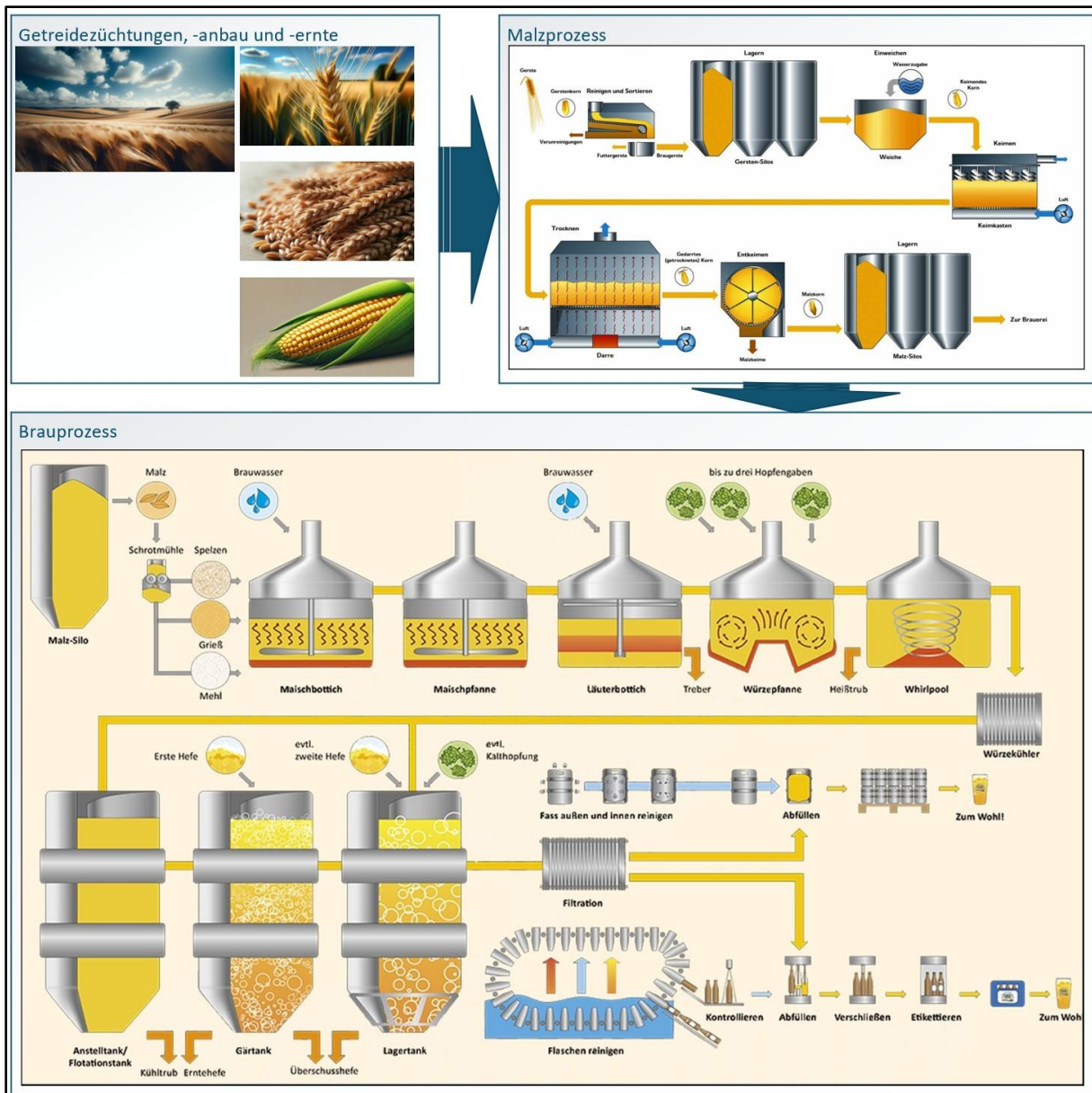


Abbildung 1: Prozessschritte zur Validierung der Hypothesen

(Schönramer Brauerei, 2024)

Das Augenmerk dieser schriftlichen Abschlussarbeit liegt auf dem Produkt Bier und nicht auf den Geräten, Anlagen, Maschinen, Steuerungen und Werkzeugen die nötig sind, um die Produktion zu steuern, um Bier zu produzieren.

Diese schriftliche Abschlussarbeit erhebt nicht den Anspruch, eine vollständige Liste aller möglichen Anwendungsfällen für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion darzustellen.

3 Geschichte und Begriffsbestimmungen

Bevor die ersten Fallbeispiele definiert und analysiert werden, wird in diesem Abschnitt der zeitliche Rahmen der Innovationen von Bier und Digitalisierung beschrieben und ihre jeweiligen Höhepunkte verglichen. Anschließend werden die grundlegenden technischen Begriffe erklärt, um so die Fallbeispiele veranschaulichen zu können.

3.1 Von zufälligen Entdeckungen zur Genauigkeit der Digitalisierung

Die derzeit, nachweisliche Geschichte des Bierbrauens begann zwischen 10.000 und 5.000 vor Christus im Gebiet des südlichen Mesopotamiens (heute Irak) durch die Sumerer. (Schweizer Brauerei-Verband, 2024) Seit dieser Zeit wurde das Brauwesen von wesentlichen regulativen und technischen Errungenschaften begleitet:

Zeitpunkt	Errungenschaft	Themengebiet
Ca. 5000 v. Chr.	Von den Sumerern wurden erstmals Bierrezepte und Brauanleitungen auf Tontafeln dokumentiert. (Schweizer Brauerei-Verband, 2024)	Regulierung
Ca. 3000 v. Chr.	Zu Zeiten von König Narmer betrieben die Ägypter die erste bekannte Großbrauerei in Abydos mit einem Ausstoß von etwa 224hl. In zahlreichen tönernen Bottichen wurde für die ersten Schritte der Bierherstellung Getreide und Wasser aufgeköcht (Maischbottich, Läuterbottich und Würzpfanne). (Dönges, 2021)	Mechanik (Thermodynamik)
1750 v. Chr.	In Hammurabi's Gesetzen werden die ersten Rahmenbedingungen für Brauer in den Paragraphen §108 und §111 in Mesopotamien gesetzlich geregelt. (Hammurabi, 1750BC)	Regulierung
23.04.1516	Das Reinheitsgebot wird von den bayrischen Herzögen Willhelm IV. und Ludwig X. im Rahmen einer Landesordnung für das Herzogtum Bayern erlassen. Hier wurde festgehalten, dass zur Bierherstellung nur Wasser, Malz und Hopfen verwendet werden darf. (Deutscher Brauer Bund e.V., 2024)	Regulierung
1748	Jean-Antoine Nollet entdeckt in einem Experiment mit einer Schweineblase als Membran, dass Lösungsmittelmoleküle aus Wasser mit wenig gelösten Stoffen durch die Blasenwand in eine höhere Konzentration gelöster Stoffe aus Alkohol fließen können. (Dr. Nähring Water Treatment GmbH, 2022)	Chemie (Verfahrenstechnik)
1857	Der Franzose Louis Pasteur konnte mit Hilfe eines Mikroskops nachweisen, dass Hefe aus lebenden Zellen besteht. Damit konnte er nachvollziehen, wie der Gärprozess abläuft und welche Rolle der Hefe zukommt. (Klipfel Hefe AG, 2017)	Chemie (Biochemie)
1873	Carl Paul Gottfried Linde erfindet die erste Kältemaschine. Mit Hilfe seines Linde-Verfahrens konnte er in großem Maß Luft verflüssigen. (Thömmes, Bierakademie Bayern, 2023)	Mechanik (Thermodynamik)
1877	In Anton Dreher's Brauerei in Triest wird die erste Kältemaschine für eine Brauerei in Betrieb genommen um auch im Sommer Bier produzieren zu können. Bis zu diesem Zeitpunkt war das nur durch die Verwendung von Eis möglich. (Thömmes, Bierakademie Bayern, 2023)	Mechanik (Thermodynamik)

Zeitpunkt	Errungenschaft	Themengebiet
12.11.1883	Emil Christian Hansen isoliert erstmalig eine einzelne Hefezelle von „Saccharomyces cerevisiae“ in den Carlsberg Laboratorien in Kopenhagen. An diesem Tag wurde der erste Sud mit Reinzuchthefer angestellt. Die Hefereinzucht war erfunden. (Thömmes, Brauwelt, 2021)	Chemie (Biochemie, Mikrobiologie)
1980	Umkehrosmoseanlagen wurden erstmals zur Verbesserung der Wasserqualität und zur Entalkoholisierung eingesetzt. (Dr. Nährung Water Treatment GmbH, 2022)	Chemie (Verfahrenstechnik)

Tabelle 1: Errungenschaften der Bierproduktion

An dieser zeitlichen Abfolge erkennt man, dass bis ins 19. Jahrhundert die Produktion des Bieres massiven Einfluss auf Innovation und Technik, im Besonderen in die Thermodynamik und Chemie, hatte.

Parallel und unabhängig zur Produktion des Bieres, entwickelt sich seit ca. 1100 vor Christus aus der Mathematik, der Physik und der Elektrotechnik das Fachgebiet der Informatik.

Zeitpunkt	Errungenschaft	Themengebiet
Ca. 1100 v. Chr.	Im indo-chinesischen Kulturraum entwickeln sich einfache Rechengeräte wie der Abakus und später der Rechenschieber. (Zeller, 2012)	Mathematik (Arithmetik)
Ca. 800	In China werden richtungsweisende Magnetnadeln für die Navigation genutzt, der Vorläufer des Kompasses. Das erste, dokumentierte Messgerät ist entdeckt. (Compassipedia, 2024)	Mechanik (Kinematik, Dynamik)
1642	Blaise Pascal erfindet die „Pascaline“, eine mechanische Rechenmaschine für sechsstellige Addition und Subtraktion. (Krüger, 2003)	Mechanik (Mechanische Rechenmaschinen)
1801	Joseph-Marie Jacquard erfindet gestanzte Platten, die Vorläufer der Lochkarten, zur Steuerung von mechanischen Webstühlen. Die erste Programmsteuerung damit ein Prozess automatisch abläuft. (Krüger, 2003)	Mechanik (Mechanische Rechenmaschinen)
Zwischen 1800-1861	Die „British Association for the Advancement of Science (B.A.)“ definiert das elektromagnetische Einheitensystem für Volt, Ohm,.... (ETHW, 2012)	Physik (Elektrodynamik)
1937	Konrad Zuse entwickelt eine mechanische Rechenmaschine mit einem Prozessor mit Datenflussarchitektur. (Raúl Rojas, 2013)	Mechanik (Mechanische Rechenmaschinen)
1937	Alex Reeves erfindet die Pulse Code Modulation, mit der Telefongespräche von analogen Signalen in eine digitale Form umgewandelt werden. (John Vardalas, 2012)	Elektrotechnik (Signalverarbeitung)
1954	Epcos Engineering stellt den ersten kommerziell verfügbaren Analog-Digital-Wandler (ADC) vor. Der erste Sensor ist am Markt verfügbar. (Oed, 2022)	Elektrotechnik (Signalverarbeitung)
1956	Die Dartmouth-Konferenz beschäftigt sich „Mit der Vermutung, dass prinzipiell jeder Aspekt des Lernens – oder jede andere Eigenschaft der Intelligenz – so genau beschrieben werden kann, dass eine Maschine ihn simulieren kann“ und stellt damit die Geburtsstunde des Begriffs „künstliche Intelligenz“ dar. (Kloiber, 2021)	Informatik

Zeitpunkt	Errungenschaft	Themengebiet
1958	Jack Kilby von Texas Instruments erfindet den integrierten Schaltkreis (IC), der heute unter dem Begriff „Chip“ bekannt ist. (Texas Instruments, 2024)	Elektrotechnik (Elektronik)
1966	Der deutsch-amerikanische Informatiker Joseph Weizenbaum vom Massachusetts Institute of Technology erfindet ein Computerprogramm, das mit Menschen kommuniziert. Der erste Chatbot ist erfunden. (Bosch, 2024)	Informatik
1969	Die Advanced Research Projects Agency (ARPA) entwickelt das ARPANET, den Vorläufer des heutigen Internets in dem 4 Rechner verbunden wurden. (Braun, 2010)	Elektrotechnik (Informationstechnik)
Ab 1970	In dieser Zeit wurde erstmalig analoge Messtechnik um analog/digital Umwandler aus der Signalverarbeitung und Rechner mit integrierten Schaltkreisen der Elektrotechnik erweitert. (Smith, 2024)	Physik, Mechanik, Elektrotechnik
1972	„MYCIN“ ein Expertensystem wird an der Stanford Universität von Ted Shortliffe entwickelt. Ein Computerprogramm, das das Wissen eines bestimmten Fachgebietes durch Formeln, Regeln und eine Wissensdatenbank bündelt. In diesem Fall wurde künstliche Intelligenz zur Unterstützung bei der Diagnose und Therapie genutzt. (Bosch, 2024)	Informatik
1974	Das Xerox Palo Alto Research Center bringt den ersten Arbeitsplatzrechner mit Bildschirm, den Xerox Alto auf den Markt. (C.P. Thacker, 1979)	Elektrotechnik (Informationstechnik)
1982	David Nichols, ein Student der Carnegie Mellon University School of Computer Science, erstellt eine dauerhafte Kommunikation mit einem Coca-Cola Automaten, um festzustellen, ob der Automat leer ist. Das Internet der Dinge (IoT) war erfunden. (Carnegie Mellon University, 2023)	Informatik
1986	Das Unternehmen National Instruments Corporation bringt elementare Komponenten der Messtechnik und das Programm LabVIEW auf den Markt. Damit wird Messtechnik für den Hausgebrauch verfügbar. (Smith, 2024)	Physik, Mechanik, Elektrotechnik,
1989	Tim Berner-Lee versucht Informationen mit anderen Wissenschaftlern zu teilen und entwickelt das World Wide Web am CERN. (CERN Accelerating Science, 2024)	Informatik
1990	John Mashey, einer der leitenden Ingenieure bei Silicon Graphics, benutzt den Begriff „Big Data“ um die 4 Dimensionen zu erklären, welche eine neue, bis dahin unbekannte Herausforderung der IT-Branche darstellt. Im Schnitt verdoppelt sich das gespeicherte Wissen alle 2 Jahre. <ul style="list-style-type: none"> • Volume (Datenvolumen) • Velocity (Geschwindigkeit mit dem Daten generiert werden) • Variety (Unterschiedliche Datentypen und -quellen) • Veracity (Echtheit der Daten) (Lohr, 2013)	Informatik
1996	Bisher wurden Daten nur in Datenbanken gesammelt. Eine Initiative zur Wissensgenerierung aus Datenbanken führte bei einer Konferenz zu Erfindung des Begriffs „Data Science“. (Press, 2013)	Informatik

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Zeitpunkt	Errungenschaft	Themengebiet
1997	Die künstliche Intelligenz „Deep Blue“ der Firma IBM bezwingt den amtierenden Schachweltmeister Garry Kasparov in einem Turnier. (Bosch, 2024)	Informatik
2006	Amazon Web Services (AWS) bietet IT-Infrastruktur über das Web an. Diese prägte den Begriff des „Cloud Computing“. (Amazon Web Services, 2024)	Informatik
2011	Apples „Siri“ kommt als künstliche Identität, mit künstlicher Intelligenz basierend auf den Daten („Big Data“) welche auf „Cloud Computing“ Diensten gehalten werden, mittels Smartphones auf den Massenmarkt. (Bosch, 2024)	Informatik
2022	Das Unternehmen OpenAI veröffentlicht sein „Generative Pre-trained Transformer“ (GPT) System, das basierend auf Wissen aus dem Internet sich selbst trainierte. ChatGPT ist ein Chatbot der GPT nutzen kann. (OpenAI, 2024)	Informatik

Tabelle 2: Errungenschaften der Informatik

Im folgenden Zeitstrahl werden die oben angeführten Innovationsschritte von der Bierproduktion links und von der Informationstechnologie rechts aufgelistet:

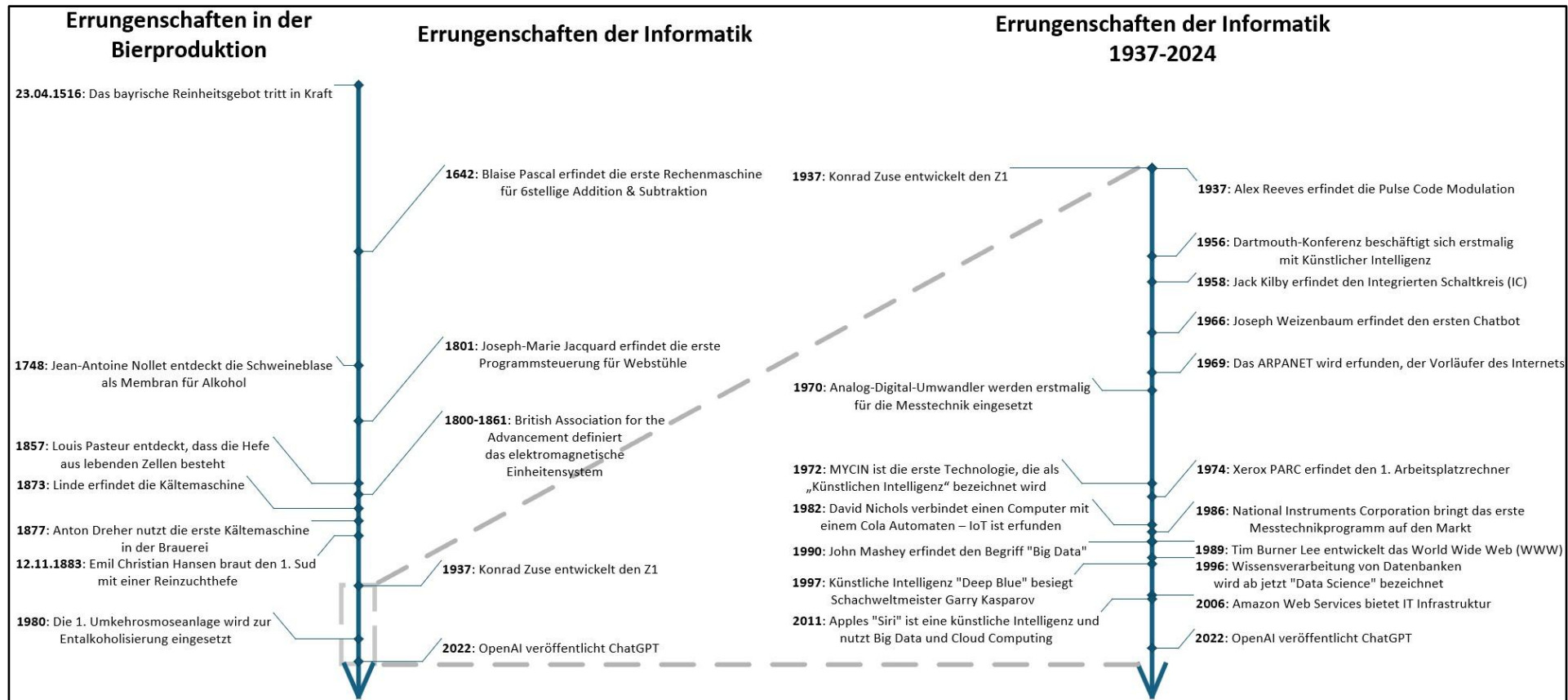


Abbildung 2: Zeitstrahl der Bier und Informatik Innovationen ausgehend von der Neuzeit

Im folgenden Vergleich der Errungenschaften von Bierproduktion und Informationstechnologie über die Jahrhunderte der Neuzeit erkennt man, dass die Bierproduktion ihre Innovationshöhepunkte im 19. Jahrhundert und im Speziellen von 1857 bis 1883 hatte. Die Informationstechnologie startete ihre Zeit der Innovationshöhepunkte 1937. Im 21. Jahrhundert werden die Abstände zwischen den Errungenschaften der Informationstechnologie länger, dennoch scheint die Zeit der Innovationshöhepunkte noch nicht beendet zu sein.

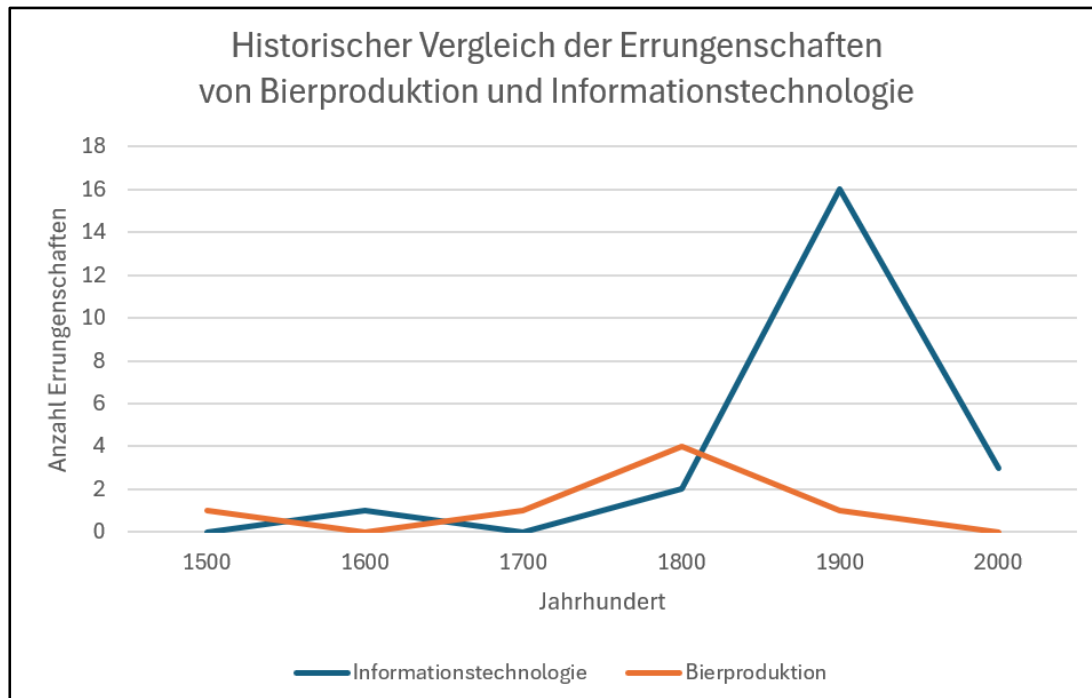


Abbildung 3: Historischer Vergleich der Errungenschaften von Bierproduktion und Informationstechnologie

3.2 Begriffsbestimmungen und Erklärungen der Informationstechnologie

Um die folgenden Anwendungsbeispiele klar und verständlich darstellen zu können, werden nun wesentliche technische Begriffe erklärt.

3.2.1 Digitalisierung

Digitalisierung bezeichnet den Prozess der Umwandlung von analogen Informationen und Prozessen in digitale Formate. Der Begriff umfasst die Nutzung von digitalen Technologien, um Daten zu erfassen, zu speichern, zu verarbeiten und zu übertragen.

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wird der Begriff *Digitalisierung* für die folgenden beiden Bereiche genutzt:

- Umwandlung von analoge in digitale Information.
- Nutzung der digitalen Informationen, um Prozesse zu automatisieren, dieser Bereich wird auch als „Digitale Transformation“ bezeichnet.

Typische Beispiele in der Bierproduktion für die Anwendung sind:

- Den Grad Plato der Ansatzwürze für einen spezifischen Sud in einer Datenbank zu speichern.

- Den Grad Plato des endvergorenen Bieres für einen spezifischen Sud in einer Datenbank zu speichern.
- Den Alkoholgehalt eines spezifischen Suds in einer Datenbank zu speichern.

Der wesentliche Unterschied zwischen ursprünglicher *Digitalisierung* und Digitaler Transformation ist, dass in der Digitalisierung EIN analoges Merkmal digital erfasst wird während in der Digitalen Transformation VIELE digital erfasste Merkmale gemeinsam genutzt werden.

Typische Beispiele in der Bierproduktion für die Nutzung der digitalen Transformation, um Prozesse zu automatisieren:

- Speichern, lesen und befolgen eines Rezepts aus einer Datenbank, um die Arbeitsschritte für Wiederholungen zu nutzen.
- Kontrolle der Unterlagen der Qualitätskontrolle einer Brauerei durch die Lebensmittelpolizei (Österreich).
- Steuerung der Brauanlage basierend auf Rezepten aus einer Datenbank.

3.2.2 Analog-Digital-Wandler oder Analog-Digital-Umsetzer

Ein Analog-Digital-Wandler, auch Analog-Digital-Umsetzer (ADU) genannt, wandelt ein analoges, stetiges Eingangssignal (z.B. Sprache von einem Mikrofon oder Messwerte eines Sensors) in digitale, diskrete Werte um. Dabei sind zwei Hauptfaktoren entscheidend:

- Die Bitbreite des Wandlers bestimmt die vertikale Auflösung. Beispielsweise wird bei einem 4-Bit-ADU der gesamte Eingangssignalebereich auf $2^4 = 16$ digitale Werte verteilt. D.h. jegliches Eingangssignal kann umgewandelt werden in einen Wert von 1-16. Heute sind Bitbreiten von 18 bis 24 Bit und höher üblich.
- Die Abtastrate, manchmal auch Abtastfrequenz genannt, bestimmt die horizontale Auflösung eines Signals. Je mehr Werte pro Zeiteinheit (in der Regel in Samples pro Sekunde S/s angegeben) vom Analog-Digital-Wandler erfasst werden, desto schnellere Signale können aufgezeichnet werden. Allerdings steigt dabei auch der Speicherbedarf, weshalb die Abtastrate sorgfältig gewählt werden muss. Je nach Bereich sind Abtastraten von einmal pro Minute, wenigen Samples pro Sekunde (z.B. für Temperaturen) bis zu mehreren Millionen Samples pro Sekunde für sehr dynamische Signale (wie z.B. von Explosionen) üblich.

(Kistler Group, 2024)

Ein Beispiel in der Bierproduktion für die analoge-digitale-Umwandlung von Stammwürzeinformation ist die iSpindel ([iSpindle Documentation](#) | [iSpindel](#)), welche während des Gärprozesses Grad Plato und Temperatur in verschiedenen Abtastraten speichert.

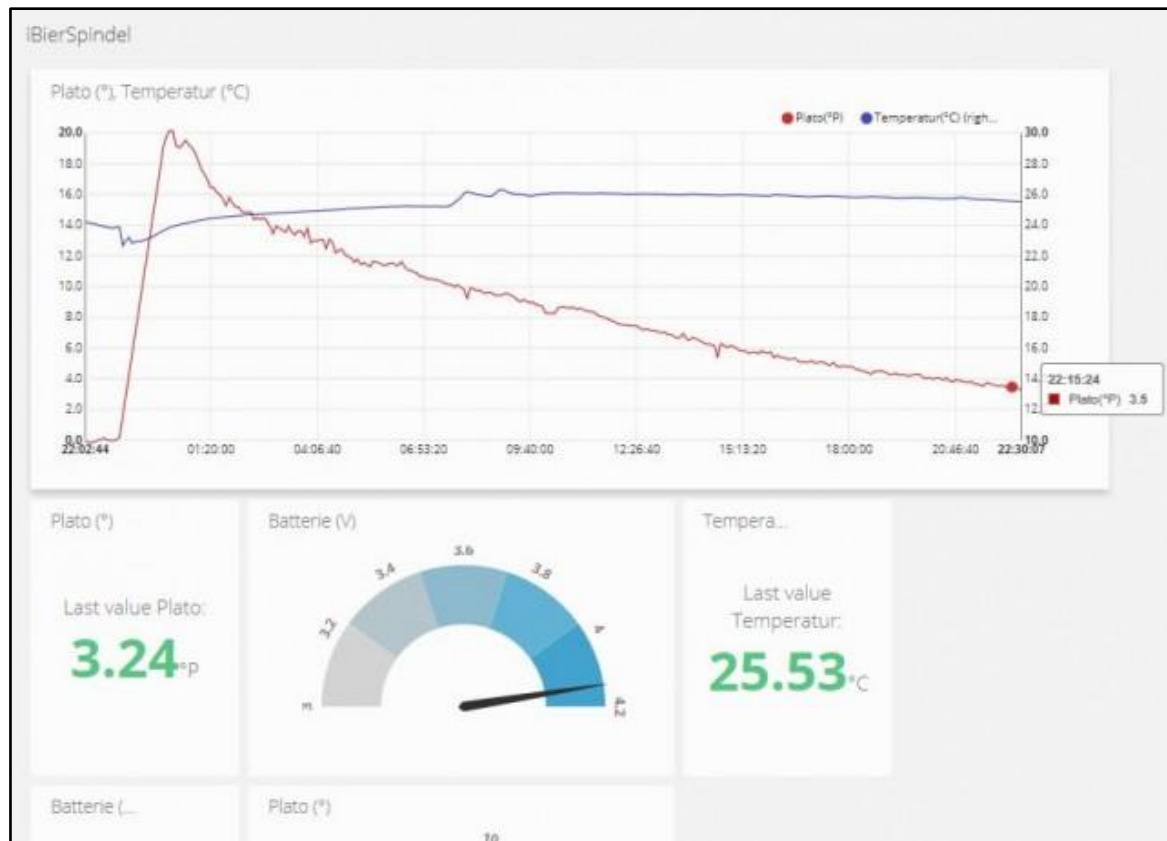


Abbildung 4: iSpindel Aufzeichnungen einer Gärung

3.2.3 Internet der Dinge - Internet of Things (IoT)

David Nichols, der 1982 als Student überprüft hat, ob der Cola Automat noch Cola hat, und sein Team bei Microsoft definieren Internet of Things folgendermaßen: „Das Internet der Dinge, oder IoT, ist der Teil des Internets, in dem intelligente Geräte und andere vernetzte Geräte online sind. Diese Geräte können Daten sammeln, speichern oder miteinander teilen. Smartphones, Smart-TVs, Tablets, vernetzte Autos sind Beispiele für Geräte, mit denen das Internet der Dinge kommunizieren kann.“ (Microsoft, 2022)

Im IoT werden viele Geräte und deren Informationen verbunden, um Wissen zu erhalten, zu visualisieren und gegebenenfalls zu steuern. Im Bereich der Digitalisierung wird IoT häufig genutzt, um analog umgewandelte digital Information von den Geräten, siehe Abschnitt 3.2.2 „Analog-Digital-Wandler oder Analog-Digital-Umsetzer“, in einem Rechenzentrum oder der „Cloud“ zu speichern, um dort im Rahmen von digitalen Prozessen verarbeitet zu werden. Diese Prozesse können Änderungen ergeben, die mittels IoT wieder an die Geräte als Steuerbefehle übermittelt werden.

Abhängig von der Brauerei wird auch heute schon IoT in der Bierproduktion genutzt. In modernen Brauanlagen ist IoT verbaut und wenige Großbrauereien nutzen es in vielen Schritten in der Bierproduktion.

3.2.4 Cloud Computing oder Cloud

Eines der führenden Unternehmen im Bereich *Cloud Computing* ist Microsoft. *Cloud Computing* wird folgendermaßen definiert: „Beim *Cloud Computing* handelt es sich um das Mieten von Computing Ressourcen (z. B. Speicherplatz) über das Internet auf den Computern eines anderen Unternehmens. Das Unternehmen, das diese Dienste bereitstellt, wird als Cloudanbieter bezeichnet.“

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Der Cloudanbieter ist für die physische Hardware verantwortlich, die für das Ausführen der Arbeiten notwendig ist. Außerdem hält er diese auf dem neuesten Stand. Die angebotenen Computing-Dienste unterscheiden sich je nach Cloudanbieter. Allerdings umfassen sie in der Regel:

- Computerleistung, wie etwa Linux-Server oder Webanwendungen
- Speicher, wie etwa Dateien und Datenbanken
- Netzwerke, wie etwa sichere Verbindungen zwischen dem Cloudanbieter und der jeweiligen Organisation
- Analytics, wie etwa die Visualisierung von Telemetrie- und Leistungsdaten

Das Ziel von *Cloud Computing* besteht darin, die Unternehmensführung zu vereinfachen und effizienter zu gestalten, egal ob für kleine Start-ups oder große Konzerne, und um sich auf ihr eigenes Geschäftsmodell konzentrieren zu können.“ (Ronsdorf, Microsoft, 2020)

In der Bierproduktion wird *Cloud Computing* nur in einzelnen Mittel- und Großbrauereien aktiv verwendet, wie z.B. bei Carlsberg ([Carlsberg Group follows a recipe for success with Microsoft Azure, SAP, and a cloud-first strategy | Microsoft Customer Stories](#)). In Hobby- und Kleinbrauereien wird *Cloud Computing* eher passiv, im Rahmen von *Cloud* angebundenen Komponenten genutzt. Eine aktive Integration der Brauanlagen, Braugeräten oder Messsystemen in die Cloud ist eher die Ausnahme in Brauereien.

3.2.5 Big Data

1990 hat John Mashey, Chef Wissenschaftler bei Silicon Graphics, den Begriff *Big Data* in einem Gespräch erklärt, in dem er über das Problem der großen Datenmengen gesprochen hat. (Lohr, 2013) Mit dem Internet und der Umwandlung von analoger in digitale Information und deren Aufbewahrung entstand die Herausforderung diese Daten zu speichern, Daten zu glauben und wieder zu finden. Mashey definierte die Herausforderung der damaligen Zeit in 4 Dimensionen und definierte den Überbegriff *Big Data*:

- Volume (Datenvolumen) - Die ursprüngliche Problematik war die neu generierten Informationen auf physischen Geräten wie Kassetten, Disketten, Bändern, Festplatten, ... zu speichern.
- Velocity (Geschwindigkeit mit dem Daten generiert werden) – Die ursprüngliche Problematik war ein Wettkampf zwischen Einkauf und IT, um schnellstmöglich ausreichend Speicherkapazität zur Verfügung zu haben, um die anfallenden Datenmengen speichern zu können.
- Variety (Unterschiedliche Datentypen und -quellen) – Die ursprüngliche Problematik war es die Daten zu erfassen, zu vereinheitlichen, um diese gemeinsam verarbeiten zu können. Damit entstanden neuerlich Datenquellen, die wiederum mit anderen Daten verknüpft werden konnten. D.h. die Daten wurden dadurch veredelt und häufig mehrmals gespeichert.
- Veracity (Echtheit der Daten) – Die ursprüngliche Problematik war, dass die Daten nicht schnell genug gespeichert werden konnten. Häufig waren die Daten veraltet und nicht mehr gültig oder es wurden unvollständige Daten genutzt, die nur einen Teil der benötigten Information enthielten.

Mit IoT und Cloud Computing können heute die ursprünglichen Probleme von *Big Data* gelöst werden. Traditionelle Branchen und Unternehmen, die am Beginn der Digitalisierung stehen, wollen typischerweise Daten nicht außer Haus geben und betreiben ihre eigenen Rechenzentren. Die

Konsequenzen kommen im Laufe der Digitalisierung und machen sich in den oben beschriebenen 4 Dimensionen von *Big Data* erkennbar.

In der doch sehr traditionellen Braubranche haben nur wenige Unternehmen eine auffallend hohe Digitalisierung. Öffentlich dokumentierte Brauereien, die *Big Data* nutzen sind entweder Großbrauereien oder Start-ups.

3.2.6 Data Science

Aufgrund der großen und schnell wachsenden Datenmengen siehe Abschnitt 3.2.5 „Big Data“, wurde es mit der Zeit immer aufwändiger, Wissen aus den gesammelten Daten zu erlangen. Hat man um 1900 noch ca. 100 Jahre benötigt, um das Wissen zu verdoppeln, waren es um 1945 nur noch 25 Jahre bis zur nächsten Verdoppelung. Um 1982 verdoppelte sich das Wissen bereits alle 13 Monate. Heute geht man davon aus, dass sich das globale Wissen etwa alle 12 Stunden verdoppelt. (Carroll, 2022)

Um Wissen zu gewinnen, wurde eine neue Wissenschaft eingeführt, mit welcher aus Daten Wissen generiert wird, *Data Science*. *Data Science* ist die wissenschaftliche Untersuchung von Daten, um Wissen zu gewinnen. Auf diesem Gebiet werden mehrere Disziplinen kombiniert, um Wissen aus umfangreichen Datenmengen (Datasets) zu extrahieren und dadurch fundierte Entscheidungen und genaue Vorhersagen zu treffen. Wissenschaftliche Fachkräfte für Daten, Data Analysts, Data Architects, Data Engineers, Statistiker, Fachkräfte für die Datenbankverwaltung und Business Analysts arbeiten alle im Fachbereich Data Science.

Der Bedarf an Data Science wächst schnell, weil das Datenvolumen exponentiell zunimmt und Unternehmen stärker von Analysen abhängig sind, um ihren Umsatz zu steigern und das Innovationsdenken zu fördern. Durch die zunehmende Digitalisierung geschäftlicher Interaktionen entstehen beispielsweise mehr Daten und damit neue Chancen, um Erkenntnisse daraus abzuleiten. Auf diese Weise können Lösungen gezielt personalisiert, Dienstleistungen verbessert, die Kundenzufriedenheit erhöht, neue und erweiterte Produkte entwickelt sowie Umsätze gesteigert werden. Darüber hinaus besitzt Data Science in der Geschäftswelt das Potenzial, einige der weltweit größten Herausforderungen zu lösen. (Microsoft, 2024)

Ein sehr berühmtes Beispiel von Data Science in der Brauwelt ist das Londoner Startup IntelligentX, das 4 Biere (4 verschiedene Bierstile) mit der jeweiligen Rezeptversion 0 auf den Markt gebracht hat. Jede Flasche Bier hat einen QR-Code, mit dem eine Kundenumfrage durchgeführt wird. Basierend auf den Daten der Kundenumfragen wurden mittels Data Science die Rezeptur für die nächste Version verändert. Ziel ist es für jeden Bierstil das Bier zu erzeugen, das den meisten Konsumenten entspricht. (Matthieu, 2019)

3.2.7 Fuzzy Logic

Fuzzy Logic ist ein Ansatz der Datenverarbeitung, der auf Wahrheitsgraden basiert und nicht auf der üblichen booleschen Logik wahr oder falsch (1 oder 0), mit der moderne Computer arbeiten.

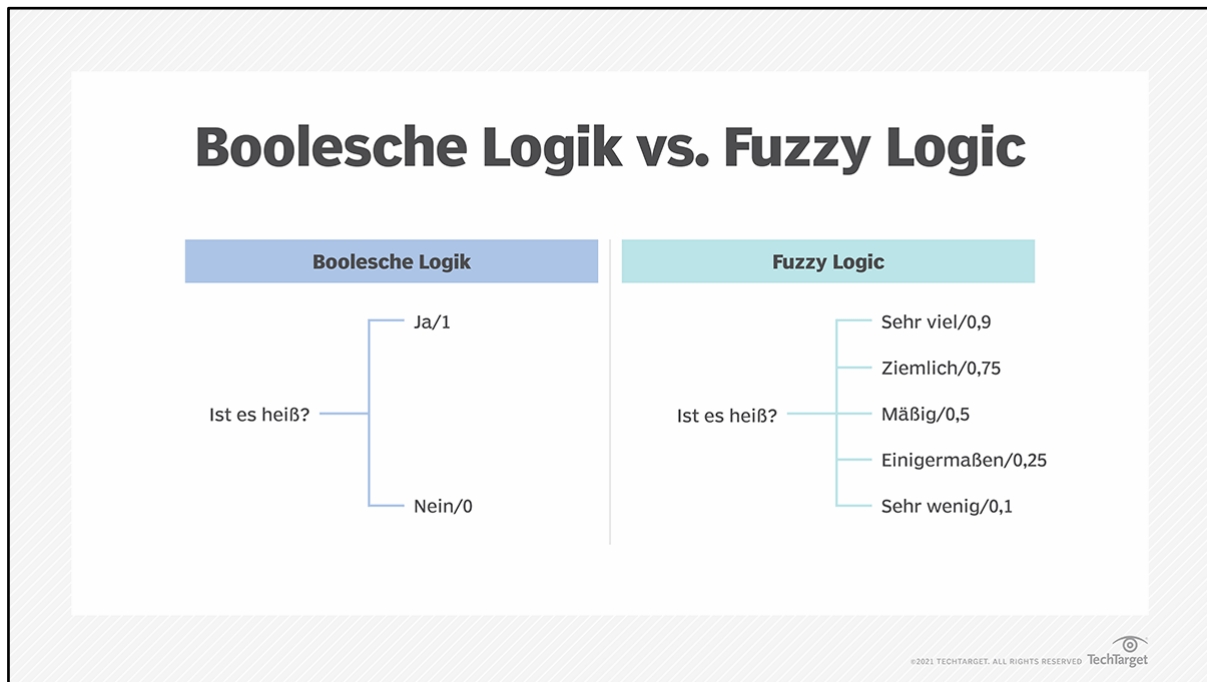


Abbildung 5: Boolesche Logik vs. Fuzzy Logic

Fuzzy Logic ist seit den 1960er Jahren Teil der Systeme für Künstliche Intelligenz und imitiert menschliches Denken und Erkennen. Statt streng binärer Wahrheitsfälle umfasst die *Fuzzy Logic* 0 und 1 als Extremfälle der Wahrheit, aber mit verschiedenen Zwischengraden an Wahrheitsgehalt. (Chai, 2023)

Die *Fuzzy Logic* ist bereits seit den 1970er Jahren in Brauanlagen bei folgenden Tätigkeiten in Verwendung:

- Temperaturregelung – zur präzisen Steuerung der Temperatur während des Brauprozesses.
- Gärungsüberwachung – zur Steuerung und Überwachung der verschiedenen Phasen der Gärung.
- Prozessoptimierung - *Fuzzy Logic* kann verwendet werden, um Unsicherheiten und Variabilität im Brauprozess zu managen. Dies ermöglicht eine bessere Vorhersage und Anpassung der Prozessparameter.
- Energieeffizienz - Durch die Anwendung von *Fuzzy Logic* können Heiz- und Kühlsysteme effizienter betrieben werden, was zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs und der Betriebskosten führt.

3.2.8 Künstliche Intelligenz (KI)

Unter *künstlicher Intelligenz* (KI) verstehen wir Technologien, die menschliche Fähigkeiten im Sehen, Hören, Analysieren, Entscheiden und Handeln ergänzen und stärken.

Beispiele hierfür sind u.a. Microsoft [Cognitive Services](#) – eine Vielzahl an Diensten zur Bild-, Audio-, Text-, Sprach- und Emotionserkennung – oder auch Bots ([Conversational AI](#)), die bestimmte Aufgaben selbstständig ausführen können.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

KI wird häufig als Oberbegriff verwendet, der mehrere Technologien umfasst, darunter [Machine Learning](#), [Deep Learning](#), Computer Vision und Verarbeitung natürlicher Sprache. Diese Technologien, einzeln oder in Kombination, machen die Anwendungen erst intelligent. (Ronsdorf, Microsoft, 2020)

- Bei *Machine Learning* handelt es sich um einen Bereich der Informatik innerhalb der KI, bei dem man einem Computersystem durch Training beibringt, wie es Muster erkennt und darauf basierend Vorhersagen trifft. Die Daten werden immer wieder durch Algorithmen geleitet, wobei jedes Mal andere Eingaben und Rückmeldungen gemacht werden, damit das System lernt und sich während des Trainingsprozesses verbessert. In etwa so, wie man unzählige Male Klaviertonleitern übt, um danach Musik vom Blatt lesen zu können. (Ray, 2024)
- *Deep Learning (DL)* ist eine spezielle Methode der Informationsverarbeitung und ein Teilbereich des *Machine Learnings*. *Deep Learning* nutzt neuronale Netze, um große Datensätze zu analysieren. Die Funktionsweise der künstlichen neuronalen Netze ist in vielen Bereichen vom biologischen neuronalen Netz inspiriert, das das menschliche Gehirn verwendet. Das heißt sie gehen ähnlich vor, wie Menschen es machen würden: Etwas wahrnehmen, darüber nachdenken und eine Schlussfolgerung daraus ziehen. Nur können viel größere Datenberge viel schneller untersucht werden, als es einem Menschen jemals möglich wäre. *Deep Learning* ist die Grundlage für die jüngsten Fortschritte im Bereich der KI. *Deep-Learning-Modelle* sind in der Lage, von sich aus zu lernen. Das passiert, in dem die Systeme das Erlernte immer wieder mit neuen Inhalten verknüpfen und dadurch erneut lernen. Beim eigentlichen Lernvorgang greift der Mensch nicht mehr ein, das Analysieren wird der Maschine überlassen. Das ist auch der entscheidende Unterschied zum *Machine Learning*. Hier greift der Mensch in die Analyse der Daten und den eigentlichen Entscheidungsprozess ein. (Ronsdorf, Microsoft, 2020)
- *Große Sprachmodelle (Large Language Models, LLM)* nutzen Techniken des maschinellen Lernens, um Sprache zu verarbeiten und so die menschliche Kommunikation zu imitieren. Sie basieren auf neuronalen Netzen, das heißt auf Computersystemen, die dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind – eine Art Knotenpunkte und Verbindungen, die Neuronen und Synapsen simulieren. Sie werden anhand einer riesigen Textmenge trainiert, um Muster und Beziehungen in der Sprache zu lernen, die ihnen helfen, menschliche Wörter zu verwenden. (Ray, 2024)
- *Generative KI* nutzt die Leistung großer Sprachmodelle, um Neues zu schaffen und nicht nur Informationen über Bestehendes wiederzugeben oder zu übermitteln. Sie lernt Muster und Strukturen und erzeugt dann etwas, das ähnlich, aber neu ist. Generative KI kann beispielsweise Bilder, Musik, Text, Videos und Code erstellen. Sie kann dazu verwendet werden, Kunst zu schaffen, Geschichten zu schreiben, Produkte zu entwerfen und sogar Ärzten bei Verwaltungsaufgaben helfen. (Ray, 2024)

Forscher arbeiten bereits seit den 1950er Jahren an der Entwicklung von KI. Warum wird die Technologie gerade jetzt wieder so viel diskutiert? Tatsächlich beruht der in den letzten Jahren erzielte Fortschritt größtenteils auf drei Entwicklungen:

- erhöhte Verfügbarkeit und Menge von Daten, siehe Abschnitt 3.2.5 „Big Data“.
- wachsende Leistungsfähigkeit des Cloud-Computings, siehe Abschnitt 3.2.4 „Cloud Computing oder Cloud“.
- leistungsfähige KI-Algorithmen. Dabei sind Algorithmen systematische Handlungsanweisungen, um ein mathematisches Problem zu lösen.

(Ronsdorf, Microsoft, 2020)

Analysiert man die Informationen im Internet, werden folgende Anwendungsfälle für KI in der Bierproduktion genannt:

- Qualitätskontrolle – KI-Algorithmen analysieren kontinuierlich Daten, die von Sensoren und Kameras gesammelt werden, um mögliche Qualitätsprobleme frühzeitig zu erkennen und zu beheben. (Brau Union Österreich AG, 2024), (Bossen, 2021)
- Prozessoptimierung - Durch die Analyse historischer Produktionsdaten kann künstliche Intelligenz Vorhersagen treffen und Empfehlungen geben, wie Ressourcen effizienter genutzt werden können. Dies führt zu einer Reduktion von Abfall und Energieverbrauch sowie einer Steigerung der Produktivität. (Brau Union Österreich AG, 2024), (Bossen, 2021)
- Entwicklung neuer Biersorten - KI kann große Mengen an Rezeptdaten analysieren und Vorschläge für neue Kombinationen und Zutaten geben. So können Brauer innovative Biersorten kreieren, die den Geschmack der Konsumenten treffen. (Matthieu, 2019), (Bossen, 2021)

4 Lösungsansatz

In diesem Abschnitt wird erklärt

- wie die in Kapitel 2 *Ausgangssituation und Hypothesen* erstellten Hypothesen untersucht werden.
- wie die Hypothesen mit identifizierten Fallbeispielen im speziellen Fachbereich betrachtet werden.
- wie die Hypothesen anhand der, in Kapitel 2 *Ausgangssituation und Hypothesen*, beschriebenen Prozessschritte („Untersuchungsrahmen“) gesamtheitlich mit den identifizierten Fallbeispielen betrachtet werden.

4.1 Untersuchung der Hypothesen

Die Hypothesen werden auf zwei Ebenen untersucht:

1. Auf Ebene eines Prozessschritts, um festzustellen, ob alle Parameter bekannt sind und gemessen werden können.
2. Auf den gesamten Untersuchungsrahmen, um festzustellen, ob Veränderungen eines Prozessschritts mit Hilfe eines der folgenden Prozessschritte ausbalanciert werden können.

4.2 Nutzung von Fallbeispielen im Prozessschritt (Kapitel 5)

Es wird versucht pro Prozessschritt mit mindestens einem Fallbeispiel festzustellen,

- welche Parameter derzeit im angegebenen Prozessschritt betrachtet werden.
- ob im angegebenen Prozessschritt alle Parameter bekannt sind oder ob es noch unbekannte gibt.
- wie die identifizierten Parameter gemessen werden können.
- wie oft die identifizierten Parameter abgetastet werden können.

4.3 Nutzung von Fallbeispielen im gesamten Untersuchungsraum (Kapitel 6)

Basierend auf den Fallbeispielen der einzelnen Prozessschritte werden folgende Untersuchungen durchgeführt,

- ob eine ungewollte Veränderung der Parameter in einem Prozessschritt mit Hilfe von Technologie in den Folgeprozessschritten ausbalanciert werden kann.
- ob diese ungewollte Veränderung in allen Prozessschritten behoben werden kann.
- ob eine gewollte Veränderung des Bieraromas in einem oder allen Prozessschritten geplant werden kann.
- ob eine gewollte Veränderung im Endprodukt basierend auf Parametern im gesamten Untersuchungsrahmen geplant werden kann.

4.4 Realisierbarkeit und Kostendarstellung im Jahre 2025 (Kapitel 7)

Basierend auf den identifizierten Fallbeispielen werden folgende Untersuchungen durchgeführt,

- ob die Fallbeispiele mit entsprechender Technologie umgesetzt werden können.
- ob die resultierenden Daten für die Entwicklung einer künstlichen Intelligenz nutzbar sind.
- ob ein Vergleich mit existierenden KIs möglich ist, um diese KI zu entwickeln.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

- in welchem Kostenbereich die identifizierten Fallbeispiele entwickelt werden können.
- in welchem Kostenbereich die Entwicklung dieser KI geschätzt werden kann.

5 Fallbeispiele der Digitalisierung in den einzelnen Prozessschritten

Im folgenden Kapitel werden die Fallbeispiele für Digitalisierung in den einzelnen Prozessschritten beschrieben.

5.1 Prozessschritt Getreideanbau und-ernte am Beispiel der Gerste (Hordeum vulgare)

5.1.1 Parameteridentifikation im Gerstenanbau und -ernte

Alle zeitlichen und klimatischen Angaben basieren auf dem deutschsprachigen Raum.

Grundsätzlich unterscheidet man Braugerste und Futtergerste. Für den Brauprozess wird ausschließlich Braugerste, typischerweise zweizeilige Gerste, verwendet.

Folgende Eigenschaftskategorisierungen können bei Gerste identifiziert werden:

- Sommergerste oder Wintergerste
- Terroir – Boden- und Klimaverhältnisse
- Aussaat
- Fruchtfolge
- Gerstensorte
 - Pflanzliche Eigenschaften
 - Qualitätseigenschaften

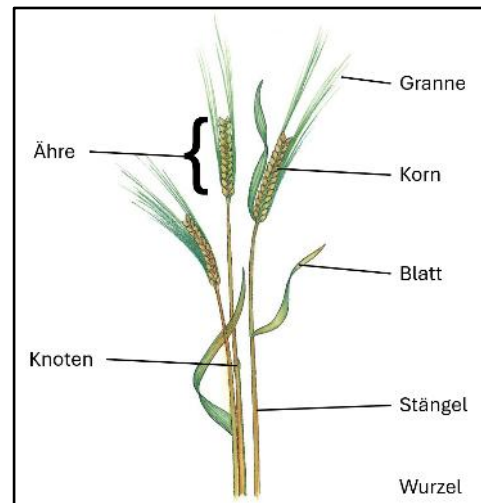


Abbildung 6: Aufbau der Gerste

(Kiesbye, 2003)

5.1.1.1 Sommergerste oder Wintergerste

Die Sommergerste wird im Kalenderjahr möglichst früh, in der Zeitspanne von Ende Februar bis Ende März ausgesät. Die Ernte erfolgt von Juli bis August. Sie ist zwischen 95 und 185 Tage am Feld.

(Doblmaier, Landwirtschaftskammer Oberösterreich, 2022)

Die Wintergerste wird vom 25. September bis 5. Oktober ausgesät. Anfang Juli wird die Wintergerste geerntet. Sie ist zwischen 260 und 280 Tage am Feld.

(Doblmaier, Landwirtschaftskammer Oberösterreich, 2021)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Art der Gerste	Unterscheidung in Sommer- oder Wintergerste	Wintergerste oder Sommergerste
Felddauer	Die Dauer von der Aussaat bis zur Ernte	Sommergerste: 95-185 Tage Wintergerste: 260-280 Tage

Tabelle 3: Identifizierte Parameter der Sommer- oder Wintergerste

5.1.1.2 Terroir – Bodenverhältnisse

Bei den Bodenverhältnissen ist der Standort, der Bodentyp und die Vorbereitung des Bodens zu beachten.

Bodentyp: In Österreich wird Boden nach ÖNORM L1050 normiert. (Austrian Standards International, 2016) Jeder Boden ist aus einem Ausgangsmaterial, dem Muttergestein hervorgegangen. Unter der Einwirkung des Klimas, der Vegetation, der Bodentiere, der Mikroorganismen, der Arbeit des Menschen, der Oberflächenform und der Transportkräfte Wasser, Wind und Schwerkraft bilden sich je nach der Stärke und Einwirkungsdauer Böden, die in Abhängigkeit von den Entstehungsvoraussetzungen bestimmte lithogene (d.h. aus dem Muttergestein stammende) und pedogene (d.h. durch die Bildungsprozesse hervorgerufene) Eigenschaften aufweisen. Böden mit ähnlichen Eigenschaften und ähnlichem bzw. im Prinzip gleichem Profilaufbau bilden einen Bodentyp.

In Österreich unterscheidet man 15 Typengruppen und 57 *Bodentypen*. Es werden 53 geologische *Ausgangsmaterialien* der Bodenbildung definiert. Zusätzlich werden folgende Bodeneigenschaften und Bodenkennwerte (oberster Horizont) betrachtet:

- Die *Gründigkeit* beschreibt die Tiefe der lockeren Bodenschichten und wird nach unten durch festes Gestein, eine verhärtete, verkittete oder extrem-verfestigte Schicht oder durch vorherrschenden Grobanteil begrenzt. In Österreich werden 6 Klassen unterschieden.
- Die *Wasserverhältnisse* spiegeln den Wasserhaushalt eines Standorts wider und liefern so einen Anhaltspunkt für die durchschnittliche Menge an Wasser, die den Pflanzen im Jahresverlauf zur Verfügung steht. In Österreich unterscheidet man 17 Klassen.
- Die *Durchlässigkeit* beschreibt das Ausmaß der vertikalen Abflussgeschwindigkeit des Wassers im Boden. Sie ist vorwiegend von der Bodenart abhängig, aber auch vom Humusgehalt, von Bodenstruktur und -gefüge, vom Grobanteil, von der Gründigkeit sowie von der Lage des Grundwasserspiegels. In Österreich unterscheidet man hier 10 Klassen.
- Alle organischen Stoffe im Boden, die abgestorben oder von Lebewesen ausgeschieden wurden, nennt man *Humus*. Dieser unterliegt einem ständigen Abbau und Neuaufbau durch Bakterien, Pilze und Bodentiere. Die organische Substanz ist mit den mineralischen Bodenteilchen mehr oder minder innig vermischt. In Österreich unterscheidet man 20 Klassen.
- Unter *Bodenart* oder Textur versteht man die in einem Boden oder in einer Bodenschicht (Horizont) vorliegende Korngrößenzusammensetzung. Sie hängt vom jeweiligen Anteil an *Ton* (Teilchen mit weniger als 0,002 mm Durchmesser), *Schluff* (0,002-0,06 mm Durchmesser) und *Sand* (0,06-2,0 mm Durchmesser) ab. Das Mischungsverhältnis bestimmt das Verhalten des Bodens gegenüber Wasser (Durchlässigkeit, Haltekraft, Stauung), seine Erwärmbarkeit, seine Durchlüftung, weitgehend seine Struktur und Lagerung, sein Quellungsvermögen, seine Nährstofflieferung und seine Nährstofffixierung. In Österreich unterscheidet man 13 Bodenarten.
- Als *Horizonte* bezeichnet man die Zonen eines Bodenprofils. Diese werden durch einen senkrechten Schnitt durch den Boden, von dessen Oberfläche bis zum unveränderten Bodenausgangsmaterial dargestellt. Es werden 24 Horizonte unterschieden.
- Der *Humusgehalt* beeinflusst viele wesentliche Bodenfunktionen, wie die Speicherung und Filterung von Wasser, die Durchlüftung und Erwärmung, die Bodenstruktur, oder die Speicherung von Kohlenstoff und Nährstoffen. Man unterscheidet 7 Klassen.
- Der Kalkgehalt bezeichnet die Menge an Kalzium- und Magnesiumkarbonat im Boden. Der Kalkgehalt wird wesentlich durch das Ausgangsmaterial beeinflusst und nimmt im Laufe der natürlichen Bodenentwicklung über lange Zeiträume hinweg ab (Entkalkung). Man unterscheidet in 16 Klassen, die in Prozent gemessen werden.

(Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)

Gerste benötigt eine gute Bodenstruktur. Bei Staunässe, Verdichtungen und schlechter Durchlüftung des Bodens reagiert sie empfindlich. Eine gute Bodenstruktur wird durch das Vorhandensein von vertikalen Bioporen definiert, die gewährleisten, dass die Niederschläge unbehindert infiltriert werden können. Bioporen sind vertikal verlaufende Porenkanäle in Ackerböden. Sie unterstützen Pflanzen dabei, in Dürrezeiten Wasser- und Nährstoffressourcen besser zu erschließen.

Der Ackerboden wird auch als Substrat bezeichnet, Material auf dem Organismen wachsen oder chemische Reaktionen stattfinden. Mittels Substratuntersuchung können die chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Substrats bestimmt werden. Typischerweise werden folgende Parameter bestimmt:

- pH-Wert: Der Säuregrad des Substrats.
- Salzgehalt: Der Gehalt an löslichen Salzen.
- Nährstoffgehalt: Verschiedene Mengen an pflanzenverfügbaren Makro- und Mikronährstoffen

(AGES - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, 2024)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Bodentyp	Kategorisierung des Bodentyps basierend auf Bereich, Typengruppe und Gliederungskriterien basierend auf ÖNORM L 1050.	Hochmoor, Tschernosem, Typischer Pseudogley, Kulturrohboden (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Ausgangsmaterial	Bodenbildung und -eigenschaften sind weitgänglich abhängig von der Natur des Ausgangsmaterials (Muttergestein).	Granit, Sandstein, Kalkgesteine, Gneis, Marmor, (Leitgeb, 2000)
Gründigkeit	Die Tiefe der lockeren Bodenschichten bis zum festen Gestein.	<ul style="list-style-type: none"> • <30 cm: seichtgründig • 30-70 cm: mittelgründig • >70 cm: tiefgründig (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Wasserverhältnisse	Die durchschnittliche Menge an Wasser, die den Pflanzen im Jahresverlauf zur Verfügung steht.	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr trocken: Pflanze völlig von den Niederschlägen abhängig. • Feucht: Zu reichliche Wasserversorgung. (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Durchlässigkeit	Die vertikale Abflussgeschwindigkeit des Wassers im Boden. Es wird das Wasservolumen (m ³) gemessen, das pro Sekunde durch eine Fläche von einem Quadratmeter (m ²) fließen kann. (m/s)	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hoch: 1 m/s • Gering: 10⁻⁶ – 10⁻¹⁰ m/s (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Humusform	Die Humusform ist eine Beschreibung der im Feld erkennbaren Eigenschaften der organischen Bodensubstanzen anhand von Farbe, Zersetzungs- und Vermischungsgrad sowie Geruch.	<ul style="list-style-type: none"> • Torf: Reste von abgestorbenen Moorpflanzen • Mull: Günstige Zersetzungsbedingungen (Reaktion, Wärme, Feuchtigkeit)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
		<ul style="list-style-type: none"> Moder: mäßige Zersetzungsbedingungen (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Bodenarten	In Österreich können 13 Mischungen aus Sand, Ton und Schluff gefunden werden.	<ul style="list-style-type: none"> Sand (S): 65-100% Sand Toniger Sand (tS): 65-90% Sand, 0-10% Schluff, 10-25% Ton (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Horizonte	Die unterschiedlichen Zonen eines Bodenprofils.	<ul style="list-style-type: none"> Ag = A-Horizont mit leichter Vergleyung O = organischer Auflagehorizont G = durch Grundwasser geprägter bzw. stark beeinflusster Horizont (Gleyhorizont) (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Humusgehalt	Der organische Anteil am Boden in Prozent.	<ul style="list-style-type: none"> Schwach Humus: < 1,5% Mittelhumus: 1,5 – 4% Stark Humus: > 4% (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Kalkgehalt	Die Menge an Kalzium- und Magnesiumkarbonat im Boden in Prozent.	<ul style="list-style-type: none"> Kalkfrei: <0,5% Schwach kalkhaltig: 0,5-1,5% Mäßig kalkhaltig: 1,5-5% Stark kalkhaltig: >5% (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)
Bodenverdichtung	Bodenverdichtung tritt auf, wenn der Boden durch mechanischen Druck, wie z.B. durch landwirtschaftliche Maschinen, stark verdichtet wird.	Optimalbereich: < 2,0 Megapascal (MPa) (Prof. Dr. Thomas Weyer, 2016)
Vertikale Bioporen	Vertikal verlaufende Porenkanäle im Ackerland gewährleisten, dass Niederschlag ungehindert eindringen kann.	Optimalbereich: > 3 Millimeter (mm) Bioporenanzahl pro Quadratmeter in 8 cm Tiefe: 180 – 800 Bioporenanzahl pro Quadratmeter in 25 cm Tiefe: 100 – 200 (Friedrich Tebrügge, 1999)
pH-Wert des Substrats	Säuregrad des Ackerbodens.	Optimalbereich: 5,2 – 7,4 (Bundesforschungszentrum für Wald, 2024)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Salzgehalt	Der Gehalt an löslichen Salzen pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 0,6 - 1,5 Gramm pro Liter (g/l).
Macronährstoff Stickstoff	Der Gehalt an Stickstoff pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 50 - 200 Milligramm pro Liter (mg/l)
Macronährstoff Phosphor	Der Gehalt von Phosphor pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 10 - 70 mg/l
Macronährstoff Kalium	Der Gehalt von Kalium pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 60 - 195 mg/l
Macronährstoff Magnesium	Der Gehalt von Magnesium pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 50 - 100 mg/l
Micronährstoff Eisen	Der Gehalt von Eisen pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 2 – 150 mg/l
Micronährstoff Mangan	Der Gehalt von Mangan pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 2 – 150 mg/l
Micronährstoff Kupfer	Der Gehalt von Kupfer pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 0,5 – 40 mg/l
Micronährstoff Zink	Der Gehalt von Zink pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 1 – 70 mg/l
Micronährstoff Bor	Der Gehalt von Bor pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 0,2 – 1 mg/l
Micronährstoff Chlorid	Der Gehalt von Chlorid pro Liter im Ackerboden.	Optimalbereich: 0 – 800 mg/l

Tabelle 4: Identifizierte Parameter der Terroir - Bodenverhältnisse

5.1.1.3 Terroir - Klimaverhältnisse

Die Gerste wird in allen gemäßigten Zonen angebaut. Sie wächst auch noch in sommertrockenen Gebieten. Es sind keine hohen Temperaturansprüche erforderlich. Daher liegt der Gerstengürtel in Russland und Kanada im Bereich zwischen 55° und 65° nördlicher Breite. (Proplanta - Vorsprung durch Wissen, 2024)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Temperatur	Temperatur am Feld in Grad Celsius	18°C
Niederschlag	Regen in Liter pro Quadratmeter	2l/m ²
Luftfeuchtigkeit	Luftfeuchtigkeit am Feld in Prozent	25%
Windgeschwindigkeit	Geschwindigkeit des Windes über dem Feld	30kmH

Tabelle 5: Identifizierte Parameter der Terroir - Klimaverhältnisse

5.1.1.4 Aussaat

Vor der eigentlichen Aussaat sind gegebenenfalls mittels Düngung die entsprechenden Vorbereitungen zu treffen. Bei der Aussaat sind die Aussaatmenge, das Volumen an Saat pro Hektar, und die Saattiefe zu betrachten.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Aussaatmenge	Die Menge an Saatgut die in kg pro Hektar gesät wird.	150kg/ha
Aussaattiefe	Die Tiefe in der das Saatgut in die Erde gesetzt wird.	2-3 cm

Tabelle 6: Identifizierte Parameter der Aussaat

5.1.1.5 Fruchtfolge

Eine der wichtigsten Aufgaben von Ackerbäuerinnen und Ackerbauern ist die Planung und Einhaltung der sogenannten Fruchtfolge. Gemeint ist damit die zeitliche Abfolge der Nutzpflanzen, die auf einer landwirtschaftlichen Fläche angebaut werden. Der wiederholte Anbau ein und derselben Kulturpflanze auf der gleichen Fläche hätte auf Dauer fatale Folgen: Schädlinge und Krankheiten, die typischerweise bei der Kulturpflanze auftreten, würden sich über die Jahre immer stärker vermehren. Ebenso die mit der Kulturpflanze vergesellschafteten Unkrautarten. Der Boden würde zudem sehr einseitig beansprucht und die Bodenfruchtbarkeit langfristig abnehmen.

(Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, 2024)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Gerste wiederholt angebaut	Wurde vor der Gerste eine andere passende Frucht gezüchtet.	Nein
Letzte Vorfrucht passend	Als passende Frucht vor der Gerste werden Winterweizen, Sonnenblumen, Silomais, Zuckerrüben oder Kartoffel genannt.	Ja

Tabella 7: Identifizierte Parameter der Fruchtfolge

5.1.1.6 Gerstensorte

Weltweit gibt es über 2500 verschiedene Gerstensorten, allein 700 davon werden in Deutschland angebaut. (Rewe, 2024) In Österreich wird jede Pflanzensorte, die als Braugerste genutzt werden darf durch das Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES zugelassen. Aktuell sind dies insgesamt 24 Sorten

- Sommergerste: 6 Sorten als Braugerstensorten empfohlen
 - 11 zusätzliche Sorten erlaubt
- Wintergerste: 3 Sorten sind als Braugerstensorten empfohlen
 - 4 zusätzliche Sorten sind erlaubt

(Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)

Die BAES bewertet die folgenden Parameter

- pflanzenbauliche Eigenschaften
- Qualitätseigenschaften
- Ertragsleistung

In den angeführten Parametern wird nur ein Auszug der identifizierten Parameter angeführt.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Pflanzenbauliche Eigenschaft: Entwicklungsstadien	Die verschiedenen Entwicklungsstadien der Gerste: <ul style="list-style-type: none"> • Keimung • Blattentwicklung • Bestockung • Schossen Haupttrieb • Ährenschwellen • Ährenschieben • Blüte • Fruchtentwicklung 	Keimung: 2.3.2024 Blattentwicklung: 12.3.2024 Bestockung: 24.3.2024 Schossen Haupttrieb: 1.4.2024 Ährenschwellen: 15.4.2024 Ährenschieben: 21.4.2024 Blüte: 1.5.2024 Fruchtentwicklung: 6.5.2024 Fruchtreife: 1.6.2024 Absterben: 10.8.2024 (Bayer Austria, 2001)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	<ul style="list-style-type: none"> • Frucht- und Samenreife • Absterben (Bayer Austria, 2001)	
Pflanzenbauliche Eigenschaften: Wuchshöhe	Die Höhe der Gerstensorte im Vergleich zu anderen Gerstensorten.	Zwischen 60-120 cm (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Pflanzenbauliche Eigenschaften: Lagerung	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass diese Gerstensorte bei entsprechender Lagerumgebung gelagert werden kann.	Einstufung von 1-9 oder von fehlend bis sehr stark. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Pflanzenbauliche Eigenschaften: Halmknicken	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass der Halm knickt.	Einstufung von 1-9 oder von fehlend bis sehr stark knickend. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Pflanzenbauliche Eigenschaften: Ährenknicken	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Ähre knickt.	Einstufung von 1-9 oder von fehlend bis sehr stark knickend. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Pflanzliche Eigenschaften: Mehltau	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Gerste an Mehltau, einer Pilzkrankung, erkrankt.	Einstufung von 1-9 oder von fehlend bis sehr stark befallend. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Pflanzliche Eigenschaften: Zwergrost	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Gerste an Netzflecken, einer Pilzkrankung, erkrankt.	Einstufung von 1-9 oder von fehlend bis sehr stark befallend. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Pflanzliche Eigenschaften: Kornertrag	Beschreibt die Höhe des Ertrags im Vergleich zu anderen Gerstensorten.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Pflanzliche Eigenschaften: N-Effizienz	Beschreibt die Stickstoff-Effizienz gemessen als Korn-Proteinерtrag und bezieht sich auf die Fähigkeit der Pflanze, den aufgenommenen Stickstoff in Kornprotein umzuwandeln.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Marktwareanteil (Sortierung >2,2 mm	Beschreibt den Anteil an Gerstenkörnern die kleiner 2,2 mm und größer 2,5 mm sind.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
oder Sortierung >2,5 mm)		(Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Tausendkorngewicht oder Hektolitergewicht	Gibt das Gewicht von 1000 Körnern in Gramm an (Tausendkorngewicht). Das Hektolitergewicht gibt das Gewicht in Kilogramm an, dass ein Hektoliter des Getreides wiegt.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Rohproteingehalt	Beschreibt den Anteil an Proteinen und wird als Prozentsatz des Trockengewichts angegeben.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Malzextraktgehalt	Beschreibt den Gehalt an löslichem Zucker und anderer löslicher Stoffe aus dem Malz der gemälzten Gerste.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Friabilimeterwert	Beschreibt die Mürbigkeit von Gerstenmalzkörner. Der Wert wird durch einen Abriebvorgang ermittelt, dabei wird Malz gemahlen und die entstehenden kleinen Teile abgesiebt.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Löslicher Stickstoffgehalt	Beschreibt wie viel Stickstoff in Form von löslichen Proteinen im Malz vorhanden ist.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Kolbachzahl	Beschreibt das Verhältnis von löslichem Stickstoff zum Gesamtstickstoff an und wird in Prozent ausgedrückt. Eine höhere Kolbachzahl deutet auf eine bessere Löslichkeit der Proteine hin.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Viskosität	Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit der Würze. Eine hohe Viskosität kann die Filtration der Würze verlangsamen und die Effizienz der Extraktion verringern.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Beta-Glucanengehalt	Beschreibt den Anteil an Beta-Glucane, löslichen Ballaststoffen, die für ihre gesundheitlichen Vorteile, wie der Senkung des Cholesterinspiegels und der Unterstützung der Verdauung bekannt sind. Der Beta-Glucanengehalt wird in Prozent des Getreidekorns angegeben.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Diastatische Kraft	Beschreibt ein Maß für die Aktivität der Enzyme, insbesondere der Amylasen, die Stärke in Zucker	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	umwandeln. Ein hoher Wert bedeutet, dass das Malz eine hohe Enzymaktivität aufweist und somit effizienter Stärke in Zucker umwandeln kann.	(Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Würzefarbe	Die Würzefarbe beschreibt die Farbe der Würze, die während des Brauprozesses aus dem Malz der Gerstensorte extrahiert werden kann.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)
Qualitätseigenschaften: Trübung der Würze	Beschreibt die Klarheit der Würze, die während des Brauprozesses mit dieser Gerstensorte entsteht.	Einstufung von 1-9 oder von sehr niedrig bis sehr hoch. (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024)

Tabella 8: Identifizierte Parameter der Gerstensorte

5.1.2 Vollständigkeit der Parameter im Gerstenanbau und der -ernte

Aufgrund der Tatsache, dass Gerste in der Landwirtschaft und in der Agrarchemie als ein Kernprodukt angesehen wird, wurden über Jahrzehnte wissenschaftliche Arbeiten und Studien durchgeführt. Die im Abschnitt 5.1.1 *Parameteridentifikation im Gerstenanbau und -ernte* gelisteten Parameter stellen nur einen Bruchteil der identifizierten Parameter dar.

Ausgehend von den analysierten Quellen, wird in dieser Abschlussarbeit angenommen, dass alle Parameter der Gerste bekannt sind.

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
Sommer- / Wintergerste	2	100%
Bodenverhältnisse	23	100%
Klimaverhältnisse	4	100%
Aussaat	2	100%
Fruchtfolge	2	100%
Gerstensorte	22	100%

Tabella 9: Vollständigkeit der Parameter im Gerstenanbau und der -ernte

Diese Annahmen sind im weiteren Verlauf praktisch zu validieren.

5.1.3 Digitale Erfassung der Parameter im Gerstenanbau und -ernte

Im Abschnitt 5.1.1 *Parameteridentifikation im Gerstenanbau und -ernte* wurden derzeit bekannte Parameter der Landwirtschaft und teilweise der Brauwirtschaft ermittelt, um den Prozessschritt bestmöglich zu dokumentieren. Derzeit sind die Messungen typischerweise:

- einmalig.
- in unregelmäßigen Zeitabständen.
- ungenau und ermöglichen Interpretationsspielraum z.B. bei der Klassifizierung mit Werten wie „Mittel“ oder „Mittel bis Stark“ ohne exakten Messgrenzen.
- nicht vollständig und nicht alle Parameter werden für einen Gerstenanbau und -ernte gemessen.

- zu allgemein wie z.B. ein Wert für Feuchtigkeit wird gemessen für ein 2ha Gerstenfeld in dem ein Wald und ein Teich angrenzt.
- mit mehreren Medienbrüchen behaftet wie z.B. von der Messdurchführung über eine schriftliche Notiz bis zur Speicherung am Computer.

Anmerkung: In der Digitalisierung sind Medienbrüche¹ so gering wie möglich zu halten!

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Messgeräte notwendig sind, um die entsprechenden Daten in den benötigten Zeitabständen zu erfassen. Um den Interpretationsspielraum zu reduzieren, werden einige der derzeit gemessenen Daten in andere Messeinheiten übertragen.

5.1.3.1 Sommergerste oder Wintergerste

5.1.3.1.1 Parameter Art der Gerste

Die Unterscheidung, ob Sommer- oder Wintergerste erfolgt mit dem Anbauzeitpunkt. Es ist eine einmalige Messung am Tag der Aussaat für einen bestimmten Standort.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte wären möglich:

- Manuell nach der Aussaat durch den Bauern per Speicherung am Smartphone oder am Computer die Daten zu Gerstensorte, Fläche und Aussaatag. (1 Medienbruch)
- Das Messgerät könnte in der Sämaschine fixiert sein wie z.B. in der Lösung von Wintersteiger „Geo Link“ (Wintersteiger, 2025)
 - Manuelle Eingabe der Gerstensorte, die ausgesät wird.
 - Integrierte Global Positioning System (GPS)-Anbindung, um quadratmetergenau die Aussaat zu speichern.

Anmerkung: GPS-Daten können bereits im Zentimeterbereich erfasst und aufgezeichnet werden.

- Datum- und Zeitstempel, an dem die Aussaat auf dem Quadratmeter durchgeführt wird.

Digitale Messeinheiten:

Folgende Daten können gespeichert werden:

Messeinheit	Beispiel
Ausgesäte Gerstensorte	Gerstensortenbezeichnung „Amidala“
GPS-Daten pro Quadratmeter der Aussaat	Breitengrad: 48.208174°N, Längengrad: 16.373819°E, Höhe: 171m
Datum und Zeitstempel der Aussaat auf dem spezifischen Quadratmeter	07.10.2024 18:02:45
Sommer- / Wintergerste basierend auf dem Datum und/oder Gerstensorte	Wintergerste

Tabella 10: Digitale Messeinheiten des Parameters Art der Gerste

Abtastrate:

Die Datenaufzeichnung wird nur einmalig, zum Aussaatzeitpunkt durchgeführt.

¹Ein Medienbruch bezeichnet den Wechsel zwischen unterschiedlichen Kommunikations- oder Speichermedien, der oft manuelle Eingriffe oder zusätzliche Schritte erfordert und somit potenziell Effizienzverluste verursacht.
Schriftliche Abschlussarbeit

5.1.3.1.2 Parameter Felddauer

Die Felddauer wird bestimmt als Differenz zwischen Anbauzeitpunkt, der mittels *Parameter* exakt gespeichert werden kann, und dem Erntezeitpunkt. Der Erntezeitpunkt ist eine einmalige Messung am Tag der Ernte für einen bestimmten Standort.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte wären möglich:

- Manuell nach der Ernte durch den Bauern per Speicherung am Smartphone oder am Computer für Fläche und Erntetag. Die Gerstensorte ist mit dem Erntetag und der exakten Fläche gegeben. (1 Medienbruch)
- Das Messgerät könnte im Mähdrescher fixiert sein wie z.B. in der Lösung von Wintersteiger „Easy Harvest“ (Wintersteiger, 2025)
 - Integrierte Global Positioning System (GPS)-Anbindung, um quadratmetergenau die Erntedaten zu speichern.
 - Datum- und Zeitstempel, an dem die Ernte auf dem Quadratmeter durchgeführt wird.

Digitale Messeinheiten:

Folgende Daten können gespeichert werden:

Messeinheit	Beispiel
Ausgesäte Gerstensorte basierend auf der Aussaatinformation auf diesen GPS-Daten	Gerstensortenbezeichnung „Amidala“
GPS-Daten pro Quadratmeter der Aussaat	Breitengrad: 48.208174°N, Längengrad: 16.373819°E, Höhe: 171m
Datum und Zeitstempel der Aussaat auf dem spezifischen Quadratmeter	07.10.2024 18:02:45
Felddauer basierend auf Aussaatdatum und Erntedatum	267 Tage

Tabella 11: Digitale Messeinheiten des Parameters Felddauer

Abtastrate:

Die Datenaufzeichnung kann nur einmalig, zum Erntezeitpunkt durchgeführt werden.

5.1.3.2 Terroir – Bodenverhältnisse

5.1.3.2.1 Parameter Bodentyp, Ausgangsmaterial, Gründigkeit, Durchlässigkeit, Humusform, Bodenarten, Horizonte, Humusgehalt, Kalkgehalt

Diese Parameter sind langanhaltende Werte die sich innerhalb eines Jahres kaum bis nicht verändern.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte sind möglich:

- Manuell mittels physikalischer Bodenuntersuchung (Spatenprobe) (1 Medienbruch) (Falkensteiner, 2022)
 - In Österreich sind diese Daten zentral vom Bundesforschungszentrum für Wald gesammelt und können online abgerufen werden unter: <https://bodenkarte.at/>

- Mittels Gammastrahlen basierenden Sensoren ist es möglich häufiger Bodenanalysen durchzuführen und alle Parameter auch historisch zu vergleichen wie z.B. mit SoilOptix (SoilOptix, 2025). Gammastrahlen basierende Sensoren können an Fahrzeugen montiert werden und liefern alle 1 – 1,5m Datenpunkte. SoilOptix empfiehlt alle 8-10 Jahre eine Analyse durchzuführen.
- Erste Versuche, mittels Satellitenanalyse und künstlicher Intelligenz wurden gestartet, um diese Daten zu generieren und um Böden in unzugänglichen Gebieten zu analysieren und Kosten für Bodenuntersuchungen zu reduzieren. (Lilienthal, 2019), (Riese, 2019), (Alexandre M.J.-C.Wadoux, 2020)

Digitale Messeinheiten:

Diese Parameter wurden mit der ÖNORM L 1050 bereits alle kategorisiert und haben unterschiedliche Ausprägungen wie z.B. die 57 Bodentypen oder die 6 Klassen der Gründigkeit. Für die Speicherung empfiehlt sich eine einfache Nummerierung von 1-x pro Parameter. Daten von Sensoranalysen können in diese Nummerierung überführt werden.

Messeinheit	Beispiel
Bodentypen	1-57
Ausgangsmaterial	1-53
Gründigkeit	1-6
Durchlässigkeit	1-10
Humusform	1-20
Bodenarten	1-13
Horizonte	1-24
Humusgehalt	1-7
Kalkgehalt	1-16

Tabella 12: Digitale Messeinheiten der Parameter Bodentyp, Ausgangsmaterial, Gründigkeit, Durchlässigkeit, Humusform, Bodenarten, Horizonte, Humusgehalt, Kalkgehalt

Mit Hilfe dieser Werte sollten alle Bodenbeschaffenheiten für die Gerste bestimmt werden können.

Abtaststrate:

In Österreich werden die Daten zentral erfasst und können für den Anwendungsfall beliebig oft genutzt werden. Aufgrund der langen Abstände, um Änderungen wahrnehmen zu können, ist eine jährliche Abfrage ausreichend.

Für die Datenerfassung können Gammastrahlen basierende Sensoren genutzt werden. Eine Datenerfassung und -analyse ist alle 8 - 10 Jahre empfohlen.

5.1.3.2.2 Parameter Bodenverdichtung, vertikale Bioporen, Wasserverhältnisse, Durchlässigkeit

Um die Bodenqualität zu erfassen, werden die Parameter Bodenverdichtung, vertikale Bioporen, Wasserverhältnisse und Durchlässigkeit erfasst und gemeinsam evaluiert. Diese Parameter haben Einfluss auf das Wachstum und Versorgung der Gerste mit Wasser und Nährstoffen am Feld. Zuviel Wasser oder Staunässe führen zu Sauerstoffmangel während zu wenig Wasser zur Austrocknung führt. Gute Durchlässigkeit führt Wasser und Nährstoffe schnell zur Gerste.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte sind möglich:

- Manuell mittels physikalischer Bodenuntersuchung (Spatenprobe) (1 Medienbruch) (Friedrich Tebrügge, 1999)
 - In Österreich sind diese Daten zentral vom Bundesforschungszentrum für Wald gesammelt und können online abgerufen werden unter: <https://bodenkarte.at/>
- Vertikale Bioporen werden auch mittels optischer Bildgebung analysiert (Friedrich Tebrügge, 1999).
- Mittels RhoC 5 Radiometriesensor auf einem Stab. Dieser Stab muss zur Messung im Feld eingedrückt werden (Karin H. J. Pepers, 2024)

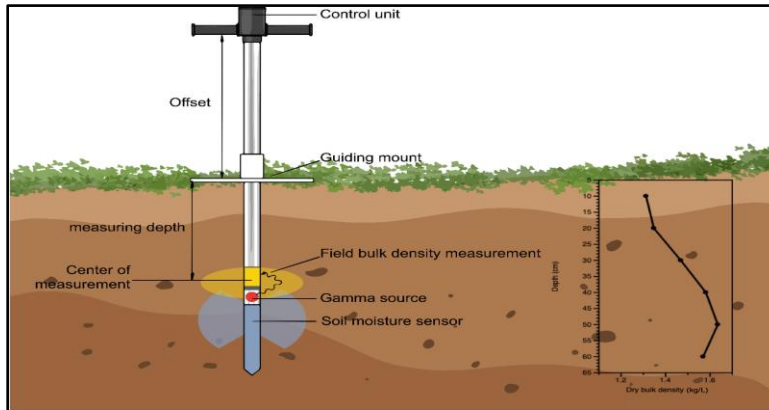


Abbildung 7: RhoC 5 Radiometriesensor von Medusa Radiometrics

- Pneumatische Sensoren messen die Luftdurchlässigkeit des Bodens, also den Druck, der erforderlich ist, um ein bestimmtes Luftvolumen in den Boden in einer bestimmten Tiefe zu drücken. Die gemessenen Daten werden mit Bodeneigenschaften wie Bodenstruktur und Verdichtung verglichen (Folnovic, 2024), (Elizabeth Hawkins, 2017).
- Mittels Gammastrahlen basierenden Sensoren ist es möglich häufiger Bodenanalysen durchzuführen und alle Parameter auch historisch zu vergleichen wie z.B. mit SoilOptix (SoilOptix, 2025). Mittels 25 verschiedener Datenebenen ermöglicht SoilOptix, die Darstellung aller oben genannten Parameter.

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Bodenverdichtung	<ul style="list-style-type: none"> • g/cm³ oder • Megapascal (MPa)
Vertikale Bioporen	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl pro m² • Länge in mm
Wasserverhältnisse/Durchlässigkeit: Wasserleitfähigkeit ist die Fähigkeit des Bodens, Wasser zu leiten.	<ul style="list-style-type: none"> • cm/h • mm/s
Wasserverhältnisse: Infiltrationsrate ist die Geschwindigkeit, mit der Wasser in den Boden eindringt.	mm/h
Wasserverhältnisse: Bodenfeuchtigkeit ist der Wassergehalt im Boden.	<ul style="list-style-type: none"> • Prozent des Gesamtvolumens • Massenprozent

Tabelle 13: Digitale Messeinheiten der Parameter Bodenverdichtung, vertikale Bioporen, Wasserverhältnisse, Durchlässigkeit

Abtaste:

Grundsätzlich reicht es diese Parameter einmalig pro Jahr zu erfassen. In Ausnahmesituationen wie Überschwemmung oder Veränderung des Bodens durch extreme Witterung empfiehlt sich eine neuerliche Datenerfassung.

5.1.3.2.3 Parameter pH-Wert des Substrats, Salzgehalt, Macronährstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, Eisen, Mangan, Kupfer, Zink, Bor, Chlorid

Diese Parameter sind die Nährstoffe des Bodens und werden in Österreich heute nur selten und dann mittels Laboranalyse erfasst. Die Auswahl des Düngers und das Düngervolumen ist stark abhängig von diesen Werten.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte sind möglich:

- Manuell mittels physikalischer Bodenuntersuchung und anschließender Laboranalyse (Spatenprobe) (1 Medienbruch) (Ages - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, 2025). In Deutschland ist eine Bodenuntersuchung durch die Landwirte alle 6 Jahre verpflichtend (August Bruckner, 2023).
- Mittels Gammastrahlen basierenden Sensoren ist es möglich häufiger Bodenanalysen durchzuführen und alle Parameter auch historisch zu vergleichen wie z.B. mit SoilOptix (SoilOptix, 2025). Mittels 25 verschiedener Datenebenen ermöglicht SoilOptix, die Darstellung aller oben genannten Parameter.
- Mittels Satellitenüberwachung und Dronenkartierung werden Bodengesundheitsanalysen durchgeführt (Farmonaut, 2024)

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Ph-Wert des Substrats	Eine Skala von 1-14. 7 ist neutral.
Salzgehalt	Gramm pro Liter (g/l)
Macronährstoff Stickstoff	Milligramm pro Liter (mg/l)
Macronährstoff Phosphor	Milligramm pro Liter (mg/l)
Macronährstoff Kalium	Milligramm pro Liter (mg/l)
Macronährstoff Magnesium	Milligramm pro Liter (mg/l)
Micronährstoff Eisen	Milligramm pro Liter (mg/l)
Micronährstoff Mangan	Milligramm pro Liter (mg/l)
Micronährstoff Kupfer	Milligramm pro Liter (mg/l)
Micronährstoff Zink	Milligramm pro Liter (mg/l)
Micronährstoff Bor	Milligramm pro Liter (mg/l)
Micronährstoff Chlorid	Milligramm pro Liter (mg/l)

Tabelle 14: Digitale Messeinheiten der Parameter pH-Wert des Substrats, Salzgehalt, Macronährstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, Eisen, Mangan, Kupfer, Zink, Bor, Chlorid

Abtaste:

Eine monatliche Abtaste ist zu empfehlen, um die Auswirkung des Bodens auf das Gerstenwachstum zu evaluieren und gegebenenfalls mittels externen Eingriffs wie z.B. Dünger das Wachstum zu optimieren.

5.1.3.3 *Terroir – Klimaverhältnisse*

5.1.3.3.1 Parameter Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit

Diese Parameter werden bereits jetzt mittels kleiner Wetterstationen erfasst. Heute werden diese Daten nur selten digital gespeichert.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte sind möglich:

- Mittels digitaler Wetterstation, welche die Daten erfasst und speichert (Cordulus, 2025).
- Pyranometer, zur Messung der Sonnenstrahlung

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Bodentemperatur	Grad Celsius (°C)
Niederschlag	Liter pro Quadratmeter (l/m ²)
Windgeschwindigkeit	Meter pro Sekunde (m/s)
Lufttemperatur	Grad Celsius (°C)
Luftfeuchtigkeit	Prozent Wasserdampf in der Luft (%)
Luftdruck	Millibar (mbar) oder Hektopascal (hPa)
Sonnenstunden und Sonnenintensität	Watt pro Quadratmeter (W/m ²)

Tabelle 15: Digitale Parameter der Parameter Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit

Abtastrate:

Die Daten können alle 10 Minuten ermittelt und gespeichert werden.

5.1.3.4 *Aussaat*

5.1.3.4.1 Parameter Aussaatmenge und Aussaattiefe

Diese Parameter sind pro Jahr einmalig zum Zeitpunkt der Aussaat zu erfassen und zu speichern.

Messgeräte:

Siehe Abschnitt 5.1.3.1 *Sommergerste oder Wintergerste*. Die Aussaattiefe ist ein weiterer Parameter, der in der Sämaschine integriert ist.

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Aussaatmenge	Kilogramm pro Hektar (kg/ha)
Aussaattiefe	Zentimeter (cm)
Ausgesäte Gerstensorte	Gerstensortenbezeichnung „Amidala“
GPS-Daten pro Quadratmeter der Aussaat	Breitengrad: 48.208174°N, Längengrad: 16.373819°E, Höhe: 171m
Datum und Zeitstempel der Aussaat auf dem spezifischen Quadratmeter	07.10.2024 18:02:45

Tabelle 16: Digitale Parameter der Parameter Aussaatmenge und Aussaattiefe

Abtastrate:

Die Daten können einmalig in Echtzeit erfasst und gespeichert werden.

5.1.3.5 Fruchtfolge

5.1.3.5.1 Parameter Gerste wiederholt angebaut, Vorfrucht passend

Diese Parameter werden heute typischerweise durch die Erfahrung der Bauern oder durch Empfehlung der Landwirtschaftskammern (Österreich und Deutschland) (Doblmaier, Landwirtschaftskammer Oberösterreich, 2022) (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2015) oder Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung (Schweiz) (Bernard Jeangros, 2019) veröffentlicht.

Messgeräte:

In diesem Fall gibt es keine Messgeräte. Die einzige erkennbare Möglichkeit ist es den entsprechenden Standort über die Sämaschine und die Aussaat zu befüllen, um die Geschichte des Standorts dokumentieren zu können.

Mit der Geschichte und den Empfehlungen der Landwirtschaftskammern/Eidgenössischen Departements können Fruchtfolgen empfohlen werden.

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Gerste wiederholt angebaut	Ja oder Nein (0 / 1)
Letzte Vorfrucht passend	Ja oder Nein (0 / 1)
Gerstenspezifische Vorfrüchte: Sommergerste	Winterweizen, Sommerweizen, Winterroggen, Triticale, Hafer, Zuckerrüben
Gerstenspezifische Vorfrüchte: Wintergerste	Winterweizen, Sommerweizen, Winterroggen, Triticale, Hafer, Frühkartoffeln

Tabelle 17: Digitale Messeinheiten der Parameter Gerste wiederholt angebaut, Vorfrucht passend

Abtastrate:

Die Abtastrate ist einmalig pro Aussaat.

5.1.3.6 Gerstensorte

5.1.3.6.1 Parametergruppe Pflanzenbauliche Eigenschaften der Gerste

Die pflanzenbaulichen Eigenschaften sind Eigenschaften rund um das Wachstum. Diese Eigenschaften werden von den Sortenfreigaberegulatoren validiert und mittels statistischer Aussagen freigegeben. In der Landwirtschaft werden die Daten durch Sichtung des Bauern erfasst und gelegentlich mittels Smartphones oder Computer gespeichert.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte sind möglich:

- Manuell mittels Sichtung erfasste Daten mittels Smartphones oder Computer speichern (1 Medienbruch)
- Mittels satellitengestützter und drohnengestützter Ernteüberwachung (Farmonaut, 2024) ist
 - eine Echtzeitüberwachung des Pflanzenwachstums
 - frühzeitige Erkennung von Krankheiten und Schädlingsbefall
 - Optimierung der Bewässerung und Düngung
 - Präzise Ertragsvorhersagen
 - Reduzierung des Ressourceneinsatzes durch gezielte Bewässerung, Düngung,
 möglich.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Entwicklungsstadien	Wachstumsdaten auf Datum genau gespeichert wie z.B. Keimung: 2.3.2024 Blattentwicklung: 12.3.2024
Wuchshöhe	Zentimeter (cm)
Lagerung/Feuchtigkeitsgehalt der Frucht	Prozent des Fruchtvolumens (%)
Halmknicken	Prozent pro Quadratmeter (%/m ²)
Ährenknicken	Prozent pro Quadratmeter (%/m ²)
Mehltau	Prozent pro Quadratmeter (%/m ²)
Zwergrost	Prozent pro Quadratmeter (%/m ²)
Netzflecken	Prozent pro Quadratmeter (%/m ²)
Kornertrag	Berechnet durch die optische Erkennung mittels Drohnen oder Satelliten und dem Wachstumsstand (Entwicklungsstadien)
N-Effizienz	Berechnet durch die optische Erkennung mittels Drohnen oder Satelliten und dem Wachstumsstand (Entwicklungsstadien)
GPS-Daten pro Quadratmeter	Breitengrad: 48.208174°N, Längengrad: 16.373819°E, Höhe: 171m
Datum und Zeitstempel der Datenerfassung auf dem spezifischen Quadratmeter	07.10.2024 18:02:45

Tabelle 18: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Pflanzenbauliche Eigenschaften der Gerste

Abtastrate:

Eine tägliche Abtastrate ermöglicht wetterbedingte Veränderungen sofort zu identifizieren und gegebenenfalls entsprechende Gegenmaßnahmen zu setzen.

5.1.3.6.2 Parametergruppe Qualitätseigenschaften der Gerste

Die von (Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES, 2024) angegebenen Qualitätskriterien sind nur teilweise in der Landwirtschaft angesiedelt. Alle Qualitätskriterien um die Frucht werden in diesem Abschnitt beschrieben. Die Qualitätskriterien für die Mälzung werden im Abschnitt Prozessschritt Mälzen 5.2 beschrieben. Diese Daten werden vor der Ernte als Vorhersage errechnet und bei der Ernte erfasst und gespeichert.

Messgeräte:

Folgende Messgeräte sind möglich:

- Manuell mittels Sichtung erfasste Daten mittels Smartphone oder Computer speichern (1 Medienbruch)
- Mittels Ertragsüberwachungssystemen auf Erntemaschinen wie etwa Mähdreschern können Ertragsvolumen, Kornelevator, Ernteguttyp, Feuchtigkeitssensor und GPS-Daten erfasst und gespeichert werden (Oria Agriculture, 2025) (Climate FieldView, 2023) (John Deere, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Feuchtigkeitsgehalt bei der Ernte (Lagerung)	In Prozent des Gesamtvolumens (%)

Messeinheit	Beispiel
Marktwarenanteil (Sortierung <2,2 mm und/oder Sortierung >2,5 mm)	Anteil an Körner die größer als 2,2/2,5mm sind in Prozent (%)
Tausendkorngewicht	Das Gewicht von 1000 Korn in Gramm (g)
Hektolitergewicht	Kilogramm pro Hektoliter (kg/hl)
Rohproteingehalt	Rohproteingehalt in Prozent der Gesamtmasse (%)
GPS-Daten pro Quadratmeter	Breitengrad: 48.208174°N, Längengrad: 16.373819°E, Höhe: 171m
Datum und Zeitstempel der Datenerfassung auf dem spezifischen Quadratmeter	07.10.2024 18:02:45

Tabella 19: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Qualitätseigenschaften der Gerste

Abstrakte:

Bei der Ernte werden die Daten pro Quadratmeter erfasst. Das heißt pro Ernte werden alle oben genannten Datenpunkte einmalig pro Quadratmeter mit GPS-Daten und Zeitstempel erfasst und gespeichert.

5.2 Prozessschritt Mälzen

5.2.1 Parameteridentifikation beim Mälzen am Beispiel Gerste

Folgende Eigenschaftskategorisierungen können beim Mälzen am Beispiel der Gerste identifiziert werden:

- Qualitätskriterien für Gerste
- Weichen
- Keimen
- Trocknen (Darren)

(Kiesbye, 2003)

5.2.1.1 Qualitätseigenschaften der Gerste

Das entspelzte Gerstenkorn, die Spelzen (äußeren Hüllblätter) sind vom Korn entfernt, hat folgende chemische Zusammensetzung:

Bestandteil	Gerstenanteil gewichtet in Prozent
Wasser	11,7
Protein	10,6
Lipide	2,1
Verwertbare Kohlenhydrate (Stärke)	63,3
Ballaststoffe	9,8
Mineralstoffe [mg/kg]	2,25

Tabella 20: Zusammensetzung der Gerste

(Hans-Dieter Belitz, 2008)

Anmerkung: Lagerfeste Gerste muss einen Wassergehalt unter 15% aufweisen (Kunze, 2023).

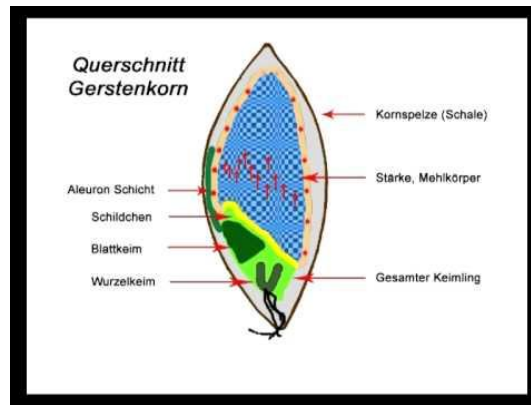


Abbildung 8: Querschnitt des Gerstenkorns

(Bier, 2014)

Die Parameter der Qualitätseigenschaften der Gerste wurden bereits im Abschnitt 5.1.1 Parameteridentifikation im Gerstenanbau und -ernte aus der Perspektive der Landwirtschaft aufgelistet. Nachfolgend werden die Parameter aus der Perspektive der Mälzer betrachtet:

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Rohproteingehalt im Malz	Beschreibt den Anteil an Proteinen und wird als Prozentsatz des Trockengewichts angegeben und ist typischerweise 0,3 – 0,4 % niedriger als der Korn-Proteingehalt. Proteine befinden sich in der Aleuronschicht, im Mehlkörper und im Keimling.	9 – 12%
Malzextraktgehalt	Beschreibt den Gehalt aller wasserlöslichen Bestandteile. Mindestens 81% Extraktausbeute wird erwartet. Jegliches Mehrextrakt ergibt mehr Bier.	<ul style="list-style-type: none"> • Helles Malz: 79 – 82 % • Dunkles Malz: 75 – 78 % Gemessen vom trockenen Malz (Weiss, 2014)
Friabilimeterwert	Beschreibt die Mürbigkeit der Gerstenmalzkörner. Beim Mälzen werden die Zellwände und -membranen mittels Enzyme, Cellulasen und β -Glucanasen, abgebaut, um den Zugang auf Stärke und Protein im Brauprozess zu erleichtern. (Bierland Österreich, 2025)	80%+ der Zellwände & -membranen sollten aufgelöst werden
Löslicher Stickstoffgehalt	Beschreibt wie viel Stickstoff in Form von löslichen Proteinen im Malz vorhanden ist.	650-750 mg/l (Weiss, 2014)
Kolbachzahl (Eiweißlösungsgrad)	Beschreibt das Verhältnis von löslichem Stickstoff zum Gesamtstickstoff an und wird in Prozent ausgedrückt. Eine höhere Kolbachzahl deutet auf eine bessere Löslichkeit der Proteine hin.	35-45% (Weiss, 2014)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Viskosität	Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit der Würze. Eine hohe Viskosität kann die Filtration der Würze verlangsamen und die Effizienz der Extraktion verringern. Eine niedrige Viskosität ist wünschenswert.	Millipascal x Sekunde angegeben. (mPa x s) 1,512 mPa x s (Weiss, 2014)
β-Glucangehalt	Beschreibt den Anteil an Beta-Glucanase die während des Keimprozesses gebildet wird, um die Zellwände des Mehlkörpers abzubauen. Je höher der Beta-Glucangehalt umso niedriger die Viskosität.	Milligramm pro Liter (mg/l) <ul style="list-style-type: none"> • Sehr gut: < 100 mg/l • Gut: 100-180 mg/l • Mittel: 180-250 mg/l • Mäßig: 250-320 mg/l • Schlecht: < 300 mg/l (Weiss, 2014)
Diastatische Kraft	Beschreibt ein Maß für die Aktivität der Enzyme, insbesondere der Beta-Amylasen, die Stärke in Zucker umwandeln. Ein hoher Wert bedeutet, dass das Malz eine hohe Enzymaktivität aufweist und somit effizienter Stärke in Zucker umwandeln kann. Die Messung der diastatischen Kraft, ist die Bestimmung der Menge an Maltose, in einer Maische aus 100 g Malz, nach 30 Minuten bei 20°C gebildet wird.	Windisch-Kolbach-Wert (°WK) Maltose Value (MV) Lintner-Wert (°L) 126 MV (BESTMALZ Pale Malz) 140.1 MV (Minch Vienna Malz)
Würzefarbe	Die Würzefarbe beschreibt die Farbe der Würze, die während des Brauprozesses aus dem Malz dieser Gerstensorte extrahiert wird. Würzefarbe wird bestimmt von der Gerstensorte, Standort, Jahresbedingungen und Mälzverfahren. ACHTUNG: Würzefarbe liefert keinen sicheren Hinweis auf die zu erwartende Bierfarbe.	European Brewery Convention (EBC)-Einheiten <ul style="list-style-type: none"> • Helle Malze: < 4 EBC • Mittlere Malze: 5 – 9 EBC • Dunkle Malze: 10 – 20 EBC 2,8 EBC (Weiss, 2014)
Dimethylsulfid (DMS) bzw. DMS-P (Precursor = Vorläufer)	Ist ein Fehl aroma im fertigen Bier, dass mit der Mälzung eingetragen wird. DMS-P muss bei der Kochung ausgetrieben werden. (Kiesbye, 2003)	DMS-P < 7 mg/kg 4,5 mg/kg

Tabelle 21: Identifizierte Parameter der Qualitätseigenschaften der Gerste

5.2.1.2 Weichen

Beim Weichen sind folgende Teilschritte beinhaltet:

- Reinigen/Sortieren
- Lagern
- Einweichen

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Beim Reinigen und Sortieren wird die Gerste maschinell gereinigt, von Grannen befreit und mittels Sieben sortiert. Nur gleichmäßig großes Gut, zwischen 2,2 mm und 2,5 mm Größe, wird für eine gleichmäßige Wasseraufnahme in der Weiche genutzt.

Das Gerstenkorn kann nicht gleich anfangen zu keimen und muss gelagert werden, sonst würde in einer winterlichen Wärmeperiode das Wachstum starten und das junge Pflänzchen wäre nicht überlebensfähig. Diese Lagerung nennt man Keimruhe. Die höchste Keimenergie besitzt der Samen erst nach circa 2 Monaten (Kiesbye, 2003). Das Korn muss bis Mitte Oktober keimfähig sein (Hansen, 2025).

Nach der Keimruhe wird die Gerste in Weichbottichen für 1 bis 2 Tage von unter 15 % auf 40 bis 45 % Wassergehalt gebracht. In den Weichbottichen muss die Gerste mit Sauerstoff versorgt werden. Die Mälzer nutzen dabei 2 sich mehrmals abwechselnde Phasen:

- Nassweiche, die Zeit, in der das Weichgut mit Wasser beaufschlagt, ist, um die Wasseraufnahme des Kornes zu beschleunigen.
- Trockenweiche, die Zeit, in der das Korn belüftet und damit am Leben gehalten wird.

Folgende Parameter können während des Weichens identifiziert werden:

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Vollgehaltsbestimmung	Beschreibt den Anteil der voll ausgebildeten, gesunden Körner im Vergleich zur Gesamtmenge. (MEBAK- Mitteleuropäische Brautechnische Analysekommision e.V., 2016)	85% - 95%
Keimenergie	Beschreibt den Anteil der Körner, die unter normalen Mälzungsbedingungen keimen. Die Keimenergie ist vor der Keimruhe bei ca. 30% - 60% der Körner und steigt maximal bis zur Vollgehaltsbestimmung. (MEBAK- Mitteleuropäische Brautechnische Analysekommision e.V., 2016)	<95%
Sortenrein	Beschreibt, ob die Gerste unterschiedliche Sorten beinhaltet. Weichen sollte nur Sortenrein durchgeführt werden, weil die unterschiedlichen Sorten auch unterschiedlich weichen und später auch keimen (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	Ja oder Nein
Lagerdauer	Dauer der Keimruhe in Tagen (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	Zwischen 42 und 60 Tagen 52 Tage
Lagertemperatur	Temperatur im Silo oder der Lagerstätte.	Zwischen 12° - 15°C 14°C

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	
Wassergehalt der Gerste	Beschreibt den Wassergehalt des Getreidekorns (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	Während der Lagerung: 12% - 15% Bis zum Ende der Weichung: 35% - 43%
Wassertemperatur	Beschreibt die Temperatur des Wassers bei der Nassweiche (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	12° - 18°C 16°C
Trinkwasserqualität	Beschreibt die Qualität als Trinkwasser oder nicht.	Ja oder Nein
PH-Wert	Beschreibt, wie sauer oder basisch das Wasser ist.	Ph-Wert: 6,5
Lufttemperatur	Beschreibt die Temperatur der Luft (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	25°C
Weichguttemperatur	Beschreibt die Temperatur des Korns unabhängig von Nass- und Trockenweiche (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	12° - 40°C
Weichschema	Beschreibt die Dauer von abwechselnden Nass- und Trockenweichen (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	Zeitaufzeichnung von Nass- und Trockenweichen
CO2-Gehalt im Raum	Beschreibt den CO2-Gehalt im Raum während der Weiche um sicher zu stellen, dass genügend Sauerstoff verfügbar und CO2 abgesaugt wird. (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011) (Rubin, 2023)	Zwischen 350 – 600 ppm Parts per Million (ppm)
Sauerstoffgehalt im Raum	Beschreibt den Sauerstoff-Gehalt im Raum während der Weiche, um sicher zu stellen, dass genügend Sauerstoff verfügbar und CO2 abgesaugt wird (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011) (Science19.com, 2024)	Wird sowohl in Prozent oder Parts per Million (ppm) angegeben. Sollte zwischen 20,9% (209.000 ppm) und 23,5% (235.000 ppm) liegen. 23% (230.000 ppm)

Tabelle 22: Identifizierte Parameter beim Weichen

5.2.1.3 Keimen

Die geweichte Gerste wird in 4 – 7 Tagen zum Keimen gebracht. Dabei bilden sich aus dem Keimling des Kornes Blatt- und Wurzelkeime und es werden im Korn Enzyme gebildet bzw. aktiviert.

Das Gerstenkorn besteht aus (Wasser)unlöslichen Makromolekülen, die sich in der Hauptsache aus Stärke und Eiweiß zusammensetzen, siehe *Tabelle 20: Zusammensetzung der Gerste* auf Seite 37.

Die korneigenen Enzyme, oder solche die erst während des Mälzens gebildet/freigesetzt werden, sind in der Lage, die genannten Makromoleküle abzubauen bzw. in kleinere, für den Blatt- und Wurzelkeim während des Wachstums verwertbare, Bestandteile zu zerlegen. Der Brauer, sowie der Mälzer machen sich diese Eigenschaft der Enzyme zu Nutze und forcieren die Lösungsvorgänge dort wo nötig und unterdrücken da, wo keine Notwendigkeit besteht (Weiss, 2014).

Es macht daher Sinn die Analyseparameter den Lösungsvorgängen zuzuordnen:

- Amylolyse - Stärkeabbau
- Proteolyse - Eiweißabbau
- Cytolyse (Zytolyse) – Gerüstsubstanzabbau findet nur in der Mälzung statt
- Sonstige Enzyme des Phosphat- und Fettabbaus

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Amylolyse: Alpha-Amylase	Enzym zur Umwandlung von Alpha-Glucane (Stärke) in Oligosaccharide, hochmolekulare Dextrine, Dextrine, Maltose, Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Milliliter (U/ml)
Amylolyse: Beta-Amylase	Enzym zur Umwandlung von Alpha-Glucane (Stärke) in Maltose, Maltotriose, Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Milliliter (U/ml)
Amylolyse: Maltase	Enzym zur Umwandlung von Maltose in Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Grenzdextrinase	Enzym zur Umwandlung von Grenzdextrine in Dextrine	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Saccharase	Enzym zur Umwandlung von Saccharose in Glucose, Fructose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Alpha-Glucane (Stärke)	Kohlenhydrate die durch die Amylase verändert werden.	Milligramm pro Gramm (mg/g) der Trockensubstanz
Amylolyse: Maltose (Malzzucker)	Malzzucker entsteht während des Abbaus von Stärke durch Amylase.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Grenzdextrine	Eine Gruppe von Kohlenhydraten die durch den Abbau von Stärke durch Alpha-Amylase entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Saccharose (Zucker)	Der Zucker der Gerste.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Amylolyse: Oligosaccharide	Kohlenhydrate die durch die Alpha-Amylase transformiert werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Dextrine	Gruppe von Kohlenhydraten, die durch den Abbau von Stärke entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Amylolyse: Glucose (Traubenzucker)	Zucker, der beim Abbau von Stärke durch Amylase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Amylolyse: Maltotriose	Zucker, der beim Abbau von Stärke durch Beta-Amylase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Fructose (Fruchtzucker)	Zucker der bei der Transformation von Saccharose durch Saccharase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Proteolyse: Endopeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen in Peptide und Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Carboxypeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen und Peptiden in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Aminopeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen und Peptiden in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Dipeptidase	Enzym zur Umwandlung von Dipeptide in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Proteine (Eiweiß)	Große komplexe Aminosäuren	Gramm pro Liter (g/L) Milligramm pro Liter (mg/L)
Proteolyse: Peptide	Kurze Ketten von Aminosäuren, die kleiner als Proteine sind	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Proteolyse: Aminosäuren	Sind Bausteine von Proteinen	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Proteolyse: Dipeptide	Kurze Ketten von 2 Aminosäuren, die durch den Abbau von Proteinen entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Cytolyse: Beta-Glucan-Solubilase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in lösliche, hochmolekulare Beta-Glucan	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Endo-1,3-Beta-Glucanase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in niedermolekulare Beta-Glucan, Cellobiose, Laminaribiose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Endo-1,4-Beta-Glycanase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in niedermolekulare Beta-Glucan, Cellobiose, Laminaribiose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Exo-Beta-Glucanase	Enzym zur Umwandlung von in Cellobiose, Laminaribiose in Glucose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Unlösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Ein Polysaccharid, komplexe Kohlenhydrate aus langen Ketten einfachen Zuckern. Es besteht in den Zellwänden von Getreiden, Gerste.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Lösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Ähnlich wie das unlösliche, hochmolekulare Beta-Glucan mit dem Unterschied, dass es mit Wasser gelöst werden kann.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Niedermolekulares Beta-Glucan	Ähnlich wie das hochmolekulare Beta-Glucan mit geringere Molekulargröße. Es kann leichter von Wasser gelöst werden.	Milligramm pro Liter (mg/L)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Cytolyse: Cellobiose	Zwei Glucosemoleküle (Zuckermoleküle) in einer speziellen Beta-1,4 Bindung. Es entsteht durch den Abbau von Cellulose, einem Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwände.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Laminaribiose	Zwei Glucosemoleküle (Zuckermoleküle) in einer speziellen Beta-1,3 Bindung.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Phosphat- und Fettabbau: Lipase	Enzym zur Umwandlung von Lipiden und Oxi-Lipide in Glycerin und freie, langkettige Fettsäuren	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Lipoxygenase	Enzym zur Umwandlung von freien, langkettigen Fettsäuren in Fettsäurehydroperoxide	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Polyphenoxydase	Enzym zur Umwandlung von Polyphenole in oxidierte Polyphenole	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Phosphatase	Enzym zur Umwandlung von organisch, gebundenes Phosphat in anorganisches Phosphat	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Lipide	Unlösliche Fette, die Hauptbestandteile der Zellmembranen sind und zur Stabilität und Flexibilität der Zellen beitragen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Oxi-Lipide	Oxidierte Fette, eine Untergruppe der Lipide	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Glycerin	Ein einfacher Zuckeralkohol, der in Wasser löslich ist.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Freie, langkettige Fettsäuren	Beschreibt Fettsäuren, die nicht an Glycerin gebunden sind.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Fettsäurehydroperoxide	Beschreibt Zwischenprodukte, die bei der Oxidation von Fettsäuren entstehen, die beim oxidativen (mit Sauerstoff) Abbau von Lipiden entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Phosphat- und Fettabbau: Polyphenole	Beschreibt sekundäre Pflanzenstoffe, die zum Schutz der Pflanzen vor UV-Strahlung und anderem genutzt werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Oxidierte Polyphenole	Beschreibt Stoffe, die entstehen, wenn Polyphenole mit Sauerstoff reagiert. Oxidierte Polyphenole sind oft für die Braunfärbung von Lebensmitteln wie Äpfel und Kartoffeln verantwortlich,	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	wenn sie geschnitten und der Luft ausgesetzt werden.	
Phosphat- und Fettabbau: Organisch, gebundenes Phosphat	Beschreibt Phosphate, organischen Verbindungen, die aus verschiedenen Quellen in die Pflanze gelangten, wie z.B. aus Humus. Sie bilden DNA & RNA.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Anorganisches Phosphat	Beschreibt Phosphate, anorganische Salze, die keine organischen Moleküle enthalten.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
pH-Wert des Wassers	Beschreibt ein Maß für Säure oder Alkalität von Wasser. Es wird in einer Skala von 0 – 15 gemessen, wobei 7 als neutral gilt. Wasser unter 7 gelten als sauer, während Werte über 7 alkalisches Wasser angeben.	pH-Wert
Temperatur	Beschreibt die Temperatur des in dem die Keimung stattfindet. Man unterscheidet die Temperatur: <ul style="list-style-type: none"> • oberhalb des Keimguts • unterhalb des Keimguts • Einströmluft <i>Anmerkung: Alle Temperaturen sind einfach zu messen und werden hier als 1 Parameter dargestellt.</i>	Grad Celsius (°C)
Luftfeuchtigkeit	Luftfeuchtigkeit am Raum der Keimung in Prozent	25%
Luftdruck	Beschreibt den Druck, den die Luft in der Atmosphäre auf die Erdoberfläche ausübt. Er wird durch das Gewicht der Luftsäule über einem bestimmten Punkt verursacht. Der Luftdruck variiert je nach Höhe über dem Meeresspiegel.	Hektopascal (hPa) Millibar (mbar)
CO ₂ -Gehalt im Raum	Beschreibt den CO ₂ -Gehalt im Raum während der Weiche, um sicher zu stellen, dass genügend Sauerstoff verfügbar und CO ₂ abgesaugt wird. (Rubin, 2023)	Zwischen 350 – 600 ppm Parts per Million (ppm)
Sauerstoffgehalt im Raum	Beschreibt den Sauerstoff-Gehalt im Raum während der Weiche, um sicher zu stellen, dass genügend Sauerstoff verfügbar und CO ₂ abgesaugt wird.	Wird sowohl in Prozent oder Parts per Million (ppm) angegeben. Sollte zwischen 20,9% (209.000 ppm) und 23,5% (235.000 ppm) liegen. 23% (230.000 ppm)
Wassergehalt der Gerste	Beschreibt den Wassergehalt des Getreidekorns	Nach der Weichung: 35% - 43% Nach der Keimung: ca. 50%

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	

Tabelle 23: Identifizierte Parameter beim Keimen

(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011) (Weiss, 2014)

5.2.1.4 Trocknen (Darren)

Die Aufgaben des Darrprozesses sind:

- Senkung des Wassergehalts, um das Malz lagerfähig zu machen
 - Malz vor dem Einlagern in die Darre wird als Grünmalz bezeichnet. Grünmalz mit ca. 50% Wassergehalt ist nicht lagerfähig.
 - Der Wassergehalt des Darrmalzes muss weniger als 5% werden.
 - Das Malz wird vorgetrocknet auf 10 – 12% Wassergehalt bevor die Temperatur auf über 50°C steigen kann. Es besteht die Gefahr, dass das Malz glasig wird und dabei schrumpft das Korn und es verliert einen hohen Anteil der Enzyme.
- Bildung von Farb- und Aromastoffen
 - Bildung von Melanoidinen, die bräunlich-rote Farbe und Aromen, die aus Zucker und Aminosäuren über 85°C entstehen.
 - Über 85°C bilden sich Reduktonen „Beschwerung des Bieres“, das das Bier vor Oxidation schützt.
 - Über 120°C bilden sich bei dunklen Malzen Assamaren. Dabei entsteht aus Zucker und Aminosäuren die Farbe und der bittere Geschmack des Malzes.
- Unterbrechung des Keimprozesses – Beendigung der Stoffumwandlung bzw. Auflösung sowie Festlegung der Malzzusammensetzung
 - Wasserentzug beendet die Enzymtätigkeit (Umwandlungsprozesse).
 - Die gebildeten Enzyme sollen weitgehend erhalten bzw. eingefroren bleiben.
- Entfernung des rohfruchtartigen Geruchs und Geschmacks
- Entfernung der Wurzelkeime

Der Darrprozess hat drei Abschnitte:

- Schwelken (10 – 12h) wird bei unter 60°C durchgeführt, bis das Malz <20% Wassergehalt hat. In diesem Abschnitt setzt die Enzymtätigkeit fort.
- Aufheizen (4 – 5h) ist das stufenweise Steigern der Temperatur (70°C bis 80°C) bis zur Abdarrtemperatur. Der Wassergehalt sinkt auf ca. 10%. Die Enzymtätigkeit wird bei einem Wassergehalt von <10% und einer Temperatur über 75°C inaktiv.
- Ausdarren (ca. 5h) reduziert den Wassergehalt auf unter 5%. Je nach gewünschter Mälzung kommen in diesem Abschnitt chemische Prozesse ins Spiel wie z.B. Melanoidinbildung. Das Ausdarren wird mit 75°C – 80°C beendet.

Erfahrungswerte:

- Je trockener das Malz beim Aufheizen, desto weniger Enzyme werden geschädigt.
- Je höher die Ausdarrtemperatur, desto dunkler die Malzfarbe (Bierfarbe) und desto besser wird Eiweiß ausgefällt (Schaumstabilität).

- Je länger die Ausdarrtemperatur gehalten wird, desto besser wird Eiweiß ausgefällt (Schaumstabilität).

Nach dem Darren wird das Malz:

- auf unter 20°C abgekühlt.
- entkeimt, um keinen bitteren Geschmack durch neue Keimung zu erhalten.
- poliert, bei dem die restlichen Wurzeln, Spelzenteile, Staub entfernt werden.
- gelagert, bei kühler, trockener Luft für 4 Wochen bis zu 2 Jahren. Bei Spezialmalzen und dunklen Malzen sollte die Lagerung nicht über 3 Monate dauern.

In Summe verliert das Malz ca. 3 – 4 % bei der Entkeimung und 0,5 – 1,5% beim Polieren.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Wassergehalt der Gerste	Beschreibt den Wassergehalt des Getreidekorns	Grünmalz: ca. 50% Nach Vortrocknung: 10 – 12% Fertiges Malz: <5%
Lufttemperatur	Beschreibt die Temperatur der Luft	Von 25°C bis über 120°C
Melanoidinen	Beschreibt braune, hochmolekulare heterogene Polymere, die entstehen, wenn Zucker und Aminosäuren bei hohen Temperaturen und niedriger Wasseraktivität miteinander reagieren.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
CO ₂ -Gehalt im Raum	Beschreibt den CO ₂ -Gehalt im Raum, um sicher zu stellen, dass genügend Sauerstoff verfügbar und CO ₂ abgesaugt wird. (Rubin, 2023)	Zwischen 350 – 600 ppm Parts per Million (ppm)
Sauerstoffgehalt im Raum	Beschreibt den Sauerstoff-Gehalt im Raum, um sicher zu stellen, dass genügend Sauerstoff verfügbar und CO ₂ abgesaugt wird.	Wird sowohl in Prozent oder Parts per Million (ppm) angegeben. Sollte zwischen 20,9% (209.000 ppm) und 23,5% (235.000 ppm) liegen. 23% (230.000 ppm)
Luftfeuchtigkeit	Luftfeuchtigkeit über dem Malz	Von 100% bis unter 10%
Luftdruck	Beschreibt den Druck, den die Luft in der Atmosphäre auf die Erdoberfläche ausübt. Er wird durch das Gewicht der Luftsäule über einem bestimmten Punkt verursacht. Der Luftdruck variiert je nach Höhe über dem Meeresspiegel.	Hektopascal (hPa) Millibar (mbar)
Malzfarbe	Die Farbe des Malzes nach der Darre.	European Brewery Convention (EBC)-Einheiten 6 EBC
Sämtliche Parameter <ul style="list-style-type: none"> • der Amylolyse - Stärkeabbau • Proteolyse - Eiweißabbau 		

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	<ul style="list-style-type: none"> • Cytolyse (Zytolyse) – Gerüstsubstanzaabbau findet nur in der Mälzung statt • Sonstigen Enzyme des Phosphat- und Fettabbaus Siehe Abschnitt 5.2.1.3 <i>Keimen</i> .	
Lagerdauer	Dauer der Lagerung des Malzes	30 – 700 Tage
Lagerlufttemperatur	Lufttemperatur während der Lagerung	Unter 20°C
Luftfeuchtigkeit	Luftfeuchtigkeit am Lagerraum in Prozent	<10%

Tabelle 24: Identifizierte Parameter beim Trocknen (Darren)

(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)

5.2.2 Vollständigkeit der Parameter im Mälzen

Die Parameter der Mälzung sind teilweise bereits seit Jahrhunderten von Mälzern und Brauern überliefert und in den letzten 150 Jahren detailliert analysiert worden.

Im Handel bieten Großmälzer wie Weyermann Spezialmalze 90+ Malzsorten an (Weyermann.de, 2025). Aufgrund der Vielzahl an Parametern gibt es eine nur schwer errechenbare mögliche Anzahl an Malzsorten pro Getreidesorte. Die im Abschnitt 5.2.1 *Parameteridentifikation beim Mälzen am Beispiel Gerste* gelisteten Parameter stellen nur einen Bruchteil der identifizierten Parameter dar.

Ausgehend von den analysierten Quellen, wird in dieser Abschlussarbeit angenommen, dass die im Abschnitt 5.2 *Prozessschritt Mälzen* gelisteten Parameter ein vollständiges Aromabild des Malzes abdecken.

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
Qualitätseigenschaften der Gerste	10	100%
Weichen	14	100%
Keimen	51	100%
Trocknen (Darren)	10	100%

Tabelle 25: Vollständigkeit der Parameter im Mälzen

Diese Annahmen sind im weiteren Verlauf praktisch zu validieren.

5.2.3 Digitale Erfassung der Parameter beim Mälzen am Beispiel der Gerste

Im Abschnitt 5.2.1 *Parameteridentifikation beim Mälzen am Beispiel Gerste* wurden derzeit bekannte Parameter der Mälzung ermittelt, um den Prozessschritt bestmöglich zu dokumentieren. Derzeit sind die Messungen typischerweise:

- einmalig.
- oder in unregelmäßigen Zeitabständen.
- oder nicht vollständig und nicht alle Parameter werden während der Mälzung gemessen.
- oder zu allgemein z.B. ein Wert wird für unterschiedliche EBC-Einheiten einer Mälzung angegeben.
- oder die Messgeräte sind nicht verfügbar.
- mit mehreren Medienbrüchen behaftet wie z.B. von der Messdurchführung über eine schriftliche Notiz bis zur Speicherung am Computer.

Anmerkung: In der Digitalisierung sind Medienbrüche so gering wie möglich zu halten!

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Messgeräte notwendig sind, um die entsprechenden Daten in den benötigten Zeitabständen zu erfassen.

5.2.3.1 *Parameter der Qualitätseigenschaften der Gerste*

5.2.3.1.1 *Parametergruppe Proteolyse: Rohproteingehalt im Malz, löslicher Stickstoff & Kolbachzahl*

Die Erfassung des Rohproteingehalts im Malz/Gesamtstickstoff, der lösliche Stickstoff und die Kolbachzahl/Eiweißlösungsgrad werden heute erst beim Darrmalz gemessen und sind stark von der Sorte, Düngung, Witterung und Jahrgang abhängig. Technisch wäre die Messung bereits ab der Keimung und bis zum Darrmalz möglich.

Messgeräte:

- Kjeldahl-Kolben wird genutzt um eine Kornprobe von 0,5 – 3g mit Schwefelsäure in Ammoniumsulfat umzuwandeln. Mittels Wasserdampfs wird Ammoniak gebunden und gemessen. Gemessen wird der Stickstoffgehalt und damit wird dann der Proteingehalt berechnet. Der Kjeldahl-Kolben wurde von Johan Kjeldahl im Forschungszentrum der Brauerei Carlsberg erfunden. Am Markt gibt es zahlreiche Kjeldahl System Hersteller, die mit dieser Methode den Rohproteingehalt von Proben messen und speichern können (Labtron, 2025).
- Dumas-Methode wird genutzt, um Kornproben zu verbrennen und damit den Stickstoff zu bestimmen. Mit Hilfe des Stickstoffs kann eine Elementaranalyse durchgeführt werden (Gerhardt Analytical Systems, 2025).
- Infrarotspektroskopie ist ein Analyseverfahren, das mit Hilfe von Infrarot die Schwingungen von Molekülen erfasst und somit eine Elementaranalyse durchführen kann (Laborhelfer.de, 2025), (Christian Zscherp, 2010). Es gibt zahlreiche Hersteller, die digitale Lösungen mittels Spektroskopie anbieten wie z.B. OceanOptics mit ihrem HR2-Spektrometer, der 10.000 Messungen in 200 ms durchführen kann (OceanOptics, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Rohproteingehalt im Malz (Gesamtstickstoff)	10,4% der Trockensubstanz
Löslicher Stickstoff	660 mg/l
Kolbachzahl	42%

Tabelle 26: Digitale Messeinheiten für Parameter Rohproteingehalt im Malz & löslicher Stickstoff

Abtaste:

Eine einmalige Abtaste des Darrmalzes wird heute durchgeführt. Basierend auf den unterschiedlichen Messmethoden unterscheidet man hier die einmalige Messung mittels einzelner Probe einer Mälzung per Kjeldahl- oder Dumas-Methode.

Eine einmalige Messung der gesamten Mälzung mittels Spektrometer ist möglich, indem sämtliche Körner durch das Gerät erfasst werden und pro Korn eine Messung durchgeführt wird.

Für die Digitalisierung sollten Messungen der gesamten Mälzung mittels Spektrometer pro Minute durchgeführt werden, um eine durchgängige Analyse der Mälzung zu ermöglichen.

5.2.3.1.2 *Parameter Malzextraktgehalt*

Der Malzextraktgehalt wird nicht in diesem Prozessschritt gemessen, sondern während des Maischens, des Würzekochens und spätestens vor dem Gärtank, siehe Abschnitt 5.3.3.2.3 *Parameter Extraktgehalt*.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

5.2.3.1.3 Parametergruppe Cytolyse: Friabilimeter, Beta-Glucangehalt, Viskosität

Der Friabilimeterwert misst die aufgelösten Zellwände & -membranen der Gerstenkörner. Heute wird der Friabilimeterwert, die Mürbigkeit und Glanzglasigkeit von Malzkörnern, einmalig nach dem Darrprozess durch einen Abriebvorgang bestimmt. Nur in Ausnahmen wird die Mürbigkeit von Malzkörnern anhand von, während des Mälzens entnommenen, Proben, die auf einen definierten Wassergehalt getrocknet werden, gemessen.

Der Beta-Glucangehalt gibt Auskunft über die Intensität des Enzyms Beta-Glucanase beim Abbau der Zellwände des Mehlkörpers.

Die Viskosität wird frühestens in der Maische gemessen.

Messgeräte:

- Friabilimeter: Ein Friabilimeter unterteilt mittels mechanischem Abriebtest die mürben Teile von den glasigen oder harten Bruchteilen einer Probe. Die Teile werden gewogen und in Prozent umgerechnet (Pfeuffer, 2025).
- Beta-Glucanasen: Infrarotspektroskopie ist ein Analyseverfahren, das mit Hilfe von Infrarot die Schwingungen von Molekülen erfasst und somit eine Elementaranalyse durchführen kann (Laborhelfer.de, 2025), (Christian Zscherp, 2010). Es gibt zahlreiche Hersteller, die digitale Lösungen mittels Spektroskopie anbieten wie z.B. OceanOptics mit ihrem HR2-Spektrometer, der 10.000 Messungen in 200 ms durchführen kann (OceanOptics, 2025).
- Die Viskosität der Maische und der Würze kann mittels Viskosimeter gemessen werden (Anton Paar, 2025)

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Friabilimeter	88,5% Mürbigkeit, 1,8% Ganzglasigkeit
Beta-Glucangehalt	220 mg/l
Viskosität	1,512 mPa x s

Tabelle 27: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Cytolyse: Friabilimeter, Beta-Glucangehalt & Viskosität

Abtastrate:

Der Friabilimeter von Pfeuffer benötigt 8 Minuten zur Messung. Für die Digitalisierung sollten die Werte ab dem Keimen bis zur Aufheizphase des Darrens und bis zu einer maximalen Temperatur von 75°C alle 8 Minuten gemessen werden.

Mit Spektrometer ist es möglich 10.000 Messungen in 200 ms durchzuführen und somit auch den Beta-Glucangehalt zu ermitteln. Für die Digitalisierung sollte der Beta-Glucangehalt ab dem Keimen bis zur Aufheizphase des Darrens und bis zu einer maximalen Temperatur von 75°C jede Minute gemessen werden.

Viskosimeter benötigen mehrere Minuten zur Messung. Für die Digitalisierung sollten die Werte ab der Maische und bis zum fertigen Bier, alle 10 Minuten gemessen werden.

5.2.3.1.4 Parameter Diastatische Kraft

Die diastatische Kraft wird in Windisch-Kolbach-Wert (°WK) angegeben und benennt die Menge der gebildeten Maltose in Milligramm pro 100 g Malz in 30 Minuten bei 20°C. Die diastatische Kraft wird während der Qualitätskontrolle des Malzes gemessen. Die Messung erfolgt oft in spezialisierten Laboren und eine Messung dauert mehrere Stunden.

Schriftliche Abschlussarbeit

Messgeräte:

- Messungen mit mehreren Amylase Assay Kits von Megazyme sind notwendig um die diastatische Kraft zu berechnen (Megazyme by Neogen, 2025).
- Mit Spektrometern kann innerhalb kürzester Zeit die Menge an freigesetzten Oligosacchariden, hochmolekularen Dextrinen, Dextrinen, Maltosen, Glucosen, Maltotriosen, Fructosen ermittelt werden. Mit der Identifikation aller resultierenden Stoffe der Amylase, einer bestimmten Menge und einer bestimmten Zeit, kann die diastatische Kraft laufend berechnet werden (Lucie M.J. Charmier, 2021). Spektrometer ermöglichen ein Analyseverfahren, dass mit Hilfe von Infrarot die Schwingungen von Molekülen erfasst und somit eine Elementaranalyse durchführen kann (Laborhelfer.de, 2025), (Christian Zscherp, 2010). Es gibt zahlreiche Hersteller, die digitale Lösungen mittels Spektroskopie anbieten wie z.B. OceanOptics mit ihrem HR2-Spektrometer, der 10.000 Messungen in 200 ms durchführen kann (OceanOptics, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Diastatische Kraft	134.1 MV (Pilsner Malz)

Tabelle 28: Digitale Messeinheiten für den Parameter Diastatische Kraft

Abtaste:

Mit einem Spektrometer ist es möglich 10.000 Messungen in 200 ms durchzuführen und somit alle zu ermittelnden Stoffe auszuwerten. Für die Digitalisierung sollte die diastatische Kraft ab dem Keimen bis zur Aufheizphase des Darrens und bis zu einer maximalen Temperatur von 75°C jede Minute gemessen werden.

5.2.3.1.5 Parametergruppe Sonstige Enzyme: Würzefarbe, Dimethylsulfid (DMS)

Die Würzefarbe wird gemessen, um eine Zuordnung zum Malztyp z.B. Pilsnermalz zu ermöglichen. Sie wird typischerweise nach dem Läutern und vor dem Kochen gemessen.

Dimethylsulfid kann beim Mälzen und beim Würzekochen auftreten. Eine Messung von Dimethylsulfid und Dimethylsulfid-Precursor (Mälzen) sollte auf einem sensorisch, akzeptablen Niveau reduziert sein.

Messgeräte:

- Die Würzefarbe wird mittels Spektralphotometrie, einem Spektralphotometer, gemessen. Auf einer Quarzglasküvette und einer Wellenlänge von 430 nm wird der Absorptionswert gemessen. Der erhaltene Absorptionswert wird mit dem 25-fachen Logarithmus zum EBC-Wert umgerechnet werden, wobei die Formel $EBC = 25 \times A_{430}$ verwendet wird, wobei A_{430} die gemessene Extinktion bei 430 nm ist. (Ascher, 2022) (Mettler Toledo, 2025).
- Dimethylsulfid (DMS/DMS-P) wird mittels Gaschromatographen und einem dazugehörigen Flammenionisationsdetektor (FID) gemessen (Leitner, 2010).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Würzefarbe	8 EBC
Dimethylsulfid (DMS)	25 Mikrogramm pro Liter ($\mu\text{g/L}$) – über 30 $\mu\text{g/L}$ erkennbar

Tabelle 29: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Sonstige Enzyme: Würzefarbe, Dimethylsulfid (DMS)

Schriftliche Abschlussarbeit

Abstrakte:

Die Würzefarbe kann mittels Spektralphotometer in wenigen Sekunden gemessen werden. Für die Digitalisierung sollten Messungen im Minutentakt ab der Läuterung bis vor den Gärtank durchgeführt werden.

Eine Messung mittels Gaschromatographen und Flammenionisationsdetektor dauert zwischen 20 bis 60 Minuten. Während dieser Zeitspanne sind zahlreiche Probenentnahmen durchzuführen. Diese Probenentnahmen müssen derzeit händisch durchgeführt werden. Für die Digitalisierung sind gespeicherte Messungen im Intervall von 20 oder 60 Minuten beim Mälzen ausreichend. DMS-Messungen zwischen Läutern und Gärtank müssten zeitverzögert und parallelisiert werden, um den DMS-Wert aufzuzeichnen.

Anmerkung: Die Messgeräte sind vorhanden, aber die Dauer der Messung ist bei der DMS-Messung zwischen Läutern und Gärtank zu lange. Für eine Messung im Minutentakt oder in Echtzeit müssten die Messgeräte weiter entwickelt werden.

5.2.3.2 Parameter beim Weichen

5.2.3.2.1 Parametergruppe Reinigen, Sortieren und Lagern: Vollgehaltsbestimmung, Keimenergie, Sortenrein, Lagerdauer, Lagertemperatur

Beim Reinigen und Sortieren ist ein Fokus auf der Auswahl der Gerstenkörner, die dem Vollgehalt bzw. der entsprechenden Keimenergie entsprechen und mit der korrekten Temperatur und Dauer gelagert wurden. Sortenreinheit muss bei der Ernte sicher gestellt und kann nur mittels DNA-Analyse in Stichproben überprüft werden.

Messgeräte:

- Vollgehaltsbestimmung, Keimenergie: Nah-Infrarot-Reflexions-Spektroskopie (NIRS) kann bereits bei der Sortierung eingesetzt werden, um nur voll ausgebildete und gesunde Körner für die nächsten Schritte freizugeben (BOKU - Universität für Bodenkultur Wien, 2024), (Steinert, 2025).
- Sortenreinheit: Die Sortenreinheit kann nur mittels Stichproben (50 Körner) und einer DNA-Analyse überprüft werden (Jun Wang, 2012). Die Malzsorte kann mit den Daten des Verkäufers genutzt werden, siehe Abschnitt 5.2.2 *Vollständigkeit der Parameter im Mälzen*.
- Lagertemperatur: Jeglicher Thermometer, der die Temperatur kontinuierlich speichern oder übertragen kann wie z.B. Netvox R718A Temperatur Sensor (IoT-Shop, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Vollgehaltsbestimmung	95%
Keimenergie	90%
Sortenreinheit	Ja oder nein (1 oder 0)
Lagertemperatur	12°C
Lagerdauer	52 Tage
Datum und Zeitstempel	20.10.2024 08:00:00

Tabelle 30: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Reinigen, Sortieren und Lagern

Abtastrate:

Die Messung für die Vollgehaltsbestimmung und die Keimenergie ist einmalig bei der Sortierung mittels der Sortiermaschine durchzuführen. Nach der Sortierung können die Messdaten angegeben werden.

Eine DNA-Analyse ist innerhalb mehrerer Tage durchführbar. Eine Analyse von 50 Körnern als Testgruppe der Sortenreinheit kann derzeit nur einmalig durchgeführt werden.

Für die Digitalisierung kann die Lagertemperatur im Stunden- oder Minutentakt gemessen und gespeichert werden.

Die Lagerdauer ergibt sich als Differenz zwischen dem Einlagerungszeitpunkt und dem Auslagerungszeitpunkt.

5.2.3.2.2 Parametergruppe Weichen

Beim Weichen werden die Parameter in Wasser, Luft und Weichgut unterteilt. Alle Parameter können während des Weichens und Darrens gemessen werden.

Messgeräte:

- Wassergehalt der Gerste: Infrarotspektroskopie ist ein Analyseverfahren, das mit Hilfe von Infrarot die Schwingungen von Molekülen erfasst und somit eine Elementaranalyse durchführen kann (Laborhelfer.de, 2025), (Christian Zscherp, 2010). Der Wassergehalt wird im Wellenlängenbereich von 850 – 1050 nm gemessen wie z.B. OceanOptics mit ihrem HR2-Spektrometer, der 10.000 Messungen in 200 ms durchführen kann (OceanOptics, 2025).
- Wassertemperatur: Mittels Wasserthermometer, der eine laufende Messung durchführen kann.
- Trinkwasserqualität: Die Trinkwasserqualität kann mittels Total Dissolved Solids (TDS) Messgeräten gemessen werden. Diese Messgeräte können Daten in Echtzeit ermitteln und entsprechend speichern. Ein Beispiel ist der TDSBot von WaterTDS Inc. (Water TDS Inc., 2025)
- pH-Wert: pH-Wert-Messgeräte können den pH-Wert in Echtzeit ermitteln und speichern.
- Lufttemperatur: Mittels Thermometer können laufende Messungen in Echtzeit durchgeführt werden.
- Weichguttemperatur: Mittels Infrarot-Thermometer kann das Weichgut laufend gemessen werden (uwe electronic, 2025).
- Weichschema: Das Weichschema kann mittels Pumpensteuerung und einem Zeitstempel gemessen werden. Beim Start vom Nassweichen wird mittels Pumpen Wasser eingeleitet und die Nassweiche begonnen. Beim Wechsel in die Trockenweiche, kann neuerlich mittels Pumpensteuerung und einem Zeitstempel eine Messung gemacht werden. Mit dem Zusammenführen aller Daten kann das Weichschema errechnet und/oder gespeichert werden.
- CO₂-Gehalt: Der CO₂-Gehalt kann mittels CO₂-Infrarot-Sensoren gemessen und gespeichert werden, wie z.B. mittels Vaisalla CARBOACAP Sensoren (Vaisalia, 2025).
- Sauerstoff-Gehalt: Der Sauerstoff-Gehalt kann mittels spezifischer Sensoren gemessen und gespeichert werden, wie z.B. mittels PST Sauerstoff-Sensor-Gas-Kompatibilität (Carbon Dioxide) (PST - Process Sensing Technologies, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Wassergehalt der Gerste	38%
Wassertemperatur	16°C
Trinkwasserqualität	Ja oder Nein (1 oder 0)
pH-Wert	6,5
Lufttemperatur	25°C
Weichguttemperatur	25°C
Weichschema	Zeitpunktspezifisch Nass- oder Trockenweiche
CO ₂ -Gehalt	400 ppm
Sauerstoff-Gehalt	210.000 ppm
Datum und Zeitstempel	20.10.2024 08:00:00

Tabelle 31: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Weichen

Abtaste:

Alle Parameter beim Weichen können mit den entsprechenden Messgeräten in Echtzeit erfasst und gespeichert werden. Für die Digitalisierung sollte pro Minute ein Messpunkt pro Messgerät erfasst werden.

5.2.3.3 Parameter beim Keimen**5.2.3.3.1 Parametergruppe Amylolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau**

Die Parameter beim Keimen sind in erster Linie die Ausgangsstoffe, die Enzyme und die resultierenden Stoffe des Umwandlungsprozesses. Für die Digitalisierung sollten für die Dauer der Keimung alle angeführten Parameter gemessen, die Ergebnisse erfasst und gespeichert werden.

Messgeräte:

- Alle genannten Stoffe dieser Parametergruppe können mittels Flüssigkeitschromatographen (HPLC) und/oder Spektrometer kombiniert, gemessen werden (Agilent Infinity Lab, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Alpha-Amylase	100 mg/L
Beta-Amylase	170 mg/L
Maltase	100 mg/L
Grenzdextrinase	40 mg/L
Saccharase	30 mg/L
Alpha-Glucane	150 mg/L
Maltose	100 mg/L
Grenzdextrine	30 mg/L
Glucose	14 mg/L
Maltotriose	75 mg/L
Fructose	44 mg/L
Endopeptidase	13 mg/L
Carboxypeptidase	17 mg/L
Aminopeptidase	40 mg/L
Dipeptidase	47 mg/L
Proteine	270 mg/L
Peptide	20 mg/L

Schriftliche Abschlussarbeit**Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion**

Messeinheit	Beispiel
Aminosäuren	31 mg/L
Dipeptide	34 mg/L
Beta-Glucan-Solubilase	13 mg/L
Endo-1,3-Beta-Glucanase	47 mg/L
Endo-1,4-Beta-Glycanase	33 mg/L
Exo-Beta-Glucanase	11 mg/L
Unlösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	45 mg/L
Lösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	24 mg/L
Niedermolekulares Beta-Glucan	47 mg/L
Cellobiose	23 mg/L
Laminaribiose	38 mg/L
Lipase	10 mg/L
Lipoxygenase	50 mg/L
Polyphenoloxydase	17 mg/L
Phosphatase	21 mg/L
Lipide	22 mg/L
Oxi-Lipide	16 mg/L
Glycerin	45 mg/L
Freie, langkettige Fettsäuren	19 mg/L
Fettsäurehydroperoxide	44 mg/L
Polyphenole	12 mg/L
Oxidierete Polyphenole	37 mg/L
Organisch, gebundenes Phosphat	40 mg/L
Anorganisches Phosphat	19 mg/L

Tabelle 32: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Parametergruppe Amylololyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau beim Keimen

Abtastrate:

Alle angeführten Parameter können mittels HPLC und/oder Spektrometer kombiniert, gemessen werden. Eine Messung mittels HPLC dauert zwischen 5 und 30 Minuten. Es gibt bereits HPLCs mit laufender Proben-Befüllung um die Daten verzögert, aber durchgängig zu erfassen und zu speichern. D.h. nach 5 bis 30 Minuten wird die erste Messung sichtbar, während die folgenden im Minutentakt, dennoch 5 bis 30 Minuten verspätet, erfasst werden können.

Anmerkung: Die Messgeräte sind vorhanden, aber die Dauer der Messung benötigt zu lange. Für eine Messung im Minutentakt oder in Echtzeit müssten die Messgeräte weiter entwickelt werden.

5.2.3.3.2 Parametergruppe sonstige Parameter des Keimens

Alle sonstigen Parameter des Keimens wurden bereits in Abschnitt 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen* erläutert.

5.2.3.4 Parameter beim Trocknen (Darren)

5.2.3.4.1 Parametergruppe Darren

In der Parametergruppe Darren fallen Wassergehalt der Gerste, Lufttemperatur, CO₂-Gehalt im Raum, Sauerstoffgehalt im Raum, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, die bereits im Abschnitt 5.1.3.3.1 *Parameter Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit* und 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen* erläutert wurden.

5.2.3.4.2 Parameter Melanoidin

Melanoidine werden für die Farbe, den Geschmack und die Stabilität des Bieres benötigt.

Messgeräte:

- Mittels Infrarot-Spektrometer können Melanoidine gemessen werden (Andrea Hornemann, 2019).
- **Digitale Messeinheiten:**

Messeinheit	Beispiel
Melanoidine	47 mg/L

Table 33: Digitale Messeinheiten für Melanoidin

Abtastrate:

Infrarot-Spektrometer können innerhalb einer Minute den Anteil an Melanoidinen ermitteln. Für die Digitalisierung sollten die Messungen im Minutentakt erfasst und gespeichert werden.

5.2.3.4.3 Parameter Malzfarbe

Mit dem Start der Darre, kann die Farbe des Malzes gemessen werden.

Messgeräte:

- Mittels Spektralphotometer für Transmissions- und Reflexionsgrad und Farbkomparatoren kann die Malzfarbe gemessen werden (Labworld, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Malzfarbe	European Brewery Convention (EBC)-Einheiten 6 EBC

Table 34: Digitale Messeinheiten für Malzfarbe

Abtastrate:

Die Farbmessung kann in Echtzeit durchgeführt werden. Für die Digitalisierung ist eine Messung pro Minute ausreichend.

5.2.3.4.4 Parametergruppe Amylyolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau

Diese Parametergruppe wurde bereits in Abschnitt 5.2.3.3.1 *Parametergruppe Amylyolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau* erläutert.

5.2.3.4.5 Lagerung

Nach dem Darren wird das Malz gelagert. Um die optimale Lagerung sicher zu stellen, sind die Parameter Lagerdauer, Lagerlufttemperatur und Luftfeuchtigkeit durchgängig zu messen.

Alle angeführten Parameter wurden bereits in Abschnitt 5.2.3.2.1 *Parametergruppe Reinigen, Sortieren und Lagern: Vollgehaltsbestimmung, Keimenergie, Sortenrein, Lagerdauer, Lagertemperatur* und im Abschnitt 5.1.3.3.1 *Parameter Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit* erläutert.

5.3 Prozessschritt Maischen

5.3.1 Parameteridentifikation beim Maischen

Das Maischen findet im Sudhaus statt. Die Parameter werden basierend auf den folgenden Teilschritten definiert:

- Malzschrotung
- Maischen
- Abläutern

(Kiesbye, 2003)

5.3.1.1 Malzschrotung

Das Schroten ist die mechanische Zerkleinerung des Malzes. Das findet üblicherweise im Sudhaus kurz vor dem Einbrauen statt, um oxidative Nachteile, die entstehen können, wenn die große reaktive Oberfläche des gemahlene Kornes mit der Umgebungsluft reagiert, klein zu halten. Je nach Typ, Güte und Einstellungen der Schrotmühle ist die Schrotzusammensetzung etwas unterschiedlich:

- Spelzenanteil: 20% - siehe *Abbildung 8: Querschnitt des Gerstenkorns*
- Grobgrießanteil: 10%
- Feingrießanteil: 60%
- Mehlanteil: 10%

(Kiesbye, 2003)

Die Schrotung hängt ab vom

- Wassergehalt des Malzes
- Malzlösung
- Maischverfahren
- Abläutersystem
- Gewünschten Biertyp
- Bauart der Schrotmühle

(Braucher-Berufsschule Ulm, 1993)

Folgende Zusammenhänge sind bekannt:

- Je schlechter gelöst das Malz, desto besser muss geschrotet werden. Die Löslichkeit des Malzes wird durch den Malzextraktgehalt definiert, siehe 5.2.1.1 *Qualitätseigenschaften der Gerste*.
- Je feuchter das Malz, desto schwieriger das Schroten.
- Je intensiver das Maischverfahren, desto weniger Bedeutung hat die Schrotung.
- Je heller der Biertyp, desto kürzere Maischkochzeiten.

(Braucher-Berufsschule Ulm, 1993)

Aus den oben genannten Angaben lassen sich folgende Parameter identifizieren:

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Wassergehalt der Gerste/Malzes	Beschreibt den Wassergehalt des Getreidekorns vor dem Einmaischen	Während der Lagerung: 12-15%

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)	
Verteilung der Partikelgrößen im Malzschrot	Beschreibt die Zerlegung des Malzschrotes nach dem Zerkleinerungsgrad in seine Bestandteile als Kontrolle der Schrotung bzw. Schrotmühleneinstellung. (Gradplato.com, 2025)	Unterteil wird in folgende Teilchengrößen: <ul style="list-style-type: none"> • >1000µ: gr. Grieß, Schrot • 600µ-1000µ: gr. Grieß • 280µ-600µ: gr. Dunst, feiner/mittlerer Grieß • 140µ-280µ: Dunst • <140µ: Mehl
Malztemperatur	Beschreibt die Temperatur des Malzes während der Schrotung. Die Malztemperatur sollte während der Schrotung 30°C nicht überschreiten, da ansonst die Enzyme aktiviert werden.	28°C

Tabelle 35: Identifizierte Parameter der Malzschrotung

5.3.1.2 Maischen

Beim Mälzen, insbesondere beim Keimen siehe Abschnitt 5.2 *Prozessschritt Mälzen*, wurden die Enzyme erstmalig aktiviert, die beim Maischen zum zweiten Mal aktiviert werden um, nach der Vereinigung des Malzschrotes mit dem Einmischwasser, die Stärke zu Zuckermoleküle abbauen.

Welche Anteile an Zucker in der Maische vorherrschen, hat maßgeblich Einfluss auf das spätere Bier. Die Anteile kann der Brauer mehr oder weniger beliebig durch sein genaues Maischverfahren einstellen. Er weiß nämlich, dass die verschiedenen Enzyme unterschiedliche „Lebensbedingungen“ benötigen.

(Kiesbye, 2003)

Grundsätzlich unterscheidet man Maischprogramme in

- Mehrstufige Infusion (das heute übliche Verfahren in modernen Brauereien)
- Dekoktionsverfahren

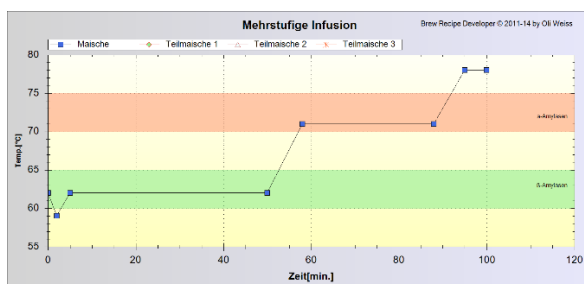


Tabelle 36: Mehrstufige Infusion

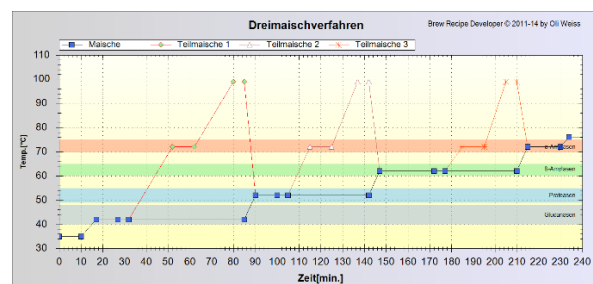


Tabelle 37: Dekoktionsverfahren - Dreimaischverfahren

(Staudt, 2014)

Bei der mehrstufigen Infusion wird die gesamte Maische stufenweise immer weiter erhitzt, bis dann bei circa 78°C das Maischen beendet wird.

Beim Dekoktionsverfahren wird ein Teil der Maische aufgeköcht, um die Stärke zusätzlich thermisch in Zuckermoleküle zu spalten und folgend durch Zubrühen mit dem nicht gekochten Maischeteil den enzymatischen Abbau weiter zu betreiben (Kiesbye, 2003).

Zum Ende der Maische kann erstmalig die Würzeanalyse, die Analyse der durch die Maische erhaltenen Würze, durchgeführt werden. Die Würzeanalyse wird normalerweise frühestens nach dem Abläutern durchgeführt. Im Falle einer Digitalisierung können einige dieser Parameter während der Maische durchgängig gemessen werden um jederzeit wieder auf die entsprechenden, bestenfalls exakten, Werte der Maische zu kommen.

Aus den oben beschriebenen Informationen ergeben sich folgende Parameter. Im Falle eines Dekoktionsverfahrens sind die Parameter für jede Teilmaische und die Gesamtmaische einzeln zu betrachten.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Maischtemperatur	Beschreibt die Temperatur der Maische vom Einmischen bis zur Abmaische.	<ul style="list-style-type: none"> • Einmischtemperatur: 35°C • Eiweißrast: 50°C • Abmischtemperatur: 78°C
Maischdauer	Beschreibt die Dauer der Maische.	240 Minuten
pH-Wert	Beschreibt, wie sauer oder basisch Wasser ist.	pH-Wert: 6,5
Trinkwasserqualität	Beschreibt die Qualität als Trinkwasser oder nicht.	Ja oder Nein
Karbonathärte (KH) des Brauwassers	Beschreibt die Menge der im Wasser gelösten Carbonat- und Hydrogencarbonat-Ionen an. KH erhöht den pH-Wert und kann zu weniger Enzymeffektivität führen.	14,2° dH (München) (Bier Akademie Bayern, 2025)
Nichtkarbonathärte (NKH) des Brauwassers	Beschreibt die Menge der im Wasser gelösten Calcium- und Magnesium-Ionen an. NKH stabilisieren den pH-Wert.	0,6° dH (München) (Bier Akademie Bayern, 2025)
Gesamthärte (°dH)	Gibt die Summe der KH und NKH im Wasser an.	14,8° dH (München) (Bier Akademie Bayern, 2025)
Konzentration der Maische	Beschreibt das Verhältnis von Malz zu Wasser während des Einmischens und wird im Verhältnis (kg/h) angegeben.	1:3 (1 kg Malz auf 3 Liter Wasser)
Malztyp	Beschreibt die Art des Malzes, das im Brauprozess verwendet wird. Typischerweise werden mehrere Malztypen gemischt verwendet.	Pilsner Malz, Wiener Malz
Malzmenge	Beschreibt die Menge eines Malztyps in der Maische. Typischerweise werden mehrere Malztypen gemischt eingemaischt.	10 kg Münchner Malz
Würzeanalyse: Farbe	Beschreibt die Farbe der Maische und gibt Aufschluss über die Malzsorten/-typen und den Röstgrad des Malzes.	4 EBC (European Brewery Convention)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	Die Farbe der Maische bestimmt nicht die Farbe des Bieres, aber hat deutlichen Einfluss.	
Würzeanalyse: Extraktgehalt	Beschreibt wie viel von den gelösten Stoffen in der Maische tatsächlich vergärbar ist. Dies wird oft als scheinbarer und wirklicher Extrakt angegeben.	11° P (Grad Plato)
Amylolyse: Alpha-Amylase	Enzym zur Umwandlung von Alpha-Glucane (Stärke) in Oligosaccharide, hochmolekulare Dextrine, Dextrine, Maltose, Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Milliliter (U/ml)
Amylolyse: Beta-Amylase	Enzym zur Umwandlung von Alpha-Glucane (Stärke) in Maltose, Maltotriose, Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Milliliter (U/ml)
Amylolyse: Maltase	Enzym zur Umwandlung von Maltose in Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Grenzdextrinase	Enzym zur Umwandlung von Grenzdextrine in Dextrine	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Saccharase	Enzym zur Umwandlung von Saccharose in Glucose, Fructose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Alpha-Glucane (Stärke)	Kohlenhydrate die durch die Amylase verändert werden.	Milligramm pro Gramm (mg/g) der Trockensubstanz
Amylolyse: Maltose (Malzzucker)	Malzzucker entsteht während des Abbaus von Stärke durch Amylase.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Grenzdextrine	Eine Gruppe von Kohlenhydraten die durch den Abbau von Stärke durch Alpha-Amylase entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Saccharose (Zucker)	Der Zucker der Gerste.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Amylolyse: Oligosaccharide	Kohlenhydrate die durch die Alpha-Amylase transformiert werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Dextrine	Gruppe von Kohlenhydraten, die durch den Abbau von Stärke entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Glucose (Traubenzucker)	Zucker, der beim Abbau von Stärke durch Amylase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Amylolyse: Maltotriose	Zucker, der beim Abbau von Stärke durch Beta-Amylase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Fructose (Fruchtzucker)	Zucker der bei der Transformation von Saccharose durch Saccharase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Proteolyse: Endopeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen in Peptide und Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Carboxypeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen und Peptiden in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Amino-peptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen und Peptiden in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Proteolyse: Dipeptidase	Enzym zur Umwandlung von Dipeptide in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Proteine (Eiweiß)	Große komplexe Aminosäuren	Gramm pro Liter (g/L) Milligramm pro Liter (mg/L)
Proteolyse: Peptide	Kurze Ketten von Aminosäuren, die kleiner als Proteine sind	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Proteolyse: Aminosäuren	Sind Bausteine von Proteinen	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Proteolyse: Dipeptide	Kurze Ketten von 2 Aminosäuren, die durch den Abbau von Proteinen entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Cytolyse: Beta-Glucan-Solubilase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in lösliche, hochmolekulare Beta-Glucan	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Endo-1,3-Beta-Glucanase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in niedermolekulare Beta-Glucan, Cellobiose, Laminaribiose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Endo-1,4-Beta-Glycanase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in niedermolekulare Beta-Glucan, Cellobiose, Laminaribiose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Exo-Beta-Glucanase	Enzym zur Umwandlung von in Cellobiose, Laminaribiose in Glucose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Unlösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Ein Polysaccharid, komplexe Kohlenhydrate aus langen Ketten einfachen Zuckern. Es besteht in den Zellwänden von Getreiden, Gerste.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Lösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Ähnlich wie das unlösliche, hochmolekulare Beta-Glucan mit dem Unterschied, dass es mit Wasser gelöst werden kann.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Niedermolekulares Beta-Glucan	Ähnlich wie das hochmolekulare Beta-Glucan mit geringere Molekulargröße. Es kann leichter von Wasser gelöst werden.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Cellobiose	Zwei Glucosemoleküle (Zuckermoleküle) in einer speziellen Beta-1,4 Bindung. Es entsteht durch den Abbau von Cellulose, einem Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwände.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Laminaribiose	Zwei Glucosemoleküle (Zuckermoleküle) in einer speziellen Beta-1,3 Bindung.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Phosphat- und Fettabbau: Lipase	Enzym zur Umwandlung von Lipiden und Oxi-Lipide in Glycerin und freie, langkettige Fettsäuren	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Phosphat- und Fettabbau: Lipoxygenase	Enzym zur Umwandlung von freien, langkettigen Fettsäuren in Fettsäurehydroperoxide	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Polyphenoloxydase	Enzym zur Umwandlung von Polyphenole in oxidierte Polyphenole	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Phosphatase	Enzym zur Umwandlung von organisch, gebundenem Phosphat in anorganisches Phosphat	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Lipide	Unlösliche Fette, die Hauptbestandteile der Zellmembranen sind und zur Stabilität und Flexibilität der Zellen beitragen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Oxi-Lipide	Oxidierte Fette, eine Untergruppe der Lipide	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Glycerin	Ein einfacher Zuckeralkohol, der in Wasser löslich ist.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Freie, langkettige Fettsäuren	Beschreibt Fettsäuren, die nicht an Glycerin gebunden sind.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Fettsäurehydroperoxide	Beschreibt Zwischenprodukte, die bei der Oxidation von Fettsäuren entstehen, die beim oxidativen (mit Sauerstoff) Abbau von Lipiden entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Phosphat- und Fettabbau: Polyphenole	Beschreibt sekundäre Pflanzenstoffe, die zum Schutz der Pflanzen vor UV-Strahlung und anderem genutzt werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Oxidierte Polyphenole	Beschreibt Stoffe, die entstehen, wenn Polyphenole mit Sauerstoff reagiert. Oxidierte Polyphenole sind oft für die Braunfärbung von Lebensmitteln wie Äpfel und Kartoffel verantwortlich, wenn sie geschnitten und der Luft ausgesetzt werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Organisch, gebundenes Phosphat	Beschreibt Phosphate, organische Verbindungen, die aus verschiedenen Quellen in die Pflanze gelangten, wie z.B. aus Humus. Sie bilden DNA & RNA.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Anorganisches Phosphat	Beschreibt Phosphate, anorganische Salze, die keine organischen Moleküle enthalten.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz

Tabelle 38: Identifizierte Parameter der Maische

5.3.1.3 Abläutern

Beim Abläutern werden die ungelösten Stoffe (Treber) von den gelösten Stoffen (Würze) getrennt. Diese Trennung erfolgt in zwei Stufen:

- Vorderwürze: Im Läuterbottich setzen sich die Feststoffe langsam ab und werden über einem geschlitzten Siebboden zu einem Filterkuchen. Durch den Filterkuchen kann die Maische klar gefiltert werden.
- Nachgüsse/Anschwänzwasser: Der Filterkuchen bleibt im Läuterbottich und wird mit einem oder mehreren Nachgüssen weiter ausgeschwemmt bis üblicherweise die Würzefanne voll ist.

Die Abläuterung sollte möglichst schnell durchgeführt werden um Zufärbungen, Auslaugung von unvorteilhaften Bitterstoffen und schaumnegativen Substanzen, Oxidation und Alterungsanfälligkeit des Bieres (Kiesbye, 2003).

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Dauer der Abläuterung	Beschreibt die Dauer vom Einlagern der Maische im Läuterbottich bis zum Ablauf der Nachgüsse.	90 Minuten
Menge der Vorderwürze	Beschreibt die Menge der Vorderwürze in Liter oder Hektoliter.	40l
Extraktgehalt der Vorderwürze	Beschreibt wie viel von den gelösten Stoffen in der Vorderwürze tatsächlich vergärbar ist.	11° P
Temperatur der Vorderwürze	Beschreibt die Temperatur der Vorderwürze.	78°C
Menge des Nachgusses	Beschreibt die Menge des spezifischen Nachgusses in Litern oder Hektolitern.	30l
Anzahl der Nachgüsse	Die Anzahl an Nachgüssen die nach der Vorderwürze durchgeführt werden. Typischerweise 1 – 3 Nachgüsse.	1
Extraktgehalt der Nachgüsse	Beschreibt wie viel von den gelösten Stoffen des spezifischen Nachgusses tatsächlich vergärbar ist.	9° P
Temperatur der Nachgüsse	Beschreibt die Temperatur des spezifischen Nachgusses.	78°C

Tabella 39: Identifizierte Parameter beim Abläutern

5.3.2 Vollständigkeit der Parameter beim Maischen

Die Parameter beim Maischen sind in den letzten 150 Jahren sehr gut analysiert worden. In der Brauer und Mälzer Berufsschule in Ulm werden auch die Auswirkungen der Parameter, Erfahrungswerte, auf das fertige Bier sehr deutlich erklärt. Diese Auswirkungen können in diesem Schritt der Digitalisierung nicht erfasst werden und müssen in den folgenden Schritten und im fertigen Bier erfasst werden.

Aufgrund der Vielzahl an Parametern gibt es eine nur schwer errechenbare mögliche Anzahl an Maischen und Würzen. Neben den im Abschnitt 5.3.1 *Parameteridentifikation beim Maischen* gelisteten Parameter gibt es noch zahlreiche weitere Parameter, die hier aufgelistet werden könnten.

Ausgehend von den analysierten Quellen, wird in dieser Abschlussarbeit angenommen, dass die gelisteten Parameter dennoch ein vollständiges Aromabild der Maische und Würze abdecken.

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
Malzschrotung	3	100%
Maischen	56	100%
Abläutern	8	100%

Tabelle 40: Vollständigkeit der Parameter beim Maischen

Diese Annahmen sind im weiteren Verlauf praktisch zu validieren.

5.3.3 Digitale Erfassung der Parameter beim Maischen

Im Abschnitt 5.3.1 *Parameteridentifikation beim Maischen* wurden derzeit bekannte Parameter des Maischens ermittelt, um den Prozessschritt bestmöglich zu dokumentieren. Derzeit sind die Messungen typischerweise:

- einmalig.
- oder in unregelmäßigen Zeitabständen.
- oder nicht vollständig und nicht alle Parameter werden während des Maischens gemessen.
- oder die Messgeräte sind nicht vorhanden.
- oder mit mehreren Medienbrüchen behaftet wie z.B. von der Messdurchführung über eine schriftliche Notiz bis zur Speicherung am Computer.

Anmerkung: In der Digitalisierung sind Medienbrüche so gering wie möglich zu halten!

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Messgeräte notwendig sind, um die entsprechenden Daten in den benötigten Zeitabständen zu erfassen.

5.3.3.1 Parameter der Malzschrotung

Der Wassergehalt der Gerste/Malz wird im Abschnitt 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen* erläutert.

Die Malztemperatur kann mittels Infrarot-Thermometer, wie in Abschnitt 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen*, erfasst werden.

5.3.3.1.1 Parameter Verteilung der Partikelgrößen im Malzschrot

Der Parameter Verteilung der Partikelgrößen im Malzschrot sollte während der Schrotung gemessen werden, bis die gewünschten Größen erreicht sind.

Messgeräte:

- Pflugstädter Plansichter ist ein Gerät mit waagrechtens Siebsätzen (= Plansichter) zur Zerlegung des Malzschrotes nach dem Zerkleinerungsgrad in seine Bestandteile wie z.B. der Plansichter Arenit von Bühler Group (Bühler Group, 2025).

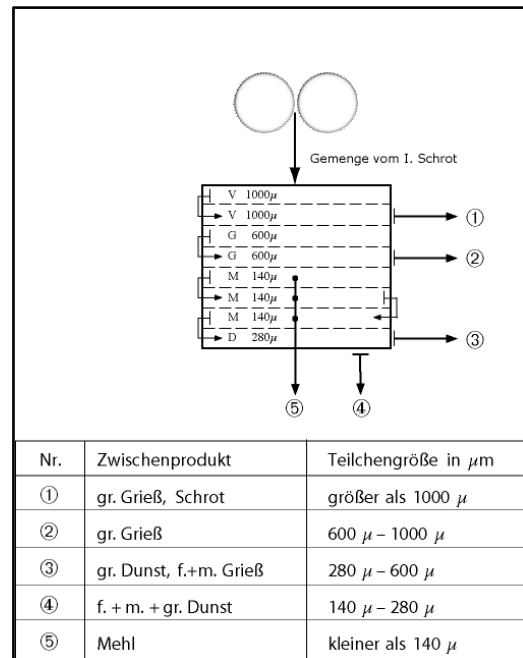


Abbildung 9: Teilchengröße Pflugstädter Plansichter

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Grober Grieß und Schrot mit Größen über $1000\ \mu$	20%
Grober Grieß zwischen $600\ \mu - 1000\ \mu$	10%
Grober Dunst, feiner und mittlerer Grieß zwischen $280\ \mu - 600\ \mu$	40%
Dunst zwischen $140\ \mu - 280\ \mu$	20%
Mehl unter $140\ \mu$	10%

Tabelle 41: Digitale Messeinheiten für die Verteilung der Partikelgrößen im Malzschrot

Abtastrate:

Die Abtastung kann nur einmalig pro Durchlauf des Malzes durch die Mühle stattfinden. Für die Digitalisierung ist das Ergebnis jeder Abtastung von jeder Schrotung, jedes Durchlaufs des Malzes durch die Mühle, digital zu erfassen und zu speichern.

5.3.3.2 Parameter beim Maischen

Folgende Parameter wurden bereits in anderen Abschnitten erläutert:

- Maischtemperatur mittels Wasserthermometer, siehe Abschnitt 5.2.3.2.2 Parametergruppe Weichen.
- Maischedauer mittels Zeiterfassungsgeräte, um Datum und Zeitstempel zu erfassen.
- pH-Wert mittels pH-Wert Messgerät, siehe Abschnitt 5.2.3.2.2 Parametergruppe Weichen.
- Trinkwasserqualität mittels Total Dissolved Solids (TDS), siehe Abschnitt 5.2.3.2.2 Parametergruppe Weichen.
- Würzeanalyse Farbe mittels Spektralphotometer, siehe Abschnitt 5.2.3.1.5 Parametergruppe Sonstige Enzyme: Würzefarbe, Dimethylsulfid (DMS).

5.3.3.2.1 Parametergruppe Karbonathärte (KH), Nichtkarbonathärte (NKH) und Gesamthärte

Diese Gruppe beschreibt die Wasserqualität des Brauwassers für die Maische und die Nachgüsse.

Schriftliche Abschlussarbeit

Messgeräte:

- Ein Grenzwerte Analysegerät misst sowohl KH, NKH und Gesamthärte. Das SYCON 2602 von Ampha-Analyse bietet durchgängige Messungen (Ampha-Analyse, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Karbonathärte (KH)	5°dH
Nichtkarbonathärte (NKH)	3°dH
Gesamthärte	8°dH

Tabelle 42: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe KH, NKH & Gesamthärte

Abtastrate:

Alle Parameter können kontinuierlich in Echtzeit gemessen werden. Für die Digitalisierung sollte pro Minute ein Messpunkt erfasst werden.

5.3.3.2.2 Parametergruppe Konzentration der Maische, Malztyp, Malzmenge

Diese Parameter bestimmen das Malz und den Malzanteil beim Einmaischen.

Messgeräte:

- Die Konzentration der Maische wird mittels Gewichtes des Malzes, gemessen durch eine Waage, und mittels der Menge an Wasser, gemessen durch Volumenangaben an Bottichen, wie z.B. der Maischpfanne, oder mittels Durchflussmesser in wasserführenden Leitungen gemessen. Ein typisches Beispiel für einen Durchflusssensor ist der Durchflusssensor SFAW von Festo (Festo, 2025).
- Der Malztyp kann mittels DNA-Analyse im Labor bestimmt werden. Eine Angabe des Verkäufers sollte als Messung ausreichend sein.
- Die Malzmenge wird mittels Waage gemessen.

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Konzentration der Maische	1:3 (1 kg Malz auf 3 Liter Wasser)
Malztyp	Pilsner Malz
Malzmenge	10 kg

Tabelle 43: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Konzentration der Maische, Malztyp, Malzmenge

Abtastrate:

Eine einmalige Messung und Speicherung jedes Parameters vor dem Einmaischen ist ausreichend.

5.3.3.2.3 Parameter Extraktgehalt

Der Extraktgehalt kann ab dem Einmaischen bis nach der Gärung und darüber hinaus bis zum fertigen Bier gemessen werden.

Messgeräte:

- Der Extraktgehalt wird mittels Refraktometer gemessen. In der Industrie wird häufig ein In-Line Prozessrefraktometer wie z.B. der iPR FS von Schmidt-Haensch genutzt (Schmidt-Haensch, 2025).

- Alternative ein Biegeschwingungsmesser wie z.B. der DMA 35 von Anton Paar (Anton Paar, 2025)

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Extraktgehalt	11° P

Tabelle 44: Digitale Messeinheit für Parameter Extraktgehalt

Abtastrate:

Der Extraktgehalt kann mittels Inline-Prozessrefraktometern kontinuierlich in Echtzeit gemessen werden. Für die Digitalisierung sollten Messungen ab dem Einmaischen und bis nach der Gärung pro Minute durchgeführt werden.

5.3.3.2.4 Parametergruppe Amylolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau

Diese Parametergruppe wurde bereits in Abschnitt 5.2.3.3.1 *Parametergruppe Amylolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau* erläutert.

5.3.3.3 Parameter des Abläuterns

Alle Parameter des Abläuterns wurden bereits in anderen Abschnitten behandelt:

- Die Dauer der Abläuterung wird mittels Zeiterfassungsgeräte gemessen, um Datum und Zeitstempel festzuhalten.
- Die Menge der Vorderwürze wird mittels Volumenangaben an Bottichen oder mittels Durchflussmesser in wasserführenden Leitungen gemessen, siehe Abschnitt 5.3.3.2.2 *Parametergruppe Konzentration der Maische, Malztyp, Malzmenge*.
- Der Extraktgehalt der Vorderwürze wird mittels Refraktometer gemessen, siehe Abschnitt 5.3.3.2.3 *Parameter Extraktgehalt*.
- Die Temperatur der Vorderwürze wird mittels Wasserthermometer gemessen, siehe Abschnitt 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen*.
- Die Menge des Nachgusses wird mittels Volumenangaben an Bottichen oder mittels Durchflussmesser in wasserführenden Leitungen gemessen, siehe Abschnitt 5.3.3.2.2 *Parametergruppe Konzentration der Maische, Malztyp, Malzmenge*.
- Die Anzahl der Nachgüsse wird gemessen mit der Anzahl der Wasserzugaben beim Maischen.
- Der Extraktgehalt der Nachgüsse wird mittels Refraktometer gemessen, siehe Abschnitt 5.3.3.2.3 *Parameter Extraktgehalt*.
- Die Temperatur der Nachgüsse wird mittels Wasserthermometer gemessen, siehe Abschnitt 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen*.

5.4 Prozessschritt Würzebereitung

5.4.1 Parameteridentifikation bei der Würzebereitung

Die Würzebereitung findet im Sudhaus statt. Die Parameter werden basierend auf den Teilschritten der Würzebereitung aufgeteilt:

- Würzekochung
- Trubabscheidung (Whirlpool)
- Würzekühlung

(Kiesbye, 2003)

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

5.4.1.1 Würzekochung

Die Würze wird in der Würzefanne zum Kochen erhitzt, um folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Sterilisation: Durch die hohe Kochtemperatur wird die Würze keimfrei.
- Abtöten der Enzyme: Der enzymatische Abbau wird bei 78°C+ beendet.
- Konzentrationssteigerung: Durch das Verdampfen des Wassers kann der endgültige Zuckergehalt der Würze, die Stammwürze, vor der Vergärung eingestellt werden.
- Austreibung unreiner Aromakomponenten (DMS): Insbesondere Schwefelsubstanzen wie Dimethylsulfid, können in späteren Prozessschritten nicht unangenehm in Erscheinung treten.
- Eiweißausscheidung (Koagulation): Durch die Hitzeeinwirkung werden die hochmolekularen Eiweiße unlöslich und fallen zusammen mit den Gerbstoffen aus („Eiweißbruch“).
- Bildung von Reduktonen: Reduktone sind Antioxidantien und schützen vor Sauerstoff und anderen oxidierenden Teilchen.
- Zufärbung:
 - Durch die Maillard-Reaktion werden Melanoiden gebildet, die der Würze dunklere Farben und komplexe Aromen, wie Röst- und Karamellnoten, verleihen.
 - Durch die Karamellisierung wird Zucker in Karamell umgewandelt, was der Würze nicht nur eine dunklere, und größere Vielfalt an Farben sondern auch süße, karamellige Aromen hinzufügt.
- Lösung von Hopfeninhaltsstoffen:
 - Frühe Hopfengabe (Bitterhopfen): Steigert die Bitterkeit durch die Hopfen-Bittersäuren (Alphasäuren), die isomerisieren und dadurch wasserlöslich werden (iso-Alphasäuren).
 - Späte Hopfengabe (Aromahopfen): Hopfengaben in den letzten 15 – 30 Minuten des Kochens, bringt mehr Aroma ins Bier, da die ätherischen Öle, die für den Hopfengeschmack verantwortlich sind, weniger Zeit haben, zu verdampfen.
 - Im Falle von mehreren Hopfengaben und Hopfensorten, ist jede für sich vollständig zu erfassen und zu speichern.

(Kiesbye, 2003), (Brauer-Berufsschule Ulm, 1993), (Carmen, 2024)

Aus den oben genannten Angaben lassen sich folgende Parametergruppen und Parameter identifizieren:

- Parametergruppe Würzekochung
- Parametergruppe Würzeanalyse
- Parametergruppe Hopfung
- Parametergruppe Aromenanalyse
- Parametergruppe Stoffe der Amylolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbaus

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Würzekochung: Temperatur der Würze	Beschreibt die Temperatur der Würze beim Kochen.	100°C
Würzekochung: Dauer der Würzekochung	Beschreibt die Zeitdauer vom Temperaturanstieg ab 78°C bis zur Trubabscheidung („Aus Schlagen“).	80 Minuten typischerweise 60-90 Minuten
Würzeanalyse: Extraktgehalt	Beschreibt wie viel von den gelösten Stoffen in der Maische tatsächlich vergärbar ist.	8° Plato

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Würzeanalyse: pH-Wert	Beschreibt, wie sauer oder basisch Wasser ist.	pH-Wert 6,2
Würzeanalyse: Farbe	Beschreibt die Farbe der Maische und gibt Aufschluss über die Malzsorten/-typen und den Röstgrad des Malzes.	5 EBC (European Brewery Convention)
Würzeanalyse: Trübung	Beschreibt die Klarheit der Würze. Trübung ist eine optische Beeinträchtigung der Durchsicht in klaren Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern. Sie wird durch kleine Partikel hervorgerufen, die einen vom Träger abweichenden Brechungsindex oder die Fähigkeit der Lichtabsorption oder Lichtstreuung besitzen (Bioanalytics GmbH)	8 EBC (European Brewery Convention) oder 32 FTU (Formazine Turbidity Units)
Würzeanalyse: Dichte (indirekt Stammwürze)	Beschreibt den Zuckergehalt in der Würze, um die Konsistenz und Qualität des Bieres sicherzustellen. Sie gibt an wie schwer die Würze im Vergleich zu Wasser ist.	1.044 g/cm ³ (Gramm pro Kubikzentimeter) (= 10,96° P)
Würzeanalyse: Freie Aminostickstoffe (FAN)	Beschreibt die Menge an freien Aminosäuren und kleinen Peptiden, die für die Hefeernährung wichtig sind. Niedriger FAN: Hefe kann Gärung abbrechen. Hoher FAN: Mikrobielle Verunreinigungen können zu Problemen im Geschmack führen.	200 mg/L (Milligramm pro Liter)
Würzeanalyse: Elektrische Leitfähigkeit	Beschreibt den Gehalt der gelösten Ionen in der Würze. Reines Wasser hat eine Leitfähigkeit fast bei 0 (isoliert). Die Messung der Leitfähigkeit des Ausgangswasser gibt Aufschluss über die Reinheit des Wassers. Die Leitfähigkeit der Würze gibt Aufschluss über die Verunreinigungen, bestimmt Kalzium- und Magnesiumwerte. Diese Werte sind notwendig, um die Konsistenz der Qualität des Bieres sicherzustellen.	3 mS/cm (Millisiemens pro Zentimeter)
Hopfung: Zeitpunkt der Bitterhopfengabe	Beschreibt den Zeitpunkt, an dem der Bitterhopfen dazu gegeben wird.	20. Minute
Hopfung: Zeitpunkt der Aromahopfengabe	Beschreibt den Zeitpunkt, an dem der Aromahopfen dazu gegeben wird.	60. Minute
Hopfung: Menge der Hopfengaben	Beschreibt die Menge des Hopfens, der in die Würze kommt.	180 g

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Hopfung: Hopfensorte	Beschreibt den gewählten Hopfen.	Herkules, Saazer
Hopfung: Bittereinheiten	Beschreibt die Anzahl der Bittereinheiten, isomerisierten Alpha-Säuren, in der Würze.	25 IBU
Hopfung: Alpha-Säuren	Beschreibt den Gehalt an Alpha-Säuren in Prozent des Gesamthopfenvolumens.	Columbus: 13,9 % – 17,5 %
Hopfung: Beta-Säuren	Beschreibt den Gehalt an Beta-Säuren in Prozent des Gesamthopfenvolumens.	Columbus: 4,3 % – 6 %
Hopfung: Polyphenol Gehalt	Beschreibt den Gehalt an Polyphenolen in Prozent des Gesamthopfenvolumens.	Columbus: bis zu 5,1 %
Hopfung: Ölgehalt	Beschreibt den Gehalt an Ölen in Prozent des Gesamthopfenvolumens.	Columbus: bis zu 4,5 ml/100g
Hopfung: Myrcene	Beschreibt den Gehalt an Myrcene in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: 8,8 % – 57,7 %
Hopfung: Caryophyllene-Anteil im Öl	Beschreibt den Gehalt an Caryophyllenen in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: 5,3 % – 15,1 %
Hopfung: Farnesen-Anteil im Öl	Beschreibt den Gehalt an Farnesen in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: bis zu 5,2 %
Hopfung: Linalool	Beschreibt den Gehalt an Linalool in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: 0,4 % – 0,7 %
Hopfung: Geraniol-Anteil im Öl	Beschreibt den Gehalt an Geraniol in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: 0,1 % – 0,6 %
Hopfung: Humulene	Beschreibt den Gehalt an Humulene in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: 8,3 % – 30,6 %
Hopfung: Ketone-Anteil im Öl	Beschreibt den Gehalt an Ketone in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: bis zu 0,3 %
Hopfung: Isobutyrate-Anteil im Öl	Beschreibt den Gehalt an Isobutyrate in Prozent des Ölgehalts.	Columbus: bis zu 0,1 %
Hopfung: Thiolen (µg/KG)	Beschreibt den Gehalt an Thiolen in Mikrogramm pro Kilo Hopfen.	Columbus: bis zu 1,4 µg/KG
Aromenanalyse: Gruppe - Terpene	Beschreibt die Anzahl der Verbindungen, die für Kräuter und Gewürze charakteristisch sind wie z.B. Limonen (Zitrusduft) und Myrcen (Hopfenaroma).	mg/L (Milligramm pro Liter / µg/L (Mikrogramm pro Liter)
Aromenanalyse: Gruppe – Aldehyde	Beschreibt die Anzahl der Verbindungen, die für Vanille charakteristisch sind.	mg/L (Milligramm pro Liter / µg/L (Mikrogramm pro Liter)
Aromenanalyse: Gruppe – Ketone	Beschreibt die Anzahl der Verbindungen, die für Menthol (Minzduft) und Aceton (süßlicher, fruchtiger Geruch) charakteristisch sind.	mg/L (Milligramm pro Liter / µg/L (Mikrogramm pro Liter)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Aromenanalyse: Gruppe – Ester	Beschreibt die Anzahl der Verbindungen, die für fruchtige Aromen charakteristisch sind wie Ethylacetat, das nach Birne riecht.	mg/L (Milligramm pro Liter / µg/L (Mikrogramm pro Liter)
Aromenanalyse: Gruppe – Phenole	Beschreibt die Anzahl der Verbindungen, die für würzige und rauchige Aromen, wie Eugenol, das nach Nelken riecht, charakteristisch sind.	mg/L (Milligramm pro Liter / µg/L (Mikrogramm pro Liter)
Aromenanalyse: Gruppe – Lactone	Beschreibt die Anzahl der Verbindungen, die für cremige und kokosnussartigen Aromen charakteristisch sind. Ein Beispiel ist γ-Decalacton, das nach Pfirsich riecht.	mg/L (Milligramm pro Liter / µg/L (Mikrogramm pro Liter)
Amylolyse: Alpha-Amylase	Enzym zur Umwandlung von Alpha-Glucane (Stärke) in Oligosaccharide, hochmolekulare Dextrine, Dextrine, Maltose, Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Milliliter (U/ml)
Amylolyse: Beta-Amylase	Enzym zur Umwandlung von Alpha-Glucane (Stärke) in Maltose, Maltotriose, Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Milliliter (U/ml)
Amylolyse: Maltase	Enzym zur Umwandlung von Maltose in Glucose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Grenzdextrinase	Enzym zur Umwandlung von Grenzdextrine in Dextrine	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Saccharase	Enzym zur Umwandlung von Saccharose in Glucose, Fructose	Einheiten pro Gramm (U/g) Einheiten pro Millimeter (U/ml)
Amylolyse: Alpha-Glucane (Stärke)	Kohlenhydrate die durch die Amylase verändert werden.	Milligramm pro Gramm (mg/g) der Trockensubstanz
Amylolyse: Maltose (Malzzucker)	Malzzucker entsteht während des Abbaus von Stärke durch Amylase.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Grenzdextrine	Eine Gruppe von Kohlenhydraten die durch den Abbau von Stärke durch Alpha-Amylase entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Saccharose (Zucker)	Der Zucker der Gerste.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Amylolyse: Oligosaccharide	Kohlenhydrate die durch die Alpha-Amylase transformiert werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Dextrine	Gruppe von Kohlenhydraten, die durch den Abbau von Stärke entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Glucose (Traubenzucker)	Zucker, der beim Abbau von Stärke durch Amylase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Amylolyse: Maltotriose	Zucker, der beim Abbau von Stärke durch Beta-Amylase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Amylolyse: Fructose (Fruchtzucker)	Zucker der bei der Transformation von Saccharose durch Saccharase entsteht.	Milligramm pro Liter (mg/L)

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Proteolyse: Endopeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen in Peptide und Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Carboxypeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen und Peptiden in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Aminopeptidase	Enzym zur Umwandlung von Proteinen und Peptiden in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Dipeptidase	Enzym zur Umwandlung von Dipeptide in Aminosäuren	Einheiten pro Milliliter (U/mL) Einheiten pro Gramm (U/g)
Proteolyse: Proteine (Eiweiß)	Große komplexe Aminosäuren	Gramm pro Liter (g/L) Milligramm pro Liter (mg/L)
Proteolyse: Peptide	Kurze Ketten von Aminosäuren, die kleiner als Proteine sind	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Proteolyse: Aminosäuren	Bausteine von Proteinen	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Proteolyse: Dipeptide	Kurze Ketten von 2 Aminosäuren, die durch den Abbau von Proteinen entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Cytolyse: Beta-Glucan-Solubilase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in lösliche, hochmolekulare Beta-Glucan	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Endo-1,3-Beta-Glucanase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in niedermolekulare Beta-Glucan, Cellobiose, Laminaribiose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Endo-1,4-Beta-Glycanase	Enzym zur Umwandlung von unlöslichem, hochmolekularem Beta-Glucan in niedermolekulare Beta-Glucan, Cellobiose, Laminaribiose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Exo-Beta-Glucanase	Enzym zur Umwandlung von Beta-1,3- und Beta-1,4-glykosidische Verbindungen in Cellobiose, Laminaribiose in Glucose	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Cytolyse: Unlösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Ein Polysaccharid, komplexe Kohlenhydrate aus langen Ketten einfachen Zuckers. Es besteht in den Zellwänden von Getreiden, Gerste.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Lösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Ähnlich wie das unlösliche, hochmolekulare Beta-Glucan mit dem Unterschied, dass es mit Wasser gelöst werden kann.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Niedermolekulares Beta-Glucan	Ähnlich wie das hochmolekulare Beta-Glucan mit geringerer Molekulargröße. Es kann leichter von Wasser gelöst werden.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Cytolyse: Cellobiose	Zwei Glucosemoleküle (Zuckermoleküle) in einer speziellen Beta-1,4 Bindung. Es entsteht durch den Abbau von Cellulose, einem	Milligramm pro Liter (mg/L)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwände.	
Cytolyse: Laminaribiose	Zwei Glucosemoleküle (Zuckermoleküle) in einer speziellen Beta-1,3 Bindung.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Phosphat- und Fettabbau: Lipase	Enzym zur Umwandlung von Lipiden und Oxi-Lipide in Glycerin und freie, langkettige Fettsäuren	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Lipoxygenase	Enzym zur Umwandlung von freien, langkettigen Fettsäuren in Fettsäurehydroperoxide	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Polyphenoloxydase	Enzym zur Umwandlung von Polyphenolen in oxidierte Polyphenole	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Phosphatase	Enzym zur Umwandlung von organisch, gebundenem Phosphat in anorganisches Phosphat	Einheiten pro Milliliter (U/ml) Einheiten pro Gramm (U/g)
Phosphat- und Fettabbau: Lipide	Unlösliche Fette, die Hauptbestandteile der Zellmembranen sind und zur Stabilität und Flexibilität der Zellen beitragen.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Oxi-Lipide	Oxidierte Fette, eine Untergruppe der Lipide	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Glycerin	Ein einfacher Zuckeralkohol, der in Wasser löslich ist.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Freie, langkettige Fettsäuren	Beschreibt Fettsäuren, die nicht an Glycerin gebunden sind.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Fettsäurehydroperoxide	Beschreibt Zwischenprodukte, die bei der Oxidation von Fettsäuren entstehen, die beim oxidativen (mit Sauerstoff) Abbau von Lipiden entstehen.	Milligramm pro Liter (mg/L)
Phosphat- und Fettabbau: Polyphenole	Beschreibt sekundäre Pflanzenstoffe, die zum Schutz der Pflanzen vor UV-Strahlung und anderem genutzt werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau: Oxidierte Polyphenole	Beschreibt Stoffe, die entstehen, wenn Polyphenole mit Sauerstoff reagiert. Oxidierte Polyphenole sind oft für die Braunfärbung von Lebensmitteln wie Äpfel und Kartoffeln verantwortlich, wenn sie geschnitten und der Luft ausgesetzt werden.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz
Phosphat- und Fettabbau:	Beschreibt Phosphate, organischer Verbindungen, die aus verschiedenen	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Organisch, gebundenes Phosphat	Quellen in die Pflanze gelangten, wie z.B. aus Humus. Sie bilden DNA & RNA.	
Phosphat- und Fettabbau: Anorganisches Phosphat	Beschreibt Phosphate (anorganische Salze), die keine organischen Moleküle enthalten.	Milligramm pro Liter (mg/L) oder % der Trockensubstanz

Tabelle 45: Identifizierte Parameter der Würzekochung

5.4.1.2 Trubabscheidung (Whirlpool)

Nach der Würzekochung befinden sich zahlreiche Feststoffe, wie Hopfenreste und koagulierte Eiweiße, in der Würze, die abgetrennt werden müssen. Im Whirlpool werden die Feststoffe, die großen Partikel, abgesondert. Die heiße Würze wird tangential in einen Whirlpoolbottich gepumpt, wo sich unter dem Einfluss von Flieh- und Schwerkraft eine donutförmige Sekundärströmung ausbildet, diese bewirkt, dass sich der Trub als Häufchen in der Mitte des Behälterbodens absetzt. Die klare Würze wird vom Rand des Behälters abgezogen (Bier Akademie Bayern, 2025).



Abbildung 10: Prinzipdarstellung des Whirlpooeffekts

Die Zeitspanne, bis es zur Klärung kommt, beträgt ca. 20 Minuten und wird als Whirlpoolrast bezeichnet (Kiesbye, 2003).

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Trubabscheidung: Eintrittsgeschwindigkeit	Beschreibt die Eintrittsgeschwindigkeit der Würze in den Whirlpool, um den Effekt zu ermöglichen.	5 – 6 m/s (Meter pro Sekunde)
Trubabscheidung: Tangentialer Würzeinlauf	Beschreibt die Höhe, in der die Würze in den Whirlpool einläuft.	0,3 m über dem Boden
Trubabscheidung: Whirlpoolrast	Beschreibt die Dauer vom Einlassen des Whirlpools bis zur Absaugung der geklärten Würze.	20 Minuten
Trubabscheidung: Temperatur der Würze	Beschreibt die Temperatur der Würze bei der Trubabscheidung.	100°C
Würzeanalyse: Extraktgehalt	Beschreibt wie viel von den gelösten Stoffen in der Maische tatsächlich vergärbar ist.	8° Plato
Würzeanalyse: pH-Wert	Beschreibt, wie sauer oder basisch Wasser ist.	pH-Wert 6,2
Würzeanalyse: Farbe	Beschreibt die Farbe der Maische und gibt Aufschluss über die Malzsorten/-typen und den Röstgrad des Malzes.	5 EBC (European Brewery Convention)
Würzeanalyse: Trübung	Beschreibt die Klarheit der Würze. Trübung ist eine optische Beeinträchtigung der Durchsicht in klaren Flüssigkeiten, Gasen oder	8 EBC (European Brewery Convention) oder 32 FTU (Formazine Turbidity Units)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	Festkörpern. Sie wird durch kleine Partikel hervorgerufen, die einen vom Träger abweichenden Brechungsindex oder die Fähigkeit der Lichtabsorption oder Lichtstreuung besitzen (Bioanalytics GmbH)	
Würzeanalyse: Dichte (indirekt Stammwürze)	Beschreibt den Zuckergehalt in der Würze, um die Konsistenz und Qualität des Bieres sicherzustellen. Sie gibt an wie schwer die Würze im Vergleich zum Wasser ist.	1.044 g/cm ³ (Gramm pro Kubikzentimeter)
Würzeanalyse: Freie Aminostickstoffe (FAN)	Beschreibt die Menge an freien Aminosäuren und kleinen Peptiden, die für die Hefeernährung wichtig sind. Niedriger FAN: Hefe kann Gärung abbrechen. Hoher FAN: Mikrobielle Verunreinigungen können zu Problemen im Geschmack führen.	200 mg/L (Milligramm pro Liter)
Würzeanalyse: Elektrische Leitfähigkeit	Beschreibt den Gehalt der gelösten Ionen in der Würze. Reines Wasser hat eine Leitfähigkeit fast bei 0 (isoliert). Die Messung der Leitfähigkeit des Ausgangswasser gibt Aufschluss über die Reinheit des Wassers. Die Leitfähigkeit der Würze gibt Aufschluss über die Verunreinigungen, bestimmt Kalzium- und Magnesiumwerte. Diese Werte sind notwendig, um die Konsistenz der Qualität des Bieres sicherzustellen.	3 mS/cm (Millisiemens pro Zentimeter)

Tabelle 46: Identifiziere Parameter bei der Trubabscheidung (Whirlpool)

5.4.1.3 Würzekühlung

Bei der Würzekühlung wird die geklärte Würze abgekühlt, um die Temperatur für die Hefe vorzubereiten:

- Untergärige Biere werden auf 8°C bis 12°C abgekühlt.
- Obergärige Biere werden auf 15°C bis 25°C abgekühlt.

Nach der Kühlung wird die Würze belüftet, um den notwendigen Sauerstoff für die Hefe zu gewährleisten.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Würzekühlung: Dauer der Würzekühlung	Beschreibt die Dauer vom Einlagern im Kühler bis zum Erreichen der Anstelltemperatur.	110 Minuten
Würzekühlung: Temperatur der Würze	Beschreibt die aktuelle Temperatur der Würze bei der Würzekühlung.	66°C

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Würzeanalyse: Extraktgehalt	Beschreibt wie viel von den gelösten Stoffen in der Maische tatsächlich vergärbar ist.	8° Plato
Würzeanalyse: pH-Wert	Beschreibt, wie sauer oder basisch das Wasser ist.	pH-Wert 6,2
Würzeanalyse: Farbe	Beschreibt die Farbe der Maische und gibt Aufschluss über die Malzsorten/-typen und den Röstgrad des Malzes.	5 EBC (European Brewery Convention)
Würzeanalyse: Trübung	Beschreibt die Klarheit der Würze. Trübung ist eine optische Beeinträchtigung der Durchsicht in klaren Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern. Sie wird durch kleine Partikel hervorgerufen, die einen vom Träger abweichenden Brechungsindex oder die Fähigkeit der Lichtabsorption oder Lichtstreuung besitzen (Bioanalytics GmbH)	8 EBC (European Brewery Convention) oder 32 FTU (Formazine Turbidity Units)
Würzeanalyse: Dichte (indirekt Stammwürze)	Beschreibt den Zuckergehalt in der Würze, um die Konsistenz und Qualität des Bieres sicherzustellen. Sie gibt an wie schwer die Würze im Vergleich zum Wasser ist.	1.044 g/cm ³ (Gramm pro Kubikzentimeter)
Würzeanalyse: Freie Aminostickstoffe (FAN)	Beschreibt die Menge an freien Aminosäuren und kleinen Peptiden, die für die Hefeernährung wichtig sind. Niedriger FAN: Hefe kann Gärung abbrechen. Hoher FAN: Mikrobielle Verunreinigungen können zu Problemen im Geschmack führen.	200 mg/L (Milligramm pro Liter)
Würzeanalyse: Elektrische Leitfähigkeit	Beschreibt den Gehalt der gelösten Ionen in der Würze. Reines Wasser hat eine Leitfähigkeit fast bei 0 (isoliert). Die Messung der Leitfähigkeit des Ausgangswasser gibt Aufschluss über die Reinheit des Wassers. Die Leitfähigkeit der Würze gibt Aufschluss über die Verunreinigungen, bestimmt Kalzium- und Magnesiumwerte. Diese Werte sind notwendig, um die Konsistenz der Qualität des Bieres sicherzustellen.	3 mS/cm (Millisiemens pro Zentimeter)
Würzebelüftung: Menge des Sauerstoffs	Beschreibt die Menge des eingebrachten Sauerstoffs in die Würze.	9 ppm (Parts Per Million)

Tabelle 47: Identifizierte Parameter in der Würzekühlung

5.4.2 Vollständigkeit der Parameter in der Würzebereitung

Die Parameter der Würzebereitung sind sehr detailliert, aber technisch schwer zu messen. Ausgehend von den analysierten Quellen, wird in dieser Abschlussarbeit angenommen, dass die im Abschnitt 5.4.1 *Parameteridentifikation bei der Würzebereitung* gelisteten Parameter ein vollständiges Aromabild der Würzebereitung abdecken.

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
Würzekochung	78	100%
Trubabscheidung (Whirlpool)	12	100%
Würzekühlung	10	100%

Tabelle 48: Vollständigkeit der Parameter in der Würzebereitung

Diese Annahmen sind im weiteren Verlauf praktisch zu validieren.

5.4.3 Digitale Erfassung der Parameter in der Würzebereitung

Im Abschnitt 5.4.1 *Parameteridentifikation bei der Würzebereitung* wurden derzeit bekannte Parameter der Würzebereitung ermittelt, um den Prozessschritt bestmöglich zu dokumentieren. Derzeit sind die Messungen typischerweise:

- einmalig.
- oder in unregelmäßigen Zeitabständen.
- oder nicht vollständig da nicht alle Parameter, während der Würzebereitung gemessen werden.
- oder die Messgeräte sind nicht vorhanden.
- oder mit mehreren Medienbrüchen behaftet wie z.B. von der Messdurchführung über eine schriftliche Notiz bis zur Speicherung am Computer.

Anmerkung: In der Digitalisierung sind Medienbrüche so gering wie möglich zu halten!

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Messgeräte notwendig sind, um die entsprechenden Daten in den benötigten Zeitabständen zu erfassen.

5.4.3.1 Parameter der Würzekochung

5.4.3.1.1 Parametergruppe Würzekochung

Die Parameter der Würzekochung sind die einfach messbaren Parameter Temperatur der Würze und Dauer der Würzekochung. Das heißt alle folgenden Parameter der Würzekochung werden für die Dauer der Würzekochung, im besten Fall pro Minute, aufgezeichnet.

Die Temperatur der Würzekochung kann mittels Wasserthermometer für laufende Messung im Minutentakt durchgeführt werden, siehe Abschnitt 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen*.

5.4.3.1.2 Parametergruppe Würzeanalyse

Die Würzeanalyse beinhaltet sämtliche Parameter, mit denen die Qualität der Würze gemessen werden kann. Für die Digitalisierung ist eine digitale Messung pro Minute wünschenswert. Die Dauer der Messungen wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt *Parametergruppe Würzekochung* festgelegt.

Der Extraktgehalt wurde bereits im Abschnitt 5.3.3.2.3 *Parameter Extraktgehalt* erläutert.

Der pH-Wert wurde bereits im Abschnitt 5.2.3.2.2 *Parametergruppe Weichen* erläutert.

Die Würzefarbe wurde bereits im Abschnitt 5.2.3.1.5 *Parametergruppe Sonstige Enzyme: Würzefarbe, Dimethylsulfid (DMS)* erläutert.

Messgeräte:

- Die Trübung wird mit Trübungsmessgeräten, -analyzern und -sensoren gemessen. Das Inline Trübungsmessgerät Model TURBIsmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH bietet durchgängige Messungen von Trübung und Farbe (Chemtronic Waltemode GmbH, 2025).
- Die Dichte der Würze wird mittels Dichte-Durchflussmessgerät gemessen wie zum Beispiel mit dem Proline Promass Q 300 von Endress+Hauser (Endress+Hauser Group Services AG, 2025).
- Die freien Aminosäuren (FAN) werden mittels UV-VIS Spektralphotometer wie z.B. dem DR6000 von Hach gemessen werden (Hach - Be Right, 2023).
- Die elektrische Leitfähigkeit wird mittels Leitfähigkeitsmessgerät gemessen. Ein digitaler Leitfähigkeitsmesser ist der Liquitrend QMW43 von Endress+Hauser, der eine kontinuierliche Messung der elektrischen Leitfähigkeit ermöglicht (Endress+Hauser Group Services AG, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Trübung	32 FTU (umgerechnet 8 EBC)
Dichte	1.044 g/cm ³ (umgerechnet etwa 11° Plato)
Freie Aminosäuren (FAN)	200 mg/L
Elektrische Leitfähigkeit	3 mS/cm

Tabelle 49: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Würzeanalyse

Abtastrate:

Mit den neuesten UV-VIS Spektrophotometern sind Messungen innerhalb einer Minute durchführbar. Für die Digitalisierung sind alle Parameter dieser Parametergruppe innerhalb von einer Minute messbar und speicherbar.

5.4.3.1.3 Parametergruppe Hopfung

Der Zeitpunkt der Hopfengabe(n) kann mittels Schüttung exakt dokumentiert und gespeichert werden. Die Menge der Hopfengabe kann mittels digitaler Waagen auf einfachem Wege durchgeführt werden. Bei der Hopfensorte und den enthaltenen Inhaltsstoffen gibt es mehrere Möglichkeiten diese zu messen oder messen zu lassen. Alternativ gibt es spezielle Hopfenprodukte wie die Lupomax Pellets Produktreihe von BarthHaas, die gleichbleibende Hopfenqualität garantieren (Schönberger, 2025). Im nachfolgenden Bereich werden die Messgeräte für die Inhaltsstoffe des Hopfens angegeben, diese sind einmalig zu erfassen und können aus der Produktbeschreibung der Hopfenbank erhalten werden.

Messgeräte:

- Zeitpunkte der Hopfengaben können mittels digitaler Zeitmesser gespeichert werden.
- Die Menge des Hopfens kann mittels einer digitalisierten Waage einmalig erfasst und gespeichert werden.
- Die Hopfensorte kann manuell mittels gewähltem Hopfenprodukt erfasst und gespeichert werden.

- Die International Bitter Units (IBU) können mittels UV-VIS Spektrophotometern bei 275nm gemessen werden. Ein mg/l Iso-Alpha-Säure entspricht einem IBU.
- Die Alpha-Säuren von Hopfen werden von Hopfenbanken wie der BarthHaas Gruppe als mittlere Spanne über 4 Jahre angegeben. Die BarthHaas Gruppe misst die Alpha-Säuren mittels unterschiedlicher Methoden, um den jeweiligen Standards zu entsprechen (BarthHaas GmbH & Co. KG, 2025):
 - European Brewery Convention (EBC) 7.4: Konduktometrischer Titration mit Geräten wie dem OMNIS Titrator von Metrohm (Metrohm Inula GmbH, 2024).
 - American Society of Brewing Chemists (ASBC Hops-6 & Hops-17): Spektralphotometrische Bestimmung mittels UV-VIS Spektrophotometer bei 275nm, siehe International Bitter Units.
- Die Beta-Säuren werden mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) gemessen.
- Der Polyphenol Gehalt kann mittels Spektralphotometrie, Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) oder Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) gemessen werden.
- Der Ölgehalt kann mittels Wasserdampfdestillation ermittelt werden (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2025). Das Wasserdampfdestillationsgerät von De Dietrich Process Systems ermöglicht die Messung des Ölgehalts im Hopfen (De Dietrich Process Systems, 2025).
- Der Anteil der folgenden Inhaltsstoffe im Hopfen kann mittels Gaschromatographie (GC) oder Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) gemessen werden (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2025):
 - Myrcene
 - Caryphyllene
 - Farnesen
 - Linalool
 - Geraniol
 - Humulene
 - Ketone
 - Isobutyrate
 - Thiolen

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Hopfengaben	19.01.2025 17:27
Hopfenmenge	180g
Hopfensorte	Columbus (CTZ)
Bittereinheiten	25 IBU oder 25mg/l Iso-Alpha-Säure
Alpha-Säuren	13,9 – 17,5% des Gesamthopfenvolumens
Beta-Säuren	4,3 – 6% des Gesamthopfenvolumens
Polyphenol Gehalt	4,8 % des Gesamthopfenvolumens
Ölgehalt	4,5 ml/100g
Myrcene	50,2 % des Ölgehalts
Caryphyllene	12,3 % des Ölgehalts
Farnese	4,4 % des Ölgehalts
Linalool	0,5 % des Ölgehalts
Geraniol	0,4 % des Ölgehalts
Humulene	12,2 % des Ölgehalts

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Messeinheit	Beispiel
Ketone	0,2 % des Ölgehalts
Isobutyrate	0,1 % des Ölgehalts
Thiolen	0,9 µg/KG

Tabelle 50: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Hopfung

Abtastrate:

Für die Hopfenanalyse ist im Bierproduktionsprozess eine einmalige Messung aller Inhaltsstoffe ausreichend. Abhängig vom Produkt der Hopfenbank kann die Qualität des Hopfenprodukts und seiner Inhaltsstoffe abweichen. Wie etwa bei Hopfendolden oder sie wird exakt eingehalten wie mit Pellets oder hochfließfähigem, flüssigem Hopfenkonzentraten. Alle Werte können von den Datenblättern der Hopfenbank ermittelt werden.

5.4.3.1.4 Parametergruppe Aromenanalyse

Wie im vorhergehenden Abschnitt, der *Parametergruppe Hopfung*, werden in diesem Abschnitt die Inhaltsstoffe analysiert. Im Gegensatz zur Hopfung, bei der eine einmalige Messung der Inhaltsstoffe des Hopfens durchgeführt wird, haben die Messungen der Aromen kontinuierlich zu erfolgen.

Messgeräte:

- Ein vollständiges Aromaprofil kann derzeit nur mittels Gaschromatographie gekoppelt an die Massenspektrometrie (GC/MS) erfasst und gespeichert werden (Deußing, 2022).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Terpene	2 mg/L
Aldehyde	0,12 mg/L
Ketone	0,09 mg/L
Ester	25 mg/L
Phenole	8 mg/L
Lactone	0,08 mg/L

Tabelle 51: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Aromenanalyse

Abtastrate:

Für die Digitalisierung wäre eine Abtastrate von einer Minute wünschenswert. Die aktuelle Technologie des Gaschromatographen gekoppelt mit einem Massenspektrometer ermöglicht eine vollständige Analyse und Detektion. Es werden für eine Messung allerdings zwischen 30 und 120 Minuten benötigt. D.h. eine minutengenaue Messung ist möglich, kann aber nur zeitverzögert ausgewertet und gespeichert werden.

Anmerkung: Die Messgeräte sind vorhanden, aber die Dauer der Messung benötigt zu lange. Für eine Messung im Minutentakt oder in Echtzeit müssten die Messgeräte weiter entwickelt werden.

5.4.3.1.5 Parametergruppe Amylolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau

Diese Parametergruppe wurde bereits in Abschnitt 5.2.3.3.1 *Parametergruppe Amylolyse, Proteolyse, Cytolyse, Phosphat- und Fettabbau* erläutert.

5.4.3.2 *Parameter der Trubabscheidung (Whirlpool)*

5.4.3.2.1 *Parametergruppe Trubabscheidung*

Die Parameter der Trubabscheidung messen die korrekte Abscheidung der Trübstoffe. Dabei werden physikalische Messungen notwendig.

Messgeräte:

- Die Eintrittsgeschwindigkeit der Würze in den Whirlpool kann mittels Durchflussmeter gemessen werden. Ein typisches Beispiel eines Durchflussmeters in der Lebensmittelindustrie ist der magnetisch-induktive Durchflussmeter von Schmachtl (Schmachtl GmbH, 2025).
- Der tangentiale Würzeinlauf ist nicht spezifisch zu messen, weil er in Whirlpools fixiert eingebaut ist.
- In Whirlpools ist eine genaue Zeitmessung vom Einlassbeginn bis zur Absaugung möglich. Diese kann mittels digitaler Zeitmessung erfasst werden.
- Die Temperatur der Würze kann mittels digitalem Wasserthermometer gemessen werden.

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Eintrittsgeschwindigkeit	5,2 m/s
Tangentialer Würzeinlauf	0,3 m über dem Boden
Whirlpoolrast	19.01.2025 20:01 – 19.01.2025 20:21 = 20 Minuten
Temperatur der Würze	98° C

Tabelle 52: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Trubabscheidung (Whirlpool)

Abtastrate:

Alle Parameter dieser Gruppe können durchgängig erfasst und gespeichert werden. Der für die Digitalisierung benötigte Minutentakt kann erfüllt werden.

5.4.3.2.2 Parametergruppe Würzeanalyse

Diese Parametergruppe wurde bereits in Abschnitt 5.4.3.1.2 *Parametergruppe Würzeanalyse* erläutert.

5.4.3.3 Parameter der Würzekühlung

5.4.3.3.1 Parametergruppe Würzekühlung

Die Würzekühlung misst kontinuierlich die Temperatur zwischen dem Einlagern im Kühler bis zum Erreichen der Anstelltemperatur.

Messgeräte:

- Die Dauer der Würzekühlung kann nach dem Abschluss exakt berechnet werden.
- Die Temperatur der Würze kann mittels digitalem Wasserthermometer erfasst und gespeichert werden.

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Dauer der Würzekühlung	108 Minuten
Temperatur der Würze	19.01.2025 20:13 92°C

Tabelle 53: Digitale Messeinheiten der Parametergruppe Würzekühlung

Abtastrate:

Die Abtastrate kann für alle Parameter im Minutentakt erfolgen.

5.4.3.3.2 Parametergruppe Würzeanalyse

Diese Parametergruppe wurde bereits in Abschnitt 5.4.3.1.2 *Parametergruppe Würzeanalyse* erläutert.

5.4.3.3.3 Parameter Würzebelüftung

Der einzige Zweck der Würzebelüftung ist es, die Würze mit Sauerstoff anzureichern, um der Hefe den notwendigen Sauerstoff für die Gärung zur Verfügung zu stellen.

Messgeräte:

- Zur Messung des Sauerstoffs werden Sauerstoffsonden wie die OXYPro von PreSens genutzt (PreSens Precision Sensing GmbH, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Menge des Sauerstoffs	9 ppm

Tabella 54: Digitale Messeinheiten der Würzebelüftung

Abtastrate:

Die Menge des Sauerstoffs kann kontinuierlich erfasst und gespeichert werden. Eine für die Digitalisierung notwendige Messung im Minutentakt ist möglich.

5.5 Prozessschritt Gärung

5.5.1 Parameteridentifikation bei der Gärung

Die Gärung findet im Gärtank des Sudhauses statt. Die Parameter werden basierend auf den Teilschritten der Gärung aufgeteilt:

- Hefegabe
- Gärung (Hauptgärung)
- Lagerung und Reifung

(Kiesbye, 2003)

5.5.1.1 Hefegabe

Bei der Hefegabe wird der Würze Hefe zugeführt, damit diese den Gärprozess in Gang setzt und Zucker in Alkohol und Kohlendioxid transformiert. Die Hefe ernährt sich von

- Zucker (Stärkeprodukte)
- Eiweiß (Aminosäuren)
- Fett
- Mineralien
- Sauerstoff

Die Anforderungen an Betriebshefen sind:

- biologisch einwandfrei (keine Infektionen)
- gärkräftig / Triebkraft
- gute Vermehrung (Hefeernte)

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

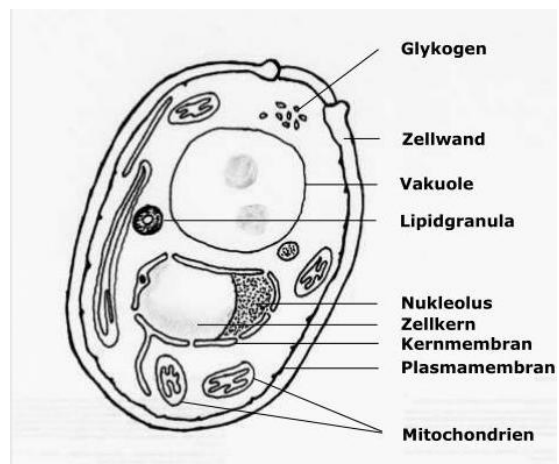


Abbildung 11: Aufbau einer Hefezelle

- weniger als 5% tote Zellen
- geringe Verschmutzung (Trub, Hopfenharze, ...)
- für Biertyp entsprechenden Geschmack liefern

Brauhefen sind Kulturhefen, welche für bestimmte Betriebsbereiche speziell gezüchtet sind.

Brauhefen werden unterteilt in:

- obergärige Brauereihefen („*Saccharomyces Cerevisiae*“)
- untergärige Brauereihefen („*Saccharomyces Carlsbergensis* bzw. *Uvarum*“)
- Wilde Hefen („*Brettanomyces*“)

Mit folgenden Hefeformen wird gebraut:

- Trockenhefe
- Flüssighefe

(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)

Aus den oben genannten Angaben lassen sich folgende Parametergruppen und Parameter identifizieren:

- Parametergruppe Hefegabe
- Parametergruppe Hefecharakteristika
- Parametergruppe Würzeanalyse

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Hefegabe: Zeitpunkt der Hefegabe	Beschreibt den Zeitpunkt, an dem die Hefe zugefügt wurde.	20.01.2025 20:44
Hefegabe: Hefetemperatur	Beschreibt die Temperatur, mit der die Hefe mit der Würze vereinigt wird. Zu niedrige Temperaturen können die Hefe inaktiv setzen, zu hohe Temperaturen können die Hefe schädigen.	Obergärige Hefe: 18 - 24°C Untergärige Hefe: 10 – 14°C
Hefegabe: Menge der Anstellhefe	Beschreibt die Menge an Hefe, die der Würze zugeführt wird.	1,5 Mio./mL (Millionen Hefezellen pro Milliliter)
Hefecharakteristika: Hefetyp	Beschreibt die Brauhefe.	Obergärig
Hefecharakteristika: Bierstil	Beschreibt den zu erwartenden Bierstil, den diese Hefe erzeugen kann.	Weizen- und Roggenbiere Alle untergärigen Bierstile
Hefecharakteristika: Name	Beschreibt den Namen, den diese Hefe von einer Hefebank erhalten hat.	Bavarian Wheat 11 Czech Pils 18
Hefecharakteristika: Temperatur-Optimum	Beschreibt den optimalen Temperaturbereich, in dem die Hefe die Gärung durchführt.	20° - 26°C 12° - 14°C
Hefecharakteristika: Temperatur-Bereich	Beschreibt den Temperaturbereich, in dem die Hefe arbeiten kann.	20° - 32°C 9° - 20°C
Hefecharakteristika: Endvergärungsgrad	Beschreibt wieviel Prozent des vergärbaren Zuckers in der Würze durch die Hefe in Alkohol und CO ₂ umgewandelt wird.	Max. 75%

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Hefecharakteristika: Gärkraft („Hefevitalität“)	Beschreibt die Hefeaktivität oder Stoffwechselaktivität lebender Zellen.	400 RLU (Relative Light Units)
Hefecharakteristika: Sedimentation	Beschreibt wie gut sich die Hefe nach der Gärung am Boden des Gärbehälters absetzt. Hohe Sedimentation ist schnell abgesetzt. Niedrige Sedimentation bedeutet, dass die Hefe länger in der Schwebelage bleibt.	Niedrig Hoch Mittel
Hefecharakteristika: Alkohol-Toleranz	Beschreibt bis zu welchem Alkoholgehalt die Hefe weiter arbeitet.	7,7% 6,9%
Hefecharakteristika: Viabilität	Beschreibt die Anzahl der lebendigen Zellen in Prozent.	98%
Würzeanalyse: Extraktgehalt	Beschreibt wie viel von den gelösten Stoffen in der Maische tatsächlich vergärbar ist.	8° Plato
Würzeanalyse: pH-Wert	Beschreibt, wie sauer oder basisch das Wasser ist.	pH-Wert 6,2
Würzeanalyse: Farbe	Beschreibt die Farbe der Maische und gibt Aufschluss über die Malzsorten/-typen und den Röstgrad des Malzes.	5 EBC (European Brewery Convention)
Würzeanalyse: Trübung	Beschreibt die Klarheit der Würze. Trübung ist eine optische Beeinträchtigung der Durchsicht in klaren Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern. Sie wird durch kleine Partikel hervorgerufen, die einen vom Träger abweichenden Brechungsindex oder die Fähigkeit der Lichtabsorption oder Lichtstreuung besitzen (Bioanalytics GmbH)	8 EBC (European Brewery Convention) oder 32 FTU (Formazine Turbidity Units)
Würzeanalyse: Dichte (indirekt Stammwürze)	Beschreibt den Zuckergehalt in der Würze, um die Konsistenz und Qualität des Bieres sicherzustellen. Sie gibt an wie schwer die Würze im Vergleich zum Wasser ist.	1.044 g/cm ³ (Gramm pro Kubikzentimeter)
Würzeanalyse: Freie Aminostickstoffe (FAN)	Beschreibt die Menge an freien Aminosäuren und kleinen Peptiden, die für die Hefeernährung wichtig sind. Niedriger FAN: Hefe kann Gärung abbrechen. Hoher FAN: Mikrobielle Verunreinigungen können zu Problemen im Geschmack führen.	200 mg/L (Milligramm pro Liter)
Würzeanalyse: Elektrische Leitfähigkeit	Beschreibt den Gehalt der gelösten Ionen in der Würze. Reines Wasser hat eine Leitfähigkeit fast bei 0 (isoliert). Die Messung der Leitfähigkeit des Ausgangswasser gibt Aufschluss über die Reinheit des	3 mS/cm (Millisiemens pro Zentimeter)

Parameter	Beschreibung	Beispiel
	<p>Wassers. Die Leitfähigkeit der Würze gibt Aufschluss über die Verunreinigungen, bestimmt Kalzium- und Magnesiumwerte.</p> <p>Diese Werte sind notwendig, um die Konsistenz der Qualität des Bieres sicherzustellen.</p>	

Tabella 55: Identifizierte Parameter der Hefegabe

(Mashcamp.shop, 2023), (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011), (Frischknecht, 2017)

5.5.1.2 Gärung (Hauptgärung)

Bei der alkoholischen Gärung beginnt bei Sauerstoffmangel, nach der Hefegabe, der Stoffwechsel der Hefen. Dieser Stoffwechsel ist ein stufenweiser, enzymatischer Prozess, bei dem organische Stoffe in körpereigene Substanzen umgewandelt oder Farbstoffe ausgeschieden werden. Bei mäßigen Temperaturen wird Energie umgesetzt. Man unterscheidet folgende zwei Stoffwechselarten, die einher gehen:

- Baustoffwechsel verwendet ca. 1 % des gesamten Zuckers und bildet neue Zellen bzw. Zellbestandteile. Dies geschieht mit Eiweißstoffwechsel und benötigt Energie.
- Betriebsstoffwechsel führt den eigentlichen Zuckerabbau durch und liefert dabei Alkohol und Energie.

(Rippel, 1927)

Die Folgen der Gärung sind:

- Zuckergehalt und Eiweiß sinken
- Bildung der Endprodukte der Gärung, Alkohol und CO₂
- Bildung der Gärungsnebenprodukte zum Beispiel organische Säuren, Ester, höhere Alkohole,
- Senkung des pH-Werts, weil als Gärungsnebenprodukte Säuren gebildet werden
- Gärungskohlensäure wird teilweise in der Flüssigkeit gebunden, gelangt aber größtenteils ins Freie und muss ausgeblasen werden
- Farbaufhellung durch die pH-Wertänderung
- Sauerstoff reichert sich im Bier an
- Unerwünschte Gärnebenprodukte können mittels CO₂-Wäsche reduziert werden

(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)

Die Hauptschritte der Glykolyse bei der alkoholischen Gärung sind:

1. **Glukoseaufnahme:** Glukose wird in die Zelle aufgenommen und durch das Enzym Hexokinase phosphoryliert, wodurch Glukose-6-phosphat entsteht.
2. **Isomerisierung:** Glukose-6-phosphat wird durch das Enzym Phosphoglukoseisomerase in Fruktose-6-phosphat umgewandelt.
3. **Phosphorylierung:** Fruktose-6-phosphat wird durch das Enzym Phosphofruktokinase zu Fruktose-1,6-bisphosphat phosphoryliert.
4. **Spaltung:** Fruktose-1,6-bisphosphat wird durch das Enzym Aldolase in zwei drei-Kohlenstoff-Verbindungen gespalten: Dihydroxyacetonphosphat und Glycerinaldehyd-3-phosphat.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

5. **Isomerisierung:** Dihydroxyacetonphosphat wird durch das Enzym Triosephosphatisomerase in Glycerinaldehyd-3-phosphat umgewandelt.
6. **Oxidation und Phosphorylierung:** Glycerinaldehyd-3-phosphat wird durch das Enzym Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase zu 1,3-Bisphosphoglycerat oxidiert und phosphoryliert.
7. **Adenosintriphosphat (ATP)-Bildung:** 1,3-Bisphosphoglycerat wird durch das Enzym Phosphoglyceratkinase zu 3-Phosphoglycerat umgewandelt, wobei ATP gebildet wird.
8. **Isomerisierung:** 3-Phosphoglycerat wird durch das Enzym Phosphoglyceratmutase zu 2-Phosphoglycerat umgewandelt.
9. **Dehydratisierung:** 2-Phosphoglycerat wird durch das Enzym Enolase zu Phosphoenolpyruvat (PEP) dehydratisiert.
10. **ATP-Bildung:** Phosphoenolpyruvat wird durch das Enzym Pyruvatkinase zu Pyruvat umgewandelt, wobei ATP gebildet wird.

Nach der Glykolyse wird Pyruvat durch das Enzym Pyruvatdecarboxylase zu Acetaldehyd decarboxyliert, und Acetaldehyd wird durch das Enzym Alkoholdehydrogenase zu Ethanol reduziert.

(Crux, 2005), (K. Rogos, 2020), (Biochemisches Institut der Universität Zürich, 2005)

Folgende Gärstadien sind zu unterscheiden:

- 1. Tag: **Ankommen oder Überweißen:** nach 12 – 16 h ist Jungbier mit weißer Schaumdecke überzogen.
- 2. & 3. Tag: **niedere Kräusen:** CO₂ bringt Harze, Gerbstoffe und Eiweiße an die Oberfläche und die Gärdecke wird braun. Die Schaumschicht wirkt als Barriere für weiteren Sauerstoffzufuhr und ermöglicht den Wechsel in die anaerobe Phase.
- 4. & 5. Tag: **Hochkräusen:** kräftiges Kräusen.
- 6. & 7. Tag: **Schlaucherdecke:** Die Kräusen fallen zusammen und bilden eine lockere braune Schicht.

(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)

Die Kontrollen bei der Hauptgärung sind:

- Gärtemperatur
- Spindelung
- Gärbilder betrachten, wenn möglich
- Klärung
- Geschmack
- Geruch
- Biologische Probe (Zwickelprobe)
- pH-Wert messen
- CO₂-Gehalt / Spundung
- Diacetyl
- Druck

(Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)

Aus den oben genannten Angaben lassen sich folgende Parametergruppen und Parameter zusätzlich zu den bereits identifizierten des Abschnitts 5.5.1.1 *Hefegabe* festlegen:

- Parametergruppe Hefegabe (5.5.1.1 *Hefegabe*)
- Parametergruppe Hefecharakteristika (5.5.1.1 *Hefegabe*)
- Parametergruppe Gärverlauf
- Parametergruppe Würzeanalyse (5.5.1.1 *Hefegabe*)
- Parametergruppe Aromenanalyse (5.4.3.1.4 *Parametergruppe Aromenanalyse*) für Flüssigkeit und Geruch

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Gärverlauf: Dauer der Gärung	Beschreibt die Zeitdauer von der Hefegabe bis zur Schlauchung (dem Umpumpen vom Gärtank in den Lagertank).	167h 18 Minuten ~7 Tage
Gärverlauf: Temperatur des Jungbiers	Beschreibt die Temperatur des Jungbiers im Verlauf der Gärung.	8° C
Gärverlauf: Druck im zylindrokonischem Gärtank (ZKG)	Beschreibt den Druck im ZKG während des Verlaufs der Gärung. Im offenen Gärbottich ist die Druckmessung nicht notwendig.	0,87 bar
Gärverlauf: CO ₂ -Gehalt	Beschreibt den in der Flüssigkeit gebundenen CO ₂ -Gehalt im Jungbier.	4,5 g/l (Gramm pro Liter)
Gärverlauf: Gärbilder	Beschreibt die Gärstadien des Bieres durch visuelle Betrachtung der Hefeentwicklung, vom Ankommen bis zur Schlaucherdecke.	14 Stunden 13 Minuten: Vollständige Überdeckung des Jungbiers durch die Schaumdecke.
Gärverlauf: Glukose	Beschreibt den Anteil an Glukose, oder Traubenzucker im Gärverlauf.	25 g/l
Gärverlauf: Enzym Hexokinase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Glukose in Glukose-6-phosphat.	0,21 mmol/l (Millimol pro Liter)
Gärverlauf: Glukose-6-phosphat	Beschreibt den Anteil an Glukose-6-phosphat im Gärverlauf.	0,1 mg/ml (Milligramm pro Milliliter)
Gärverlauf: Enzym Phosphoglukoseisomerase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Glukose-6-phosphat in Fruktose-6-phosphat.	U/mg Protein (Einheiten pro Milligramm Protein)
Gärverlauf: Fruktose-6-phosphat	Beschreibt den Anteil an Fruktose-6-phosphat im Gärverlauf.	0,9 mmol/l (Millimol pro Liter) (0,1-1,0 mmol/l möglich)
Gärverlauf: Enzym Phosphofruktokinase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Fruktose-6-phosphat in Fruktose-1,6-bisphosphat.	U/mg Protein (Einheiten pro Milligramm Protein)
Gärverlauf: Fruktose-1,6-bisphosphat	Beschreibt den Anteil der Fruktose-1,6-bisphosphat im Gärverlauf.	0,8 mmol/l (0,1 – 1,0 mmol/l möglich)
Gärverlauf: Enzym Aldolase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Fruktose-1,6-bisphosphat in Dihydroxyacetohphosphat und Glycerinaldehyd-3-phosphat.	U/mg Protein

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Gärverlauf: Dihydroxyacetonphosphat	Beschreibt den Anteil Dihydroxyacetonphosphat im Gärverlauf.	9 mg/mL (Milligramm pro Milliliter)
Gärverlauf: Glycerinaldehyd-3-phosphat	Beschreibt den Anteil Glycerinaldehyd-3-phosphat im Gärverlauf.	mg/mL
Gärverlauf: Enzym Triosephosphatisomerase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Dihydroxyacetonphosphat in Glycerinaldehyd-3-phosphat.	U/mg Protein
Gärverlauf: Enzym Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Glycerinaldehyd-3-phosphat in 1,3-Bisphosphoglycerat.	U/mg Protein
Gärverlauf: 1,3-Bisphosphoglycerat	Beschreibt den Anteil 1,3-Bisphosphoglycerat im Gärverlauf.	mg/mL
Gärverlauf: Enzym Phosphoglyceratkinase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von 1,3-Bisphosphoglycerat in 3-Phosphoglycerat.	U/mg Protein
Gärverlauf: 3-Phosphoglycerat	Beschreibt den Anteil 3-Phosphoglycerat im Gärverlauf.	mg/mL
Gärverlauf: Enzym Phosphoglyceratmutase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von 3-Phosphoglycerat in 2-Phosphoglycerat und Adenosintriphosphat.	U/mg Protein
Gärverlauf: 2-Phosphoglycerat	Beschreibt den Anteil 2-Phosphoglycerat im Gärverlauf.	mg/mL
Gärverlauf: Enzym Enolase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von 2-Phosphoglycerat in Phosphoenolpyruvat.	U/mg Protein
Gärverlauf: Phosphoenolpyruvat (PEP)	Beschreibt den Anteil Phosphoenolpyruvat im Gärverlauf.	mg/mL
Gärverlauf: Enzym Pyruvatkinase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Phosphoenolpyruvat in Pyruvat und Adenosintriphosphat.	U/mg Protein
Gärverlauf: Pyruvat	Beschreibt den Anteil Pyruvat im Gärverlauf.	mg/mL
Gärverlauf: Adenosintriphosphat (ATP)	Beschreibt den Anteil Adenosintriphosphat im Gärverlauf.	mg/mL
Gärverlauf: Enzym Pyruvatdecarboxylase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Pyruvat in Acetaldehyd.	U/mg Protein
Gärverlauf: Acetaldehyd	Beschreibt den Anteil Acetaldehyd im Gärverlauf.	mg/mL

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Gärverlauf: Enzym Alkoholdehydrogenase	Beschreibt die Aktivität des Enzyms im Gärverlauf bei der Umwandlung von Acetaldehyd in Ethanol.	U/mg Protein
Gärverlauf: Ethanol	Beschreibt den Anteil Ethanol im Gärverlauf.	mg/mL

Tabelle 56: Identifizierte Parameter der Gärung

Ein gut dokumentiertes Beispiel der Messung von Zuckergehalt bei der Vergärung findet man bei CDR BeerLab (Bellassai, 2019).

5.5.1.3 Lagerung und Reifung (Nachgärung)

Die Lagerung und Reifung hat folgende Aufgaben:

- Nachgärung
- Vergärung des Restextrakts
- Klärung des Bieres (Hefe, Eiweiß und Hopfenpartikel)
- CO₂-Bindung und Sättigung
- Reifung, Abrundung
- Weitere Hopfengaben

Die Lagerzeit hängt ab von:

- Biertyp
- Konzentration (Stammwürze)
- Hopfengabe
- Vergärungsgrad (Restextrakt)

Eine Brauerregel schreibt vor „alt und kalt“. Je stärker das Bier und je höher die Hopfengabe, desto länger sollte gelagert werden.

(Brauer-Berufsschule Ulm, 1993)

Aus den oben genannten Angaben lassen sich folgende Parametergruppen und Parameter identifizieren:

- Parametergruppe Gärverlauf
- Parametergruppe Würzeanalyse (5.5.1.1 Hefegabe)
- Parametergruppe Aromenanalyse (5.4.3.1.4 Parametergruppe Aromenanalyse) für Flüssigkeit und Geruch
- Gegebenenfalls Parametergruppe Hopfung (5.4.3.1.3 Parametergruppe Hopfung)
- Parameter Endvergärungsgrad (5.5.3.1.2 Parametergruppe Hefecharakteristika)

5.5.2 Vollständigkeit der Parameter in der Gärung

Die Parameter der Gärung sind sehr detailliert, aber technisch schwer zu messen. Ausgehend von den analysierten Quellen, wird in dieser Abschlussarbeit angenommen, dass die im Abschnitt 5.5.1 *Parameteridentifikation bei der Gärung* gelisteten Parameter ein vollständiges Aromabild der Gärung abdecken.

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
Hefegabe	<ul style="list-style-type: none"> • Hefegabe: 3 • Hefecharakteristika: 10 	100%

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
	<ul style="list-style-type: none"> • Würzeanalyse: 7 • Total: 20 	
Gärung (Hauptgärung)	<ul style="list-style-type: none"> • Gärverlauf: 31 • Hefegabe: 3 • Hefecharakteristika: 10 • Würzeanalyse: 7 • Aromenanalyse: 51 • Total: 102 	100%
Lagerung und Reifung (Nachgärung)	<ul style="list-style-type: none"> • Gärverlauf: 31 • Würzeanalyse: 7 • Aromenanalyse: 51 • Hopfung: 18 • Endvergärungsgrad: 1 • Total: 108 	100%

Tabella 57: Vollständigkeit der Parameter in der Gärung

Diese Annahmen sind im weiteren Verlauf praktisch zu validieren.

5.5.3 Digitale Erfassung der Parameter in der Gärung

Im Abschnitt 5.5.1 *Parameteridentifikation bei der Gärung* wurden derzeit bekannte Parameter der Hauptgärung ermittelt, um den Prozessschritt bestmöglich zu dokumentieren. Derzeit sind die Messungen typischerweise:

- einmalig.
- oder in unregelmäßigen Zeitabständen.
- oder nicht vollständig, da nicht alle Parameter, während der Würzebereitung gemessen werden.
- oder die Messgeräte sind nicht vorhanden.
- oder mit mehreren Medienbrüchen behaftet wie z.B. von der Messdurchführung über eine schriftliche Notiz bis zur Speicherung am Computer.

Anmerkung: In der Digitalisierung sind Medienbrüche so gering wie möglich zu halten!

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Messgeräte notwendig sind, um die entsprechenden Daten in den benötigten Zeitabständen zu erfassen.

5.5.3.1 Parameter der Hefegabe

5.5.3.1.1 Parametergruppe Hefegabe

Diese Parametergruppe erfasst die Parameter

- Zeitpunkt der Hefegabe
- Hefetemperatur
- Menge der Anstellhefe

Alle drei Parameter werden einmalig erfasst.

Messgeräte:

- Der Zeitpunkt der Hefegabe wird mit der Uhr erfasst. Dieser Zeitpunkt definiert den Startpunkt der Gärung und dient als Referenzzeitangabe.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

- Die Hefetemperatur kann mittels digitaler Thermometer oder Temperatursensoren gemessen werden.
- Die Menge der Anstellhefe kann mittels Füllstandsensoren oder Durchflusssensoren erfasst werden. Ein typischer Vertreter der Füllstandsensoren ist der Radar-Füllstandsensor NivoRadar NR 8000 von UWT. Ein typischer Vertreter eines Durchflussmessers ist der Magnetisch-induktive Durchflussmesser OPTIFLUX 1300 von Krohne Messtechnik GmbH. (Krohne Messtechnik GmbH, 2025), (UWT GmbH, 2025)

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Zeitpunkt der Hefegabe	08.02.2025 11:39
Hefetemperatur	6°C
Menge der Anstellhefe	2,25l

Tabelle 58: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Hefegabe

Abtastrate:

Alle Parameter dieser Gruppe werden einmalig erfasst und können mit den gegebenen Messgeräten einfach erfasst und gespeichert werden.

5.5.3.1.2 Parametergruppe Hefecharakteristika

Die Parametergruppe der Hefecharakteristika beschreibt die Hefe. Für die Digitalisierung ist zu diesem Zeitpunkt eine einmalige Datenerfassung ausreichend.

Messgeräte:

- Der exakte Hefetyp wird vom Lieferanten angegeben, kann aber auch mittels DNA-Analyse identifiziert werden. Das *Saccharomyces Cerevisiae* ist einer der ersten 5 Organismen mit vollständig erfasster Erbsubstanz (Dr. Dmitrij Frishman, 1997). Eine schnelle Quantifizierung von DNA ist mittels Colibri+ Mikrovolumen Spektrophotometer möglich (Berthold Technologiees GmbH & Co.KG, 2025).
- Der Bierstil wird von der Hefe festgemacht. D.h. wenn man einen spezifischen Bierstil brauen möchte, wählt man die entsprechende Hefe. Hefebanken und -laboratorien verkaufen Hefen basierend auf Bierstilen wie z.B. Lallemand, Fermentis, Wyeastlab oder White Labs (Lallemand Brewing, 2025), (White Labs, 2025), (Wyeast Laboratories, Inc, 2025), (Fermentis, 2025).
- Der Name der Hefe wird von den Hefebanken vergeben und ist beim Ankauf verfügbar.
- Das Temperatur-Optimum wird von den Hefebanken angegeben. Die Temperatur wird während der Gärung durchgängig mittels Temperatursensor gemessen.
- Der Temperatur-Bereich wird von den Hefebanken angegeben und ist typischerweise in einem größeren Bereich als das Temperatur-Optimum. Die Temperatur wird während der Gärung durchgängig mittels Temperatursensor gemessen.
- Der vom Lieferanten angegebene Endvergärungsgrad wird durch den Extraktgehalt (5.3.3.2.3 *Parameter Extraktgehalt*) bei der Würzeanalyse durchgängig erfasst und gespeichert. Der Endvergärungsgrad des spezifischen Suds wird nach der Gärung erfasst.
- Die Gärkraft („Hefevitalität“) kann mittels spezialisiertem Analysegerät, dem CDR BeerLab innerhalb kürzester Zeit gemessen werden (FoodLab, 2025).

- Die Sedimentation wird von den Hefebanken und -laboren kategorisiert. Während der Gärung kann mittels Messung der Trübung die aktuelle Sedimentation gemessen werden, siehe dazu Trübung im Abschnitt 5.4.3.1.2 *Parametergruppe Würzeanalyse*.
- Die Alkohol-Toleranz wird von der Hefebank und -laboren angegeben und bezieht sich auf den maximalen Alkoholgehalt, den diese Hefe verträgt. Der Alkoholgehalt wird über die Dichtemessung erfasst, siehe dazu Abschnitt 5.4.3.1.2 *Parametergruppe Würzeanalyse*.
- Die Viabilität der Hefe kann mittels Durchfluss-Mikroskopie erfasst werden (Tim Höpfner, 2010).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Hefetyp	Obergärig
Bierstil	Belgische Bierstile
Name	Abbaye Belgian
Temperatur-Optimum	20° - 24° C
Temperatur-Bereich	17° - 25° C
Endvergärungsgrad	Hoch
Gärkraft („Hefevitalität“)	400 RLU (Relative Light Units)
Sedimentation	Mittel bis Hoch
Alkohol-Toleranz	14%
Viabilität	98%

Tabella 59: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Hefecharakteristika

Abtastrate:

Die Hefecharakteristika werden von der Hefebank und -laboren bestimmt und beim Erwerb angegeben. Für die Digitalisierung müssen die Hefeangaben initial erfasst werden. Die weitere Abstufung erfolgt bei der Würzeanalyse.

5.5.3.1.3 Parametergruppe Würzeanalyse

Diese Parametergruppe wurde bereits in Abschnitt 5.4.3.1.2 *Parametergruppe Würzeanalyse* erläutert.

5.5.3.2 Parameter der Gärung (Hauptgärung)

Die Parameter der Gärung sind aufgeteilt in mehrere Gruppen:

- Parametergruppe Hefegabe, siehe Abschnitt 5.5.3.1.1 *Parametergruppe Hefegabe*.
- Parametergruppe Hefecharakteristika, siehe Abschnitt 5.5.3.1.2 *Parametergruppe Hefecharakteristika*.
- Parametergruppe Gärverlauf
- Parametergruppe Würzeanalyse, siehe Abschnitt 5.4.3.1.2 *Parametergruppe Würzeanalyse*.
- Parametergruppe Aromenanalyse, siehe Abschnitt 5.4.3.1.4 *Parametergruppe Aromenanalyse*.

5.5.3.2.1 Parametergruppe Gärverlauf

Die Parameter des Gärverlaufs können ab dem Zeitpunkt der Hefegabe im Minutentakt bis zur Lagerung und Reifung gemessen und gespeichert werden.

Messgeräte:

- Die Dauer der Gärung wird mittels eines chronologischen Zeitmessgeräts erfasst.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

- Die Temperatur des Jungbieres wird mittels digitalen Thermometers erfasst.
- Der Druck im Gärtank wird mittels Drucksensor wie z.B. dem VEGABAR 38 von Vega erfasst (Vega.com, 2025).
- Der CO₂-Gehalt im Jungbier kann mittels digitalen Aphrometer erfasst werden (Exacta Labcenter SpA, 2025).
- Gärbilder können mittels digitalen Fotos erfasst werden. Mittels Computer Vision ist es möglich Fotos einem spezifischen Gärstadium zuzuordnen (Arbelaez, 2025).

Die folgenden Stoffe können mittels High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) erfasst und gespeichert werden (S. Ball, 2010):

- Glucose
- Glucose-6-phosphat
- Fruktose-6-phosphat
- Fruktose-1,6-bisphosphat
- Dihydroxyacetanphosphat
- Glycerinaldehyd-3-phosphat
- 1,3-Bisphosphoglycerat
- 3-Phosphoglycerat
- 2-Phosphoglycerat
- Phosphoenolpyruvat (PEP)
- Pyruvat
- Adenosintriphosphat (ATP)
- Acetaldehyd
- Ethanol

Die folgenden Enzymaktivitäten können mittels Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography (RP-HPLC) oder High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) erfasst werden (Yuxia Guan, 2011), (P. Pietta, 1987):

- Hexokinase
- Phosphoglucoseisomerase
- Phosphofruktokinase
- Aldolase
- Triosephosphatisomerase
- Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase
- Phosphoglyceratkinase
- Phosphoglyceratmutase
- Enolase
- Pyruvatkinase
- Pyruvatdecarboxylase
- Alkoholdehydrogenase

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Dauer der Gärung	167h 18 Minuten ~7 Tage
Temperatur des Jungbiers	8° C
Druck im zylindrokonischem Gärtank (ZKG)	0,87 bar
CO ₂ -Gehalt	4,5 g/l
Gärbilder	14 Stunden 13 Minuten: Vollständige Überdeckung des Jungbiers durch die Schaumdecke.
Glukose	25 g/l
Enzym Hexokinase	0,21 mmol/l
Glukose-6-phosphat	0,1 mg/ml
Phosphoglucoseisomerase	U/mg Protein
Fruktose-1,6-bisphosphat	0,8 mmol/l
Aldolase	U/mg Protein
Dihydroxyacetonphosphat	9 mg/mL
Glycerinaldehyd-3-phosphat	mg/mL
Enzym Triosephosphatisomerase	U/mg Protein
Enzym Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase	U/mg Protein
1,3-Bisphosphoglycerat	mg/mL

Messeinheit	Beispiel
Enzym Phosphoglyceratkinase	U/mg Protein
3-Phosphoglycerat	mg/mL
Enzym Phosphoglyceratmutase	U/mg Protein
2-Phosphoglycerat	mg/mL
Enzym Enolase	U/mg Protein
Phosphoenolpyruvat (PEP)	mg/mL
Enzym Pyruvatkinase	U/mg Protein
Pyruvat	mg/mL
Adenosintriphosphat (ATP)	mg/mL
Enzym Pyruvatdecarboxylase	U/mg Protein
Acetaldehyd	mg/mL
Enzym Alkoholdehydrogenase	U/mg Protein
Ethanol	mg/mL

Tabelle 60: Digitale Messeinheiten für die Parametergruppe Gärverlauf

Abtastrate:

Für die Digitalisierung wäre eine Abtastrate von einer Minute wünschenswert. Die aktuelle Technologie des High-Performance Liquid Chromatograph benötigt für eine Analyse und Detektion zwischen 10 und 20 Minuten. D.h. eine minutengenaue Messung ist möglich, kann aber nur zeitverzögert ausgewertet und gespeichert werden.

Anmerkung: Die Messgeräte sind vorhanden, aber die Dauer der Messung benötigt zu lange. Für eine Messung im Minutentakt oder in Echtzeit müssten die Messgeräte weiterentwickelt werden.

5.5.3.3 Parameter der Lagerung und Reifung (Nachgärung)

Die Parameter der Nachgärung sind aufgeteilt in mehrere Gruppen:

- Parametergruppe Gärverlauf, siehe Abschnitt 5.5.3.2.1 *Parametergruppe Gärverlauf*.
- Parametergruppe Würzeanalyse, siehe Abschnitt 5.4.3.1.2 *Parametergruppe Würzeanalyse*.
- Parametergruppe der Aromenanalyse, siehe Abschnitt 5.4.3.1.4 *Parametergruppe Aromenanalyse*.
- Gegebenenfalls Parametergruppe Hopfung, siehe Abschnitt 5.4.3.1.3 *Parametergruppe Hopfung*.
- Parameter Endvergärungsgrad, siehe Abschnitt 5.3.3.2.3 *Parameter Extraktgehalt*.

5.6 Prozessschritte Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

5.6.1 Parameteridentifikation bei der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

Die Parameter werden basierend auf den Teilschritten gegliedert:

- Filtration
- Stabilisierung
- Abfüllung

(Kiesbye, 2003)

5.6.1.1 Filtration

Die Filtrierung, Klärung des Bieres, hat folgende Aufgaben:

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

- Entfernung von Teilchen, um ein glanzfeines Bier zu erhalten.
- Entfernung von Geschmacksträgern, um einen anderen Biergeschmack zu erhalten.
- Verbesserung der Haltbarkeit
 - Biologisch
 - Chemisch-physikalisch
 - Sensorisch

Grundsätzlich erfolgt die Filtration auf mechanischem Weg, zweistufig:

1. Stufe: Dosage von Kieselgur, Perlite oder Cellulose zur Bildung eines feinporigen Filterkuchens, durch den das Bier filtriert wird.
2. Stufe: Das durch die 1. Stufe vorgeklärte Bier wird nochmals durch Filterschichten geleitet und je nach Porigkeit werden Hefen und Bakterien zurückgehalten.

(Kiesbye, 2003), (Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97, 2011)

Aus den oben genannten Angaben lassen sich folgende Parametergruppen und Parameter identifizieren:

- Parametergruppe Würzeanalyse
- Parametergruppe Filtration
- Parametergruppe Aromenanalyse, siehe Abschnitt 5.4.3.1.4 *Parametergruppe Aromenanalyse*
- Parametergruppe Würzekochung, siehe Abschnitt 5.4.3.1.1 *Parametergruppe Würzekochung*.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Würzeanalyse: Trübung	Beschreibt die Klarheit der Würze. Trübung ist eine optische Beeinträchtigung der Durchsicht in klaren Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern. Sie wird durch kleine Partikel hervorgerufen, die einen vom Träger abweichenden Brechungsindex oder die Fähigkeit der Lichtabsorption oder Lichtstreuung besitzen (Bioanalytics GmbH)	8 EBC (European Brewery Convention) oder 32 FTU (Formazine Turbidity Units)
Filtration: Filtrationsdruck	Beschreibt den Druck, mit dem das Bier durch das Filtermedium gedrückt wird.	0,8 bar
Filtration: Viskosität	Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit der Würze. Eine hohe Viskosität kann die Filtration der Würze verlangsamen und die Effizienz der Extraktion verringern.	2 mPa-S (Millipascal-Sekunden)
Filtration: Temperatur der Flüssigkeit	Beschreibt die Temperatur des Bieres bei der Filtration	3° C
Filtration: Filtermittel	Beschreibt das verwendete Filtermittel wie z.B. Kieselgur, Zellulose, Baumwollfasern oder Perlite	Kieselgur

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Filtration: Filtermittel Menge	Beschreibt die Menge des verwendeten Filtermittels	10 g/L (Gramm pro Liter)
Filtration: Filterhilfsmittel	Beschreibt das verwendete Filterhilfsmittel wie z.B. Aktivkohle, Asbest, Kieselgelee, Bentonite, PVPP	Aktivkohle
Filtration: Filterhilfsmittel Menge	Beschreibt die Menge des verwendeten Filterhilfsmittel	2 g/L (Gramm pro Liter)
Filtration: CO ₂ -Gehalt	Beschreibt die Menge des CO ₂ im Bier	5 g/L (Gramm pro Liter)
Filtration: O ₂ -Gehalt	Beschreibt die Menge des Sauerstoffs im Bier	0,1 mg/L (Milligramm pro Liter)
Filtration: Eiweißgehalt	Beschreibt den Anteil an Eiweiß im Bier, um die Stabilität des Schaums zu gewährleisten	4 g/l (Gramm pro Liter)

Tabelle 61: Identifizierte Parameter der Filtration

(Brauer-Berufsschule Ulm, 1993)

5.6.1.2 Stabilisierung

Die Stabilisierung hat folgende Aufgaben:

- Verlängerung der biologischen Haltbarkeit
- Verlängerung der chemisch-physikalischen Haltbarkeit
- Verlängerung der geschmacklichen, sensorischen Haltbarkeit

5.6.1.2.1 Biologische Haltbarkeit

Um die biologische Haltbarkeit zu erhöhen, sind folgende Hilfsmittel bekannt:

- Sauberkeit – schwer digital zu messen
- Gute Vergärung (hoher Ausstoßvergärungsgrad)
- Pasteurisation

(Brauer-Berufsschule Ulm, 1993)

5.6.1.2.2 Chemisch-physikalische Haltbarkeit

Um die chemisch-physikalische Haltbarkeit zu erhöhen, sind folgende Hilfen bekannt:

- Gute Trubausscheidung
- Intensive, kalte Gärung und Lagerung
- Scharfe Filtration (Temperatur bei 0° C)
- Fernhalten von O₂
- Desinfektionsmittel gut ausgespült
- Zugabe von Enzymen wie z.B. Papain

(Brauer-Berufsschule Ulm, 1993)

5.6.1.2.3 Geschmackliche, sensorische Haltbarkeit

Um die sensorische Haltbarkeit zu erhöhen, sind folgende Möglichkeiten bekannt:

- Fernhalten von Luft im Bier
- Lichtgeschützte Lagerung

*Schriftliche Abschlussarbeit**Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion*

- Zugabe von Antioxidanten wie z.B. Ascorbinsäure

(Brauer-Berufsschule Ulm, 1993)

Aus den oben genannten Angaben lassen sich nur wenige Parameter für die Digitalisierung identifizieren. Ein Teil wurde bereits in vorhergehenden Prozessen gemessen und kann zu diesem Zeitpunkt nur aus den vorhergehenden Aufzeichnungen der Parameter genutzt werden.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Ausstoßvergärungsgrad	Beschreibt den Prozentsatz des Zuckers im Bier, der während der Gärung in Alkohol und Kohlendioxid umgewandelt wurde. Dieser Wert kann zu diesem Zeitpunkt zwar nicht mehr gemessen werden, aber durch einige bereits erfasste Parameter berechnet werden.	80%
Pasteurisationstemperatur	Beschreibt die Temperatur, mit der die Pasteurisation durchgeführt wurde.	60° C
Pasteurisationsdauer	Beschreibt die Dauer, mit der die Pasteurisation durchgeführt wurde.	15 Minuten
Trübung	Beschreibt die Klarheit der Würze. Trübung ist eine optische Beeinträchtigung der Durchsicht in klaren Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern. Sie wird durch kleine Partikel hervorgerufen, die einen vom Träger abweichenden Brechungsindex oder die Fähigkeit der Lichtabsorption oder Lichtstreuung besitzen (Bioanalytics GmbH)	8 EBC (European Brewery Convention) oder 32 FTU (Formazine Turbidity Units)
O ₂ -Gehalt im Bier	Beschreibt die Menge des Sauerstoffs im Bier	0,1 mg/L (Milligramm pro Liter)

Tabelle 62: Identifizierte Parameter der Stabilisierung

5.6.1.3 Abfüllung

Bei der Abfüllung können alle fast durchgängig erfassten Parameter ein letztes Mal erfasst und gespeichert werden. Neue Parameter des Bieres sind in diesem Prozessschritt nicht mehr zu erfassen.

5.6.2 Vollständigkeit der Parameter der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

Die Parameter der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung sind einfacher zu messen. Ausgehend von den analysierten Quellen, wird in dieser Abschlussarbeit angenommen, dass die im Abschnitt 5.6.1 *Parameteridentifikation bei der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung* gelisteten Parameter ein vollständiges Bild abdecken.

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
Filtration	11	100%
Stabilisierung	5	100%
Abfüllung	0	100%

Tabelle 63: Vollständigkeit der Parameter in der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

Diese Annahmen sind im weiteren Verlauf praktisch zu validieren.

5.6.3 Digitale Erfassung der Parameter in der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

Im Abschnitt 5.6.1 *Parameteridentifikation bei der Filtration, Stabilisierung und Abfüllung* wurden derzeit bekannte Parameter dieser Bereiche ermittelt, um die Prozessschritte bestmöglich zu dokumentieren. Derzeit sind die Messungen typischerweise:

- einmalig.
- oder in unregelmäßigen Zeitabständen.
- oder nicht vollständig, da nicht alle Parameter während der Würzebereitung gemessen werden.
- oder die Messgeräte sind nicht vorhanden.
- oder mit mehreren Medienbrüchen behaftet wie z.B. von der Messdurchführung über eine schriftliche Notiz bis zur Speicherung am Computer.

Anmerkung: In der Digitalisierung sind Medienbrüche so gering wie möglich zu halten!

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Messgeräte notwendig sind, um die entsprechenden Daten in den benötigten Zeitabständen zu erfassen.

5.6.3.1 Parameter der Filtration

Die Parameter der Filtration sollen alle Werte im Minutentakt erfassen und speichern, die während der Filtration von besonderer Bedeutung sind.

Messgeräte:

- Die Trübung wird mit Trübungsmessgeräten, -analyzern und -sensoren gemessen. Das Inline Trübungsmessgerät Model TURBIsmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH bietet durchgängige Messungen von Trübung und Farbe (Chemtronic Waltemode GmbH, 2025).
- Der Filtrationsdruck kann mittels Manometer gemessen werden, wie z.B. dem Absolute Manometer DL 01 von BDSensors GmbH (DirectIndustryConnect, 2025).
- Die Viskosität kann mittels Viscometer, wie z.B. dem Weighing RV-6M, gemessen werden (Weighing Instrument Co. Ltd, 2025).
- Die Temperatur der Flüssigkeit kann mittels digitaler Thermometer oder Temperatursensoren erfasst werden.
- Das Filtermittel kann vom Lieferanten erfasst werden.
- Die Menge des Filtermittels kann mittels digitaler Waage erfasst werden.
- Das Filterhilfsmittel kann vom Lieferanten erfasst werden.
- Die Menge des Filterhilfsmittel kann mittels digitaler Waage erfasst werden.
- Der CO₂-Gehalt im Bier kann mittels digitalen Aphrometer erfasst werden (Exacta Labcenter SpA, 2025).
- Der O₂-Gehalt im Bier kann mittels optischen Sensors für gelösten Sauerstoff, wie z.B. dem DO Sensor InPro6960i/12/120, erfasst und gespeichert werden (Mettler Toledo, 2025).
- Der Eiweißgehalt kann mittels Kjeldahl Analyzer, wie z.B. dem Fully-Automatic Kjeldahl Analyzer LKA-C10 von Labtron, gemessen werden (Labtron, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Messeinheit	Beispiel
Trübung	32 FTU (umgerechnet 8 EBC)
Filtrationsdruck	0,8 bar
Viskosität	2 mPa-S (Millipascal-Sekunden)
Temperatur der Flüssigkeiten	3° C
Filtermittel	Kieselgur
Filtermittel Menge	10 g/L
Filterhilfsmittel	Aktivkohle
Filterhilfsmittel Menge	2 g/L
CO ₂ -Gehalt	5 g/L
O ₂ -Gehalt	0,1 mg/L
Eiweißgehalt	4 g/L

Tabelle 64: Digitale Messeinheiten der Filtration

Abtastrate:

Alle Parameter können digital erfasst und gespeichert werden. Die Kjeldahl Analyser benötigen durchschnittlich 3-4 Minuten pro Analyse, können aber mehrere Analysen parallel durchführen. Daher ist die Erfassung und Speicherung von Daten im Minutentakt gegeben.

5.6.3.2 Parameter der Stabilisierung

Die Parameter der Stabilisierung messen die Schritte für die Verlängerung der Haltbarkeit.

Messgeräte:

- Der Ausstoßvergärungsgrad kann zu jedem Zeitpunkt errechnet werden, in dem die bereits zur Gärung gespeicherten Werte Extraktgehalt der Anstellwürze und Endvergärungsgrad genutzt werden.
- Die Pasteurisationstemperatur kann mittels digitalem Temperaturmessgerät erfasst werden.
- Die Pasteurisationsdauer kann mittels digitalem Zeitmessgerät erfasst werden.
- Die Trübung wird mit Trübungsmessgeräten, -analyzern und -sensoren gemessen. Das Inline Trübungsmessgerät Model TURBIsmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH bietet durchgängige Messungen von Trübung und Farbe (Chemtronic Waltemode GmbH, 2025).
- Der O₂-Gehalt im Bier kann mittels optischen Sensors für gelösten Sauerstoff, wie z.B. dem DO Sensor InPro6960i/12/120, erfasst und gespeichert werden (Mettler Toledo, 2025).

Digitale Messeinheiten:

Messeinheit	Beispiel
Ausstoßvergärungsgrad	80%
Pasteurisationstemperatur	60° C
Pasteurisationsdauer	15 Minuten
Trübung	8 EBC (European Brewery Convention) oder 32 FTU (Formazine Turbidity Units)
O ₂ -Gehalt im Bier	0,1 mg/L (Milligramm pro Liter)

Tabelle 65: Digitale Messeinheiten für die Stabilisierung

Abtastrate:

Für die Digitalisierung ist eine Abtastrate von einer Minute wünschenswert. Alle Parameter können mit den jeweiligen Messgeräten innerhalb einer Minute erfasst und gespeichert werden.

Schriftliche Abschlussarbeit**Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion**

5.7 Prozessschritt Sensorische Analyse – Biersensorik

5.7.1 Parameteridentifikation bei der Sensorischen Analyse

Bei der sensorischen Analyse werden die physikalischen und chemischen Reize des Bieres mit den Rezeptoren der Sinnesorgane wahrgenommen, in elektrische Signale umgewandelt und zum Gehirn weitergeleitet. Die aufgenommenen Informationen werden von unserem Gehirn gefiltert, verarbeitet und als Empfindung bzw. Wahrnehmung wiedergegeben. (Dr. Michael Zepf, 2021)

Der Mensch hat 5 Sinne, Hören, Riechen, Schmecken, Sehen und Tasten. Basierend auf diesen 5 Sinnen können Biere beschrieben werden. Das Hören wird in der sensorischen Analyse des Bieres vernachlässigt.

Biersommeliers und Brauerei Qualitätsmanager beschreiben Biere mit Hilfe der sensorischen Analyse. Diese ist eine blumige Beschreibung aller Sinneswahrnehmungen und kann in folgende Parameter gegliedert werden.

5.7.1.1 Sehen

Beim Sehen wird zu Beginn der Gesamteindruck erfasst. Der Gesamteindruck beinhaltet neben dem eigentlichen Bier noch das Glas und die Örtlichkeit.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Glas	Beschreibung des Glases in dem das Bier analysiert wird.	Pint Glas
Farbe	Beschreibt die Farbe des Bieres.	Kupferfarben
Karbonisierung	Beschreibt die Lebendigkeit des Bieres und die zu erwartende Kohlensäure.	Perlend
Schaum	Beschreibt den Schaum am Bier. Der Schaum kann vom Glas und dessen Sauberkeit beeinflusst werden.	Feinporig, stabil
Farbe des Schaums	Beschreibt die Farbe des Schaums am Bier.	Schneeweiß
Trübung	Beschreibt, ob das Bier klar ist oder eine Trübung hat.	Glanzfein

Tabella 66: Identifizierte Parameter Sensorische Analyse Sehen

5.7.1.2 Riechen

Im nächsten Schritt wird das Bier mit der Nase, dem Geruchssinn, erkundet. Man unterscheidet orthonasale und retronasale Eigenschaften. Orthonasale Eigenschaften werden vor dem Trinken in der Nase erfasst. Retronasale Eigenschaften werden im Mundraum durch die Mund-Nase-Verbindung erfasst. Der Geruch wird von den umgebenden Gerüchen beeinflusst wie z.B. einem verrauchten Raum.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Bouquet	Beschreibt die orthonasalen Gerüche des Bieres.	Fruchtige Beerenvariationen, reifes Steinobst, Vanillenoten
Aromatik	Beschreibt die orthonasalen und retronasalen Gerüche des Bieres.	Gewürzaromatische, fruchtige, honigartige Aromaeindrücke, hopfig, harzig

Tabella 67: Identifizierte Parameter Sensorische Analyse Riechen

5.7.1.3 Schmecken und Tasten

Im letzten Schritt der sensorischen Analyse wird vom Bier getrunken und der Geschmack im Mund sowie das Mundgefühl, die Haptik, wahrgenommen. Die 5 Grundgeschmacksarten sind:

- Süß
- Sauer
- Salzig
- Bitter
- Umami

Die Haptik kann unterteilt werden in:

- Taktile Eindrücke (Tasten)
- Kinästhetische Eindrücke (Widerstandswahrnehmung)
- Trigeminale Eindrücke (Schmerz)
- Temperaturbedingte Eindrücke

Alle folgenden Parameter können sowohl mit analytischen Werten von 1-10 als auch textuell beschrieben werden.

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Salzig	Beschreibt die Salzigkeit des Bieres	Wert von 1-10
Bitter	Beschreibt die Bitterkeit des Bieres	Wert von 1-10
Süß	Beschreibt die Süße des Bieres	Wert von 1-10
Sauer	Beschreibt die Säuerlichkeit des Bieres	Wert von 1-10
Muffig	Beschreibt einen unangenehmen, abgestandenen Geschmack.	Wert von 1-10
Schweflig	Beschreibt den Geschmack, der an Schwefel erinnert.	Wert von 1-10
Brenzlig	Beschreibt den Geschmack, der an angebranntes oder verbranntes erinnert.	Wert von 1-10
Würzeartig	Beschreibt den Geschmack, der an Bierwürze und Sudkessel erinnert.	Wert von 1-10
Rauchig	Beschreibt den Geschmack, der an Rauch, geräucherten Schinken, Holz oder Speck erinnert.	Wert von 1-10
Röstaromatisch	Beschreibt den Geschmack, der an gerösteten Kaffee oder gerösteten Kakao erinnert.	Wert von 1-10
Karamellig	Beschreibt den Geschmack, der an süßes, cremiges und reichhaltiges, bräunliches Karamell erinnert.	Wert von 1-10
Malzig	Beschreibt den Geschmack, der an Malz erinnert und oft mit süßen, nussigen und leicht gebräunten Aromen verbunden ist.	Wert von 1-10
Grasig	Beschreibt den Geschmack, der an frisch geschnittenes Gras oder grüne Pflanzen erinnert.	Wert von 1-10

Parameter	Beschreibung	Beispiel
Nussig	Beschreibt den Geschmack, der an geröstete, warme, leicht süßliche Nüsse, erinnert.	Wert von 1-10
Harzig	Beschreibt den Geschmack, der an Baumharz, intensiv, leicht bitter erinnert.	Wert von 1-10
Hopfig	Beschreibt den Geschmack, der an Hopfen, kräuter- und zitrusartig erinnert	Wert von 1-10
Blumig	Beschreibt den Geschmack, der an frische Blumen, Frühlingssträucher erinnert.	Wert von 1-10
Fruchtig	Beschreibt den Geschmack, der an Früchte erinnert.	Wert von 1-10
Alkoholaromatisch	Beschreibt den Geschmack, der an Alkohol erinnert.	Wert von 1-10
Vollmundig	Beschreibt ein reiches, komplexes, den gesamten Mund ausfüllendes Mundgefühl.	Wert von 1-10
Wärmend	Beschreibt das Mundgefühl, dass ein angenehmes, wohliges Gefühl der Wärme hervorruft.	Wert von 1-10
Ölig	Beschreibt das Mundgefühl, dass an das Gefühl von Öl erinnert.	Wert von 1-10
Adstringent	Beschreibt ein trockenes, zusammenziehendes Mundgefühl. Es hinterlässt oft ein raues Gefühl im Mund.	Wert von 1-10
Belegend	Beschreibt das Mundgefühl, dass einen Film oder eine Schicht im Mund hinterlässt.	Wert von 1-10
Viskosität	Beschreibt das Mundgefühl, wie sich das Bier im Mund bewegt und anfühlt.	Wert von 1-10 (dünn – dick – fest)
Textur	Beschreibt das Mundgefühl, wie sich das Bier im Mund anfühlt.	Wert von 1-10 (breiig – cremig – körnig)
Temperatur	Beschreibt die Temperatur des Bieres	8° C
Antrunk	Beschreibt den ersten Eindruck des Bieres im Mundraum.	Erfrischen, zart, lieblich, kräftig
Rezenz	Beschreibt die Art der Ausprägung der Kohlensäure auf den Lippen, im Mund und im Nachtrunk.	Wenig, beißend, moussierend, schäumend, aufbrausend, schal
Körper	Beschreibt die Ausprägung des Körpers des Bieres.	Schlank, voll, rund, mächtig
Finale	Beschreibt die Art und Länge des Nachtrunks bzw. beim Schlucken des Bieres.	Rascher, kurzer Abgang, langanhaltend, harmonisch, Fruchtaromatik

Tabelle 68: Identifizierte Parameter Sensorische Analyse Schmecken und Tasten

5.7.2 Vollständigkeit der Parameter der Sensorischen Analyse

Die Parameter der sensorischen Analyse können nicht gemessen werden. Es ist eine beschreibende Analyse (Deskriptive Analyse), die von geschulten Sensorikern wie z.B. Biersommeliers und Brauerei Qualitätsmanagern, durchgeführt werden und mit spezifischen, sensorischen Eigenschaften das Bier beschrieben.

In der Gemeinschaft der Biersommeliers versucht man mittels Verkostungsbögen diese Beschreibungen zu vereinheitlichen. Nichtsdestotrotz wird eine 100% Erfassung aller sensorischen Eigenschaften eines Bieres mit dieser Methode nicht möglich sein.

Gruppierung der Parameter	Anzahl der gelisteten Parameter	Vollständigkeit
Sehen	6	Deutlich < 100%
Riechen	2	Deutlich < 100%
Geschmack und Tasten	32	Deutlich < 100%

Tabelle 69: Vollständigkeit der Parameter in der sensorischen Analyse

Diese Annahmen sind im weiteren Verlauf praktisch zu validieren.

5.7.3 Digitale Erfassung der Parameter der sensorischen Analyse

Im Abschnitt 5.7.1 *Parameteridentifikation bei der Sensorischen Analyse* wurden derzeit genutzte Parameter der sensorischen Analyse aufgelistet. Geschulte Sensoriker erfassen bei der sensorischen Analyse spezifische, sensorische Eigenschaften des Bieres. Diese Eigenschaften werden häufig mittels Verkostungsbögen dokumentiert.

Für die digitale Erfassung der sensorischen Analyse empfiehlt es sich diese Verkostungsbögen zu standardisieren und digital zu erfassen. Die erfassten Verkostungsbögen werden einmalig erfasst und einem Bier oder einem Sud zugeordnet.

6 Fallbeispiele der künstlichen Intelligenz im gesamten Untersuchungsraum

Basierend auf Kapitel 5 *Fallbeispiele der Digitalisierung in den einzelnen Prozessschritten*, ist davon auszugehen, dass alle Prozessschritte mittels der identifizierten Parameter mit deren konkrete Datenpunkte nachvollziehbar sind. In weiterer Folge ist anzunehmen, dass in Zukunft noch weitere Parameter identifiziert, werden können.

ANNAHME: In dieser Abschlussarbeit wird davon ausgegangen, dass auch alle fehlenden Parameter mess- und speicherbar sind.

6.1 Vorbereitung der Daten für künstliche Intelligenz

Typischerweise wird Digitalisierung in den Unternehmen in kleinen Schritten und in verschiedenen Abteilungen durchgeführt. Das hat zur Folge, dass die Daten in verschiedenen Formaten, isoliert in verschiedenen Datenbanken oder anderen Datenquellen abgespeichert werden. Um aus den vorhandenen Daten lernen zu können ist es notwendig, diese entsprechend abzulegen, damit die Daten

- verfügbar und für alle Berechtigten zugänglich sind.
- lesbar sind, d.h. in einem Format erfasst werden mit dem auch weiter gearbeitet werden kann.
- nachvollziehbar sind, d.h. der Datenursprung und die Bearbeitungsschritte dokumentiert sind.
- zeitgenau sind, d.h. die Daten sind aktuell und sind im Kontext der Bierproduktion, für die aktuellen Maschinen erfasst.
- vollständig sind, wie z.B. das bei einer Aromenanalyse alle bekannten Ester identifiziert sind. Nicht erfasste Ester führen zu falschen Interpretationen und die gewünschte Banane kann von einer intensiven Birne unterdrückt werden.
- keine Duplikate enthalten. D.h. mehrfach die gleichen Datenpunkte abzuspeichern kann zu einer höheren Priorisierung und damit zu falschen Vorhersagen führen.
- gültig sind, d.h. die erfassten Daten sind für jene Geräte in der Bierproduktion erfasst, die auch wirklich vorhanden sind. Für neue Geräte im Prozess müssten die Daten neu erfasst werden oder wenn genügend Datenpunkte vorhanden sind, vorhergesagt werden.
- konsistent sind, d.h. wenn die Daten in unterschiedlichen Bereichen der Bierproduktion erfasst sind, diese dennoch so miteinander verknüpft sind, dass der Prozess nachvollziehbar bleibt. Sollten Daten von einem Sud mit einem anderen Sud verknüpft, verwechselt werden, dann sind diese Daten inkonsistent.
- relevant sind, d.h. die Daten sind für die Bierproduktion notwendig, um den Prozess eines Suds nachzuvollziehen. Nicht relevante Daten sind z.B. Daten wie, es hat geregnet am Abfülltag.

Um die Daten und Datenmengen entsprechend vorzubereiten, empfiehlt es sich diese zentral abzulegen, die Rohdaten zu sichern und alle weiter verarbeiteten Daten zu duplizieren. Rohdaten sind jene Daten direkt aus den Geräten von Kapitel 5 *Fallbeispiele der Digitalisierung in den einzelnen Prozessschritten*. Die modernsten Technologien für künstliche Intelligenz sind von Cloud Providern bereitgestellt. Daher empfiehlt sich eine Cloud Architektur, um die Daten zu speichern und entsprechend vorzubereiten.

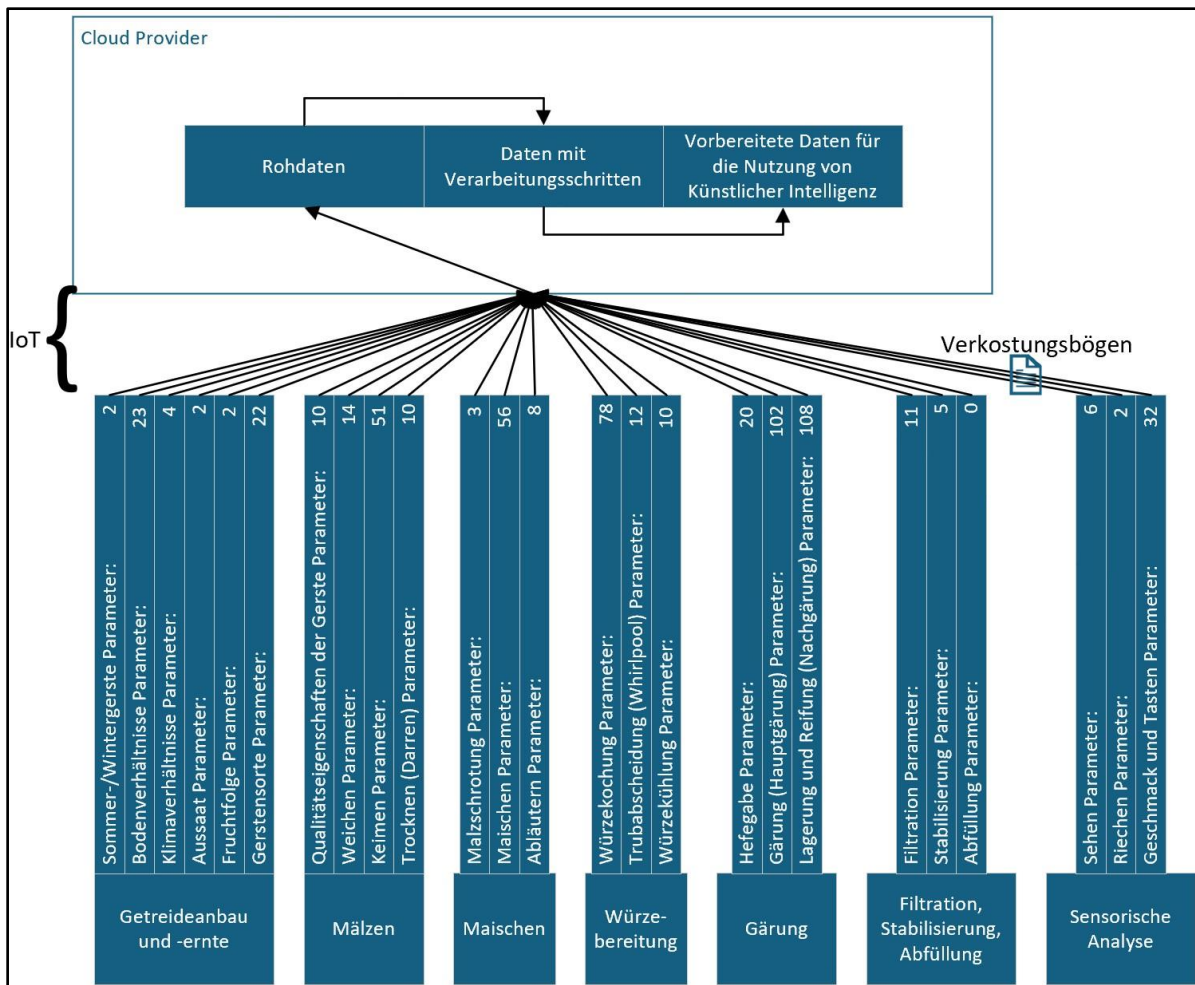


Abbildung 12: Technische Architektur für die Datenvorbereitung

In *Abbildung 12: Technische Architektur für die Datenvorbereitung* wird der Weg der Daten von den in Kapitel 5 *Fallbeispiele der Digitalisierung in den einzelnen Prozessschritten* identifizierten Geräten über *Internet der Dinge - Internet of Things (IoT)*, siehe Abschnitt 3.2.3 in die Cloud, siehe Abschnitt 3.2.4 *Cloud Computing oder Cloud* übertragen. Die Daten der sensorischen Analyse können über digitale Verkostungsbögen, digitale Dokumente, erfasst und im Bereich Rohdaten als Dokumente gespeichert werden.

Innerhalb der Cloud werden die Rohdaten gespeichert und in weiterer Folge nur mehr lesend genutzt. Die Rohdaten werden in mehreren Verarbeitungsschritten dupliziert, bearbeitet und die Qualität gesteigert. Nach jedem Verarbeitungsschritt werden die resultierenden Daten erneut gespeichert, um für folgende Verarbeitungsschritte zur Verfügung zu stehen. Nach mehreren Verarbeitungsschritten sind die Daten in einem Zustand, um von Technologien für künstliche Intelligenz genutzt werden zu können.

Die in *Abbildung 12* dargestellte Architektur entspricht der heutigen Definition einer „*Big Data*“ Architektur, siehe dazu Abschnitt 3.2.5. Die Daten werden laufend, in den verschiedensten Formaten erstellt, zentral gespeichert, verwaltet und mit den Kapazitäten der Cloud veredelt.

6.2 Entwicklung einer künstlichen Intelligenz mittels Deep Learning

6.2.1 Datenmengen

Pro Sud und Bier ergibt sich ein Datensatz aus mehreren Billionen Datenpunkten. Ein Datenpunkt ist ein Messpunkt für einen Parameter. Zum Beispiel wird während der Gärung im Minutentakt der Glukose oder CO₂-Gehalt gemessen. Bei einer Gärung von 7 Tagen würden für Glukose 10.080 Datenpunkte gesammelt werden. Ein vereinfachter Datensatz mit unbestimmten Werten würde folgendermaßen aussehen:

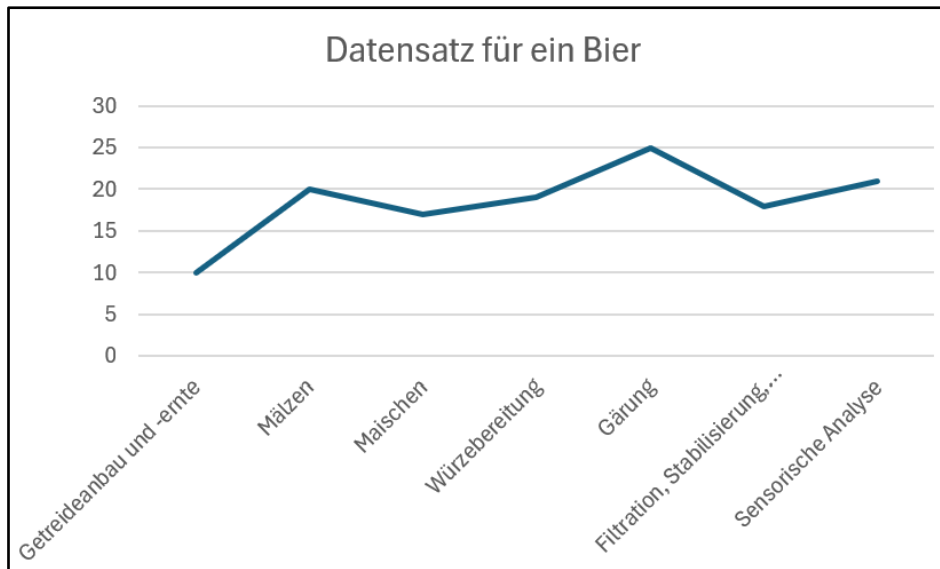


Abbildung 13: Einzelner Datensatz für ein Bier

Beim Sammeln von tausenden von Datensätzen für tausende von Bieren würde eine wesentlich höhere Aussagekraft entstehen.

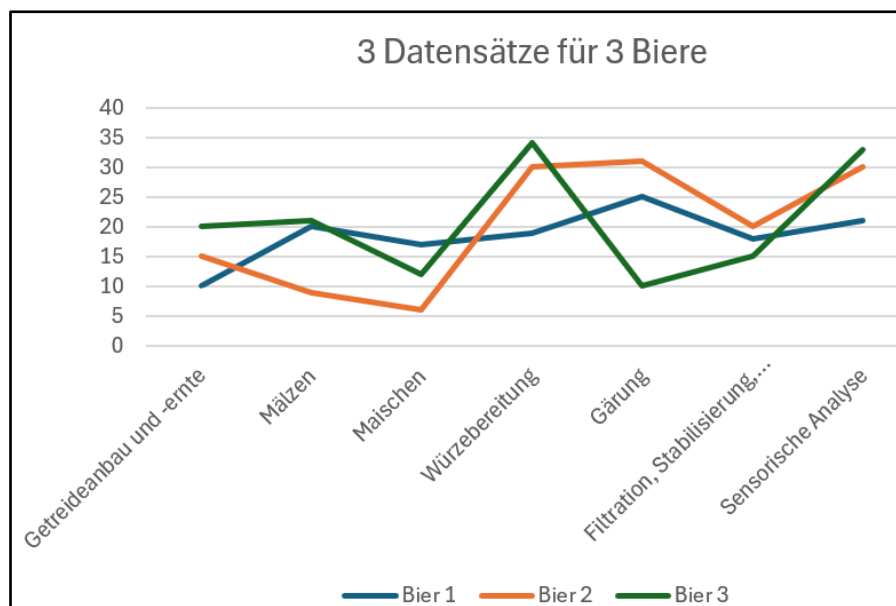


Abbildung 14: 3 vereinfachte Datensätze für 3 Biere

Aufgrund der fehlenden Technologie sind die folgenden Werte heute nur theoretisch zu erreichen. Es ist z.B. nicht möglich jedes einzelne Gerstenkorn beim Keimen im Minutentakt zu analysieren. Für einen vollständigen einzelnen Datensatz sind in etwa folgende Mengen an Datenpunkten zu erwarten:

Prozessschritt Getreideanbau und ernte für 1 Jahr und 1 Hektar		
Sommergerste oder Wintergerste	Pro Aussaat	40.002
Terroir – Bodenverhältnisse	Pro Jahr	1.580.000
Terroir – Klimaverhältnisse	Alle 10 Minuten	315.360
Aussaat	Pro Aussaat	30.002
Gerstensorte	Pro Aussaat und 3 Vorfrüchte / täglich	40.150.008
Prozessschritt Mälzen für 1 Tonne und korngenaue (Korn = 0,035g)		
Qualitätseigenschaften der Gerste		~90.000.002.040
Weichen	2 Tage	~28.530.000
Keimen	5 Tage	~2.000.000.000.000
Darren	20 Stunden	~1.402.200.000.000
Prozessschritt Maischen		
Malzschrotung	Pro Durchlauf	5
Maischen	2 Stunden	5.403
Abläutern		~20
Prozessschritt Würzbereitung		
Würzekochung	1 Stunde	3.318
Trubabscheidung	20 Minuten	220
Würzekühlung	90 Minuten	901
Prozessschritt Gärung		
Hefegabe	Einmalige Messung	20
Hauptgärung	7 Tage	~450.000
Lagerung und Reifung	14 Tage und 1 weitere Hopfengabe	~870.000
Prozessschritt Filtration, Stabilisierung und Abfüllung		
Filtration	1 Stunde	542
Stabilisierung	1 Stunde	63
Prozessschritt Sensorische Analyse		
Sehen		6
Riechen		2
Geschmack und Tasten		32
SUMME Gerstenanbau:		~42.115.372
SUMME Mälzen:		~3.492.228.532.040
SUMME Brauerei (Maischen, Würzbereitung, Gärung, Filtration, Stabilisierung, Abfüllung und Sensorische Analyse):		~1.330.532
SUMME DATENPUNKTE TOTAL:		~3.492.271.977.944

Tabelle 70: Annäherung an die Datenmenge eines theoretischen Datensatzes

Diese Berechnung entspricht einem theoretischem Wert, der aufgrund der Genauigkeit, wenig Sinn machen würde und in keiner Relation zu Kosten-Nutzen stehen würde. Eine realistische Größenordnung von Parametern liegt wahrscheinlich bei 10 - 50 Millionen Parametern.

6.2.2 Entwicklung einer künstlichen Intelligenz für die Bierproduktion

Um Deep Learning zu nutzen sind folgende vereinfachte Schritte notwendig (IBM, 2025):

1. **Daten sammeln**, siehe Kapitel 5 *Fallbeispiele der Digitalisierung in den einzelnen Prozessschritten*.
2. **Daten vorbereiten**, siehe Abschnitt 6.1 *Vorbereitung der Daten für künstliche Intelligenz*.
3. **Netzwerkstruktur entwerfen**. Dabei werden die Schichten und die Anzahl der Neuronen in jeder Schicht definiert. Im Falle des beschriebenen Bierproduktionsprozesses ergeben sich die Schichten aufgrund der beschriebenen Prozessreihenfolge. In den Schichten befinden sich Knoten, die sogenannten Neuronen. Jeder Knoten ist mit anderen Knoten verbunden und verfügt über eine bestimmte Gewichtung und einen Schwellenwert. Wenn der Output eines einzelnen Knotens über dem angegebenen Schwellenwert liegt, wird dieser Knoten aktiviert und sendet Daten an die nächste Schicht des Netzes. Andernfalls werden keine Daten an die nächste Schicht des Netzes weitergegeben.
Typischerweise nutzt ein Data Scientist die Daten, um die Netzwerkstruktur zu entwerfen.
4. **Implementieren des Modells**. Dabei wird mit Deep-Learning-Bibliotheken, Softwareprogrammen, das vorher entworfene neuronale Netz implementiert. Typische Deep-Learning-Bibliotheken sind PyTorch (Linux Foundation, 2025) oder TensorFlow (TensorFlow, 2025).
5. **Modell trainieren**. Mittels Trainingsdaten lernt das in Punkt 4 erstellte Neuronale Netz. Die Trainingsdaten sind die im Abschnitt 6.1 *Vorbereitung der Daten für künstliche Intelligenz* erstellten Daten.
6. **Modell evaluieren**. Nach dem das Modell trainiert wurde, kann es evaluiert werden. Dabei werden verschiedene mathematische Werte evaluiert und mit der Realität verglichen. Sollten die Werte große Unterschiede zwischen Realität und Ergebnisse aufweisen, ist das Modell zu optimieren, und weiter zu trainieren.
7. **Modell einsetzen**. Nach einer erfolgreichen Evaluierung, Punkt 6, kann das Modell gespeichert und für die weitere Verwendung genutzt werden.

6.3 Was kann die künstliche Intelligenz vorhersagen?

Ein Grundsatz ist, je mehr Datensätze verfügbar sind, umso genauer kann das Modell trainiert werden.

Das mittels Deep Learning in Abschnitt 6.2 *Entwicklung einer künstlichen Intelligenz mittels Deep Learning* erstellte Modell kann Voraussagen treffen.

- Ergibt die Umsetzung der Voraussagen das gewünschte Ergebnis, ist die Präzision und Genauigkeit der Aussage gut.
- Ergibt die Umsetzung der Voraussagen ein nicht ausreichendes Ergebnis, ist die Präzision und Genauigkeit nicht ausreichend und das Modell ist in dem entsprechenden Bereich zu optimieren.

Ein Beispiel für ein nicht ausreichendes Ergebnis wäre, wenn beim Brauen eines deutschen Pils das Pilsner Malz ausgegangen ist. Das Modell muss das Rezept abändern, sodass an Stelle des Pilsner Malzes ein Wiener Malz verwendet werden kann. Die Änderungen des Rezepts können nur dann ein gewünschtes Ergebnis liefern, wenn ausreichend Datenpunkte für deutsche Pilsse und Wiener Malze vorhanden sind. Dabei müssen deutsche Pils und Wiener Malz nicht im selben Rezept vorhanden sein.

Ausgehend eines vollständigen Modells, einer digitalen Überwachung und Steuerung des Brauprozesses wie im Kapitel 5 beschrieben, sind folgende Voraussagen möglich:

- Eine ungewollte Veränderung eines Parameters kann mittels Voraussagen des Modells behoben werden, solange diese Voraussagen physikalisch, biochemisch und zeitlich umsetzbar sind.
Beispielsweise hat die Gerste beim Mälzen normalerweise einen Friabilimeterwert von 80% Mürbigkeit. Bei diesem Sud beträgt die Mürbigkeit jedoch nur 75%. Das Modell kann daraufhin vorhersagen, dass beim Maischen eine höhere Temperatur, ein niedrigerer pH-Wert und eine längere Dauer notwendig sind.
- Bei mehreren unerwünschten Veränderungen in verschiedenen Parametern eines Suds kann das Modell Vorhersagen treffen, um die Rezeptur kontinuierlich an die Veränderungen anzupassen und dennoch das gewünschte Endergebnis zu erzielen. Auch in diesem Fall sind die physikalischen, biochemischen und zeitlichen Grenzen gegeben.
- Das Modell sollte eine kontrollierte Veränderung in allen Prozessschritten der Bierproduktion vorhersagen können. D.h. basierend auf einer sensorischen Beschreibung oder Veränderung, sollte das Modell in der Lage sein, das Rezept und die Prozessschritte der Bierproduktion entsprechend zu verändern.
Beispielsweise ist das Trumer Pils mit etwas Trübung und Mango im Bouquet gewünscht. Das Modell sollte in der Lage sein, dass bestehende Rezept mit einer weiteren Hopfengabe (Kalthopfung) und dem Auslassen der Filterung die gewünschten Ergebnisse vorherzusagen und mittels Überwachung und Steuerung des Brauprozesses umzusetzen.

6.3.1 Einschränkungen des Modells

Alle Vorhersagen sind beschränkt durch folgende Begrenzungen

- Physikalisch – der Druck während der Gärung und Lagerung definiert den Kohlensäuregehalt. Ein zu hoher Druck kann nicht innerhalb weniger Sekunden abgebaut werden.
- Biochemisch – Enzyme haben unterschiedliche Temperatur- und pH-Wertbereiche. Es kann zu einem Zeitpunkt nur eine Temperatur und ein pH-Wert eingestellt werden, um einige Enzyme aktiv zu halten während andere inaktiv sind.
- Zeitlich – ein Fehler in der letzten Sekunde kann nicht mehr behoben werden. Die Keimung kann nicht auf 1-2 Tage reduziert werden.

7 Realisierbarkeit und Kostendarstellung

7.1 Realisierbarkeit

In diesem Abschnitt wird die Realisierbarkeit der Digitalisierung und Entwicklung der künstlichen Intelligenz pro Prozessschritt erläutert. Realisierbarkeit bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Möglichkeit der Umsetzung oder Durchführung dieses Prozessschritts.

7.1.1 Realisierbarkeit der digitale Parametererfassung

Nachfolgend wird die Digitale Erfassung der Parameter auf Realisierbarkeit überprüft:

7.1.1.1 Realisierbarkeit des Prozessschritts Getreideanbau und -ernte

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Ausgesäte Gerstensorte	Manuelle Eingabe / Einkaufsbezeichnung	100%
GPS-Daten pro Quadratmeter der Aussaat	GPS-Datenlogger (Wintersteiger „Geo-Link“)	100%
Datum- und Zeitstempel	GPS-Datenlogger (Wintersteiger „Geo-Link“)	100%
Sommer- / Wintergerste	Manuelle Eingabe / Einkaufsbezeichnung	100%
Felddauer	Manuelle Eingabe / GPS-Datenlogger der Aussaat	100%
Bodentypen	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Ausgangsmaterial	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Gründigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Durchlässigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Humusform	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Bodenarten	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Horizonte	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Humusgehalt	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Kalkgehalt	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Bodenverdichtung	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix) / Pneumatische Sensoren	100%
Vertikale Bioporen	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Wasserleitfähigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Bodenfeuchtigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
pH-Wert des Substrats	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Salzgehalt	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Macronährstoff Stickstoff	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Macronährstoff Phosphor	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Macronährstoff Kalium	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Macronährstoff Magnesium	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Micronährstoff Eisen	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Micronährstoff Mangan	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Micronährstoff Kupfer	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Micronährstoff Zink	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Micronährstoff Bor	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Micronährstoff Chlorid	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	100%
Bodentemperatur	Digitale Wetterstation (Cordulus)	100%

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Niederschlag	Digitale Wetterstation (Cordulus)	100%
Windgeschwindigkeit	Digitale Wetterstation (Cordulus)	100%
Lufttemperatur	Digitale Wetterstation (Cordulus)	100%
Luftfeuchtigkeit	Digitale Wetterstation (Cordulus)	100%
Luftdruck	Digitale Wetterstation (Cordulus)	100%
Aussaatmenge	Digitale Waage	100%
Aussaattiefe	Sämaschinen-datenlogger	100%
Gerste wiederholt angebaut	Manuell / Felddatenerfassung	100%
Letzte Vorfrucht passend	Manuell / Felddatenerfassung	100%
Gerstenspezifische Vorfrüchte	Abrufbar von Landwirtschaftskammern	100%
Entwicklungsstadien	Manuell / Farmonaut	100%
Wuchshöhe	Manuell / Farmonaut	100%
Lagerung/Feuchtigkeitsgehalt der Frucht	Manuell / Farmonaut	100%
Halmknicken	Manuell / Farmonaut	100%
Ährenknicken	Manuell / Farmonaut	100%
Mehltau	Manuell / Farmonaut	100%
Zwergrost	Manuell / Farmonaut	100%
Netzflecken	Manuell / Farmonaut	100%
Kornertrag	Manuell / Farmonaut	100%
N-Effizienz	Manuell / Farmonaut	100%
Feuchtigkeitsgehalt bei der Ernte	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	100%
Marktwarenanteil	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	100%
Tausendkorngewicht	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	100%
Hektolitergewicht	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	100%
Rohproteingehalt	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	100%

Tabelle 71: Realisierbarkeit im Prozessschritt Getreideanbau und -ernte

7.1.1.2 Realisierbarkeit des Prozessschritts Mälzen

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Rohproteingehalt im Malz	Kjeldahl-Kolben/Dumas-Methode / Infrarotspektroskopie (HR2-Spektrometer)	100%
Löslicher Stickstoff	Kjeldahl-Kolben/Dumas-Methode / Infrarotspektroskopie (HR2-Spektrometer)	100%
Kolbachzahl	Kjeldahl-Kolben/Dumas-Methode / Infrarotspektroskopie	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
	(HR2-Spektrometer)	
Friabilimeter	Mechanischer Abriebtest	100%
Beta-Glucangehalt	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	100%
Viskosität	Viskosimeter	100%
Diastatische Kraft	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	100%
Würzefarbe	Spektralphotometer	100%
Dimethylsulfid (DMS/DMS-P)	Gaschromatograph mit Flammenionisationsdetektor (GC/FID)	100%
Vollgehaltsbestimmung	Nah-Infrarot-Reflexions-Spektroskopie (NIRS)	100%
Keimenergie	Nah-Infrarot-Reflexions-Spektroskopie (NIRS)	100%
Sortenreinheit	DNA-Analyse	100%
Lagertemperatur	Digitaler Thermometer (Netvox R718A Temperatur Sensor)	100%
Lagerdauer	Manuell	100%
Wassergehalt der Gerste	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	100%
Wassertemperatur	Digitaler Thermometer (Netvox R718A Temperatur Sensor)	100%
Trinkwasserqualität	Total Dissolved Solids (TDS) (WaterTDS Inc. TDSBot)	100%
pH-Wert	pH-Wert Messgerät	100%
Lufttemperatur	Digitaler Thermometer (Netvox R718A Temperatur Sensor)	100%
Weichguttemperatur	Infrarot-Thermometer (uwe electronic Infrarot- Temperatursensor)	100%
Weichschema	Datenlogger der Pumpensteuerung	100%
CO ₂ -Gehalt	CO ₂ -Infrarot-Sensoren (Vaisalla CARBOCAP Sensoren)	100%
Sauerstoff-Gehalt	Sauerstoff-Sensoren (PST Sauerstoff-Sensor-Gas- Kompatibilität)	100%
Alpha-Amylase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Beta-Amylase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Maltase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Grenzdextrinase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Saccharase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Alpha-Glucane	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Maltose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
	(Agilent Infinity Lab Infinity III)	
Grenzdextrine	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Glucose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Maltotriose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Fructose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Endopeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Carboxypeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Aminopeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Dipeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Proteine	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Peptide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Aminosäuren	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Dipeptide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Beta-Glucan-Solubilase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Endo-1,3-Beta-Glucanase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Endo-1,4-Beta-Glycanase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Exo-Beta-Glucanase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Unlösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Lösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Niedermolekulares Beta-Glucan	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Cellobiose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Laminaribiose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Lipase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Lipoxygenase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Polyphenoloxydase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
	(Agilent Infinity Lab Infinity III)	
Phosphatase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Lipide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Oxi-Lipide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Glycerin	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Freie, langkettige Fettsäuren	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Fettsäurehydroperoxide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Polyphenole	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Oxidierete Polyphenole	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Organisch, gebundenes Phosphat	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Anorganisches Phosphat	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	100%
Melanoidine	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	100%
Malzfarbe	Spektralphotometer für Transmissions- und Reflexionsgrad (Tintometer Lovibond)	100%

Tabelle 72: Realisierbarkeit im Prozessschritt Mälzen

7.1.1.3 Realisierbarkeit des Prozessschritts Maischen

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Grober Grieß und Schrott >1000µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	100%
Grober Grieß 600µ -1000µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	100%
Grober Dunst 280µ-600µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	100%
Dunst zwischen 140µ-280µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	100%
Mehl unter 140µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	100%
Maischtemperatur	Digitaler Thermometer (Netvox R718A Temperatur Sensor)	100%
Maischedauer	Digitaler Zeiterfassung	100%
pH-Wert	pH-Wert Messgerät	100%
Trinkwasserqualität	Total Dissolved Solids (TDS) (WaterTDS Inc. TDSBot)	100%
Würzefarbe	Spektralphotometer für Transmissions- und Reflexionsgrad (Tintometer Lovibond)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Karbonhärte	Wasser-Analysegeräte (SYCON 2602 von Ampha-Analyse)	100%
Nichtkarbonhärte	Wasser-Analysegeräte (SYCON 2602 von Ampha-Analyse)	100%
Gesamthärte	Wasser-Analysegeräte (SYCON 2602 von Ampha-Analyse)	100%
Konzentration der Maische	Digitale Waage für Malz & Durchflusssensor für Wasser (SFAW von Festo)	100%
Malztyp	DNA-Analyse / Einkaufsinformationen	100%
Malzmenge	Digitale Waage	100%
Extraktgehalt	Refraktometer (iPR FS von Schmidt Haensch)	100%

Tabelle 73: Realisierbarkeit des Prozessschritts Maischen

7.1.1.4 Realisierbarkeit des Prozessschritts Würzbereitung

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Trübung	Trübungsmessgeräte (TURBISmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	100%
Dichte der Würze	Dichte-Durchflussmessgerät (Proline Promass Q 300 von Endress+Hauser)	100%
Freie Aminosäuren (FAN)	UV-VIS-Spektralphotometer (DR6000 von Hach)	100%
Elektrische Leitfähigkeit	Leitfähigkeitsmessgerät (Liquitrend QMW43 von Endress+Hauser)	100%
Zeitpunkt der Hopfengabe	Digitales Zeitmessgerät	100%
Menge des Hopfens	Digitale Waage	100%
Hopfensorte	Einkaufsinformation	100%
Bittereinheiten - International Bitter Units (IBU)	UV-VIS-Spektrophotometer (Agilent Technologies Cary 7000 UV-VIS- NIR Spectrophotometer)	100%
Alpha-Säuren	Konduktometrischer Titration (OMNIS Titrator von Metrohm) UV-VIS-Spektrophotometer (Agilent Technologies Cary 7000 UV-VIS- NIR Spectrophotometer)	100%
Beta-Säuren	Hochleistungsflüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Polyphenol	Gaschromatographie- Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Ölgehalt	Wasserdampfdestillationsgerät (Wasserdampfdestillationsgerät von De Dietrich Process Systems)	100%
Myrcene	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Caryphyllene	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Farnese	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Linalool	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Geraniol	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Humulene	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Ketone	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Isobutyrate	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Thiolen	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	100%
Terpene	Gaschromatographie- Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	100%
Aldehyde	Gaschromatographie- Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	100%
Ketone	Gaschromatographie- Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	100%
Ester	Gaschromatographie- Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	100%
Phenole	Gaschromatographie- Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	100%
Lactone	Gaschromatographie- Massenspektrometrie (GC-MS)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
	(Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	
Eintrittsgeschwindigkeit	Durchflussmeter (Magnetisch-induktive Durchflussmeter von Schmachtl)	100%
Tangentialer Würzeinlauf	Fix verbaut im Whirlpool	100%
Whirlpoolrast	Digitale Zeitmesser	100%
Temperatur der Würze	Digitaler Wasserthermometer	100%
Dauer der Würzekühlung	Digitale Zeitmesser	100%
Menge des Sauerstoffs	Sauerstoffsonden (OXYPro PreSens)	100%

Tabelle 74: Realisierbarkeit des Prozessschritts Würzebereitung

7.1.1.5 Realisierbarkeit des Prozessschritts Gärung

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Zeitpunkt der Hefegabe	Digitaler Zeitmesser	100%
Hefetemperatur	Digitaler Thermometer	100%
Menge der Anstellhefe	Füllstandsensor (NivoRadar NR 8000 von UWT)	100%
Hefetyp	Einkaufsinformation / DNA-Analyse	100%
Bierstil	Einkaufsinformation / DNA-Analyse	100%
Name der Hefe	Einkaufsinformation	100%
Temperatur Optimum	Einkaufsinformation	100%
Endvergärungsgrad	Einkaufsinformation	100%
Gärkraft („Hefevitalität“)	Gärkraft Analysegerät (CDR BeerLab)	100%
Sedimentation	Einkaufsinformation / Trübungsmessgerät (TURBIsmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	100%
Alkohol-Toleranz	Einkaufsinformation	100%
Viabilität	Durchflusszytometrie (ThermoFischer Attune NxT Flow Cytometer) (ThermoFischer Scientific, 2025)	100%
Dauer der Gärung	Digitaler Zeitmesser	100%
Temperatur des Jungbieres	Digitaler Thermometer	100%
Druck im Gärtank	Drucksensor (VEGABAR 38 von Vega)	100%
CO ₂ -Gehalt im Jungbier	Digitaler Aphrometer (Pin Afrometer von Exactalab)	100%
Gärbilder	Digitale Fotos und Computer Vision	100%
Glucose	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Aktivität des Enzyms Hexokinase	Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography (RP-HPLC)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Glukose-6-phosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Phosphoglukoseisomerase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Fruktose-1,6-bisphosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Aldolase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Dihydroxyacetonphosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Glycerinaldehyd-3-phosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Enzym Triosephosphatisomerase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Enzym Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
1,3-Bisphosphoglycerat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Enzym Phosphoglyceratkinase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
3-Phosphoglycerat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Enzym Phosphoglyceratmutase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
2-Phosphoglycerat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
	(Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	
Enzym Enolase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Phosphoenolpyruvat (PEP)	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Enzym Pyruvatkinase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Pyruvat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Adenosintriphosphat (ATP)	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Enzym Pyruvatdecarboxylase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Acetaldehyd	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Enzym Alkoholdehydrogenase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%
Ethanol	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	100%

Tabelle 75: Realisierbarkeit des Prozessschritts Gärung

7.1.1.6 Realisierbarkeit des Prozessschritts Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Trübung	Trübungsmessgerät (TURBIsMART-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	100%
Filtrationsdruck	Digitaler Manometer (Absolutes Manometer DL 01 von BDSensors GmbH)	100%
Viskosität	Viscometer (Weighing RV-6M)	100%

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Temperatur der Flüssigkeiten	Digitaler Thermometer	100%
Filtermittel	Einkaufsinformation	100%
Menge des Filtermittels	Digitale Waage	100%
Filterhilfsmittel	Einkaufsinformation	100%
Menge des Filterhilfsmittels	Digitale Waage	100%
CO ₂ -Gehalt im Bier	Digitaler Aphrometer (Pin Afrometer von Exactalab)	100%
O ₂ -Gehalt im Bier	Optischer Sensor für gelösten Sauerstoff (DO Sensor InPro6960i/12/120)	100%
Eiweißgehalt	Kjehldahl-Analyzer (Fully-Automatic Kjehldahl Analyzer LKA-C10 von Labtron)	100%
Ausstoßvergärungsgrad	Berechnung mittels Extraktgehalt und Endvergärungsgrad	100%
Pasteurisationstemperatur	Digitaler Thermometer auf der Pasteurierungsanlage	100%
Pasteurisationsdauer	Digitaler Zeitmesser	100%
Trübung	Trübungsmessgerät (TURBlsmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	100%

Tabelle 76: Realisierbarkeit des Prozessschritts Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

7.1.1.7 Realisierbarkeit des Prozessschritts Sensorische Analyse

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Glas	Definierte Glasform / Einkaufsinformation	100%
Farbe	Objektive, sensorische Analyse	100%
Karbonisierung	Objektive, sensorische Analyse	100%
Schaum	Objektive, sensorische Analyse	100%
Farbe des Schaums	Objektive, sensorische Analyse	100%
Trübung	Objektive, sensorische Analyse	100%
Bouquet	Objektive, sensorische Analyse	100%
Aromatik	Objektive, sensorische Analyse	100%
Salzig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Bitter	Objektive, sensorische Analyse	100%
Süß	Objektive, sensorische Analyse	100%
Sauer	Objektive, sensorische Analyse	100%
Muffig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Schweflig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Brenzlig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Würzeartig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Rauchig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Röstaromatisch	Objektive, sensorische Analyse	100%
Karamellig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Malzig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Grasig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Nussig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Harzig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Hopfig	Objektive, sensorische Analyse	100%

Parameter	Technologie oder Methodik	Realisierbarkeit
Blumig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Fruchtig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Alkoholaromatisch	Objektive, sensorische Analyse	100%
Vollmundig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Wärmend	Objektive, sensorische Analyse	100%
Ölig	Objektive, sensorische Analyse	100%
Adstringent	Objektive, sensorische Analyse	100%
Belegend	Objektive, sensorische Analyse	100%
Viskosität	Objektive, sensorische Analyse	100%
Textur	Objektive, sensorische Analyse	100%
Temperatur	Objektive, sensorische Analyse	100%
Antrunk	Objektive, sensorische Analyse	100%
Rezenz	Objektive, sensorische Analyse	100%
Körper	Objektive, sensorische Analyse	100%
Finale	Objektive, sensorische Analyse	100%

Tabella 77: Realisierbarkeit des Prozessschritts Sensorische Analyse

7.1.1.8 Zusammenfassung über die Realisierbarkeit der untersuchten Prozessschritte

Alle Parameter können digital erfasst und gespeichert werden. In einigen Fällen müssen mehrere Geräte parallel arbeiten, um die Daten im Minutentakt zu erfassen. Die Daten selbst werden teilweise erst 2-3 Stunden nach der Probenerfassung speicherbar.

ANMERKUNG: Im Bereich Mälzen und Maischen ist eine korngenaue Datenerfassung heute nicht möglich. Nichtsdestotrotz können die Werte einzelner Körner, einer Probe, digital erfasst und gespeichert werden.

Damit ist die digitale Parametererfassung zu 100% möglich.

Die sensorische Analyse lässt sich realisieren, aber kann aufgrund der objektiven Betrachtung keinen durchgängig vergleichbaren Wert liefern. Um diese Möglichkeit zu schaffen, müsste ein geschulter Sensoriker in der gleichen Umgebung, mit den gleichen Utensilien und im immer gleichen Zustand die Verkostung durchführen und die Verkostungsbögen ausfüllen.

7.1.2 Realisierbarkeit der Entwicklung der künstlichen Intelligenz für den Bierproduktionsprozess

Die aktuell größte künstliche Intelligenz, bei der die Größenordnungen veröffentlicht wurden, ist das Generative Pre-trained Transformer 4, kurz GPT-4, Modell. Das Modell wurde von OpenAI ([OpenAI](#)) entwickelt und betrieben. Die bekannteste Benutzeranwendung ist ChatGPT4 ([ChatGPT](#)).

Aufgrund des theoretischen Ansatzes dieser Abschlussarbeit wird die Realisierbarkeit der künstlichen Intelligenz durch einen Vergleich mit GPT-4 geschätzt (Schreiner, 2023):

	GPT-4 Modell	Erstschätzung Modell Bierproduktion
Layers/Schichten	120	~30
Parameter	~1 Billion	~10 – 50 Millionen
Dataset (Tokens)	~13 Trillionen	~3,5 Milliarden
Computerkosten für das Training (1 Durchlauf)	\$63M	~ < \$100k

Tabella 78: GPT-4 Modell Kenngrößen

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Der Vergleich mit OpenAI's GPT-4 Modell ist als Beispiel angeführt. OpenAI's Eingaben sind die im Internet veröffentlichte Webseiten, Dokumente, Source Codes, Bilder und Videos. Die Eingaben für eine Künstliche Intelligenz der Bierproduktion würde strukturiertere Daten und damit leichter verarbeitbarere Daten liefern. Weitere technische Details für die Umsetzung und dem Training von neuronalen Netzen findet man auf der Homepage von OpenAI (Lilian Weng, 2022).

7.2 Kostendarstellung

In diesem Abschnitt wird versucht sich der Kostendarstellung für die digitale Erfassung und die Entwicklung einer künstlichen Intelligenz der Bierproduktion anzunähern.

7.2.1 Kosten der Digitalisierung der Parameter

Nachfolgend werden die Kosten kategorisiert in wenig, mittel, hoch und sehr hoch überprüft:

7.2.1.1 Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Getreideanbau und -ernte

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Ausgesäte Gerstensorte	Manuelle Eingabe / Einkaufsbezeichnung	1	Wenig
GPS-Daten pro Quadratmeter der Aussaat	GPS-Datenlogger (Wintersteiger „Geo-Link“)	1	Wenig
Datum- und Zeitstempel	GPS-Datenlogger (Wintersteiger „Geo-Link“)	1	Wenig
Sommer- / Wintergerste	Manuelle Eingabe / Einkaufsbezeichnung	1	Wenig
Felddauer	Manuelle Eingabe / GPS-Datenlogger der Aussaat	1	Wenig
Bodentypen	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Ausgangsmaterial	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Gründigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Durchlässigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Humusform	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Bodenarten	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Horizonte	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Humusgehalt	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Kalkgehalt	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Bodenverdichtung	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix) / Pneumatische Sensoren	1	Mittel
Vertikale Bioporen	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Wasserleitfähigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Bodenfeuchtigkeit	Bodenkarte.at / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
pH-Wert des Substrats	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Salzgehalt	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Macronährstoff Stickstoff	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Macronährstoff Phosphor	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Macronährstoff Kalium	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Macronährstoff Magnesium	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Micronährstoff Eisen	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Micronährstoff Mangan	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Micronährstoff Kupfer	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Micronährstoff Zink	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Micronährstoff Bor	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Micronährstoff Chlorid	Spatenprobe & Laboruntersuchung / Gammastrahlenmessung (SoilOptix)	1	Mittel
Bodentemperatur	Digitale Wetterstation (Cordulus)	1	Wenig
Niederschlag	Digitale Wetterstation (Cordulus)	1	Wenig
Windgeschwindigkeit	Digitale Wetterstation (Cordulus)	1	Wenig
Lufttemperatur	Digitale Wetterstation (Cordulus)	1	Wenig
Luftfeuchtigkeit	Digitale Wetterstation (Cordulus)	1	Wenig
Luftdruck	Digitale Wetterstation (Cordulus)	1	Wenig
Aussaatmenge	Digitale Waage	1	Wenig
Aussaattiefe	Sämaschinendatenlogger	1	Wenig
Gerste wiederholt angebaut	Manuell / Felddatenerfassung	1	Wenig
Letzte Vorfrucht passend	Manuell / Felddatenerfassung	1	Wenig
Gerstenspezifische Vorfrüchte	Abrufbar von Landwirtschaftskammern	1	Wenig
Entwicklungsstadien	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Wuchshöhe	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Lagerung/Feuchtigkeitsgehalt der Frucht	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Halmknicken	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Ährenknicken	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Mehltau	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Zwergrost	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Netzflecken	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Kornertrag	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
N-Effizienz	Manuell / Farmonaut	1	Mittel
Feuchtigkeitsgehalt bei der Ernte	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	1	Mittel
Marktwarenanteil	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	1	Mittel
Tausendkorngewicht	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	1	Mittel
Hektolitergewicht	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	1	Mittel
Rohproteingehalt	Manuell / Digitale Erntemaschinen (John Deere HarvestLab 3000)	1	Mittel

Tabelle 79: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Getreideanbau und -ernte

7.2.1.2 Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Mälzen

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Rohproteingehalt im Malz	Kjeldahl-Kolben/Dumas-Methode / Infrarotspektroskopie (HR2-Spektrometer)	1	Mittel
Löslicher Stickstoff	Kjeldahl-Kolben/Dumas-Methode / Infrarotspektroskopie (HR2-Spektrometer)	1	Mittel
Kolbachzahl	Kjeldahl-Kolben/Dumas-Methode / Infrarotspektroskopie (HR2-Spektrometer)	1	Mittel
Friabilimeter	Mechanischer Abriebtest	1	Wenig
Beta-Glucangehalt	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	1	Mittel
Viskosität	Viskosimeter	1	Mittel
Diastatische Kraft	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	1	Mittel
Würzefarbe	Spektralphotometer	1	Hoch
Dimethylsulfid (DMS/DMS-P)	Gaschromatograph mit Flammenionisationsdetektor (GC/FID)	1	Hoch
Vollgehaltsbestimmung	Nah-Infrarot-Reflexions-Spektroskopie (NIRS)	1	Hoch
Keimenergie	Nah-Infrarot-Reflexions-Spektroskopie (NIRS)	1	Hoch
Sortenreinheit	DNA-Analyse	1	Wenig
Lagertemperatur	Digitaler Thermometer (Netvox R718A Temperatur Sensor)	1	Wenig
Lagerdauer	Manuell	1	Wenig
Wassergehalt der Gerste	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	1	Mittel
Wassertemperatur	Digitaler Thermometer (Netvox R718A Temperatur Sensor)	1	Wenig
Trinkwasserqualität	Total Dissolved Solids (TDS) (WaterTDS Inc. TDSBot)	1	Wenig
pH-Wert	pH-Wert Messgerät	1	Mittel
Lufttemperatur	Digitaler Thermometer (Netvox R718A Temperatur Sensor)	1	Wenig
Weichguttemperatur	Infrarot-Thermometer (uwe electronic Infrarot- Temperatursensor)	1	Wenig
Weichschema	Datenlogger der Pumpensteuerung	1	Wenig
CO ₂ -Gehalt	CO ₂ -Infrarot-Sensoren (Vaisalla CARBOCAP Sensoren)	1	Mittel
Sauerstoff-Gehalt	Sauerstoff-Sensoren (PST Sauerstoff-Sensor-Gas- Kompatibilität)	1	Mittel
Alpha-Amylase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Beta-Amylase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Maltase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Grenzdextrinase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Saccharase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Alpha-Glucane	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Maltose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Grenzdextrine	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Glucose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Maltotriose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Fructose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Endopeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Carboxypeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Aminopeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Dipeptidase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Proteine	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Peptide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Aminosäuren	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Dipeptide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Beta-Glucan-Solubilase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Endo-1,3-Beta-Glucanase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Endo-1,4-Beta-Glycanase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Exo-Beta-Glucanase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Unlösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Lösliches, hochmolekulares Beta-Glucan	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Niedermolekulares Beta-Glucan	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Cellobiose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC)	30	Sehr Hoch

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
	(Agilent Infinity Lab Infinity III)		
Laminaribiose	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Lipase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Lipoxygenase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Polyphenoloxydase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Phosphatase	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Lipide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Oxi-Lipide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Glycerin	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Freie, langkettige Fettsäuren	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Fettsäurehydroperoxide	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Polyphenole	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Oxidierete Polyphenole	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Organisch, gebundenes Phosphat	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Anorganisches Phosphat	Flüssigkeitschromatograph (HPLC) (Agilent Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Melanoidine	Infrarotspektroskopie (OceanOptics HR2-Spektrometer)	1	Mittel
Malzfarbe	Spektralphotometer für Transmissions- und Reflexionsgrad (Tintometer Lovibond)	1	Mittel

Tabelle 80: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Mälzen

7.2.1.3 Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Maischen

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Grober Grieß und Schrott >1000µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	1	Hoch
Grober Grieß 600µ -1000µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	1	Hoch
Grober Dunst 280µ-600µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	1	Hoch
Dunst zwischen 140µ-280µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	1	Hoch
Mehl unter 140µ	Pfungstädter Plansichter (Plansichter Arenit, Bühler Group)	1	Hoch
Maischtemperatur	Digitaler Thermometer	1	Wenig

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
	(Netvox R718A Temperatur Sensor)		
Maischedauer	Digitaler Zeiterfassung	1	Wenig
pH-Wert	pH-Wert Messgerät	1	Wenig
Trinkwasserqualität	Total Dissolved Solids (TDS) (WaterTDS Inc. TDSBot)	1	Wenig
Würzefarbe	Spektralphotometer für Transmissions- und Reflexionsgrad (Tintometer Lovibond)	1	Mittel
Karbonhärte	Wasser-Analysegeräte (SYCON 2602 von Ampha-Analyse)	1	Mittel
Nichtkarbonhärte	Wasser-Analysegeräte (SYCON 2602 von Ampha-Analyse)	1	Mittel
Gesamthärte	Wasser-Analysegeräte (SYCON 2602 von Ampha-Analyse)	1	Mittel
Konzentration der Maische	Digitale Waage für Malz & Durchflusssensor für Wasser (SFAW von Festo)	1	Wenig
Malztyp	DNA-Analyse / Einkaufsinformationen	1	Wenig
Malzmenge	Digitale Waage	1	Wenig
Extraktgehalt	Refraktometer (iPR FS von Schmidt Haenisch)	1	Mittel

Tabelle 81: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Maischen

7.2.1.4 Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Würzebereitung

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Realisierbarkeit
Trübung	Trübungsmessgeräte (TURBIsmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	1	Hoch
Dichte der Würze	Dichte-Durchflussmessgerät (Proline Promass Q 300 von Endress+Hauser)	1	Hoch
Freie Aminosäuren (FAN)	UV-VIS-Spektralphotometer (DR6000 von Hach)	10	Hoch
Elektrische Leitfähigkeit	Leitfähigkeitsmessgerät (Liquitrend QMW43 von Endress+Hauser)	1	Wenig
Zeitpunkt der Hopfengabe	Digitales Zeitmessgerät	1	Wenig
Menge des Hopfens	Digitale Waage	1	Wenig
Hopfensorte	Einkaufsinformation	1	Wenig
Bittereinheiten - International Bitter Units (IBU)	UV-VIS-Spektrophotometer (Agilent Technologies Cary 7000 UV-VIS- NIR Spectrophotometer)	1	Sehr Hoch
Alpha-Säuren	Konduktometrischer Titration (OMNIS Titrator von Metrohm) UV-VIS-Spektrophotometer (Agilent Technologies Cary 7000 UV-VIS- NIR Spectrophotometer)	120	Sehr Hoch
Beta-Säuren	Hochleistungsflüssigkeitschromatograph (HPLC)	120	Sehr Hoch

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Realisierbarkeit
	(Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)		
Polyphenol	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	120	Sehr Hoch
Ölgehalt	Wasserdampfdestillationsgerät (Wasserdampfdestillationsgerät von De Dietrich Process Systems)	120	Sehr Hoch
Myrcene	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Caryphyllene	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Farnese	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Linalool	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Geraniol	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Humulene	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Ketone	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Isobutyrate	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Thiolen	Gaschromatographie (GC) (Agilent Technologies 8890 GC System)	120	Sehr Hoch
Terpene	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	120	Sehr Hoch
Aldehyde	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	120	Sehr Hoch
Ketone	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	120	Sehr Hoch
Ester	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	120	Sehr Hoch
Phenole	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS)	120	Sehr Hoch

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Realisierbarkeit
	(Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)		
Lactone	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) (Agilent Technologies 8890 GC System & LTM Series II Rapid Heating/Cooling for 7890/8890 GC)	120	Sehr Hoch
Eintrittsgeschwindigkeit	Durchflussmeter (Magnetisch-induktive Durchflussmeter von Schmachtl)	1	Mittel
Tangentialer Würzeinlauf	Fix verbaut im Whirlpool	1	Wenig
Whirlpoolrast	Digitale Zeitmesser	1	Wenig
Temperatur der Würze	Digitaler Wasserthermometer	1	Wenig
Dauer der Würzekühlung	Digitale Zeitmesser	1	Wenig
Menge des Sauerstoffs	Sauerstoffsonden (OXYPro PreSens)	1	Mittel

Tabelle 82: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Würzebereitung

7.2.1.5 Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Gärung

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Realisierbarkeit
Zeitpunkt der Hefegabe	Digitaler Zeitmesser	1	Wenig
Hefetemperatur	Digitaler Thermometer	1	Wenig
Menge der Anstellhefe	Füllstandsensoren (NivoRadar NR 8000 von UWT)	1	Wenig
Hefetyp	Einkaufsinformation / DNA-Analyse	1	Wenig
Bierstil	Einkaufsinformation / DNA-Analyse	1	Wenig
Name der Hefe	Einkaufsinformation	1	Wenig
Temperatur Optimum	Einkaufsinformation	1	Wenig
Endvergärungsgrad	Einkaufsinformation	1	Wenig
Gärkraft („Hefevitalität“)	Gärkraft Analysegerät (CDR BeerLab)	1	Mittel
Sedimentation	Einkaufsinformation / Trübungsmessgerät (TURBIsmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	1	Hoch
Alkohol-Toleranz	Einkaufsinformation	1	Wenig
Viabilität	Durchflusszytometrie (ThermoFischer Attune NxT Flow Cytometer) (ThermoFischer Scientific, 2025)	1	Hoch
Dauer der Gärung	Digitaler Zeitmesser	1	Wenig
Temperatur des Jungbieres	Digitaler Thermometer	1	Wenig
Druck im Gärtank	Drucksensoren (VEGABAR 38 von Vega)	1	Wenig
CO ₂ -Gehalt im Jungbier	Digitaler Aphrometer (Pin Afrometer von Exactlab)	1	Wenig
Gärbilder	Digitale Fotos und Computer Vision	1	Mittel

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Realisierbarkeit
Glucose	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Aktivität des Enzyms Hexokinase	Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography (RP-HPLC)	30	Sehr Hoch
Glukose-6-phosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Phosphoglukoseisomerase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Fruktose-1,6-bisphosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Aldolase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Dihydroxyacetonphosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Glycerinaldehyd-3-phosphat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Enzym Triosephosphatisomerase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Enzym Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
1,3-Bisphosphoglycerat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Enzym Phosphoglyceratkinase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
3-Phosphoglycerat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Realisierbarkeit
Enzym Phosphoglyceratmutase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
2-Phosphoglycerat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Enzym Enolase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Phosphoenolpyruvat (PEP)	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Enzym Pyruvatkinase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Pyruvat	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Adenosintriphosphat (ATP)	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Enzym Pyruvatdecarboxylase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Acetaldehyd	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Enzym Alkoholdehydrogenase	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch
Ethanol	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent Technologies Infinity Lab Infinity III)	30	Sehr Hoch

Tabelle 83: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Gärung

7.2.1.6 Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Realisierbarkeit
Trübung	Trübungsmessgerät (TURBISmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	1	Hoch
Filtrationsdruck	Digitaler Manometer (Absolutes Manometer DL 01 von BDSensors GmbH)	1	Wenig
Viskosität	Viscometer (Weighing RV-6M)	1	Mittel
Temperatur der Flüssigkeiten	Digitaler Thermometer	1	Wenig
Filtermittel	Einkaufsinformation	1	Wenig
Menge des Filtermittels	Digitale Waage	1	Wenig
Filterhilfsmittel	Einkaufsinformation	1	Wenig
Menge des Filterhilfsmittels	Digitale Waage	1	Wenig
CO ₂ -Gehalt im Bier	Digitaler Aphrometer (Pin Afrometer von Exactalab)	1	Wenig
O ₂ -Gehalt im Bier	Optischer Sensor für gelösten Sauerstoff (DO Sensor InPro6960i/12/120)	1	Wenig
Eiweißgehalt	Kjehldahl-Analyzer (Fully-Automatic Kjehldahl Analyzer LKA-C10 von Labtron)	8	Hoch
Ausstoßvergärungsgrad	Berechnung mittels Extraktgehalt und Endvergärungsgrad	1	Wenig
Pasteurisationstemperatur	Digitaler Thermometer auf der Pasteurierungsanlage	1	Wenig
Pasteurisationsdauer	Digitaler Zeitmesser	1	Wenig
Trübung	Trübungsmessgerät (TURBISmart-F von Chemtronic Waltemode GmbH)	1	Hoch

Tabelle 84: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Filtration, Stabilisierung und Abfüllung

7.2.1.7 Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Sensorische Analyse

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Glas	Definierte Glasform / Einkaufsinformation	1	Wenig
Farbe	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Karbonisierung	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Schaum	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Farbe des Schaums	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Trübung	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Bouquet	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Aromatik	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Salzig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Bitter	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Süß	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Sauer	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Muffig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Schweflig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Parameter	Technologie oder Methodik	Anzahl	Kostenkategorie
Brenzlig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Würzeartig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Rauchig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Röstaromatisch	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Karamellig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Malzig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Grasig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Nussig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Harzig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Hopfig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Blumig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Fruchtig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Alkoholaromatisch	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Vollmundig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Wärmend	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Ölig	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Adstringent	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Belegend	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Viskosität	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Textur	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Temperatur	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Antrunk	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Rezenz	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Körper	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig
Finale	Objektive, sensorische Analyse	1	Wenig

Tabelle 85: Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter des Prozessschritts Sensorische Analyse

7.2.1.8 Zusammenfassung der Kostendarstellung zur Digitalisierung der Parameter der untersuchten Prozessschritte

Bei der Kostendarstellung wird deutlich, dass in wenigen Schritten derzeit ausschließlich mit Labortechnik gearbeitet werden kann. Um die theoretische Parametergrößen zu erreichen müsste diese Labortechnik mehrfach bereitstehen, um die anfallenden Daten in Echtzeit zu entnehmen und zeitverzögert auszuwerten und zu speichern. Einige der teuersten und parallel zu verwendenden Laborgeräte kommen auf Preisen von \$150.000,- pro Stück.

7.2.2 Kosten der Entwicklung einer künstlichen Intelligenz für Bierproduktion

Ein Entwicklungsprojekt für ein Feld, eine Mälzereilinie und eine Braulinie würde sich wie folgt zusammensetzen (1. Schätzung):

Entwicklungsaufwand	Dauer	Kostenschätzung
Integration der Geräte	1,5 Jahre	Aufwand & Material: ~€3M ²
Implementierung „Big Data Architektur“	1 Jahr	Aufwand & Cloudkosten: ~€4M
Bereinigung der Daten	1 Jahr	Aufwand & Cloudkosten: ~€7M
Entwicklung Neuronales Netz	2 Jahre	Aufwand & Cloudkosten: ~€5M
Kosten Rechenleistung für Training des Neuronales Netzes	2 Jahre	Aufwand & Cloudkosten: ~€10M

Tabella 86: Initiale Kostenabschätzung für die Entwicklung einer Künstlichen Intelligenz für Bierproduktion

Bei der Schätzung wurden folgende Annahmen getroffen:

Entwicklungsaufwand	Annahmen
Integration der Geräte	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 200 Geräte sind zu integrieren • Ca. 50% der Geräte haben die Integration fertig • Pro Integration kommen ca. €30.000,-
Implementierung „Big Data Architektur“	<ul style="list-style-type: none"> • Ein Datenpunkt kann als Integer mit 4 Byte gespeichert werden • Geschätzter, vollständiger Datensatz hat 3.500.000.000.000 Datenpunkte • Ein geschätzter, vollständiger Datensatz entspricht ca. 12,7 Terabyte (TB) • 1000 vollständige Datensätze sind ca. 12,7 Petabyte (PB) • Monatliche Speicherkosten (03.2025): €250.000,- • Entwicklungskosten: €1M
Bereinigung der Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von automatisierter Datenbereinigung • Entwicklungskosten: €1M • Datenduplikation und Mehrfachspeicherung: 2-mal die Größe der Rohdaten: €6M
Entwicklung Neuronales Netz	<ul style="list-style-type: none"> • Data Science Entwicklungsaufwand: €2M • Rechenleistung für die Experimente: €3M
Kosten Rechenleistung für Training des Neuronales Netzes	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisierungsaufwand, um die Trainingsläufe zu ermöglichen: €2M • Vollständiges Training: €1M • Erfolgreicher Durchlauf des Trainings nach dem 8. Versuch: €1M x 8 Versuchen

Tabella 87: Annahmen zur ersten Kostenschätzung

Als nächster Evolutionsschritt wäre die Integration der Steuerung für die Mälzereinlinie und Braulinie möglich um bei entsprechender Überwachung durch die künstliche Intelligenz die Bierproduktion korrigieren bzw. optimieren zu können.

² M = Millionen

8 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Digitalisierung in der Landwirtschaft, speziell in der Präzisionslandwirtschaft, schon wesentlich weiter vorangeschritten ist als in der Mälzerei und der Brauerei. Die Messmechanismen für die Mälzerei und Brauerei sind wesentlich komplexer als in der Landwirtschaft und derzeit in erster Linie in der Labortechnik und nicht in der Industrie verwendbar.

Zahlreiche Technologien für eine effiziente Nutzung in der Brauindustrie sind noch nicht vorhanden. Eine korngenaue Messung ist ab der Mälzerei derzeit nicht mehr möglich und vielleicht auch nicht sinnvoll. Zahlreiche Messverfahren zerstören die Probe und können für eine flächendeckende Nutzung nicht eingesetzt werden.

Aufgrund des theoretischen Charakters dieser Abschlussarbeit können die in Kapitel 2 *Ausgangssituation und Hypothesen* nur theoretisch oder fiktiv beantwortet werden. Speziell die sensorische Analyse im Zusammenhang mit den analytischen Parametern der Brauerei ist hinsichtlich einer künstlichen Intelligenz für die Bierproduktion nur schwer abzuschätzen. Die Grenzen zwischen analytischen Werten der Brauerei und den sensorischen Analysen eines Sensorikers wurden mehrfach praktisch erprobt und konnten bisher keine 100% Übereinstimmung treffen. Meine persönliche Vermutung ist es, dass bisher die biochemischen Werte eines Bieres nicht granular genug erfasst werden konnten, um die wahrnehmbaren Grenzen (Schwellwerte) der menschlichen Rezeptoren exakt definieren zu können.

Hypothese 1: Die durchgängige, vollständige Kontrolle aller bekannten Parameter mit der heutigen Technologie kann die Qualität des Bieres in der Brauerei optimieren.

Es ist technisch möglich alle bekannten Parameter bis zu einer gewissen Granularität zu erfassen. Die vollständige und kontinuierliche Erfassung aller derzeit bekannten Parameter der Bierproduktion ist mit erheblichen Kosten verbunden. Aufgrund des höheren Detailgrades an Informationen für den Landwirt, Mälzer und Brauer ist es auf jeden Fall möglich eine höhere Qualität des Bieres zu erreichen und auf Dauer zu erhalten.

Hypothese 2: Das sensorische Gesamtbild und dessen Herstellung kann mit heutiger Technologie kontrolliert und überwacht werden.

Das sensorische Gesamtbild entwickelt sich erst sehr spät im Bierproduktionsprozess. Alle Werte bis zur Hauptgärung sind analytisch. Alle analytischen Werte können kontrolliert und etwaige Fehler identifiziert und behoben werden. Alle bisher bekannten analytischen Werte, die das sensorische Gesamtbild beeinflussen, können somit besser kontrolliert und überwacht werden. Die Grenze zwischen Bierproduktion und Sensoriker verschiebt sich weiter, wenn mehr Werte der sensorischen Analysen in die Optimierung der Bierproduktion auf Basis von analytischen Werten einfließen. Speziell die Entwicklung einer künstlichen Intelligenz für die Bierproduktion würde uns weiteres Wissen in diesem Bereich erarbeiten. Aufgrund des höheren Detailgrades an Informationen und der höheren Häufigkeit der Auswertung und Nutzung von sensorischen Analysen für weitere Sude ist diese Hypothese zutreffend.

ANMERKUNG: Sensorische Analysen werden vom Qualitätsmanager in jeder Brauerei durchgeführt. Sensorische Analysen von Bieren mit weiterer Reifung und Alterung werden derzeit nicht berücksichtigt.

Hypothese 3: Bei Veränderung der Zutaten oder des Prozesses kann das sensorische Gesamtbild des Bieres mit heutiger Technologie bewahrt werden.

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

Wie bereits in den vorhergehenden Hypothesen festgestellt, sind die analytischen Werte technisch sehr detailliert erfassbar. Jegliche Veränderung kann bei vollständigem Einsatz der Technologie analytisch adaptiert werden, wenn die Grenzen der Physik, der Biochemie und der Zeit nicht überschritten werden, siehe dazu Abschnitt 6.3.1 *Einschränkungen des Modells*. Wie in den vorhergehenden Hypothesen ist auch in diesem Fall die Grenze zwischen sensorischer Analyse und analytischen Werten nicht exakt. Das bedeutet, dass Hypothese 3 mit der heutigen Technologie das sensorische Gesamtbild besser bewahren kann, da detaillierterer Informationen und mehr gesammeltes Wissen vorliegen, während die analytischen Werte weiterhin eingehalten werden.

Hypothese 4: Mit dem entsprechenden Wissen über den Bierproduktionsprozess und der heutigen Technologie kann ein beliebiges Bier entworfen und hergestellt werden.

Mit dem richtigen Einsatz der heutigen Technologie, und der Nutzung einer künstlichen Intelligenz für die Bierproduktion, ist es möglich ein beliebiges Bier sensorisch zu beschreiben und ein sehr detailliertes Rezept zu erhalten, um das gewünschte Bier zu produzieren.

Um diese Hypothesen zu beweisen ist eine praktische Implementierung unabdingbar.

9 Literaturverzeichnis

- 42project. (18. 03 2019). *42project*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Fachbegriffe: Abtastrate (Sampling-Rate): <https://42project.net/fachbegriffe-abtastrate-sampling-rate/>
- AGES - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH. (20. 11 2024). *AGES - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH*. Abgerufen am 30. 12 2024 von Information zur Interpretation der Substratuntersuchungsergebnisse: <https://www.ages.at/download/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJpYXQiOiJlMk0NTkyMDAsImV4cCI6NDA3MDkwODgwMCwidXNlciI6MCwiZ3JvdXBzIjpbMCwtMV0slmZpbGUiOiJmaWxIYWRTaW4vQUdFU18yMDIyLzVfVU1XRUXUL0JvZGVuL0JvZGVudW50ZXJzdWNodW5nZW4vSW50ZXJwcmV0YXRpb25fd>
- Ages - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH. (2025). *Ages - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Information zur Interpretation der Substratuntersuchungsergebnisse: <https://www.ages.at/download/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJpYXQiOiJlMk0NTkyMDAsImV4cCI6NDA3MDkwODgwMCwidXNlciI6MCwiZ3JvdXBzIjpbMCwtMV0slmZpbGUiOiJmaWxIYWRTaW5cL0FHRVNFMjAyMlwwNV9VTVdFTFRcL0JvZGVuXC9Cb2RlbnVudGVyc3VjaHVuZ2VuXC9JbnRlcnByZXRhd>
- Agilent Infinity Lab. (2025). *Agilent Infinity Lab*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Say Hello to the HPLC made for tomorrow: <https://explore.agilent.com/hplc-made-for-tomorrow>
- Alexandre M.J.-C.Wadoux, B. M. (17. 9 2020). *ScienceDirect*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825220304050>
- Amazon Web Services. (27. 08 2024). *Amazon Web Services*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Overview of Amazon Web Services: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/aws-overview/introduction.html>
- Ampha-Analyse. (2025). *Ampha-Analyse*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Grenzwert Analysegerät SYCON 2602 - Gesamthärte oder Karbonathärte Grenzwertüberwachung: <https://www.ampha-analyse.de/Grenzwert-Analysengerat-SYCON-2602-Gesamthaerte-oder-Karbonathaerte-Grenzwertueberwachung/WA30-010160>
- Andrea Hornemann, B. K. (3. 12 2019). *Physikalisch-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Verfahren zur Quantifizierung von Melanoidinen in Lebensmitteln: https://www.ptb.de/cms/nc/en/ptb/fachabteilungen/abt7/archiv-7/single-view.html?tx_news_pi1%5Bnews%5D=9986&cHash=b187a167f18df5ae53f786ec996c1250
- Anton Paar. (2025). *Anton Paar*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Viskosimeter - Die erfolgreichsten Viskosimeter der Welt: <https://www.anton-paar.com/corpe/produkte/gruppe/viskosimeter/>
- Anton Paar. (2025). *Anton Paar*. Abgerufen am 8. 3 2025 von Tragbares Dichtemessgeräte: DMA 35: <https://www.anton-paar.com/at-de/produkte/details/dma-35/>

- Arbelaez, P. (2025). *Berkeley - University of California - Computer Vision Group*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Reorganization: Grouping, Contour Detection, Segmentation, Ecological Statistics: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/>
- Ascher, T. (24. 7 2022). *Brau Campus Graz*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Es wird bunt: Bierfarbe aus Schüttung berechnen: <https://www.braucampus.at/site/es-wird-bunt-bierfarbe-aus-schuetting-berechnen/>
- August Bruckner, J. M. (11. 12 2023). *NutriNet*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Die Nährstoffsituation erfassen: https://www.nutrinet.agrarpraxisforschung.de/fileadmin/daten/pdf/Publikationen/Merkblatt_Boden-und_Pflanzenanalysen.pdf
- Austrian Standards International. (15. 03 2016). *Austrian Standards*. Abgerufen am 31. 12 2024 von ÖNORM L 1050 Boden als Pflanzenstandort- Begriffe und Untersuchungsverfahren: <https://www.austrian-standards.at/de/shop/onorm-l-1050-2016-03-15~p2192335>
- BarthHaas GmbH & Co. KG. (2025). *BarthHaas GmbH & Co. KG*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Columbus: <https://www.barthhaas.com/de/hopfen-und-produkte/hopfensorte/columbus>
- Bayer Austria. (2001). *Landwirtschaftskammer Oberösterreich*. Abgerufen am 1. 1 2025 von Entwicklungsstadien des Getreides: <https://ooe.lko.at/media.php?filename=download%3D%2F2021.04.15%2F1618473075372578.pdf&rn=Entwicklungsstadien%20Getreide.pdf>
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2025). *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Die Bedeutung und Analytik der Hopfeninhaltsstoffe: <https://www.lfl.bayern.de/ipz/hopfen/154307/index.php>
- Bellassai, D. S. (8. 3 2019). *CDR BeerLab*. Abgerufen am 1. 2 2025 von Die Entwicklung des Zuckergehalts und der Dichte der Würze während der Biergärung: <https://www.cdrfoodlab.de/cdrbeerlab/zusatzliche-details/zuckergehalt-dichte-biergaerung>
- Bernard Jeangros, N. C. (8. 7 2019). *Eidgenössisches Department für Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Optimale Fruchtfolgen im Feldbau: https://www.agrarforschungschweiz.ch/wp-content/uploads/2019/12/2019_0708_2488.pdf
- Berthold Technologiees GmbH & Co.KG. (2025). *Berthold Technologiees GmbH & Co.KG*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Zuverlässige Quantifizierung von DNA, RNA und Proteinen in weniger als 3 Sekunden: <https://www.berthold.com/de/bioanalytik/produkte/mikrovolumenspektrophotometer/colibri-lb916/>
- Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97. (22. 4 2011). *Bierbrauerei.net*. Abgerufen am 5. 1 2025 von Fachkunde II - Das Malz - Unterlagen der Berufsschule für Brauer und Mälzer, Ferdinand-von-Steinbeis Schule Ulm 1994-97: http://www.bierbrauerei.net/Technikum/bierbrauerei-net_bierbereitung_II_-_malz.pdf
- Bier Akademie Bayern. (2025). *Bier Akademie Bayern*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Die Härte des Brauwassers: <https://www.bierakademie.bayern/bedeutung-fuer-die-qualitaet/>
- Bier Akademie Bayern. (2025). *Bier Akademie Bayern*. Abgerufen am 12. 1 2025 von Trubabscheidung: <https://www.bierakademie.bayern/trubabscheidung/>

- Bier, B. (2014). *Youtube*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Keimendes Gerstenkorn Animation f4v:
<https://www.youtube.com/watch?v=0cs5xcAeDCo>
- Bierland Österreich. (2025). *Bierland Österreich*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Der Malzvorgang:
<https://bierland-oesterreich.at/unser-bier/bierherstellung/470-der-malzvorgang.html>
- Bioanalytics GmbH. (kein Datum). *Bioanalytics GmbH*. Abgerufen am 12. 1 2025 von Produktionsinformation Trübungsstandards: <https://www.bioanalytic.de/document/turbidity-standards/de/bioPIN%20Turbidity%20Standards%20-%20bioanalytic%20%28de%29.pdf>
- Biochemisches Institut der Universität Zürich. (25. 8 2005). *Biochemisches Institut der Universität Zürich*. Abgerufen am 1. 2 2025 von Glykolyse und alkoholische Gärung:
https://www.biochem.ch/Bipweb_all/bipweb/lexikon/pfade/glykolyse/glykolyse.html
- BOKU - Universität für Bodenkultur Wien. (2024). *BOKU - Universität für Bodenkultur Wien - Department of Crop Sciences - Institute of Plant Breeding*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Züchtung auf Qualitätseigenschaften:
http://plantbreeding.boku.ac.at/957308/Qual_op_1.htm
- Bosch. (2024). *Bosch*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichte der künstlichen Intelligenz:
<https://www.bosch.com/de/stories/geschichte-der-kuenstlichen-intelligenz/>
- Bossen, K. (16. 06 2021). *DM EXCO 25*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Bierbrauen 4.0: Digitalisierung der Braubranche: <https://dmexco.com/de/stories/bierbrauen-4-0/>
- Brau Union Österreich AG. (24. 06 2024). *Brau Union Österreich AG*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Künstliche Intelligenz in der Bierbrauerei: Zukunft der Braukunst:
<https://www.brauunion.at/blog/2024/06/24/kunstliche-intelligenz-in-der-bierbrauerei/>
- Brauer-Berufsschule Ulm. (1993). *Brauer-Berufsschule Ulm (1994-1997)*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Fachkunde III - Die Würze: http://www.bierbrauerei.net/Technikum/bierbrauerei-net_bierbereitung_III_-_wuerze.pdf
- Braun, T. (02 2010). *Universität Bern - Institut für Informatik*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichte und Entwicklung des Internets:
https://home.inf.unibe.ch/~rvs/research/pub_files/Br10a.pdf
- Bühler Group. (2025). *Bühler Group*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Hochleistungsmaschinen zum Sichten und Sortieren: <https://www.buhlergroup.com/global/de/product-families/Plansifters.html>
- Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES. (2024). *Bundesamt für Ernährungssicherheit BAES*. Abgerufen am 31. 12 2024 von Sommergerste:
<https://bsl.baes.gv.at/kulturen/getreide/sommergerste>
- Bundesforschungszentrum für Wald. (2024). *Bundesforschungszentrum für Wald*. Abgerufen am 31. 12 2024 von Kleines Bodenseminar: <https://geo.bfw.ac.at/bodenseminar/bodentyp.html>
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. (11. 1 2024). *Bundesinformationszentrum Landwirtschaft*. Abgerufen am 31. 12 2024 von Die Fruchtfolge in der Landwirtschaft: <https://www.landwirtschaft.de/tier-und-pflanze/pflanze/nutzpflanzen-allgemein/die-fruchtfolge-in-der-landwirtschaft>

- C.P. Thacker, E. M. (07. 08 1979). *Universität Stuttgart*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Alto: A personal computer: http://bitsavers.informatik.uni-stuttgart.de/pdf/xerox/parc/techReports/CSL-79-11_Alto_A_Personal_Computer.pdf
- Carlsberg Group. (2019). *Carlsberg Group*. Abgerufen am 08. 12 2024 von What is a non-alcoholic beer made of?: <https://www.carlsberg.com/en-be/better-answers/what-is-non-alcoholic-beer-made-of/>
- Carmen. (25. 6 2024). *Beer of the Gods - Wackenbrauerei*. Abgerufen am 12. 1 2025 von Würzekochen: Wichtiger Schritt im Brauprozess: <https://www.wacken.beer/blog/wuerzekochen-wichtiger-schritt-im-brauprozess>
- Carnegie Mellon University. (06. 04 2023). *Carnegie Mellon University*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Decoding the Internet of Things: <https://csd.cmu.edu/news/decoding-the-internet-of-things>
- Carroll, J. (12. 12 2022). *Jim Carroll*. Abgerufen am 25. 12 2024 von 23 Trends for 2023: #8 - Knowledge Velocity: <https://jimcarroll.com/2022/12/23-trends-for-2023-8-knowledge-velocity/>
- CERN Accelerating Science. (2024). *CERN Accelerating Science*. Abgerufen am 07. 12 2024 von The birth of the Web: <https://home.web.cern.ch/science/computing/birth-web>
- Chai, W. (03 2023). *ComputerWeekly.de*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Definition Fuzzy Logic: <https://www.computerweekly.com/de/definition/Fuzzy-Logic>
- Chemtronic Waltemode GmbH. (2025). *Chemtronic Waltemode GmbH*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Inline Trübungsmessgerät Modell TURBIsmart-F: <https://www.chemtronic-gmbh.de/inline-truebungsmessung-modell-turbismart-f/>
- Christian Zscherp, A. B. (1. 11 2010). *Institut für Biophysik Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Analyse der Sekundärstruktur von Proteinen mittels Infrarotspektroskopie: http://www.biophys.uni-frankfurt.de/~wille/prakt/anleitungen/05_infrarot.pdf
- Climate FieldView. (2023). *Climate FieldView*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Mit jedem Mähdrescher Erträge kartieren: <https://www.climatefieldview.de/produkt/#ERNTE%20%26%20ANALYSE>
- Compassipedia. (2024). *Compassipedia - Das Internet-Kompassmuseum*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichte der Entwicklung des Kompasses: https://www.compassmuseum.com/diverstext/history_d.htm
- Cordulus. (2025). *Cordulus*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Landwirtschaftliche Wetterstation für die Präzisionslandwirtschaft: <https://www.cordulus.com/de/weather-station>
- Crux. (23. 6 2005). *Wikipedia*. Abgerufen am 1. 2 2025 von Alkoholische Gärung: https://de.wikipedia.org/wiki/Alkoholische_G%C3%A4rung
- De Dietrich Process Systems. (2025). *De Dietrich Process Systems*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Wasserdampfdistillation: <https://www.dedietrich.com/de/loesungen-produkte/pflanzenchemie/wasserdampfdistillation>
- Deußing, G. (2. 5 2022). *Labor Praxis*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Aromastoffe bestimmen: Vier Extraktionstechniken im Vergleich: <https://www.laborpraxis.vogel.de/aromastoffe-bestimmen-vier-extraktionstechniken-im-vergleich-a-a82e206bfa1bbbf335630bb2698c412/>

- Deutscher Brauer Bund e.V. (2024). *Deutscher Brauer Bund e.V.* Abgerufen am 07. 12 2024 von Unser Reinheitsgebot - weltbekannt und in aller Munde: <https://brauer-bund.de/reinheitsgebot>
- DirectIndustryConnect. (2025). *DirectIndustryConnect*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Absolutes Manometer DL 01: <https://www.directindustry.de/prod/bd-sensors-gmbh/product-14047-1629403.html>
- Doblmaier, P. (19. 08 2021). *Landwirtschaftskammer Oberösterreich*. Abgerufen am 30. 12 2024 von Wintergerste: <https://ooe.lko.at/bio-wintergerste-hordeum-vulgare+2400+3465674>
- Doblmaier, P. (20. 01 2022). *Landwirtschaftskammer Oberösterreich*. Abgerufen am 30. 12 2024 von Sommergerste: <https://ooe.lko.at/bio-sommergerste-hordeum-vulgare+2400+3413507>
- Dönges, J. (15. 02 2021). *Spektrum.de*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Älteste Großbrauerei der Welt in Ägypten: <https://www.spektrum.de/news/abydos-aelteste-grossbrauerei-der-welt-stand-in-aegypten/1835179>
- Dr. Dmitrij Frishman, D. K. (1. 8 1997). *Spektrum.de*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Das Hefegenom - von der Sequenz zur Funktion: <https://www.spektrum.de/magazin/das-hefegenom-von-der-sequenz-zur-funktion/824075>
- Dr. Michael Zepf, J. B. (2021). *Doemens E.V. - Diplom Biersommelier Begleitendes Schulungsmaterial* (1. Aufl.). München, Deutschland: Doemens E.V. Abgerufen am 1. 3 2025
- Dr. Nähring Water Treatment GmbH. (01. 08 2022). *Dr. Nähring Water Treatment GmbH*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichte der Umkehrosmose: <https://dr-naehring.com/geschichte-der-umkehrosmose/>
- Elizabeth Hawkins, J. F. (12. 1 2017). *Ohio State University Extension*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Using Soil Electrical Conductivity (EC) to Delineate Field Variation: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-565>
- Endress+Hauser Group Services AG. (2025). *Endress+Hauser Group Services AG*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Rpoline Promass Q 300: <https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/durchflussmessung-produktuebersicht/coriolis-durchflussmessgeraet-promass-q300-8q3b?t.tabId=product-overview>
- Endress+Hauser Group Services AG. (2025). *Endress+Hauser Group Services AG*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Flüssigkeitanalyse Physikalische Medieneigenschaften Liquitrend QMW43: <https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/fluessigkeitsanalyse-produktuebersicht/Konduktiv-Liquitrend-QMW43>
- ETHW. (24. 04 2012). *Engineering and Technology History WIKI*. Abgerufen am 07. 12 2024 von System of Measurement Units: https://ethw.org/System_of_Measurement_Units#History_of_the_International_Metric_System
- Exacta Labcenter SpA. (2025). *Exacta Labcenter SpA*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Aphrometers: <https://exactalabcenter.it/oenology/co2-aphrometers/aphrometers/?lang=en>
- Falkensteiner, a. B. (11. 4 2022). *Landwirtschaftskammer Oberösterreich*. Abgerufen am 1. 1 2025 von Bodenuntersuchung: Kompaktinfo: <https://ooe.lko.at/bodenuntersuchung-kompaktinfo+2400+3626861>

- Farmonaut. (30. 12 2024). *Farmonaut*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Zukunftsgerichtete Präzisionslandwirtschaft: Farmonaut revolutioniert Satellitenüberwachung und Bodengesundheitsanalyse für nachhaltiges Wachstum: <https://farmonaut.com/precision-farming/zukunftsgerichtete-prazisionslandwirtschaft-farmonaut-revolutioniert-satellitenuberwachung-und-bodengesundheitsanalyse-fur-nachhaltiges-wachstum/>
- Fermentis. (2025). *Fermentis*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Beer & Brewing Yeast: <https://fermentis.com/en/fermentation-solutions/beer/>
- Festo. (2025). *Festo*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Durchflusssensor SFAW: https://www.festo.com/at/de/p/durchflusssensor-id_SFAW/?q=%7E%3AsortByCoreRangeAndNewProduct
- Folnovic, T. (2024). *Agrivi*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Smart Sensors for Accurate Soil Measurements: <https://www.agrivi.com/blog/smart-sensors-for-accurate-soil-measurements/>
- FoodLab. (2025). *FoodLab*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Bestimmung der Hefevitalität: <https://www.cdrfoodlab.de/cdrbeerlab/analysen/hefektivitat-bier>
- Friedrich Tebrügge, J. A. (22. 02 1999). *agricultural-Engineering.eu*. Abgerufen am 30. 12 2024 von Bioporen fördern die Versickerung: <https://www.agricultural-engineering.eu/landtechnik/article/view/1999-54-1-013-015/1999-54-1-013-015-de-pdf>
- Frischknecht, K. (6. 12 2017). *Mug-Mikrobrauerei.ch*. Abgerufen am 20. 1 2025 von Hefequalität II: Bestimmung der Hefevitalität: https://www.mug-mikrobrauerei.ch/_files/ugd/72fd17_9479a83814934017a445a920ed33c3f0.pdf
- Gerhardt Analytical Systems. (2025). *Gerhardt Analytical Systems*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Die Dumas Methode zur Stickstoff- und Proteinbestimmung: <https://www.gerhardt.de/de/know-how/analytische-methoden/dumas-methode/>
- Gradplato.com. (2025). *Gradplato.com*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Bierwissen - Pfungstädter Plansichter: <https://gradplato.com/bierwissen/pfungstaedter-plansichter?rCH=2>
- Hach - Be Right. (2023). *Hach - Be Right*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Vereinfachung einer effizienten Gärung: <https://de.hach.com/asset-get.download.jsa?id=51143887660>
- Hammurabi, 6. K. (1750BC). *eHammurabi*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Law Code of Hammurabi: <https://ehammurabi.org/#intro>
- Hans-Dieter Belitz, W. G. (2008). *Lehrbuch der Lebensmittelchemie* (6. Ausg.). Springer Verlag. Abgerufen am 2. 1 2025 von <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-73202-0>
- Hansen, M. (2025). *IREKS GmbH*. Abgerufen am 8. 3 2025 von Getreidekompetenz: <https://www.ireks-malz.de/know-how/ireks-getreidekompetenz>
- IBM. (2025). *IBM*. Abgerufen am 1. 3 2025 von Was sind neuronale Netzwerke?: <https://www.ibm.com/de-de/topics/neural-networks>
- IoT-Shop. (2025). *IoT-Shop*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Netvox R718A Temperature and Humidity Sensor: <https://iot-shop.de/en/shop/nv-r718a-netvox-r718a-temperature-and-humidity-sensor-4212>

- John Deere. (2025). *John Deere*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Inhaltsstoffbestimmung von Getreide - HarvestLab: <https://www.deere.at/de/landtechnik/inhaltsstoffbestimmung-von-getreide/>
- John Vardalas, P. (01. 06 2012). *IEEE USA*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Your Engineering Heritage: Pulse Code Modulation: It all Started 75 Years Ago with Alec Reeves: <https://insight.ieeeusa.org/articles/your-engineering-heritage-pulse-code-modulation-it-all-started-75-years-ago-with-alec-reeves/>
- Jun Wang, V. P. (2012). *Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Entwicklung eines auf Mikrosatelliten basierenden Nachweissystems zur Differenzierung von Gerstensorten: https://raumberg-gumpenstein.at/forschung/infothek/downloads/download-file.html?path=Tagungen%2FSaatzuechtertagung%2FSaatzuechtertagung_2011%2F2s_2012_petersei_neu.pdf
- K. Rogos, M. A. (7. 6 2020). *Uni Bayreuth*. Abgerufen am 1. 2 2025 von Glykolyse: <https://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/glycolyse/Glykolyse.pdf>
- Karin H. J. Pepers, F. v. (16. 7 2024). *British Society of Soil Science*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Validation of a new gamma raqy soil bulk density sensor: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ejss.13542>
- Kiesbye, D.-B.-I. A. (2003). *Diplom Biersommelier Buch 2* (Bd. 2022). (J. Luckart, Hrsg.) Obertrum am See: Kiesbye Akademie.
- Kistler Group. (2024). *Kistler Group*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Analog-Digital-Wandler (Analog-Digital-Umsetzer ADU): <https://www.kistler.com/DE/de/analog-digital-wandler-analog-digital-umsetzer-adu-/C00000092>
- Klipfel Hefe AG. (2017). *Klipfel Hefe AG*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichte der Hefe: <https://www.klipfel.ch/Klipfel-Hefe-AG/Die-Hefe/Geschichte/>
- Kloiber, M. (13. 07 2021). *Deutschlandfunk*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geburtsstunde des Begriffs "künstliche Intelligenz": <https://www.deutschlandfunk.de/vor-65-jahren-die-dartmouth-konferenz-geburtsstunde-des-100.html>
- Krohne Messtechnik GmbH. (2025). *DirectIndustryConnect*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Magnetisch-induktiver Durchflussmesser OPTIFLUX 1300: <https://www.directindustry.de/prod/krohne-messtechnik-gmbh/product-5863-15106.html>
- Krüger, R. (2003). *Otto von Guericke Universität Magdeburg*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichte der Rechenmaschine: <https://www.math.uni-magdeburg.de/private/henning/rechenmaschinen.pdf>
- Kunze, W. (2023). *Technologie Brauer & Mälzer* (12. Aufl.). VLB Berlin. Von <https://www.vlb-berlin.org/news/Kunze-Neuaufgabe-erschienen> abgerufen
- Laborhelfer.de. (2025). *Laborhelfer.de*. Abgerufen am 6. 1 2025 von IR-Spektroskopie - Einführung & Auswertung: <https://laborhelfer.de/ir-spektroskopie>
- Labtron. (2025). *Labtron*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Kjeldahl Systems: <https://www.labtron.com/kjeldahl-systems>

- Labtron. (2025). *Labtron*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Fully-automatic Kjeldahl Analyzer LKA-C10: <https://www.labtron.com/kjeldahl-analyzer/lka-c10>
- Labworld. (2025). *Labworld*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Tintometer Lovibond Farbmessgeräte: <https://www.labworld.at/tintometer-lovibond-farbmessgeraete/>
- Lallemand Brewing. (2025). *Lallemand Brewing*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Brewing Yeast: <https://www.lallemandbrewing.com/en/united-states/products/brewing-yeast/?page=1>
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. (1. 2 2015). Abgerufen am 2. 1 2025 von Maximale Anbaukonzentration von Feldfruchtarten bzw. -gruppen, nach Zielen der nachhaltigen Pflanzenproduktion in %: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/fruchtfolge/tabellen-fruchtfolge-pdf.pdf>
- Leitgeb, D. E. (2000). *Bundesforschungszentrum für Wald*. Abgerufen am 31. 12 2024 von Bodenkunde für Ökologen: https://www.bfw.gv.at/wp-content/uploads/Vorlesung_Bodenkunde.pdf
- Leitner, E. (2010). *Technische Universität Graz*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Gaschromatographie in der Lebensmittelanalytik: https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=150199
- Lilian Weng, G. B. (9. 6 2022). *OpenAi.com*. Abgerufen am 2. 3 2025 von Techniques for training large neural networks: <https://openai.com/index/techniques-for-training-large-neural-networks/>
- Lilienthal, D. H. (5. 8 2019). *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft*. Abgerufen am 1. 1 2025 von Fernerkundungsinformationen zur Beobachtung landwirtschaftlich genutzter Böden in Deutschland: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/fernerkundung.html>
- Linux Foundation. (2025). *PyTorch.org*. Abgerufen am 1. 3 2025 von PyTorch.org: <https://pytorch.org/>
- Lohr, S. (01. 02 2013). *The New York Times*. Abgerufen am 07. 12 2024 von The Origins of "Big Data": An Etymological Detective Story: <https://archive.nytimes.com/bits.blogs.nytimes.com/2013/02/01/the-origins-of-big-data-an-etymological-detective-story/>
- Lucie M.J. Charmier, C. M. (9. 8 2021). *Wiley Online Library*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Diastatic power and maltose value: a method for the measurement of amylolytic enzymes in malt: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jib.665>
- Mashcamp.shop. (11 2023). *Mashcamp.shop*. Abgerufen am 20. 1 2025 von Sortimentsübersicht Hefe: <https://mashcamp.shop/wp-content/uploads/2023/11/Hefesortiment-MashCamp-Uebersichtsliste-2023.pdf>
- Matthieu. (20. 11 2019). *Harvard Digital Innovation and Transformation*. Abgerufen am 25. 12 2024 von IntelligentX: Changing the world, one beer at a time: <https://d3.harvard.edu/platform-digit/submission/intelligentx-changing-the-world-one-beer-at-a-time/>
- MEBAK- Mitteleuropäische Brautechnische Analysekommission e.V. (3 2016). *MEBAK- Mitteleuropäische Brautechnische Analysekommission e.V.* Abgerufen am 2. 1 2025 von R-

- 110.22.011 Sortierung von Gerste: <https://www.mebak.org/methode/r-110-22-011/sortierung-von-gerste/1931>
- Megazyme. (2025). *Megazyme*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Alpha-Amylase Assay Kit: <https://www.megazyme.com/Alpha-Amylase-Assay-Kit>
- Megazyme. (2025). *Megazyme*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Beta-Amylase Assay Kit (Betamyl-3): <https://www.megazyme.com/beta-amylase-assay-kit>
- Megazyme. (2025). *Megazyme*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Maltose/Sucrose/D-Glucose Assay Kit: <https://www.megazyme.com/maltose-sucrose-d-glucose-assay-kit>
- Megazyme. (2025). *Megazyme*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Digestible and Resistant Starch Assay Kit: <https://www.megazyme.com/digestible-and-resistant-starch-assay-kit>
- Megazyme. (2025). *Megazyme*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Sucrose/D-Fructose/D-Glucose Assay Kit: <https://www.megazyme.com/sucrose-fructose-d-glucose-assay-kit>
- Megazyme by Neogen. (2025). *Megazyme by Neogen*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Beta-Amylase Assay Kit (Betamyl-3): <https://www.megazyme.com/beta-amylase-assay-kit>
- Metrohm Inula GmbH. (2 2024). *Metrohm Inula GmbH*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Konduktometrische Titration zur Prüfung des Hopfens auf Alphasäuregehalt: https://www.metrohm.com/de_at/applications/application-notes/aa-t-001-100/an-t-154.html
- Mettler Toledo. (2025). *Mettler Toledo*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Spektralphotometer für UV/VIS-spektroskopische Arbeitsabläufe: https://www.mt.com/at/de/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/uv-vis-spectrometers/spectrophotometer.html
- Mettler Toledo. (2025). *Mettler Toledo*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Trübungsmessgeräte InPro 86x0ie für die Getränkeproduktion: <https://www.mt.com/at/de/home/products/Process-Analytics/turbidity-meter/inpro8600i-color-and-turbidity-sensors.html>
- Mettler Toledo. (2025). *Mettler Toledo*. Abgerufen am 8. 2 2025 von DO Sewnsor InPro6960i/12/120: <https://www.mt.com/at/de/home/products/Process-Analytics/DO-CO2-ozone-sensor/dissolved-oxygen-meter/optical-dissolved-oxygen-sensor/inpro6960i-12-120.html>
- Microsoft. (13. 07 2022). *Microsoft*. Abgerufen am 25. 12 2024 von What is the Internet of Things?: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365-life-hacks/privacy-and-safety/what-is-the-internet-of-things>
- Microsoft. (2024). *Microsoft*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Was ist Data Science?: <https://azure.microsoft.com/de-de/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-data-science>
- Molecular Devices. (2025). *Molecular Devices*. Abgerufen am 7. 1 2025 von SpectraMax Spectrophotometers for UV-Vis Absorbance Detection: <https://www.moleculardevices.com/products/microplate-readers/absorbance-readers>
- OceanOptics. (2025). *OceanOptics*. Abgerufen am 6. 1 2025 von High Resolution Spectrometers: <https://www.oceanoptics.com/spectrometers/high-resolution-spectrometers/>

- Oed, R. (24. 08 2022). *Elektronikpraxis.de*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Ein Blick in die Vergangenheit der Datenwandler: <https://www.elektronikpraxis.de/ein-blick-in-die-vergangenheit-der-datenwandler-a-7b5b34f806076c7328948d7fea8ab147/>
- OpenAI. (2024). *OpenAI*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Was ist ChatGPT?: <https://chatopenai.de/>
- Oria Agriculture. (2025). *Oria Agriculture*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Ertragsüberwachungssystem FarmRTX: <https://www.oriaagriculture.com/de/products/farm-trx/yield-monitor>
- P. Pietta, P. M. (12 1987). *Springer Nature*. Abgerufen am 8. 2 2025 von HPLC assay of enzymatic activities: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02688523>
- Pfeuffer. (2025). *Pfeuffer*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Friabilimeter - Messgerät für die Malzmürbigkeit: <https://www.pfeuffer.com/de/produkt/friabilimeter>
- PreSens Precision Sensing GmbH. (2025). *PreSens Precision Sensing GmbH*. Abgerufen am 19. 1 2025 von In-Line O2 Messungen mit OXYPro: <https://www.presens.de/de/wissen/grundlagen/detail/oxygen-measurements-in-breweries-1989>
- Press, G. (28. 05 2013). *Forbes*. Abgerufen am 07. 12 2024 von A Very Short History Of Data Science: <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2013/05/28/a-very-short-history-of-data-science/>
- Prof. Dr. Thomas Weyer, D.-I. (. (05 2016). *Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen*. Abgerufen am 30. 12 2024 von Bodenverdichtungen vermeiden: https://www.umwelt.nrw.de/system/files/media/document/file/bodenverdichtung_broschue_re.pdf
- Proplanta - Vorsprung durch Wissen. (2024). *Proplanta - Vorsprung durch Wissen*. Abgerufen am 31. 12 2024 von Verbreitung der Gerste: https://www.proplanta.de/gerste/gerste-verbreitung_pflanze1180714897.html
- PST - Process Sensing Technologies. (2025). *PST - Process Sensing Technologies*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Sauerstoff-Sensor-Gas-Kompatibilität: <https://www.processsensing.com/de-de/industrielle-sauerstoff-sensoren/sauerstoff-sensor-gas-kompatibilitat/>
- Raúl Rojas, J. R. (2013). *Freie Universität Berlin - Fachbereich Mathematik und Informatik*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Die Prozessorarchitektur der Rechenmaschine Z1: <https://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-ki/publications/RechenmaschineZ1/Manuskript.pdf>
- Ray, S. (2024). *Microsoft*. Abgerufen am 25. 12 2024 von 10 KI-Begriffe, die man kennen sollte: <https://news.microsoft.com/de-de/features/die-wichtigsten-ki-begriffe-im-ueberblick/>
- Rewe. (12. 2024 2024). *Rewe*. Abgerufen am 31 von Gerste: alte Getreidesorte mit vielen Talenten: <https://www.rewe.de/lexikon/gerste/>
- Riese, F. (3. 9 2019). *Bundesministerium für Bildung und Forschung*. Abgerufen am 1. 1 2025 von Fachleute wollen Böden anhand von Satellitenbildern analysieren: <https://www.wissenschaftsjahr.de/2019/neues-aus-der-wissenschaft/september-2019/bodenanalyse-anhand-von-satellitenbildern/index.html>

- Rippel, D. A. (1927). *Vorlesungen über Theoretische Mikrobiologie - Betriebsstoffwechsel*. Berlin: Julius Springer Verlag. Abgerufen am 01. 02 2025 von https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-99108-0_17
- Ronsdorf, J. (27. 04 2020). *Microsoft*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Was ist Cloud Computing?: <https://news.microsoft.com/de-de/microsoft-erklaert-was-ist-cloud-computing-definition-funktionen/>
- Ronsdorf, J. (04. 03 2020). *Microsoft*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Was ist künstliche Intelligenz? Definition & Funktion von KI: <https://news.microsoft.com/de-de/einfach-erklaert-was-ist-kuenstliche-intelligenz/>
- Ronsdorf, J. (09. 04 2020). *Microsoft*. Abgerufen am 25. 12 2024 von Was ist Deep Learning= Definition & Funktion von Deep Learning: <https://news.microsoft.com/de-de/microsoft-erklaert-was-ist-deep-learning-definition-funktionen-von-dl/>
- Rubin, G. (2. 10 2023). *YourIAQ*. Abgerufen am 5. 1 2025 von Acceptable Levels of CO2 in Your Home: What is Safe?: <https://youriaq.com/acceptable-levels-of-co2-in-home/>
- S. Ball, k. M. (5 2010). *Agilent*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Sugar Analysis: An aqueous alternative to the use of amino-bonded HPLC columns with acetonitrile eluents: <https://www.agilent.com/cs/library/posters/Public/SI-2576%20HPLC%2009%20sugar%20analysis,%20no%20ACN.pdf>
- Schmachtl GmbH. (2025). *Schmachtl GmbH*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Durchflussmessung: <https://www.schmachtl.at/de/geschaeftsbereiche/umwelt-und-messtechnik/durchflussmessung/>
- Schmidt-Haensch. (2025). *Schmidt-Haensch*. Abgerufen am 11. 1 2025 von iPR FS Prozessrefraktometer mit hygienischem Design: <https://schmidt-haensch.com/de/produkt/ipr-fs/>
- Schönberger, D. C. (2025). *BarthHaas*. Abgerufen am 19. 1 2025 von Lupomax Pellets: <https://www.barthhaas.com/de/hopfen-und-produkte/produkte/lupomax>
- Schönramer Brauerei. (2024). *Schönramer Brauerei*. Abgerufen am 08. 12 2024 von Produktion: <https://www.schoenramer.de/de/brauerei/produktion>
- Schreiner, M. (11. 7 2023). *The-Decoder.com*. Abgerufen am 2. 3 2025 von GPT-4 architecture, datasets, costs and more leaked: <https://the-decoder.com/gpt-4-architecture-datasets-costs-and-more-leaked/>
- Schweizer Brauerei-Verband. (2024). *Schweizer Brauerei-Verband*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichtlicher Hintergrund: <https://bier.swiss/rund-ums-bier/bier/geschichte/>
- Science19.com. (2024). *Science19.com*. Abgerufen am 5. 1 2025 von Minimale Sauerstoffkonzentration für die menschliche Atmung: <https://science19.com/minimum-oxygen-concentration-for-human-breathing-13152>
- Seal Analytics. (2025). *Seal Analytics*. Abgerufen am 7. 1 2025 von Autoanalyzer II: <https://www.seal-analytical.com/de/Produkte/Continuous-Flow-Analysatoren/AutoAnalyzer-II>
- Smith, G. M. (05. 02 2024). *DEWESoft*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Die Geschichte der Datenerfassung: <https://dewesoft.com/de/blog/geschichte-der-datenerfassung>

Schriftliche Abschlussarbeit

Fallbeispiele für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Bierproduktion

- SoilOptix. (2025). *SoilOptix*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Soil Mapping Opportunities: <https://soiloptix.com/what-is-soiloptix/our-technology/>
- Staudt, A. (2014). *Braumagazin.de*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Auswahl eines Maischverfahrens: <https://braumagazin.de/article/auswahl-maischverfahren/>
- Steinert. (2025). *Steinert*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Unisort PR Evo 5.0: <https://steinertglobal.com/de/sortiersysteme/sensorsortierung/nir-sortiersysteme/unisort-pr/>
- TensorFlow. (2025). *TensorFlow.org*. Abgerufen am 1. 3 2025 von TensorFlow.org: <https://www.tensorflow.org/>
- Texas Instruments. (2024). *Texas Instruments*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Der Chip, der die Welt veränderte: <https://www.ti.com/de-de/about-ti/newsroom/company-blog/the-chip-that-changed-the-world.html>
- ThermoFischer Scientific. (2025). *ThermoFischer Scientific*. Abgerufen am 1. 3 2025 von Attune Flow Cytometer: <https://www.thermofisher.com/at/en/home/life-science/cell-analysis/flow-cytometry/flow-cytometers/attune-nxt-flow-cytometer/models.html>
- Thömmes, G. (08. 11 2021). *Brauwelt*. Abgerufen am 08. 12 2024 von Giganten der Biergeschichte: Jacob Christian Jacobson und Emil Christian Hansen: <https://brauwelt.com/de/karriere/personen-und-positionen/643711-giganten-der-biergeschichte-jacob-christian-jacobsen-und-emil-christian-hansen>
- Thömmes, G. (16. 10 2023). *Bierakademie Bayern*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Giganten der Biergeschichte: Carl von Linde: <https://www.bierakademie.bayern/wp-content/uploads/2023/11/26-Carl-von-Linde.pdf>
- Tim Höpfner, P. L. (2010). *Leibniz Universität Hannover - Institut für technische Chemie*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Online-Viabilitätsmessung von Hefe- und Tierzellen mittels Durchfluss-Mikroskopie: https://www.academia.edu/75055969/Online_Viabilit%C3%A4tsmessung_von_Hefe_und_Tierzellen_mittels_Durchflussmikroskopie
- uwe electronic. (2025). *uwe electronic*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Infrarot-Temperatursensor: <https://www.uweelectronic.de/de/temperaturmanagement-2/thermosensoren/infrarot-temperaturfuehler.html>
- UWT GmbH. (2025). *DirectIndustryConnect*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Radar-Füllstandsensor Nivo: <https://www.directindustry.de/prod/uwt-gmbh/product-25110-2722444.html>
- Vaisalia. (2025). *Vaisalia*. Abgerufen am 6. 1 2025 von Kohlendioxidmessungen: <https://www.vaisala.com/de/measurement/carbon-dioxide-co2-measurements>
- Vega.com. (2025). *Vega.com*. Abgerufen am 8. 2 2025 von VEGABAR 38 - Drucksensor mit Schaltfunktion: <https://www.vega.com/de-at/produkte/produktkatalog/druck/prozessdruck/vegabar-38>
- Water TDS Inc. (2025). *Water TDS Inc*. Abgerufen am 6. 1 2025 von TDSBot - AI powered remote water purifier monitoring: <https://watertds.com/>

- Weighing Instrument Co. Ltd. (2025). *Weighing Instrument Co. Ltd.* Abgerufen am 8. 2 2025 von Viscometer RV-6M: <https://www.weighinginstru.com/-million-cps-industrial-digital-viscomsimer-27.html>
- Weiss, O. (2014). *Braumagazin*. Abgerufen am 2. 1 2025 von Lesen und beurteilen einer Malzanalyse: <https://braumagazin.de/article/malzanalyse/>
- Weyermann.de. (2025). *Weyermann.de*. Abgerufen am 11. 1 2025 von Weyermann Malz: <https://www.weyermann.de/>
- White Labs. (2025). *White Labs*. Abgerufen am 8. 2 2025 von Yeast & Bacteria Bank: <https://www.whitelabs.com/yeast-bank>
- Wintersteiger. (2025). *Wintersteiger*. Abgerufen am 1. 1 2025 von Geo Link GPS-Lösung für Sämaschinen: <https://www.wintersteiger.com/de/Pflanzenzucht-und-Forschung/Produkte/Produktprogramm/Drills%C3%A4maschinen/574-Geo-Link>
- Wintersteiger. (2025). *Wintersteiger*. Abgerufen am 1. 1 2025 von Easy Harvest: <https://www.wintersteiger.com/de/Pflanzenzucht-und-Forschung/Produkte/Produktprogramm/Datenmanagement-und-Software/45-Easy-Harvest>
- Wyeast Laboratories, Inc. (2025). *Wyeast Laboratories, Inc.* Abgerufen am 8. 2 2025 von Yeast & Cultures Beer: <https://wyeastlab.com/yeast-cultures/beer/strains/>
- Yuxia Guan, J. W. (13. 11 2011). *Springer Nature*. Abgerufen am 8. 2 2025 von A method for determination of hexokinase activity by RP-HPLC: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11859-011-0793-0>
- Zeller, O. (16. 08 2012). *Abakus*. Abgerufen am 07. 12 2024 von Geschichte: <https://abakus-phsalzburg.weebly.com/geschichte.html>