



**HOCHSCHULE LANDSHUT**  
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

**Hochschule für angewandte Wissenschaften  
Landshut**

Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

Bachelorarbeit zum Thema

**Entwicklung eines intelligenten  
Dosiersystems für viskose Medien**

*Öffentliche Fassung ohne personenbezogene Angaben*

Eingereicht: 10. August 2026

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Abbildungsverzeichnis                                                  | III       |
| Tabellenverzeichnis                                                    | IV        |
| <b>1 Wie kommt der Honig ins Glas?</b>                                 | <b>1</b>  |
| <b>2 Anforderungen und Systemkonzept</b>                               | <b>3</b>  |
| 2.1 Anforderungen an das Dosiersystem . . . . .                        | 3         |
| 2.2 Gesamtkonzept der Anlage . . . . .                                 | 4         |
| 2.3 Funktionsablauf und mögliche Fehlbedienungen . . . . .             | 5         |
| <b>3 Mechanische Konstruktion</b>                                      | <b>7</b>  |
| 3.1 Mechanisches Gesamtkonzept . . . . .                               | 7         |
| 3.2 Mechanische Hauptbaugruppen . . . . .                              | 8         |
| 3.2.1 Basisstruktur . . . . .                                          | 8         |
| 3.2.2 Träger für den Abfülleimer . . . . .                             | 9         |
| 3.2.3 Magazin- und Positioniersystem . . . . .                         | 9         |
| 3.2.4 Dosiereinheit und Betätigungsmechanik . . . . .                  | 11        |
| 3.3 Fertigung und 3D-Druck . . . . .                                   | 12        |
| 3.4 Zusammenbau der Baugruppen . . . . .                               | 12        |
| <b>4 Elektronik und Hardwareaufbau</b>                                 | <b>14</b> |
| 4.1 Anforderungen an die Hardware . . . . .                            | 14        |
| 4.2 Auswahl und Einbindung von Sensorik und Aktorik . . . . .          | 14        |
| 4.3 Schaltungsentwurf . . . . .                                        | 18        |
| 4.4 PCB-Layout und Fertigung . . . . .                                 | 22        |
| 4.5 Aufbau, Inbetriebnahme und Einzeltests . . . . .                   | 24        |
| <b>5 Firmware und Steuerungskonzept</b>                                | <b>27</b> |
| 5.1 Anforderungen an die Firmware . . . . .                            | 27        |
| 5.2 Softwarearchitektur und Task-Struktur . . . . .                    | 27        |
| 5.3 Zustandsautomat und Prozessablauf . . . . .                        | 29        |
| 5.4 Bedienung, Parametrierung und Kalibrierung . . . . .               | 31        |
| 5.5 Fehlerbehandlung, Sicherheit und Datenaufzeichnung . . . . .       | 32        |
| <b>6 Analyse des Dosierprozesses und gemeinsame Versuchsgrundlagen</b> | <b>34</b> |
| 6.1 Analyse des Dosierprozesses . . . . .                              | 34        |
| 6.2 Wirkstruktur und charakteristische Prozessparameter . . . . .      | 35        |
| 6.3 Zielgrößen und Bewertungskriterien . . . . .                       | 41        |

|           |                                                            |           |
|-----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.4       | Versuchsaufbau und Randbedingungen . . . . .               | 41        |
| 6.5       | Überblick über die untersuchten Dosierstrategien . . . . . | 43        |
| <b>7</b>  | <b>Einfache heuristische Dosierstrategie</b>               | <b>44</b> |
| 7.1       | Grundidee und Ablauf . . . . .                             | 44        |
| 7.2       | Relevante Parameter und Umsetzung . . . . .                | 46        |
| 7.3       | Versuche und Tuning . . . . .                              | 46        |
| 7.4       | Ergebnisse und Grenzen . . . . .                           | 47        |
| <b>8</b>  | <b>Erweiterte Dosierstrategie mit adaptiven Parametern</b> | <b>49</b> |
| 8.1       | Motivation, Grundidee und Ablauf . . . . .                 | 49        |
| 8.2       | Relevante Parameter und Umsetzung . . . . .                | 51        |
| 8.3       | Versuche und Tuning . . . . .                              | 52        |
| 8.4       | Ergebnisse und Bewertung . . . . .                         | 52        |
| <b>9</b>  | <b>Untersuchter regelungsbasierter Ansatz</b>              | <b>56</b> |
| 9.1       | Motivation und Zielsetzung . . . . .                       | 56        |
| 9.2       | Grundidee und Ablauf . . . . .                             | 56        |
| 9.3       | Regelkreis und Umsetzung . . . . .                         | 58        |
| 9.4       | Versuche und Beobachtungen . . . . .                       | 64        |
| 9.5       | Ergebnisse und Einordnung . . . . .                        | 67        |
| <b>10</b> | <b>Vergleich und Diskussion der Strategievarianten</b>     | <b>68</b> |
| 10.1      | Vergleich der Strategievarianten . . . . .                 | 68        |
| 10.2      | Diskussion und Auswahl der bevorzugten Strategie . . . . . | 70        |
| <b>11</b> | <b>Was wurde erreicht?</b>                                 | <b>73</b> |
| 11.1      | Zusammenfassung der Arbeit . . . . .                       | 73        |
| 11.2      | Bewertung der entwickelten Lösung . . . . .                | 73        |
| 11.3      | Ansätze für Weiterentwicklungen . . . . .                  | 74        |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>                                | <b>76</b> |
| <b>A</b>  | <b>Schaltplan der Steuerplatine</b>                        | <b>78</b> |
| <b>B</b>  | <b>Digitale Begleitmaterialien</b>                         | <b>79</b> |

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                               |    |
|------|---------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | CAD-Gesamtansicht der Anlage . . . . .                        | 4  |
| 2.2  | Vereinfachter Ablauf der Anlage . . . . .                     | 5  |
| 3.1  | Basisstruktur mit Komponentenaufnahmen . . . . .              | 8  |
| 3.2  | Trägergestell für den Abfülleimer . . . . .                   | 9  |
| 3.3  | CAD-Ansicht des Magazin- und Positioniersystems . . . . .     | 10 |
| 3.4  | CAD-Ansichten der Dosiereinheit . . . . .                     | 11 |
| 3.5  | Realer mechanischer Aufbau der Anlage . . . . .               | 13 |
| 4.1  | Blockdiagramm der Elektronik . . . . .                        | 15 |
| 4.2  | Gravimetrische Messkette . . . . .                            | 16 |
| 4.3  | Funktionsprinzip des Reedkontakts . . . . .                   | 17 |
| 4.4  | Interner Aufbau der Steuerplatine . . . . .                   | 19 |
| 4.5  | Schaltungsausschnitt der Servo-Versorgung . . . . .           | 20 |
| 4.6  | Antriebs- und Bremsschaltung des Magazinmotors . . . . .      | 21 |
| 4.7  | Layout der Steuerplatine . . . . .                            | 22 |
| 4.8  | Gefräste Vorderseite der Leiterplatte . . . . .               | 23 |
| 4.9  | Testaufbau der bestückten Steuerplatine . . . . .             | 24 |
| 4.10 | Basisstruktur während der Verkabelung . . . . .               | 25 |
| 4.11 | Dosiereinheit mit Servomotor und Bedienelementen . . . . .    | 26 |
| 5.1  | Firmware-Architektur mit den wichtigsten Tasks . . . . .      | 29 |
| 5.2  | Implementierter Zustandsautomat der Anlage . . . . .          | 30 |
| 5.3  | OLED-Display bei der Bedienung . . . . .                      | 32 |
| 6.1  | Vereinfachte Wirkstruktur des Dosierprozesses . . . . .       | 35 |
| 6.2  | Repräsentativer Füllverlauf mit Prozesseffekten . . . . .     | 37 |
| 6.3  | Gemessene Füllrate über der Klappenöffnung . . . . .          | 40 |
| 6.4  | Versuchsaufbau während eines Abfüllvorgangs . . . . .         | 42 |
| 7.1  | Ablaufdiagramm der heuristischen Dosierstrategie . . . . .    | 45 |
| 7.2  | Zwei Läufe der heuristischen Strategie im Vergleich . . . . . | 48 |
| 8.1  | Prinzip der adaptiv erweiterten Dosierstrategie . . . . .     | 50 |
| 8.2  | Zwei Läufe der adaptiv-heuristischen Strategie . . . . .      | 53 |
| 8.3  | Entwicklung der adaptierten Schwellwerte . . . . .            | 54 |
| 8.4  | Leistung der erweiterten Strategie über die Sitzung . . . . . | 55 |
| 9.1  | Ablaufdiagramm der regelungsbasierten Strategie . . . . .     | 57 |
| 9.2  | Blockschaltbild der Kaskadenregelung . . . . .                | 59 |



|      |                                                                     |    |
|------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 9.3  | Beispielhaftes äußeres Sollraten-Profil . . . . .                   | 60 |
| 9.4  | Repräsentativer Lauf des regelungsbasierten Ansatzes . . . . .      | 64 |
| 9.5  | Identifizierte Streckenparameter über die Sitzung . . . . .         | 65 |
| 9.6  | Leistung des regelungsbasierten Ansatzes über die Sitzung . . . . . | 66 |
| 10.1 | Füllmassenabweichung der drei Strategien . . . . .                  | 69 |

## Tabellenverzeichnis

|      |                                                      |    |
|------|------------------------------------------------------|----|
| 5.1  | Von der Firmware erkannte Fehlerfälle . . . . .      | 33 |
| 6.1  | Prozessparameter und Einflussgrößen . . . . .        | 38 |
| 10.1 | Qualitativer Vergleich der drei Strategien . . . . . | 68 |

# 1 Wie kommt der Honig ins Glas?

Honig wird nach der Ernte in großen Vorratsbehältern wie Polypropylen-Eimern gelagert und daraus nach und nach in Gläser abgefüllt. Von Hand läuft das immer gleich ab: Man hält ein Glas unter den Auslass, öffnet den Quetschhahn, wartet und schließt ihn wieder, sobald das Glas voll genug aussieht. Bei Wasser wäre das in Sekunden erledigt. Honig aber ist zäh und fließt langsam, sodass ein einzelnes Glas je nach Sorte gut über eine Minute und bei sehr zähem Honig auch mehrere Minuten braucht.

Drei Dinge machen das mühsam. Am meisten stört der Zeitaufwand, denn man muss über den gesamten Vorgang danebenstehen, die vollen Gläser gegen leere tauschen und den Hahn im richtigen Moment schließen. Bei vielen Gläsern nacheinander lässt sich in dieser Zeit kaum etwas anderes erledigen, und auch ein guter Abfülleimer ändert daran wenig. Hinzu kommen hygienische Bedenken durch Verunreinigungen, weil Honig Fäden zieht, nachtropft und Spuren am Glasrand hinterlässt. Zudem ist das Abfüllen nach Augenmaß ungenau, sodass die Gläser unterschiedlich voll werden und man, um das aufgedruckte Füllgewicht sicher zu erreichen, eher zu viel einfüllt.

Gerade diese Genauigkeit ist bei Honig heikel und verlangt von Hand einige Konzentration. Weil das zähe Medium träge reagiert, folgt der Fluss einer Änderung am Auslass nur verzögert, und nach dem Schließen läuft weiter Honig nach, sodass man den richtigen Moment vorausahnen oder mehrmals nachfüllen muss. Zudem verhält sich nicht jeder Honig gleich: Warm und frisch geschleudert fließt er deutlich anders als kühl und kristallisierend, und auch der sinkende Füllstand im Eimer verändert das Verhalten während des Abfüllens. Ein einfaches Ventil, das nur „auf“ und „zu“ kennt, reicht deshalb nicht aus, um zuverlässig ein bestimmtes Gewicht zu treffen.

Aus diesen Beobachtungen entstand die Idee zu einer halbautomatischen Anlage, die das Abfüllen weitgehend übernimmt. Die Bedienperson stellt mehrere leere Gläser ein und startet den Vorgang, den Rest erledigt die Anlage allein: Ein drehbares Magazin führt die Gläser nacheinander unter den Auslass, eine Waage verfolgt dabei laufend das Gewicht, und eine angetriebene Klappe gibt den Honig dosiert frei und schließt, sobald das Zielgewicht erreicht ist. Eine eigens entwickelte Elektronik mit zugehöriger Firmware steuert diesen Ablauf. Die besondere Herausforderung besteht dabei neben dem mechanischen Aufbau darin, die Steuerklappe so präzise anzusteuern, dass das Glas trotz des trägen und nachlaufenden Fließverhaltens genau das Zielgewicht trifft. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt deshalb neben dem Bau der Maschine wesentlich bei der Dosierstrategie, also der Frage, welcher Ansatz das gewünschte Gewicht unter realen Bedingungen am genauesten, zuverlässigsten und schnellsten trifft. Dazu werden mehrere Strategien umgesetzt und unter möglichst gleichen Bedingungen verglichen.

Wie geht die Arbeit nun bei der Lösung dieser Aufgabe vor? Zunächst werden aus den Schwächen des manuellen Abfüllens konkrete Anforderungen abgeleitet und daraus das Gesamtkonzept der Anlage entwickelt (Kapitel 2). Darauf folgt die Umsetzung von Mechanik, Elektronik und Firmware, die zusammen die funktionsfähige Basis der Anlage ergeben (Kapitel 3 bis 5). Den Schwerpunkt bildet anschließend der Dosierprozess selbst. Nach einer Analyse der Eigenschaften, die das genaue Abfüllen erschweren (Kapitel 6), werden drei Dosierstrategien nacheinander entwickelt und erprobt: eine einfache schwellenbasierte Steuerung (Kapitel 7), eine Variante, die ihre Parameter von Glas zu Glas selbst nachjustiert (Kapitel 8), und ein regelungsbasiertes Verfahren (Kapitel 9). Ein abschließender Vergleich bewertet, welcher Ansatz das gewünschte Gewicht unter realen Bedingungen am besten trifft und warum (Kapitel 10), bevor das Fazit die Ergebnisse zusammenfasst (Kapitel 11).

## 2 Anforderungen und Systemkonzept

Aus der in der Einleitung beschriebenen Problemstellung des manuellen Abfüllens lassen sich konkrete Anforderungen an ein automatisiertes Dosiersystem ableiten. Dieses Kapitel fasst diese Anforderungen zusammen, stellt das daraus entwickelte Gesamtkonzept der Anlage vor und beschreibt den grundlegenden Funktionsablauf.

### 2.1 Anforderungen an das Dosiersystem

Aus den Schwächen des manuellen Abfüllens ergeben sich folgende zentrale Anforderungen:

- **Genauigkeit:** Die Zielmasse im Glas soll reproduzierbar und ohne systematische Über- oder Unterfüllung erreicht werden, statt wie beim manuellen Abfüllen vom Augenmaß der bedienenden Person abzuhängen.
- **Prozesssicherheit und Sauberkeit:** Der klebrige, nachtropfende Honig darf nicht unkontrolliert austreten. Fehlbedienungen wie ein fehlendes oder bereits gefülltes Glas müssen erkannt werden, ohne den Ablauf zu gefährden.
- **Bedienbarkeit:** Die Anlage soll sich mit wenigen Bedienelementen direkt vor Ort starten, überwachen und parametrieren lassen, ohne Fachwissen über die interne Funktionsweise vorauszusetzen.
- **Zeitersparnis:** Mehrere Gläser sollen nacheinander befüllt werden können, ohne dass nach jedem Glas manuell eingegriffen werden muss.
- **Eignung für viskose Medien:** Viskose Medien wie Honig lassen sich nicht ohne Weiteres exakt dosieren. Ihr Fließverhalten reagiert träge und nichtlinear auf eine Änderung der Klappenstellung, zudem läuft nach dem Schließen des Auslasses noch Honig nach. Das Dosierverfahren muss mit dieser Totzeit, dem Nachlauf und dem nichtlinearen Verhalten umgehen können.
- **Robustheit:** Honig unterscheidet sich je nach Sorte deutlich in Viskosität und Fließverhalten. Auch ein sinkender Füllstand im Abfülleimer und Temperaturschwankungen verändern den Honigfluss während des Betriebs. Das Dosierverfahren muss auch unter solchen wechselnden Bedingungen zuverlässig arbeiten, statt nur für einen einzelnen Honig und feste Randbedingungen ausgelegt zu sein.

Die ersten vier Anforderungen bestimmen vor allem den mechanischen und elektronischen Aufbau sowie die Ablaufsteuerung und werden in den Kapiteln 3 bis 5 umgesetzt. Die letzten beiden Anforderungen betreffen dagegen unmittelbar die eigentliche Dosierlogik und begründen, warum in dieser Arbeit mehrere Dosierstrategien untersucht und verglichen werden (Kapitel 6 bis 9).

## 2.2 Gesamtkonzept der Anlage

Abbildung 2.1 zeigt das daraus entwickelte Gesamtkonzept der Anlage anhand einer CAD-Ansicht mit den wesentlichen Baugruppen. Der Abfülleimer sitzt erhöht über einem drehbaren Magazin, das mehrere Gläser aufnimmt und einzeln nacheinander unter dem Auslass positioniert. Dort dosiert eine servoangetriebene Einheit den Honig in das bereitstehende Glas, während die Steuerplatine in der Basisstruktur Antrieb, Dosiereinheit und Wägezelle koordiniert.

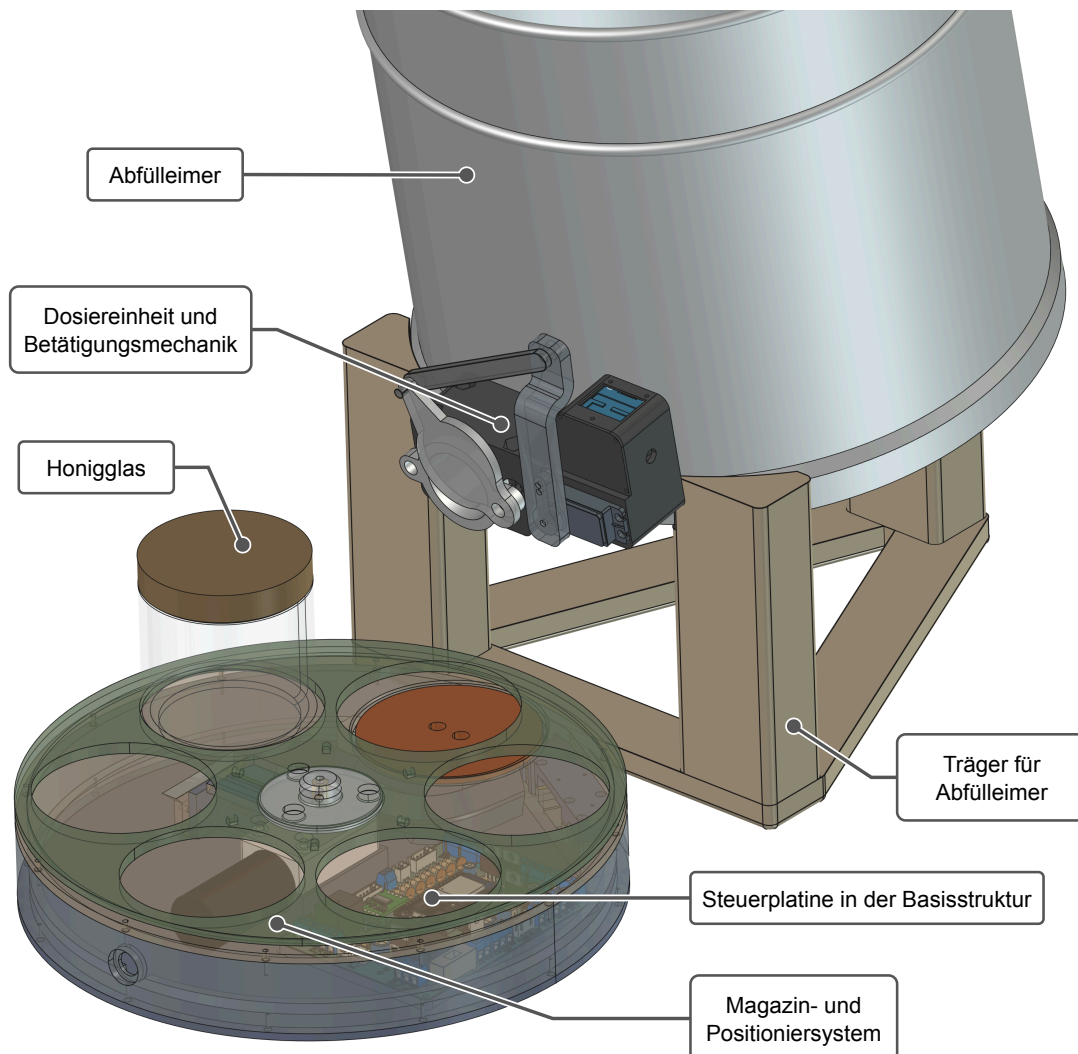


Abbildung 2.1: CAD-Gesamtansicht der Abfüllanlage mit den wesentlichen Baugruppen.

Jede Baugruppe adressiert dabei gezielt eine der zuvor genannten Anforderungen. Das Magazin ermöglicht den mehrere Gläser umfassenden, teilautonomen Betrieb und damit die geforderte Zeitersparnis. Die Wägezelle an der Position liefert die für die Genauigkeit nötige Rückmeldung über die tatsächliche Füllmasse. Die servoangetriebene Dosiereinheit stellt die reproduzierbare und saubere Abgabe des viskosen Mediums sicher, während die lokale Bedienung über

Taster, Drehencoder und Display an der Dosiereinheit die geforderte einfache Bedienbarkeit umsetzt. Wie diese Baugruppen im Einzelnen konstruiert, verschaltet und angesteuert werden, beschreiben die Kapitel 3, 4 und 5 im Detail.

## 2.3 Funktionsablauf und mögliche Fehlbedienungen

Im Betrieb stellt die Bedienperson leere Gläser ins Magazin und startet die Anlage. Das Magazin dreht daraufhin selbstständig von Position zu Position, erkennt dabei jeweils, ob ein leeres Glas bereitsteht, und befüllt es nach der gewählten Dosierstrategie. Anschließend dreht das Magazin zum nächsten Glas weiter, bis alle Gläser befüllt sind oder keine weitere befüllbare Position mehr gefunden wird. Abbildung 2.2 zeigt diesen Ablauf in vereinfachter Form.

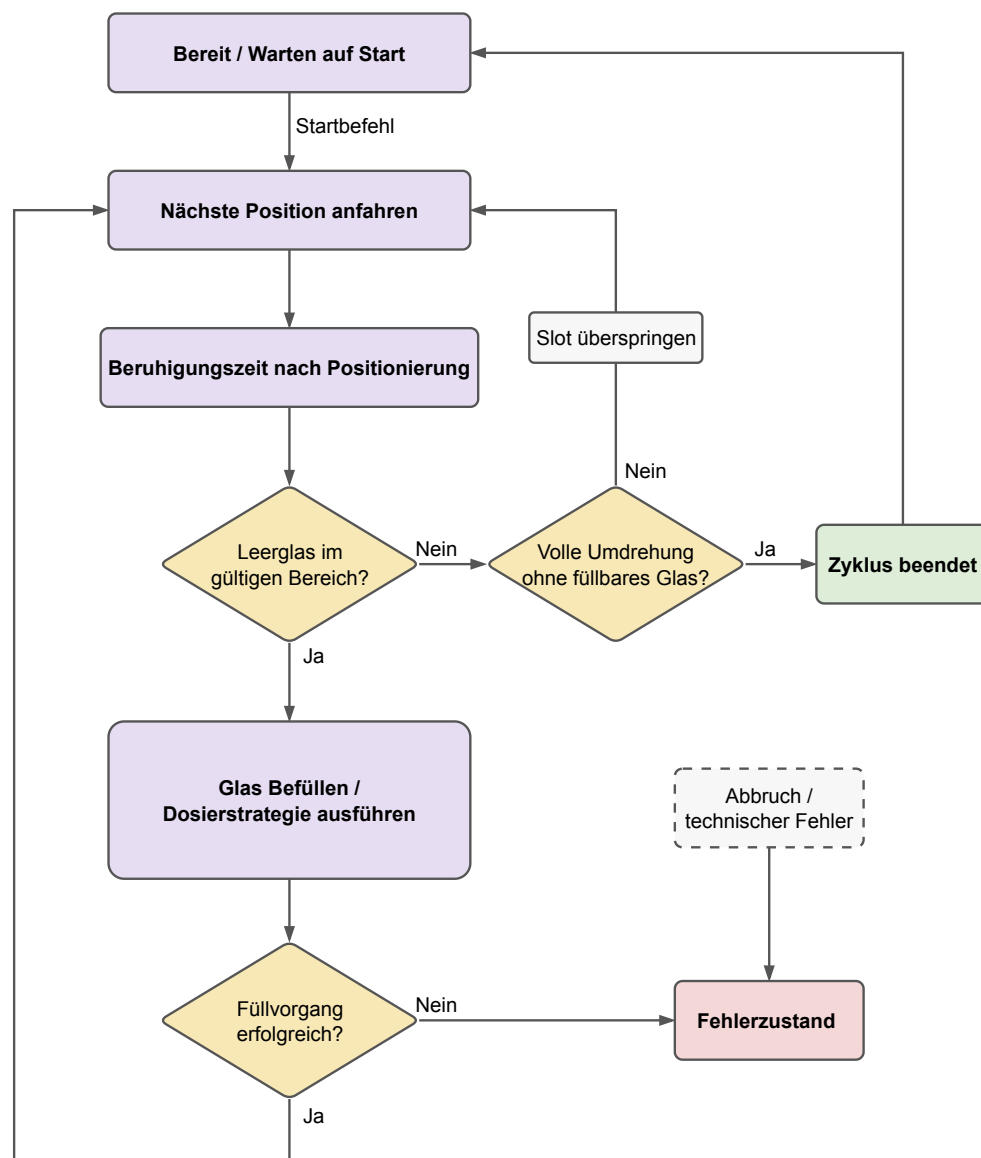


Abbildung 2.2: Vereinfachter Ablauf der Abfüllanlage mit den wichtigsten Prozessschritten.

Der Füllvorgang selbst ist im Ablauf bewusst nur als „Dosierstrategie ausführen“ dargestellt. Genau diese austauschbare Dosierlogik bildet den wissenschaftlichen Kern der Arbeit und wird in den Kapiteln 6 bis 9 im Detail untersucht. Der vollständige Anlagenablauf am realen Aufbau ist ergänzend in einer Videoaufnahme auf der in Anhang B genannten Projektseite dokumentiert.

Neben dem regulären Ablauf muss die Anlage auch mit typischen Fehlbedienungen umgehen. Dazu zählen eine unbesetzte Position, ein bereits gefülltes oder nur teilweise befülltes Glas sowie technische Störungen wie eine ausbleibende Gewichtsreaktion oder eine Zeitüberschreitung während des Füllvorgangs. Solche Fälle überführt die Firmware in einen sicheren Fehlerzustand, in dem die Klappe geschlossen bleibt und der Ablauf angehalten wird, statt unkontrolliert weiterzulaufen. Die vollständige Liste der erkannten Fehlerfälle zeigt Kapitel 5. Diese Behandlung ist unmittelbar Voraussetzung für die geforderte Prozesssicherheit und Bedienbarkeit, da Gläser dadurch auch während des laufenden Betriebs entnommen oder nachgestellt werden können, ohne dass ein Eingriff in den Ablauf nötig wird.

Aus diesem Ablauf ergeben sich unmittelbare Anforderungen an die folgenden Kapitel: Die Mechanik muss Gläser reproduzierbar positionieren und den Auslass definiert öffnen und schließen können, die Elektronik muss dazu Position, Gewicht und Klappenstellung zuverlässig erfassen und stellen, und die Firmware muss diesen Ablauf einschließlich der Fehlerfälle als durchgängigen Zustandsautomaten umsetzen.

## 3 Mechanische Konstruktion

Die mechanische Konstruktion bildet die Grundlage des realen Aufbaus der Abfüllanlage. In diesem Kapitel werden das mechanische Gesamtkonzept, die wesentlichen Baugruppen sowie deren Fertigung und Zusammenbau beschrieben. Im Mittelpunkt stehen dabei die konstruktiven Entscheidungen, die für Funktion, Stabilität und den Dosierprozess relevant sind.

### 3.1 Mechanisches Gesamtkonzept

Die Gesamtansicht der Anlage wurde bereits in Kapitel 2 in Abbildung 2.1 als funktionaler Überblick eingeführt. Mechanisch gliedert sich der Aufbau in wenige klar abgegrenzte Hauptbaugruppen: eine tragende Basisstruktur, das darauf aufgesetzte Magazin- und Positioniersystem, den erhöht darüber angeordneten Abfülleimer und die Dosiereinheit am Auslass. Diese Baugruppen werden in den folgenden Abschnitten einzeln beschrieben.

Als konstruktive Randbedingung wurde der Außendurchmesser der Einheit bewusst auf etwa 300 mm begrenzt, sodass der Aufbau zur Lagerung im Abfülleimer selbst untergebracht werden kann.

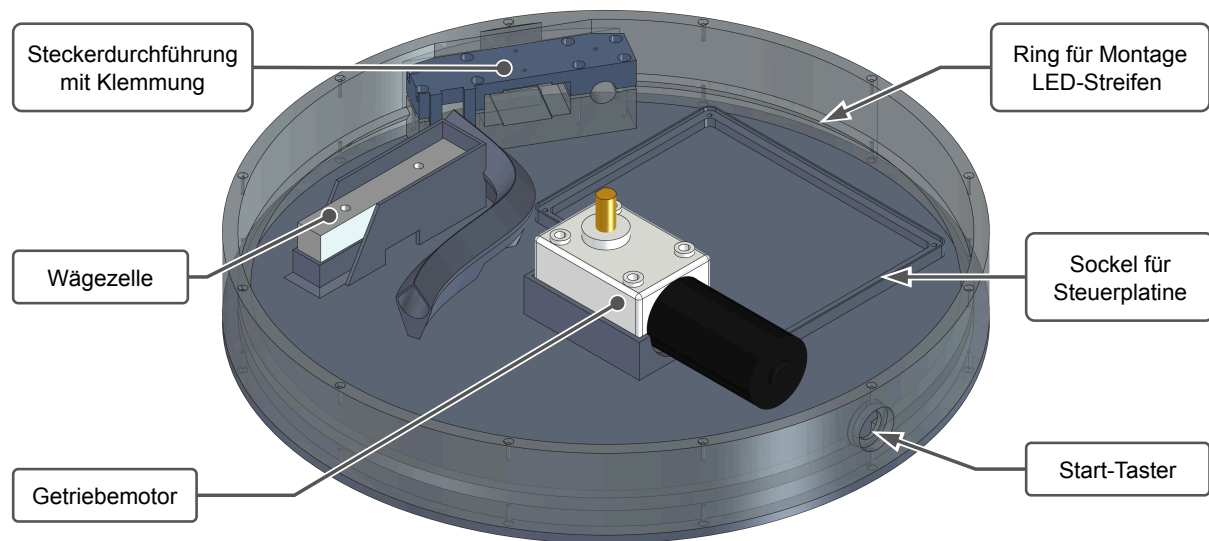
Die mechanischen Bauteile wurden in FreeCAD, einem quelloffenen parametrischen 3D-CAD-System [1], konstruiert und in mehreren Iterationen als gemeinsames CAD-Modell weiterentwickelt.



## 3.2 Mechanische Hauptbaugruppen

### 3.2.1 Basisstruktur

Die Basisstruktur bildet den mechanischen Grundkörper der Anlage und dient als gemeinsame Trägerstruktur für die weiteren Baugruppen. Sie nimmt den Antrieb des Magazins, die Wägezelle sowie zentrale Elemente der Elektronik auf und schafft damit die mechanische Grundlage für einen kompakten und funktional integrierten Aufbau.



**Abbildung 3.1:** Basisstruktur mit Aufnahmen für Motor, Wägezelle, Stecker, LED-Streifen und Platine.

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, besteht die Basisstruktur aus mehreren Einzelteilen. Die zentrale Grundplatte nimmt den Getriebemotor, die Wägezelle sowie die Aufnahme für die Steuerplatine auf. Bereits in die Konstruktion integriert sind dabei formschlüssige Bereiche zur Positionierung und Befestigung dieser Komponenten sowie Kabelführungen für die elektrische Anbindung.

Ergänzt wird die Grundplatte durch einen äußeren Ring, der den Innenraum der Basis seitlich abschließt und die Verbindung zur später beschriebenen Magazinbaugruppe herstellt. In diesen Ring sind zugleich funktionale Details integriert, darunter Öffnungen für Stecker, eine Aufnahme für den Start-Taster sowie ein umlaufender Bereich zur Montage eines LED-Streifens als Statusanzeige. Für die eingesetzten Steckverbinder ist zusätzlich eine separate Klemmung vorgesehen, die diese mechanisch fixiert.

Im Bereich der Wägezelle wurde außerdem eine schützende Umfassung vorgesehen, um zu vermeiden, dass Kabel oder andere Bauteile unbeabsichtigt in den Messbereich gelangen und die Gewichtserfassung beeinflussen.

### 3.2.2 Träger für den Abfülleimer

Der Träger für den Abfülleimer positioniert den Eimer erhöht über der Magazinbaugruppe und gibt zugleich eine leichte Neigung nach vorne vor. Dadurch wird der Honig gezielt zum Auslass geführt und der Materialfluss beim Abfüllen unterstützt.

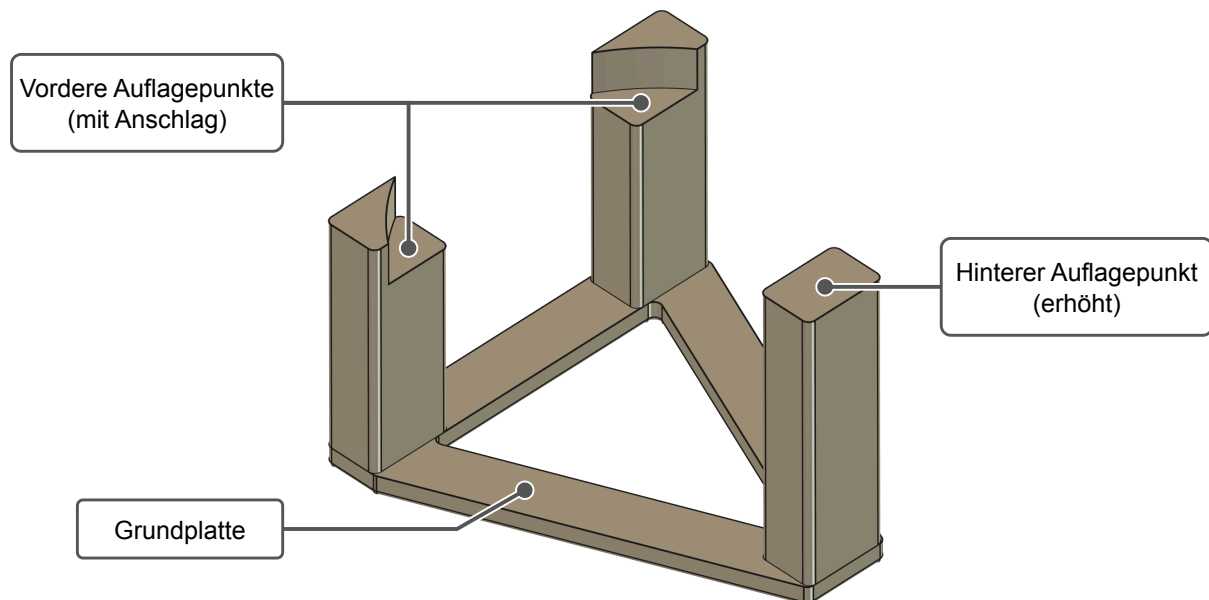


Abbildung 3.2: Trägergestell zur erhöhten und leicht geneigten Positionierung des Abfülleimers.

Wie in Abbildung 3.2 gezeigt, besteht die Baugruppe aus einer Grundplatte und drei tragenden Elementen, wobei der hintere Auflagerpunkt länger ausgeführt ist und so den festen Neigungswinkel vorgibt. Im vorderen Bereich ist die Aufnahme so gestaltet, dass der Eimer sicher sitzt und nicht nach vorne verrutschen kann.

Auf eine verstellbare Ausführung wurde zugunsten einer einfachen und robusten Geometrie zunächst verzichtet. Damit eignet sich die Baugruppe auch für eine spätere Fertigung aus Holz und erfüllt die für den Prototypen wesentlichen Anforderungen an Positionierung und Stabilität.

### 3.2.3 Magazin- und Positioniersystem

Das Magazin- und Positioniersystem übernimmt die Aufnahme, den schrittweisen Weitertransport und die reproduzierbare Positionierung der Gläser innerhalb der Anlage. Seine Aufgabe besteht darin, mehrere Gläser bereitzustellen und jeweils ein Glas definiert an die Wäge- und Abfüllposition zu bringen.

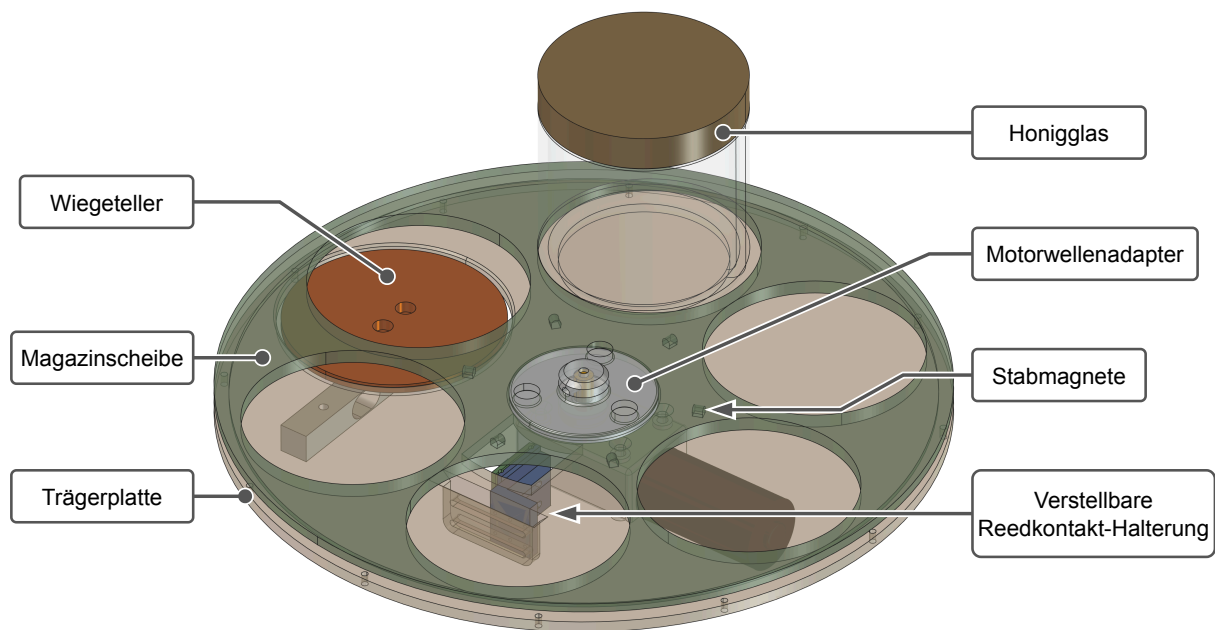


Abbildung 3.3: CAD-Ansicht des Magazin- und Positioniersystems.

Wie in Abbildung 3.3 dargestellt, bildet die Trägerplatte die obere Führungsebene der Baugruppe. Sie wird mit der zuvor beschriebenen Basisstruktur verschraubt und bildet zusammen mit dem äußeren Ring zugleich den oberen Abschluss des darunterliegenden Gehäuseinnenraums. Darauf ist die Magazinscheibe angeordnet, deren Aussparungen zur Aufnahme der Gläser dienen. Durch die Drehbewegung dieser Scheibe werden die Gläser schrittweise weitertransportiert.

Der Antrieb erfolgt über einen Getriebemotor, dessen Drehmoment über einen separaten Motorwellenadapter in die Magazinscheibe eingeleitet wird. Dieser Adapter dient als mechanisches Verbindungselement zwischen Motorwelle und gedruckter Scheibe und ermöglicht eine definierte und belastbare Kopplung. Gleichzeitig ist die Magazinscheibe dadurch nur formschlüssig aufgesteckt und kann ohne Werkzeug abgenommen werden, was die Reinigung der für den Abfüllprozess relevanten Teile erleichtert.

Im Bereich der Wägeposition ist ein separater Wiegeteller vorgesehen, auf dem das jeweils aktive Glas während des Abfüllvorgangs steht. Dadurch kann die Gewichtserfassung auf einer klar definierten, von der restlichen Magazinstruktur getrennten Auflagefläche erfolgen.

Für die Positionerkennung sind in der Magazinscheibe kleine Aufnahmen für Stabmagnete vorgesehen. Diese werden beim Drehen des Magazins an einer fest montierten, verstellbaren Reedkontakt-Halterung vorbeigeführt und ermöglichen so die Erkennung definierter Positionen. Die Baugruppe stellt damit sicher, dass die Gläser wiederholt an derselben Stelle für Wägung und Dosierung bereitstehen.

### 3.2.4 Dosiereinheit und Betätigungsmechanik

Die Dosiereinheit bildet die mechanische Schnittstelle zwischen Abfülleimer und Dosierstrategie. Ihre Aufgabe besteht darin, den ursprünglich von Hand betätigten Auslass des Abfülleimers elektrisch und reproduzierbar ansteuern zu können, sodass der Honigfluss gezielt beeinflusst werden kann.

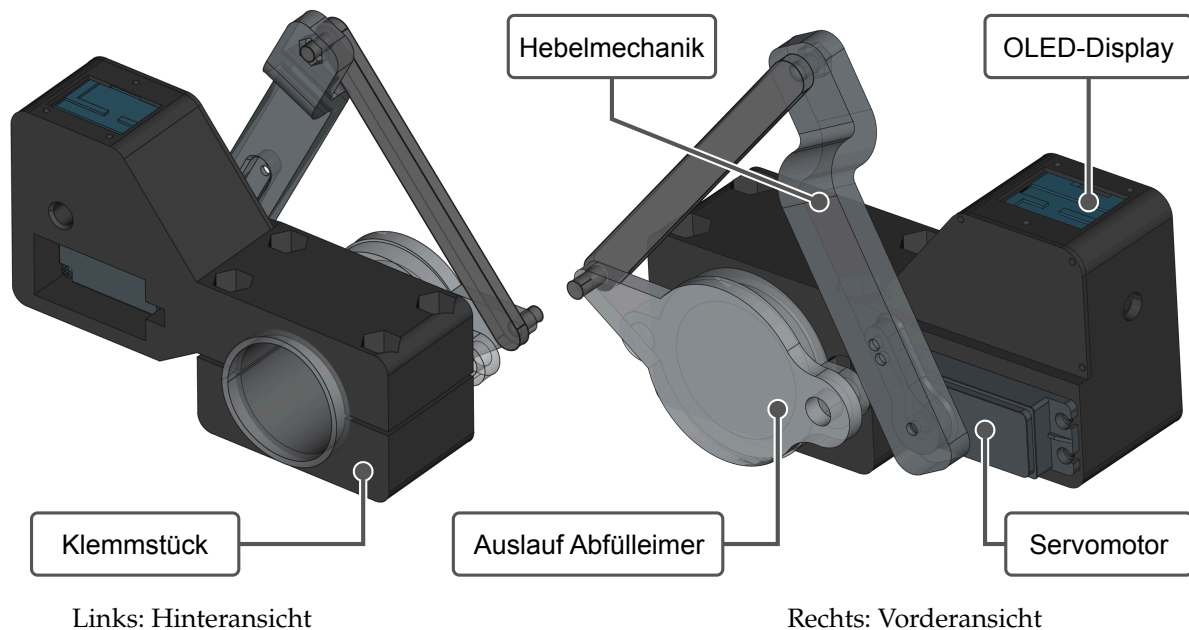


Abbildung 3.4: CAD-Ansichten der Dosiereinheit mit Betätigungsmechanik.

Abbildung 3.4 zeigt die Baugruppe in Vorder- und Hinteransicht. Zentrales Element ist ein Servomotor, der von der Rückseite her in eine dafür vorgesehene Aufnahme eingesetzt und verschraubt wird. Seine Bewegung wird über eine Hebelmechanik auf die Klappe am Auslauf des Abfülleimers übertragen. Die Geometrie dieser Betätigungsmechanik wurde zuvor im CAD-Modell untersucht und hinsichtlich der Hebellängen so ausgelegt, dass eine geeignete Übertragung zwischen Servoweg und Klappenbewegung erreicht wird. Die Anbindung erfolgt über ein Klemmstück, das am Auslaufrohr des Eimers befestigt wird. Dadurch bleibt die Baugruppe einerseits sicher mit dem Eimer verbunden, andererseits aber auch ohne dauerhafte Veränderung des Behälters wieder lösbar, etwa für Reinigung oder Lagerung.

Im oberen Bereich der Baugruppe ist zusätzlich ein Gehäuse für die lokale Bedienung vorgesehen. Dort sind ein OLED-Display und ein Drehencoder untergebracht, sodass Zustände, Gewichtswerte und Menüfunktionen direkt an der Anlage angezeigt und bedient werden können. Das Gehäuse nimmt außerdem die zugehörige Verkabelung sowie den Servoanschluss auf und wird als eigenständige Baugruppe über einen einzelnen Steckverbinder mit der darunterliegenden Basisstruktur verbunden.

Für den späteren Dosierprozess ist diese Baugruppe von besonderer Bedeutung, da Stellweg, Reproduzierbarkeit und mechanisches Spiel der Betätigung das Dosierverhalten direkt beeinflussen. Damit bildet sie die mechanische Grundlage für die in den späteren Kapiteln untersuchten Dosierstrategien.

### 3.3 Fertigung und 3D-Druck

Für den mechanischen Prototypen wurden die meisten speziell projektspezifischen Bauteile im 3D-Druck gefertigt. Dies ermöglichte eine schnelle Umsetzung mehrerer Konstruktionsiterationen sowie die direkte Integration funktionaler Details wie Aufnahmen, Halterungen, Kabelführungen und Montagehilfen in die Bauteilgeometrie. Gerade für die vorliegende Prototypenentwicklung bot der 3D-Druck damit den Vorteil, konstruktive Anpassungen ohne aufwendige konventionelle Fertigungsschritte kurzfristig umsetzen zu können.

Die Konstruktion der Bauteile erfolgte in FreeCAD, die Druckvorbereitung mit den Slicer-Programmen Cura [2] und Bambu Studio [3]. Bei der Gestaltung wurde bereits früh auf eine druckgerechte Geometrie geachtet, sodass kritische Überhänge weitgehend vermieden werden konnten. Die meisten Bauteile wurden mit Fokus auf ausreichende Stabilität und kurze Fertigungszeit hergestellt. Hierzu kam überwiegend eine 1 mm Düse mit 0,7 mm Schichthöhe zum Einsatz. Nur für Bauteile mit feineren Strukturen, insbesondere das Gehäuse der Bedieneinheit, wurde eine kleinere Düse mit entsprechend geringerer Schichthöhe verwendet.

Nicht alle Komponenten der Mechanik wurden additiv gefertigt. Der Träger für den Abfülleimer wurde bewusst als einfache Holzkonstruktion ausgeführt, da seine Geometrie funktional einfach ist und sich mit geringem Aufwand konventionell herstellen lässt. Der Motorwellenadapter wurde als separates Drehteil aus Stahl gefertigt, um eine belastbare und definierte Kopplung zwischen Motorwelle und Magazinscheibe zu realisieren.

### 3.4 Zusammenbau der Baugruppen

Der Zusammenbau der Anlage erfolgte schrittweise aus den zuvor beschriebenen mechanischen Baugruppen. Zunächst wurden Basisstruktur, Magazinbaugruppe und Träger für den Abfülleimer montiert, anschließend die Dosiereinheit sowie die weiteren Sensor- und Elektronikkomponenten ergänzt. Abbildung 3.5 zeigt den daraus entstandenen realen Aufbau der Anlage.

Ein wesentlicher Aspekt des Zusammenbaus war, dass in der Konstruktion bereits an vielen Stellen definierte Aufnahmen, Schraubpunkte und Durchführungen vorgesehen wurden. Dadurch konnten die meisten gedruckten Bauteile direkt miteinander verschraubt und die Komponenten mit geringem Justageaufwand montiert werden. Wägezelle und Wiegeteller wurden über die vorhandenen Gewinde befestigt, der Motorwellenadapter auf der Motorwelle fixiert und die



Steckverbinder über die vorgesehenen Klemmpunkte mechanisch gesichert. Auch die Stabmagnete in der Magazinscheibe sowie die Ausrichtung der Reedkontakt-Halterung konnten auf diese Weise gezielt angepasst werden.

Der eingebaute Getriebemotor verbindet die untere Basis zusätzlich zum äußeren Ring mit der oberen Trägerplatte und erhöht so die Steifigkeit des Aufbaus. Die Dosiereinheit ist als eigenständige Baugruppe ausgeführt und kann über eine einzelne Steckverbindung an die Basis angebunden werden.



Abbildung 3.5: Foto des realen mechanischen Aufbaus der Anlage.

## 4 Elektronik und Hardwareaufbau

Die Elektronik verbindet die mechanischen Baugruppen mit der Steuerung und stellt Sensorik, Aktorik und Energieversorgung für den Abfüllprozess bereit. Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Entscheidungen bei Auswahl, Schaltungsentwurf und Aufbau der Elektronik.

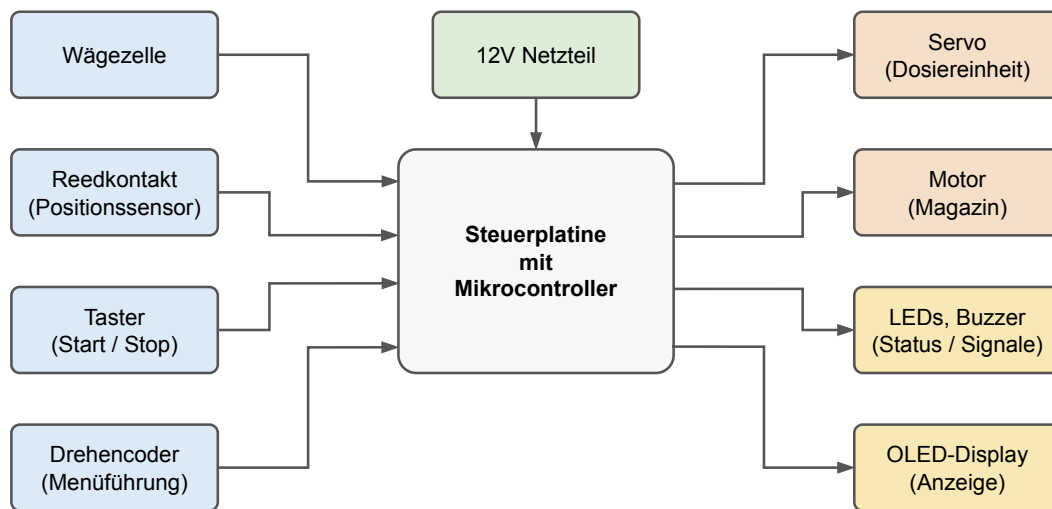
### 4.1 Anforderungen an die Hardware

Die Anforderungen an die Hardware ergeben sich unmittelbar aus dem in Kapitel 2 beschriebenen Funktionsablauf und den in Kapitel 3 vorgestellten mechanischen Baugruppen. Damit der dort erläuterte Ablauf umgesetzt werden kann, muss die Elektronik die nötige Sensorik, Aktorik und Energieversorgung bereitstellen.

Im Mittelpunkt steht die zuverlässige Erfassung der Füllmasse, da diese zugleich Mess- und Zielgröße der späteren Dosierstrategien ist. Daneben muss die Klappe am Auslass reproduzierbar gestellt und das Magazin schrittweise positioniert werden. Hinzu kommen die lokale Bedienung der Anlage sowie eine robuste Versorgung aus einer einzelnen Eingangsspannung. Da die gesamte Elektronik in der Basisstruktur unter dem Magazin untergebracht ist, war zudem ein kompakter und integrierter Aufbau erforderlich. Da ohnehin mehrere Komponenten und zusätzliche Schaltungsteile zusammengeführt werden müssen, wurden diese auf einer gemeinsamen Trägerplatine integriert, anstatt die Module frei zu verdrahten.

### 4.2 Auswahl und Einbindung von Sensorik und Aktorik

Aus den genannten Anforderungen wurde für jede Funktion eine geeignete Komponente ausgewählt. Abbildung 4.1 fasst die elektrischen Komponenten des Gesamtsystems zusammen und ordnet sie den Funktionsgruppen Steuerung, Messung, Aktorik und Bedienung zu. Den Kern bildet die Steuerplatine mit dem Mikrocontroller, an die alle Sensoren, Aktoren und Bedienelemente angebunden sind. Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten und die Gründe für ihre Auswahl beschrieben.



**Abbildung 4.1:** Blockdiagramm der Elektronik. Die Komponenten sind nach Funktion eingefärbt: Steuerung (grau), Sensorik und Eingänge (blau), Versorgung (grün), Aktorik (rot) und Bedienung (gelb).

## Steuerung

Als zentrale Steuerung dient ein ESP32-DevKitV1-Board mit einem ESP32-WROOM-32-Modul. Der ESP32 ist ein Dual-Core-SoC mit integriertem 2,4-GHz-WLAN, dessen Peripherie die für die Anlage benötigten Funktionen ohne zusätzliche Bausteine abdeckt [4]. Für den Betrieb relevant sind vor allem genügend digitale Ein- und Ausgänge, eine hardwarebasierte PWM-Erzeugung für das Servosignal sowie eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle für das Display. Das integrierte WLAN kann später für eine drahtlose Telemetrie oder eine Bedienoberfläche genutzt werden.

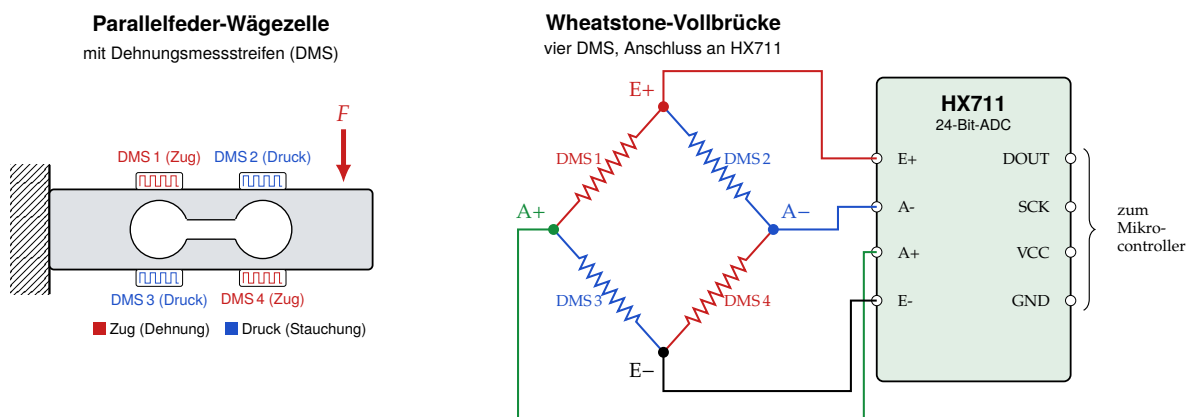
## Gewichtserfassung

Die Füllmasse wird über eine Wägezelle erfasst, die von einem spezialisierten Analog-Digital-Messwandler für Wägezellen, hier einem HX711-Modul, ausgelesen wird. Die Wägezelle verformt sich unter Last geringfügig, und auf ihren Messkörper geklebte Dehnungsmessstreifen ändern dabei ihren elektrischen Widerstand. Sie sind zu einer Wheatstone-Vollbrücke verschaltet, die diese Widerstandsänderung in eine kleine, lastproportionale Differenzspannung umsetzt [5]. Der HX711 verstärkt dieses Brückensignal rauscharm und digitalisiert es mit einem 24-Bit-Wandler [6], woraus die Firmware über eine Kalibrierung die angezeigte Masse berechnet. Die nominelle Auflösung von 24 Bit ist dabei nicht mit der tatsächlichen Messgenauigkeit des Gesamtsystems gleichzusetzen. Für die langsame gravimetrische Dosierung ist die Messkette jedoch ausreichend aufgelöst und erspart einen eigenen Verstärker- und Wandlerentwurf. Da die Gewichtserfassung die zentrale Messgröße der Arbeit liefert, ist ihre zuverlässige Anbindung besonders wichtig.

Abbildung 4.2 zeigt das Zusammenwirken dieser drei Stufen. Der Messkörper ist als Parallelfeder mit zwei Bohrungen ausgeführt, die unter Last eine S-förmige Verformung erzwingt. An



den vier dünnen Biegestellen über und unter den Bohrungen entsteht dabei ein festes Muster aus Dehnung und Stauchung, sodass jede der beiden Oberflächen zugleich einen gedehnten und einen gestauchten Dehnungsmessstreifen trägt (vgl. [5]). Die vier Streifen sind so zu einer Vollbrücke verschaltet, dass sich in jedem Brückenweig ein gedehnter und ein gestauchter Streifen gegenüberstehen. Dadurch addieren sich die vier Widerstandsänderungen zu einem möglichst großen Ausgangssignal, während gleichsinnige Störeinflüsse wie eine Temperaturänderung sich weitgehend aufheben. Aus der lastproportionalen Differenzspannung zwischen den Brückenmittelpunkten A+ und A– gewinnt der HX711 über seinen Verstärker und den 24-Bit-Wandler den digitalen Messwert, aus dem die Firmware die Masse berechnet.

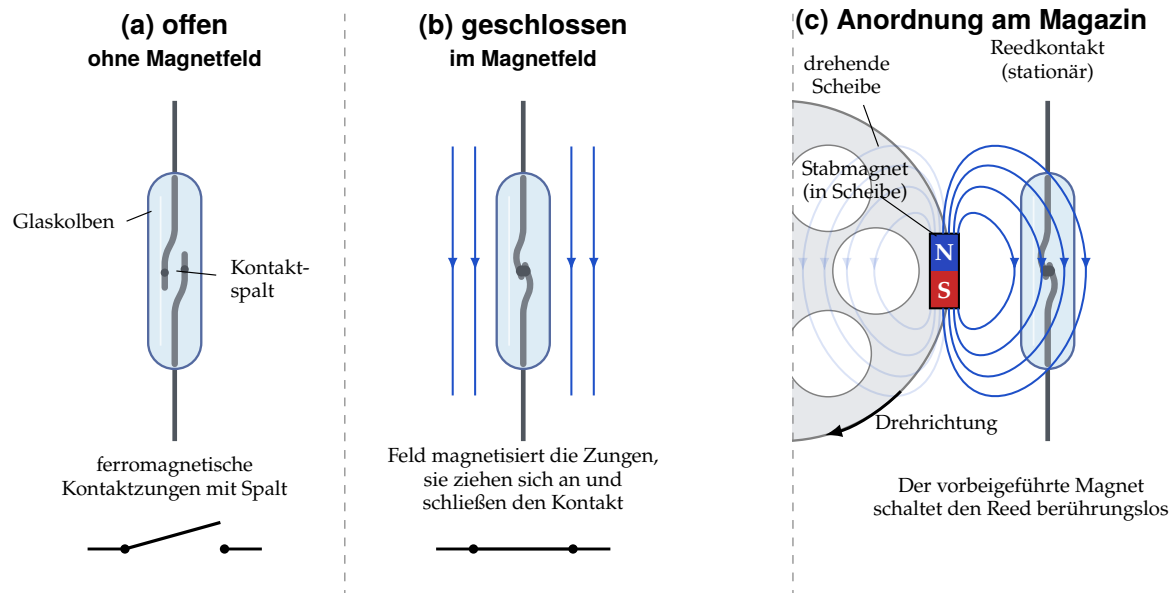


**Abbildung 4.2:** Prinzip der gravimetrischen Messkette aus DMS-Wägezelle, Wheatstone-Vollbrücke und HX711. Eigene Darstellung nach [5, 6].

## Positionserkennung

Die Position des Magazins wird über Magnete an der Magazinscheibe und einen Reedkontakt erkannt, wie bereits in Abschnitt 3.2.3 mechanisch eingeordnet. Ein Reedkontakt besteht aus zwei ferromagnetischen Kontaktzungen, die luftdicht in einem Glasröhrchen eingeschlossen sind und durch ein äußeres Magnetfeld geschlossen werden [7]. In dieser Anlage sind die Magnete an der drehenden Magazinscheibe mitgeführt, während der Reedkontakt ortsfest bleibt. Gewählt wurde diese Lösung, weil sie berührungslos schaltet, keine eigene Versorgung an der drehenden Scheibe benötigt und mit ihrem gekapselten Schaltelement gegenüber einer möglichen Verschmutzung durch Honig unempfindlicher ist als ein offener mechanischer Kontakt. Beim Drehen des Magazins löst jeder vorbeigeführte Magnet ein definiertes Schaltsignal aus, aus dem die Steuerung die jeweilige Glasposition ableitet. Abbildung 4.3 fasst Funktionsprinzip und Einbau zusammen. Ohne äußeres Feld halten die Kontaktzungen den in Teilbild (a) gezeigten Spalt. Ein achsparalleles Magnetfeld magnetisiert beide Kontaktzungen entlang der Feldrichtung, wodurch an ihren gegenüberliegenden Enden entgegengesetzte Pole entstehen und sich die Zungen bis zum Schließen des Stromkreises anziehen, wie in Teilbild (b) dargestellt. Teilbild (c) zeigt den Einbau. Der Reedkontakt ist ortsfest mit radial zur Magazinscheibe ausgerichteter Längsachse montiert, während die Magnete am Scheibenrand mitlaufen. Läuft

ein Magnet vorbei, durchsetzt sein Feld die Zungen kurzzeitig achsparallel und schaltet den Kontakt berührungslos, woraus die Steuerung die erreichte Position ableitet.



**Abbildung 4.3:** Funktionsprinzip des Reedkontakts und seine Anordnung am Magazin (nicht maßstabsgetreu). Eigene Darstellung nach [7].

## Aktorik

Die eigentlichen Aktoren der Anlage sind der Servomotor und der Getriebemotor. Darüber hinaus sind Reserveausgänge vorgesehen, etwa für eine spätere Heizung des Auslassbereichs, die das Fließverhalten des Honigs gezielt beeinflussen könnte. Sie sind im Prototyp bewusst angelegt, um spätere Erweiterungen ohne Eingriff in die Platine zu ermöglichen.

Die Klappe am Auslass wird über einen Servomotor gestellt. Verwendet wird ein digitales Modellbau-Servo (FEETECH FT5320M) mit Metallzahnradern und Aluminiumgehäuse [8]. Sein Blockiermoment gibt das Datenblatt mit 20 kg cm bei 7,4 V und 16,5 kg cm bei 6 V an, wobei 20 kg cm etwa 2 N m entsprechen; als zulässiger Versorgungsbereich sind 4 bis 8,4 V angegeben. Eine höhere Versorgungsspannung liefert damit ein größeres Stellmoment und eine höhere Stellgeschwindigkeit, was die in Abschnitt 4.3 beschriebene einstellbare Servoversorgung gezielt ausnutzt. Über die in Abschnitt 3.2.4 beschriebene Hebelmechanik wird dieses Moment auf die Klappe übertragen und stellt dort ausreichend Kraft für deren Betätigung bereit. Ein solches Servo enthält neben dem Motor bereits ein Getriebe und eine interne Lage-regelung, sodass eine vorgegebene Position selbsttätig angefahren und gehalten wird. Damit ist es für diese Anwendung gut geeignet, da die Klappenwinkel wiederholgenau angefahren werden, ohne dass eine eigene Sensorik oder Regelung der Klappenstellung erforderlich ist. Die Sollposition wird über ein PWM-Signal vorgegeben, dessen Pulsweite die Winkelstellung bestimmt. Für den Stellbereich von 180° nennt das Datenblatt eine Pulsweite von 0,5 bis 2,5 ms

mit einer Mittelstellung bei 1,5 ms, was der von der Firmware mit 50 Hz erzeugten Ansteuerung entspricht.

Der Magazinantrieb erfolgt über einen Gleichstrom-Getriebemotor, der die Magazinscheibe schrittweise weiterdreht. Seine Ansteuerung einschließlich der Bremsfunktion wird im Schaltungsentwurf näher beschrieben (Abschnitt 4.3).

### **Bedienung und Anzeige**

Für die Bedienung direkt an der Anlage sind ein Drehencoder, zwei Taster und ein OLED-Display vorgesehen. Als Anzeige dient ein verbreitetes 0,96 Zoll-OLED-Modul mit SSD1306-Controller und einer Auflösung von  $128 \times 64$  Pixeln, das über I<sup>2</sup>C angesteuert wird [9]. Seine Anzeigeeinhalte im Betrieb zeigt Abbildung 5.3 in Kapitel 5. Als optische Rückmeldung dient vor allem der bereits in Abschnitt 3.2.1 erwähnte LED-Streifen, der den Anlagenzustand anzeigt, ergänzt durch einzelne LEDs und einen Summer für eine einfache akustische Rückmeldung.

## **4.3 Schaltungsentwurf**

Die Steuerplatine ist als Trägerplatine ausgeführt, die das ESP32-Board aufnimmt und mit der Versorgung, der Sensorik, der Aktorik und der Bedienung verbindet. Während die Steuerplatine in Abbildung 4.1 nur als ein Block im Gesamtsystem erscheint, zeigt Abbildung 4.4 ihren internen funktionalen Aufbau.

Aus der Eingangsspannung erzeugen zwei Schaltregler die internen Versorgungen. Das OLED-Display ist über eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle angebunden, während Taster, Drehencoder und Reedkontakt als digitale Eingänge zur Steuerung geführt sind. Die Ausgänge zu den Relais sowie zu den LEDs und dem Summer werden über einen Darlington-Array als Treiber geschaltet, da der Mikrocontroller diese Lasten nicht direkt treiben kann. Neben dem Relais für den Magazinmotor sind ein zweites Relais sowie zwei MOSFET-Ausgänge vorgesehen. Diese sind im aktuellen Prototyp noch nicht vollständig belegt und dienen als Reserve für spätere Erweiterungen wie eine Heizung oder ein zusätzliches Ventil.

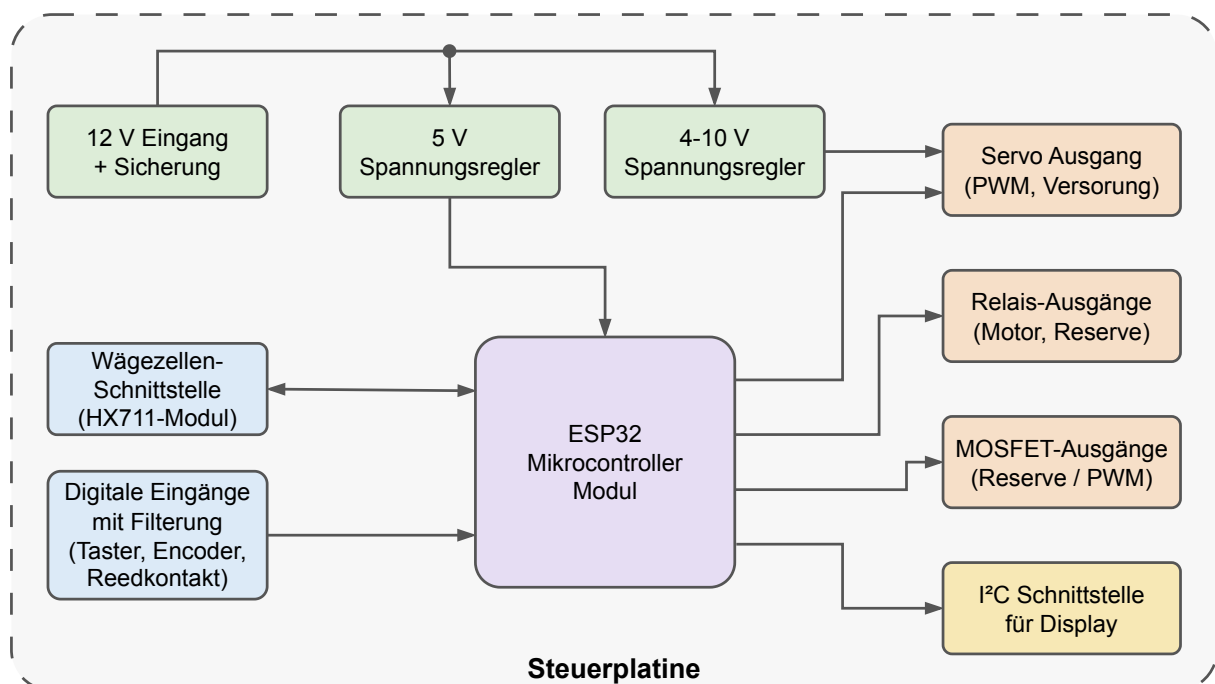


Abbildung 4.4: Blockdiagramm des internen funktionalen Aufbaus der Steuerplatine.

Die gesamte Anlage wird aus einer einzelnen Gleichspannung von 12 bis 40 V versorgt. Eingangsseitig schützen eine Sicherung sowie Schottky-Dioden vor Verpolung und vor einer Rückspeisung aus dem USB-Anschluss des ESP32, über den während der Entwicklung programmiert wird. Aus der Eingangsspannung erzeugen zwei Schaltregler vom Typ LM2576 die internen Spannungen, eine feste 5-V-Schiene für die Logik und eine einstellbare Schiene für den Servomotor. Die 3,3-V-Versorgung der Logik stellt das ESP32-Board über seinen integrierten Regler bereit.

### Einstellbare Servoversorgung

Die Versorgung des Servomotors ist bewusst einstellbar ausgeführt. Über die Versorgungsspannung lassen sich Stellmoment und Stellgeschwindigkeit des Servomotors beeinflussen. Eine niedrigere Spannung begrenzt das Stellmoment und verringert so das Risiko einer mechanischen Überlastung, während eine höhere Spannung ein größeres Stellmoment und eine schnellere Klappenbewegung ermöglicht. Kommt es dennoch zu einer Blockade, begrenzt der überlast- und kurzschlussfeste Schaltregler den Strom und regelt die Spannung herunter, sodass kein Schaden entsteht. Dies ist jedoch eher eine Rückfallabsicherung als ein gezielt vorgesehener Dauerbetrieb. Da sich der sinnvolle Spannungswert am Prototyp noch schlecht abschätzen ließ, wurde eine variabel einstellbare Lösung gewählt. Abbildung 4.5 zeigt den zugehörigen Schaltungsausschnitt mit den Bauteilbezeichnungen.

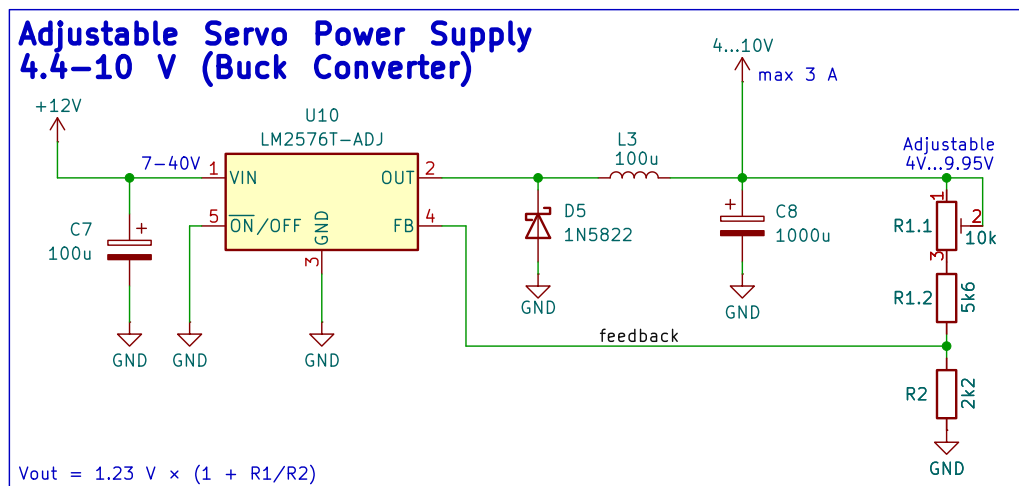


Abbildung 4.5: Schaltungsausschnitt der Servo-Versorgung mit Buck-Wandler.

Die Ausgangsspannung des eingesetzten Reglers LM2576-ADJ wird durch die Dimensionierung eines Spannungsteilers im Rückkopplungszweig festgelegt und ergibt sich nach dem Datenblatt [10] zu

$$U_{out} = U_{ref} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right), \quad U_{ref} = 1,23 \text{ V}.$$

Den oberen Zweig des Spannungsteilers bilden der Festwiderstand R1.2 mit 5,6 kΩ in Reihe mit dem Potentiometer R1.1, das sich von 0 bis 10 kΩ verstellen lässt. Den unteren Zweig bildet ein Widerstand mit  $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ . In der Minimalstellung des Potentiometers ist  $R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega$ , in der Maximalstellung  $R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega = 15,6 \text{ k}\Omega$ . Daraus ergeben sich die kleinste und die größte Ausgangsspannung zu

$$U_{out,min} = 1,23 \text{ V} \left( 1 + \frac{5,6 \text{ k}\Omega}{2,2 \text{ k}\Omega} \right) \approx 4,36 \text{ V} \quad U_{out,max} = 1,23 \text{ V} \left( 1 + \frac{15,6 \text{ k}\Omega}{2,2 \text{ k}\Omega} \right) \approx 9,95 \text{ V}.$$

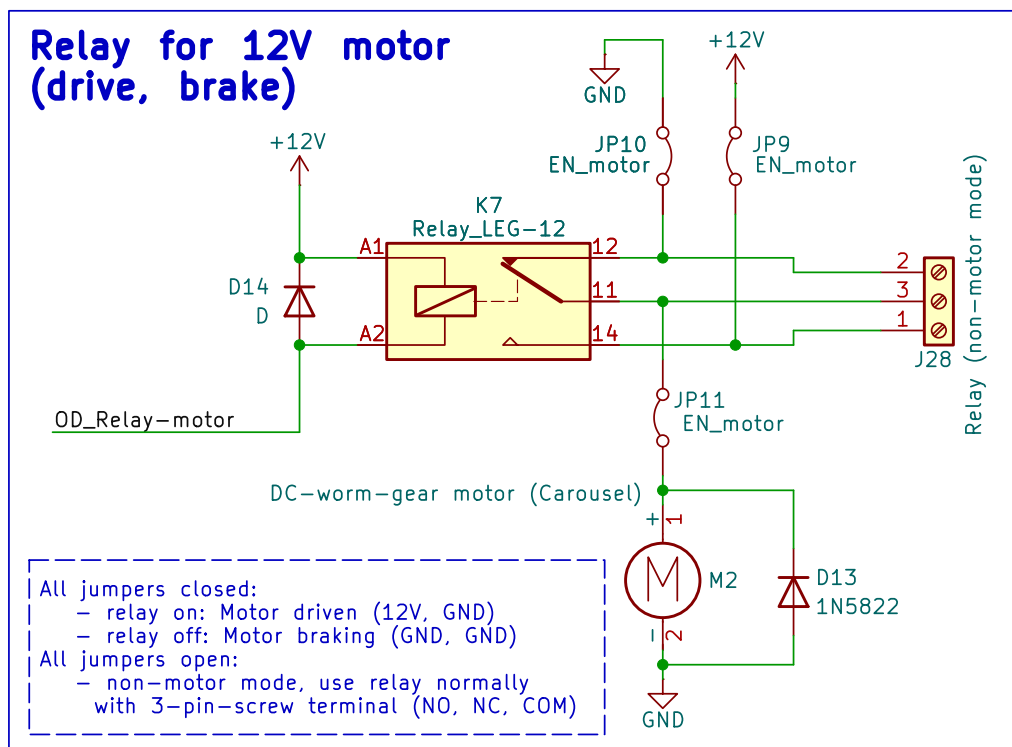
Der einstellbare Bereich von rund 4,4 bis 9,9 V deckt damit die für den Servomotor sinnvollen Versorgungsspannungen ab. Die Drossel wurde mit 100 µH für einen Ausgangsstrom von bis zu 3 A ausgelegt. Ein Stützkondensator fängt die Stromspitzen beim Stellen der Klappe ab. Zusätzlich trennt ein schaltbarer High-Side-Transistor den Servomotor zwischen den Füllvorgängen von der Versorgung, um Halteströme und ein Zittern in der Ruhelage zu vermeiden.

### Antrieb und Bremsung des Magazinmotors

Damit ein Glas reproduzierbar an der Wägeposition zum Stehen kommt, darf das Magazin nach dem Abschalten des Antriebs nicht unkontrolliert nachlaufen. Der Getriebemotor wird daher nicht nur ein- und ausgeschaltet, sondern zusätzlich aktiv gebremst. Realisiert ist dies über ein Relais, dessen Kontakte so verschaltet sind, dass der Motor im angezogenen Zustand an die Versorgung gelegt und im abgefallenen Zustand kurzgeschlossen wird. Durch den Kurzschluss wirkt der Motor als Generator gegen seine eigene Drehung und kommt dadurch deutlich

schneller zum Stillstand. Dieses aktive Bremsen verringert den Nachlauf des Magazins und verbessert die Wiederholgenauigkeit der Positionierung.

Auf eine Ansteuerung über eine MOSFET-Brücke wurde verzichtet. Eine Halbbrücke hätte zum Bremsen zwar ausgereicht, und eine Vollbrücke hätte zusätzlich eine Drehrichtungsumkehr ermöglicht. Beides ist hier jedoch nicht erforderlich, da das Magazin nur in eine Richtung weitertransportiert und keine stufenlose Drehzahlsteuerung benötigt wird. Das Magazin dreht über das angebaute Schneckengetriebe ohnehin sehr langsam mit etwa 7 Umdrehungen pro Minute bei 12 V, sodass ein einfaches Schalten zwischen vollem Antrieb und Stillstand genügt. Die Relaislösung erfüllt die Funktion damit mit weniger Bauteilen. Über Steckbrücken lässt sich das Relais zudem als gewöhnlicher Schaltausgang für eine andere Aufgabe nutzen. Abbildung 4.6 zeigt den zugehörigen Schaltungsausschnitt.



**Abbildung 4.6:** Schaltungsausschnitt der Antriebs- und Bremsschaltung des Magazinmotors über ein Relais.

Der vollständige Schaltplan der Steuerplatine befindet sich in Anhang A. An dieser Stelle wurden nur die Schaltungsteile herausgegriffen, die für dieses Projekt charakteristisch sind oder eine bewusste Auslegungsentscheidung erfordern.

## 4.4 PCB-Layout und Fertigung

Das Layout der Steuerplatine wurde in KiCad, einem quelloffenen Programm für Elektronikentwurf und Leiterplattenlayout [11], erstellt. Angestrebt wurde eine doppelseitige Platine, bei der die meisten Leiterbahnen auf der Rückseite verlaufen, während die Vorderseite überwiegend als durchgehende Massefläche ausgeführt ist. Im Bereich des Relais, über das sich später eine mit Netzspannung (230 V) betriebene Last wie eine Heizung schalten ließe, wurden gezielt kupferfreie Isolationsflächen vorgesehen, um einen ausreichenden Abstand zu den übrigen Leiterbahnen sicherzustellen.

Die Abmessungen orientieren sich an einem vorhandenen Platinenrohling im Europakartenformat. Außerdem wurde auf gut zugängliche Anschlüsse und mehrere Testpunkte geachtet, die die spätere Inbetriebnahme und Fehlersuche erleichtern. Abbildung 4.7 zeigt das fertige Layout mit den Leiterbahnen beider Lagen.

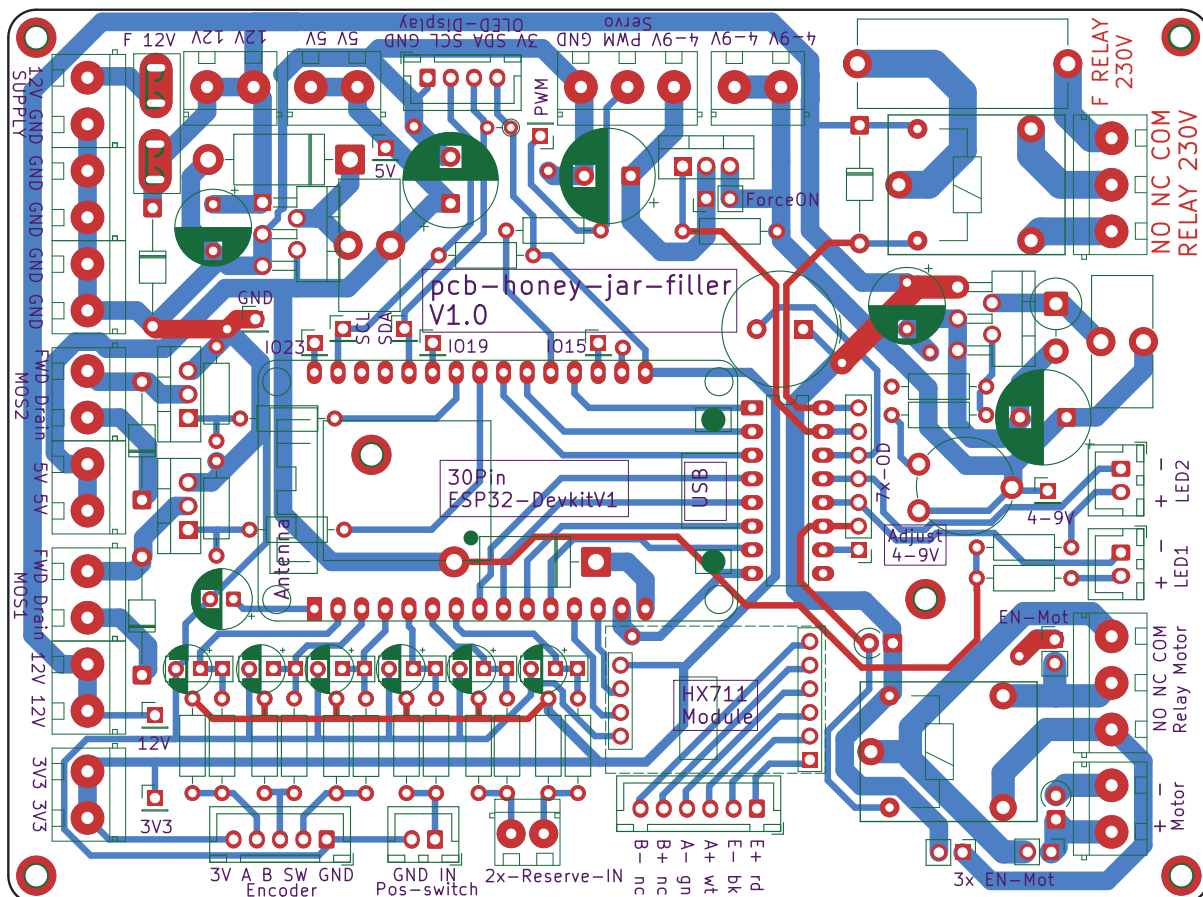


Abbildung 4.7: Layout der Steuerplatine. Leiterbahnen der Vorderseite in Rot, Leiterbahnen der Rückseite in Blau.



Die Leiterplatte wurde nicht extern bestellt, sondern selbst auf einer CNC-Fräse gefertigt. Dieser Weg war für eine Einzelanfertigung schneller und günstiger als eine externe Fertigung mit Mindestbestellmenge. Da die Platine ausschließlich bedrahtete Bauteile verwendet und keine hohen Anforderungen an feine Strukturen stellt, ließ sie sich gut fräsen.

Für die Fertigung wurden zunächst die Gerber-Daten aus KiCad exportiert und mit der Software `pcb2gcode`<sup>1</sup> in Fräsbahnen (sog. G-Code) umgewandelt. Anschließend wurde die Platine in mehreren Schritten gefräst, beginnend mit den Bohrungen, gefolgt vom Isolationsfräsen der Leiterbahnen samt Beschriftung und dem Freifräsen der größeren Flächen. Für die zweite Lage wurde der Vorgang entsprechend wiederholt, bevor die Platine zum Schluss aus dem Rohling ausgefräst wurde. Danach wurde die Platine von Hand bestückt. Nach dem Löten wurde die bestückte Platine mit einem transparenten Schutzlack auf Acrylharzbasis eingesprüht, der die Isolationseigenschaften verbessert und vor Korrosion schützt. Abbildung 4.8 zeigt die gefräste Vorderseite der Platine.

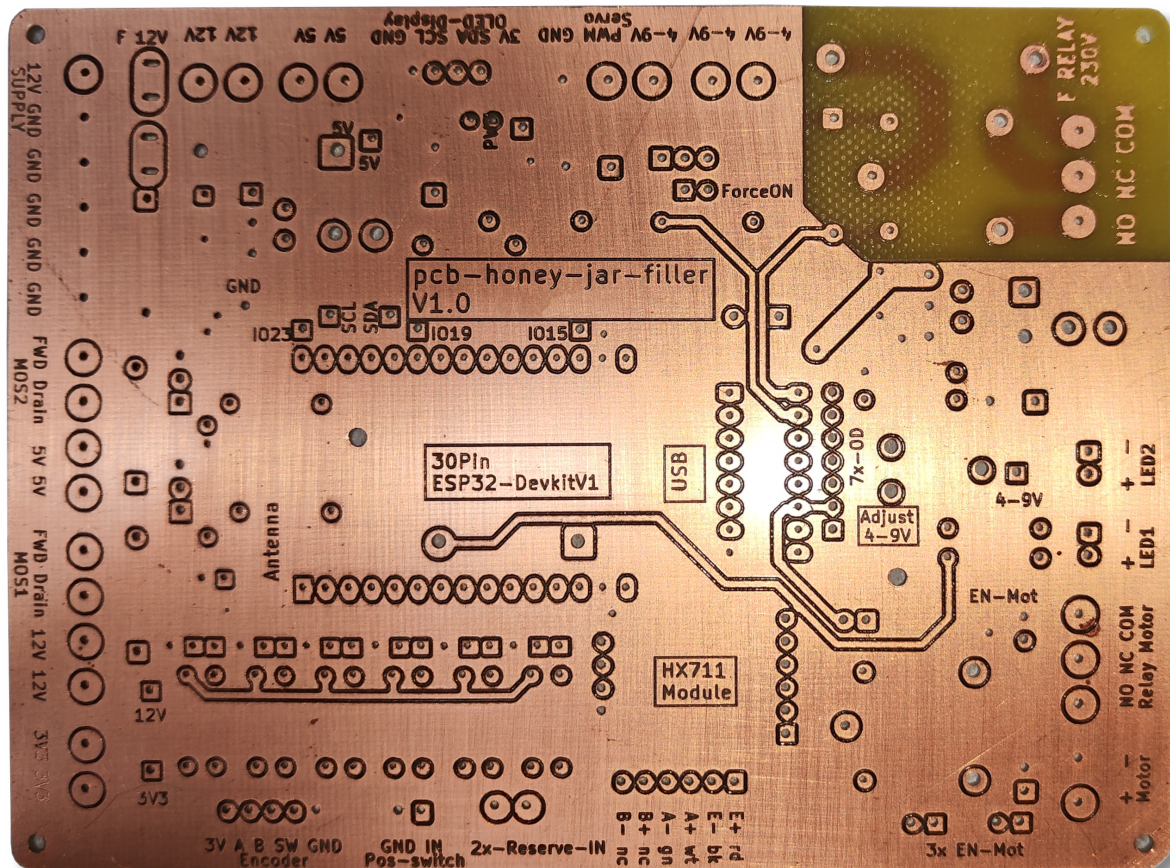


Abbildung 4.8: Gefräste Vorderseite der Leiterplatte.

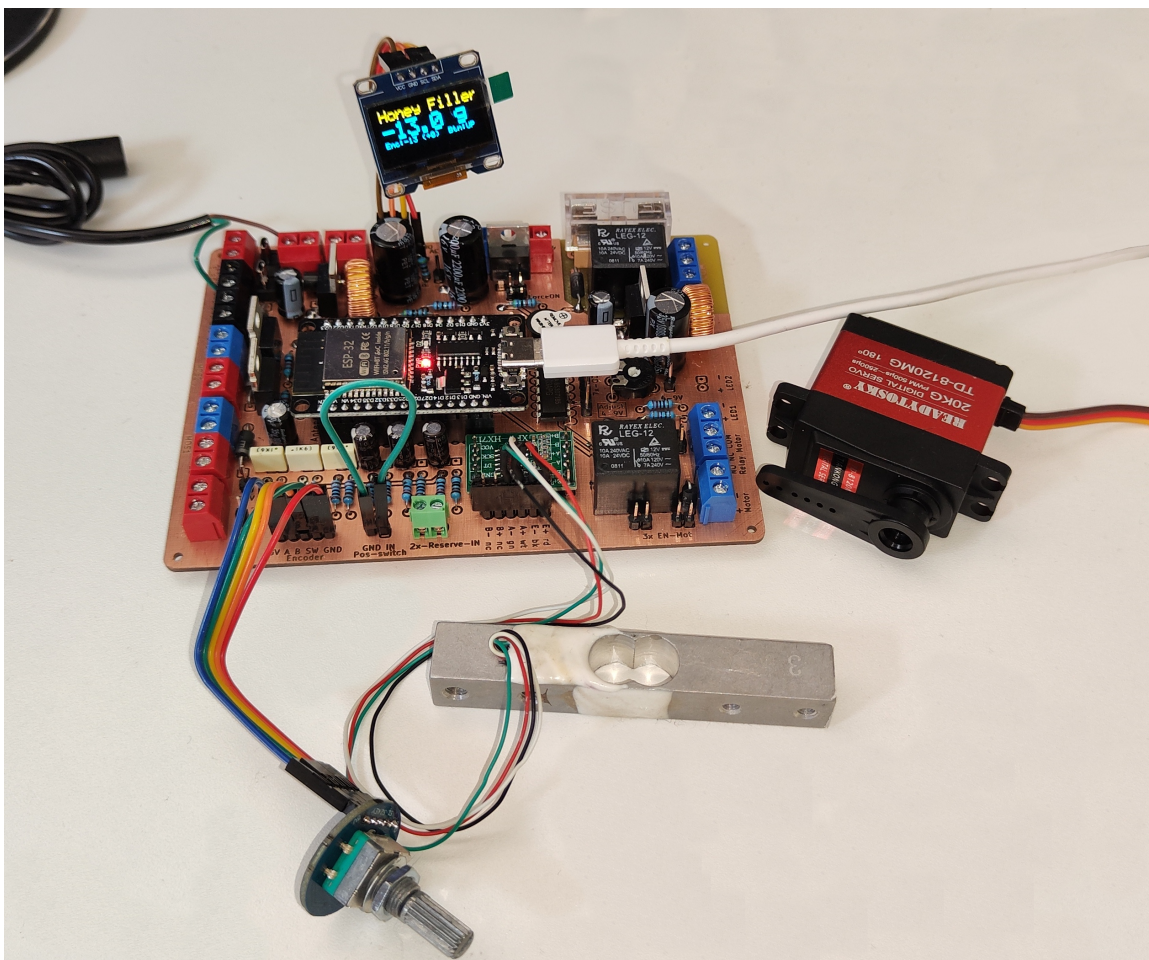
<sup>1</sup>Quelloffenes Werkzeug zur Umwandlung von Gerber-Daten in Fräsbahnen, <https://github.com/pcb2gcode/pcb2gcode>.



## 4.5 Aufbau, Inbetriebnahme und Einzeltests

Vor dem Einbau ins Gesamtsystem wurden die einzelnen Funktionsgruppen schrittweise in Betrieb genommen. Zuerst wurden die Versorgungsspannungen an den Testpunkten gemessen und die Ausgangsspannung des einstellbaren Reglers auf den vorgesehenen Wert für den Servomotor eingestellt.

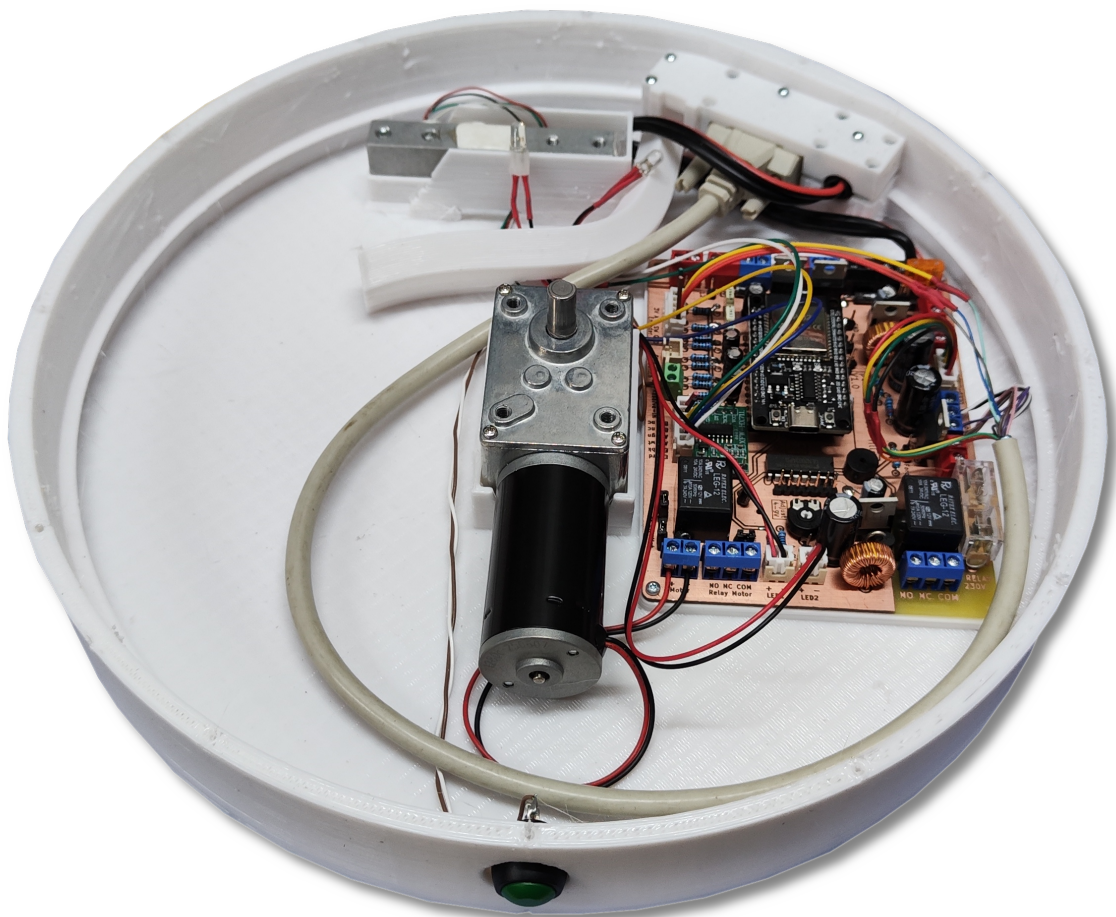
Anschließend wurde ein einfaches Testprogramm geschrieben, mit dem sich die Ein- und Ausgänge einzeln prüfen ließen. Die Auslesung der Wägezelle, die Signale des Drehencoders sowie alle digitalen Eingänge wurden dabei über die UART-Schnittstelle protokolliert und kontrolliert. Display und Servomotor ließen sich zudem direkt prüfen, indem das Display Testinhalte wie das aktuelle Gewicht und die Encoderwerte anzeigte und der Servomotor eine feste Bewegungssequenz abfuhr. Abbildung 4.9 zeigt diesen Testaufbau, bei dem Drehencoder, Wägezelle, Servomotor und Display provisorisch an die bestückte Platine angeschlossen sind und das Testprogramm läuft.



**Abbildung 4.9:** Testaufbau der bestückten Steuerplatine mit provisorisch angeschlossenem Drehencoder, Wägezelle, Servomotor und Display.

Ein abschließender Funktionstest mit allen angeschlossenen Peripheriekomponenten bestätigte die grundsätzliche Funktion der Steuerplatine und damit die Systembasis für die folgenden Kapitel.

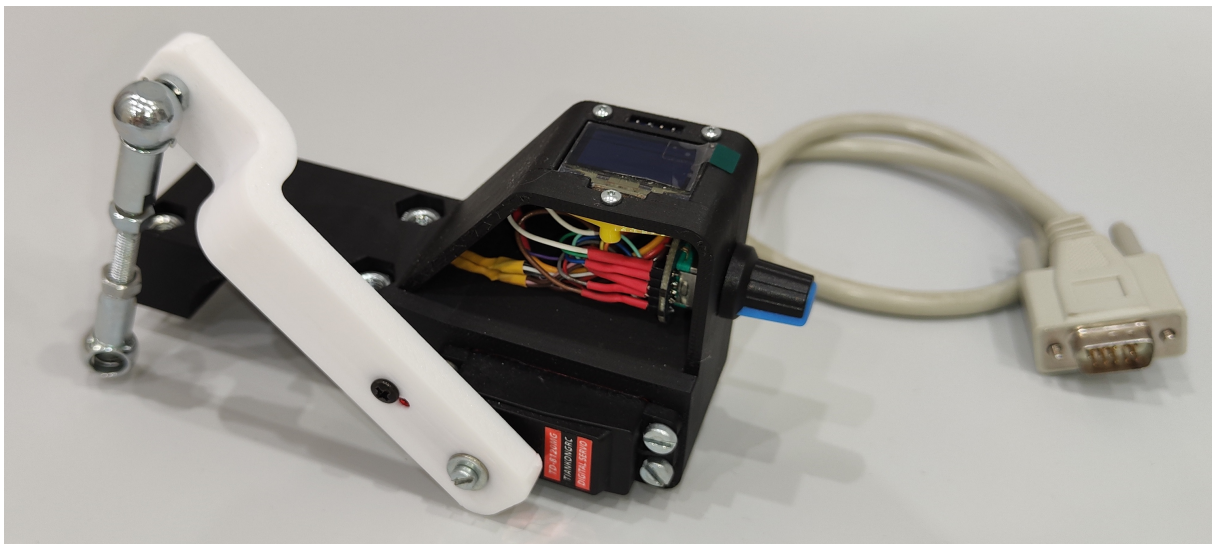
Nach den erfolgreichen Einzeltests wurde die Elektronik in die Basisstruktur der Anlage integriert. Die Platine wurde dazu in den dafür vorgesehenen Sockel geschraubt und alle Komponenten verkabelt. Wo es sinnvoll war, etwa für LEDs, Wägezelle, Servomotor und Display, wurden JST-Steckverbinder eingesetzt, da sie die Montage vereinfachen und Verpolungen vermeiden. Für Hochstrom- und Versorgungsanschlüsse sind weiterhin einige Schraubklemmen vorgesehen. Diese sind zur einfacheren Zuordnung farblich codiert, etwa Schwarz für Masse, Grün für Eingänge, Blau für Ausgänge und Rot für die Spannungsversorgung. Abbildung 4.10 zeigt die geöffnete Basisstruktur mit montierter Platine während der Verkabelung. Vorn ist der eingebaute Taster zu erkennen, hinten das in einer Klemme geführte neunpolige Kabel mit SUB-D-Stecker (vergleichbar einem älteren RS232-Kabel), über das die externe Dosiereinheit angebunden wird.



**Abbildung 4.10:** Geöffnete Basisstruktur mit montierter Steuerplatine während der Verkabelung. Vorn der eingebaute Taster, hinten das neunpolige Kabel mit SUB-D-Stecker zur Dosiereinheit.

Die Versorgung der Anlage wird über einen Hohlstecker zugeführt, der zusammen mit dem Datenkabel in der Klemme an der Basisstruktur nach außen geführt ist und an den ein Steckernetzteil mit 12 V angeschlossen wird. Auf eine direkte Versorgung mit 230 V und ein in die Basis integriertes Netzteil wurde bewusst verzichtet, um die Gefahr durch hohe Spannungen zu vermeiden und die Anforderungen an die Schutzklasse einfacher einzuhalten. Da die Elektronik dadurch vollständig im Kleinspannungsbereich bleibt, ist das externe Steckernetzteil hier die sicherere Lösung.

Die Dosiereinheit wurde, wie bereits in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, in das dort vorgestellte gedruckte Gehäuse integriert. Aus elektrischer Sicht sind darin der Servomotor sowie das OLED-Display und der Drehencoder zusammengefasst. Der Servomotor ist in das Gehäuse geschraubt, Display und Drehencoder sind im oberen Bereich untergebracht. Alle drei sind mit dem nach hinten herausgeführten neunpoligen Kabel verbunden, das über den SUB-D-Stecker an die Basis und damit an die Steuerplatine angeschlossen wird. Abbildung 4.11 zeigt die Einheit mit diesen Komponenten.



**Abbildung 4.11:** Dosiereinheit mit eingebautem Servomotor sowie integriertem Display und Drehencoder, angebunden über das herausgeführte Kabel mit SUB-D-Stecker.



## 5 Firmware und Steuerungskonzept

Die Firmware verbindet die in den vorherigen Kapiteln beschriebene Sensorik und Aktorik zu einem funktionsfähigen Anlagenbetrieb. Sie steuert den Ablauf eines Füllvorgangs, verarbeitet die Sensordaten und stellt die Bedienung bereit. Dieses Kapitel beschreibt die Softwarearchitektur, den Prozessablauf sowie Bedienung und Fehlerbehandlung. Die eigentliche Dosierlogik, also die Steuerung der Klappe während des Füllens, ist bewusst als austauschbarer Bestandteil ausgeführt und wird erst in den Kapiteln 7 bis 9 untersucht.

### 5.1 Anforderungen an die Firmware

Die Anforderungen an die Firmware ergeben sich aus dem Prozessablauf und dem Bedienbedarf der Anlage. Sie muss die Gläser positionieren, die Wägezelle kontinuierlich auslesen, Klappe und Magazinantrieb ansteuern und den gesamten Ablauf zuverlässig steuern. Da die Gewichtserfassung die zentrale Messgröße liefert, muss sie zeitlich stabil und unabhängig von der Bedienung erfolgen. Gleichzeitig soll sich die Anlage jederzeit bedienen und parametrieren lassen, etwa um Einstellungen während eines laufenden Füllvorgangs anzupassen, ohne die Gewichtserfassung oder den Ablauf zu stören.

Eine weitere Anforderung ergibt sich aus der vergleichenden Untersuchung der Dosierstrategien. Damit sich diese systematisch entwickeln, erproben und vergleichen lassen, muss die Firmware verschiedene Dosierstrategien unterstützen und die relevanten Prozessdaten aufzeichnen können. Der allgemeine Anlagenbetrieb und die eigentliche Dosierlogik sind daher bewusst getrennt, sodass die Dosierstrategie austauschbar bleibt und die Firmware als gemeinsame Grundlage für deren spätere Untersuchung dient.

### 5.2 Softwarearchitektur und Task-Struktur

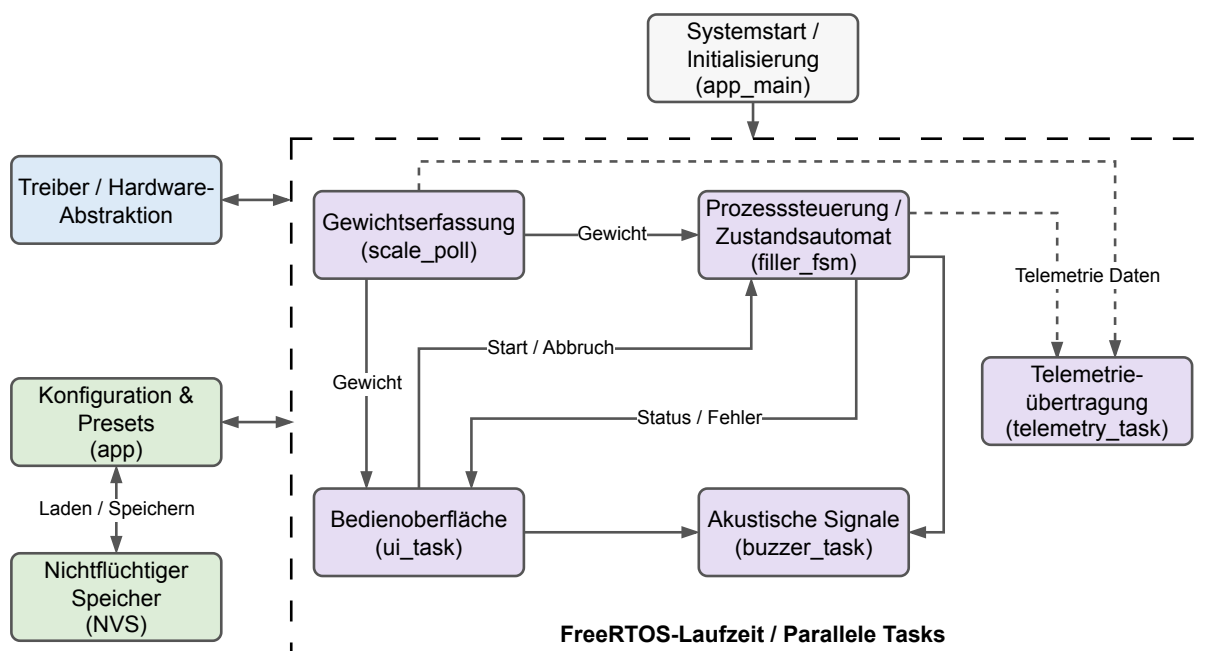
Die Firmware ist in C auf Basis des ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) in der Version 5.5.2 umgesetzt und nutzt dessen integriertes Echtzeitbetriebssystem FreeRTOS für die nebenläufige Ausführung mehrerer Aufgaben (Tasks), zwischen denen der Scheduler umschaltet [12]. Da der verwendete ESP32 über zwei Prozessorkerne verfügt, verteilt die im ESP-IDF eingesetzte SMP-Variante von FreeRTOS diese Tasks auf beide Kerne, was die im Folgenden beschriebene Trennung der Gewichtserfassung von der übrigen Verarbeitung ermöglicht. Entwickelt wurde sie in Visual Studio Code, das Übersetzen und Aufspielen erfolgt über die ESP-IDF-Werkzeugkette, der Quellcode ist mit Git versioniert. Der Aufbau ist modular in Komponenten gegliedert, die jeweils eine klar abgegrenzte Aufgabe übernehmen, etwa die Gewichtserfassung, die Klappen- und Motoransteuerung, die Bedienung, die Telemetrie und die eigentliche Fülllogik. Für gängige Standardaufgaben wie das Auslesen des HX711, die Ansteuerung des

OLED-Displays und die Abfrage des Drehencoders werden bereits vorhandene Bibliotheken als Komponenten eingebunden.<sup>1</sup>

Abbildung 5.1 zeigt die Architektur der Firmware mit den wichtigsten Tasks (in der Abbildung violett hinterlegt, jeweils mit dem zugehörigen Quellcode-Namen in Klammern) und den Datenflüssen zwischen ihnen. Die Auslesung der Wägezelle läuft in einem eigenen, hoch priorisierten Task (Gewichtserfassung / `scale_poll`). Die Kommunikation mit dem HX711-IC erfolgt über ein softwareseitig getaktetes serielles Protokoll mit engen Zeitvorgaben. Bleibt dessen Takteingang länger als etwa 60 µs auf High-Pegel, schaltet der Baustein selbsttätig in einen Energiesparmodus [6]. Wird der auslesende Task mitten in einer Übertragung von einem anderen Task verdrängt, kann das den Messwert verfälschen oder einen solchen Reset auslösen. Die Übertragung darf daher nicht unterbrochen werden. Der Task erfasst die Gewichtswerte daher in festem Takt von etwa 100 ms und unabhängig von Bedienung und Ablaufsteuerung. Der jeweils aktuelle Messwert wird zentral bereitgestellt, sodass die übrigen Tasks lesend darauf zugreifen können, ohne die Erfassung zu beeinflussen. Andere Ereignisse wie die Signale des Drehencoders oder die Telemetriedatensätze werden dagegen über Queues zwischen den Tasks ausgetauscht, wodurch Erzeugung und Verarbeitung entkoppelt werden. Die Prozesssteuerung mit dem Zustandsautomaten (`filler_fsm`) steuert den eigentlichen Füllvorgang und greift dabei auf diese Messwerte sowie auf Klappe und Motor zu. Die Bedienoberfläche (`ui_task`) verarbeitet Encoder und Taster und aktualisiert das Display. Prozesssteuerung und Gewichtserfassung stellen ihre Datensätze zusätzlich einer Queue bereit, aus der die niedrig priorisierte Telemetrieübertragung (`telemetry_task`) sie entnimmt und ausgibt, ohne dabei die übrigen Tasks zu blockieren. Wie diese Telemetriedaten aufgebaut sind und weiterverarbeitet werden, beschreibt Abschnitt 5.5.

---

<sup>1</sup>Verwendet werden der HX711-Treiber `esp-idf-lib/hx711` [13], der OLED-Treiber `chill-sam/ssd1306` [14] und der Drehencoder-Treiber `esp-idf-lib/encoder` [15], jeweils aus der ESP-Component-Registry eingebunden.



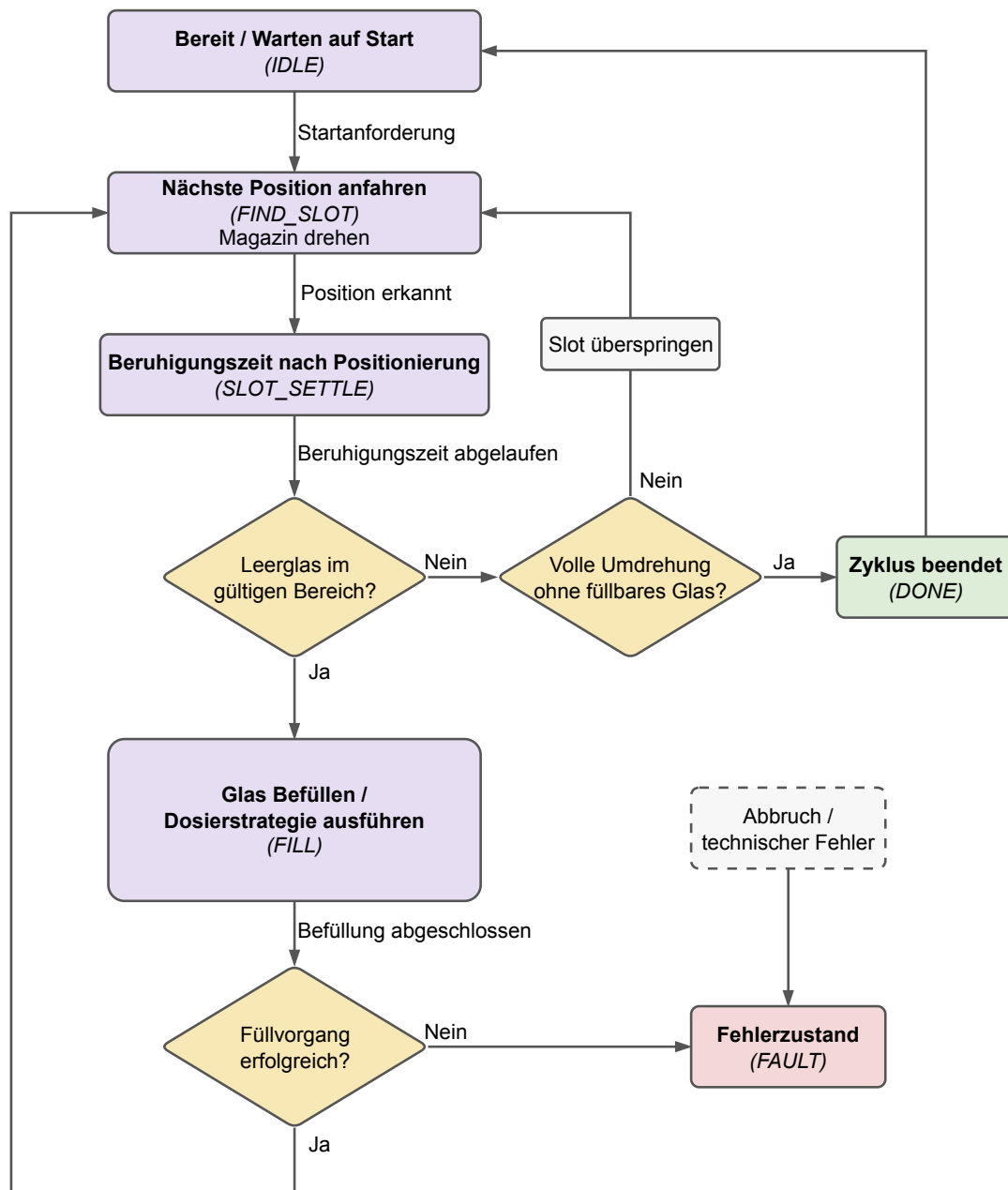
**Abbildung 5.1:** Übersicht der Firmware-Architektur mit den wichtigsten Tasks und den Datenflüssen zwischen Sensorik, Ablaufsteuerung, Bedienung und Telemetrie.

Die Tasks sind über Prioritäten und die Verteilung auf die beiden Prozessorkerne so eingeteilt, dass die Gewichtserfassung Vorrang vor Ablaufsteuerung und Bedienung hat. Die Erfassung der Wägezelle läuft dabei auf einem eigenen Prozessorkern, während Ablaufsteuerung und Bedienung gemeinsam auf dem zweiten Kern ausgeführt werden. Diese Aufteilung stellt sicher, dass die für die Dosierung entscheidenden Messwerte auch bei gleichzeitiger Bedienung zuverlässig und in gleichmäßigem Takt erfasst werden. Der vollständige Firmware-Quellcode mit den beschriebenen Modulen und der zugehörigen Versionshistorie wird über die in Anhang B genannte Projektseite bereitgestellt.

### 5.3 Zustandsautomat und Prozessablauf

Der Anlagenbetrieb ist als Zustandsautomat (englisch *finite state machine*, FSM) umgesetzt, ein verbreitetes Konzept der Ablaufsteuerung, bei dem sich das System zu jedem Zeitpunkt in genau einem definierten Zustand befindet und nur über festgelegte, durch Ereignisse oder Bedingungen ausgelöste Übergänge wechselt [16, Kap. 3]. Abbildung 5.2 zeigt den implementierten Automaten und damit die detaillierte Umsetzung des in Kapitel 2 vereinfacht gezeigten Ablaufs. Er beschreibt den gesamten Betriebsablauf der Anlage, also das schrittweise Weiterdrehen des Magazins, das Prüfen der Positionen sowie das Starten und Beenden des Betriebs. Der Füllvorgang eines einzelnen Glases ist darin nur ein Teilschritt, der als austauschbarer Block ausgeführt wird und dessen Dosierlogik erst in den folgenden Kapiteln behandelt wird. Die Übergänge werden durch Sensorereignisse und Zeitbedingungen ausgelöst, etwa den über

einen GPIO-Eingang eingelesenen Positionsschalter, das Erreichen einer Gewichtsschwelle im abgetasteten Wägesignal oder das Überschreiten einer zulässigen Wartezeit.



**Abbildung 5.2:** Detaillierter implementierter Zustandsautomat der Abfüllanlage mit den wesentlichen Zuständen und Übergängen. Die während des Füllens durchlaufenen Zustände werden von der jeweils gewählten Dosierstrategie gesteuert.

Im Ruhezustand wartet die Anlage auf den Start durch den Bediener. Nach dem Start dreht der Magazintrieb bis zum Signal des Positionsschalters weiter und bringt so die nächste Position an die Wägestelle, wo das Magazin zur Ruhe kommt. Anschließend prüft die Steuerung über die Wägezelle, ob dort ein leeres Glas mit einem Gewicht im erwarteten Bereich steht. Ist die



Position befüllbar, wird der Füllvorgang für dieses Glas ausgeführt und abschließend bewertet, ob die Zielmasse erreicht wurde. Wie dieser Füllvorgang im Detail gesteuert wird, bestimmt die gewählte Dosierstrategie, die der Zustandsautomat an dieser Stelle aufruft, während er selbst nur den allgemeinen Ablauf vorgibt. Nach Abschluss eines Glases dreht das Magazin zur nächsten Position weiter.

Die Anlage arbeitet fortlaufend und beendet den Betrieb nicht nach einer festen Anzahl von Gläsern. Stattdessen wird nur dann in den Endzustand gewechselt, wenn das Magazin eine vollständige Umdrehung ausführt, ohne eine befüllbare Position zu finden, wenn also jede einzelne Position entweder bereits gefüllt oder unbesetzt ist. Diese Abbruchbedingung ist in Abbildung 5.2 als grün hervorgehobener Endzustand dargestellt. Der Vorteil liegt darin, dass der Bediener während des Betriebs jederzeit gefüllte Gläser entnehmen und leere nachstellen kann. Da ein Füllvorgang vergleichsweise lange dauert, kann so kontinuierlich weitergearbeitet werden, ohne die Anlage nach jeweils sechs Positionen neu starten zu müssen, bis alle Gläser gefüllt sind oder ein Fehler auftritt.

## 5.4 Bedienung, Parametrierung und Kalibrierung

Die Anlage lässt sich vollständig lokal bedienen. Dazu dienen ein grüner Start-Taster an der Vorderseite des Magazins und ein Drehencoder mit integriertem Taster, ein OLED-Display zeigt Zustand, Gewicht und Menüführung an. Der Start-Taster steuert den Ablauf abhängig vom aktuellen Zustand. Im Ruhezustand startet ein Tastendruck den Betrieb, während eines laufenden Ablaufs hält ihn ein erneuter Tastendruck wieder an. Der Drehencoder dient der Menüführung und den Einstellungen. Durch Drehen wird im Ruhezustand die Zielmasse verändert oder durch die Menüpunkte navigiert, der integrierte Taster bestätigt die Auswahl. Über das Menü lassen sich zusätzlich weitere Parameter einsehen und verändern.

Die Prozessparameter sind zentral definiert und werden dauerhaft im nichtflüchtigen Speicher (NVS) des ESP32 abgelegt, der Schlüssel-Wert-Paare im Flash speichert [17]. Da sich das Prozessverhalten je nach Honig deutlich unterscheidet, lassen sich verschiedene Parametersätze als Voreinstellungen (Presets) speichern und im Betrieb umschalten, etwa für dünnflüssigen oder zähen Honig. Die Parameter sind dabei in zwei Gruppen unterteilt. Rezeptbezogene Parameter wie Zielmasse, Toleranzen, Schwellwerte und Nachtropfzeit hängen vom Honig und vom verwendeten Glas ab und gehören zu diesen umschaltbaren Voreinstellungen. Maschinenbezogene Parameter wie die Kalibrierung der Wägezelle, die Endwinkel der Klappe oder die Grenzen der Glaserkennung beschreiben dagegen die konkrete Anlage und bleiben beim Wechsel des Honigs unverändert. Diese Trennung stellt sicher, dass beim Umschalten der Voreinstellung nicht versehentlich die Kalibrierung der Anlage verändert wird, und erleichtert das reproduzierbare Einstellen für die späteren Versuche.

Vor dem Betrieb sind zwei Kalibrierungen erforderlich. Die Wägezelle wird über einen Nullabgleich und ein bekanntes Referenzgewicht kalibriert, sodass die Rohwerte des HX711 in eine

Masse in Gramm umgerechnet werden. Die Klappe wird über ihre beiden Endwinkel einge-  
lernt, die der vollständig geschlossenen und der vollständig geöffneten Stellung entsprechen.  
Beide Kalibrierwerte gehören zu den maschinenbezogenen Parametern und müssen nur bei  
Änderungen an der Mechanik erneut bestimmt werden.

Abbildung 5.3 zeigt das Menü anhand von vier per Drehencoder angesteuerten Displayinhalten.  
Im Ruhezustand zeigt das Display die aktuelle Nettomasse, den Anlagenzustand mit der akti-  
ven Magazinposition sowie die gewählte Voreinstellung mit Zielmasse. Über das Hauptmenü  
lässt sich unter anderem die Dosierstrategie auswählen, wie im zweiten Bild an der markierten  
Menüzeile zu sehen. Werden aus dem Hauptmenü die Maschinen- beziehungsweise Rezeptein-  
stellungen geöffnet, erscheinen die im dritten und vierten Bild gezeigten Untermenüs mit den  
zuvor beschriebenen maschinen- und rezeptbezogenen Parametern, hier jeweils am Beispiel  
eines Grenzwerts für die Glaserkennung und für die Zieltoleranz.



**Abbildung 5.3:** Fotos des OLED-Displays bei der Bedienung über den Drehencoder: Ruhezustand mit Nettomasse, Zustand und aktiver Voreinstellung, Hauptmenü mit markierter Auswahl der Dosierstrategie sowie je ein Beispiel aus den Untermenüs für Maschinen- und Rezeptparameter.

## 5.5 Fehlerbehandlung, Sicherheit und Datenaufzeichnung

Bei einer erkannten Störung wechselt der Zustandsautomat in einen eigenen Fehlerzustand und überführt die Anlage in einen sicheren Zustand. Da ein Fehler jederzeit auftreten kann, auch bei geöffneter Klappe, werden für diesen sicheren Zustand zuerst die Klappe geschlossen und der Motor gestoppt, bevor der Fehler über Display und Telemetrie gemeldet und der Ablauf angehalten wird. Andernfalls würde der Honig unkontrolliert weiterlaufen und die Anlage verschmutzen. Tabelle 5.1 fasst die erkannten Fehlerfälle und ihre Ursachen zusammen.

| Fehlerzustand                                 | Auslöser / Ursache                                                                                             |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gewicht außerhalb des Bereichs (WEIGHT_RANGE) | Das gemessene Gewicht liegt außerhalb des plausiblen Bereichs.                                                 |
| Motor-Zeitüberschreitung (MOTOR_TIMEOUT)      | Innerhalb der zulässigen Zeit wurde keine Glasposition gefunden.                                               |
| Ausbleibende Reaktion (SERVO_TIMEOUT)         | Nach dem Öffnen der Klappe bleibt eine Gewichtszunahme vollständig aus, es erfolgt keine Reaktion des Systems. |
| Keine aktuellen Messwerte (SCALE_TIMEOUT)     | Die Wägezelle liefert keine gültigen, aktuellen Gewichtswerte mehr.                                            |
| Honig aufgebraucht (EMPTY_HONEY)              | Die maximale Füllzeit wurde überschritten, weil zu wenig oder kein Honig mehr nachfließt.                      |
| Abbruch durch Bediener (USER_ABORT)           | Der Füllvorgang wurde manuell abgebrochen.                                                                     |

**Tabelle 5.1:** Von der Firmware erkannte Fehlerfälle mit ihren Auslösern. In Klammern ist die in der Telemetrie verwendete Bezeichnung angegeben.

Die Fehlerbehandlung ist eng mit dem Prozessablauf verknüpft. So führt etwa ein Gewicht außerhalb des erwarteten Bereichs oder das Überschreiten der zulässigen Zeit für einen Ablaufschritt unmittelbar in den Fehlerzustand. Auch ein Ausbleiben aktueller Messwerte der Wägezelle wird erkannt und als Fehler behandelt, da eine Dosierung ohne gültige Gewichtswerte nicht sinnvoll möglich ist. Ein Abbruch durch den Bediener wird ebenfalls als definierter Zustand behandelt, sodass die Anlage kontrolliert stehen bleibt.

Für die spätere Auswertung zeichnet die Firmware den Prozess über eine eigene Telemetrie-Komponente auf, die in einem eigenen Task läuft und die übrigen Tasks nicht blockiert. Die Datensätze werden zeilenweise als JSON über die serielle Schnittstelle ausgegeben und lassen sich auf einem angeschlossenen Rechner mitschneiden. Aufgezeichnet werden Zustandsübergänge, Fehler, einzelne Messwerte mit Gewicht und Klappenstellung sowie eine Zusammenfassung je Füllvorgang. Diese Daten bilden die Grundlage für die Auswertung in den folgenden Kapiteln.

## 6 Analyse des Dosierprozesses und gemeinsame Versuchsgrundlagen

Mit den vorangegangenen Kapiteln wurden Aufbau und technische Umsetzung der Abfüllanlage beschrieben. Im Folgenden steht nun der Dosierprozess selbst im Mittelpunkt. Ziel dieses Kapitels ist es, die für alle untersuchten Strategien gemeinsamen Prozesseigenschaften, Randbedingungen und Bewertungskriterien als Grundlage für die spätere Analyse zusammenzufassen.

### 6.1 Analyse des Dosierprozesses

Für die Beurteilung geeigneter Dosierstrategien genügt es nicht, lediglich eine funktionsfähige Implementierung des Abfüllvorgangs zu betrachten. Zunächst ist zu klären, welche Eigenschaften des Prozesses das dosiergenaue Abfüllen viskoser Medien erschweren und warum eine einfache, rein statische Ansteuerung der Klappe nur begrenzt zu guten Ergebnissen führt.

Die Stellgröße des Systems ist die Klappenstellung am Auslass des Abfülleimers, angegeben als prozentualer Öffnungsgrad von vollständig geschlossen (0 %) bis vollständig geöffnet (100 %) und über den Servowinkel eingestellt. Über sie wird der Honigfluss und damit indirekt die zeitliche Zunahme der Füllmasse im Glas beeinflusst. Die Wägezelle erfasst physikalisch eine Kraft, die in der vorliegenden Arbeit in eine Füllmasse umgerechnet wird. Diese wird daher im Folgenden als Mess- und Zielgröße verwendet.

Zwischen einer Änderung der Klappenstellung und der messbaren Reaktion des Systems besteht jedoch kein unmittelbarer Zusammenhang. Zunächst muss die Klappe mechanisch bewegt werden, anschließend setzt der Honigfluss ein, der Honig erreicht nach einer gewissen Fallzeit das Glas und wird erst danach über die Gewichtserfassung sichtbar. Zusätzlich wird das Gewichtssignal nicht kontinuierlich, sondern zeitdiskret und mit Mittelwertbildung erfasst. Dadurch entstehen Totzeiten und Messverzögerungen, die bei der Auslegung einer Dosierstrategie berücksichtigt werden müssen.

Erschwert wird der Prozess zusätzlich durch nichtlineare und veränderliche Zusammenhänge. Der Zusammenhang zwischen Klappenstellung und Honigfluss wurde dabei zunächst als deutlich nichtlinear angenommen. Gleichzeitig hängen Fließverhalten, Nachlauf und Ansprechverhalten stark von den Eigenschaften des Honigs ab, insbesondere von seiner Viskosität. Diese hängt ihrerseits stark von Temperatur und Zusammensetzung ab und nimmt mit steigender Temperatur deutlich ab [18]. Auch der sinkende Füllstand im Abfülleimer verändert das Prozessverhalten während des Betriebs.

Nach dem Schließen der Klappe steigt die gemessene Füllmasse häufig noch weiter an, da Honig nachläuft oder abtropft. Relevant ist daher nicht nur das Erreichen der Zielmasse, sondern auch das zeitliche Verhalten des Systems beim Schließen und im anschließenden Nachlauf.

Aus diesen Gründen werden in der vorliegenden Arbeit mehrere Strategieansätze untersucht. Die folgenden Abschnitte fassen zunächst die wesentlichen Wirkzusammenhänge, Einflussgrößen und Versuchsgrundlagen als gemeinsame Basis für die spätere Bewertung zusammen.

## 6.2 Wirkstruktur und charakteristische Prozessparameter

### Wirkstruktur des Dosierprozesses

Für die spätere Bewertung der untersuchten Dosierstrategien ist es hilfreich, den Abfüllvorgang zunächst als vereinfachte Wirkstruktur zu betrachten. Abbildung 6.1 zeigt dazu die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Stellgröße, Strecke, Messeinrichtung und Störgrößen. Die dabei verwendete Darstellung aus Regler, Strecke und Messeinrichtung sowie aus Verzögerungs-, Integrier- und Totzeitgliedern folgt der üblichen regelungstechnischen Notation [19]. Ihre Zuordnung zum Abfüllprozess ist dagegen eine eigene, bewusst vereinfachte Modellannahme und kein identifiziertes exaktes Streckenmodell. Die Stellgröße ist die Klappenstellung am Auslass des Abfülleimers. Über sie wird der Honigfluss beeinflusst, der schließlich zu einer Zunahme der Füllmasse im Glas führt. Die Messgröße liegt jedoch nicht unmittelbar als kontinuierlicher Massenstrom vor, sondern wird erst über die Gewichtserfassung mit zeitdiskreter Abtastung und softwareseitiger Mittelwertbildung verfügbar.

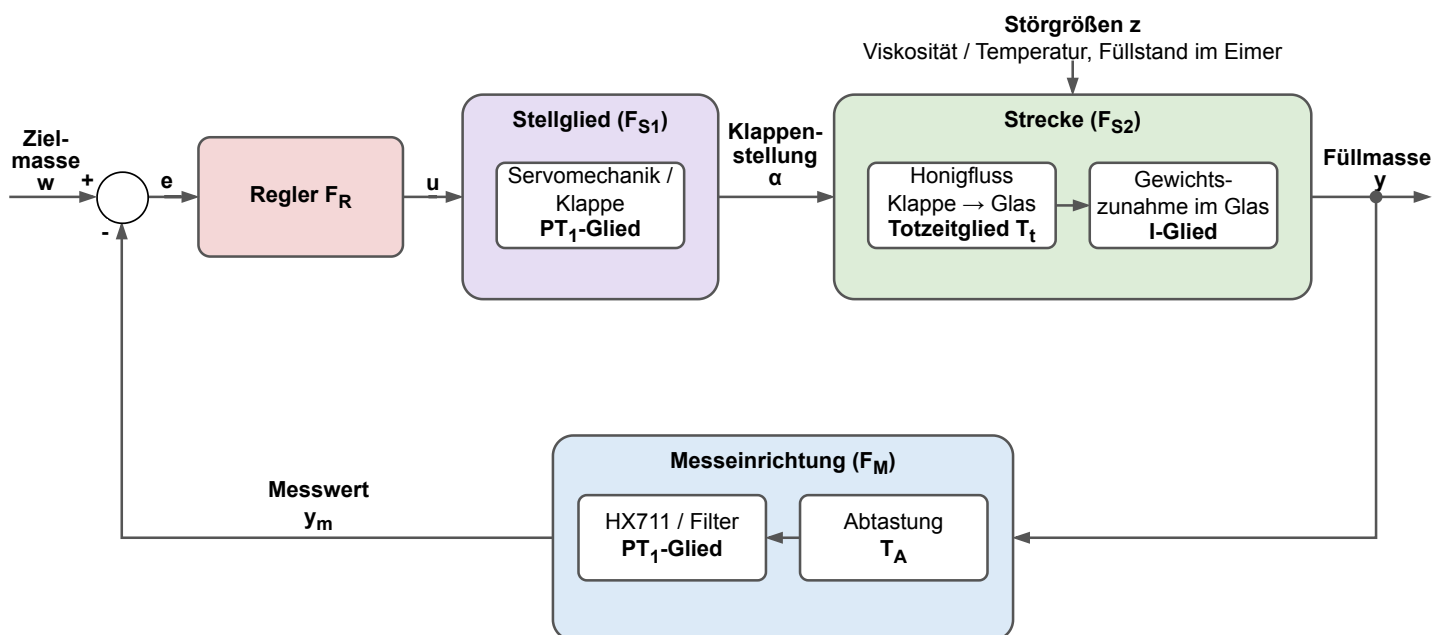


Abbildung 6.1: Vereinfachte Wirkstruktur des Dosierprozesses mit Stellgröße, Strecke, Messeinrichtung und wesentlichen Störgrößen.

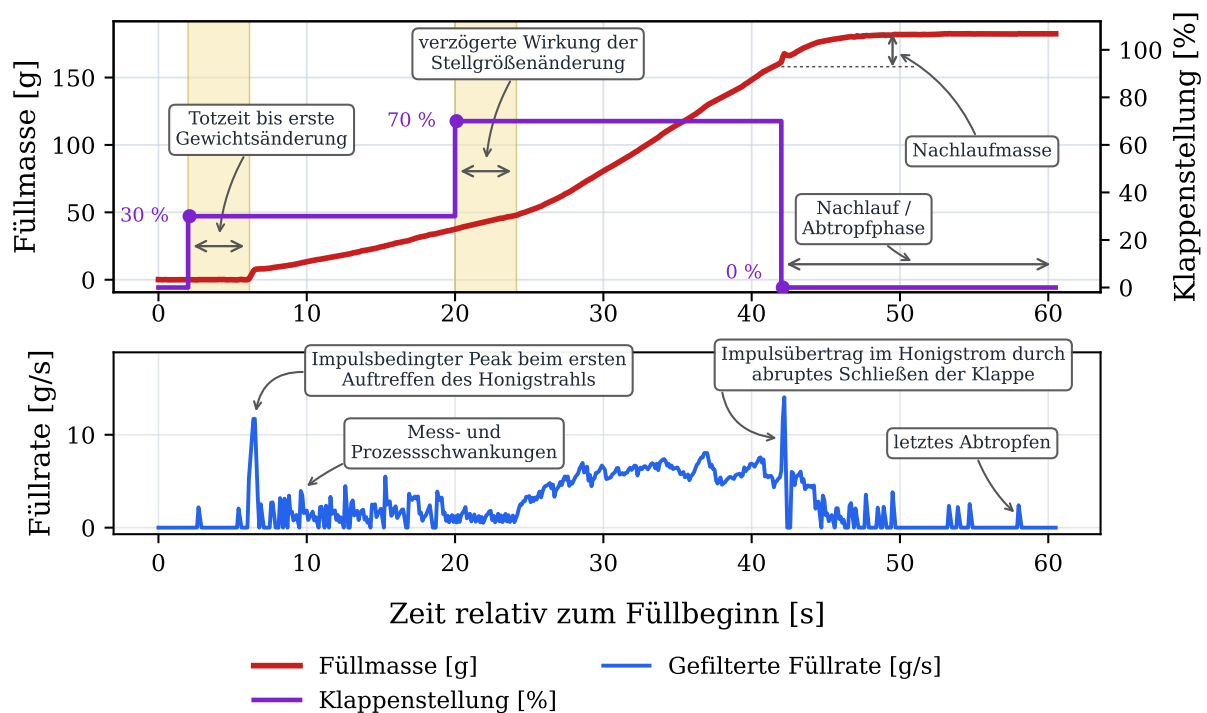
Damit besteht zwischen Stellgrößenänderung und beobachtetem Messwert eine mehrstufige Wirkungskette. Neben der mechanischen Reaktion von Servo und Klappe tragen insbesondere die Fließ- und Nachlaufeigenschaften des Honigs sowie die Dynamik der Messkette zur Verzögerung des Gesamtsystems bei. Das Blockschaltbild ist daher nicht als exaktes mathematisches Modell zu verstehen, sondern als vereinfachte gemeinsame Sicht auf den Prozess, aus der sich die wesentlichen Schwierigkeiten für alle später untersuchten Strategien ableiten lassen.

### **Charakteristische Prozesseffekte**

Charakteristisch für den Dosierprozess ist insbesondere, dass mehrere relevante Größen nicht direkt vorgegeben oder exakt modelliert werden können, sondern nur aus Messungen und Beobachtungen näherungsweise zugänglich sind. Hierzu zählen insbesondere die Totzeit zwischen einer Änderung der Klappenstellung und der ersten messbaren Gewichtsänderung, die Nachlaufmasse nach dem Schließen der Klappe sowie der Zusammenhang zwischen Klappenöffnung und Honigfluss. Andere Größen, etwa Waagenabtastung, Mittelwertbildung und Messrauschen, ergeben sich dagegen direkt aus der verwendeten Messkette. Zusätzlich wirken mit Viskosität, Temperatur und Füllstand des Honigs Störgrößen auf den Prozess, die sich im Betrieb verändern und das Doserverhalten deutlich beeinflussen können.

Abbildung 6.2 zeigt ergänzend einen repräsentativen gemessenen Füllverlauf mit annotierten charakteristischen Prozesseffekten. Darin ist erkennbar, dass zwischen dem Öffnen der Klappe und der ersten messbaren Gewichtsänderung eine endliche Totzeit liegt. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch bei der Reduktion der Klappenstellung: Die Wirkung der Stellgrößenänderung erscheint nicht sofort im gemessenen Verlauf, sondern erst mit zeitlicher Verzögerung. Nach dem vollständigen Schließen der Klappe steigt die Füllmasse weiterhin an, da Honig nachläuft beziehungsweise abtropft.





**Abbildung 6.2:** Repräsentativer Füllverlauf mit annotierten Prozesseffekten wie Totzeit, verzögerter Wirkung von Stellgrößenänderungen, Nachlauf und charakteristischen Messspitzen.

Im unteren Teil des Diagramms ist zusätzlich die aus dem Gewichtssignal abgeleitete Füllrate dargestellt. Dabei werden kurzzeitige Peaks und Schwankungen sichtbar, die nicht unmittelbar als stationärer Honigfluss interpretiert werden dürfen. Solche Effekte entstehen unter anderem beim ersten Auftreffen des Honigstrahls im Glas, bei abrupten Änderungen des Honigstroms infolge einer Klappenbewegung sowie durch die endliche Abtastung und Signalverarbeitung der Messkette. Auch dies verdeutlicht, dass aus dem gemessenen Verlauf keine ideal unmittelbar reagierende Strecke abgeleitet werden kann.

Die Totzeit des Systems entsteht nicht allein durch mechanische und messtechnische Verzögerungen, sondern auch durch den Materialtransport vom Auslass bis zur messbaren Gewichtszunahme im Glas, der zusätzlich von der Fallstrecke beziehungsweise dem aktuellen Füllstand im Glas abhängt. Da mehrere Effekte überlagert wirken, wird die Totzeit im Folgenden als Gesamtgröße messtechnisch erfasst, statt sie aus der geometrischen Fallhöhe zu berechnen.

Tabelle 6.1 gibt eine kompakte Übersicht über die für den weiteren Verlauf der Arbeit wichtigsten Prozessparameter und Einflussgrößen mit ihren Größenordnungen und qualitativen Wirkungen.

| Parameter / Einflussgröße                                   | Größenordnung               | Einfluss auf den Dosierprozess                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Stellglied und Strecke</b>                               |                             |                                                                                                                                      |
| Totzeit Klappe → erste Gewichtsänderung $T_t$               | z. B. 2–10 s                | Verzögerte Wirkung einer Stellgrößenänderung auf das messbare Füllgewicht                                                            |
| Honignachlauf / Abtropfzeit                                 | z. B. 5–30 s                | Weiteres Ansteigen der Füllmasse nach dem Schließen der Klappe                                                                       |
| Zusammenhang Klappenöffnung $\alpha \rightarrow$ Honigfluss | näherungsweise linear       | Zunächst nichtlinear angenommen, jedoch annähernd proportional gemessen (Abb. 6.3), zusätzlich vom Füllstand im Abfülleimer abhängig |
| <b>Messkette</b>                                            |                             |                                                                                                                                      |
| Waagen-Abtastzeit $T_A$                                     | z. B. 100 ms                | Zeitdiskrete Erfassung mit begrenzter zeitlicher Auflösung                                                                           |
| Mittelwertbildung / Filterfenster                           | z. B. 2–10 Samples          | Glättung des Signals bei zusätzlicher Messverzögerung                                                                                |
| Messrauschen / Messspitzen                                  | kurzzeitig, prozessabhängig | Erschwerte Interpretation des Messsignals, insbesondere beim Auftreffen des Honigstrahls und bei abrupten Stellgrößenänderungen      |
| <b>Störgrößen und Randbedingungen</b>                       |                             |                                                                                                                                      |
| Viskosität / Temperatur des Honigs                          | stark variabel              | Beeinflusst Fließverhalten, Totzeit, Nachlauf und Honigfluss                                                                         |
| Füllstand im Abfülleimer                                    | sinkt während des Betriebs  | Verändert hydrostatischen Druck und damit das Prozessverhalten während einer Messreihe                                               |

**Tabelle 6.1:** Wesentliche Prozessparameter und Einflussgrößen des Dosierprozesses mit grober Größenordnung und qualitativer Wirkung auf das Abfüllverhalten.

### Zusammenhang von Klappenöffnung und Füllrate

Zwischen der Klappenöffnung und dem Honigfluss wurde zunächst ein nichtlinearer Zusammenhang vermutet, da mehrere geometrische und strömungsmechanische Effekte zusammenwirken. Die aus Servoarm, Gestänge und Klappenhebel bestehende Kinematik koppelt den Servowinkel  $\varphi$  über mehrere winkelabhängige beziehungsweise trigonometrische Zusammenhänge an die Klappenstellung ( $s = f(\varphi)$ ). Auch die freigegebene Öffnungsfläche  $A$  hängt aufgrund der kreissegmentförmigen Überdeckung nichtlinear vom Klappenweg ab ( $A = g(s)$ ).

Für zwei idealisierte Grenzfälle der Strömung lässt sich der Zusammenhang dagegen geschlossen angeben. Für eine kurze Ausflussöffnung gilt mit dem Ausflussbeiwert  $C_d$  und der wirksamen Öffnungsfläche  $A$

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2 \rho \Delta p},$$

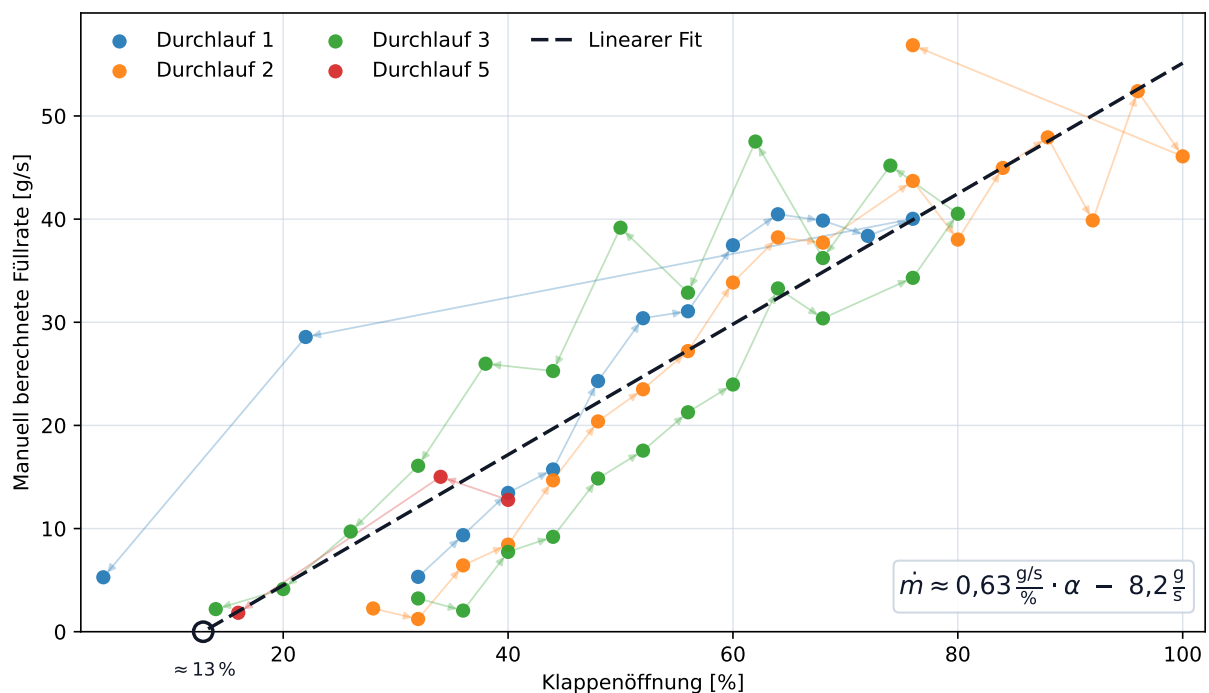
sodass der Massestrom bei näherungsweise konstanter Dichte  $\rho$ , Druckdifferenz  $\Delta p$  und konstantem  $C_d$  im Wesentlichen proportional zur Öffnungsfläche ist ( $\dot{m} \propto A$ ) [20, S. 35–77]. Für eine voll ausgebildete laminare Strömung durch ein langes kreisförmiges Rohr gilt dagegen das Gesetz von Hagen-Poiseuille

$$Q = \frac{\pi \Delta p d^4}{128 \mu L},$$

mit dem Volumenstrom  $Q$ , dem Rohrdurchmesser  $d$ , der dynamischen Viskosität  $\mu$  und der Rohrlänge  $L$ , wonach der Durchsatz mit der vierten Potenz des Durchmessers wächst [20, S. 223–271]. Die reale, nur teilweise geöffnete Klappen geometrie ist jedoch weder eine ideale kurze Ausflussöffnung noch ein langes kreisförmiges Rohr. Viskose, geometrische und mechanische Effekte überlagern sich hier, sodass der Gesamtzusammenhang keiner der beiden Beziehungen exakt folgt.

Der Gesamtzusammenhang vom Servowinkel über die Klappenstellung und die freigegebene Öffnungsfläche bis zur Füllrate wurde daher nicht vollständig analytisch modelliert, sondern messtechnisch bestimmt. Hierzu wurde die Klappe in mehreren manuellen Durchläufen stufenweise geöffnet und wieder geschlossen und für jede gehaltene Öffnung die stationäre Füllrate aus dem Gewichtsverlauf ermittelt.

Abbildung 6.3 zeigt die dabei ermittelten Füllraten in Abhängigkeit von der Klappenöffnung. Die Punkte streuen deutlich, da die Füllrate aus dem verrauschten Gewichtssignal abgeleitet wird und von Filterung und Totzeitkorrektur abhängt. Mehrere Durchläufe machen diese Streuung und die Wiederholbarkeit sichtbar. Auffällig ist eine leichte Hysterese, etwa im dritten Durchlauf (grün), bei dem die Rate beim Öffnen niedriger liegt als beim anschließenden Schließen. Besonders deutlich zeigen dies die beiden erhöhten blauen Punkte im linken Bereich, bei denen die Klappe beim Zurückfahren vermutlich zu schnell geschlossen wurde, sodass sich die niedrigere Rate wegen der Totzeit noch nicht eingestellt hatte. Das mechanische Umkehrspiel der Betätigung wird dagegen nur als kleinerer Beitrag vermutet.



**Abbildung 6.3:** Gemessene Füllrate in Abhängigkeit von der Klappenöffnung aus mehreren manuellen Durchläufen mit einer niedrigviskosen dunklen Honigsorte.

Die farbigen Punktfolgen gehören zu einzelnen Durchläufen, ihre Verbindungs Pfeile markieren nur die zeitliche Reihenfolge der Aufnahme und keine Interpolation. Die gestrichelte Linie ist ein linearer Fit über alle Punkte mit einer Steigung von etwa  $0,6 \text{ g/s pro Prozent Öffnung}$ , der die Achse bei rund  $13 \%$  schneidet.

Entgegen der ursprünglichen Erwartung verläuft der Zusammenhang über den untersuchten Bereich näherungsweise linear, wie die schwarz gestrichelte Ausgleichsgerade zeigt. Die nicht-linearen Einflüsse aus Kinematik, Öffnungsgeometrie und Strömung sind in diesem Arbeitsbereich offenbar nur schwach ausgeprägt oder kompensieren sich teilweise. Für die Umsetzung der Dosierstrategien rechtfertigt das Messergebnis daher die vereinfachende Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Klappenöffnung und Füllrate.

Der lineare Fit schneidet die Achse zudem erst bei rund  $13 \%$  Öffnung, sodass ein nennenswerter Honigfluss erst oberhalb dieser Schwelle einsetzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Klappe in der geschlossenen Stellung die Dichtung überlappt und zunächst um einen entsprechenden Stellweg geöffnet werden muss, bevor die Auslassöffnung freigegeben wird. Das Stellglied besitzt damit im unteren Öffnungsbereich ein Totband, das bei einer späteren Regelung berücksichtigt werden muss.

Die in Abbildung 6.3 gezeigten Messungen wurden nur mit einer einzigen, vergleichsweise niedrigviskosen Honigsorte durchgeführt. Für zähere Sorten wurde der Zusammenhang nicht untersucht und könnte deutlich anders ausfallen.

### 6.3 Zielgrößen und Bewertungskriterien

Damit die im Folgenden untersuchten Dosierstrategien vergleichbar bewertet werden können, sind zunächst gemeinsame Zielgrößen festzulegen. Bewertet wird dabei nicht nur, ob ein Füllvorgang grundsätzlich gelingt, sondern vor allem, mit welcher Genauigkeit, in welcher Zeit und mit welcher Robustheit dies geschieht:

- **Genauigkeit:** Wichtigste Zielgröße ist die erreichte Füllmasse im Verhältnis zur vorgegebenen Zielmasse. Eine Strategie ist umso günstiger, je kleiner die Abweichung vom Sollwert ausfällt und je zuverlässiger der Zielbereich ohne deutliche Über- oder Unterfüllung erreicht wird.
- **Ablaufzeit:** Die Gesamtdauer eines Füllvorgangs bestimmt die praktische Nutzbarkeit. Lange Nachtropfzeiten, wiederholtes Nachfüllen oder unnötig konservative Stellgrößenwechsel verlängern den Vorgang.
- **Robustheit:** Gemeint ist, wie empfindlich eine Strategie auf Totzeit, Nachlauf, Messverzögerungen und veränderliche Randbedingungen wie Viskosität oder Füllstand des Honigs reagiert. Relevant ist dabei auch, ob ein Füllvorgang in einem Durchlauf abgeschlossen werden kann oder ob zusätzliche Nachfüllzyklen nötig sind.

Für die spätere Bewertung der Strategien werden daher insbesondere die Abweichung von der Zielmasse, die Gesamtdauer des Füllvorgangs sowie der Nachfüllbedarf herangezogen. Ergänzend wird qualitativ betrachtet, wie stabil und nachvollziehbar sich das jeweilige Verfahren unter den gegebenen Prozessbedingungen verhält.

### 6.4 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Die Untersuchung der Dosierstrategien erfolgte am real aufgebauten Prototypen der Abfüllanlage. Abbildung 6.4 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau während eines Abfüllvorgangs. Rechts ist die Anlage mit Magazin, Wägeposition und Dosiereinheit zu sehen, links der per USB angeschlossene Laptop zur Aufzeichnung und Visualisierung der Telemetriedaten. Für den normalen Anlagenbetrieb ist dieser externe Rechner nicht erforderlich. Im Rahmen der Versuche diente er ausschließlich der Protokollierung und späteren Auswertung der Messdaten.





**Abbildung 6.4:** Gesamtansicht des Versuchsaufbaus während eines Abfüllvorgangs. Links ist der Laptop zur Aufzeichnung und Visualisierung der Telemetriedaten zu sehen, rechts die Abfüllanlage beim Befüllen eines Glases.

Die Versuche wurden iterativ durchgeführt. Hierzu wurden je nach Strategie zunächst die relevanten Parameter über die Bedienoberfläche der Anlage eingestellt beziehungsweise in einzelnen Fällen direkt in der Firmware angepasst. Anschließend wurden mehrere Füllvorgänge durchgeführt, die Messdaten aufgezeichnet und danach ausgewertet. Auf dieser Grundlage konnten Parameter verändert, Strategien angepasst und weitere Versuchsreihen durchgeführt werden. Während der Messreihen war es dabei auch möglich, die Telemetriedaten live zu beobachten und bei Bedarf in den weiteren Iterationen zu berücksichtigen.

Für die Vergleichbarkeit der Strategien wurde darauf geachtet, den grundsätzlichen mechanischen und elektronischen Aufbau der Anlage unverändert zu lassen. Ebenso blieben Messkette,

Aktorik, Firmwarebasis sowie der grundsätzliche Versuchsablauf zwischen den einzelnen Strategien gleich. Unterschiede zwischen den Versuchen ergaben sich damit im Wesentlichen aus der jeweils verwendeten Dosierstrategie und deren Parametrierung.

Eine praktisch relevante Randbedingung ist der Füllstand im Abfülleimer, der während einer Messreihe kontinuierlich abnimmt. Der hydrostatische Druckanteil am Auslass folgt mit  $\Delta p_h = \rho g h$  näherungsweise der Füllhöhe  $h$  des Honigs über dem Auslass [20, S. 1–33], sodass ein sinkender Füllstand den treibenden Druck und damit den Honigfluss verringert. Selbst bei gleichem Honig und unveränderter Mechanik unterscheidet sich der Honigfluss dadurch zwischen frühen und späteren Füllvorgängen einer Versuchsreihe. Dieser Effekt wird bei der Interpretation der Messergebnisse berücksichtigt.

Auch Temperatur und Viskosität des Honigs beeinflussen das Prozessverhalten. Die Versuche zielen daher bewusst nicht auf ideale Laborbedingungen, sondern auf einen nachvollziehbaren und zwischen den Strategievarianten möglichst konsistenten Vergleich unter praxisnahen Bedingungen.

Da die verfügbare Honigmenge begrenzt ist, wurde ein Teil der Versuche zudem mit einer wasserbasierten Testflüssigkeit anstelle von Honig durchgeführt. Sie erlaubt viele reproduzierbare Läufe, ohne den Honig wiederholt umfüllen zu müssen, und dient als lebensmittelechter Ersatz mit ähnlichem Fließverhalten.

## 6.5 Überblick über die untersuchten Dosierstrategien

Auf Grundlage der beschriebenen Prozesscharakteristik wurden drei Dosierstrategien untersucht, die sich in Komplexität, Anpassungsfähigkeit und Regelungsanteil unterscheiden:

- **Einfache heuristische Strategie** (Kapitel 7): feste, vorab eingestellte Schwellwerte und eine zweistufige Klappensteuerung als nachvollziehbare Basisvariante.
- **Adaptiv erweiterte Strategie** (Kapitel 8): gleicher Ablauf, wobei Schwellwerte und Nachtropfzeit aus vorherigen Füllvorgängen nachgeführt werden.
- **Regelungsbasierter Ansatz** (Kapitel 9): kontinuierliche Anpassung der Klappenstellung während des Füllvorgangs anhand der gemessenen Füllrate.

Die drei Ansätze werden in den folgenden Kapiteln einzeln entwickelt und erprobt und in Kapitel 10 miteinander verglichen.



## 7 Einfache heuristische Dosierstrategie

### 7.1 Grundidee und Ablauf

Die einfache heuristische Dosierstrategie bildet die Basisvariante der Untersuchung. Heuristisch bedeutet hier, dass der Füllvorgang nicht über ein Prozessmodell oder eine Regelung gesteuert wird, sondern über einfache, empirisch festgelegte Regeln und feste Schwellwerte. Diese Schwellwerte werden vorab eingestellt und bleiben während des Betriebs unverändert, der Prozess wird also weder modelliert noch aus vorherigen Läufen gelernt.

Abbildung 7.1 zeigt den Ablauf der Dosierstrategie als Flussdiagramm. Er gliedert sich in eine schnelle und eine reduzierte Füllphase, das Schließen der Klappe, eine Abtropfzeit und eine abschließende Bewertung des Füllgewichts.

Zu Beginn wird die Klappe auf ihre Maximalöffnung gefahren, sodass der Honig mit hoher Rate einströmt. Sobald die Füllmasse den ersten Schwellwert erreicht, im Diagramm die Abfrage „Nahe am Zielgewicht? (Schwellwert 1)“, schaltet die Strategie in eine reduzierte Öffnungsphase. In dieser Phase strömt weniger Honig nach, sodass sich weniger Masse gleichzeitig zwischen Klappe und Glas befindet und die Füllmasse langsamer ansteigt. Dadurch lässt sich der weitere Verlauf feiner steuern und die in Kapitel 6 beschriebene Totzeit wirkt sich weniger stark auf die erreichbare Genauigkeit aus.

Da die Füllmasse nach dem Schließen der Klappe noch weiter ansteigt, wird die Klappe nicht erst beim Erreichen der Zielmasse geschlossen, sondern bereits beim zweiten Schwellwert davor, im Diagramm die Abfrage „Kurz vor Zielgewicht? (Schwellwert 2)“. Dieser vorgezogene Schließzeitpunkt nutzt den Nachlauf so aus, dass die Zielmasse nach dem Abtropfen möglichst genau erreicht wird. Anschließend wartet die Strategie eine feste Abtropfzeit ab, in der die restliche Masse ins Glas fällt und sich der Messwert stabilisiert.

Abschließend wird das erreichte Füllgewicht bewertet. Liegt es innerhalb des Toleranzbands, gilt der Vorgang als erfolgreich abgeschlossen. Liegt es darunter, verzweigt der Ablauf zurück zum Nachfüllen, bei dem in einem weiteren Zyklus gezielt Masse ergänzt wird. Liegt es darüber, wird der Vorgang als Übergewicht abgebrochen. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in seiner Einfachheit und Nachvollziehbarkeit, da er ohne Prozessmodell und ohne Anpassung zur Laufzeit auskommt.

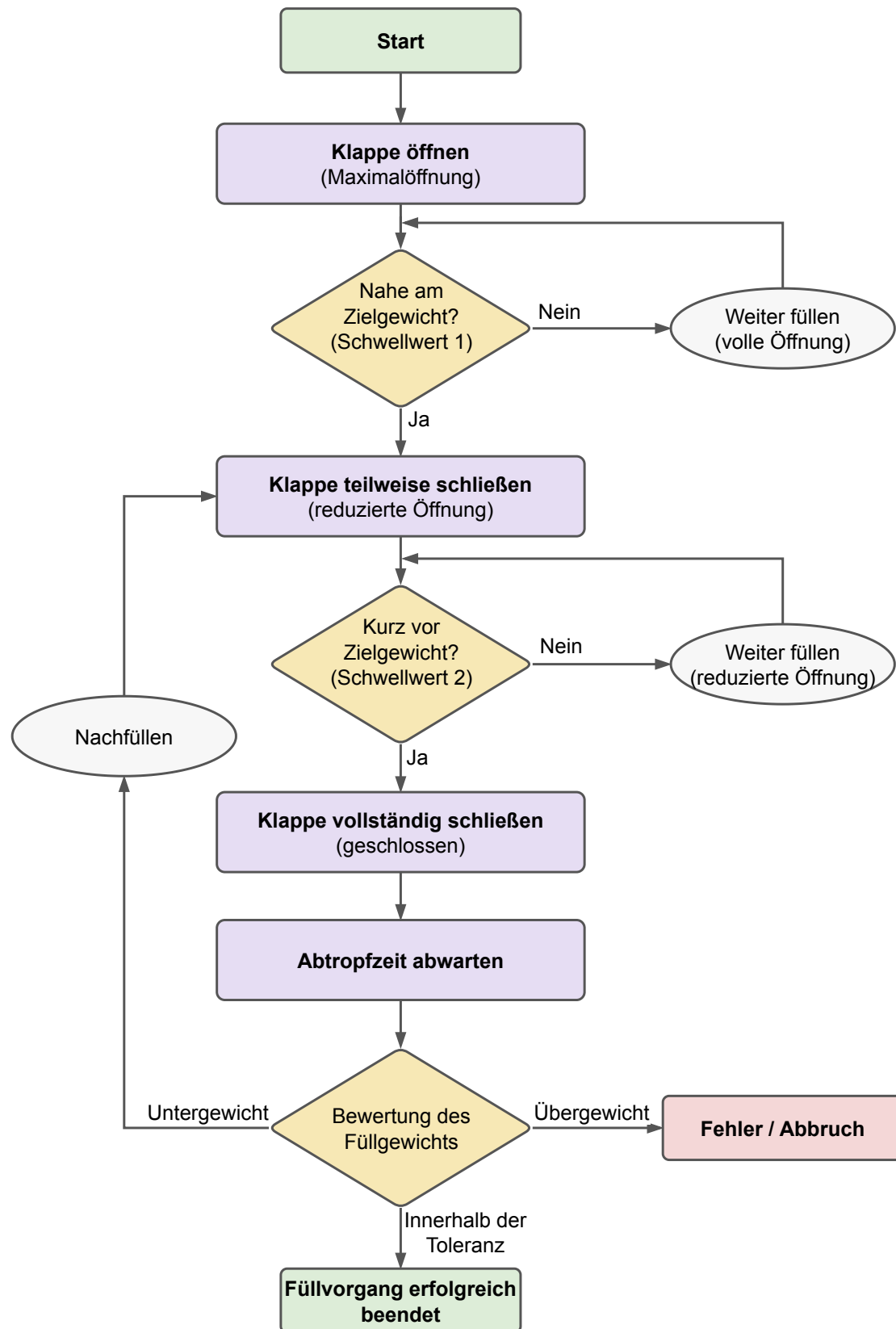


Abbildung 7.1: Ablaufdiagramm der einfachen heuristischen Dosierstrategie mit zweistufiger Klappensteuerung, Abtropfzeit und abschließender Bewertung des Füllgewichts.

## 7.2 Relevante Parameter und Umsetzung

Das Verhalten der Strategie wird durch wenige Parameter bestimmt, die als Voreinstellung gespeichert und über Drehencoder und Display der Anlage eingestellt werden. Sie werden vorab empirisch festgelegt und bleiben während eines Füllvorgangs unverändert, der Prozess wird also nicht zur Laufzeit gelernt. Maßgeblich sind drei Größen:

- **Restmasse für die reduzierte Öffnung** (`slow_remaining_g`): die noch fehlende Masse bis zur Zielmasse, bei deren Unterschreiten die Strategie von der schnellen in die reduzierte Öffnungsphase wechselt.
- **Restmasse beim Schließen** (`close_remaining_g`): die noch fehlende Masse bis zur Zielmasse, bei deren Unterschreiten die Klappe vollständig geschlossen wird.
- **Nachtropfzeit**: die feste Wartezeit nach dem Schließen, in der die restliche Masse ins Glas fällt und sich der Messwert stabilisiert.

Beide Schwellwerte sind also als Restmasse bis zur Zielmasse definiert und nicht als absoluter Füllwert. Hinzu kommen die Klappenstellungen der beiden Füllphasen und das Toleranzband um die Zielmasse. Um kurzzeitige Messspitzen auszublenden, muss die jeweilige Schwellwertbedingung über mehrere aufeinanderfolgende Messwerte erfüllt sein.

Liegt die Füllmasse nach der Nachtropfzeit unterhalb des Toleranzbandes, wird ein Nachfüllzyklus ausgeführt. Dabei wird die Restmasse beim Schließen schrittweise verringert, sodass die Klappe später schließt und zusätzliche Masse ergänzt wird. Während eines Füllvorgangs bleiben alle Parameter unverändert, eine Anpassung an das gemessene Prozessverhalten erfolgt nicht.

## 7.3 Versuche und Tuning

Für die Untersuchung der heuristischen Strategie wurden die Parameter ausgehend von konservativen Startwerten schrittweise angepasst. Der grundsätzliche Versuchsaufbau und die Randbedingungen entsprechen den in Kapitel 6 beschriebenen gemeinsamen Grundlagen.

Im Vordergrund stand die Frage, wie sich die beiden Restmassen-Schwellwerte (für die reduzierte Öffnung und für das Schließen) und die Nachtropfzeit auf Genauigkeit und Fülldauer auswirken. Dazu wurden mehrere Füllvorgänge mit variierten Schwellwerten durchgeführt und die aufgezeichneten Verläufe hinsichtlich Endmasse, Fülldauer, Nachlaufmasse und Anzahl der Nachfüllzyklen ausgewertet. Aus den Ergebnissen wurden die Parameter anschließend von Hand über den Drehencoder und das Display der Anlage für den jeweils nächsten Lauf angepasst, um den Zielbereich möglichst ohne Nachfüllen und ohne Überfüllung zu treffen.

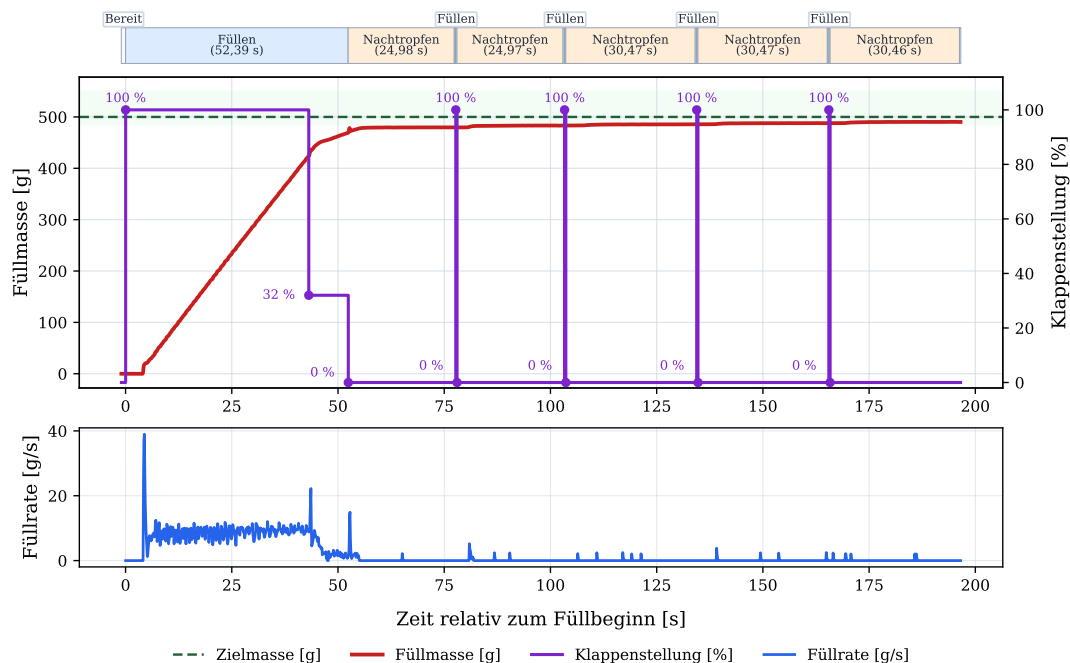
## 7.4 Ergebnisse und Grenzen

Die heuristische Strategie erreicht die Zielmasse grundsätzlich, ihr Ergebnis hängt jedoch stark von den gewählten Schwellwerten ab. Abbildung 7.2 stellt dies anhand zweier Läufe mit unterschiedlichen Parametersätzen gegenüber.

Die beiden Verläufe zeigen die hohe Empfindlichkeit der heuristischen Strategie gegenüber den gewählten Schwellwerten. Im oberen Lauf aus Abbildung 7.2a wurde mit einer vergleichsweise großen Restmasse beim Schließen von 30 g und einem früheren Übergang in die reduzierte Phase bei 60 g Restmasse gearbeitet. Dadurch wurde der Füllvorgang zwar konservativ geführt, die Zielmasse jedoch beim ersten Schließen nicht erreicht. Es folgen insgesamt vier Nachfüllzyklen mit jeweils erneuter Nachtropf- und Zielprüfung. Die Strategie erreicht damit zwar noch einen zulässigen Endwert, benötigt mit rund 197 s jedoch nahezu die doppelte Zeit des unteren Vergleichslaufs. Gleichzeitig bleibt eine Unterfüllung von 9,7 g bestehen.

Im unteren Lauf aus Abbildung 7.2b wurde der Übergang in die reduzierte Phase später gewählt (Restmasse für die reduzierte Öffnung 90 g) und die Restmasse beim Schließen auf 10 g reduziert. Dadurch bleibt die Klappe länger weit geöffnet und der Sollwert wird ohne Nachfüllvorgang in einem einzigen Füllzyklus erreicht. Die Fülldauer sinkt auf etwa 103 s. Gleichzeitig steigt jedoch die gemessene Nachlaufmasse auf 9,7 g an, was sich in einer leichten Überfüllung von 4,7 g widerspiegelt.

Die beiden Diagramme verdeutlichen damit die zentrale Schwäche des heuristischen Ansatzes: Bereits relativ kleine Änderungen einzelner Parameter verschieben den Zielkonflikt zwischen Fülldauer und Genauigkeit deutlich. Ein konservativer Parametersatz vermeidet Überfüllung, führt jedoch zu langen Nachfüllsequenzen. Ein aggressiverer Parametersatz verkürzt den Prozess, erhöht aber das Risiko, die Zielmasse durch Nachlauf nach dem Schließen zu überschreiten. Gerade die in beiden Läufen gemessene Totzeit von etwa 3 s und die stark unterschiedliche Nachlaufmasse zeigen, dass feste Schwellwerte das reale Prozessverhalten nur unzureichend abbilden.

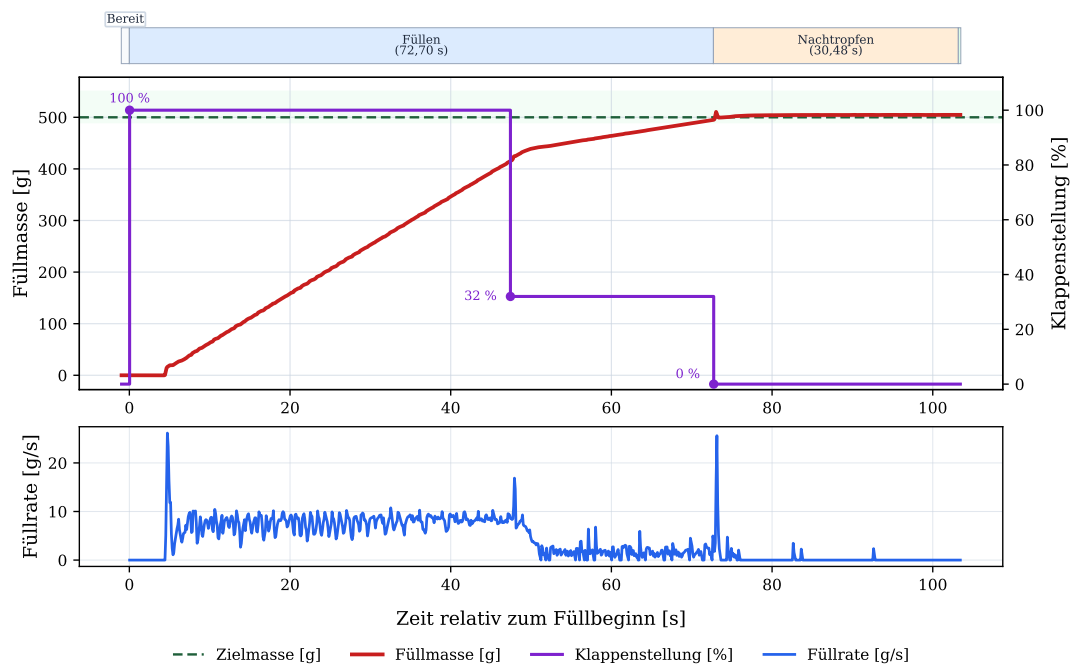


(a) Heuristische Strategie mit konservativerem Schließverhalten.

**Parameter:** Restmasse für reduzierte Öffnung 60 g, Restmasse beim Schließen 30 g, Nachtropfzeit 25 bzw. 30 s.

**Ergebnis:** Endmasse 490,3 g, Fehler -9,7 g, Gesamtdauer 196,5 s, 4 Nachfüllvorgänge.

**Messwerte:** Totzeit 3,0 s, Nachlaufmasse 2,3 g, Füllrate ca. 10,9/5,9 g/s (schnell/reduziert).



(b) Heuristische Strategie mit späterem Übergang in die reduzierte Phase und kleinerer Restmasse beim Schließen.

**Parameter:** Restmasse für reduzierte Öffnung 90 g, Restmasse beim Schließen 10 g, Nachtropfzeit 30,5 s.

**Ergebnis:** Endmasse 504,7 g, Fehler +4,7 g, Gesamtdauer 103,4 s, kein Nachfüllen.

**Messwerte:** Totzeit 3,0 s, Nachlaufmasse 9,7 g, Füllrate ca. 9,8/4,1 g/s (schnell/reduziert).

**Abbildung 7.2:** Vergleich zweier Läufe der heuristischen Dosierstrategie mit unterschiedlichen Parametersätzen. Dargestellt sind Füllmasse, Klappenstellung und Füllrate über der Zeit.

## 8 Erweiterte Dossierstrategie mit adaptiven Parametern

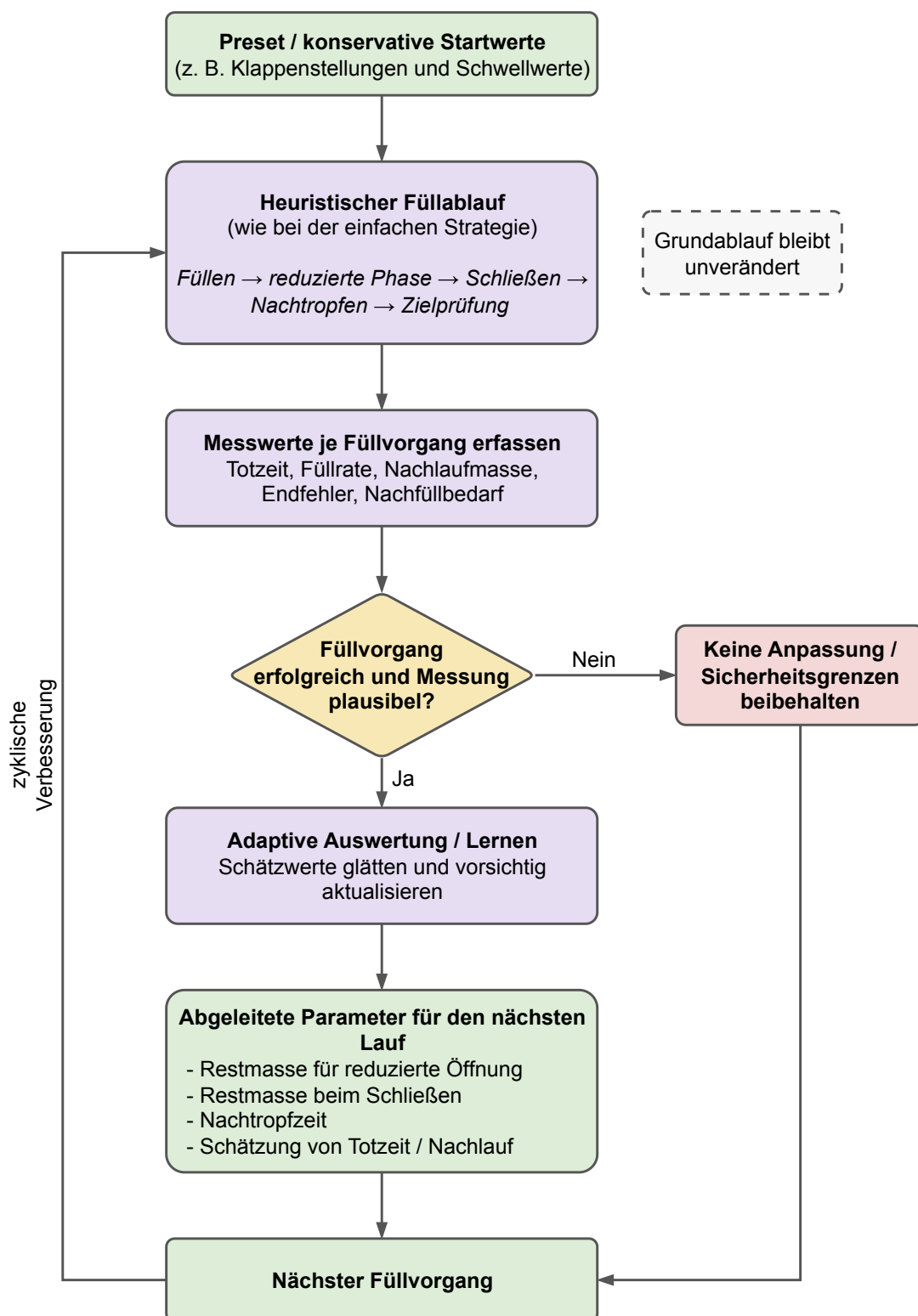
### 8.1 Motivation, Grundidee und Ablauf

Die einfache heuristische Strategie erreicht die Zielmasse nur dann zuverlässig, wenn ihre Schwellwerte gut zum aktuellen Prozessverhalten passen. Wie die Ergebnisse in Kapitel 7 zeigen, hängt das Ergebnis jedoch stark von Totzeit, Nachlauf und Füllrate ab, die sich mit Honig, Temperatur und Füllstand ändern. Feste Parameter führen daher entweder zu langen Nachfüllsequenzen oder zu Überfüllung. Die erweiterte Strategie setzt genau an dieser Schwäche an, indem sie den Ablauf der Basisvariante beibehält, die verwendeten Schwellwerte und die Nachtropfzeit jedoch aus den Messwerten der vorangegangenen Füllvorgänge fortlaufend anpasst.

Abbildung 8.1 zeigt dieses Prinzip. Der eigentliche Füllvorgang ist darin zu einem einzigen Block „Heuristischer Füllablauf“ zusammengefasst, der genau dem in Kapitel 7 beschriebenen Ablauf entspricht und unverändert bleibt. Um diesen Block ist die eigentliche Erweiterung gelegt, ein zyklischer Lernpfad. Nach jedem Füllvorgang werden die gemessenen Größen erfasst und, sofern der Lauf erfolgreich und die Messung plausibel war, in einem Auswerteschritt zu geglätteten Schätzwerten verrechnet. Daraus leitet die Strategie die Parameter für den nächsten Lauf ab, im Diagramm die Restmasse für die reduzierte Öffnung, die Restmasse beim Schließen und die Nachtropfzeit. War ein Lauf nicht auswertbar, bleiben die bisherigen Werte innerhalb festgelegter Sicherheitsgrenzen erhalten. Die im Preset hinterlegten Werte dienen dabei nur noch als konservative Startwerte, von denen aus sich die Laufzeitwerte an das reale Prozessverhalten annähern.

Die Anpassung erfolgt damit ausschließlich zwischen den Füllvorgängen und nicht innerhalb eines einzelnen Laufs. Die adaptive Strategie verringert damit die Nachteile einer rein festen Parametrierung, ohne bereits eine kontinuierliche Regelung der Klappe während des Füllens einzusetzen.





**Abbildung 8.1:** Prinzipdarstellung der adaptiv erweiterten heuristischen Dosierstrategie. Während der grundlegende Füllablauf unverändert bleibt, werden aus den Messwerten jedes Füllvorgangs aktualisierte Schätzwerte und daraus abgeleitete Parameter für den nächsten Lauf bestimmt.

## 8.2 Relevante Parameter und Umsetzung

Die Adaption stützt sich auf Größen, die sich aus jedem Füllvorgang messen lassen. Nach dem Öffnen der Klappe wird die Totzeit bis zur ersten Gewichtsänderung erfasst, während des Füllens die Füllrate und nach dem Schließen die Nachlaufmasse, also die Zunahme der Füllmasse bis zum Stillstand.

Die Messwerte werden weder sofort als neue Parameterwerte übernommen noch als einfacher Mittelwert über alle Läufe gebildet. Ein einfacher Mittelwert würde mit zunehmender Laufzahl immer träger reagieren, sodass spätere Änderungen des Prozessverhaltens kaum noch Wirkung hätten. Eine sofortige Übernahme wäre dagegen zu empfindlich gegenüber einzelnen Ausreißern. Stattdessen werden die Schätzwerte über einen exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwert (englisch *exponentially weighted moving average*, EWMA) gebildet [21], der über den Gewichtungsfaktor einen einstellbaren Kompromiss zwischen der Glättung einzelner Abweichungen und der Reaktion auf Änderungen des Prozessverhaltens bietet. Nach jedem Lauf wird der bisherige Schätzwert mit dem neuen Messwert nach

$$\hat{x}_{\text{neu}} = \hat{x}_{\text{alt}} + \alpha (x_{\text{mess}} - \hat{x}_{\text{alt}}), \quad 0 < \alpha \leq 1,$$

aktualisiert. Der Faktor  $\alpha$  bestimmt, wie stark ein einzelner Messwert den Schätzwert verschiebt. Ein kleines  $\alpha$  glättet stark und reagiert träge, ein großes  $\alpha$  folgt neuen Messwerten schneller, überträgt aber auch Ausreißer stärker. Für die einzelnen Größen werden feste, experimentell bestimmte Werte für  $\alpha$  verwendet. Zuverlässig messbare Größen wie die Nachlaufmasse erhalten dabei ein größeres  $\alpha$  und damit eine schnellere Anpassung, während stärker streuende Größen wie die Füllrate mit einem kleineren  $\alpha$  stärker geglättet werden.

Aus den geglätteten Schätzwerten werden die Parameter des nächsten Laufs abgeleitet. Die Restmasse beim Schließen ergibt sich im Wesentlichen aus der gemessenen Nachlaufmasse, da diese bestimmt, wie viel Masse nach dem Schließen noch hinzukommt. Der Übergang in die reduzierte Phase, also die Restmasse für die reduzierte Öffnung, wird zusätzlich aus dem Produkt von Totzeit und Füllrate abgeschätzt, das angibt, wie viel Honig während der Totzeit noch nachströmt. Die Nachtropfzeit wird an das beobachtete Abklingen des Nachlaufs angepasst.

Umgesetzt ist diese Anpassung für die genannten Schwellwerte und die Nachtropfzeit. Weitere Ansätze, etwa eine zusätzliche Anpassung der Öffnungsgrade oder eine analytische Bestimmung des Schließzeitpunkts, wurden nicht umgesetzt. Für Letztere ließe sich aus dem zeitlichen Verlauf der Füllrate erkennen, wann sich nach der Reduktion der Öffnung eine neue, stabile Füllrate eingestellt hat, um daraus den Schließzeitpunkt direkt zu berechnen, statt ihn iterativ anzunähern. Da das aus dem Gewichtssignal abgeleitete Ratensignal jedoch bereits deutlich rauscht und eine weitere Ableitung dieses Rauschen zusätzlich verstärken würde, wurde dieser Weg zunächst nicht weiter verfolgt.

### 8.3 Versuche und Tuning

Die adaptive Strategie wurde in zusammenhängenden Messreihen untersucht, in denen mehrere Gläser nacheinander befüllt wurden. Entscheidend war dabei nicht ein einzelner Lauf, sondern die Entwicklung über eine Reihe von Füllvorgängen hinweg. Beobachtet wurde, wie schnell sich die anfänglich konservativen Startwerte an das Prozessverhalten annähern und ob die Zielmasse mit zunehmender Lernphase zuverlässiger ohne Nachfüllen erreicht wird.

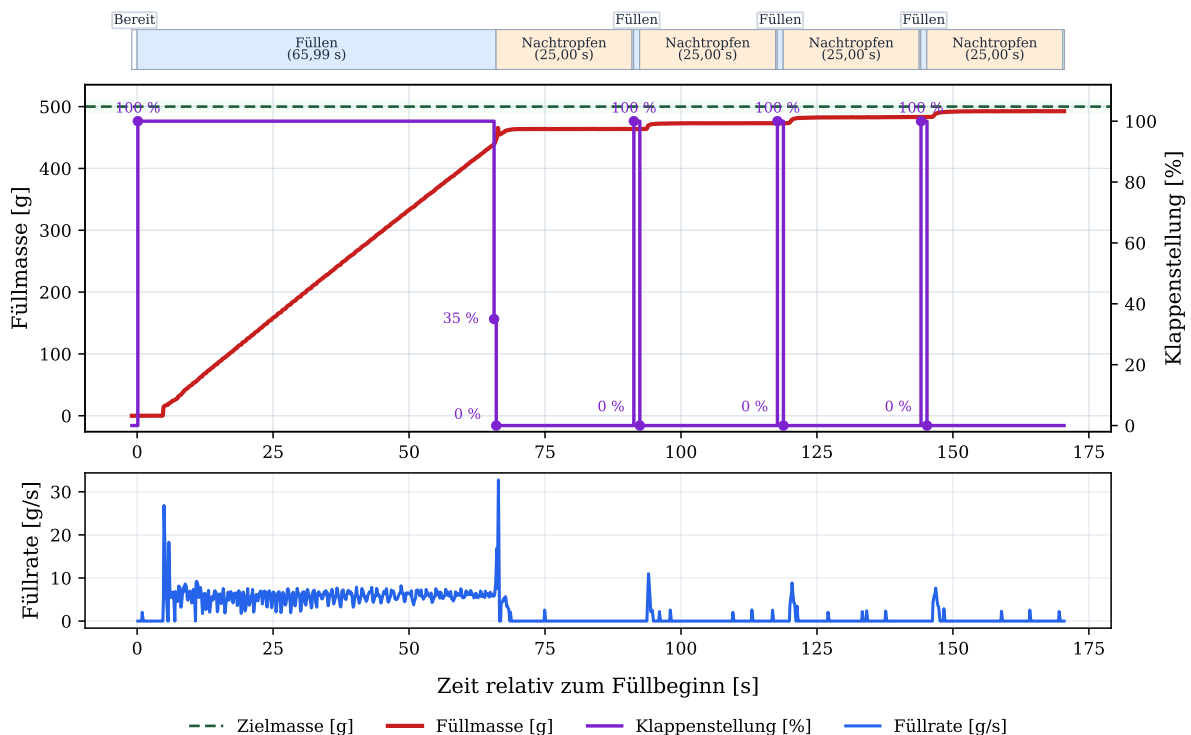
Wie zuvor entsprechen Aufbau und Randbedingungen den gemeinsamen Grundlagen aus Kapitel 6.

### 8.4 Ergebnisse und Bewertung

Für die adaptive Strategie wurde eine Messreihe mit mehreren aufeinanderfolgenden Füllvorgängen aufgezeichnet. Abbildung 8.2 stellt daraus zwei Läufe gegenüber, den ersten Lauf und einen späteren nach drei vorangegangenen Füllvorgängen.

Im ersten Lauf aus Abbildung 8.2a liegen die verwendeten Schätzwerte noch deutlich neben dem tatsächlichen Prozessverhalten. Die daraus resultierende frühe Schließung führt zu drei Nachfüllzyklen und einer entsprechend langen Gesamtdauer.

Im späteren Lauf aus Abbildung 8.2b haben sich die intern verwendeten Laufzeitwerte deutlich verschoben. Besonders auffällig sind die Reduktion der Restmasse beim Schließen von 56,5 g auf 13,2 g sowie die Verkürzung der Nachtropfzeit von 25,0 s auf 12,725 s. Damit wird die Zielmasse in einem einzigen Füllvorgang ohne Nachfüllen erreicht. Gleichzeitig sinkt die Gesamtdauer des dargestellten Verlaufs von etwa 170 s auf etwa 108 s, während sich der Fehler von  $-7,3$  g auf  $-2,8$  g verringert. Die Diagramme zeigen damit, dass die adaptive Strategie die anfänglich konservativen Schätzwerte innerhalb weniger Läufe an das reale Prozessverhalten annähern kann. Wie sich dieser Ablauf am realen Aufbau darstellt, veranschaulicht ergänzend eine Videoaufnahme auf der in Anhang B genannten Projektseite.

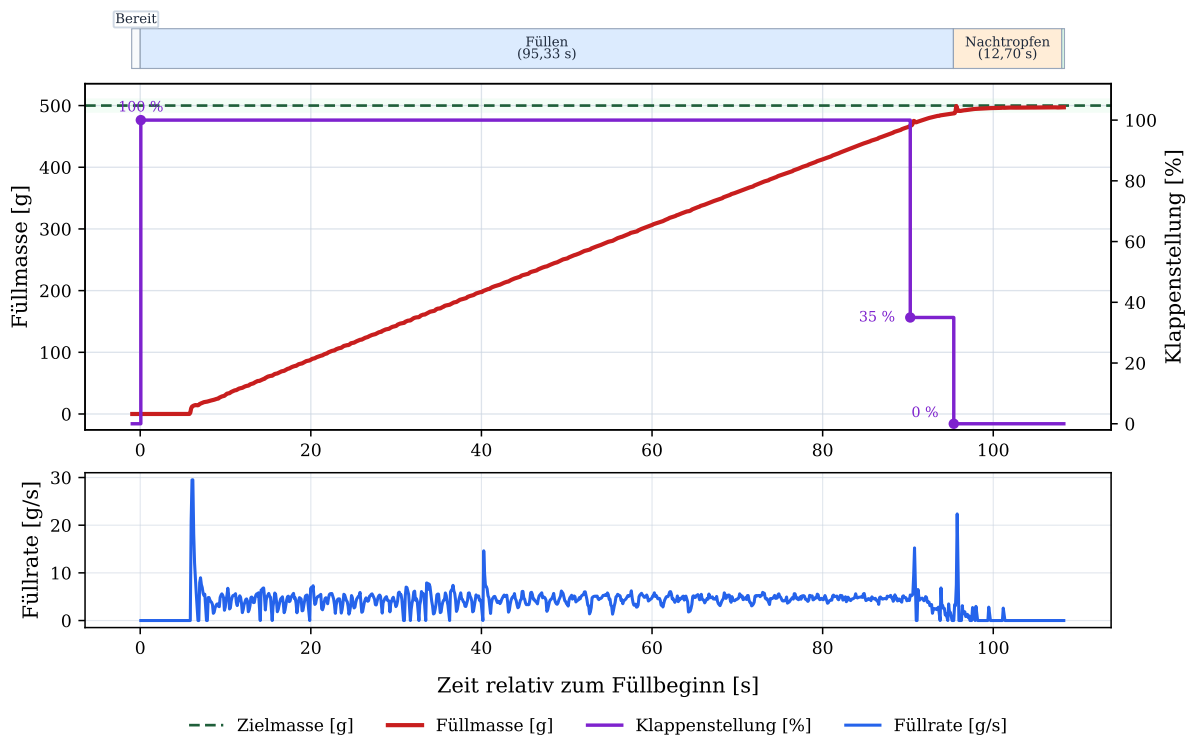


(a) Erster Lauf der adaptiv-heuristischen Strategie.

**Parameter:** Restmasse für reduzierte Öffnung 60,5 g, Restmasse beim Schließen 56,5 g, Nachtropfzeit 25,0 s.

**Messwerte:** Totzeit 4,839 s, Nachlaufmasse 9,8 g, Füllrate ca. 7,4 g/s.

**Ergebnis:** Endmasse 492,7 g, Fehler -7,3 g, Gesamtdauer ca. 170 s, 3 Nachfüllvorgänge.



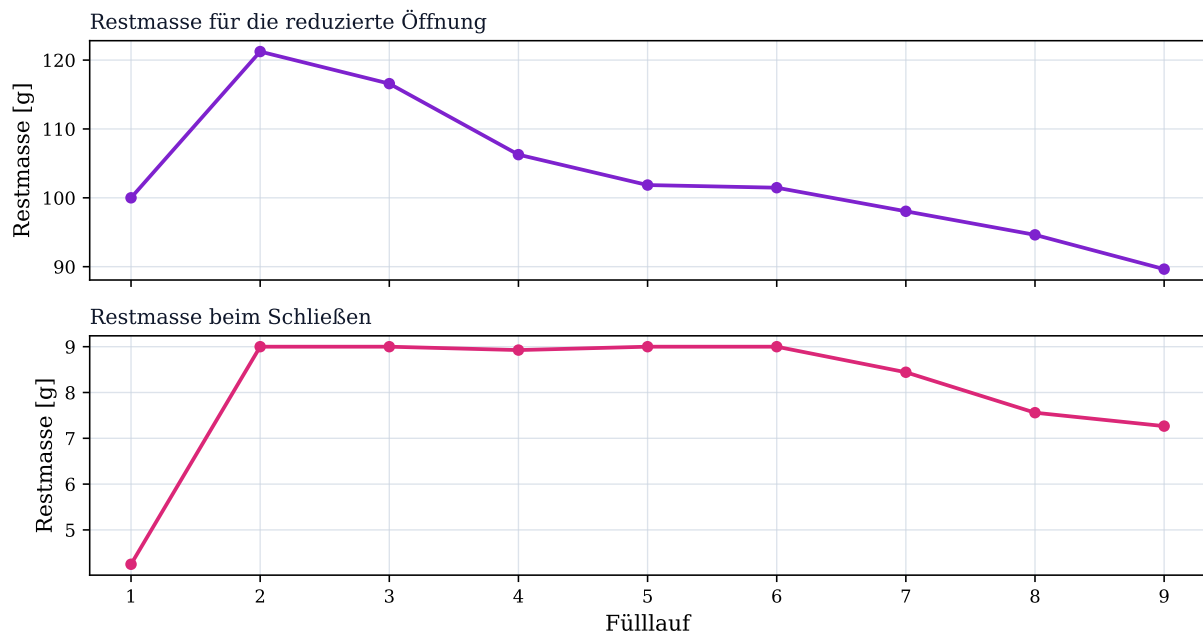
(b) Späterer Lauf nach drei vorangegangenen Füllvorgängen mit jeweils weiter optimierten Parametern.

**Parameter:** Restmasse für reduzierte Öffnung 92,0 g, Restmasse beim Schließen 13,2 g, Nachtropfzeit 12,725 s.

**Messwerte:** Totzeit-Schätzwert 3,893 s, Nachlauf-Schätzwert 11,7 g, gemessene Totzeit 5,979 s, gemessene Nachlaufmasse 10,2 g.

**Ergebnis:** Endmasse 497,2 g, Fehler -2,8 g, Gesamtdauer ca. 108 s, kein Nachfüllen.

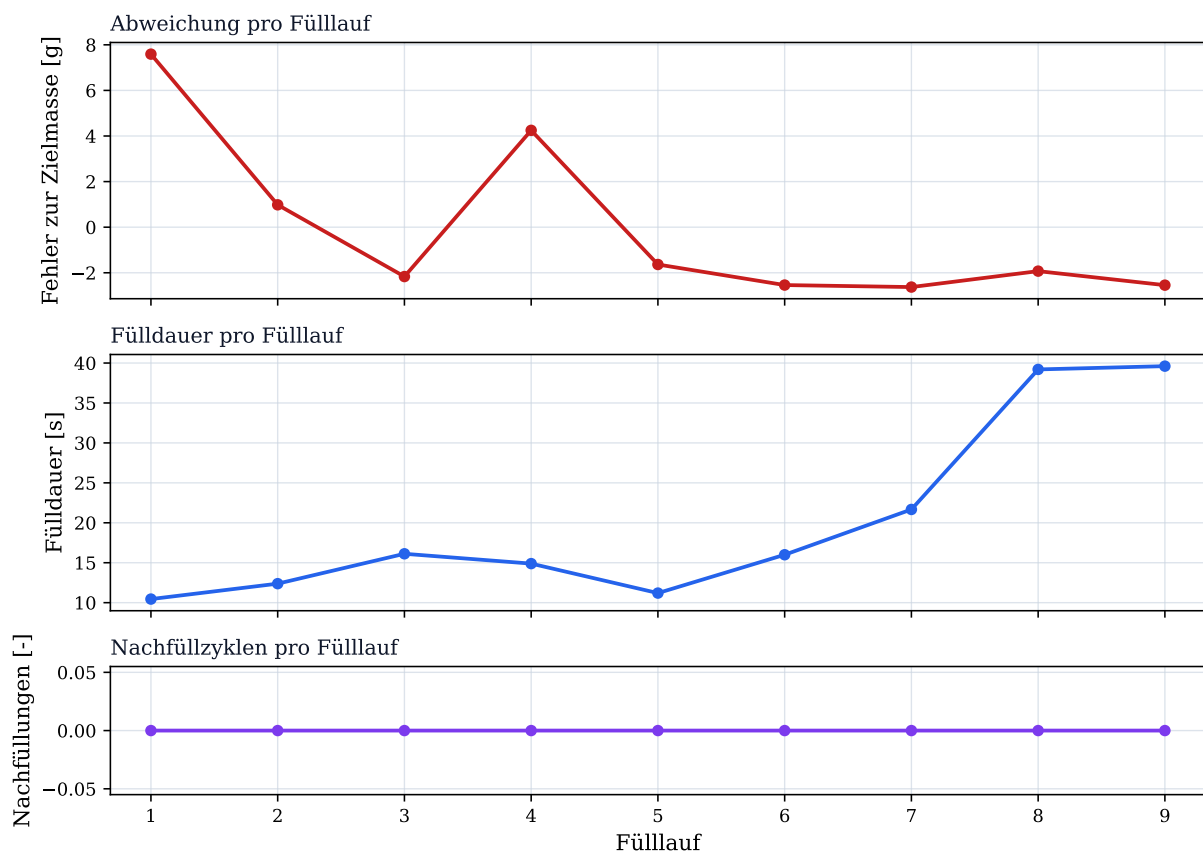
Abbildung 8.2: Vergleich zweier Läufe der adaptiv-heuristischen Dosierstrategie.



**Abbildung 8.3:** Entwicklung der adaptierten Schwellwerte der erweiterten Dosierstrategie über die Füllläufe der Sitzung: Restmasse für die reduzierte Öffnung und Restmasse beim Schließen.

Abbildung 8.3 zeigt, wie sich die beiden adaptierten Schwellwerte über die Sitzung entwickeln. Zwischen dem ersten und dem zweiten Lauf springen beide Werte deutlich, der erste gemessene Lauf erhält durch die eingangs beschriebene Anlaufgewichtung des EWMA-Verfahrens noch nahezu vollen Einfluss auf den Schätzwert. Ab dem zweiten Lauf sinkt die Restmasse für die reduzierte Öffnung (violett) kontinuierlich von rund 121 g auf rund 90 g, der Übergang in die reduzierte Phase erfolgt also zunehmend später und dichter am Ziel. Das verkürzt den Füllvorgang und kompensiert zugleich teilweise den mit sinkendem Füllstand im Abfülleimer abnehmenden Durchfluss. Die Restmasse beim Schließen (pink) bleibt zunächst nahe 9 g und sinkt erst in den letzten Läufen auf rund 7 g, weil bei geringerem Durchfluss auch weniger Honig nachtropft und die Klappe entsprechend näher am Zielgewicht schließen kann.

Wie sich diese Annäherung über die gesamte Sitzung von neun aufeinanderfolgenden Füllvorgängen auf die Füllergebnisse auswirkt, zeigt das folgende Diagramm (Abbildung 8.4).



**Abbildung 8.4:** Leistung der erweiterten Dosierstrategie über die Sitzung: Abweichung zur Zielmasse, Fülldauer und Nachfüllzyklen je Fülllauf (gleiches Format wie beim regelungsbasierten Ansatz, Abb. 9.6).

Der Fehler zur Zielmasse liegt im ersten Lauf noch bei rund 8 g, verbessert sich aber bereits im zweiten Lauf deutlich und pendelt ab dem fünften Lauf konstant um etwa  $-2$  g, mit einem einzelnen Ausreißer von  $+4$  g im vierten Lauf. Ein Nachfüllen war während der gesamten Sitzung nicht nötig. Die Fülldauer ist dank bereits guter Startparameter von Beginn an niedrig und bleibt über die ersten sechs Läufe im Bereich von etwa 11 bis 16 s, steigt ab dem siebten Lauf jedoch deutlich an. Da die Strategie ausschließlich die Restmassen-Schwellwerte und die Nachtropfzeit anpasst, nicht aber die Öffnungsgrade selbst, kann sie den mit sinkendem Füllstand im Abfülleimer abnehmenden Durchfluss nicht ausgleichen: Die Klappenstellung bleibt gleich, während die Füllrate sinkt, und die Fülldauer steigt entsprechend an. Ein Nachführen der Öffnungsgrade, insbesondere ein geringeres Reduzieren in der langsamen Phase, wenn der Durchfluss ohnehin schon niedrig ist, könnte dem entgegenwirken, wird in dieser Variante aber bewusst noch nicht vorgenommen.

## 9 Untersucher regelungsbasierter Ansatz

### 9.1 Motivation und Zielsetzung

Weder die heuristische Strategie aus Kapitel 7 noch die adaptive Strategie aus Kapitel 8 verändern die Klappenstellung kontinuierlich während eines Füllvorgangs. Beide verwenden feste Öffnungsstufen; die adaptive Variante passt lediglich Schwellwerte und Nachtropfzeit zwischen den Läufen an. Sinkender Füllstand im Abfülleimer oder eine veränderte Honigviskosität führen daher bei gleicher Klappenstellung zu einem abweichenden Honigfluss, ohne dass die Strategien unmittelbar darauf reagieren können. Der regelungsbasierte Ansatz verwendet stattdessen die laufend bestimmte Füllrate als Regelgröße und führt die Klappenstellung kontinuierlich nach. Dafür sind ein vereinfachtes Streckenmodell sowie ein Regler erforderlich, der die in Kapitel 6 beschriebenen Totzeiten, Nachlaufeffekte und das verrauschte Ratensignal berücksichtigt. Die folgenden Abschnitte untersuchen, wie sich diese Struktur auf der realen Anlage umsetzen lässt.

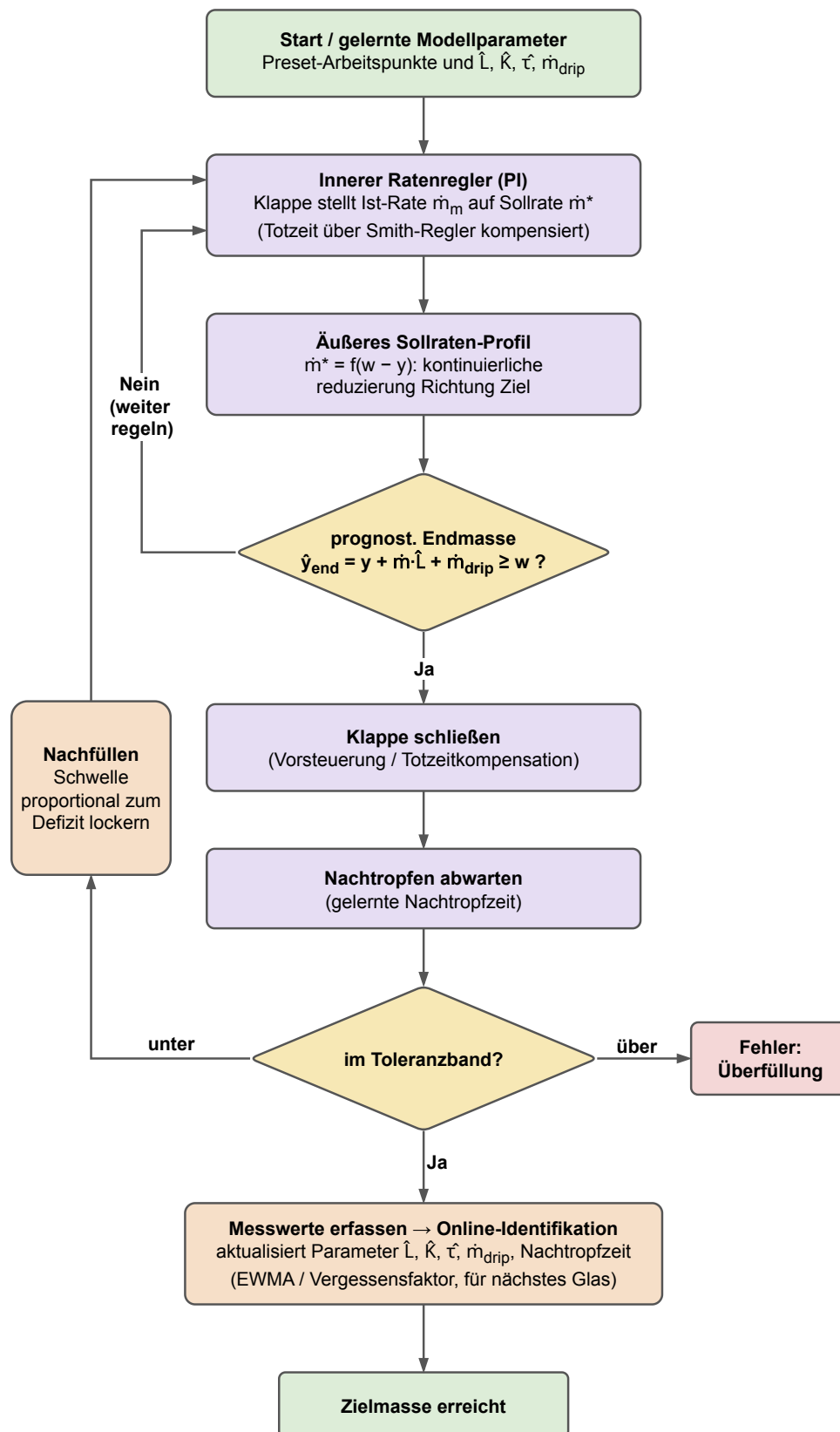
Damit ist der Ansatz konzeptionell aufwendiger als die beiden vorangegangenen Varianten. Er benötigt eine, wenn auch stark vereinfachte, Vorstellung vom Übertragungsverhalten der Strecke aus Kapitel 6 und eine Reglerauslegung, die mit der dort beschriebenen Totzeit, dem Nachlauf und dem verrauschten Ratensignal umgehen kann. Ein solcher Regelkreis lässt sich auf der realen Anlage umsetzen und führt einen vollständigen Füllvorgang eigenständig durch.

### 9.2 Grundidee und Ablauf

Der Ansatz besteht aus einer Kaskadenregelung mit einem inneren Ratenregler und einem äußeren Sollraten-Profil. Der innere Ratenregelkreis ist als Smith-Reglerstruktur ausgeführt und berücksichtigt die Totzeit zwischen einer Änderung der Klappenstellung und der messbaren Reaktion der Füllrate. Die benötigten Streckenparameter werden aus den Messwerten geschätzt und während beziehungsweise nach geeigneten Prozessabschnitten aktualisiert. Damit konkretisiert der Regelkreis die in Abbildung 6.1 eingeführte Wirkstruktur.

Stellgröße ist die Klappenstellung  $\alpha$ . Die innere Schleife regelt die aus der Wägezelle abgeleitete und gefilterte Füllrate  $\dot{m}_m$  auf die Sollrate  $\dot{m}^*$ . Diese wird vom äußeren Profil aus dem verbleibenden Massefehler  $w - y_m$  bestimmt; Zielgröße des Gesamtvorgangs bleibt die erreichte Endmasse  $y$ . Abbildung 9.1 zeigt den Ablauf als Flussdiagramm. Sein Kernstück bilden die beiden obersten violetten Blöcke: der innere Ratenregler und das äußere Sollraten-Profil.





**Abbildung 9.1:** Ablaufdiagramm der regelungsbasierten Dosierstrategie: innerer Ratenregler und äußeres Sollraten-Profil, vorausschauendes Schließen sowie Nachfüll-/Toleranzlogik mit anschließender Parameteraktualisierung.

Zu Beginn eines Füllvorgangs stehen die aus vorangegangenen Läufen geschätzten Modellparameter zur Verfügung (grünes Startfeld). Der innere Ratenregler führt die Klappenstellung so nach, dass die gemessene Füllrate der vom äußeren Profil vorgegebenen Sollrate  $\dot{m}^* = f(w - y)$  folgt. Diese nimmt mit sinkendem Massedefizit kontinuierlich ab, anstatt wie bei der heuristischen Strategie zwischen festen Öffnungsstufen umzuschalten.

Anschließend prüft die gelbe Raute, ob die geschätzte Endmasse  $\hat{y}_{\text{end}} = y + \dot{m}\hat{L} + m_{\text{drip}}$  die Zielmasse  $w$  erreicht. Die Gleichung berücksichtigt neben der aktuellen Masse den während der geschätzten Totzeit  $\hat{L}$  noch transportierten Anteil und den erwarteten Nachlauf. In der Firmware werden die beiden letzten Anteile zu einem empirisch gelernten Restmassen-Schätzwert zusammengefasst, um eine Doppelzählung zu vermeiden (Abschnitt 9.3). Ist die Schließbedingung noch nicht erfüllt, wird der Regelzyklus mit dem nächsten Messwert fortgesetzt.

Bei erfüllter Schließbedingung greift die Entscheidung direkt in die Ansteuerung ein und schließt die Klappe vorgesteuert sowie totzeitkompensiert, anstatt die Sollrate schrittweise bis auf null auszuregeln. Die konkrete Umsetzung beschreibt Abschnitt 9.3.

Nach der gelernten Nachtropfzeit wird die erreichte Füllmasse geprüft. Bei Unterfüllung wird die Nachfüllschwelle abhängig vom verbleibenden Defizit gelockert und der Ratenregler erneut aktiviert; eine Überfüllung beendet den Lauf mit einem Fehler. Nach einem erfolgreichen Lauf werden Totzeit, Zeitkonstante, Nachlaufmasse und Nachtropfzeit für das folgende Glas aktualisiert. Hierfür werden teilweise EWMA-Filter verwendet, während die Parameter der affinen Streckenkennlinie bereits während des Füllvorgangs durch ein RLS-Verfahren mit Vergessensfaktor nachgeführt werden (Abschnitt 9.3).

### 9.3 Regelkreis und Umsetzung

Abbildung 9.2 zeigt den implementierten Regelkreis im Detail und ergänzt das Flussdiagramm um die konkrete Signalführung. Farblich sind darin die beiden Regler rot, die Strecke grün, die Messeinrichtung blau sowie der Smith-Kompensator und das Vorsteuerglied  $F_V$  violett hinterlegt, die Online-Identifikation ist orange. Das gelbe Feld fasst die bereits beschriebene Schließentscheidung zusammen.

Das Diagramm unterscheidet außerdem konsequent zwischen der tatsächlichen Prozessgröße und ihrer Messung:  $y$  und  $\dot{m}$  bezeichnen die reale Füllmasse und Füllrate,  $y_m$  und  $\dot{m}_m$  die jeweils über die Wägezelle gemessenen, gefilterten Größen. Ein Dach kennzeichnet durchgehend online geschätzte bzw. identifizierte Größen, etwa  $\hat{L}$ ,  $\hat{K}$  oder  $\hat{\tau}$ , während der Index  $p$  eine daraus berechnete Modellgröße markiert, etwa die Modellrate  $\dot{m}_p$ .

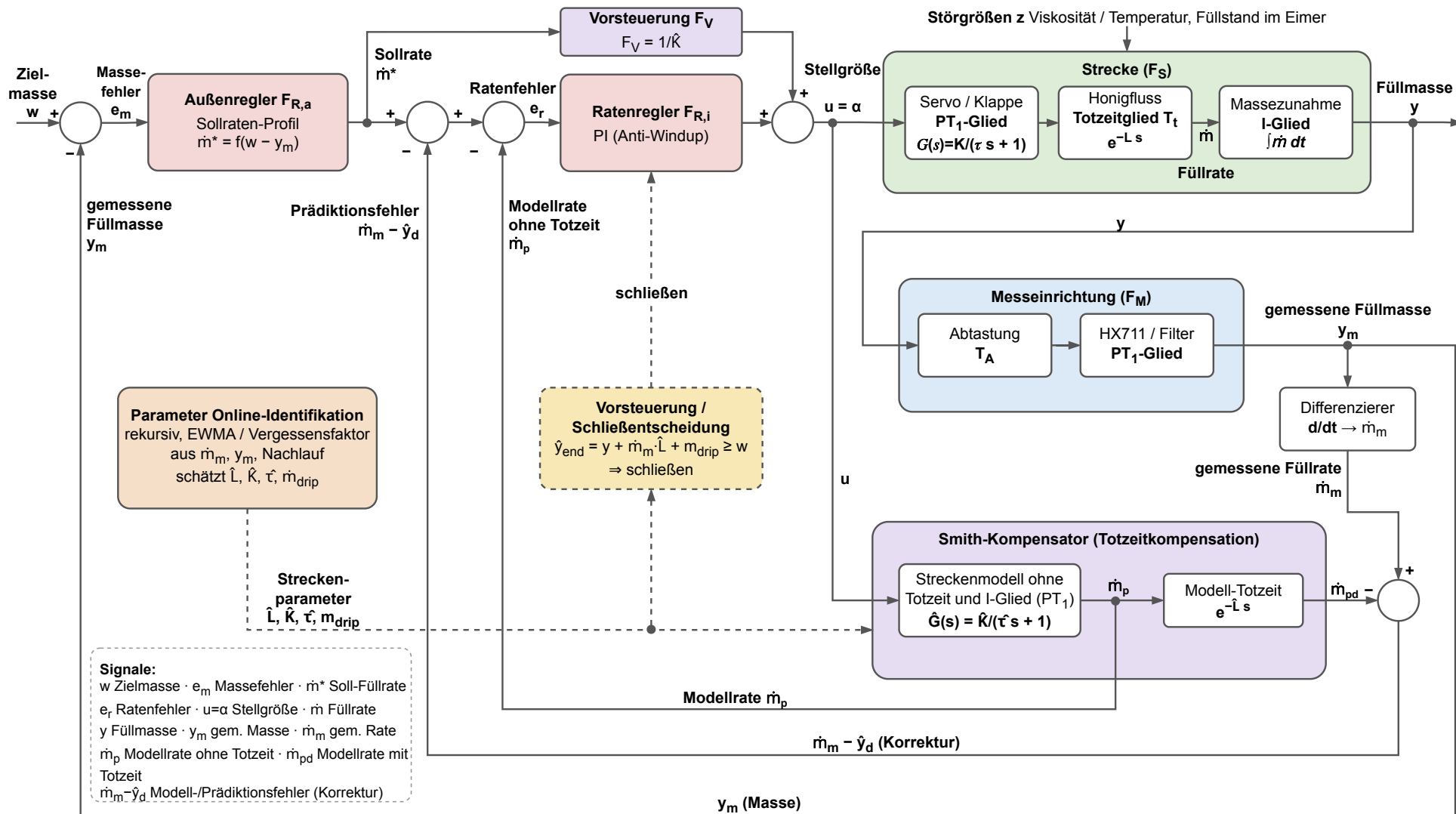
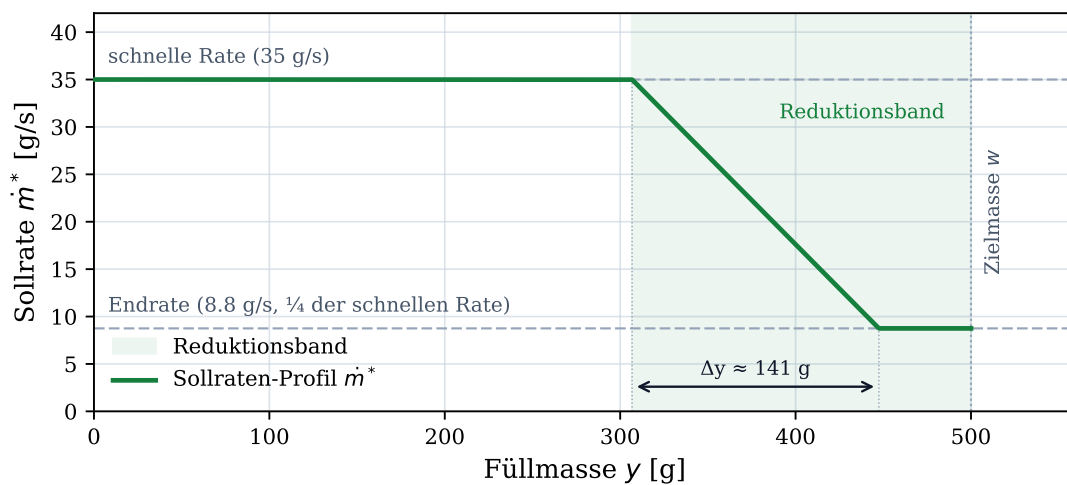


Abbildung 9.2: Detailliertes Blockschaltbild der regelungsbasierten Dosierstrategie (Kaskadenregelung) mit Smith-Reglerstruktur zur Totzeitkompensation und laufender Online-Identifikation der Modellparameter. Eigene Darstellung, Smith-Reglerstruktur nach [22, S. 8 f.].

### Reduktionsband und äußeres Sollraten-Profil

Das äußere Sollraten-Profil ist keine klassische Regelkennlinie, sondern ein festes Übergangsprofil zwischen zwei Betriebspunkten: der vollen, gelernten schnellen Rate weitab vom Ziel und einer niedrigen Endrate kurz vor dem Schließen. Innerhalb eines bestimmten Massebereichs, dem *Reduktionsband*, wird zwischen diesen beiden Raten linear interpoliert. Die dafür verwendete Restmasse wird zuvor um die während der Totzeit noch zulaufende Menge und den erwarteten Nachlauf bereinigt. Der Zweck dieses Bands ist, den Übergang von der schnellen in eine gut kontrollierbare, langsame Phase nicht wie bei der heuristischen Strategie abrupt an einer einzelnen Schwelle zu vollziehen, sondern kontinuierlich zu gestalten. Seine Breite orientiert sich an der erwarteten Nachlaufmasse und der Totzeit-Transportmasse und wächst damit mit einer trägeren Strecke automatisch mit.

Abbildung 9.3 zeigt diesen Verlauf anhand repräsentativer Beispielwerte. Links des grün hinterlegten Reduktionsbands bleibt die Sollrate auf der schnellen Rate, innerhalb sinkt sie linear bis auf die Endrate ab, ein Viertel der schnellen Rate. Die eingezeichnete Breite  $\Delta y$  des sichtbaren Übergangs ergibt sich aus dem Reduktionsband zuzüglich der bei schneller bzw. Endrate jeweils unterschiedlichen, kompensierten Transportmasse.



**Abbildung 9.3:** Beispielhafter Verlauf des äußeren Sollraten-Profiles  $\dot{m}^*$  über der Füllmasse  $y$  mit repräsentativen Beispielwerten: schnelle Rate, Reduktionsband und Endrate.

### Ratenregler und Vorsteuerung

Der innere Ratenregler  $F_{R,i}$  ist im Kern ein PI-Regler mit Anti-Windup auf den Ratenfehler  $e_r = \dot{m}^* - \dot{m}_m$  (mit der gemessenen Füllrate  $\dot{m}_m$ ) [23]. Parallel dazu liegt im Blockschaltbild das violett hinterlegte Vorsteuerglied  $F_V$ , das das online geschätzte affine Streckenmodell  $\dot{m} = \hat{K} \cdot \alpha + \hat{b}$  zwischen Klappenstellung  $\alpha$  (der Stellgröße  $u = \alpha$ ) und Füllrate direkt invertiert. Darin ist  $\hat{K}$  die Streckenverstärkung und  $\hat{b}$  ein Achsenabschnitt, der den nichtlinearen Flussbeginn bei kleiner Klappenöffnung als konstanten Offset annähert und meist negativ ist. Die Ausgänge von Ratenregler und Vorsteuerglied werden an einer eigenen Summationsstelle vor

der Strecke addiert, sodass der PI-Anteil im Idealfall nur noch kleine Korrekturen um den bereits vorgesteuerten Arbeitspunkt ausregeln muss. Farblich ist das Vorsteuerglied damit derselben Gruppe wie der Smith-Kompensator zugeordnet, von dessen ebenfalls modellbasierter Korrektur es sich aber unterscheidet: Die Vorsteuerung bestimmt direkt einen Anteil der Stellgröße, während der Modellzweig der Smith-Reglerstruktur stattdessen die für die Regelabweichung verwendete Ratenschätzung korrigiert.

Als Übertragungsglied betrachtet ist  $F_V$  rein statisch,

$$\alpha_V = F_V(\dot{m}^* - \hat{b}), \quad F_V = \frac{1}{\hat{K}},$$

und wirkt additiv parallel zum PI-Anteil auf dieselbe Stellgröße,  $u = \alpha_V + \alpha_{PI}$ . Eine vollständige dynamische Vorsteuerung müsste zusätzlich das Verzögerungsverhalten  $(\hat{\tau}s + 1)/\hat{K}$  der Strecke invertieren, wäre wegen der enthaltenen Totzeit aber ohnehin nicht kausal realisierbar [24]. Die Vorsteuerung beschränkt sich deshalb bewusst auf die statische Verstärkung, während die dynamischen Anteile dem PI-Regler und der im Folgenden beschriebenen modellbasierten Totzeitkompensation überlassen bleiben.

Der Steigungsparameter  $\hat{K}$  wird dazu nicht fest vorgegeben, sondern im Betrieb aus einzelnen stationären Beobachtungen geschätzt. Sobald die Klappe lange genug in einer Stellung gehalten wurde, dass die gemessene Rate nicht mehr der um eine Totzeit zurückliegenden Stellung folgt, liefert das Verhältnis aus gemessener Füllrate und wirksamer Öffnung einen Schätzwert für  $\hat{K}$ , der über einen exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwert (EWMA) geglättet wird. Diese Glättung lässt die Schätzung einer langsamen Drift der Strecke folgen, etwa dem mit sinkendem Füllstand abnehmenden Honigfluss, ohne dass einzelne verrauschte Beobachtungen den Wert sofort verschieben. Der Achsenabschnitt wird nicht unabhängig identifiziert, sondern ergibt sich aus  $\hat{b} = -\hat{K} \alpha_0$  mit dem fest kalibrierten Totwinkel  $\alpha_0$  des Ventils, also der Klappenöffnung, unterhalb der noch kein Honig fließt. Die Aktualisierung erfolgt damit bereits innerhalb eines laufenden Füllvorgangs aus den tatsächlich angefahrenen Klappenstellungen und nicht erst zwischen zwei Läufen.

### Taktung der Regelaktualisierung

Die Aktualisierung des Ratenreglers orientiert sich an der laufend geschätzten Totzeit, wartet dabei aber nicht immer exakt genau eine Totzeit lang, sondern ist zusätzlich nach oben auf aktuell 2,5 s begrenzt. Diese Obergrenze ist keine reine Randbedingung, sondern greift in der Praxis durchaus regelmäßig: Bei deutlich zähflüssigerem Honig mit einer Totzeit von etwa 5 s würde eine rein an der Totzeit orientierte Taktung den Regelkreis so träge machen, dass er kaum noch praktisch nutzbar wäre. In diesem Fall taktet die Regelung schneller, als es die geschätzte Totzeit allein nahelegen würde. Für den in Abschnitt 9.4 gezeigten Lauf mit einer gemessenen Totzeit von rund 0,9 s liegt die tatsächliche Taktung dagegen noch unterhalb dieser Grenze und folgt näherungsweise der Totzeit selbst.

Dass die Taktung überhaupt so langsam gewählt ist, wirkt zunächst widersprüchlich. Die Smith-Reglerstruktur soll die Totzeit ja gerade aus dem Regelkreis herausrechnen und dadurch schnellere Reaktionen auf der totzeitfreien Modellrate ermöglichen. Bei einem exakt bekannten Streckenmodell wäre eine so zurückhaltende Taktung nicht nötig. Das hier verwendete affine Modell und die geschätzte Totzeit bleiben jedoch nur Näherungen. Zwar werden Streckenverstärkung und Zeitkonstante bereits innerhalb eines Laufs aus einzelnen stationären Beobachtungen nachgeführt, doch beschreibt das Modell den tatsächlich nichtlinearen Prozess nur als lokale Sekante zwischen zwei Betriebspunkten und stützt sich auf wenige, aus einem gefilterten und verzögert verfügbaren Ratensignal gewonnene Beobachtungen. Eine schnellere Regelung auf Basis eines noch unsicheren Modells liefe Gefahr, eher auf Prädiktionsfehler als auf tatsächliche Ratenänderungen zu reagieren und dadurch zu schwingen, zumal die verwendete Rate selbst aus einer numerisch differenzierten, verrauschten Gewichtsmessung stammt (Kapitel 6). Die eher langsam gewählte Taktung ist damit weniger eine regelungstechnisch zwingende Notwendigkeit als eine bewusst konservative Sicherheitsmarge gegenüber Modellunsicherheit und Messrauschen, die zugleich der Online-Identifikation Zeit gibt, den aktuellen Betriebspunkt vor der nächsten Stellgrößenänderung stabil zu erfassen. Da eine Überfüllung ein nicht mehr korrigierbares Ergebnis ist, wurde diese Abwägung bewusst zugunsten von Stabilität und nicht von maximaler Regeldynamik getroffen.

### Totzeitkompensation mit der Smith-Reglerstruktur

Da die Strecke selbst totzeitbehaftet ist, ist der Ratenregelkreis zusätzlich als Smith-Reglerstruktur zur Totzeitkompensation ausgeführt [25], deren Aufbau der Darstellung im Vorlesungsskript folgt [22, S. 8 f.]. Die international häufig als *Smith Predictor* bezeichnete Gesamtstruktur wird entsprechend der Terminologie des verwendeten Vorlesungsskripts im Folgenden als Smith-Reglerstruktur bezeichnet. Formal lässt sich die Strecke auf Ratenebene als  $PT_1$ -Glied mit vorgeschalteter Totzeit auffassen und in ein totzeitfreies Teilmodell sowie ein reines Totzeitglied zerlegen,

$$G(s) = \underbrace{\frac{\hat{K}}{\hat{\tau}s + 1}}_{\hat{G}(s) \text{ (totzeitfrei)}} \cdot \underbrace{e^{-\hat{L}s}}_{\text{Totzeitglied}},$$

mit der online identifizierten Streckenverstärkung  $\hat{K}$ , der Zeitkonstante  $\hat{\tau}$  und der Totzeit  $\hat{L}$ . Der Modellzweig der Smith-Reglerstruktur nutzt das totzeitfreie Teilmodell  $\hat{G}(s)$ , um aus der Stellgröße  $u$  die Modellrate  $\dot{m}_p = \hat{G}(s) u$  zu bilden, und verzögert diese separat zu  $\dot{m}_{pd} = e^{-\hat{L}s} \dot{m}_p$ . Der für den Ratenregler verwendete Ratenfehler ergibt sich damit zu

$$e_r = \underbrace{\dot{m}^* - \dot{m}_p}_{\text{Fehler auf Basis der Modellrate}} - \underbrace{(\dot{m}_m - \dot{m}_{pd})}_{\text{Modell-/Prädiktionsfehler (Korrektur)}}.$$

Während die Zerlegung in totzeitfreies Teilmodell und Totzeitglied und die daraus gebildete Prädiktorkorrektur der Standardtheorie der Smith-Reglerstruktur entsprechen, sind die konkrete Zuordnung von Sollrate  $\dot{m}^*$ , Modellrate  $\dot{m}_p$ , verzögerter Modellrate  $\dot{m}_{pd}$  und Messrate  $\dot{m}_m$  zum Ratenfehler  $e_r$  sowie dessen Einbettung in die Kaskade anwendungsspezifische Festlegungen dieser Arbeit. Im Blockschaltbild entspricht das den beiden Summationsstellen links oben: Die dem Außenregler  $F_{R,a}$  vorgeschaltete Stelle bildet den Massefehler  $e_m = w - y_m$ , die dem Ratenregler  $F_{R,i}$  vorgeschaltete Stelle führt Sollrate  $\dot{m}^*$ , Modellrate  $\dot{m}_p$  und die Korrektur  $\dot{m}_m - \dot{m}_{pd}$  jeweils mit negativem Vorzeichen zu  $e_r$  zusammen. Stimmt das Modell mit der Strecke überein, kürzt sich der zweite Term im eingeschwungenen Zustand heraus, und der Regler reagiert effektiv auf die totzeitfreie Modellrate  $\dot{m}_p$  statt auf die um  $\hat{L}$  verzögerte Messung  $\dot{m}_m$ . Weicht das Modell von der Strecke ab, bleibt die Abweichung  $\dot{m}_m - \dot{m}_{pd}$  als Prädiktionsfehler bestehen und korrigiert sowohl den Ratenregler als auch die für die Schließentscheidung verwendete Modellrate  $\dot{m}_p$ . Solange kein plausibles Streckenmodell vorliegt, etwa zu Beginn eines Presets ohne gelernte Werte, fällt der Regelkreis auf die direkt gemessene, gefilterte Rate zurück.

### Vorausschauende Schließentscheidung

Die in Abschnitt 9.2 beschriebene Schließentscheidung wertet dabei nicht wörtlich die Summe aus zwei getrennten Termen  $\dot{m}\hat{L}$  und  $m_{\text{drip}}$  aus. Stattdessen lernt die Firmware Totzeit-Transportmasse und Nachlauf gemeinsam als einen einzigen Restmassen-Schätzwert und schließt, sobald die verbleibende Masse diesen Schätzwert zuzüglich eines kleinen Sicherheitsaufschlags unterschreitet. Im Kern folgt sie damit demselben Prinzip wie die direkt gelernte Nachlaufmasse der adaptiven Strategie aus Kapitel 8: Auch dort wird die nach dem Schließen noch zulaufende Masse als ein einzelner, unmittelbar aus Messwerten geschätzter Wert geführt, statt sie aus mehreren Modelltermen zusammenzusetzen. Beide Formulierungen beschreiben dasselbe Schließkriterium, einmal konzeptionell in getrennte Terme zerlegt und einmal implementierungsnah zu einem Schätzwert zusammengefasst. Die getrennte Darstellung im Flussdiagramm eignet sich besser zur Erklärung des Prinzips, die firmwareseitige Zusammenfassung vermeidet dagegen eine doppelte Berücksichtigung der während der Totzeit ohnehin schon im Nachlauf enthaltenen Masse.

Diese Schließentscheidung wird jeden Regelzyklus vor dem eigentlichen Ratenregler geprüft. Bei Erreichen der Schwelle wird der Regelschritt für diesen Zyklus ausgelassen und die Klappe stattdessen sofort geschlossen.

### Umsetzungsstand

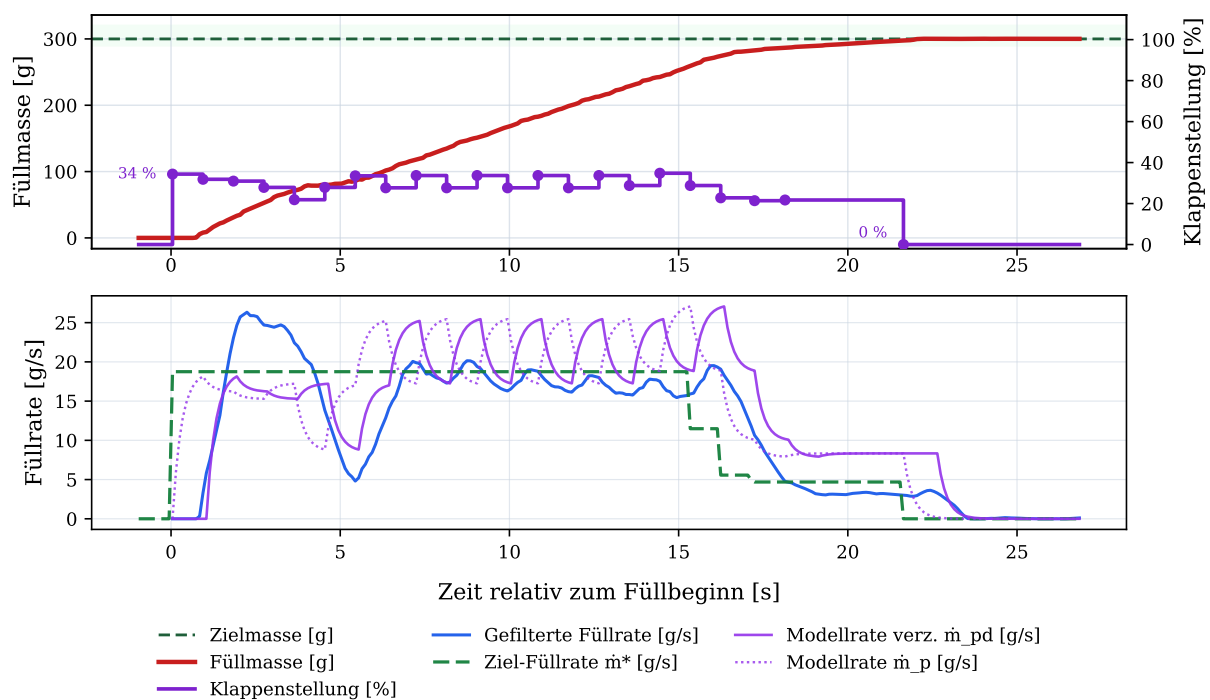
Umgesetzt sind damit der vollständige Kaskadenregelkreis mit Vorsteuerung, PI-Ratenregler mit Smith-Modellstruktur und Online-Identifikation sowie ein Sicherheitslayer, der bei unplausibel hoher Rate die Klappe abgestuft schließt und bei harter Überfüllung sofort abbricht. Nicht umgesetzt ist eine Modellierung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Klappenöffnung und Honigfluss aus Abbildung 6.3, das affine Modell approximiert diesen Zusammenhang



stattdessen lokal um die beiden gelernten Betriebspunkte. Ebenso wenig werden Viskosität, Temperatur oder Füllstand als eigene Störgrößen erfasst, ihr Einfluss geht nur indirekt über die laufend nachgeführten Schätzwerte in die Regelung ein. Die Reglerverstärkungen des inneren PI-Reglers wurden empirisch und bewusst konservativ gewählt. Eine systematische Reglerauslegung, etwa über eine Sprungantwort- oder Kennwertidentifikation des geschätzten Modells, wurde noch nicht durchgeführt.

## 9.4 Versuche und Beobachtungen

Aufbau und Randbedingungen entsprechen den gemeinsamen Grundlagen aus Kapitel 6. Die folgende Auswertung stützt sich auf eine Sitzung von neun aufeinanderfolgenden Füllvorgängen mit einer dünnflüssigen Testflüssigkeit: zunächst anhand eines repräsentativen Einzellaufs, anschließend anhand der Entwicklung der identifizierten Streckenparameter und der Füllergebnisse über die gesamte Messreihe.



**Abbildung 9.4:** Repräsentativer Lauf des kaskadierten regelungsbasierten Ansatzes (dünnes, klebriges Testfluid). Oben Füllmasse und Klappenstellung, unten die geregelte Füllrate im Vergleich zur Ziel-Füllrate  $\dot{m}^*$  und zur (verzögerten) Modellrate  $\dot{m}_{pd}$  bzw. zur totzeitfreien Modellrate  $\dot{m}_p$ .

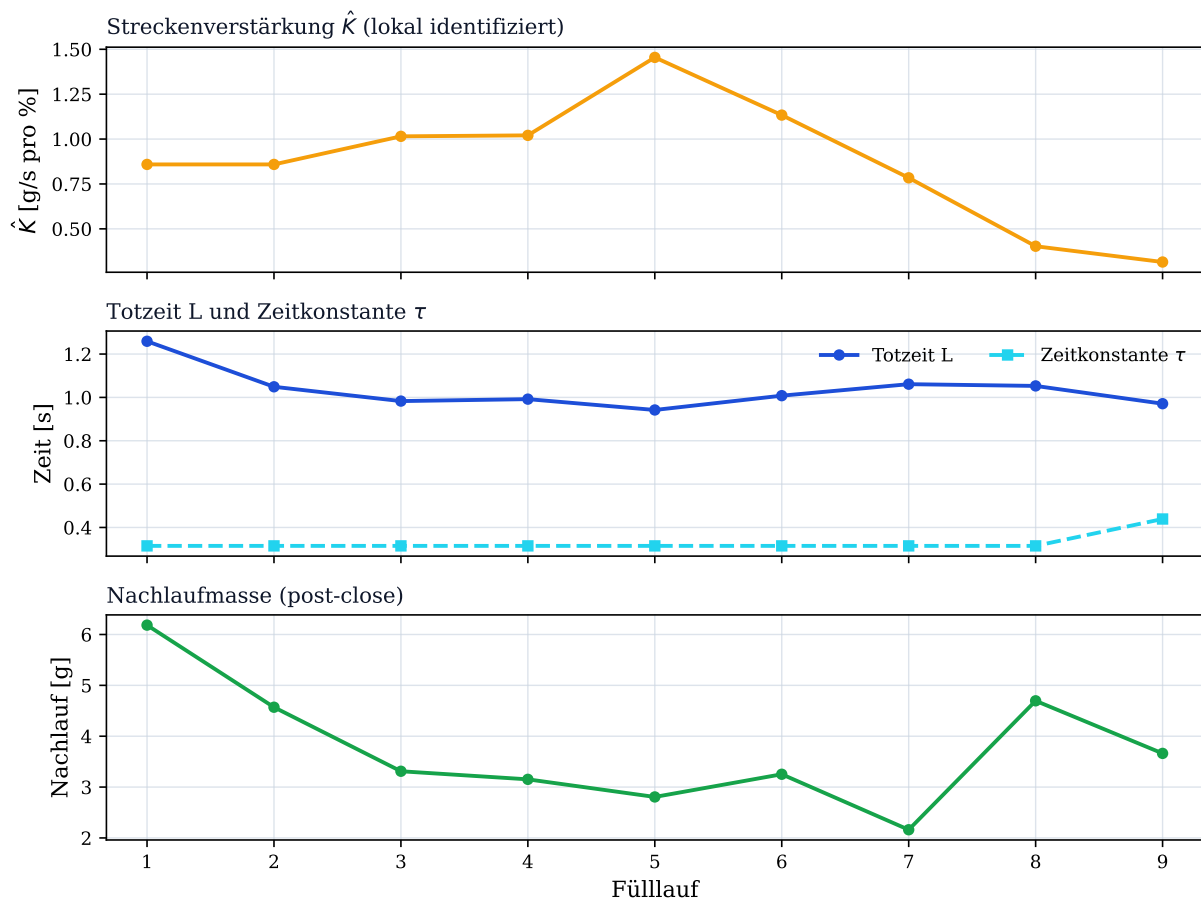
**Gelerntes Streckenmodell:**  $\hat{K} \approx 1,45 \text{ g/s pro } \%$ , Totwinkel  $16 \%$ , Zeitkonstante  $\tau \approx 0,32 \text{ s}$ , Totzeit  $\approx 0,94 \text{ s}$ , Nachlaufmasse  $\approx 2,8 \text{ g}$ .

**Ergebnis:** Zielmasse  $300 \text{ g}$ , Endmasse  $300,1 \text{ g}$ , Fehler  $+0,1 \text{ g}$ , kein Nachfüllen.

Im oberen Diagramm steigt die rot dargestellte Füllmasse über die Füllphase von rund 22 s nahezu linear an, während die violette Klappenstellung auf der rechten Achse in vielen kleinen Schritten von anfänglich 34 % bis auf 0 % zurückgeht. Der zeitliche Abstand dieser Schritte

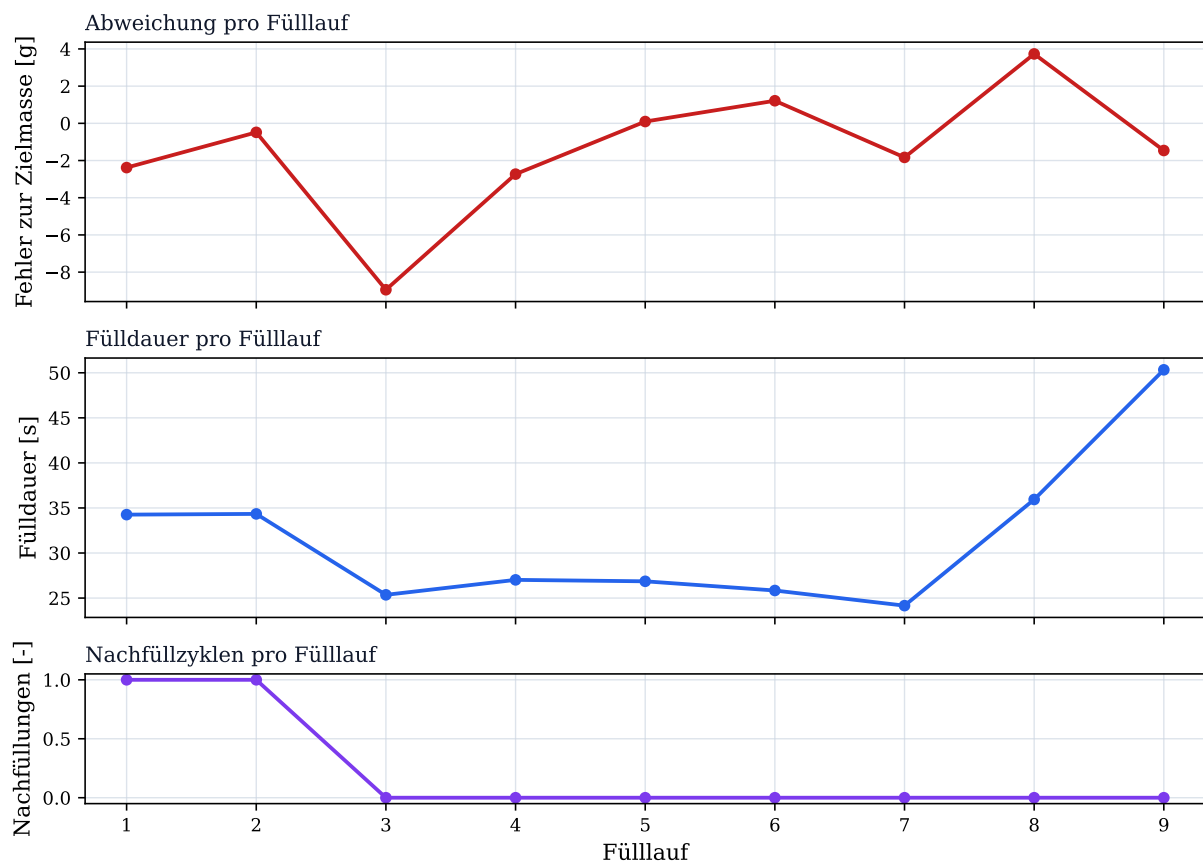
folgt der in Abschnitt 9.3 beschriebenen Taktung der Regelaktualisierung. Dieses fortlaufende Nachführen der Klappe ist ergänzend in einer Videoaufnahme dokumentiert (siehe Anhang B).

Im unteren Diagramm folgt die gemessene, gefilterte Füllrate (blau) der grün gestrichelten Ziel-Füllrate  $\dot{m}^*$  insgesamt recht gut. Die beiden violetten Kurven sind die vom Modellzweig der Smith-Reglerstruktur berechneten Raten (Abschnitt 9.3): gepunktet die totzeitfreie Modellrate  $\dot{m}_p$ , die direkt in den Ratenregler eingeht, durchgezogen die um die Totzeit verzögerte Modellrate  $\dot{m}_{pd}$ , die als Gütemaß für die Modellgenauigkeit dient und im Idealfall deckungsgleich mit der gemessenen Rate liegt. In der ersten Sekunde reagiert die gemessene Rate stärker, als das Modell vorhersagt, die Streckenverstärkung  $\hat{K}$  ist hier also noch zu niedrig geschätzt. Zwischen etwa 7 s und 15 s pendelt sich die Regelung dagegen in ein wiederkehrendes Muster kleiner Korrekturen ein, in dem die totzeitfreie Modellrate deutlich stärker ausschlägt als die gemessene Rate. In dieser Phase ist die Streckenverstärkung  $\hat{K}$  zu hoch geschätzt, sodass das Modell auf eine Stellgrößenänderung eine größere Ratenänderung vorhersagt, als tatsächlich eintritt. Trotz dieser gegenläufigen Abweichungen gleicht der PI-Anteil den verbleibenden Regelfehler ausreichend aus, die tatsächliche Rate bleibt nahe an der Zielrate, und der Lauf erreicht die Zielmasse von 300 g mit einem Fehler von nur 0,1 g ohne Nachfüllen.



**Abbildung 9.5:** Verlauf der online identifizierten Streckenparameter über die Füllläufe der Sitzung: Streckenverstärkung  $\hat{K}$ , Totzeit  $L$  und Zeitkonstante  $\tau$  sowie die gelernte Nachlaufmasse.

Abbildung 9.5 zeigt, wie sich die online identifizierte Streckenparameter über die neun Füllvorgänge der Sitzung entwickeln. Die Streckenverstärkung  $\hat{K}$  startet bei einem bereits guten Wert von rund 0,85 g/s pro %, wird über die ersten Läufe durch die EWMA-Glättung der einzelnen Beobachtungen zunächst nur langsam bis zu einem Maximum beim fünften Lauf nach oben korrigiert und sinkt danach deutlich. Das passt zur Randbedingung der Sitzung: Ab dem sechsten Glas wurde der Füllstand im Vorratsbehälter nicht mehr konstant gehalten, wodurch bei gleicher Klappenöffnung weniger Honig floss. Die Online-Identifikation bildet diese sich ändernde Streckenverstärkung sichtbar nach, genau das Verhalten, das eine Strategie mit fest vorgegebenen Parametern nicht leisten könnte (Abschnitt 9.1). Totzeit und Zeitkonstante werden ebenfalls laufend nachgeführt, bleiben über die Sitzung aber nahezu konstant. Die im untersten Diagramm gezeigte Nachlaufmasse wird nach demselben Prinzip wie bei der adaptiven Strategie aus Kapitel 8 bestimmt.



**Abbildung 9.6:** Leistung über die Sitzung: Abweichung zur Zielmasse, Fülldauer und Nachfüllzyklen je Fülllauf.

Abbildung 9.6 zeigt die Füllergebnisse derselben Sitzung, im selben Diagrammtyp wie in Kapitel 8. Bei den ersten beiden Gläsern schließt die Strategie noch sicherheitshalber zu früh, was jeweils einen Nachfüllzyklus auslöst, das Ergebnis liegt danach aber bereits nah an der Zielmasse. Im dritten Lauf unterschreitet die Füllmasse das Ziel um 9 g, bleibt damit aber noch

innerhalb der Toleranz. Von da an lernt die Strategie das Nachtropfverhalten und bleibt bis zum Ende der Sitzung mit Abweichungen im niedrigen einstelligen Grammbereich vergleichsweise genau. Die Fülldauer ist nur in den ersten beiden, durch das Nachfüllen verlängerten Läufen erhöht und liegt sonst konstant bei rund 27 s, bis sie in den letzten beiden Läufen deutlich ansteigt, genau in dem Zeitraum, in dem auch  $\hat{K}$  wegen des sinkenden Füllstands zurückgeht und auch bei 100 % Öffnung nicht mehr Füllrate zustande kommt.

## 9.5 Ergebnisse und Einordnung

Konzeptionell schließt der regelungsbasierte Ansatz genau die in Abschnitt 9.1 genannte Lücke der adaptiven Strategie: Er reagiert innerhalb eines Füllvorgangs auf die gemessene Rate, statt nur zwischen zwei Läufen zu lernen, und ersetzt den zweistufigen Übergang der heuristischen Ansätze durch eine stufenlose Reduktion. Damit sollte der Ansatz Störungen, die sich erst während eines einzelnen Laufs zeigen, prinzipiell besser ausregeln können als die beiden vorangegangenen Varianten.

Die in Abschnitt 9.4 ausgewertete Sitzung zeigt, dass der Ansatz auf der realen Anlage über mehrere Läufe hinweg zuverlässig nahe an der Zielmasse bleibt, und macht zugleich sichtbar, wovon diese Regelgüte abhängt: von der Qualität des laufend geschätzten Streckenmodells. Weicht die geschätzte Streckenverstärkung  $\hat{K}$  vom tatsächlichen Wert ab, wie im interpretierten Lauf in beide Richtungen zu beobachten, muss der PI-Anteil diesen strukturellen Fehler zusätzlich zu den eigentlichen Störungen ausregeln. Die Sitzung zeigt aber auch die Kehrseite fester Parametrierung: Erst als sich der Füllstand im Vorratsbehälter über mehrere Gläser änderte, eine Störung, auf die die beiden heuristischen Strategien gar nicht reagieren können, passte sich  $\hat{K}$  sichtbar an, während die Fülldauer entsprechend anstieg. Eine feste heuristische Strategie kann ein solches sich änderndes Streckenverhalten weder erkennen noch ausgleichen, da ihre Schwellwerte unverändert bleiben und keinen Bezug zum aktuellen Honigfluss haben. Der regelungsbasierte Ansatz erkennt die Änderung dagegen unmittelbar an der veränderten geschätzten Streckenverstärkung  $\hat{K}$  und führt die Klappenstellung entsprechend nach, auch wenn ihm dafür einige Läufe Anpassungszeit fehlen.

# 10 Vergleich und Diskussion der Strategievarianten

Die Kapitel 7 bis 9 beschreiben und bewerten drei Dosierstrategien einzeln. Dieses Kapitel vergleicht sie anhand der in Kapitel 6 festgelegten Kriterien und begründet die Auswahl der bevorzugten Variante.

## 10.1 Vergleich der Strategievarianten

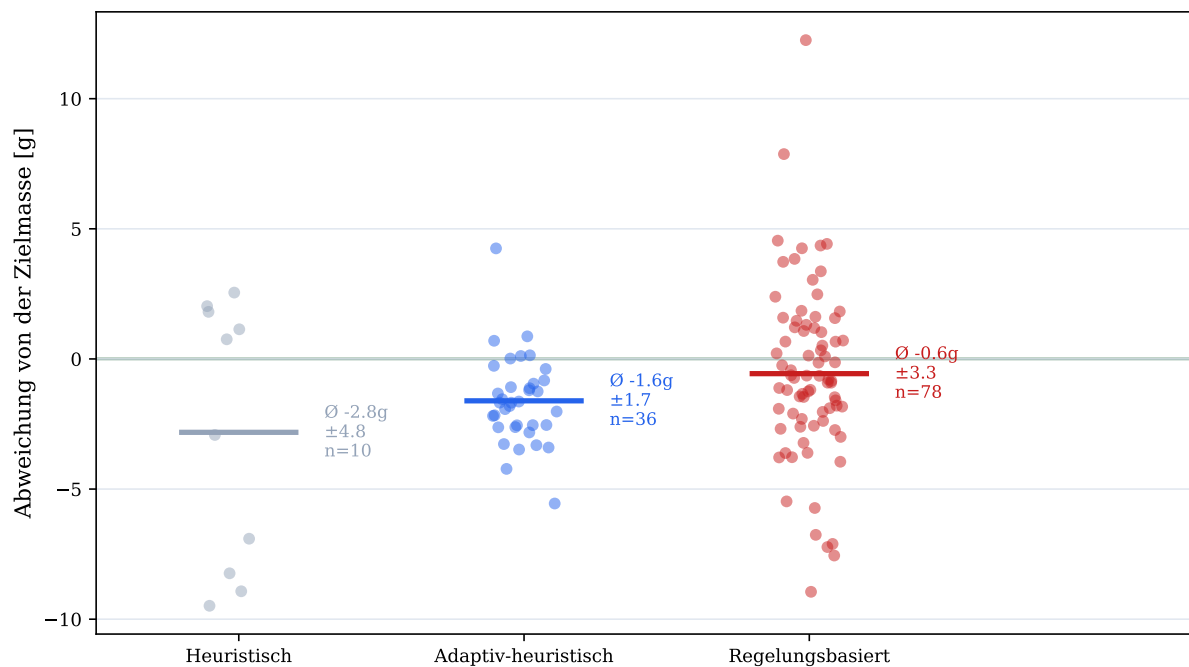
| Kriterium                              | Heuristisch                                      | Adaptiv-heuristisch                                     | Regelungsbasiert                                              |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Grundprinzip                           | Feste Schwellwerte, zweistufige Klappensteuerung | Gleicher Ablauf, Schwellwerte und Nachtropfzeit gelernt | Kaskadierte Ratenregelung mit Smith-Reglerstruktur, stufenlos |
| Anpassung an das Prozessverhalten      | keine, Parameter bleiben fest                    | zwischen Läufen, über EWMA                              | im Lauf, über Online-Identifikation                           |
| Reaktion auf veränderliche Bedingungen | nur manuell                                      | verzögert, über Folgeläufe                              | unmittelbar, im Vorgang                                       |
| Erreichte Genauigkeit                  | parameterabhängig                                | zuverlässig, nach Lernphase                             | im Mittel hoch, größere Streuung und Ausreißerisiko           |
| Fülldauer und Nachfüllbedarf           | schwankend, teils lange Nachfüllsequenzen        | gering, meist ohne Nachfüllen                           | kurz, sofern Modell passt                                     |
| Robustheit und neue Fehlerquellen      | gering                                           | mittel, nur zwischen Läufen                             | modellabhängig, Risiko Fehlidentifikation                     |
| Modell- und Implementierungsaufwand    | gering                                           | gering bis mittel                                       | hoch                                                          |
| Bedien- und Tuning-Aufwand             | hoch, ständiges Nachstellen                      | gering, nur Startwerte                                  | mittel bis hoch, viele Parameter                              |

Farbskala nach Eignung für den Anwendungsfall: günstig eher günstig mittel eher ungünstig ungünstig.

**Tabelle 10.1:** Qualitativer Vergleich der drei Dosierstrategien anhand der Bewertungskriterien aus Kapitel 6 mit farbiger Kennzeichnung der Eignung.

Tabelle 10.1 fasst die wesentlichen Eigenschaften der drei Varianten qualitativ zusammen und ordnet sie entlang von Wirkprinzip, Anpassungsverhalten, erreichbarer Genauigkeit, Fülldauer, Robustheit sowie Implementierungs- und Bedienaufwand ein.

Über die qualitative Einordnung hinaus zeigt Abbildung 10.1 die erreichte Genauigkeit anhand der aufgezeichneten Einzelläufe. Aufgetragen ist die Abweichung der erreichten Füllmasse von der Zielmasse, ein Punkt je befülltem Glas.



**Abbildung 10.1:** Abweichung der erreichten Füllmasse von der Zielmasse für die drei Dosierstrategien. Jeder Punkt entspricht einem Füllvorgang; die horizontale Versetzung dient nur der besseren Sichtbarkeit. Angegeben sind Mittelwert  $\bar{x}$ , Populationsstandardabweichung  $\sigma$  und Stichprobenumfang  $n$ . Berücksichtigt wurden je Sitzung die Läufe ab dem dritten Füllvorgang. Da die Messungen aus unterschiedlichen Testläufen, Honigsorten und Testflüssigkeiten stammen, ist der Vergleich nur indikativ.

Die drei Strategien unterscheiden sich sowohl in der mittleren Abweichung als auch in ihrer Streuung deutlich, die hier als Standardabweichung der Grundgesamtheit angegeben ist. Die heuristische Strategie (grau) trifft die Zielmasse nur in wenigen Läufen sehr genau, nämlich dort, wo die festen Parameter zuvor frisch einjustiert wurden. Daneben treten einzelne hohe und sehr hohe Abweichungen auf, überwiegend als Unterfüllung. Mit sinkendem Füllstand läuft systematisch weniger Honig nach und es gelangt weniger Masse ins Glas, ohne dass die festen Schwellwerte dies ausgleichen. Trotz der kleinsten Stichprobe zeigt sie mit einer Streuung von rund 4,8 g die breiteste Verteilung.

Die adaptiv-heuristische Strategie (blau) liegt mit im Mittel -1,6 g zwar ebenfalls leicht in der Unterfüllung, streut mit etwa 1,7 g aber deutlich enger und bildet eine kompakte Punktwolke.

Die Parameteradaption gleicht den mit dem Füllstand driftenden Prozess zwischen den Läufen aus, sodass die Ergebnisse gleichmäßiger und besser vorhersehbar ausfallen. Nur wenige Ausreißer lassen sich der Lernphase zuordnen.

Die regelungsbasierte Strategie (rot) erreicht mit im Mittel  $-0,6\text{ g}$  die geringste Abweichung, streut mit rund  $3,3\text{ g}$  jedoch stärker als die adaptive Variante und zeigt einzelne deutliche Ausreißer nach oben. Ihre mit 78 Läufen klar größte Punktzahl erklärt sich daraus, dass die Reglerparameter über viele Test- und Firmware-Iterationen erst experimentell festgelegt und erprobt wurden. Ein Teil der Streuung stammt damit aus frühen, noch nicht abgestimmten Läufen und veranschaulicht zugleich die Kehrseite des Ansatzes, da ein falsch eingestellter Regler schnell zu Überfüllung und großen Abweichungen führt. In der Zusammenschau erreicht die adaptive Strategie die verlässlichste Genauigkeit, die regelungsbasierte die im Mittel beste bei größerer Streuung und die heuristische die geringste und am stärksten systematisch verschobene.

Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Strategien nicht unter identischen Bedingungen getestet werden konnten. Die verfügbare Honigmenge war begrenzt, sodass die Versuche zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit verschiedenen Honigsorten und Testflüssigkeiten sowie jeweils sinkendem Füllstand aufgenommen wurden. Abbildung 10.1 umfasst dementsprechend nahezu alle aufgezeichneten Läufe aus verschiedenen Sitzungen, sodass ihre Mittelwerte und Streuungen indikativ und nicht als Ergebnis eines kontrollierten Vergleichs zu verstehen sind. Ein belastbarer quantitativer Vergleich würde Messreihen aller Strategien mit derselben Honigsorte und in einem vergleichbaren Füllstandsbereich voraussetzen, was im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgängig möglich war.

Auf eine quantitative Gegenüberstellung von Füllzeit oder Dosiergeschwindigkeit wird an dieser Stelle bewusst verzichtet. Da die Versuche der einzelnen Strategien überwiegend mit unterschiedlichen Honigsorten und Testflüssigkeiten durchgeführt wurden und sich deren Fließverhalten stark unterscheidet, wäre ein direkter Zeitvergleich nicht aussagekräftig. Aussagen zur Fülldauer bleiben daher auf die qualitative Einordnung in Tabelle 10.1 und die Einzelbetrachtungen der Strategiekapitel beschränkt.

## 10.2 Diskussion und Auswahl der bevorzugten Strategie

Die Unterschiede zwischen den Varianten lassen sich unmittelbar auf ihren Umgang mit dem veränderlichen Prozessverhalten zurückführen. Die heuristische Strategie legt Totzeit, Nachlauf und Füllrate implizit über feste Schwellwerte fest. Diese Größen hängen jedoch von Honigsorte, Temperatur und Füllstand ab und ändern sich nicht nur zwischen verschiedenen Honigen, sondern bereits während einer Messreihe, weil der sinkende Füllstand den treibenden Druck am Auslass verringert (Kapitel 6). Ein fester Parametersatz passt daher bestenfalls für einen einzelnen Betriebspunkt und müsste bei jeder Verschiebung der Bedingungen nachgezogen



werden, was in der Praxis auf ständiges manuelles Nachstellen hinausläuft und die in Kapitel 7 gezeigte hohe Empfindlichkeit gegenüber der Parametrierung erklärt.

Genau hier setzt die adaptive Strategie an. Sie behält den nachvollziehbaren zweistufigen Ablauf bei, ersetzt aber die feste Parametrierung durch aus den Messwerten geschätzte Werte, die dem langsamen Abdriften des Prozesses zwischen den Läufen folgen. Die entscheidende Verbesserung ist damit weniger ein grundsätzlich anderes Wirkprinzip als der Wegfall des manuellen Nachstellens: Die Strategie nähert die konservativen Startwerte innerhalb weniger Läufe an das reale Verhalten an und führt sie anschließend selbsttätig nach. Die in Kapitel 8 gezeigte Verkürzung der Fülldauer und die geringere Abweichung sind eine Folge dieser Nachführung und nicht eines komplexeren Regelkonzepts.

Die adaptive Strategie behebt jedoch nicht jede Schwäche. Sie passt ihre Parameter nur zwischen zwei Läufen an und lernt lediglich die Restmassen-Schwellwerte und die Nachtropfzeit, nicht die Öffnungsgrade selbst. Eine Störung innerhalb eines einzelnen Füllvorgangs oder das erste Glas nach einem Wechsel der Honigsorte wird daher erst über die folgenden Läufe ausgeglichen. Der regelungsbasierte Ansatz schließt genau diese Lücke, indem er die Klappenstellung fortlaufend anhand der gemessenen Rate nachführt und stufenlos statt in zwei festen Stufen übergeht.

Diese zusätzliche Fähigkeit wird mit deutlich höherem Aufwand und einer neuen Fehlerquelle erkaufte. Die Regelgüte hängt unmittelbar von der Güte des laufend geschätzten Streckenmodells ab. Wird dieses fehlerhaft geschätzt, wie im interpretierten Lauf aus Kapitel 9 mit zu niedrig angesetzter Streckenverstärkung, treibt die modellbasierte Vorsteuerung den Fehler zunächst in die falsche Richtung, und der Lauf endet mit einer Überfüllung. Hierin liegt der qualitative Unterschied zu den heuristischen Varianten: Ein fest oder adaptiv gewählter Schwellwert kann bestenfalls ungünstig liegen, ein Regler mit fehlerhaftem Modell stellt den Prozess dagegen aktiv in die falsche Richtung. Da eine Überfüllung nicht mehr korrigierbar ist, wiegt dieses Risiko besonders schwer.

Hinzu kommt eine größere Zahl wechselwirkender Parameter, von den Reglerverstärkungen über die Vergessensfaktoren der Online-Identifikation bis zur Breite des Reduktionsbands und zur Taktung, was das Verhalten schwerer nachvollziehbar und die Auslegung aufwendiger macht. Für den praktischen Einsatz ist zudem die Bedienbarkeit entscheidend: Langfristig soll die Anlage möglichst ohne Fachwissen bedienbar sein und sich selbst auf eine neue Honigsorte einstellen, statt für jede Änderung neu parametrisiert zu werden. Diesem Ziel kommt die adaptive Strategie am nächsten, weil sie sich ausgehend von wenigen konservativen Startwerten selbst nachführt, während die heuristische Variante ständiges Eingreifen erfordert und der regelungsbasierte Ansatz derzeit eine sorgfältige, sachkundige Parametrierung voraussetzt.

Aus diesen Gründen wird für den betrachteten Anwendungsfall, das halbautomatische Abfüllen von Honig unter praxisnah veränderlichen Bedingungen, die adaptiv erweiterte heuristische

Strategie als bevorzugte Variante gewählt. Über die Kriterien Genauigkeit, Robustheit, Aufwand und Bedienbarkeit hinweg bietet sie den günstigsten Kompromiss.

Mit dieser Wahl werden bewusst die genannten Grenzen der adaptiven Strategie in Kauf genommen, vor allem ihre auf den Wechsel zwischen den Läufen beschränkte Reaktion. Für den vorgesehenen Betrieb mit vielen aufeinanderfolgenden Gläsern derselben Sorte und langsam sinkendem Füllstand ist das vertretbar, da gerade dieser langsame Drift zwischen den Läufen ausgeregelt wird.

Die heuristische Strategie behält ihren Wert als transparente Basisvariante und konzeptionelle Grundlage der adaptiven Erweiterung und eignet sich als einfach nachvollziehbares Rückfallverhalten. Der regelungsbasierte Ansatz bleibt ein vielversprechender Ausblick: Er adressiert als einzige Variante die Reaktion innerhalb eines Laufs und könnte die adaptive Strategie übertreffen, sobald die Online-Identifikation zuverlässig genug ist und durch weitere Messreihen abgesichert wurde. Seine grundsätzliche Funktion wurde bislang in einer einzelnen Sitzung mit neun aufeinanderfolgenden Füllvorgängen nachgewiesen (Kapitel 9). Die Übertragbarkeit auf verschiedene echte Honigsorten und breitere Randbedingungen ist damit jedoch noch nicht ausreichend abgesichert, sodass er für eine gleichwertig belastbare Empfehlung noch nicht ausreicht.

# 11 Was wurde erreicht?

## 11.1 Zusammenfassung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein funktionsfähiger Prototyp einer halbautomatischen Abfüllanlage für Honig entstanden. Ein drehbares Magazin, eine servoangetriebene Dosiereinheit und die tragende Basisstruktur, ergänzt um die eigens entwickelte Steuerplatine mit Wägezelle und die zugehörige Firmware, bilden zusammen eine Anlage, die mehrere Gläser nacheinander selbstständig befüllt und dabei typische Fehlbedienungen erkennt. Damit sind die in Kapitel 2 aus den Schwächen des manuellen Abfüllens abgeleiteten Anforderungen an Mechanik, Elektronik und Ablaufsteuerung erfüllt.

Der eigentliche Schwerpunkt lag jedoch nicht im Bau der Anlage, sondern in der Frage, wie das Zielgewicht trotz Totzeit, Nachlauf und veränderlichem Fließverhalten zuverlässig getroffen werden kann. Dazu wurde der Dosierprozess analysiert (Kapitel 6) und die Dosierlogik bewusst als austauschbarer Baustein der Firmware ausgelegt. So konnten unter unverändertem mechanischem und elektronischem Aufbau drei Strategien umgesetzt und verglichen werden: eine feste heuristische Steuerung, eine adaptiv erweiterte Variante mit Parameterlernen zwischen den Läufen und ein regelungsbasierter Ansatz mit kaskadierter Ratenregelung und Smith-Reglerstruktur.

## 11.2 Bewertung der entwickelten Lösung

Der mechatronische Aufbau aus Mechanik, Elektronik und Firmware hat sich als tragfähige Grundlage bewährt. Positionierung, Wägung und Dosierung arbeiten zuverlässig genug, um die Dosierstrategien überhaupt vergleichbar untersuchen zu können.

Welche Strategie sich für den Anwendungsfall durchsetzt, wurde in Kapitel 10 hergeleitet. Ausschlaggebend ist der Umgang mit dem veränderlichen Prozessverhalten: Feste Schwellwerte lassen sich wegen des mit Honigsorte, Temperatur und Füllstand driftenden Prozesses nicht dauerhaft passend einstellen, weshalb die adaptiv erweiterte heuristische Strategie als bevorzugte Variante gewählt wurde. Sie führt Schwellwerte und Nachtropfzeit selbstständig nach und erreicht über die aufgezeichneten Läufe die verlässlichste Genauigkeit, im Mittel etwa  $-1,6\text{ g}$  Abweichung bei der geringsten Streuung, ohne den nachvollziehbaren Ablauf der Basisvariante aufzugeben oder die Modellabhängigkeit des regelungsbasierten Ansatzes zu übernehmen.

Diese Wahl ist bewusst mit Grenzen erkaufte. Die adaptive Strategie reagiert nur zwischen den Läufen und passt die Öffnungsgrade nicht an, sodass die Fülldauer bei stark sinkendem Füllstand innerhalb einer Sitzung ansteigt. Zudem konnten die Strategien wegen der begrenzten Honigmenge nicht unter identischen Bedingungen getestet werden, weshalb der quantitative Vergleich indikativ bleibt.

### 11.3 Ansätze für Weiterentwicklungen

Aus den Ergebnissen lassen sich mehrere konkrete Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung ableiten.

**Adaptive Strategie um variable Öffnungsgrade erweitern.** Die adaptive Strategie lernt bislang nur die Restmassen-Schwellwerte und die Nachtropfzeit, während die Öffnungsgrade fest bleiben. Genau deshalb steigt die Fülldauer bei sinkendem Füllstand innerhalb einer Sitzung an (Kapitel 8). Naheliegend ist daher, zusätzlich die Öffnungsgrade beziehungsweise die angestrebte Füllrate über die Läufe mitzulernen und so nachzuführen, dass eine gewünschte Füllrate näherungsweise gehalten wird. Der mit dem Füllstand abnehmende Durchfluss würde dann zumindest langsam über mehrere Läufe ausgeglichen, ohne bereits die volle Komplexität der kontinuierlichen Regelung aus Kapitel 9 einzuführen. Die Erweiterung schlosse damit einen Teil der Lücke zwischen der adaptiven und der regelungsbasierten Variante.

**Datengestützte Parameteroptimierung.** Als grundsätzlich anderer Ansatz zum Parameterlernen könnte untersucht werden, ob sich die aufgezeichneten Füllvorgänge für eine datengetriebene Optimierung der Strategieparameter nutzen lassen. Dazu ließe sich eine Kostenfunktion aus Füllabweichung, Fülldauer und Nachfüllbedarf bilden und die Strategieparameter beispielsweise mit einem gradientenbasierten Verfahren [26, S. 109–123] schrittweise anpassen. Im Unterschied zur bisherigen direkten Nachführung einzelner Schwellwerte würde damit das gemeinsame Verhalten mehrerer Parameter optimiert. Ob der zusätzliche Daten-, Modellierungs- und Rechenaufwand gegenüber der bestehenden adaptiven Strategie einen praktischen Vorteil bietet, wäre experimentell zu untersuchen.

**Analytische Bestimmung des Schließzeitpunkts.** Statt den Schließzeitpunkt iterativ über gelernte Restmassen anzunähern, ließe er sich direkt aus dem zeitlichen Verlauf der Füllrate bestimmen, sobald sich nach der Öffnungsreduktion eine neue stabile Rate eingestellt hat (bereits in Kapitel 8 angerissen). Erkennbar ist das daran, dass sich die Füllrate nicht mehr ändert und die Krümmung des Massenverlaufs gegen null geht, die zweite Ableitung der Füllmasse also  $\ddot{m} \approx 0$  erreicht. Das Hauptproblem ist, dass die Füllrate bereits als erste Ableitung des ohnehin verrauschten Gewichtssignals gebildet wird, sodass das Erkennen ihrer Änderung eine weitere Ableitung erfordert, die das Rauschen zusätzlich verstärkt. Abhilfe könnten eine stärkere Tiefpassfilterung, eine reduzierte Abtastrate oder eine Auswertung über Masse pro Zeit in einem Fenster statt einer echten Ableitung schaffen.

**Zusätzliche Sensorik und Aktorik.** Als größte Störgrößen haben sich die Viskosität des Honigs und der Füllstand im Abfülleimer herausgestellt. Der Füllstand wirkt dabei systematisch, da er über den hydrostatischen Druck den Honigfluss im Verlauf einer Sitzung stetig verringert (Kapitel 6). Er ließe sich vergleichsweise einfach mit einem Differenzdrucksensor erfassen und der Strategie als zusätzliche Eingangsgröße bereitstellen, um ihn gezielt auszugleichen. Einen

Schritt weiter ginge das auf der Platine bereits vorgesehene Ventil, mit dem sich der Tank mit einem geringen, aus Sicherheitsgründen bewusst niedrig gehaltenen Luftdruck beaufschlagen ließe. Damit könnte der treibende Druck am Auslass aktiv nachgeführt und ein sinkender Füllstand oder eine höhere Viskosität teilweise kompensiert werden. Eine aktive Temperierung des Honigs, wie sie anfangs als Erweiterung angedacht war, erscheint im vorgesehenen Betrieb dagegen wenig praktikabel, da ein gleichmäßiges Durchheizen des zähen Mediums im laufenden Betrieb sehr viel Leistung erfordern würde und sich der Honig in der Praxis einfacher vorab, etwa in einem Wasserbad, erwärmen lässt.

**Mechanische Vereinfachungen.** Auf konstruktiver Seite bietet vor allem die Dosiereinheit Potenzial. Sie muss nach jeder Nutzung abgebaut werden, um den Abfülleimer zu reinigen, sodass derzeit jedes Mal vier Schrauben zu lösen sind. Eine werkzeuglose Klemmung würde diesen wiederkehrenden Ab- und Anbau spürbar beschleunigen.

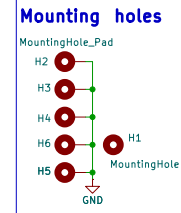
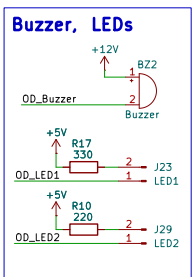
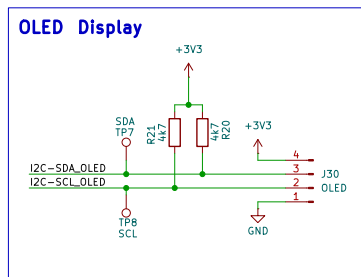
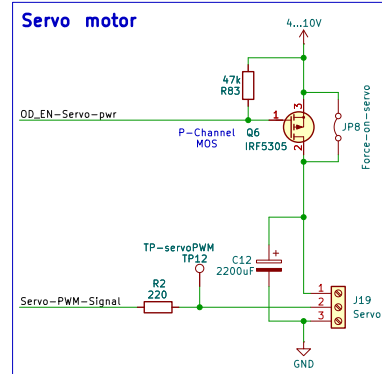
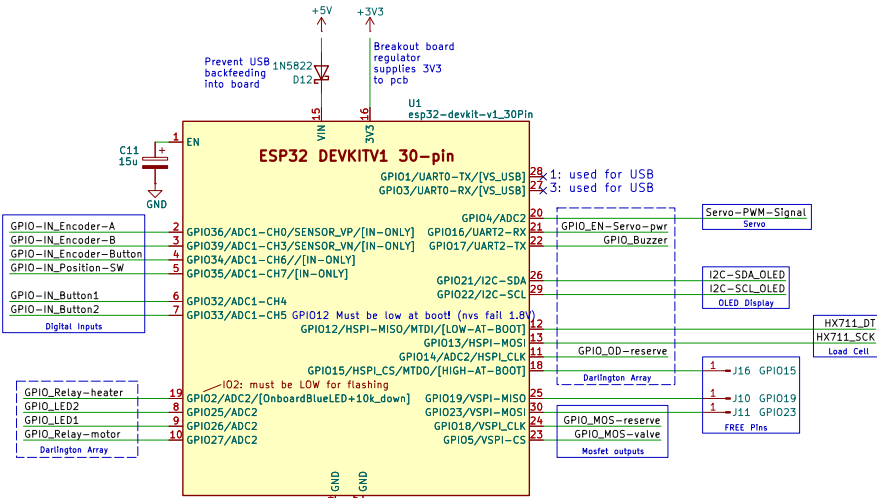
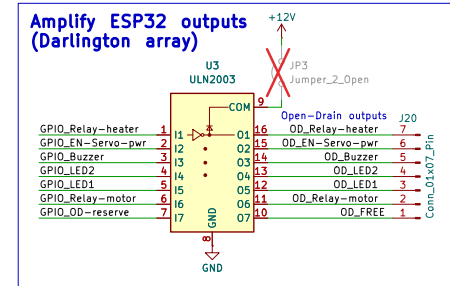
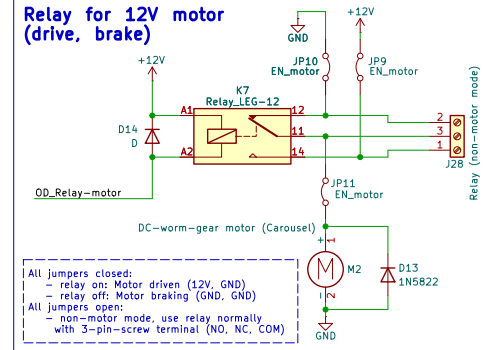
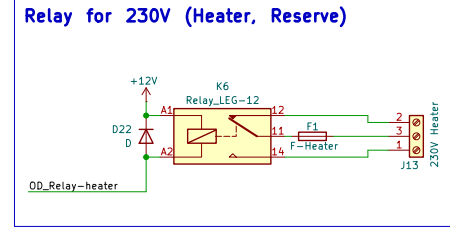
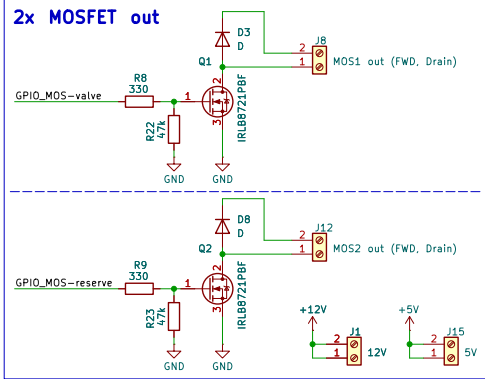
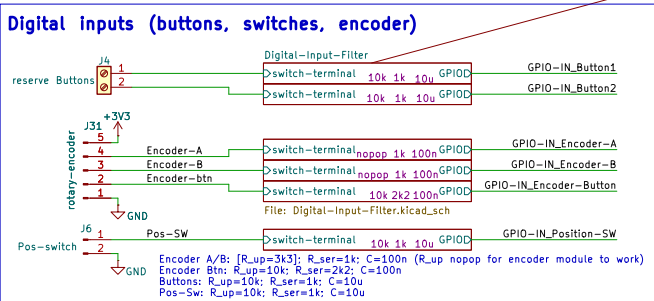
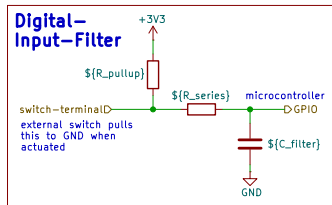
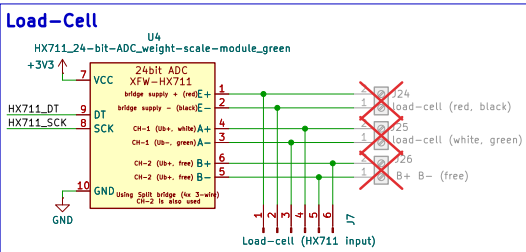
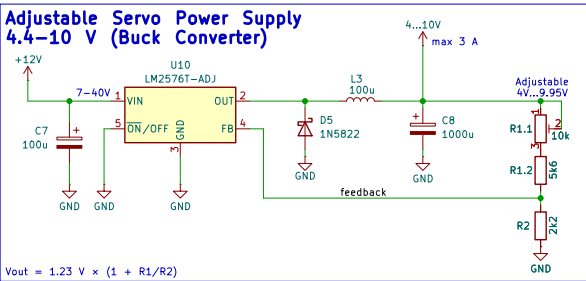
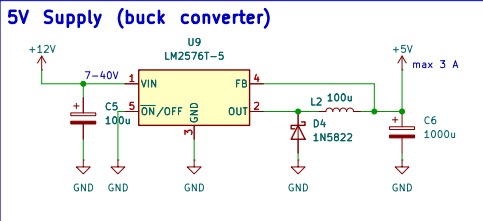
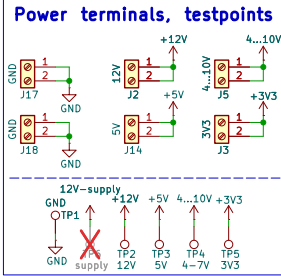
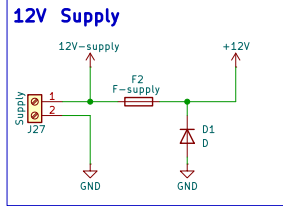
**Abgesicherter Vergleich auf breiterer Datenbasis.** Der in Kapitel 10 indikativ gebliebene Vergleich ließe sich mit Messreihen aller Strategien an derselben Honigsorte und in einem vergleichbaren Füllstandsbereich deutlich absichern. Das gilt besonders für den regelungsbasierten Ansatz, der als einziger innerhalb eines Laufs eingreift und die adaptive Strategie übertreffen könnte, bislang aber nur in einer einzelnen Sitzung mit neun Füllvorgängen und einer vergleichsweise niedrigviskosen Testflüssigkeit erprobt wurde. Er müsste an verschiedenen echten Honigsorten, mit einer besser geeigneten und reproduzierbaren Testflüssigkeit sowie mit einer systematischeren Reglerauslegung getestet werden, bevor sich sein möglicher Vorteil belastbar beurteilen lässt.

# Literaturverzeichnis

- [1] The FreeCAD Team. *FreeCAD: Your own 3D parametric modeler*. URL: <https://www.freecad.org/> (besucht am 17.07.2026).
- [2] Ultimaker B.V. *Ultimaker Cura*. 3D-Slicer-Software. URL: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> (besucht am 17.07.2026).
- [3] Bambu Lab. *Bambu Studio*. 3D-Slicer-Software, basierend auf PrusaSlicer. URL: <https://github.com/bambulab/BambuStudio> (besucht am 17.07.2026).
- [4] Espressif Systems. *ESP32 Series Datasheet*. Version 5.2. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf) (besucht am 17.07.2026).
- [5] Flintec. *How Does a Load Cell Work?* URL: <https://www.flintec.com/nl/learn/weight-sensor/load-cell> (besucht am 17.07.2026).
- [6] AVIA Semiconductor. *HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*. URL: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf) (besucht am 17.07.2026).
- [7] Standex Electronics. *What Is a Reed Switch? Working Principle, Applications, and Benefits*. URL: <https://standexdetect.com/blog/what-is-a-reed-switch-and-how-does-it-work> (besucht am 17.07.2026).
- [8] Shenzhen FEETECH RC Model Co., Ltd. *FT5320M Product Specification*. Version A/0. 9. Juni 2020. URL: <https://www.feetechrc.com/Data/feetechrc/upload/file/20200716/6373049282277666952145716.pdf> (besucht am 18.07.2026).
- [9] Solomon Systech. *SSD1306: Advance Information. 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller*. Version 1.1. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf> (besucht am 20.07.2026).
- [10] Texas Instruments. *LM2576xx Series SIMPLE SWITCHER Power Converter 3-A Step-Down Voltage Regulator*. Version SNVS107G. März 2023. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf> (besucht am 17.07.2026).
- [11] KiCad Development Team. *KiCad EDA: A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*. URL: <https://www.kicad.org/> (besucht am 20.07.2026).
- [12] Espressif Systems. *FreeRTOS (Overview) — ESP-IDF Programming Guide*. Version v5.5.2. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.5.2/esp32/api-reference/system/freertos.html> (besucht am 18.07.2026).
- [13] esp-idf-lib. *hx711 — HX711 24-bit ADC driver (ESP Component Registry)*. Version 1.1.0. URL: <https://components.espressif.com/components/esp-idf-lib/hx711> (besucht am 18.07.2026).

- [14] chill-sam. *ssd1306* — *SSD1306 OLED driver (ESP Component Registry)*. Version 1.1.2. URL: <https://components.espressif.com/components/chill-sam/ssd1306> (besucht am 18.07.2026).
- [15] esp-idf-lib. *encoder* — *rotary encoder driver (ESP Component Registry)*. Version 1.1.0. URL: <https://components.espressif.com/components/esp-idf-lib/encoder> (besucht am 18.07.2026).
- [16] Edward A. Lee und Sanjit A. Seshia. *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach*. 2. Aufl. MIT Press, 2017. ISBN: 9780262533812.
- [17] Espressif Systems. *Non-Volatile Storage Library (NVS) — ESP-IDF Programming Guide*. Version v5.5.2. URL: [https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.5.2/esp32/api-reference/storage/nvs\\_flash.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.5.2/esp32/api-reference/storage/nvs_flash.html) (besucht am 18.07.2026).
- [18] Diego Gómez-Díaz, José M. Navaza und Lourdes C. Quintáns-Riveiro. „Effect of Temperature on the Viscosity of Honey“. In: *International Journal of Food Properties* 12.2 (2009), S. 396–404. DOI: [10.1080/10942910701813925](https://doi.org/10.1080/10942910701813925).
- [19] Jan Lunze. *Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 12. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. DOI: [10.1007/978-3-662-60746-6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60746-6).
- [20] Sabine Bschorer und Konrad Költzsch. *Technische Strömungslehre. Mit 262 Aufgaben und 31 Beispielen*. 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-658-30406-5. DOI: [10.1007/978-3-658-30407-2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-30407-2).
- [21] S. W. Roberts. „Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages“. In: *Technometrics* 1.3 (1959), S. 239–250. DOI: [10.1080/00401706.1959.10489860](https://doi.org/10.1080/00401706.1959.10489860).
- [22] Martin Soika. „Skript zur Vorlesung Regelungstechnik 2 (E640)“. Vorlesungsskript. Dokument P0922 E640-WS25-V/2, über Moodle bereitgestellt. 22. Sep. 2025.
- [23] Karl J. Åström und Tore Hägglund. *Advanced PID Control*. ISA — The Instrumentation, Systems, und Automation Society, 2006. ISBN: 9781556179426.
- [24] Julio E. Normey-Rico und Eduardo F. Camacho. *Control of Dead-time Processes*. London: Springer, 2007. DOI: [10.1007/978-1-84628-829-6](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-829-6).
- [25] O. J. M. Smith. „Closer Control of Loops with Dead Time“. In: *Chemical Engineering Progress* 53.5 (1957), S. 217–219.
- [26] Alexander Jung. *Maschinelles Lernen. Die Grundlagen*. Singapore: Springer, 2024. ISBN: 978-981-99-7972-1. DOI: [10.1007/978-981-99-7972-1](https://doi.org/10.1007/978-981-99-7972-1).





Carrier board for controlling the honey-jar-filler project (mounts modules, power, I/O)  
 In: Encoder, 2xBTN, LIMIT - UI: OLED Display, buzzer, 2xLED  
 Out: Servo(4-10 V), 2xRelay, 2xMOSFET  
 Pwr: 12-40 V in, 5 V buck, adj 4-10 V buck

Sheet: /  
 File: pcb\_honey-jar-filler\_THESIS.kicad\_sch

**Title: honey jar filler control**

Size: A3  
 Date: 2026-03-01  
 KiCad E.D.A. 10.0.3

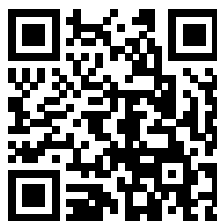
Rev: V1.0  
 Id: 1/1

## B Digitale Begleitmaterialien

Ergänzend zu dieser Arbeit wird eine vom Autor gepflegte Projektseite mit weiterführenden digitalen Materialien zum entwickelten Dosiersystem bereitgestellt. Dort werden insbesondere Inhalte zusammengeführt, die sich in gedruckter Form nur eingeschränkt darstellen lassen, etwa Videoaufnahmen, Quellcode und Konstruktionsdateien. Die Materialien dienen der ergänzenden Dokumentation. Alle für die Argumentation und Bewertung erforderlichen Inhalte sind in der vorliegenden Arbeit enthalten.

Die Projektseite umfasst je nach aktuellem Stand insbesondere:

- Fotografien und Videoaufnahmen der Maschine, des Betriebsablaufs und ausgewählter Versuchsläufe,
- den Firmware-Quellcode mit zugehöriger Versionshistorie,
- die KiCad-Projektdaten mit Schaltplan und PCB-Layout sowie
- CAD-Modelle, ausgewählte technische Zeichnungen und interaktive 3D-Ansichten der Anlage und ausgewählter Baugruppen.



**Projektseite und digitale Begleitmaterialien**

<https://schnber.de/honey-jar-filler>

Die Projektseite kann nach der Abgabe um weitere Inhalte ergänzt werden. Solche Ergänzungen verändern den in dieser Arbeit dokumentierten Entwicklungs- und Ergebnisstand nicht.