



**Technische
Universität
Braunschweig**



Institut für Nachrichtentechnik

Nachrichtentechnik Praktikum

Ein Testbed für molekulare Kommunikation

**Institut für Nachrichtentechnik
Prof. Dr.-Ing. Eduard A. Jorswieck**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Arten der molekularen Kommunikation	3
2.1.1	Diffusion	3
2.1.2	Gap junction channel	3
2.1.3	Molekulare Motoren	4
2.1.4	Bakterientransport	4
2.1.5	Vergleich der Kommunikationsvarianten	4
2.2	Diffusionsbasierter Übertragungskanal	4
2.2.1	Statistische Verteilung im Kanal	5
2.2.2	Empfänger	6
2.3	Moleküle	7
2.3.1	Single Molecule Communication	7
2.3.2	Multiple Molecule Communication	7
3	Grundlagen des Praktikumversuch	9
3.1	Kanal	9
3.1.1	Strömungsarten	9
3.1.2	Diffusion	10
3.2	Ermittlung der Farben im Kanal	10
4	Versuch	13
4.1	Versuchsaufbau	13
4.1.1	Pumpen	14
4.1.2	Photosensor	14
4.1.3	Rückschlagventil	16
4.1.4	Materialien	17
4.1.5	Aufbauanleitung	18
4.1.6	Hinweise zum Versuchsaufbau	21
4.1.7	Hinweise zur Ansteuerung der Pumpen	21
4.1.8	Hinweise zum Programmcode des Photosensors	22
4.2	Versuchsabbau und Reinigung	22
5	Versuchsdurchführung	23
5.1	Messung des Hintergrundflusses	23
5.2	Detektion der Farben	23

5.3	Datenübertragung	24
5.4	Versuchsprotokoll	25
5.4.1	Messung des Hintergrundflusses	25
5.4.2	Detektion der Farbe	25
5.4.3	Datenübertragung	27
6	Kurzfragen	29
	Literatur	31

1 Einleitung

Die molekulare Kommunikation ist eine Art Nachrichtenübertragung, die in Bereichen zum Einsatz kommen soll, in denen sich die herkömmlichen optischen, akustischen oder elektromagnetischen Kommunikationsarten als unpraktikabel und ineffizient erwiesen haben [1]. Die Anwendungsmöglichkeiten sind dabei sehr vielfältig, Einsätze in der Biomedizin, Gesundheitsinformation, Überwachung und Kontrolle der Umwelt, aber auch der Industrie sind denkbar [2].

Die Natur dient als Vorbild der molekularen Kommunikation, so basiert der Informationsaustausch zwischen Schädlingen unter anderem auf Pheromonen, speziellen Sexuallockstoffen, die im Sinne der Bionik als Schädlingsbekämpfungsmittel in der Landwirtschaft eingesetzt werden, um die Paarung von Schädlingen zu unterbinden und somit Nutzpflanzen zu schützen [3]. Der Pflanzenschutz ist allerdings nicht das einzige Gebiet auf dem molekulare Kommunikation zum Einsatz kommt, gewisse Bakterien regen zum Beispiel das Pflanzenwachstum an, somit ist es möglich mittels künstlicher Herstellung dieser Bakterien, Einfluss auf das Pflanzenwachstum zu nehmen [4]. Aber auch allgemeinere ökologische Anwendungen sind denkbar, wie die Überwachung von Ökosystemen und Populationen [3]. Die Überwachung und Kontrolle ist nicht ausschließlich im landwirtschaftlichen Kontext möglich, sondern auch im Bereich industrieller Anwendungen. Es ist angedacht die molekulare Kommunikation für die Überwachung von chemischen Reaktionen oder auch bei Herstellungsprozessen im Nanometerbereich einzusetzen [5]. Hierbei sind Anwendungen wie zum Beispiel die sogenannte "e-nose" für die Lebensmittelindustrie vielversprechend, um in Brauereien oder anderen Branchen der Lebensmittelindustrie Qualitätskontrollen durchzuführen [6].

Die molekulare Kommunikation auf Basis von Gerüchen ist auch im alltäglichen Leben denkbar, um zum Beispiel durch Freisetzung von Molekülen in die Luft ein immersives Erlebnis in Videospielen zu kreieren, um dieses mit allen Sinnen erleben zu können [7]. Auch für Industriebereiche, die aufgrund örtlicher Gegebenheiten der Kommunikation über elektromagnetische Wellen schwerer zugänglich sind, wie beispielsweise im Bergbau mit seinen Tunnelsystemen, scheint eine Kommunikation per Luft transportierter Moleküle eine zuverlässige Alternative der Nachrichtenübertragung darzustellen [8].

Bei der Verwendung im medizinischen Bereich sind die Möglichkeiten ebenso weitreichend wie vielversprechend. Da die molekulare Kommunikation ereignisgesteuert ist, eignet sie sich unter anderem für diagnostische Anwendung, wie die Detektion von Biomarkern, von pH-Wertänderungen und von Immunreaktionen. Über derartige Verfahren sind virale und bakterielle Erkrankungen sowie Tumore zu erkennen [1].

Um diese Anwendungen auf der Ebene der molekularen Kommunikation zu realisieren, ist die Implementierung von Nanomaschinen in einer Größenordnung von $10\text{-}100\text{ }\mu\text{m}^2$

notwendig [9]. Eines der aktuellen Hauptgebiete aktueller Forschung im Bereich molekularer Kommunikation konzentriert sich auf den Versuch, die Detektion von Krankheiten und den gezielten Transport von Medikamenten auf derartigen Nanomaschinen über einen Laps-on-Chip zu realisieren [10].

Nicht allein die Behandlung von Infektionskrankheiten scheint vorstellbar, sondern auch die Behandlung degenerativer Erkrankungen synaptischer Verbindungen wie zum Beispiel der Alzheimer-Krankheit. Für solche Einsatzzwecke wird an Brain-Machine Interfaces geforscht, die mittels molekularer Kommunikation ein System bereitstellen sollen, das in der Lage ist, die synaptischen Bahnen im Gehirn zu regulieren, zu verändern oder nachzuahmen [11].

Damit diese gesamten Gesundheitsdaten auch von außen detektierbar sind, ist ein weiterer wichtiger Forschungsaspekt der molekularen Kommunikation die Entwicklung eines Bio-Cyber Interfaces. Dieses soll zum Beispiel in eine Art Armbanduhr integrierbar sein und eine Schnittstelle zwischen der molekularen Kommunikation im Körper und der herkömmlichen Kommunikation bereitstellen [10]. Dies ist auch ein wesentlicher Aspekt für die Implementation des Internets of Things beziehungsweise des Internets of Bio-Nano Things, denn Ziel ist es im zukünftigen 6G-Standard die menschliche Welt mit der digitalen und der physischen Welt zu verbinden. Damit dies gelingen kann, werden Schnittstellen wie die Bio-Cyber Interfaces benötigt, die die Kommunikation zwischen der menschlichen Welt und der Außenwelt ermöglichen [12], [13]. Für die Nachrichtenübertragung im menschlichen Körper ist die molekulare Kommunikation eine der vielversprechendsten Möglichkeit, um zukünftig eine Kommunikation zwischen mehreren biologischen Entitäten im Körper, welche Daten sammeln, verarbeiten und übertragen, bereitzustellen [14]. Damit die molekulare Kommunikation auch in der Standardisierung in 6G aufgenommen werden kann, sind noch wesentliche Fortschritte in Bezug auf die Informationstheorie, die Nanotechnologie sowie die biochemische Kryptographie notwendig [1].

Die TU Braunschweig unterstützt auf dem Forschungsgebiet der molekularen Kommunikation im Zusammenhang mit der Nachrichtenidentifikation, auch die Uni Erlangen hat erste Vorlesungen zu diesem Themengebiet der molekularen Kommunikation eingeführt. Allerdings ist die Forschung auf diesem Gebiet nicht nur auf die Nachrichtentechnik begrenzt, sondern ist interdisziplinär in Zusammenarbeit von Biologen und auch Wissenschaftlern, die sich mit den ethischen Aspekten befassen, zu sehen [15].

Wie dargelegt ist die molekulare Kommunikation vielfältig einsetzbar, jedoch sehr vielschichtig und komplex, sei es über luftgetragene Moleküle oder solche die über Flüssigkeiten transportiert werden. Um einen einfachen Einstieg in dieses Themenfeld zu ermöglichen, wird zum besseren Verständnis grundlegender Konzepte der Fokus auf die Einrichtung einer molekularen Kommunikation unter Verwendung von Tinten in einem flüssigen Medium gelegt.

2 Grundlagen

2.1 Arten der molekularen Kommunikation

Für die Umsetzung von molekularer Kommunikation gibt es verschiedene Ansätze. Diese unterscheiden sich hauptsächlich darin, dass bei manchen Modellen die Moleküle direkt in das entsprechende Medium freigesetzt werden und bei anderen die Moleküle in Form eines ‚Motors‘ vom Sender zum Empfänger transportiert werden.

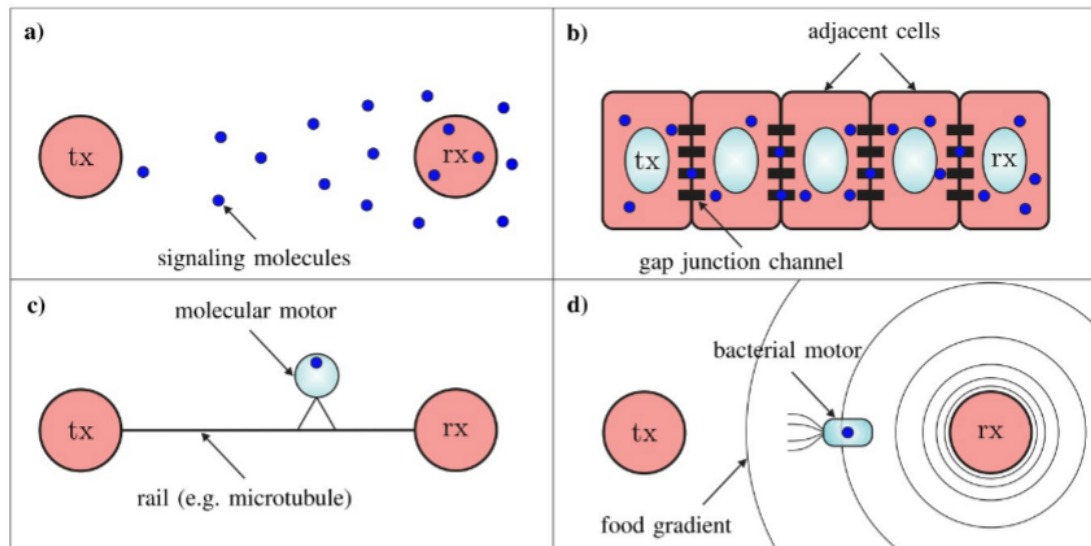


Abbildung 2.1: Überblick über 4 Arten der molekularen Kommunikation [5, S. 1257]

2.1.1 Diffusion

Die Kommunikation über Diffusion (Abb. 2.1a) ist ein Prinzip, welches der menschliche Körper natürlicherweise zum Übermitteln von Botschaften nutzt. Hierbei werden Moleküle oder auch Botenstoffe von einem Sender in ein Medium wie Blut freigesetzt, die dann von einem Empfänger aufgenommen werden. [16].

2.1.2 Gap junction channel

In der Natur gibt es auch den sogenannten gap junction channel (Abb. 2.1b), welcher in der molekularen Kommunikation verwendet werden kann. Bei diesem werden Moleküle zwischen den einzelnen Zellen über die natürlichen Kanäle, die das Zytosol benachbarter Zellen verbinden, weiterverbreitet [5].

2.1.3 Molekulare Motoren

Der Ansatz über molekulare Motoren (Abb. 2.1c) verfolgt die Idee, dass ein Molekül oder mehrere Moleküle sich innerhalb eines Motors befinden und sich dieser entlang einer Art Schiene fortbewegt. Diese Fortbewegung funktioniert dabei durch Eingehen und Lösen von Bindungen mit der Schiene [17].

2.1.4 Bakterientransport

In der Natur bewegen sich Bakterien über Flagellen fort. Dies sind Proteinfäden, welche sich wie ein Propeller drehen können. Diese Art der Fortbewegung kann für die molekulare Kommunikation (Abb. 2.1d) genutzt werden. Hierbei sind die Moleküle in ein künstliches Bakterium eingeschlossen, das mithilfe einer Nahrungsquelle zum Sender geleitet wird [18].

2.1.5 Vergleich der Kommunikationsvarianten

Jede dieser Varianten der Kommunikation mittels Molekülen hat ihre eigenen Vor- und Nachteile. Nun stellt sich die Frage, welche dieser Varianten für eine Anwendung von Nanorobotern in der Größenordnung eines Blutplättchens geeignet ist, um dies später zum Beispiel im menschlichen Körper einsetzen zu können? Wesentliche Faktoren, die es zu berücksichtigen gilt, sind die limitierte Fläche für die Implementation sowie die geringen Energieressourcen [19].

Die wesentlichen Nachteile bei molekularen Motoren, gap junctions und künstlichen Bakterien sind zum einen die zusätzlich notwendige Infrastruktur, die nicht praktikabel ist, zum anderen ist der Energiebedarf von molekularen Motoren zu groß.

Somit ist die am einfachsten umsetzbare Art die Kommunikation über Diffusion, da dabei die Moleküle nur in das entsprechende Medium eingebracht werden müssen und keine Infrastruktur notwendig ist. Allerdings ist der Transport der Moleküle vom Sender zum Empfänger komplett ungesteuert, sodass die Moleküle unterschiedlich lange Laufzeiten vom Empfänger zum Sender haben und es dadurch zu Kanalverzerrung und Informationsverlust führen kann [20].

2.2 Diffusionsbasierter Übertragungskanal

Durch die Wahl von diffusionsbasierter molekularer Kommunikation ergeben sich für die Auslegung des Kommunikationskanals Besonderheiten, die es zu lösen gilt. Eine davon ist die molekulare Bewegung von Teilchen, welche durch die Brownsche Molekularbewegung beschrieben wird, wodurch die Verteilung der Moleküle als statistisch normalverteilt anzusehen ist [19].

2.2.1 Statistische Verteilung im Kanal

In einem Medium erfolgt die Ausbreitung von Molekülen entsprechend einem Konzentrationsgefälle, dies kann auf makroskopischer Ebene durch die Fick'schen Gesetze beschrieben werden.

Das erste Fick'sche Gesetz im eindimensionalen Fall wird durch die Teilchenstromdichte J , den Diffusionskoeffizient D und den Konzentrationsgradienten $\frac{\partial \rho}{\partial x}$ beschrieben:

$$J(x, t) = -D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \quad (2.1)$$

Mit dem Massenerhaltungsgesetz unter Berücksichtigung der Dichte der Molekülproduktion $c(x, t)$ an einem Punkt x .

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x, t)}{\partial x} + c(x, t) \quad (2.2)$$

Durch Einsetzen von Gl.(2.2) in Gl.(2.1) ergibt sich das zweite Fick'sche Gesetz erweitert um die Dichte der Molekülproduktion.

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho(x, t)}{\partial x^2} + c(x, t) \quad (2.3)$$

Zur Lösung dieser Differenzialgleichung soll es an dieser Stelle keine Randbedingungen geben, die zu Reflexion oder Absorption an den Rändern führen. Somit führt die Lösung dieser Differenzialgleichung auf einem Intervall $I = (-\infty, \infty)$ und einem Sender bei $x = 0$, der zum Zeitpunkt $t = 0$ ein Molekül freisetzt, also der Molekülproduktionsrate von $c(x, t) = \delta(x = 0)\delta(t = 0)$ zu

$$\rho(x, t) = D \frac{\mathbf{1}[t > 0]}{(4\pi Dt)^{0,5}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (2.4)$$

Für einen festen Zeitpunkt t fällt auf, dass die Lösung die Form einer Gauss'schen Normalverteilung über x hat. An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass aufgrund äußerer Einflüsse wie chemischer Reaktionen der Moleküle oder Absorption nicht zwangsläufig eine analytische Lösung existiert.

Auf mikroskopischer Ebene unterliegt jedes Molekül der Brownschen Bewegung, diese lässt sich als Random Walk Prozess darstellen. Im eindimensionalen Fall folgt daraus, dass jede Molekularbewegung unabhängig von der vorherigen Bewegung ist und somit jeweils als separate, normalverteilte Zufallsvariable angesehen werden kann. Da die Summe von normalverteilten Zufallsvariablen wieder als eine solche dargestellt werden kann, folgt für $0 \leq t_1 < t_2$ und für eine Freisetzung des Moleküls zum Zeitpunkt $t = 0$ im Ursprung $\mathcal{N}(0, 2D(t_2 - t_1))$. Zusammenfassend folgt für ein Molekül, welches sich zum Zeitpunkt t bei $\rho(x, t)$ befindet, eine Varianz von $2Dt$ und $\rho(x, t)$ hat den gleichen Wert wie in Gl.2.4. Dies wird auch von Einsteins Veröffentlichung über den Zusammenhang von der Brownschen Bewegung und den Fick'schen Gesetzen von 1905 gesichert [19], [21].

2.2.2 Empfänger

Für die Auslegung der Empfänger gibt es zwei Ansätze. Bei dem einen werden die Moleküllkonzentrationen gemessen, wobei die Moleküle jedoch nicht aus dem Medium absorbiert werden. Bei der anderen Variante des Empfängers werden die Moleküle aus dem Medium absorbiert oder reagieren mit diesem.

Nicht reagierende Empfänger

Zu den nicht reagierenden Empfängern zählen der Sampling-Empfänger und der transparente Empfänger. Der Sampling-Empfänger misst die Konzentration an einem bestimmten Raumpunkt, ähnlich dazu misst der transparente Empfänger die Konzentration innerhalb eines Volumens einer Kugel V_R .

Es wird allerdings davon ausgegangen, dass diese beiden Empfänger die Anzahl der Moleküle perfekt detektieren. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Sampling-Empfänger den Mittelwert $\rho(x, t)$ misst und der transparente Empfänger den Mittelwert $\rho(x, t)$ und die Varianz $\rho(x, t)/V_R$. Bei nicht reagierenden Empfängern werden die Moleküle nicht aufgenommen, die Moleküllkonzentration bleibt unverändert, sodass die Fick'schen Gesetze ohne Randbedingungen anwendbar sind [19].

Reagierende Empfänger

Zu den reagierenden Empfängern zählt der absorbierende Empfänger, welcher auftretende Moleküle in sich aufnimmt und dadurch die Moleküllkonzentration verändert. Außerdem ist der Ligand- oder reaktive Empfänger zu nennen, der in Analogie zu den Rezeptoren von Zellen funktioniert. Hierbei reagieren die Moleküle mit Rezeptoren auf der Oberfläche des Empfängers. Dabei können die Rezeptoren in den Zuständen „gebunden“ oder „ungebunden“ vorliegen, abhängig davon, ob der Rezeptor mit dem Molekül reagiert oder nicht. Wobei Moleküle nicht an bereits gebundenen Rezeptoren binden können und das Lösen von vorliegenden Molekül-Rezeptor-Bindungen nach einem zeitlichen Zufallsprinzip geschieht. Die Anzahl an gebundenen Rezeptoren ließe sich über eine speicherlose Binomialverteilung mit $\text{binomial}(k, p)$, k als Anzahl der Rezeptoren und der Bindungswahrscheinlichkeit p modellieren. Aus den eben genannten Gründen lassen sich Signale beim Empfänger mit $Z = \alpha X + N$ modellieren, wobei Z die gemessene Ausgabe am Empfänger, α ein Verstärkungsfaktor, X die Moleküllkonzentration und N ein Gaußsches Rauschen ist.

Damit die Fick'schen Gesetze für nicht reagierende und reagierende Empfänger zur Anwendung kommen können, sind spezielle Randbedingungen zu beachten. So ist die Oberfläche des absorbierenden Empfängers als Nullrand und für den Ligand-Empfänger als teilweise absorbierende Oberfläche mit aktiver Molekülquelle zu modellieren [19].

2.3 Moleküle

Zur Auslegung einer molekularen Kommunikation gehört auch die Spezifikation der Moleküle, um Messungen durchführen zu können. In anderen Versuchen wurden bereits einige Ansätze experimentell getestet. Es wird unterschieden zwischen Empfängern, die nach der Single Molecule Communication (SiMo) mittels eines Molekültyps kommunizieren und Empfängern, denen das Prinzip der Multiple Molecule Communication (MuMo) auf Basis mehrere Molekültypen zur Kommunikation zugrunde liegt [22].

2.3.1 Single Molecule Communication

Ein Ansatz der Single Molecule Communication ist es, durch die Verwendung von Säuren und Basen zu kommunizieren. Bei diesen Versuchen werden dafür Säuren / Basen freigesetzt und von mehreren peristaltischen Pumpen zum Empfänger, einer pH-Sonde, transportiert. Mittels rekurrenter neuronaler Detektoren sind Datenraten bis zu $4 \frac{\text{bit}}{\text{s}}$ erreichbar [23].

Des Weiteren kommen schaltbare fluoreszierende Proteine zum Einsatz, deren wesentlicher Vorteil in der mehrfachen Nutzung desselben Proteins für unterschiedliche Übertragungszyklen liegt. Für diese Art von Versuchen sind zwei LED-Arrays beim Sender zum Senden und Löschen notwendig, welche die Proteine aktivieren und deaktivieren können. Zur Messung der Fluoreszenz werden beim Empfänger Spektrometer verwendet, damit sind Datenraten von $0,1 \frac{\text{bit}}{\text{s}}$ erreichbar [24].

Diese beiden Versuchsansätze sind bislang nur über Kommunikationsstrecken von wenigen Zentimetern hinweg durchgeführt worden. Für eine Kommunikation über eine größere Entfernung wurden spezielle magnetische Nanopartikel von peristaltischen Pumpen freigesetzt und von einem nicht-invasiven Suszeptometer empfangen. So wird über kurze Distanzen von 5 cm hinweg eine Datenrate von $6 \frac{\text{bit}}{\text{s}}$ erzielt, auch über 40 cm sind Nachrichten noch decodierbar [25].

2.3.2 Multiple Molecule Communication

Bei der Multiple Molecule Communication werden mehrere Moleküle für die Datenübertragung verwendet, hierfür können zum Beispiel verschiedene Farben zum Einsatz kommen. Im anschließenden experimentellen Teil dieses Versuchs soll diese Art der Multiple Molecule Communication mithilfe von verschiedenen Farben durchgeführt werden. Für diese Kommunikation wird zum Decodieren ein linearer Schätzer, der die zeitabhängi-

gen Farbintensitäten aus den Rohdaten der Spektralmessungen des Photosensors für jede verwendete Farbe bestimmt, verwendet. Die für dieses Verfahren erreichten Datenraten liegen über eine Distanz von mehr als 20 cm bei $3 \frac{\text{bit}}{\text{s}}$ [22].

3 Grundlagen des Praktikumversuch

3.1 Kanal

Für eine optimale Versuchsdurchführung ist das Wissen über den im Versuch vorliegenden Kanal, hier den mit Wasser gefüllten Schlauch, insbesondere das Verhalten der Tinte, unerlässlich. Die Bewegung der Moleküle der Tinten durch den Kanal beruht auf Advektion, das heißt sie werden durch den Hintergrundfluss des Wassers vom Sender zum Empfänger transportiert [22]. Bei Strömungen in flüssigen Medien ist auch die Betrachtung der Art der Strömung sowie die Diffusion der Moleküle relevant, um das Verhalten der Moleküle im Medium besser vorhersagen zu können.

3.1.1 Strömungsarten

Im Allgemeinen wird bei der Bewegung von flüssigen und gasförmigen Medien zwischen laminaren und turbulenten Strömungen unterschieden. Turbulente Strömungen sind Strömungen, bei denen Wirbel entstehen, laminare Strömungen hingegen sind wirbelfrei. Die Einordnung von Strömungen erfolgt über die sogenannte Reynolds-Zahl $[Re]$

$$Re = \frac{d_c * v_{avg}}{\nu} \quad (3.1)$$

mit d_c für den Durchmesser des Kanals, ν der kinetischen Viskosität, welche bei Wasser bei $1,01 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ und $v_{avg} = \frac{Q_0}{\pi * r_c^2}$ der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Wassers, wobei Q_0 der Hintergrundflussmenge entspricht.

Der Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungen erfolgt bei einer Reynolds-Zahl von $Re = 2100$, wobei Strömungen bei $Re < 2100$ als laminar angesehen werden können. Bei dem durchzuführenden Versuch liegt eine laminare Strömung zugrunde. Um für laminare Strömungen in kreisförmigen Röhren die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Raumpunktes zu bestimmen, kann das Poiseuille Strömungspofil

$$v(\rho) = v_{max} \left(1 - \frac{\rho^2}{r_c^2} \right), \quad \rho \in [0, r_c] \quad (3.2)$$

genutzt werden. Die in der Formel benötigte maximale Fließgeschwindigkeit, ergibt sich aus $v_{max} = 2 * v_{avg}$ [22], [26].

3.1.2 Diffusion

Der Einfluss der Diffusion auf den Transport der Tinten lässt sich mittels der Péclet-Zahl $[Pe]$ bestimmen. Diese wird durch

$$Pe = \frac{r_c * v_{avg}}{D} \quad (3.3)$$

berechnet. Für den durchgeführten Versuch lässt sich durch die Berechnung mit dem Diffusionskoeffizienten $[D]$ des Wassers mit $D \lesssim 2,299 * 10^{-9} \frac{m^2}{s}$ feststellen, dass die resultierende Péclet-Zahl deutlich größer als eins ist und somit der Hintergrundfluss gegenüber der Diffusion dominiert. Deshalb kann bei der späteren Durchführung des Versuchs die Diffusion vernachlässigt werden [22], [26].

3.2 Ermittlung der Farben im Kanal

Bei der Durchführung des Praktikumsversuchs werden am Sender drei verschiedene Tintenfarben kontrolliert in einen Kanal eingespritzt, die separat voneinander am Empfänger detektierbar sein müssen. Hierfür wird im Versuch das ‚Zeroforcing‘ angewandt.

Beim Zeroforcing wird im Mobilfunk davon ausgegangen, dass eine bestimmte Anzahl an Sendeantennen M_t und Empfangsantennen M_r vorliegen. Für den Praktikumsversuch lässt sich das Zeroforcing in Analogie anwenden; die in den Kanal eingespritzten verschiedenen Farben stellen M_t dar, die am Empfänger detektierbaren Wellenlängen der verschiedenen Tintenfarbe werden mit M_r beschrieben.

Für die Übertragung lässt sich somit eine Kanalmatrix H definieren mit $H \in \mathbb{C}^{M_r \times M_t}$. Zur Bestimmung der unterschiedlichen Tintenfarben per Zeroforcing wird eine MIMO-Equalisierungsmatrix $A \in \mathbb{C}^{M_t \times M_r}$ benötigt, um die Wellenlängen den einzelnen Farben zuordnen zu können, wird diese über eine Matrixmultiplikation mit der Kanalmatrix und dem Eingangsvektor verrechnet.

Das Ergebnis am Empfänger lässt sich darstellen als $y = H * x + N$ mit N als Rauschvariable. Für die Detektion der Farben mittels Zeroforcing ergibt sich $\tilde{x} = Ay$ mit $\tilde{x}(y) \in \mathbb{C}^{M_t}$. Dieser so erhaltene berechnete Eingangsvektor wird dann mit

$$\hat{x}(y)_i = \arg \min_{s \in X} |\tilde{x}(y)_i - s| \quad \text{für alle } i \quad (3.4)$$

dem Eingangsvektor $\hat{x}$ zugeordnet, welcher dem berechneten am ähnlichsten ist.

Um diese theoretischen Grundlagen auf den Versuch übertragen zu können, muss für alle Farben zusammen die Kanalmatrix bestimmt werden, dazu ist es am einfachsten, die Impulsantwort am Empfänger für jede Farbe zu betrachten. Daraus ergibt sich $H \in \mathbb{C}^{8 \times 3}$, wobei A zu bestimmen ist, bei quadratischen Matrizen können diese direkt invertiert werden, wodurch A dann unmittelbar erhalten wird, bei nicht quadratischen muss A über die Pseudoinverse bestimmt werden.

$$A = H^\dagger = (H^H H)^{-1} H^H \quad (3.5)$$

Zu erwähnen ist, dass H^H die hermitesche Transponierte von H ist und $H^\dagger$ die Moore-Penrose-Inverse. Damit ergibt sich

$$\tilde{x} = Ay \quad (3.6)$$

Grundsätzlich enthält y auch einen Rauschanteil, der durch das Zeroforcing verstärkt wird, allerdings kann dieser Rauschanteil im Versuch vernachlässigt werden, da die Signalstärke der Intensität der Farben entspricht, deutlich größer ist als das Hintergrundrauschen. Aus $\tilde{x}$ werden im Versuch die einzelnen Farben zuletzt über Schwellwerte detektiert [27].

4 Versuch

4.1 Versuchsaufbau

Bei diesem Versuch wird aus einem Wasserreservoir mithilfe einer Pumpe Wasser durch einen Schlauch gepumpt und auf diese Weise ein Hintergrundfluss erzeugt. In diesen kann mittels in Y-Verbindern mit Epoxidharz eingeklebten Injektionsnadeln und drei weiteren Pumpen Tinte in den Farben blau, rot und gelb hineingepumpt werden. Eingebaute Rückschlagventile verhindern den Eintrag von Wasser-Tintengemisch zurück in die Schläuche des Tintenzuflusses. Die Mischung aus Wasser und Tinte fließt anschließend an einem Photosensor vorbei. Dieser ist in der Lage, einzelne Wellenlängen zu detektieren und mittels eines Programmcodes den entsprechenden Farben zuzuordnen. Zuletzt fließt das Wasser-Tintengemisch zur späteren Entsorgung in einen Abwasserbehälter.

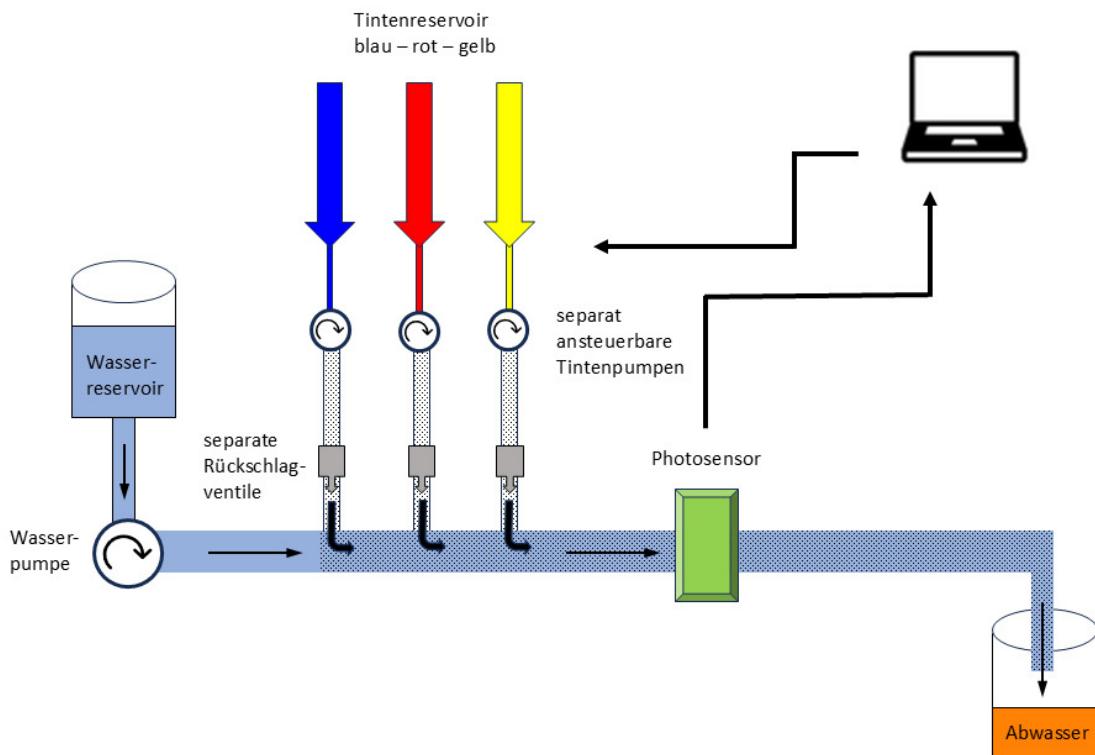


Abbildung 4.1: Skizze des Versuchsaufbaus

4.1.1 Pumpen

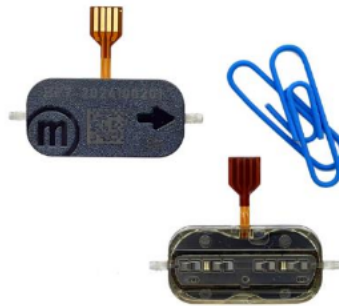


Abbildung 4.2: BP7-Tubing Pumpe

Zum Pumpen werden piezoelektrische Membranpumpen BP7-Tubing Pumpen verwendet. Piezoelektrisch heißt, dass die Materialien sich unter Anlegen einer elektrischen Spannung verformen, dies wird bei derartigen Pumpen zum Transportieren von Flüssigkeiten oder Gasen mit einem Druck von bis zu 500 mbar genutzt. Für den sicheren Betrieb ist es wichtig, dass keine Spannung außerhalb von 0-250V angelegt wird. Für den Transport von Flüssigkeiten ist nur eine Modulationsfrequenz von 100 Hz notwendig, höher Frequenzen werden lediglich beim Transport von Gasen verwendet.

Es ist unbedingt darauf hinzuweisen, dass die piezoelektrischen Pumpen sehr druckempfindlich sind, der Durchbruchdruck liegt bei 1,5 bar, wenn dieser Druck überschritten wird, geht die Pumpe kaputt. In diesem Versuch werden Spritzen zum Aufbewahren der Tinten sowie zum anfänglichen Befüllen der Schläuche verwendet. Aufgrund des Durchbruchdrucks der empfindlichen piezoelektrischen Membranpumpen ist dringend davon abzuraten die Schläuche mit Flüssigkeit zu befüllen während die Pumpen angeschlossen sind, um diese nicht zu zerstören bzw. zu beschädigen [28].

Die Ansteuerung der Pumpen geschieht über einen auf einem mp-Multiboard2 verbauten ESP32 Mikrocontroller.

4.1.2 Photosensor

Als Photosensor wird ein Adafruit AS7341 10-Channel Light Sensor verwendet, dieser ist in der Lage neun verschiedene Wellenlängen, acht davon im sichtbaren Bereich (415 nm, 445 nm, 480 nm, 515 nm, 555 nm, 590 nm, 630 nm, 680 nm) und eine Wellenlänge für den nahen Infrarotbereich zu messen. Zudem besitzt dieser Sensor einen Kanal zum Messen der gesamt eintreffenden Lichtintensität. Verbunden wird dieser Sensor über einen I²C Anschluss mit einem Arduino Micro, der die Werte ausliest und an den angeschlossenen Computer weiterleitet [29].

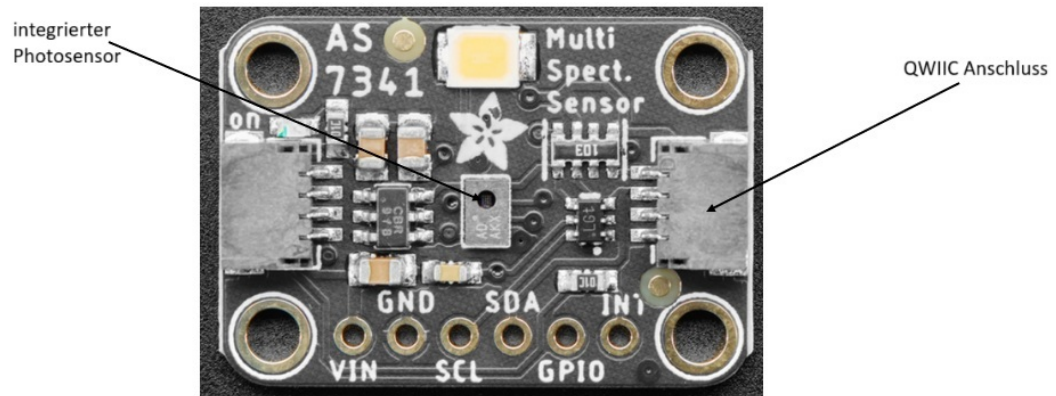


Abbildung 4.3: Adafruit AS7341 10-Channel Light Sensor

Um Störeinflüsse durch Umgebungslicht zu vermeiden, befindet sich die Photodiode in einer von einem 3D-Drucker hergestellten Box. Damit konstante Lichtwerte am Sensor anliegen, ist oberhalb von dieser Photodiode eine weiße LED angebracht, die von dem Arduino Micro gesteuert wird. Um mit diesem Aufbau die Änderungen, welche durch die eingespritzten Tinten hervorgerufen werden, im Kanal messen zu können, wird dafür der Schlauch mit dem Wasser-Tintengemisch zwischen LED und Photodiode entlang geführt. Während des Versuchs werden nur die Wellenlängen des sichtbaren Bereichs ausgelesen.

4.1.3 Rückschlagventil



Abbildung 4.4: Rückschlagventil Infuvalve B. Braun[30]

Um den Rückfluss von Wasser in die Tinten zu unterbinden und somit die Verwässerung dieser zu verhindern, werden Rückschlagventile benutzt. Diese Rückschlagventile sind nur in eine Fließrichtung von der weißen zur grünen Seite durchlässig und öffnen sich bei einem Druck von 20 mbar. Die Pumpen sind in der Lage einen Druck von bis zu 500 mbar aufzubauen, das Öffnen der Rückschlagventile ist somit sichergestellt. Bis zu einem Rückschlagdruck von 2 bar verschließen diese Ventile den Kanal zuverlässig. Weder durch die Tintenpumpen selbst noch in Kombination mit dem allgemeinen Wasserdruck wird dieser Druck erreicht, sodass kein Wasser ungewollt in die Tinten zurückgedrückt werden kann.

Um Beschädigungen der Rückschlagventile zu verhindern, darf kein Druck von über 6 bar entgegen der Durchflussrichtung ausgeübt werden. Somit ist beim Versuchsaufbau darauf zu achten, dass die Ventile richtig herum eingebaut werden, damit diese beim Befüllen nicht beschädigt werden, auch wenn es unwahrscheinlich erscheint derartige Drücke manuell mit den Spritzen zu erreichen [30], [31].

4.1.4 Materialien

Für den Versuch werden folgende Materialien benötigt:

Kategorie	Teile	Herstellernummer
Elektronische Bauteile	Arduino Micro Jumperkabel Adafruit AS7341 10-Channel Sensor mp-Multiboard2 Micro-USB Kabel Bartels Pumpe BP7-Tubing mp-Highdriver4 LED weiß Widerstand 4,7 kΩ	4698 Bartels Mikrotechnik: BM-S-0008 Bartels Mikrotechnik: BM-S-0008 Bartels Mikrotechnik: BM-S-0008 Bartels Mikrotechnik: BM-E-0003 C513AWSNCX0Z0342 MFR100FTE734K7
Versuchsbauteile	Nadeln 30G x 1/2" Spritze 3 ml TYGON LMT-55 Schlauch AD[30mm] ID Luer Lock Adapter m (male) Luer Lock Adapter m (female) Y-Verbinder 1/16" Rückschlagventil Infuvalve®	PT9969 Techlab: ISM SC0039T Techlab: UP P-850 Techlab: UP P-857 B. Braun PZN: 02232430
sonstiges Materialien	Tinte blau Tinte gelb Tinte rot destilliertes Wasser Abwasserbehälter 3D gedruckter Wasserbehälter Handschuhe Laborkittel	Conrad: 2233365-VQ Conrad: 2233367-VQ Conrad: 2233366-VQ

Tabelle 4.1: Übersicht der verwendeten Materialien

4.1.5 Aufbauanleitung

Damit bei dem Versuchsaufbau keine Bauteile kaputtgehen, ist eine strikte Beachtung der Aufbauanleitung Voraussetzung.

Zuerst ist der Hintergrundfluss aufzubauen. Hierfür wird jeder Schlauch vor der Anbringung mit destilliertem Wasser befüllt, da die Pumpen nicht korrekt pumpen können, wenn sich eine Mischung aus Wasser und Luft in den Schläuchen befindet. Zur Befüllung der Schläuche wird auf eine saubere Spritze ein Luer Lock (female) Adapter geschraubt und vorab Wasser durch die Schläuche gedrückt, sodass eine konstante Wassersäule in den Schläuchen steht. Diese befüllten Schläuche können dann an das Wasserreservoir, an den Luer Lock Adapter (female) und an die Pumpe für den Hintergrundfluss, die Pumprichtung ist dabei auf der Pumpe durch einen Pfeil gekennzeichnet, angeschlossen werden. Von dieser Pumpe aus muss ein Schlauch an den Y-Verbinder von der blauen Tinte angeschlossen werden, von diesem Y-Verbinder werden über zwei weitere Schläuche und zwei Y-Verbinder die rote und gelbe Tinte angeschlossen. Von dem letzten Y-Verbinder (von der gelben Tinte) wird ein Schlauch durch das Gehäuse des Photosensors zum Abwasserbehälter geführt.

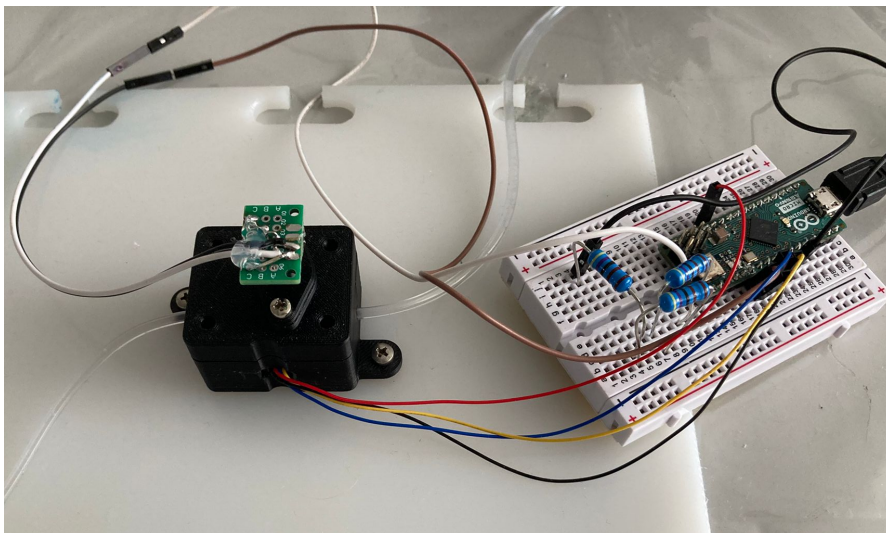


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau im Bereich des Photosensors

Zum Anschließen der Tintenvorräte bietet es sich an, die von den Tintenpumpen wegführenden Schläuche ebenfalls mit Wasser zu befüllen und am Ausgang der Pumpe sowie an das weiße Ende des Rückschlagventils anzuschließen. Die in den Y-Verbinder geklebte Injektionsnadel wird in das grüne Ende des Rückschlagventils geschraubt. Um das Rückschlagventil anschließen zu können, muss auf dieses noch ein Luer Lock (male) Adapter aufgeschraubt werden. Die von den Tinten zur Pumpe führenden Schläuche sollten zunächst mit Wasser befüllt werden, da das direkte Befüllen mit Tinten das Risiko birgt, dass die Tinten auf dem Versuchstisch auslaufen.

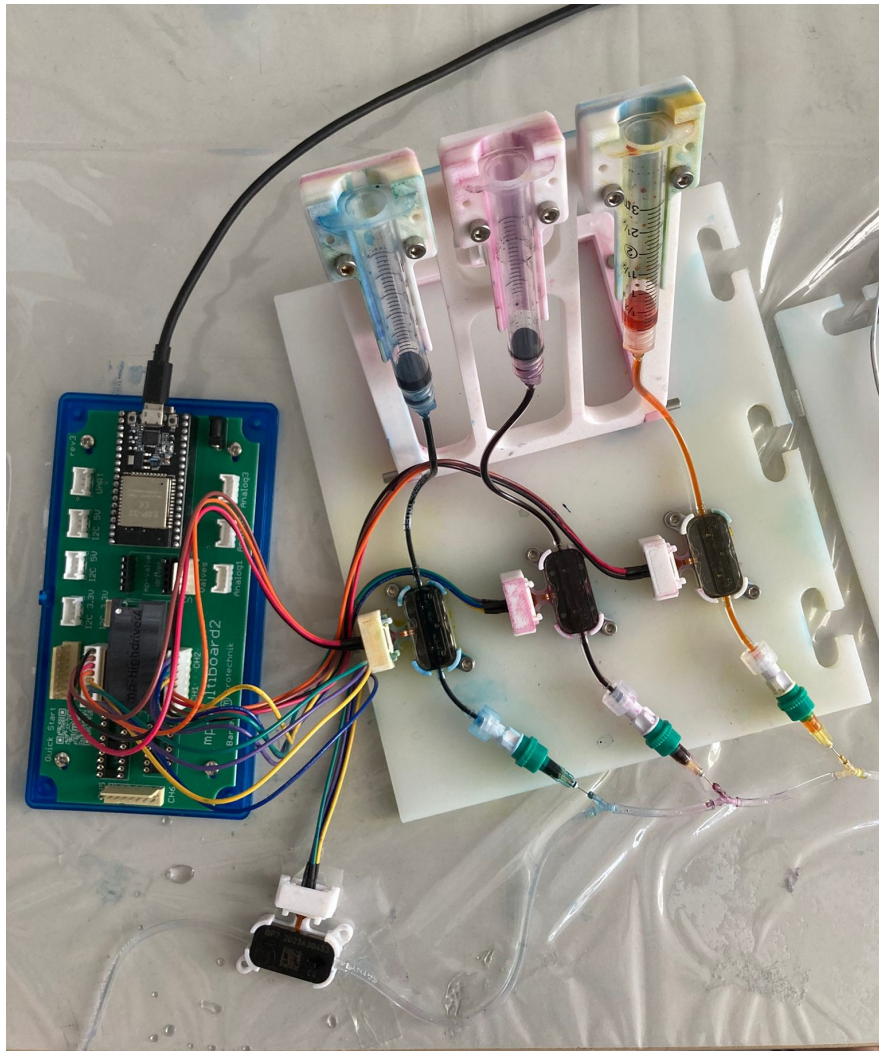


Abbildung 4.6: Aufbau der Tinteneinspritzung

Im letzten Schritt des Aufbaus müssen die Tinten in die jeweiligen Behälter gefüllt werden und der ESP32 sowie der Arduino Micro an den Computer angeschlossen werden. Damit mit den Versuchen begonnen werden kann, muss das Wasser aus den Schläuchen von den Tintenreservoirs bis zum Y-Verbinder herausgepumpt werden. Dafür sollte das Programm zur Steuerung der Pumpen über das Multiboard verwendet werden und durch manuelle Eingabe der jeweiligen Pumpen mit der entsprechenden Pumpdauer die Tinten bis zu den Y-Verbindern gepumpt werden. Falls dabei Tinte in den Schlauch für den Hintergrundfluss gelangt, kann diese mit der Pumpe für den Hintergrundfluss weggepumpt werden.

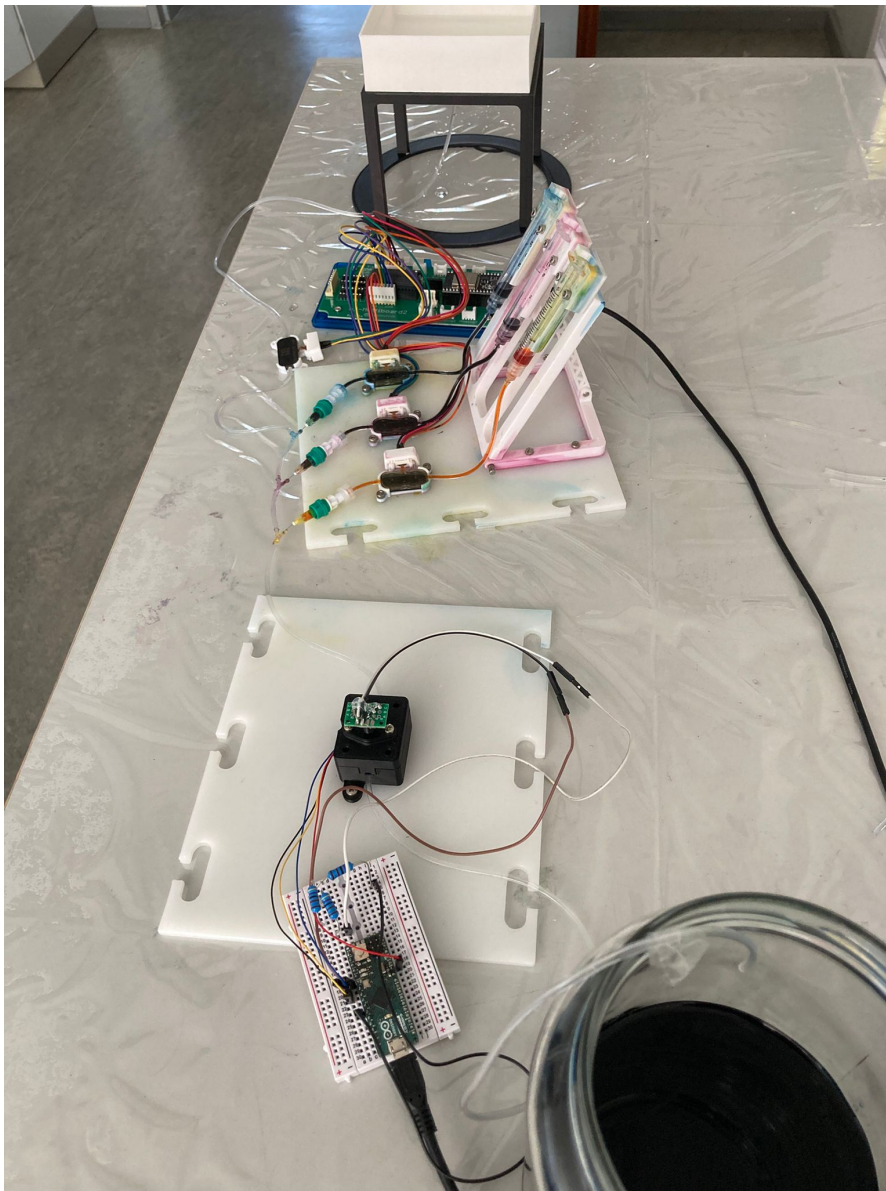


Abbildung 4.7: Kompletter Versuchsaufbau

4.1.6 Hinweise zum Versuchsaufbau

Für den Aufbau selbst ist es sinnvoll, die bereitgelegten Handschuhe und Kittel zu benutzen, damit die im Versuch verwendeten Tinten nicht auf die Haut oder die Bekleidung gelangen.

Die Positionierung der einzelnen Behälter ist beim Aufbau dieses Versuchs sehr relevant, da die Pumpen im ausgeschalteten Zustand weiterhin in beide Richtungen für die Flüssigkeiten durchlässig sind. Zwar verhindern die eingebauten Rückschlagventile ein Eindringen von Wasser in die Tinte, allerdings unterbindet es nur bedingt das Herausfließen der Tinte in den Schlauch des Hintergrundflusses. Daher sollten die Tinten an einer tiefer gelegenen Stelle eingespritzt werden als das Wasser in den Schlauch hineingepumpt wird, bzw. das Abwasser aus dem Schlauch fließt.

Der Grund für dieses Herausfließen der Tinten bei Höherpositionierung der Tintenbehälter ist, dass Flüssigkeit in einem Schlauch aufgrund des Drucks der Wassersäule auf beiden Seiten die gleiche Höhe im Schlauch aufweisen. Daher sollte das Abwassergefäß am höchsten positioniert sein und die Tinten am niedrigsten, damit diese nicht von allein in den Schlauch fließen und so zu einer fehlerhaften Erkennung am Photosensor führen.

4.1.7 Hinweise zur Ansteuerung der Pumpen

Die Tintenpumpen sind von rechts nach links mit den Ziffern eins bis drei im Programmcode durchnummeriert. Voraussetzung für die korrekte Ansteuerung der Pumpen ist, dass die Pumpen an den mit ihrer Nummer versehenen Kanal auf dem mp-Multiboard2 verbunden sind und der Hintergrundfluss an den Channel 4 angeschlossen wird. Die Pumpen werden über den Serial Monitor in der Arduino IDE angesteuert, dafür stehen im ersten Teil des Versuchs die Befehle "1" für das Starten und "0" zum Stoppen des Hintergrundflusses zur Verfügung.

Mit "Pumpennummer,Pumpennummer Pumpdauer,Pumpdauer" lassen sich die Pumpen steuern: Somit würde für die Eingabe "1,2 100,100" die Pumpe 1 100 ms und die Pumpe 2 100 ms pumpen. Die Eingabe für eine Pumpe könnte dann auch wie folgt aussehen "2 100". Wichtig zu erwähnen ist, dass die Pumpdauer in Millisekunden angegeben wird und eine Pumpdauer von mehr als 100 ms bei der Versuchsdurchführung vermieden werden sollte, da der Kanal dann mit Tinte geflutet und eine Messung sehr erschwert wird. Im zweiten Teil des Versuchs können im Serial Monitor Buchstabenfolgen zur Nachrichtenübermittlung eingegeben werden. Zu beachten ist, dass die Übertragungsdauer recht lang ist und somit die Nachrichten aus Zeitgründen kurz zu halten sind.

In manchen Fällen kann es zu einer Fehlermeldung beim Hochladen des Programmcodes auf den ESP kommen, so zum Beispiel wenn der ESP noch in der Ausführung des alten Programmcodes ist. Bei Anzeige "Connecting" auf dem Terminal kann das beschriebene Problem durch Drücken des Enable Knopfes rechts vom USB-C Anschluss behoben werden. Der rechte Knopf ist dabei aus der Perspektive mit direkter Blickrichtung auf den USB-C Anschluss zu sehen.

Programm	Eingabe	Ausgabe	Versuchsteil
Pumpensteuerung	1	startet den Hintergrundfluss	alle Versuchsteile
	0	stoppt den Hintergrundfluss	alle Versuchsteile
	1 30	lässt die Pumpe 1 30 ms pumpen	Versuchsteil 1 und 2
	1,3 30,50	lässt die Pumpe 1 30 ms pumpen und die Pumpe 3 50 ms	Versuchsteil 1 und 2
	Hello World	überträgt die Nachricht Hello World	Versuchsteil 3
Photosensorsteuerung	1	kalibriert den Kanal	alle Versuchsteile nach dem erneuten hochladen

Tabelle 4.2: Beispiele möglicher Programmbefehle

4.1.8 Hinweise zum Programmcode des Photosensors

Der Programmcode für den Photosensor ermöglicht es im ersten Teil des Versuches sowohl Intensitätsverläufe des Lichtes, als auch die prozentualen Änderungen der Intensitäten graphisch darzustellen. Im zweiten Teil des Versuches werden die gesendeten Nachrichten detektiert und decodiert, auf dem Serial Monitor wird die empfangene Nachricht entsprechend ausgegeben. Um Messungen durchführen zu können muss bei einem sauberen Kanal, heißt es darf nur Wasser in dem Schlauch über dem Photosensor vorhanden sein, eine "1" eingegeben werden.

4.2 Versuchsabbau und Reinigung

Für den richtigen Umgang mit den Labormaterialien ist ein fachgerechter Abbau des Versuches und auch eine Reinigung der Materialien notwendig. Dafür sind ein paar Punkte zu berücksichtigen.

Da grundsätzlich immer etwas beim Abbau auslaufen kann, sollten Papiertücher bereitliegen, um ausgelaufene Flüssigkeiten aufnehmen zu können. Übriggebliebene unverbrauchte Tinte aus den Spritzen kann in die farblich zugehörigen Tintenflaschen zurückgekippt werden. Anschließend sind die Tintenreservoirs zu reinigen, dafür werden die Tintenreservoirs des Versuchsaufbaus mit destilliertem Wasser gefüllt und mittels der Tintenpumpen über den laufenden Hintergrundfluss leergepumpt. So wird vermieden, dass durch Trennen der Schläuche von den Pumpen Tinte ausläuft. Sobald alle Schläuche keine sichtbaren Tintenrückstände mehr aufweisen, darf das restliche Wasser aus dem Wasserreservoir in den Abwasserbehälter gekippt und anschließend alle Schläuche von den Verbindern und den Pumpen getrennt werden. Das in den abgetrennten Schlauchteilen befindliche Restwasser kann mit einer luftgefüllten Spritze entfernt werden. Zuletzt werden alle verwendeten Spritzen, Schläuche und Behälter zum Trocknen hingelegt.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Messung des Hintergrundflusses

Für die Messung des Hintergrundflusses öffnen Sie bitte die Datei Pumpensteuerung.ino, achten Sie darauf, dass Sie in die globale Variable "Versuch" eine 1 eintragen. Nehmen Sie nun ein leere 3 ml Spritze, halten Sie unten die Öffnung zu und stecken Sie den Schlauch, der ins Abwassergefäß führt in die Spritze. Geben Sie dann im Serial Monitor des Arduino IDE eine 1 ein, um den Hintergrundfluss zu starten und messen Sie die Zeitdauer bis 3 ml der Spritze mit Wasser gefüllt sind und stoppen Sie den Hintergrundfluss mit einer 0. Führen Sie diese Messung dreimal durch und tragen Sie ihre Ergebnisse in das Versuchsprotokoll ein. Berechnen Sie nun den Durchschnitt ihrer Hintergrundflussmenge Q_0 und treffen Sie eine Aussage darüber, um welche Art von Strömung es sich handelt. Zudem ist der Diffusionskoeffizienten zu bestimmen. Erläutern Sie, ob die Diffusion der Tinte im Wasser vernachlässigbar ist und begründen Sie Ihre Antwort.

5.2 Detektion der Farben

Im Skript wurde bereits erläutert, dass für den Versuch Zeroforcing verwendet wird, um dies nutzen zu können, muss die Kanalimpulsantwort gemessen werden. Hierfür muss im Programm Photosensor.ino die globale Variable Versuch auf 1 gesetzt werden. Schauen Sie sich zu Anfang erst einmal an, wie sich der Farbeindruck bei unterschiedlicher Farbdosierung im Kanal verändert und wie sich die Tinten verhalten. Dafür können Sie für die unterschiedlichen Pumpen beliebige Einspritzdauern im Bereich von 0 – 100ms verwenden.

Bestimmen Sie nun für eine Einspritzdauer von 15 ms, 30 ms, 45 ms, 60 ms und 100 ms die Absorptionswerte und bilden sie aus den Werten für die Einspritzdauer von 30 ms die Kanalmatrix H und berechnen sie mithilfe des Programms Pseudoinverse.py die Pseudoinverse der Kanalmatrix und tragen diese in das Programm für den Photosensor ein. Die Kanalmatrix ist dafür in der Reihenfolge (gelb, rot, blau) aufzustellen. Ändern Sie nun die globale Variable "Versuch" in der Steuerung des Photosensors auf 2. Geben Sie nun erneut Tinten mit jeweils einer Pumpdauer von 30 ms in den Kanal. Was erwarten Sie im idealen Fall für ein Ergebnis und warum weicht Ihr Ergebnis eventuell ab?

Probieren Sie außerdem aus, was passiert, wenn Sie gleichzeitig verschiedene Farben in den Kanal einspritzen. Welcher Schwellwert sollte für die Detektion der einzelnen Farben gewählt werden, damit diese noch gut detektierbar sind und welcher Schwellwert sollte für die Startflag gewählt werden, damit eine Einspritzdauer der gelben Farbe für 50 ms detektierbar ist?

5.3 Datenübertragung

Nun sind die Kanalmatrix und alle Schwellwerte gewählt, damit ist grundsätzlich eine Nachrichtenübertragung möglich. Stellen Sie beliebige Werte für die Wartezeit nach der Startflag und der Bitdauer beim Sender und Empfänger ein, bedenken Sie, dass für die Startflag $t_{\text{Empfänger}} = t_{\text{Sender}} - \frac{t_{\text{Bitdauer}}}{2}$ gelten und auch die Bitdauer bei beiden gleich sein sollte. Verringern Sie nach und nach die Zeiten von Bitdauer, Startflag sowie die Pumpdauern, dafür können Sie zur Bestimmung der Schwellwerte wie in Versuch 2 vorgehen. Um Nachrichten senden zu können ändern Sie in der Pumpensteuerung den Wert von Versuch von 1 auf 3 und in der Photosensorsteuerung von 2 auf 3. Welche maximale Bitrate erreichen Sie, wenn Sie die Zeiten, die Einspritzdauern und entsprechend die Schwellwerte heruntersetzen?

5.4 Versuchsprotokoll

5.4.1 Messung des Hintergrundflusses

Messung	Dauer für Hintergrundflussmenge (3 ml)
1	
2	
3	

Tabelle 5.1: Messung der Durchflussrate

Hintergrundfluss: _____

Mittlere Fließgeschwindigkeit: _____

Reynolds-Zahl: _____

Péclet-Zahl: _____

Ist die Strömung laminar oder turbulent und muss die Diffusion berücksichtigt werden?

5.4.2 Detektion der Farbe

Zeit	15 ms	30 ms	45 ms	60 ms	100 ms
415 nm					
445 nm					
480 nm					
515 nm					
555 nm					
590 nm					
630 nm					
680 nm					

Tabelle 5.2: Detektion der Farbe

Zeit	15 ms	30 ms	45 ms	60 ms	100 ms
415 nm					
445 nm					
480 nm					
515 nm					
555 nm					
590 nm					
630 nm					
680 nm					

Tabelle 5.3: Absorptionswerte von Rot

Zeit	15 ms	30 ms	45 ms	60 ms	100 ms
415 nm					
445 nm					
480 nm					
515 nm					
555 nm					
590 nm					
630 nm					
680 nm					

Tabelle 5.4: Absorptionswerte von Blau

Warum ist der Graph von Blau breiter als von Gelb?

Welchen Wert sollte eine Einspritzung von 30 ms Tinte nach der Berechnung der Pseudoinversen erreichen und warum ist dies nicht exakt zu messen?

Welcher Wert sollte als Schwellwert für die Farben und die Startflag gewählt werden?

Warum steigen die Werte nicht linear an?

5.4.3 Datenübertragung

Einspritzdauer - Tinte	Einspritzdauer - Flag	Bitdauer	Startsequenz- Sender	Startsequenz- Empfänger	Schwellwert- Bit	Schwellwert- Flag	Datenrate

Tabelle 5.5: Datenraten

Beste Datenrate bei:

Einspritzdauer - Tinte: _____

Einspritzdauer - Flag: _____

Sequenzdauer: _____

Startsequenz-Sender: _____

Startsequenz-Empfänger: _____

Schwellwert-Bit: _____

Schwellwert-Flag: _____

Datenrate: _____

Aus welchem Grund kann die Datenrate nicht beliebig gesteigert werden?

Was sind potenzielle Möglichkeiten, die von Ihnen erreichte Datenrate eventuell noch zu steigern?

6 Kurzfragen

Die folgenden Kurzfragen sind zuhause vor der Durchführung des Praktikumsversuchs zu bearbeiten und werden im Kolloquium vor der Durchführung besprochen.

1. Bestimmen Sie für einen Hintergrundfluss von $Q_0 = 10 \frac{ml}{min}$ und einem Kanaldurchmesser von $d_c = 2mm$ die Strömungsart und den Diffusionskoeffizienten.
2. Erklären sie grundlegend wie das Zeroforcing funktioniert.

Literatur

- [1] V. Gholamiyan, Y. Zhao, W. Labidi, H. Boche und C. Deppe, *Security and Privacy: Key Requirements for Molecular Communication in Medicine and Healthcare*, 2025. arXiv: 2503.11169 [cs.IT]. Adresse: <https://arxiv.org/abs/2503.11169>.
- [2] I. F. Akyildiz, M. Pierobon und S. Balasubramaniam, „Molecular Communications and Networking [Scanning the Issue]“, *Proceedings of the IEEE*, Jg. 107, Nr. 7, S. 1227–1229, 2019. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2927797.
- [3] B. D. Unluturk und I. F. Akyildiz, „An End-to-End Model of Plant Pheromone Channel for Long Range Molecular Communication“, *IEEE Transactions on NanoBioscience*, Jg. 16, Nr. 1, S. 11–20, 2017. DOI: 10.1109/TNB.2016.2628047.
- [4] A. Boo, T. Toth, Q. Yu, A. Pfotenhauer, B. D. Fields, S. C. Lenaghan, C. N. S. Jr und C. A. Voigt, „Synthetic microbe-to-plant communication channels“, *Nature Communications*, Jg. 15, Nr. 1, S. 1–14, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-45897-6. Adresse: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-45897-6>.
- [5] V. Jamali, A. Ahmadzadeh, W. Wicke, A. Noel und R. Schober, „Channel Modeling for Diffusive Molecular Communication—A Tutorial Review“, *Proceedings of the IEEE*, Jg. 107, Nr. 7, S. 1256–1301, 2019.
- [6] A. Vanarse, A. Osseiran, A. Rassau und P. van der Made, „Application of Neuromorphic Olfactory Approach for High-Accuracy Classification of Malts“, *Sensors*, Jg. 22, Nr. 2, S. 440, 2022. DOI: 10.3390/s22020440. Adresse: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/2/440>.
- [7] S. Giannoukos, A. Marshall, S. Taylor und J. Smith, „Molecular Communication over Gas Stream Channels using Portable Mass Spectrometry“, *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Jg. 28, Nr. 11, S. 2371–2383, 2017. DOI: 10.1007/s13361-017-1752-6. Adresse: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13361-017-1752-6>.
- [8] S. Qiu, W. Guo, S. Wang, N. Farsad und A. Eckford, „A molecular communication link for monitoring in confined environments“, in *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2014, S. 718–723. DOI: 10.1109/ICCW.2014.6881284.
- [9] M. K. Negar Rikhtegar, „A Brief Survey on Molecular and Electromagnetic Communications in Nano-Networks“, *International Journal of Computer Applications*, Jg. 79, Nr. 3, S. 16–28, Okt. 2013, ISSN: 0975-8887. DOI: 10.5120/13721-1510. Adresse: <https://ijcaonline.org/archives/volume79/number3/13721-1510/>.

- [10] A. Bienau, H. Boche, C. Deppe, F. Fitzek, P. Hofmann, W. Kellerer, W. Labidi, A. Richter, F. Simmel, A. Wietfeld, R. Zheng und P. Zhou, *Molecular Communication for 6G Networks* (6G-life: Unveiling the Future of Technological Sovereignty, Sustainability and Trustworthiness), en, F. Fitzek, H. Boche, W. Kellerer und P. Seeling, Hrsg. Academic Press, Sep. 2025, ISBN: 978-0443274107.
- [11] M. Veletić und I. Balasingham, „Synaptic Communication Engineering for Future Cognitive Brain–Machine Interfaces“, *Proceedings of the IEEE*, Jg. 107, Nr. 7, S. 1425–1441, 2019. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2915199.
- [12] P. Hofmann, R. Bassoli, F. H. Fitzek und M. Reisslein, „MC NfV: Molecular Communication NfV in 6G Networks“, in *2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, 2022, S. 1205–1210. DOI: 10.1109/MELECON53508.2022.9843087.
- [13] M. Kuscü und B. D. Unluturk, „Internet of Bio-Nano Things: A Review of Applications, Enabling Technologies and Key Challenges“, *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, Jg. 2, Nr. 3, S. 1–24, 2021. DOI: 10.52953/CHBB9821. Adresse: <https://www.itu.int/pub/S-JNL-VOL2-ISSUE3-2021-A08>.
- [14] M. B. Dissanayake und N. Ekanayake, „On the Exact Performance Analysis of Molecular Communication via Diffusion for Internet of Bio-Nano Things“, *IEEE Transactions on NanoBioscience*, Jg. 20, Nr. 3, S. 291–295, 2021. DOI: 10.1109/TNB.2021.3072230.
- [15] M. Egan, M. Kuscü, M. T. Barros, M. Booth, A. Llopis-Lorente, M. Magarini, D. P. Martins, M. Schäfer und P. Stano, „Toward Interdisciplinary Synergies in Molecular Communications: Perspectives from Synthetic Biology, Nanotechnology, Communications Engineering and Philosophy of Science“, *Life*, Jg. 13, Nr. 1, S. 208, 2023. DOI: 10.3390/life13010208. Adresse: <https://www.mdpi.com/2075-1729/13/1/208>.
- [16] M. Pierobon und I. F. Akyildiz, „Capacity of a Diffusion-Based Molecular Communication System With Channel Memory and Molecular Noise“, *IEEE Transactions on Information Theory*, Jg. 59, Nr. 2, S. 942–954, 2013. DOI: 10.1109/TIT.2012.2219496.
- [17] R. Mallik und S. P. Gross, „Molecular motors: Strategies to get along“, *Current Biology*, Jg. 14, Nr. 22, R971–R982, 2004. DOI: 10.1016/j.cub.2004.10.046.
- [18] M. Gregori und I. F. Akyildiz, „A new nanonetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Jg. 28, Nr. 4, S. 612–619, 2010. DOI: 10.1109/JSAC.2010.100517.
- [19] A. Gohari, M. Mirmohseni und M. Nasiri-Kenari, „Information theory of molecular communication: directions and challenges“, *IEEE Transactions on Molecular, Biological, and Multi-Scale Communications*, Jg. 2, Nr. 2, S. 120–142, 2016.
- [20] T. Nakano, A. W. Eckford und T. Haraguchi, *Molecular Communication*. Cambridge University Press, 2013.

- [21] T. Heumann und H. Mehrer, „Ficksche Gleichungen und Lösungen“, in *Diffusion in Metallen*, Springer, 1992, S. 13–39, ISBN: 978-3-642-86413-1. DOI: 10.1007/978-3-642-86413-1_2.
- [22] A. Wietfeld, S. Schmidt und W. Kellerer, *Evaluation of a Multi-Molecule Molecular Communication Testbed Based on Spectral Sensing*, 2024.
- [23] N. Farsad, D. Pan und A. Goldsmith, „A Novel Experimental Platform for In-Vessel Multi-Chemical Molecular Communications“, in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8255058.
- [24] L. Brand, M. Scherer, T. t. Dieck, S. Lotter, M. Schäfer, A. Burkovski, H. Sticht, K. Castiglione und R. Schober, „Closed Loop Molecular Communication Testbed: Setup, Interference Analysis, and Experimental Results“, in *ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications*, 2024, S. 4805–4811. DOI: 10.1109/ICC51166.2024.10622231.
- [25] W. Wicke, H. Unterweger, J. Kirchner, L. Brand, A. Ahmadzadeh, D. Ahmed, V. Jammali, C. Alexiou, G. Fischer und R. Schober, „Experimental System for Molecular Communication in Pipe Flow With Magnetic Nanoparticles“, *IEEE Transactions on Molecular, Biological, and Multi-Scale Communications*, Jg. 8, Nr. 2, S. 56–71, 2022. DOI: 10.1109/TMBMC.2021.3099399.
- [26] F. M. White, *Fluid Mechanics*. New York, U.S.: McGraw-Hill, 2016.
- [27] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, siehe S. 345–346, ISBN: 978-0521837163.
- [28] Bartels Mikrotechnik GmbH, *Datasheet: The Bartels Pump | BP7 - Tubing*, Stand: 10. Juni 2024, 2024.
- [29] ams OSRAM Group, *AS7341L 10-Channel Spectral Sensor Frontend*, 2020.
- [30] B. Braun Melsungen AG, *Infuvalve® – Back-Check Valve for Infusion Therapy (Standard)*, https://www.praxisdienst.nl/out/media/Infuvalve_Broschuere_englisch.pdf, Zugriff: 6.8.2025.
- [31] B. Braun Melsungen AG, *Infuvalve® – Back-Check Valve for Infusion Therapy*, https://www.bb Braun-vetcare.com/content/dam/catalog/bbraun/bbraunProductCatalog/BVC_WEB_01/en-ag/b117/infuvalve-back-checkvalves.pdf, Zugriff: 6.8.2025.