

Verbundprojekt

Makroskopische Molekulare Kommunikation (MAMOKO)

Teilprojekt

Kommunikationsmethoden und integrierte Simulationswerkzeuge

Schlussbericht

Laufzeit: 01.11.2018 bis 31.10.2022

Verbundführer: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Projektpartner: Technische Universität Berlin

Erteilungsnummer: 16KIS0917

Prof. Dr.-Ing. habil. Falko Dressler

Dr. Jorge Torres-Gómez

M.Sc. Lukas Stratmann

24. April 2023

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16KIS0917 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

1 Kurzbericht

Das Projekt “Makroskopische Molekulare Kommunikation (MAMOKO)” wurde vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert, um eine Alternative zu den herkömmlichen drahtlosen Kommunikationssystemen zu finden, die elektromagnetische (EM) Wellen zur Übertragung von Informationen nutzen. EM-Wellen-basierte Kommunikationssysteme sind in Rohrleitungsnetzen und Abwassersystemen sowie in der Industrie, wo explosive Chemikalien verwendet werden, oft ungeeignet. Für solche Anwendungen wurde das neue Konzept der molekularen Kommunikation (MK) vorgeschlagen, bei dem Moleküle oder sehr kleine Partikel mit Abmessungen im Mikro- bis Nanometerbereich als Informationsträger verwendet werden. Während sich die meisten bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiet auf Nano- und Mikroanwendungen konzentrierten – oft mit biologischer oder medizinischer Relevanz – konzentriert sich das MAMOKO-Projekt auf die Eignung von MK für makroskopische industrielle Anwendungen. In dieser Arbeit wird unter anderem eine integrierte Simulationsumgebung für flüssigkeitsbasierte MK mit superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs) sowie für luftbasierte MK vorgestellt.

1.1 Aufgabenstellung

In diesem Projekt untersuchten wir die Eignung makroskopischer molekularer Kommunikationslösungen für industrielle Anwendungen. Zu diesem Zweck arbeiteten wir an der Theorie, der Simulation und der Demonstration von molekularen Kommunikationssystemen auf dem Prüfstand. Wir untersuchten Punkt-zu-Punkt- und Punkt-zu-Mehrpunkt-Netzwerke unter Berücksichtigung der Ausbreitungsmöglichkeiten, Modulationsverfahren und Erkennungsmethoden einschließlich Modelle für maschinelles Lernen. Wir haben auch Werkzeuge wie analytische Modelle, geeignete Testumgebungen und Demonstratoren entwickelt.

1.2 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Der Bereich der molekularen Kommunikation wurde auf der Grundlage von Theorie, Simulation und praktischen Tests entwickelt. Jüngste theoretische Studien zeigen die Kommunikationsfähigkeiten von Nanosensoren, die Diffusions-Advektionsmechanismen nutzen, um größere Entfernungen in Rohren zu erreichen [1]. Außerdem wurden in theoretischen

Analysen Ergebnisse für Modulationsverfahren entwickelt, um die Kommunikationskapazitäten mit molekularen Trägern zu erhöhen [2]. Bekannte Kommunikationsschemata in drahtlosen Verbindungen wurden an den molekularen Bereich angepasst, indem Moleküle als Träger betrachtet wurden.

Simulatoren für molekulare Kommunikation standen ebenfalls im Mittelpunkt der Untersuchungen. Zu Beginn des Projekts existierten vornehmlich nanoNS3 [3], BiNS2 [4] und AcCoRD [5]. Der Fokus dieser drei Simulatoren liegt tendenziell auf molekularer Kommunikation via Diffusion im mikroskopischen Maßstab. Dabei nutzt nanoNS3 analytische Kanalmodelle, und AcCoRD und BiNS2 können individuelle Partikelbewegungen simulieren. Wahlweise unterstützt AcCoRD auch beide Ansätze gleichzeitig in einem hybriden Modus. Ein detaillierter Überblick über diese Simulatoren findet sich in [6].

Darüber hinaus wurde während der Projektlaufzeit durch veröffentlichte Forschungsarbeiten die Machbarkeit von Sendern und Empfängern mit synthetischen Materialien aufgezeigt [7], [8]. Deren Modellierung ist noch im Gange, um die Auswirkungen der chemischen und mechanischen Mechanismen auf die Kommunikationsleistung zu ermitteln. In der Literatur finden sich auch Fortschritte bei makroskopischen Testumgebungen, die Experimente mit Molekülen kostengünstig und zugänglich machen [9].

1.3 Ablauf des Vorhabens

TUB trug hauptsächlich zu den Arbeitspaketen 3-2 bis 3-5 und zum Arbeitspaket 4a-5 bei. Einzelheiten zu den Beiträgen finden Sie im nächsten Abschnitt 2. Diese Arbeitspakete bezogen sich auf Kanalmodelle, Vorbereitung für Parameterstudien, Validierung, Überwachung von Simulationsstudien und Entwurf von Mehrfachzugriffsmethoden für molekulare Mehrpunkt-zu-Punkt-Kanäle.

1.4 Wesentliche Ergebnisse

Wir haben die Forschung im Bereich der molekularen Kommunikation mit Hilfe von Simulatoren und theoretischen Perspektiven vorangetrieben. Im Einzelnen:

- Wir haben einen flexiblen Simulator für den Fluss von Nanopartikeln in Rohren entwickelt.
- Wir haben ein wenig komplexes Modell zur Berechnung von Druck und Strömung in kesselartigen Rohren entwickelt.
- Wir haben Erklärungen für implementierte molekulare Empfänger mit Machine-Learning-Modellen erforscht, um so den Nachweis der Korrektheit zu erbringen.
- Wir haben Metriken für die Bildung von Nanonetzwerken mit molekularen Kommunikationsmedien erstellt.
- Wir haben Metriken für die Kommunikationsleistung zwischen Nanosensoren und externen Gateways erstellt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Wir haben uns für die Forschung in diesem Projekt mit verschiedenen Universitäten und Kolleg:innen zusammengetan. Gemeinsam mit unseren Partnern haben wir Software und Modelle entwickelt, wir haben die Kommunikationsmöglichkeiten der Nanokommunikation erforscht und Studierende bei ihrer Arbeit betreut. Unsere Haupttätigkeiten waren wie folgt

- Wir haben mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel einen Simulator für die Strömung von Partikeln entwickelt
- Mit der Universität Luxemburg haben wir ein Modell für die Strömung und den Druck in kesselartigen Rohren entwickelt.
- Mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und der Universität Valparaíso (Chile) erforschten wir die Vernetzungsmöglichkeiten von Nanosensoren.
- Gemeinsam mit der Michigan State University (USA) und der FAU (Deutschland) analysierten wir die Detektionsfähigkeiten von Nanosensoren.
- Wir forschten mit Testbeds zur Ausbreitung und Detektion von Molekülen mit der Technischen Universität Dresden.
- Wir betreuten gemeinsame Studierendenarbeiten mit der Technischen Universität Dresden und einem Forscher am Technology Innovation Institute (Abu Dhabi)

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Ergebnisse

2.1.1 AP 3-1: Simulationswerkzeuge

Wir haben Simulatoren für die molekulare Kommunikation bewertet, die die Bewegung von Molekülen in einer Zielumgebung berücksichtigen. Wir verglichen sie im Hinblick auf die Geometrie der Umgebung, die Molekularbewegung und -verfolgung sowie die visuelle Darstellung. Wir haben die Partikelbewegung und -verfolgung als eine der schwierigsten Forschungsfragen in diesem Bereich identifiziert. Bei Simulatoren, die jedes Molekül einzeln verfolgen, stellen wir fest, dass sie vereinfachte Strömungsmodelle verwenden und es nicht erlauben, komplexere Strömungsmechanik wie laminare Strömung um Hindernisse oder Kreuzungen zu simulieren, die die Molekularbewegung stark beeinflussen können. Diese Analyse verfügbarer Werkzeuge haben wir im Rahmen der Nanocom-Konferenz vorgestellt und veröffentlicht [6].

Als mögliche Lösung schlagen wir die Verwendung von Vektorfeldern vor, siehe Abbildung 2.1, die auch in der Strömungsmechanik verwendet werden, um komplexere molekulare Kommunikationskanäle zu simulieren. Solche Vektorfelder lassen sich mit Computational Fluid Dynamics (CFD) Software berechnen, zum Beispiel mit OpenFOAM. Unter Verwendung solcher Tools schlagen wir einen Arbeitsablauf vor, der aus drei Hauptschritten besteht: (i) Beschreibung der Umgebung in einer 3D-Modellierungssoftware; (ii) Import dieser Beschreibung in eine CFD-Software, die Strömungsberechnungen durchführt und ein Vektorfeld exportiert, das die Partikelverfolgung ermöglicht; und (iii) Verwendung dieses Vektorfeldes in einem Molekularsimulator, um eine genaue Bewegung von Trägermolekülen durchzuführen. Dieser Ansatz führt dazu, dass genauere Simulationen ohne einen großen Anstieg der Rechenzeit wiederholt werden können, da das vorberechnete Vektorfeld wiederverwendet werden kann. Die Komplexität der Umgebung hängt dann

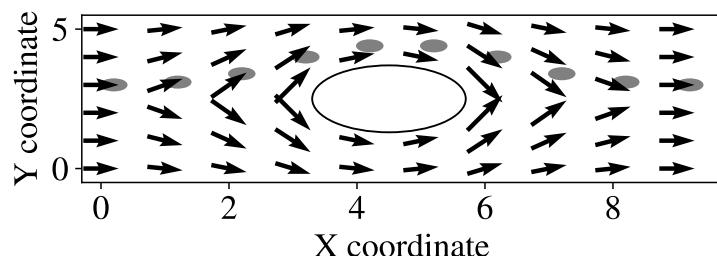


Abbildung 2.1: Vektorfeld, das die laminare Strömung um ein ovalförmiges Hindernis beschreibt. Graue Punkte skizzieren die Bewegungsbahn eines Moleküls.

Tabelle 2.1: Vergleich von Molekularsimulatoren in Bezug auf die Kanaleigenschaften

Simulator	Environment geometry	Molecular movement	Molecular tracking	Visual representation
nanoNS3 [3]	Simple configurable geometries	Diffusion, flow	None (analytical channel description)	None
BiNS2 [4]	Pre-defined scenarios (simple geometries)	Diffusion, Poiseuille flow	Microscopic (per molecule)	Live 3D rendering
AcCoRD [5]	Combination of multiple configurable geometries	Diffusion, uniform (constant) flow	Microscopic (per molecule), mesoscopic (subvolumes), hybrid	Textual and post-processing in Matlab
Blood-VoyagerS [12]	One given scenario (human cardiovascular system)	Different uniform flows (depending on vessel type)	Microscopic (per molecule)	Textual trace of each molecule

von den Fähigkeiten des Tools ab, das zur Erzeugung des Feldes verwendet wird. Wir haben diesen Ansatz in unserem Pogona-Simulator implementiert, den wir ebenfalls auf der ACM Nanocom sowie in einer Publikation in der Zeitschrift IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC) vorgestellt haben [10], [11].

2.1.2 AP 3-2: Kanalmodelle

Bei den Kanalmodellen haben wir in zwei Hauptrichtungen geforscht: Modellierung von Kanälen mit freier Diffusion, in denen sich die Moleküle frei in drei Dimensionen bewegen, und Modellierung von Driftkanälen in Form von Rohren, in denen Moleküle von äußeren Kräften beeinflusst werden. Wir haben den freien Diffusionskanal mit FPGA-Technologie modelliert. Dieser digitale Simulator bietet Flexibilität und ermöglicht es, die Komplexität des Netzwerks leicht zu erhöhen und verschiedene Sender und Empfänger einzubeziehen. Außerdem können mehr Verbindungen parallel modelliert werden, was für die Modellierung verschiedener Einstellungen für Rohre in industriellen Netzen sehr nützlich ist.

Diese Richtung wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts mit drei Studierenden verfolgt. Die Studierenden trugen zu einem Beitrag auf der International Conference on Networked Systems (NetSys 2021) bei. Sie entwickelten das in Abbildung 2.2 dargestellte Systemmodell, das nicht nur den Kanaldiffusionsprozess modelliert, sondern auch die

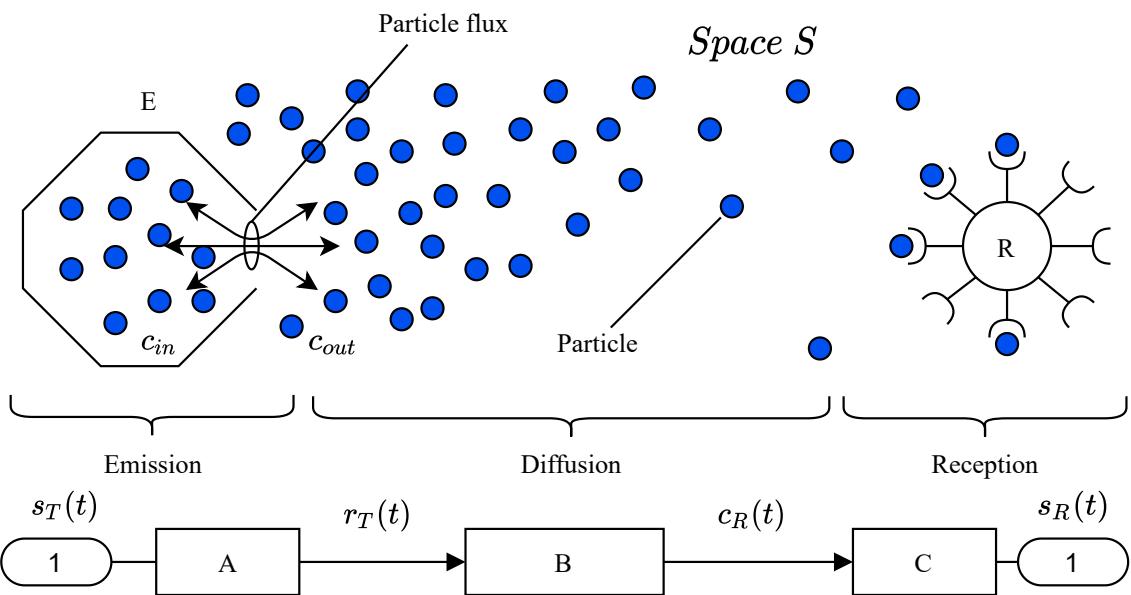


Abbildung 2.2: Systemmodell molekularer Kommunikation mit Sender, Kanal und Empfänger.

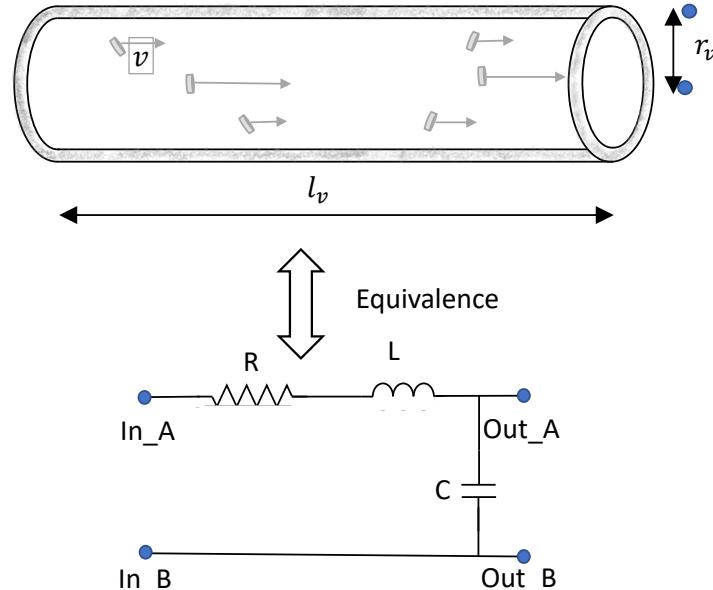


Abbildung 2.3: Kanalabstraktionsmodell implementiert mit elektrischen Schaltkreiskomponenten.

Geometrie auf der Sender- und Empfängerseite integriert.

Wir haben auch Kanäle mit Drift mit 0-D-Modellen modelliert. Die 0-D-Modelle ermöglichen die Simulation von Druck und Strömung in kesselartigen Rohren mit wenig komplexen Schemata. Wir haben eine äquivalente Darstellung des elektrischen Stromkreises verwendet, um Druck und Durchfluss mit Widerständen, Induktoren und Kondensatoren zu bewerten, siehe Abbildung 2.3. Diese Modelle sind besonders relevant, da sie eine geringe Rechenkomplexität aufweisen, die es uns ermöglicht, komplexe Rohrnetzwerke ähnlich dem menschlichen Kreislaufsystem zu simulieren. Wir haben dieses Modell auch mit digitalen Technologien implementiert, die in FPGAs eingesetzt werden können. Wir haben die Modelle als Open Access der Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt. Die Arbeit wurde in der ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2021) und der European Wireless (EW 2022) veröffentlicht in [13], [14].

2.1.3 AP 3-3: Vorbereitung für Parameterstudien

In Bezug auf AP 3-3 zur Vorbereitung für Parameterstudien wurde ein Arbeitsablauf für den neu entwickelten Pogona-Simulator erarbeitet, der die parallele Ausführung mehrerer unterschiedlich parametrisierter Simulationsdurchläufe ermöglicht.

2.1.4 AP 3-4: Validierung

In WP 3-4 zur Validierung des Simulators haben wir eine gemeinsame Arbeit in zwei Richtungen durchgeführt. Wir haben die Kanalimpulsantwort, einschließlich der Mobilität, mit Partnern an der Universität Kiel gemessen. Zusätzlich testeten wir Sender- und Empfängerschemata mit einer makroskopischen Testumgebung mit Partnern an der TU Dresden.

Mit Partnern an der Universität Kiel validierten wir das analytische End-to-End-Systemmodell und erweiterten es um das Rauschmodell. Wir haben auch verschiedene Modulationsschemata untersucht, die die Konzentrationsniveaus der versprühten Farbstoffe als Informationsquelle ausnutzen, und haben ihre Leistungen mit dem Standard On-Off Keying verglichen. Der Teststand besteht aus einem industriellen Sprüher als Sender, einem 2 m langen Rohr als Übertragungskanal und einem Hochgeschwindigkeitsdetektor auf Kamerabasis. Die betrachteten Übertragungsdistanzen decken einen Bereich von einigen zehn Zentimetern bis Metern ab, siehe Abbildung 2.4. Wir haben diese Studie in der Zeitschrift IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC) als gemeinsamen Beitrag mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel veröffentlicht [15].

In Zusammenarbeit mit der TU Dresden haben wir einen Prototyp eines molekularen Kommunikationskanals mit einem Sender-Sprüher und einem Sensor-Empfänger entwickelt, siehe Abbildung 2.5. Wir verwendeten Raspberry Pi-Geräte, die als Controller im Testbett und als Informationssender angeschlossen waren. Wir entwarfen einen adaptiven Empfänger mit einem Simulator, der sich bei der Implementierung im Testbed als korrekt funktionierend erwies. Wir haben ein Paper auf der Konferenz IEEE International Balkan

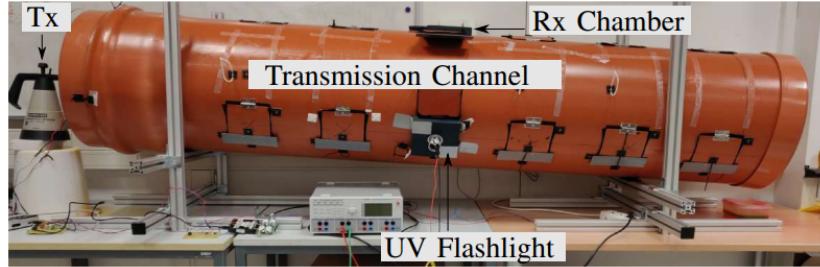


Abbildung 2.4: Prüfstand für luftgetragene MC mit Fluoreszenzfarbstoffen über einen 2 m langen Übertragungskanal.

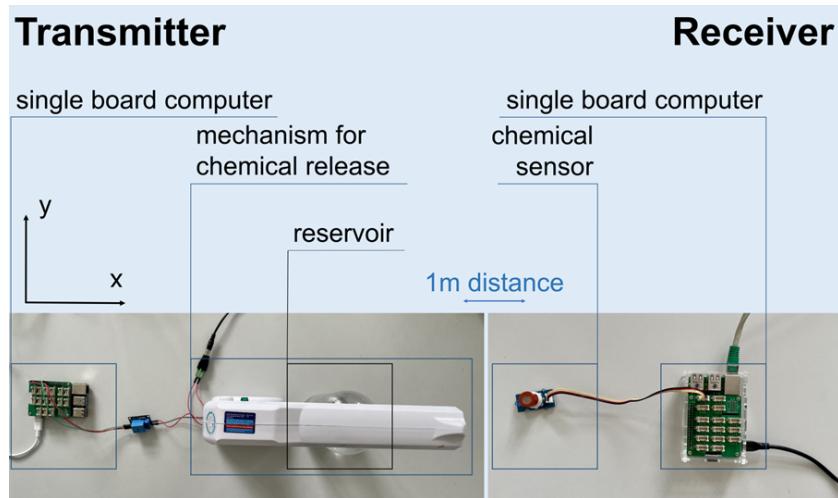


Abbildung 2.5: Das molekulare SISO-Kommunikationssystem. Das System ist keiner Beschränkung unterworfen und kann jederzeit erweitert werden.

Conference Communications and Networking (BalkanCom 2022) veröffentlicht [16] und wurden mit dem Best Paper Student Award ausgezeichnet. Wir führten auch Messungen der Empfängerleistung durch, die mit den theoretischen und getesteten Ergebnissen übereinstimmten. In dieser Richtung haben wir im Sommersemester 2021/2022 ein gemeinsames Projekt mit Masterstudierenden der TU Dresden und der TU Berlin organisiert. Die Studierenden der TU Berlin bewerteten die Kommunikationsverbindung theoretisch mit Ergebnissen aus der Literatur. Die Studierenden der TU Dresden maßen die Kommunikationsleistung mit Hilfe eines Testbeds. Die Idee des Projekts war es, theoretische und praktische Ergebnisse in Einklang zu bringen.

Wir berichteten auch über diese Testumgebung, um den Betrieb von neural networks (NNs)-basierten Empfängern zu untersuchen. Wir haben erklärbare Methoden angewandt, um die Funktionsweise des NN bei der Erkennung von Einsen und Nullen in concentration shift keying (CSK)-Modulationen zu verstehen. Wir validierten unseren theoretischen Ansatz mit dem Testbed im Bereich hoher und niedriger Interferenzen. Wir haben unseren Beitrag auf dem 7th Workshop on Molecular Communications (WMC 2023) in [17] veröffentlicht.

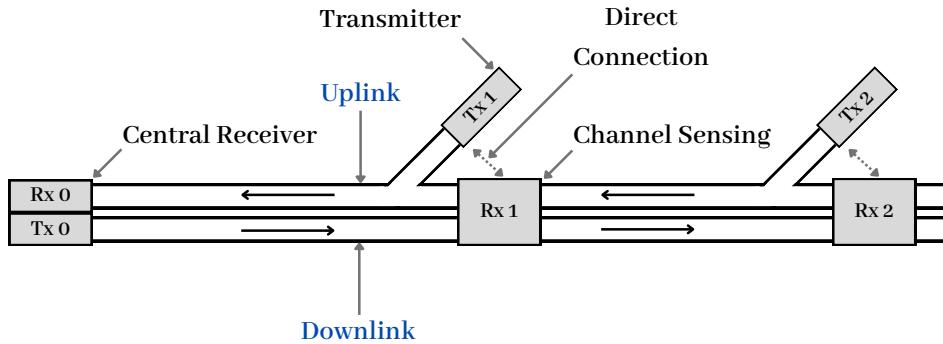


Abbildung 2.6: Simuliertes Rohrsystem mit mehreren Sendern und Empfängern für die Untersuchung von Mehrzugriffsverfahren in SPION-basierter molekularer Kommunikation [21].

2.1.5 AP 3-5: Begleitung von Simulationsstudien

Grundsätzlich erfolgte die Entwicklung des Pogona-Simulators [10] in engem Austausch mit den Projektpartnern in Erlangen. Das Erlanger Testbed auf Basis von sogenannten SPIONs diente maßgeblich der Validierung des Simulators. In einem späteren Schritt erweiterten wir den Pogona-Simulator um Funktionen für luftbasierte molekulare Kommunikation. In einer Kooperation mit den Projektpartnern in Kiel integrierten wir hierfür ein Modell des im Testbed eingesetzten Sprühkopfes [18].

Ebenfalls im Kontext des Arbeitspaket 3-5 zur Begleitung von Simulationsstudien wurde in Kooperation mit den Projektpartnern in Kiel eine Arbeit zur Dualität zwischen Coronavirus-Infektionen und luftbasierter makroskopischer molekularer Kommunikation zunächst im IEEE Communications Magazine (COMMAG) publiziert [19] und später in der Infectious Diseases Special Issue der IEEE T-MBMC weiter ausgeführt [20]. Hierfür wurde erstmals eine Erweiterung des Pogona-Simulators um die physikalischen Einflüsse von Schwerkraft, Auftrieb und Luftwiderstand eingesetzt.

2.1.6 AP 4a-5: Entwurf von Mehrzugriffsverfahren für Multipunkt-zu-Punkt-Kanälen

Um Mehrzugriffsverfahren in SPION-basierter makroskopischer molekularer Kommunikation simulativ im Pogona-Simulator untersuchen zu können, musste dieser zunächst beschleunigt werden. Das gelang R. C. Pampu und H. Messaoudi in einem Studierenden-Semesterprojekt (vgl. Abschnitt 2.6.1), in dem sie die ursprüngliche Python-Version von Pogona prototypisch in Rust reimplementiert und so eine Verkürzung der Rechenzeit bei 100 000 simulierten Partikeln auf bis zu $\frac{1}{60}$ erreicht haben. Aufbauend auf dieser Arbeit verglich H. Messaoudi im Rahmen seiner Bachelorarbeit die Verfahren Time-Division Multiple Access (TDMA) und Token Passing im in Abbildung 2.6 skizzierten Netzwerk [21]. Der Fokus der Arbeit lag hierbei auf kurzen und zeitkritischen Nachrichten (Warnungen). Welches der Verfahren besser geeignet ist, hängt den Ergebnissen zufolge entscheidend von der Länge des Netzwerks und der Länge zeitkritischer Nachrichten ab: Falls in einem

2-Sender-Szenario die Zeit zum Übertragen von zwei Frames in TDMA kürzer ist als die Zeit, die ein Token benötigen würde, um den gesamten Kanal zu durchlaufen, ist TDMA zu favorisieren, und andernfalls Token Passing.

Parallel zu dieser Arbeit entwickelte R. C. Pampu in einer weiteren Bachelorarbeit ein Verfahren für luftbasierte MK, das es erlaubt, Symbole von zwei gleichzeitig sendenden Transmittern dekodieren zu können [22]. Das Systemmodell hierfür ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Das Dekodierverfahren macht sich dabei zu Nutze, dass bei einem Versatz des Empfängers näher zu dem einen oder dem anderen Transmitter die Signale leicht zeitversetzt und unterschiedlich stark empfangen werden. Hierfür wird eine Publikation auf der ACM Nanocom 2023 angestrebt.

Auch die Ausbreitung von infektiösen Tröpfchen oder Aerosolen in der Luft kann als Vielfachzugriff modelliert werden (vgl. Abschnitt 2.1.5, [20]). Mithilfe des Pogona-Simulators haben wir die Flugbahn von Speicheltröpfchen simuliert, die beim Husten ähnlich wie im Kieler Testbed für luftbasierte MK ausgestoßen werden. Abbildung 2.7 zeigt die Position dieser von zwei simulierten Personen ausgestoßenen Partikel an der Stelle, wo sie auf eine Ebene auf der Höhe der Hände getroffen sind. Mit im Simulator bereits existierenden Modulen wie sphärischen absorbierenden Empfängern lassen sich außerdem die Hand- und Mundregionen modellieren und zählen, wie viele Partikel diese Regionen erreichen.

2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Teil der Kosten dieses Teilprojekts entfiel auf Personalkosten. Wir hatten bis Dezember 2021 drei wissenschaftliche Mitarbeiter im Projekt, und zwei studentische Hilfskräfte wurden durch das Projekt finanziert. Von Januar 2022 bis Dezember 2022 waren zwei wissenschaftliche Mitarbeiter und eine studentische Hilfskraft beschäftigt. Weiterhin fielen Kosten für projektbezogene Dienstreisen an, sowohl für „regelmäßige Besuche der Projektpartner als auch für genehmigte Konferenzreisen mit eigener Präsentation“. Details finden sich in den Ausgabenerklärungen unter der Förderungsnummer 16KIS0917 für die Jahre 2019, 2020, 2021, and 2022.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In diesem Projekt untersuchten wir alternative Lösungen für die zukünftige Kommunikation, insbesondere für 6G-Mobilfunknetze. Die Arbeit untersuchte die Möglichkeiten der Integration molekularer Kommunikationssysteme in künftige Generationen von drahtlosen Netzen. Die Integration ist besonders wichtig für eingebettete drahtlose Sensoren, die möglicherweise Informationen in komplexen und widrigen Umgebungen übermitteln müssen. Herkömmliche drahtlose Kommunikation mit EM-Wellen in unterirdischen (z.B.

Tunneln oder Minen) und engen industriellen Umgebungen (z.B. Rohrleitungsnetze, einschließlich Öl-, Wasser- und Gaspipelines) ist aufgrund der hohen Ausbreitungsverluste unter Umständen nicht durchführbar. Wir berichteten über Studien in flüssigkeits- und luftbasierten MK-Systemen im Makromaßstab mit echtem Prüfstand zur Analyse der Erkennungs- und Kommunikationsleistung. Wir untersuchten auch die Verbindung von Nano-Dingen als Netzwerke, einschließlich der Auswirkungen der Mobilität, die die Grundlage für verschiedene zukünftige industrielle Anwendungen ist. Außerdem haben wir weitere Analysen zu den Schnittstellen zwischen externen Gateways und Nanosensoren durchgeführt. Dies ist insbesondere für die Steuerung innerhalb von Netzwerken und die Übermittlung von Daten an Überwachungsgeräte relevant.

2.4 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

Im Einzelnen berichteten wir über die folgenden Vorteile, die sich aus den durchgeführten Untersuchungen ergaben:

- Wir haben Simulatoren für den Partikelfluss entwickelt, die eine flexible Umgebung zum Testen zukünftiger molekularer Netzwerke bieten. Hiermit können wir flexibel verschiedene Bedingungen für den Fluss und die Diffusion von Partikeln testen. Dies spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von molekularen Transceiver-Systemen.
- Wir haben niedrigkomplexe Modelle entwickelt, die Strömung und Druck in blutgefäßartigen Rohren liefern. Mit Hilfe elektrischer Ersatzschaltungen können wir Rohrnetze in großem Maßstab integrieren und die Strömung und Konzentration von Partikeln mit geringen Rechenressourcen untersuchen.
- Wir haben einen auf neuronalen Netzen basierenden Detektor für molekulare Kommunikationsumgebungen entwickelt. Dieser Detektor ist in der Lage, niedrige und hohe Interferenzregime mit einer hohen Kommunikationsleistung zu bewältigen.
- Wir haben Metriken für die Kommunikationsleistung zwischen fließenden Nanosensoren und externen Schnittstellen entwickelt. Diese Ergebnisse sind relevant für die Untersuchung der erreichbaren Bitrate in Schnittstellen beim Zugriff auf und bei der Verbindung mit Nanonetzwerken in Rohren.
- Wir wendeten neue Werkzeuge an, um die Informationsmetriken wie das Alter der Information in molekularen Mitteln zu verstehen. Diese Ergebnisse sind besonders wichtig, um die Überwachungskapazitäten von molekularen Nanonetzwerken zu verbessern.

2.5 Fortschritte auf benachbarten Gebieten

In Zusammenarbeit mit der Universität Kiel trugen wir auch zur Erforschung der Dualität zwischen einem viralen Infektionsprozess und einer makroskopischen luftgetragenen MK

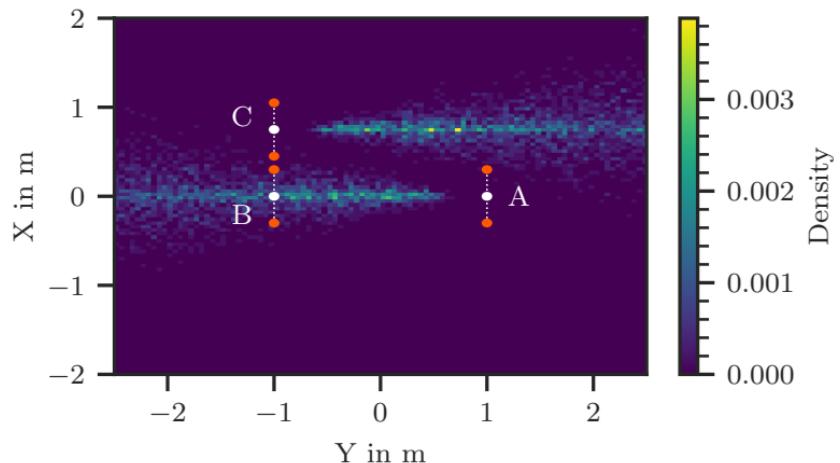


Abbildung 2.7: Dichtekarten von Partikeln mit den Simulationswerkzeugen.

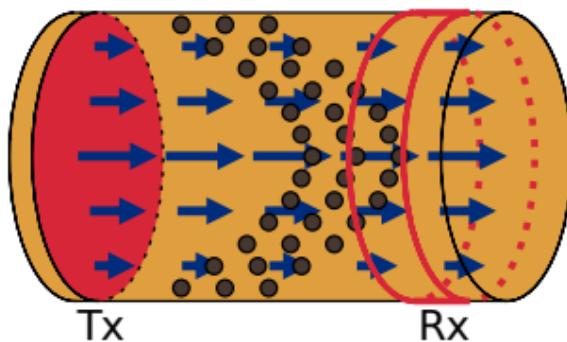


Abbildung 2.8: Modeling the flow of particles in pipes.

bei. Wir haben einen theoretischen Rahmen für virale Infektionsprozesse für Aerosol- und Tröpfchenübertragungen geschaffen. Auf diese Weise haben wir eine Formulierung der gegenseitigen Information zur Vorhersage von Infektionsraten angewandt. Außerdem haben wir ein Szenario mit mehreren Nutzern mit fortschrittlichen Partikelsimulationswerkzeugen simuliert. Dies ist in Abbildung 2.7 zu sehen, die die Verteilung von beim Husten ausgestoßener Partikel auf der Höhe der Hände zeigt. Wir schlugen mehrere Gegenmaßnahmen zur Verringerung der Infektionen vor, die direkt zur Eindämmung von COVID-19 eingesetzt werden können.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

2.6.1 Studierendenprojekte

Während des Projektvorhabens haben wir im Rahmen des Bachelor- und Masterstudiums im Fach „Research Project Advanced Network Technologies“ verschiedene Forschungsak-

tivitäten mit Studierenden durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine einsemestrige Lehrveranstaltung, in der die Studierenden aufgefordert werden, sich an projektbasierten Problemen zu beteiligen. Insgesamt nahmen 27 Studierende an 10 Projekten teil. Die Projekte bezogen sich unter anderem auf die Modellierung des Partikelflusses (siehe Abbildung 2.8), die Verwendung von FPGA-basierten Technologien zur Beschleunigung der Modellierung, die Simulation der Diffusion von Partikeln wie CO₂, die Implementierung von Empfängern mit Modellen des maschinellen Lernens und die Implementierung von Ersatzschaltbildmethoden zur Modellierung des Flusses und des Drucks in kesselartigen Rohren. Einige der Projekte haben wir auch in Zusammenarbeit mit Studierenden der TU Dresden unter gemeinsamer Betreuung und Co-Betreuung mit dem Technology Innovation Institute (Abu Dhabi) durchgeführt.

1. Sommer 2021 (Jakob Arndt): „Simulation Studies in Molecular Communication“
2. Winter 2020 (Daniil Romanchenko, Ba Que Le, Matis Tartie): „Molecular Communication Channel Modelling in FPGA technology“
3. Sommer 2021 (Finn Niklas Krempien, Hannes Michallik, Arian Nasr Jalali): „Electric Circuit Modeling of the Human Circulatory System“
4. Winter 2021 (Hamza Messaoudi, Rebecca Corinna Pampu, Butch Warns): „(More) Efficient Simulation of Macroscopic Molecular Communication – Pogona in Rust“
5. Winter 2021 (Ismail Can, Oguz Karaahmetoglu, Dominik Christian Busse): „Communication network for climate surveillance with drones“
6. Winter 2021 (Muhammad Fadli Damara, Sinan Can Max Koepp, Christos Laskos, Tim Marc Schröder): „Machine learning approach for disease detection in the Human body“
7. Sommer 2022 in Zusammenarbeit mit TU Dresden, (Xin Li, Jivala Gabriel Touzard): „MIMO Molecular Communication Systems“
8. Sommer 2022 (Mohamed Dhia Askri, Alessandra Melina Kalläne, Akram Salim Jawad Al-Saffah): „Electric Circuit Modeling of the Human Circulatory System“
9. Sommer 2022 in Zusammenarbeit mit dem Technology Innovation Institute in Abu Dhabi (Doan Hoang Long Kästner, Anke Küstner, Philip Nys): „In-body ultrasound and Terahertz communications“
10. Winter 2022 in Zusammenarbeit mit TU Dresden (Balkis Abidi, Lisa Yvonne Debus): „Machine learning method to optimize performance in Molecular Communication Links“

Im Rahmen dieser Arbeit haben wir auf der Netsys-Konferenz 2021 eine Veröffentlichung mit Studierenden eingebbracht:

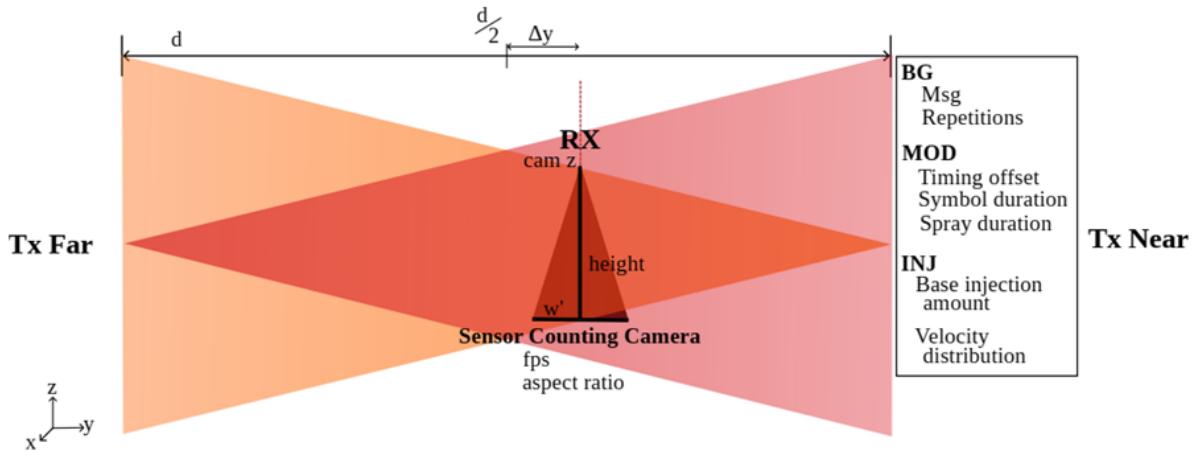


Abbildung 2.9: Systemmodell der Bachelorarbeit von R. C. Pampu [22]

D. Romanchenko, M. Tartie, B. Que Le, J. Torres Gómez und F. Dressler, „Molecular Communication Channel Modelling in FPGA Technology,“ in *International Conference on Networked Systems (NetSys 2021), Workshop on Nanonetworks and Nanocomputation (WoNaN 2021)*, Virtual Conference: EASST, Sep. 2021.

2.6.2 Bachelor- und Masterarbeiten

Im Rahmen des Projekts wurden 6 Bachelorarbeiten mit der gleichen Anzahl von Studierenden verteidigt. In den Abschlussarbeiten befassten sich die Studierenden mit Themen wie der Modellierung von Partikeldiffusionen in Rohren, der Darstellung elektrischer Schaltkreise von blutgefäßartigen Rohren für Druck und Durchfluss, der Nachweisfähigkeit von Nanosensoren sowie der Bildung bioinspirierter Nanonetzwerke. Ein Beispiel ist in Abbildung 2.9 dargestellt, wo die Studentin analytische und Simulationsstudien durchführte, um die Auswirkungen von Übertragungsverzögerungen und die Position des Empfängers in Rohren zu untersuchen und um die Auswirkungen von Intersymbol-Interferenzen zu minimieren.

1. S. Omar, „Macroscopic Molecular Communication Networks – Extending the Configuration System of the Pogona Simulator for Improved Mobility,“ Bachelor Thesis, Telecommunication Networks Group, Berlin, Germany, Juni 2022.
2. H. Messaoudi, „Medium Access Control in Macroscopic Molecular Communication,“ Bachelor Thesis, Telecommunication Networks Group, Berlin, Germany, Dez. 2022.
3. J. S. Burggraf, „Modeling and Simulating Chemotaxis Bacteria Networks in MATLAB,“ Bachelor’s Thesis, School of Electrical Engineering und Computer Science (EECS), Berlin, Germany, Juli 2022.
4. M. Tartié, „Modelling the Human Circulatory System with Electric Circuits,“ Bachelor Thesis, School of Electrical Engineering und Computer Science (EECS), Berlin, Germany, März 2022.

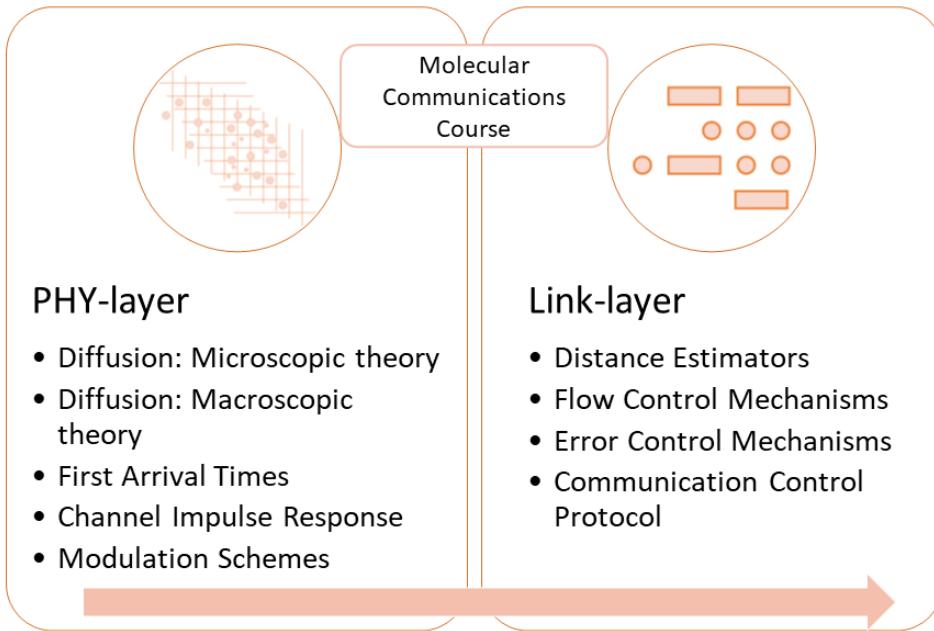


Abbildung 2.10: Kurs Molekulare Kommunikation (Masterstudiengang).

5. R. C. Pampu, „Identification of the Signal Source among Multiple Simultaneous Senders in an Air-based Molecular Communication Channel,“ Bachelor Thesis, Telecommunication Networks Group, Berlin, Germany, Jan. 2023.
6. A. Mhrok, „Abnormality Detection in Blood Vessels via Mobile Nanosensors,“ Bachelor Thesis, School of Electrical Engineering und Computer Science (EECS), Berlin, Germany, Jan. 2023.

2.6.3 Eröffneter akademischer Kurs im Masterprogramm

Wir haben einen Kurs im Masterprogramm eröffnet, der sich mit den PHY- und Link-Schichten in molekularen Kommunikationsarchitekturen befasst (siehe ein Diagramm des Inhalts in Abbildung 2.10). Der Kurs fand im Wintersemester 2022 statt und wird im Sommersemester 2023 eine zweite Auflage haben. Der akademische Kurs behandelt Kommunikationstechniken und -technologien, um Netzwerke auf der Nanoskala nach dem Paradigma der molekularen Kommunikation zu konzipieren. Er verfolgt einen Netzwerkarchitekturansatz aus der Perspektive von Computernetzwerken. In der physikalischen Schicht werden Modelle für die molekularen Kommunikationskanäle sowie für Sender und Empfänger eingeführt. In der Verbindungsschicht behandeln wir Mechanismen für den Informationsfluss und Fehlerkontrollmechanismen. Die Studierenden führen verschiedene praktische Aktivitäten im Matlab-Simulator durch, um die physikalische und die Verbindungsschicht zu modellieren. Nach Abschluss des Kurses werden die Teilnehmenden die wichtigsten Kommunikationsschemata in molekularen Szenarien charakterisieren können. Außerdem werden sie das theoretische Wissen anwenden, um molekulare Kommunikationsnetzwerke zu entwickeln. Schließlich werden die Studierenden in der Lage sein,

molekulare Kommunikationsverbindungen mit Simulatoren zu entwickeln.

2.6.4 Tagungsbeiträge

Im Rahmen des Projekts haben wir insgesamt 14 Beiträge zu den wichtigsten Konferenzen und Workshops im Bereich der molekularen Kommunikation (Nanocom, Globecom, WoNan, BalkanCom) eingereicht. Wir behandelten verschiedene Themen zu

- Diffusion von Partikeln in Rohren und offenen Umgebungen mit Testbed.
- Einfluss der Mobilität auf die Kommunikationsleistung.
- Bildung von Nanonetzwerken.
- Lokalisierung von Nanosensoren in blutgefäßartigen Rohren.
- Modellierung von Druck und Strömung in blutgefäßähnlichen Rohren.
- Überblick über den Inhalt mit Blick auf zukünftige Anwendungen im molekularen Bereich.

Für unsere Beiträge zum ACM International Workshop on Nanoscale Computing, Communication, and Applications (NanoCoCoA 2021) und zur IEEE International Balkan Conference Communications and Networking (BalkanCom 2022) erhielten wir außerdem einen Preis für das beste Papier und einen Preis für das beste studentische Papier. Wir haben auch Beiträge in Zusammenarbeit mit Partnern an verschiedenen Standorten in Deutschland und im Ausland veröffentlicht (TU Dresden, TU München, FAU Erlangen-Nürnberg, Universität Luxemburg, Michigan State University).

Nachfolgend listen wir alle veröffentlichten Arbeiten auf:

1. W. Haselmayr, A. Springer, G. Fischer, C. Alexiou, H. Boche, P. A. Hoher, F. Dressler und R. Schober, „Integration of Molecular Communications into Future Generation Wireless Networks,“ in *1st 6G Wireless Summit*, Levi, Finland: IEEE, März 2019.
2. F. Bronner und F. Dressler, „Towards Mastering Complex Particle Movement and Tracking in Molecular Communication Simulation,“ in *6th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2019), Poster Session*, Dublin, Ireland: ACM, Sep. 2019, 36:1–36:2.
3. S. Bhattacharjee, M. Damrath, F. Bronner, L. Stratmann, J. P. Drees, F. Dressler und P. A. Hoher, „A Testbed and Simulation Framework for Air-based Molecular Communication using Fluorescein,“ in *7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2020)*, Virtual Conference: ACM, Sep. 2020.

4. J. P. Drees, L. Stratmann, F. Bronner, M. Bartunik, J. Kirchner, H. Unterweger und F. Dressler, „Efficient Simulation of Macroscopic Molecular Communication: The Pogona Simulator,“ in *7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2020)*, Virtual Conference: ACM, Sep. 2020.
5. D. Romanchenko, M. Tartie, B. Que Le, J. Torres Gómez und F. Dressler, „Molecular Communication Channel Modelling in FPGA Technology,“ in *International Conference on Networked Systems (NetSys 2021), Workshop on Nanonetworks and Nanocomputation (WoNaN 2021)*, Virtual Conference: EASST, Sep. 2021.
6. L. Stratmann, J. Torres Gómez, S. Bhattacharjee, M. Damrath, P. A. Hoeher und F. Dressler, „Impact of Mobility on Air-Based Macroscopic Molecular Communication – A Simulation Study,“ in *8th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2021)*, Virtual Conference: ACM, Sep. 2021, 26:1–26:2.
7. J. Torres Gómez, W. Wicke, K. Toledo de la Garza, R. Schober und F. Dressler, „Leader-Follower Dynamics for Diffusion-based Molecular Communication,“ in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2021)*, Madrid, Spain: IEEE, Dez. 2021.
8. J. Torres Gómez, A. Kuestner, K. Pitke, J. Simonjan, B. D. Unluturk und F. Dressler, „A Machine Learning Approach for Abnormality Detection in Blood Vessels via Mobile Nanosensors,“ in *19th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2021), 2nd ACM International Workshop on Nanoscale Computing, Communication, and Applications (NanoCoCoA 2021)*, Coimbra, Portugal: ACM, Nov. 2021, S. 596–602.
9. P. Hofmann, J. Torres Gómez, F. Dressler und F. H. P. Fitzek, „Testbed-based Receiver Optimization for SISO Molecular Communication Channels,“ in *5th IEEE International Balkan Conference Communications and Networking (BalkanCom 2022)*, Sarajevo, Bosnia und Herzegovina: IEEE, Aug. 2022, S. 120–125.
10. F. Güleç, F. Dressler und A. W. Eckford, „Characterization of Airborne Pathogen Transmission in Turbulent Molecular Communication Channels,“ in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2022)*, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, Dez. 2022, S. 4523–4528.
11. J. Torres Gómez, J. L. González Rios und F. Dressler, „Nanosensor Location in the Human Circulatory System based on Electric Circuit Representation of Vessels,“ in *9th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2022)*, Barcelona, Spain: ACM, Okt. 2022.
12. J. Torres Gómez, J. L. González Rios und F. Dressler, „Digital Simulator of the Human Arteries,“ in *European Wireless (EW 2022)*, Dresden, Germany: VDE, Sep. 2022.

13. J. Torres Gómez, A. Kuestner, L. Stratmann und F. Dressler, „Modeling Ultrasonic Channels with Mobility for Gateway to In-Body Nanocommunication,“ in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2022)*, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, Dez. 2022, S. 4535–4540.
14. J. Torres Gómez, P. Hofmann, F. H. P. Fitzek und F. Dressler, „Explainability of Neural Networks for Symbol Detection in Molecular Communication Channels,“ in *7th Workshop on Molecular Communications (WMC 2023)*, Erlangen, Germany, Apr. 2023.

2.6.5 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften

Wir haben insgesamt 7 Beiträge in den wichtigsten Fachzeitschriften und Sonderausgaben auf dem Gebiet der Molekularforschung veröffentlicht, darunter IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC), IEEE Transactions on Nanotechnology (TNANO), IEEE Communications Magazine und Elsevier Digital Signal Processing. Wir haben die in Konferenzen veröffentlichten Beiträge erweitert und uns auch mit dem Konzept des Informationszeitalters im molekularen Bereich befasst.

Die vollständige Liste lautet wie folgt:

1. M. Schurwanz, P. A. Hoher, S. Bhattacharjee, M. Damrath, L. Stratmann und F. Dressler, „Infectious Disease Transmission via Aerosol Propagation from a Molecular Communication Perspective: Shannon Meets Coronavirus,“ *IEEE Communications Magazine (COMMAG), Special Issue on Nano-Networking for Nano-, Micro- and Macro-Scale Applications*, Jg. 59, Nr. 5, S. 40–46, Mai 2021.
2. L. Stratmann, J. P. Drees, F. Bronner und F. Dressler, „Using Vector Fields for Efficient Simulation of Macroscopic Molecular Communication,“ *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC), Special Section - Advances in Molecular Communication*, Jg. 7, Nr. 2, S. 73–77, Juni 2021.
3. M. Schurwanz, P. A. Hoher, S. Bhattacharjee, M. Damrath, L. Stratmann und F. Dressler, „Duality between Coronavirus Transmission and Air-based Macroscopic Molecular Communication,“ *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC), Infectious Diseases Special Issue*, Jg. 7, Nr. 3, S. 200–208, Sep. 2021.
4. J. Torres Gómez, K. Pitke, L. Stratmann und F. Dressler, „Age of Information in Molecular Communication Channels,“ *Elsevier Digital Signal Processing (DSP), Special Issue on Molecular Communication*, Jg. 124, S. 103–108, Mai 2022.
5. F. Güleç, B. Atakan und F. Dressler, „Mobile Human Ad Hoc Networks: A Communication Engineering Viewpoint on Interhuman Airborne Pathogen Transmission,“ *Elsevier Nano Communication Networks*, Jg. 32–33, S. 100–410, Juni 2022.

6. J. Torres Gómez, A. Kuestner, J. Simonjan, B. D. Unluturk und F. Dressler, „Nanosensor Location Estimation in the Human Circulatory System using Machine Learning,“ *IEEE Transactions on Nanotechnology (TNANO)*, Jg. 21, S. 663–673, Okt. 2022.
7. S. Bhattacharjee, M. Damrath, L. Stratmann, P. A. Hoher und F. Dressler, „Digital Communication Techniques in Macroscopic Air-Based Molecular Communication,“ *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC)*, Jg. 8, Nr. 4, S. 276–291, Dez. 2022.

Literatur

- [1] 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, Juli 2019.
- [2] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, I. Demirkol, N. Farsad und A. Goldsmith, „A Survey on Modulation Techniques in Molecular Communication via Diffusion,“ *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Jg. 23, Nr. 1, S. 7–28, Jan. 2021.
- [3] Y. Jian, B. Krishnaswamy, C. M. Austin, A. O. Bicen, J. E. Perdomo, S. C. Patel, I. F. Akyildiz, C. R. Forest und R. Sivakumar, „nanoNS3: Simulating Bacterial Molecular Communication Based Nanonetworks in Network Simulator 3,“ in *3rd ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2016)*, New York City, NY: ACM, Sep. 2016, 17:1–17:7.
- [4] L. Felicetti, M. Femminella und G. Reali, „Simulation of molecular signaling in blood vessels: Software design and application to atherogenesis,“ *Elsevier Nano Communication Networks*, Jg. 4, Nr. 3, S. 98–119, Sep. 2013.
- [5] A. Noel, K. C. Cheung, R. Schober, D. Makrakis und A. Hafid, „Simulating with AcCoRD: Actor-based Communication via Reaction–Diffusion,“ *Elsevier Nano Communication Networks*, Jg. 11, S. 44–75, März 2017.
- [6] F. Bronner und F. Dressler, „Towards Mastering Complex Particle Movement and Tracking in Molecular Communication Simulation,“ in *6th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2019), Poster Session*, Dublin, Ireland: ACM, Sep. 2019, 36:1–36:2.
- [7] M. Kuscu, E. Dinc, B. A. Bilgin, H. Ramezani und O. B. Akan, „Transmitter and Receiver Architectures for Molecular Communications: A Survey on Physical Design With Modulation, Coding, and Detection Techniques,“ *Proceedings of the IEEE*, Jg. 107, Nr. 7, S. 1302–1341, Juli 2019.
- [8] C. A. Soldner, E. Socher, V. Jamali, W. Wicke, A. Ahmadzadeh, H.-G. Breitinger, A. Burkowski, K. Castiglione, R. Schober und H. Sticht, „A Survey of Biological Building Blocks for Synthetic Molecular Communication Systems,“ *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Jg. 22, Nr. 4, S. 2765–2800, 2020.
- [9] C. Lee, B.-H. Koo und C.-B. Chae, „Demo: In-Vessel Molecular MIMO Communications,“ in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Seoul, South Korea: IEEE, Apr. 2020.

- [10] J. P. Drees, L. Stratmann, F. Bronner, M. Bartunik, J. Kirchner, H. Unterweger und F. Dressler, „Efficient Simulation of Macroscopic Molecular Communication: The Pogona Simulator,“ in *7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2020)*, Virtual Conference: ACM, Sep. 2020.
- [11] L. Stratmann, J. P. Drees, F. Bronner und F. Dressler, „Using Vector Fields for Efficient Simulation of Macroscopic Molecular Communication,“ *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC), Special Section - Advances in Molecular Communication*, Jg. 7, Nr. 2, S. 73–77, Juni 2021.
- [12] R. Geyer, M. Stelzner, F. Büther und S. Ebers, „BloodVoyagerS: Simulation of the Work Environment of Medical Nanobots,“ in *5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2018)*, Reykjavík, Iceland: ACM, Sep. 2018, 5:1–5:6.
- [13] J. Torres Gómez, J. L. González Rios und F. Dressler, „Digital Simulator of the Human Arteries,“ in *European Wireless (EW 2022)*, Dresden, Germany: VDE, Sep. 2022.
- [14] J. Torres Gómez, R. Wendt, A. Kuestner, K. Pitke, L. Stratmann und F. Dressler, „Markov Model for the Flow of Nanobots in the Human Circulatory System,“ in *8th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2021)*, Virtual Conference: ACM, Sep. 2021, 5:1–5:7.
- [15] S. Bhattacharjee, M. Damrath, L. Stratmann, P. A. Hoher und F. Dressler, „Digital Communication Techniques in Macroscopic Air-Based Molecular Communication,“ *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC)*, Jg. 8, Nr. 4, S. 276–291, Dez. 2022.
- [16] P. Hofmann, J. Torres Gómez, F. Dressler und F. H. P. Fitzek, „Testbed-based Receiver Optimization for SISO Molecular Communication Channels,“ in *5th IEEE International Balkan Conference Communications and Networking (BalkanCom 2022)*, Sarajevo, Bosnia und Herzegovina: IEEE, Aug. 2022, S. 120–125.
- [17] J. Torres Gómez, P. Hofmann, F. H. P. Fitzek und F. Dressler, „Explainability of Neural Networks for Symbol Detection in Molecular Communication Channels,“ in *7th Workshop on Molecular Communications (WMC 2023)*, Erlangen, Germany, Apr. 2023.
- [18] S. Bhattacharjee, M. Damrath, F. Bronner, L. Stratmann, J. P. Drees, F. Dressler und P. A. Hoher, „A Testbed and Simulation Framework for Air-based Molecular Communication using Fluorescein,“ in *7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2020)*, Virtual Conference: ACM, Sep. 2020.
- [19] M. Schurwanz, P. A. Hoher, S. Bhattacharjee, M. Damrath, L. Stratmann und F. Dressler, „Infectious Disease Transmission via Aerosol Propagation from a Molecular Communication Perspective: Shannon Meets Coronavirus,“ *IEEE Communications Magazine (COMMAG), Special Issue on Nano-Networking for Nano-, Micro- and Macro-Scale Applications*, Jg. 59, Nr. 5, S. 40–46, Mai 2021.

- [20] M. Schurwanz, P. A. Hoher, S. Bhattacharjee, M. Damrath, L. Stratmann und F. Dressler, „Duality between Coronavirus Transmission and Air-based Macroscopic Molecular Communication,“ *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications (T-MBMC), Infectious Diseases Special Issue*, Jg. 7, Nr. 3, S. 200–208, Sep. 2021.
- [21] H. Messaoudi, „Medium Access Control in Macroscopic Molecular Communication,“ Bachelor Thesis, Telecommunication Networks Group, Berlin, Germany, Dez. 2022.
- [22] R. C. Pampu, „Identification of the Signal Source among Multiple Simultaneous Senders in an Air-based Molecular Communication Channel,“ Bachelor Thesis, Telecommunication Networks Group, Berlin, Germany, Jan. 2023.
- [23] D. Romanchenko, M. Tartie, B. Que Le, J. Torres Gómez und F. Dressler, „Molecular Communication Channel Modelling in FPGA Technology,“ in *International Conference on Networked Systems (NetSys 2021), Workshop on Nanonetworks and Nanocomputation (WoNaN 2021)*, Virtual Conference: EASST, Sep. 2021.
- [24] S. Omar, „Macroscopic Molecular Communication Networks – Extending the Configuration System of the Pogona Simulator for Improved Mobility,“ Bachelor Thesis, Telecommunication Networks Group, Berlin, Germany, Juni 2022.
- [25] J. S. Burggraf, „Modeling and Simulating Chemotaxis Bacteria Networks in MATLAB,“ Bachelor’s Thesis, School of Electrical Engineering und Computer Science (EECS), Berlin, Germany, Juli 2022.
- [26] M. Tartié, „Modelling the Human Circulatory System with Electric Circuits,“ Bachelor Thesis, School of Electrical Engineering und Computer Science (EECS), Berlin, Germany, März 2022.
- [27] A. Mhrok, „Abnormality Detection in Blood Vessels via Mobile Nanosensors,“ Bachelor Thesis, School of Electrical Engineering und Computer Science (EECS), Berlin, Germany, Jan. 2023.
- [28] W. Haselmayr, A. Springer, G. Fischer, C. Alexiou, H. Boche, P. A. Hoher, F. Dressler und R. Schober, „Integration of Molecular Communications into Future Generation Wireless Networks,“ in *1st 6G Wireless Summit*, Levi, Finland: IEEE, März 2019.
- [29] L. Stratmann, J. Torres Gómez, S. Bhattacharjee, M. Damrath, P. A. Hoher und F. Dressler, „Impact of Mobility on Air-Based Macroscopic Molecular Communication – A Simulation Study,“ in *8th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2021)*, Virtual Conference: ACM, Sep. 2021, 26:1–26:2.
- [30] J. Torres Gómez, W. Wicke, K. Toledo de la Garza, R. Schober und F. Dressler, „Leader-Follower Dynamics for Diffusion-based Molecular Communication,“ in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2021)*, Madrid, Spain: IEEE, Dez. 2021.

- [31] J. Torres Gómez, A. Kuestner, K. Pitke, J. Simonjan, B. D. Unluturk und F. Dressler, „A Machine Learning Approach for Abnormality Detection in Blood Vessels via Mobile Nanosensors,“ in *19th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SensSys 2021), 2nd ACM International Workshop on Nanoscale Computing, Communication, and Applications (NanoCoCoA 2021)*, Coimbra, Portugal: ACM, Nov. 2021, S. 596–602.
- [32] F. Güleç, F. Dressler und A. W. Eckford, „Characterization of Airborne Pathogen Transmission in Turbulent Molecular Communication Channels,“ in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2022)*, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, Dez. 2022, S. 4523–4528.
- [33] J. Torres Gómez, J. L. González Rios und F. Dressler, „Nanosensor Location in the Human Circulatory System based on Electric Circuit Representation of Vessels,“ in *9th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM 2022)*, Barcelona, Spain: ACM, Okt. 2022.
- [34] J. Torres Gómez, A. Kuestner, L. Stratmann und F. Dressler, „Modeling Ultrasonic Channels with Mobility for Gateway to In-Body Nanocommunication,“ in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2022)*, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, Dez. 2022, S. 4535–4540.
- [35] J. Torres Gómez, K. Pitke, L. Stratmann und F. Dressler, „Age of Information in Molecular Communication Channels,“ *Elsevier Digital Signal Processing (DSP), Special Issue on Molecular Communication*, Jg. 124, S. 103 108, Mai 2022.
- [36] F. Güleç, B. Atakan und F. Dressler, „Mobile Human Ad Hoc Networks: A Communication Engineering Viewpoint on Interhuman Airborne Pathogen Transmission,“ *Elsevier Nano Communication Networks*, Jg. 32-33, S. 100 410, Juni 2022.
- [37] J. Torres Gómez, A. Kuestner, J. Simonjan, B. D. Unluturk und F. Dressler, „Nanosensor Location Estimation in the Human Circulatory System using Machine Learning,“ *IEEE Transactions on Nanotechnology (TNANO)*, Jg. 21, S. 663–673, Okt. 2022.