

# 1 Einleitung

Die Suche nach immer neuen Erkenntnissen über die Natur im Allgemeinen und über die Vorgänge des Lebens im Besonderen hat dazu geführt, dass zu Beginn des 21. Jahrhunderts wesentliche biochemische Vorgänge im Organismus bekannt sind. Dieses Wissen hat dem Menschen zahlreiche Innovationen im Bereich der Medizin beschert und so entscheidend zur Erhöhung seiner Lebenserwartung beigetragen. Es bildet zudem die Grundlage neuer biotechnologischer Verfahren, die eine zunehmend größere Rolle für die Ernährung, wirtschaftliche Entwicklung und das Wohlergehen einer stark anwachsenden Menschheit spielen.

## Bioanalytik

Diese Erfolge bei der Entschlüsselung der Vorgänge des Lebens und der damit verbundenen Innovationen zum Wohle des Menschen wären ohne die Beiträge vieler natur- und ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen zu neuen bioanalytischen Methoden nicht möglich gewesen. Die heutige Bioanalytik umfasst einen weiten Bereich unterschiedlichster Verfahren [1], um Einblick in die biochemischen Vorgänge innerhalb einer Zelle, der grundlegenden Organisationseinheit allen Lebens, zu gewinnen. Dazu gehören sowohl Trennmethode wie die Chromatographie [2] und die Elektrophorese [3], um die einzelnen Bestandteile der Zelle zu extrahieren, als auch strukturbestimmende Methoden wie die Röntgenstrukturanalyse [4] und die auf Kernspinresonanz (engl. *nuclear magnetic resonance* - *NMR*) basierende Spektroskopie [5]. So entdeckten *Watson* und *Crick* im Jahre 1953 die Doppelhelixstruktur der Desoxyribonukleinsäure (engl. *desoxyribonucleic acid* - *DNA*) mit Hilfe der kristallografischen Methode der Röntgenstrukturanalyse [6]. Damit konnte erstmals geklärt werden, auf welche Weise die genetische Information eines Lebewesens in der Abfolge der Basenpaare Adenin-Thymin und Cytosin-Guanin gespeichert und weitergegeben werden. Während zu Beginn des letzten Jahrhunderts Biologie, Chemie, Physik und die damaligen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen weitgehend getrennte Wissensbereiche darstellten, sind moderne hochentwickelte bioanalytische Verfahren, wie die Kernspinresonanzspektroskopie, ohne eine interdisziplinäre Zusammenarbeit nicht vorstellbar.

Zunehmend wichtig werden Analyseverfahren, die es erlauben, die Abfolge der Basenpaare im DNA-Molekül oder der dadurch kodierten Aminosäuren in den Proteinen zu ermitteln. Die Identifikation einer bekannten Sequenz in einer unbekannt Probe erfolgt beispielsweise mit Hilfe einer Hybridisierungsreaktion zwischen Testsubstanz und Probe. Dabei wird untersucht, ob sich ein einzelner DNA-Strang an eine kurze, synthetische DNA-Sequenz anlagern kann, was nur möglich ist, wenn die Testsequenz komplementär in der zu untersuchenden DNA-Probe vorkommt. Mittlerweile ist es im Rahmen des Human-Genom-Projektes [7] gelungen, durch geeignete bioanalytische Verfahren das menschliche Erbgut vollständig zu sequenzieren.

Die daraus gewonnenen Daten lassen das Verständnis und eine bessere Behandlung zahlreicher Erbkrankheiten erwarten.

Sowohl für die weitere Erforschung des genetischen Codes, als auch für die zukünftige Anwendung von Gentests in der medizinischen Praxis ist es zwingend erforderlich, dass der Nachweis von Gensequenzen schnell, zuverlässig und kostengünstig erfolgt. Der Einsatz von sogenannten Biochips ermöglicht bereits heute die gleichzeitige Durchführung von mehreren zehntausend Nachweisreaktionen auf einem Substrat von der Größe eines Objektträgers für mikroskopische Untersuchungen [8, 9]. Üblicherweise erfolgt das Auslesen des Ausgangs der Hybridisierungsreaktion mit optischen Methoden [10, 11]. Die Probe wird beispielsweise durch einen fluoreszenten Farbstoff, radioaktiv oder auch durch Nanopartikel markiert und hinterlässt überall dort auf dem Biochip ein Signal, wo eine Hybridisierung mit der verankerten Testsubstanz erfolgt ist. Ein alternatives Verfahren basiert auf der Messung der Leitfähigkeit der Testspots. Auch hier ist jedoch eine Markierung der Probe mit Enzymen erforderlich [12].

Gegenstand aktueller angewandter biotechnologischer Forschung und Entwicklung ist die Realisierung von Gentests, die ohne eine fluoreszente oder auch andersartige Markierung auskommen, da diese die Zuverlässigkeit der Gentests herabsetzt und außerdem aufwändig und teuer ist [13]. Hierzu wurden bereits verschiedene optische Verfahren, wie die reflektometrische Interferenzspektroskopie [14, 15] oder die Methode der Oberflächenplasmonenresonanz [16, 17] demonstriert, aber auch mikromechanische Verfahren, bei denen nanotechnologisch hergestellte Kragbalken mit der Testsubstanz beaufschlagt werden und je nach Hybridisierungsgrad in Folge der Reaktion ihre Resonanzfrequenz verändern [18].

Schon heute stellt der Einsatz von Biochips in der biologischen Forschung, der Diagnostik und in anderen Anwendungsbereichen wie der Toxikologie, der Forensik, der Landwirtschaft und dem Militär einen bedeutenden Markt mit weltweit mehreren Milliarden US-Dollar Umsatz dar [11]. Wie Bild 1.1 am Beispiel des US-amerikanischen Marktes zeigt, wird der Branche ein starkes Wachstum prognostiziert, das durch neue Innovationen im Bereich der markerfreien Verfahren nochmals gesteigert werden könnte.

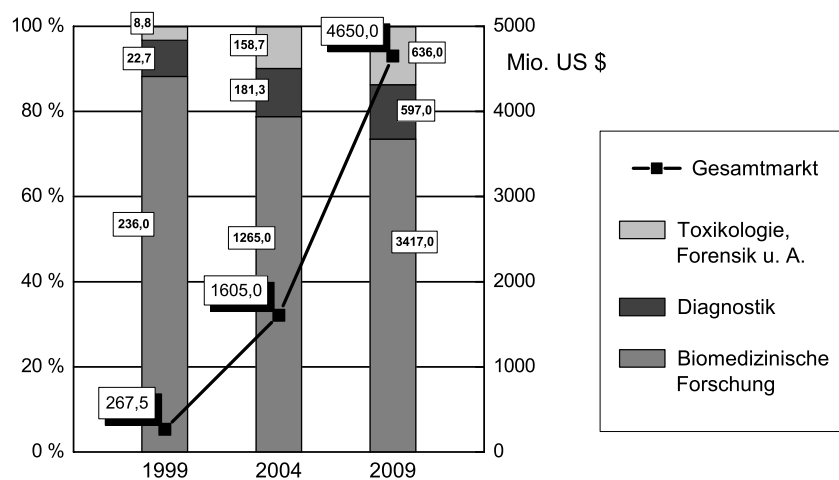


Bild 1.1: Prognostizierte Entwicklung des Biochipmarktes in den Vereinigten Staaten von Amerika [19].

## Physikalische Eigenschaften von Biomolekülen

Aktuelle, mehr grundlagenorientierte Untersuchungen an Biomolekülen haben zum Ziel, nach wie vor unbekannte physikalische Eigenschaften wie die intrinsische Leitfähigkeit oder die molekulare Dynamik der überwiegend sehr komplexen und oft in komplizierte, intermolekulare Netzwerke eingebundenen biologischen Moleküle aufzuklären. Diese Grundlagenforschung könnte den Weg hin zu zukünftigen, leistungsfähigen markerfreien Detektionsverfahren weisen. Weiterhin besteht die Vision, die Fähigkeit von Biomolekülen zur Selbstorganisation technologisch zu nutzen [20, 21]. Biologische Strukturen weisen zwei fundamentale Eigenschaften auf, die sie herkömmlicher Technologie überlegen machen könnten: die Selbsterkennung, mit der spezifische Bindungsstellen lokalisiert werden, und die anschließende Selbstassemblierung oder Eigenmontage. So wird über die Möglichkeit selbstassemblierter Schaltungen auf Basis von DNA nachgedacht. DNA-Stränge könnten entweder direkt leitende Verbindungen bilden oder als sogenanntes Template für eine Metallisierung dienen. Vorstellbar ist auch, eines Tages die Zusammenlagerung von DNA für die Ausführung komplexer Rechenoperationen zu nutzen oder neuronale Netze mit herkömmlicher auf Silizium basierender Elektronik zu verbinden.

Vor diesem Hintergrund zukünftiger Anwendungen werden in dieser Arbeit die dynamischen Eigenschaften und die Leitfähigkeit ausgewählter Biomoleküle mit dem Ziel untersucht, neben dem Gewinn von grundlegenden Erkenntnissen auch Vorarbeiten für die Entwicklung eines neuen Verfahrens der markerfreien Analyse von Biomolekülen zu leisten.

## Intrinsische Leitfähigkeit von DNA

In der Literatur verfügbare Untersuchungen zum Ladungsträgertransport entlang von DNA-Molekülen zeigen eine Vielzahl unterschiedlicher Ergebnisse, die je nach Art der untersuchten Probe und der experimentellen Bedingungen stark variieren [22]. Untersucht wurde sowohl künstlich synthetisierte DNA als auch natürlich vorkommende Erbsubstanz unterschiedlicher Länge. Die Leitfähigkeitsmessungen wurden unter den unterschiedlichsten experimentellen Bedingungen durchgeführt. Unter anderem wurde aufgetropfte DNA auf Nanokontakten untersucht [23, 24]. Um die schwer abschätzbaren Einflüsse der DNA-Kontaktierung zu eliminieren, wurden neben Gleichstrommessungen auch Hochfrequenzmessungen durchgeführt, indem die Verluste eines mit DNA gefüllten Hohlraumresonators bestimmt wurden [25]. Die Ergebnisse der vielfältigen Studien reichen von isolierendem über halbleitendes Verhalten bis hin zur Beobachtung ohmscher oder sogar metallischer Leitfähigkeit.

Die Leitfähigkeitsmessungen in dieser Arbeit beschränken sich auf die Untersuchung von DNA auf Nanokontakten [26, 27]. Die Kenntnis der Eigenschaften von ungeordneter, aufgetropfter DNA sind von großer Bedeutung für zukünftige Anwendungen, bei denen auf eine aufwändige Probenpräparation verzichtet werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss Druck, Temperatur, Gaszusammensetzung und Feuchtegehalt der umgebenden Atmosphäre auf die Leitfähigkeit ungeordneter DNA haben. Zu diesem Zweck wurde ein Messplatz zur Bestimmung der Strom-Spannungskennlinie unter definierten atmosphärischen Bedingungen aufgebaut. Damit konnte gezeigt werden [28], dass unter Normalatmosphäre die Leitfähigkeit in biologischen Proben von angelagerten Wassermolekülen dominiert wird.

## Terahertz-Spektroskopie an Biomolekülen

Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt auf der Untersuchung der dynamischen Eigenschaften der Biomoleküle im ferninfraroten Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums. Strukturelle Informationen über den Aufbau der Moleküle und die Kräfte, die zur Ausbildung eines intermolekularen Netzwerkes führen, spiegeln sich im Absorptionsspektrum wider [29]. Während Spektroskopie im Bereich des sichtbaren Lichtes (eng. *visible* - VIS) und des ultravioletten Lichtes (engl. *ultraviolet* - UV) Informationen über die elektronischen Energieniveaus der Materie liefert, sind Deformations- und Streckerschwingungen der Moleküle bei niedrigeren Frequenzen angesiedelt. Stark lokalisierte Streck- und Biegeschwingungen individueller Atome liegen vorwiegend im nahen und mittleren Infrarotbereich (engl. *near infrared* - NIR und *middle infrared* - MIR). Handelt es sich um delokalisierte Schwingungen ganzer Atomgruppen oder um die phononenartige Schwingung der Moleküle untereinander, so liegen die zugehörigen Absorptionslinien bei noch größeren Wellenlängen. Bei den oft recht großen und durch schwache Wasserstoffbrücken untereinander gebundenen Biomolekülen liegen diese Resonanzen im fernen Infrarotbereich [30] (engl. *far infrared* - FIR), der auch als THz-Bereich bezeichnet wird.

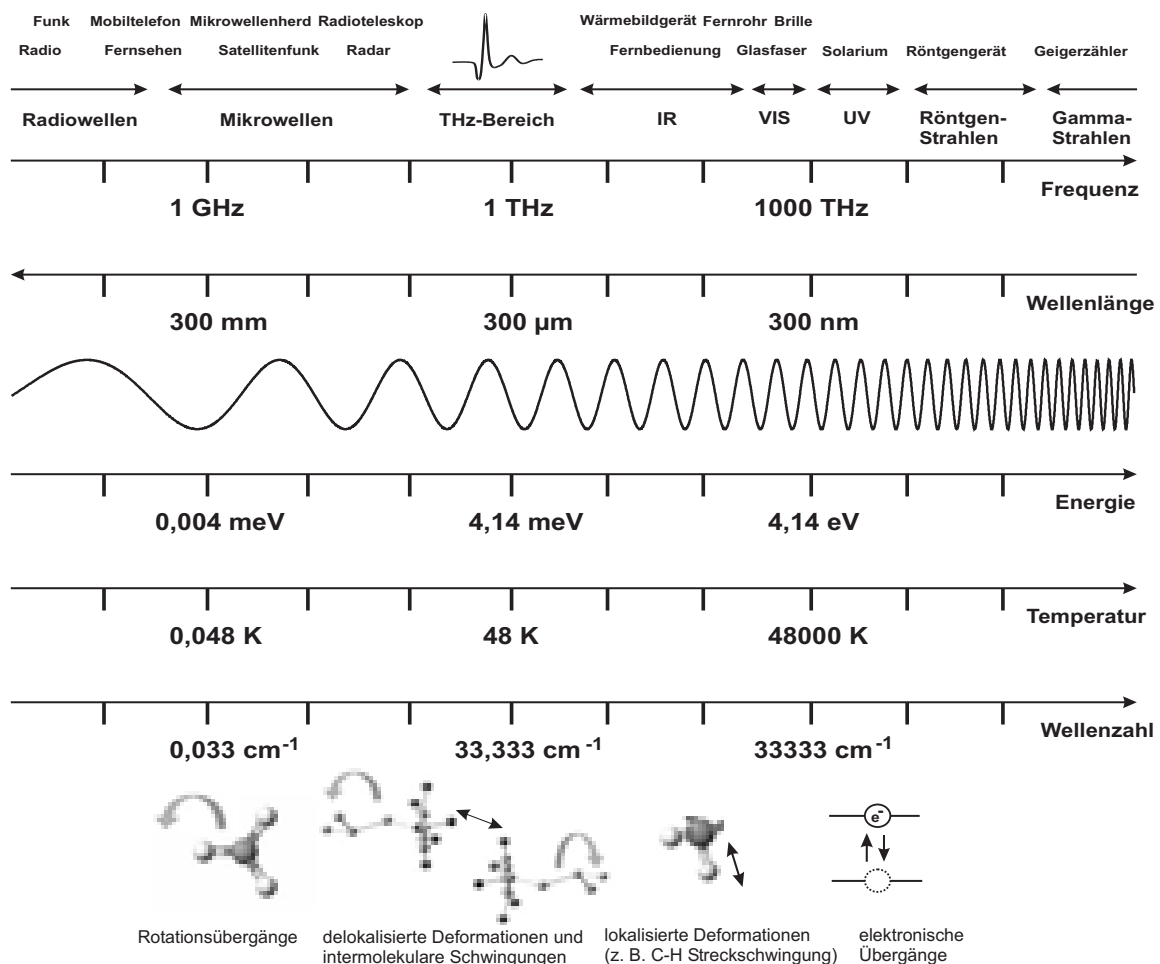


Bild 1.2: Einordnung der THz-Strahlung in das elektromagnetische Spektrum anhand der Skalen Frequenz, Wellenlänge, Energie, Temperatur und Wellenzahl. Exemplarisch werden einige Bereiche genannt, in denen elektromagnetische Strahlung eine Rolle spielt. Zusätzlich sind die Absorptionsmechanismen angedeutet.

Dieser Frequenzbereich liegt, wie aus Bild 1.2 ersichtlich ist, im Spektrum zwischen dem Bereich der Mikrowellen und dem des Lichtes und erstreckt sich von wenigen hundert GHz bis hin zu einigen THz<sup>1</sup>. Die Nutzung der THz-Strahlen (engl. *T-Rays*) für spektroskopische oder andere Anwendungen gestaltete sich aufgrund des Mangels an spektral reinen Strahlungsquellen mit genügend hoher Abstrahlleistung lange Zeit sehr schwierig. Erste spektroskopische Untersuchungen im FIR-Spektralbereich wurden jedoch bereits in den sechziger Jahren mit FTIR-Spektrometern durchgeführt [31] (engl. *Fourier transform infrared - FTIR*), bei denen die Probe mit dem inkohärenten Licht einer breitbandigen Strahlungsquelle durchleuchtet wird, das anschließend in einem Interferometer spektral analysiert wird [32]. Auf diese Weise wurden zwar Messungen bis herab zu wenigen 100 GHz durchgeführt, jedoch mit geringem Signal-zu-Rauschabstand unterhalb von etwa 2 THz. Da im FTIR-Spektrometer nur die spektrale Intensität gemessen wird, kann nur der Absorptionskoeffizient direkt bestimmt werden. Der Brechungsindex muss indirekt mit Hilfe der Kramers-Kronig-Relationen<sup>2</sup> [33] bestimmt werden.

Seit dem Aufkommen der THz-Zeitbereichsspektroskopie besteht erstmals die Möglichkeit, Absorption und Brechungsindex zwischen 100 GHz und wenigen THz mit hohem Signal-zu-Rauschabstand direkt zu bestimmen. Dabei werden mit ultrakurzen Laserimpulsen Strahlungsimpulse generiert, deren Spektrum sich über den THz-Bereich erstreckt. Erstmals gelang es *Auston* im Jahre 1984 ultrakurze Strompulse in einer photoleitenden Antenne zu generieren, die als Quelle für THz-Impulse fungieren [34]. Die Entwicklung eines ersten praktikablen THz-Spektrometers erfolgte 1989 durch *Grischkowsky* [35]. Mittlerweile existieren zahlreiche Varianten solcher THz-Spektrometer, in denen die THz-Impulse entweder in photoleitenden Halbleiterantennen oder in nicht-linearen Kristallen generiert und detektiert werden. Alle diese Varianten basieren auf dem Anrege-Abfrage-Prinzip (engl. *pump and probe*), bei dem der THz-Impuls, der viel zu schnell für eine direkte elektronische Detektion ist, am Detektor durch einen Laserimpuls mit variabler Zeitverzögerung abgetastet wird. Damit wurden bisher zahlreiche Materialeigenschaften untersucht. Beispiele dafür sind die Verlustmechanismen in Dielektrika [36], die Charakterisierung von Halbleitern [37] und Supraleitern [38] oder auch die Messung der Rotationsspektren einiger Moleküle in der Gasphase [39]. Auch biologische Proben wurden untersucht. Bisherige spektroskopische Studien umfassen Untersuchungen an DNA- und RNA-Fragmenten [40, 41, 42, 43], Zuckern [44], Benzoe- und Salizylsäure [45] und einigen funktionellen Molekülen wie Retinal [46]. Neben den grundlagenorientierten spektroskopischen Untersuchungen gewinnen immer mehr andere Anwendungsfelder der THz-Technik an Bedeutung. *Hu* und *Nuss* demonstrierten 1995 das erste bildgebende THz-Spektrometer [47]. Seitdem wurden zahlreiche, zum Teil auch auf anderen THz-Quellen beruhende Anwendungen der THz-Technik demonstriert, die von Personenkontrollen an Flughäfen [48] über die Fertigungskontrolle von Industrieprodukten [49] bis hin zur Detektion von Hautkrebs [50] reichen.

Für zukünftige bioanalytische Anwendungen interessant ist die Demonstration eines markerfreien Gentests mit leitungsgebundenen THz-Impulsen. *Nagel et al.* konnten den Unterschied zwischen einzel- und doppelsträngiger DNA auf einem Chip nachweisen [51]. Dazu wurden die

---

<sup>1</sup>Bei einer Frequenz  $f$  berechnet sich die Wellenlänge  $\lambda$  im Vakuum zu  $\frac{c_0}{f}$ , die Energie zu  $h \cdot f$  und die Wellenzahl zu  $\frac{1}{\lambda}$ . Der Photonenenergie lässt sich über  $\frac{h \cdot f}{k_B}$  eine Temperatur zuordnen. Dabei ist  $c_0$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit,  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $k_B$  die Boltzmannkonstante.

<sup>2</sup>benannt nach *H. A. Kramers* (1894-1952) und *R. Kronig* (1904-1995)

Proben auf ein Filter aufgetropft, dessen Transmissionscharakteristik gemessen wurde, indem auf dem Chip THz-Impulse in einem Spalt angeregt und hinter dem Filter elektrooptisch detektiert wurden. Diese gepulste Variante hat den Nachteil, sehr aufwendig und teuer zu sein, da zur Generation der Laserpulse ein Femtosekundenlaser erforderlich ist, was einer Kommerzialisierung eines markerfreien Gentests im Wege steht. Ein Spektrometer auf Basis kontinuierlicher (engl. *continuous wave* - *cw*) THz-Strahlung wäre um eine Größenordnung kostengünstiger. *Brown* konnte im Jahre 1995 erstmals von der Erzeugung von THz-Dauerstrichstrahlung durch Photomischung zweier Laserquellen berichten, deren spektraler Modenabstand auf die Frequenz der zu erzeugenden THz-Strahlung eingestellt wurde [52]. Mittlerweile wurde auch die bildgebende Spektroskopie mit kontinuierlicher THz-Strahlung demonstriert [53].

Ziel dieser Arbeit ist einerseits die Untersuchung des dynamischen Verhaltens verschiedener Biomoleküle mittels gepulster THz-Strahlung. Andererseits werden Vorarbeiten für die markerfreie Detektion mit gepulster und kontinuierlicher THz-Strahlung durchgeführt, deren langfristiges Ziel ein markerfreier, kosteneffizienter Gentest ist.

## Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt. Nach dieser Einleitung werden im zweiten Kapitel die Eigenschaften biologischer Moleküle diskutiert, sofern sie für die Leitfähigkeitsuntersuchungen und die THz-Spektroskopie relevant sind. Dabei wird zunächst auf den Aufbau der DNA und der Peptide eingegangen, die in dieser Arbeit näher untersucht werden. Dann werden Leitfähigkeitsmechanismen und Schwingungsspektren behandelt. Das Kapitel endet mit einer Betrachtung computerchemischer Verfahren, insbesondere der Dichtefunktionaltheorie, die zur Berechnung der Absorptionsspektren der untersuchten Peptide dient. In Kapitel drei werden die Grundlagen der mess- und analysetechnischen Verfahren abgehandelt. Zunächst werden die wesentlichen bioanalytischen Verfahren vorgestellt, um dann auf die für diese Arbeit besonders relevanten Leitfähigkeitsuntersuchungen einzugehen. Anschließend wird die THz-Spektroskopie ausführlich diskutiert, gefolgt von der On-Chip-Analyse und der Momentenmethode, die für die Entwicklung effizienter Filterstrukturen eingesetzt wird. Die Ergebnisse der Leitfähigkeitsuntersuchungen sind in Kapitel vier dargestellt. Zuerst wird der dazu entwickelte Aufbau vorgestellt, dann werden die Messungen diskutiert. Im fünften Kapitel wird die Spektroskopie an Biomolekülen mit gepulster THz-Strahlung behandelt. Zunächst werden die dazu erforderlichen Aufbauten und dann unterschiedliche Arten der Probenpräparation beschrieben. Anschließend werden Ergebnisse zur orts aufgelösten Detektion vorgestellt. Danach werden Absorptionsspektren von Biomolekülen gezeigt und mit Rechnungen verglichen. Das Kapitel endet mit dem Entwurf effizienter Filterstrukturen für die On-Chip-Analyse. In Kapitel sechs werden Arbeiten zur Realisierung eines kosteneffizienten Spektrometers auf Basis kontinuierlicher THz-Strahlung vorgestellt. Beschrieben wird der Aufbau und die Stabilisierung einer zweifarbig Laserquelle für die Photomischung, erste Ergebnisse mit einfachen Freistrahl-spektrometern und der Entwurf effizienter Photomischer. Die Ergebnisse der Dissertation werden in Kapitel sieben zusammenfassend dargestellt. Weiterhin wird ein Ausblick auf die weitere Entwicklung der hier vorgestellten markerfreien Analytik gegeben. Im Anhang der Arbeit befinden sich für die Auswertung der Messergebnisse erforderliche Herleitungen.

## 2 Eigenschaften biologischer Moleküle

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften biologischer Moleküle behandelt, sofern sie für die Entwicklung neuartiger markerfreier Detektionsverfahren relevant sind. Die bioanalytisch untersuchten Moleküle sind zumeist Bestandteile der Zellen, aus denen alle Organismen aufgebaut sind. Dementsprechend wird zunächst auf den prinzipiellen Aufbau von Zellen und deren Bestandteile eingegangen, bevor die in dieser Arbeit näher untersuchten Moleküle und deren physikalischen Eigenschaften vorgestellt werden. Vor diesem Hintergrund werden Leitfähigkeitsmechanismen und resonantes Absorptionsverhalten diskutiert. Mit der Dichtefunktionaltheorie wird ein computerchemisches Verfahren vorgestellt, das eine Vorhersage der Schwingungsspektren erlaubt.

### 2.1 Zellaufbau und -funktion

Die Zelle ist die grundlegende, strukturelle und funktionelle Einheit aller Organismen [54, 55, 56]. Sie enthält alle für Wachstum und Reproduktion des Lebewesens erforderlichen Informationen. Während einige einfache Lebewesen aus nur einer einzigen Zelle bestehen (Einzeller), können höher entwickelte Organismen (Mehrzeller) wie der Mensch aus bis zu  $10^{14}$  Zellen bestehen. Die Größe einer typische Zelle liegt im Bereich von  $1 - 100 \mu\text{m}$ . Prinzipiell wird zwischen prokaryotischen und eukaryotischen Zellen unterschieden. Prokaryoten (Bakterien und Achaebakterien) besitzen keinen Zellkern, wogegen Eukaryoten (Tiere, Pflanzen, Pilze und Protisten) einen klar definierten Zellkern aufweisen.

Bild 2.1 zeigt den Aufbau und die Bestandteile einer typischen eukaryotischen Zelle [57]. Die Zelle wird von einer nur etwa  $6 - 10 \text{ nm}$  dicken Zellmembran gegen Nachbarzellen abgegrenzt. Pflanzliche Zellen haben zusätzlich eine umhüllende Zellwand aus Zellulosefibrillen, die in eine Kohlenhydratmatrix eingebettet sind und der Zelle eine zusätzliche Formstabilität

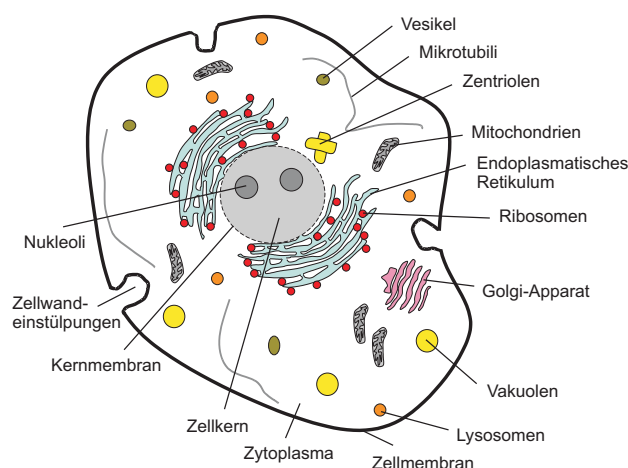


Bild 2.1: Aufbau einer typischen eukaryotischen Zelle.

verleiht. Nichtpflanzliche Zellen verdanken ihre Stabilität dagegen einem Cytoskelett aus Mikrotubuli, kleinen Röhren mit 15 bis 25 nm Durchmesser, die aus Proteinfasern gebildet werden. Die Biomembran besteht aus einer Doppellipidschicht, deren hydrophile Seite zur wässrigen Umgebung hin ausgerichtet ist. Im Lipidfilm befinden sich Proteinstrukturen, die in Form von Transportkanälen und Ionenpumpen für den Austausch zwischen Extrazellulärraum und dem Zytoplasma im Inneren der Zelle sorgen. Die meisten Zellen besitzen eine elektrochemische Potentialdifferenz zwischen Zellinnerem und Außenraum. Der Transport lebenswichtiger Ionen oder Proteine erfolgt dann unter Umsetzung des zellulären Energielieferanten Adenosintriphosphat (ATP) nicht nur gegen den osmotischen Druck, sondern auch entgegen einem elektrochemischen Gradienten.

Das Innere der Zelle enthält das Zytoplasma, in das alle weiteren Zellorganellen eingebettet sind. Darunter fallen die 1 bis 10  $\mu\text{m}$  großen Mitochondrien, die für die Energieversorgung der Zelle zuständig sind. Ihre Hauptfunktion besteht darin, im Rahmen der Zellatmung unter Verbrauch von Sauerstoff ATP herzustellen. Wichtigster Bestandteil der Zelle ist jedoch der Zellkern, in dem sich, abgeschottet durch eine selektiv durchlässige Kernmembran oder -hülle, die Erbsubstanz DNA befindet. Die DNA-Doppelhelix ist dabei zeitweise um das Kernprotein Histon zu mehreren Chromosomen aufgewickelt. Innerhalb des Zellkerns sind ein oder mehrere Nukleoli (Kernkörperchen) von der Umgebung unterscheidbar. Im Bereich eines solchen Nukleolus liegen besondere Abschnitte der DNA, die Informationen für die Herstellung der so genannten Ribosomen enthalten. Eine eukaryotische Zelle enthält zwischen  $10^5$  und  $10^7$  Ribosomen mit einem Durchmesser in der Größenordnung von 25 nm. Diese Ribosomen befinden sich im Zytoplasma im und am endoplasmatischen Retikulum (einer Fortsetzung der Kernmembran) und spielen eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung der Erbinformation in Proteine. Dieser Prozess wird als Biosynthese bezeichnet. Dazu wird im Zellkern mit der Ribonukleinsäure (engl. *ribonucleic acid* - RNA) zunächst eine Kopie der DNA erstellt (Transkription), die dann von den Ribosomen abgelesen und in Proteinsequenzen umgesetzt wird (Translation). Nach der Biosynthese werden die Proteine dann mit Hilfe des Golgi-Apparates<sup>1</sup> aus der Zelle ausgeschleust. Weitere Bestandteile der Zelle dienen vor allem der Aufrechterhaltung der zellulären Prozesse. Vesikel sind kleine rundliche bis ovale Bläschen, die von einer einfachen Membran umgeben sind. Sie bilden Zellkompartimente, in denen unterschiedliche, oft enzymbasierte Prozesse ablaufen. Vakuolen dienen der Nahrungsspeicherung und Verdauung. Die dafür erforderlichen Enzyme werden in den Lysosomen gebildet.

Neben der Synthese von Proteinen ist die Zellteilung der entscheidende Prozess, der das Wachstum und die Fortpflanzung aller Lebewesen gewährleistet. Bei den eukaryotischen Lebewesen erfolgt zunächst eine als Mitose bezeichnete Teilung des Zellkerns und anschließend die Abschnürung des Zelleibs, so dass aus einer Zelle zwei Tochterzellen mit identischem Erbgut entstehen. Bei den Keimzellen erfolgt eine Sonderform der Zellteilung, bei der aus einer diploiden Ausgangszelle (mit doppeltem Chromosomensatz) vier haploide Tochterzellen (nur einfacher Chromosomensatz) entstehen. Bei der Zellteilung spielen die Zentriolen eine zentrale Rolle. Sie sind an der Ausbildung des Spindelapparats beteiligt. Es handelt sich um ca. 0,3 – 0,5  $\mu\text{m}$  große rundliche oder stäbchenförmige Gebilde, die sich in der Nähe des Zellkerns befinden und aus Mikrotubuli gebildet werden.

---

<sup>1</sup>benannt nach C. Golgi (1844-1926)