

# 1 Einleitung

Am 31. Dezember 2019 meldeten chinesische Behörden der Weltgesundheitsorganisation (WHO, engl. World Health Organization) Fälle einer Lungenentzündung unbekannter Ursache aus der Stadt Wuhan in China. Am 07. Januar 2020 wurde ein neuartiges Coronavirus als Ursache entdeckt und erhielt den vorläufigen Namen „2019-nCoV“, später wurde es umbenannt in „SARS-CoV-2“ (Schweres Akutes Respiratorisches Syndrom Coronavirus-2) [1]. Fünf Monate später wurde in den Vereinigten Staaten per Notfallzulassung der US-Arzneimittelbehörde FDA (Food and Drug Administration) ein Antigen-Schnelltest zugelassen, welcher den Nachweis einer Infektion mit SAR-CoV-2 erbringt [2]. In der Zwischenzeit verbreitete sich das Virus weltweit und veränderte die Lebensweise auf den Kontinenten drastisch. Der SARS-CoV-2 Antigen-Schnelltest ist ein aktuelles Beispiel für die Point-of-Care (POC) bzw. patientennahe Labordiagnostik. Zu der POC Diagnostik gehören unter anderem auch übliche Schwangerschaftstest oder Drogenteststreifen zum Nachweis bestimmter Substanzen. Diese Funktionsprinzipien beruhen auf dem Lateral-Flow-Test (zu deutsch seitlicher Flusstest) [3, 4]. Daneben gibt es auch optische Verfahren, welche zwar bislang nicht kommerziell eingesetzt werden, aber dennoch einfache Handhabung und hohe Sensitivität versprechen. Auch in Bezug auf das Coronavirus wurden erste optische Detektionserfolge gemeldet [5]. Diese optischen Verfahren beruhen meistens auf Absorption, Fluoreszenz, Chemilumineszenz, Interferometrie sowie Oberflächenplasmonenresonanz und werden häufig in mikrofluidischen Biosensoren angewendet. Solche kleinen Analysewerkzeuge oder Sensoren werden meist Lab-on-a-Chip genannt (LOC) [6, 7]. Ein Prüfmedium wird in einem mikrofluidischen Kanal oder einem Reservoir optisch analysiert. In vielen Fällen wird lateral zur Chipfläche optisch angeregt und eine Absorption oder Fluoreszenz gemessen. Beruht das Messverfahren auf sensitivere Messmethoden, wie auf Basis optischer Interferometrie, Oberflächenplasmonenresonanz, Gitter-Koppler, Ringresonatoren oder photonische Kristalle, kann eine Wellenführung und damit ein optischer Wellenleiter im LOC benötigt werden [8, 9]. Der Detektionsmechanismus beruht häufig auf der Veränderung der effektiven Brechzahl am Sensor, die durch die molekulare Wechselwirkung des zu analysierenden Stoffes oder der Flüssigkeit mit der Sensoroberfläche ausgelöst wird. Es können Brechzahländerung von  $10^{-8}$  [10] bei Verwendung der Oberflächenplasmonenresonanz und sogar Brechzahländerung im Bereich  $10^{-9}$  durch Nutzung einer mikro-interferometrischen Detektion der Rückstreuung eines Substrates detektiert werden [11]<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Diese Messmethode nutzt jedoch einen Laser in einem Freistrahllaufbau ohne Wellenleitung.

Solche Biosensoren fanden bislang noch keinen Weg in den kommerziellen Markt, da die Handhabung und die Robustheit der Messung nur unter Laborbedingungen gewährleistet werden kann. So ist die Handhabung vieler Probensubstanzen aufgrund ihres meist flüssigen Zustandes recht aufwendig. Bei optischen LOC-Bauteilen stellt aber vor allem die Lichtein- und -auskopplung eine Herausforderung dar. Je nach Messverfahren muss ein großer Aufwand für die Licht- oder Lasereinkopplung in das Sensorsystem betrieben werden. Basiert der LOC-Sensor auf einem Wellenleitersystem, kann zum Beispiel über Stirnkopplung, Gitterkoppler oder ein Prisma eingekoppelt werden. In allen Fällen gilt jedoch, dass das Modenfeld der eingestrahlten Welle mit dem Modenfeld im Wellenleiter übereinstimmen muss, um effizient Lichtstrahlung oder eine Laserstrahlung in das System einzukoppeln. Je nach Anwendung werden dazu die Licht- oder Laserstrahlen kollimiert, fokussiert oder defokussiert und gegebenenfalls polarisiert. Bei Gitterkopplern oder Prismen ist sogar nur über einen bestimmten Einfallswinkel eine effiziente Einkopplung möglich, siehe Abbildung 1.1.

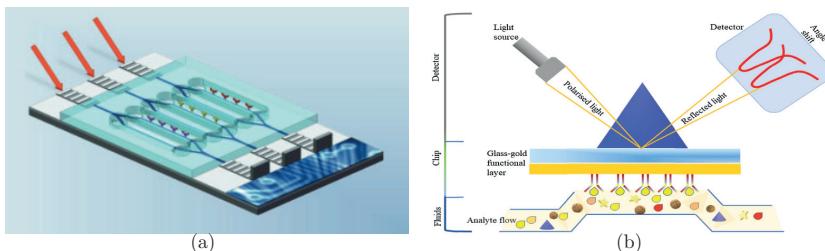


Abbildung 1.1: Beispiele eines optischen LOC mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien und Einkoppelarten. Mach-Zehnder Interferometrie basierender LOC (a). Das Laserlicht wird durch einen Gitterkoppler in das Wellenleitersystem eingekoppelt. Ein optischer Biosensor basierend auf Oberflächenplasmonenresonanz, welcher durch ein Prisma Lichtinformation ein- und auskoppelt (b).

Daher muss sowohl die Einkopplung als auch der gesamte Aufbau mechanisch stabilisiert werden. Oftmals sind stabile Messaufbauten für eine robuste Lasereinkopplung und -auskopplung in ein optisches Sensorsystem eine der größten Herausforderungen in der wissenschaftlichen Praxis. Von ihrer technischen Realisierung ist jedoch selten etwas in der Literatur zu finden.

Eine Möglichkeit, diese Herausforderungen zu überwinden, besteht darin, die Licht- bzw. Laserquelle in den Wellenleiter bzw. in das Sensorsystem zu integrieren. Angesichts der geringen Systemgrößen sind insbesondere polymere bzw. organische

---

Laserquellen geeignet. Sie sind nicht nur weniger als ein Mikrometer hoch, sondern auch weitestgehend flexibel. Als Anregungsquelle wird in der Regel eine ausreichend starke UV-Quelle benötigt, an die jedoch keine hohen optischen Anforderungen gestellt werden.

In den letzten Jahren wurde viel Forschung im Bereich der LOC durchgeführt, insbesondere mit Blick auf die Integration optischer Quellen und Senken in das System. Von 2013 bis 2017 wurde im Sonderforschungsbereich/Transregio 123 „Planare optronische Systeme“ (SFB/TRR 123 PlanOS-Projekt) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) intensiv Foliensensoren erforscht. Dies umfasste Themenschwerpunkte wie polymere Materialforschung für Rolle-zu-Rolle Herstellungsverfahren, polymere Wellenleitersysteme sowie die Sensorentwicklung für unterschiedliche Anwendungsgebiete auf einer Polymerfolie. Die Integration von Lichtquellen und -senken wurde im Teilbereich A03 für diese Foliensysteme untersucht [12]. Im Zeitraum von 2018 bis 2021 konzentrierten sich die Bemühungen im Rahmen des DFG-Projektes „Polymerbasierte optische Sensorplattform mit integrierter Lichtquelle“ (PolySens) darauf, einen Foliensensor mit integrierter Lichtquelle zu entwickeln [13]. Ein Schwerpunkt dieser Forschung lag auf der Integration eines einmodigen organischen Lasers in einen einmodigen polymeren Wellenleiter.

In dieser Dissertation werden Ergebnisse präsentiert, die im Rahmen verschiedener Projekte erarbeitet wurden und zur Lösung der Problematik der Integration von Laserquellen in Wellenleiter beitragen. Dabei werden die Handhabung der beiden gängigsten kommerziell erhältlichen polymeren Wellenleiterwerkstoffe untersucht sowie ihre optischen und prozesstechnischen Eigenschaften analysiert. Des Weiteren wird die Integration eines organischen Lasers in diese Wellenleiter detailliert untersucht. Diese Integration eröffnet die Möglichkeit, justagefreie optische Sensoren zu entwickeln, um die Handhabung zu vereinfachen und die Robustheit der Messung zu erhöhen. Aufgrund der Vielfalt an organischen und polymeren Materialien für optische Quellen, Senken, Substrate und Sensoren stellt diese Arbeit eine Machbarkeitsstudie mit den ausgewählten Materialien dar.

## Gliederung der Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit werden dem Leser die notwendigen Grundlagen der organischen Optoelektronik nähergebracht. Dazu wird im Kapitel 2 in das Thema der photophysikalischen Eigenschaften der organischen Halbleiter eingeführt. Insbesondere werden das Orbitalmodell, der inter- und intramolekular Energietransfer und die Photolumineszenz organischer Halbleiter beschrieben. Danach werden die Grundlagen der organischen Laserphysik sowie ihrer Verstärkungsprozesse und die gebräuchlichsten Resonatorformen für Dünnschichtlaser ausführlicher erläutert. Um das Verständnis für Wellenleiter zu vertiefen, wird das Thema polymere Wellenleiter

und ihre Struktur näher beleuchtet. Letztlich wird auf die besondere Form der spiegellosen, stimulierten Emission, dem sogenannten Random Lasing, eingegangen.

In Kapitel 3, „Technologie und Messtechnik“, werden die verwendeten Substrate und die Prozesse hin zur fertigen Probe erklärt. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Herstellungstechnologien und Nachweismethoden. Darüber hinaus werden die messtechnischen Mittel und optischen Messplätze zur Charakterisierung der Proben vorgestellt.

Das erste experimentelle Kapitel, „Polymere planare Wellenleiter“, beschäftigt sich mit den verwendeten polymeren Wellenleitermaterialien und ihren prozessbezogenen und optischen Eigenschaften. Der Fokus liegt insbesondere auf der Prozessentwicklung und der Fertigung eimodiger Wellenleiterstrukturen. Die dafür benötigten Prozesse sowie auch die Wellenleiter wurden eigens entwickelt und im Labor hergestellt.

Im zweiten experimentellen Kapitel, „Photolumineszenz in polymeren mehrmodigen Stegwellenleitern“, wird der Aufbau der ersten Photolumineszenzproben beschrieben. Insbesondere wird ein detaillierter Blick auf die spektralen Eigenschaften dieser Proben geworfen und ist eine Vorbereitung auf das folgende Kapitel 6.

Das Kapitel 6, „Spiegellose Lasertätigkeit“, untersucht und beschreibt die morphologischen Eigenschaften der Wellenleitermaterialien und behandelt den Effekt des entdeckten spiegellosen Lasings ein, auch Random Lasing genannt. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der spektralen Untersuchung der Laserspektren und deren Zusammenhang mit den ermittelten Resonatorlängen.

Im letzten Ergebniskapitel, „Wellenleiterintegration des organischen Lasers“, wird die Integration organischer Halbleiter und polymerer Wellenleiter, insbesondere im Hinblick auf den einmodigen Betrieb, behandelt. Zunächst wird dem Leser die Herstellung von Resonatorstrukturen im Wellenleiter gezeigt und der Einfluss der verschiedenen Schichtdicken im System auf das spektrale Verhalten des Lasers verdeutlicht. Anschließend werden die gemessenen optischen Eigenschaften von einmodigen polymeren Lasern präsentiert. Schließlich werden Lebensdaueranalysen sowie die Degradation der optischen Verstärkung diskutiert.

Abschließend werden im Kapitel 8 die Beobachtungen und Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und diskutiert. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf das Thema Wellenleiterintegration organischer Dünnschichtlaser und deren mögliche Anwendungen gegeben.

## 2 Grundlagen organischer Optoelektronik

### 2.1 Photophysikalische Eigenschaften organischer Halbleiter

Organische Halbleiter bzw. Moleküle bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen. Häufig findet man diese auch in Verbindung mit Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und diversen anderen Elementen. Daher sind Kohlenwasserstoffverbindungen in nahezu unbegrenzter Variation verfügbar. Das konjugierte  $\pi$ -Elektronensystem ist dabei das markanteste Merkmal und die Grundlage für die halbleitenden Eigenschaften der organischen Materialklasse. Im Vergleich mit anorganischen Halbleitern unterscheiden sich die optischen und elektrischen Eigenschaften maßgeblich und werden im Folgenden näher erklärt.

#### 2.1.1 Elektronensystem

Ein Kohlenstoffatom besitzt sechs Elektronen, welche in der Konfiguration  $1s^2 2s^2 2p^2$  vorliegen. Die Abbildung 2.1 zeigt die Elektronenkonfiguration des freien Kohlenstoffs. Dieser Grundzustand erlaubt zwei Bindungen. Vier Bindungen können jedoch eingegangen werden, wenn sich zwei Orbital zu einem energetisch gleichen Orbital vermischen. Diesen Vorgang nennt man Hybridisierung. Es wird unterschieden zwischen  $sp$ -,  $sp^2$ - und  $sp^3$ -Hybridisierung.[14]

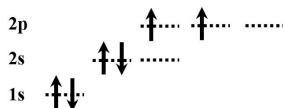


Abbildung 2.1: Elektronenkonfiguration eines freien Kohlenstoffatoms im Grundzustand. Die Pfeile repräsentieren den Eigendrehimpuls der Elektronen, auch Spin genannt.

Eine  $sp^3$ -Hybridisierung entsteht, wenn ein 2s-Elektron auf das Niveau des 2p-Orbitals angehoben wird. Die nun drei Elektronen im 2p-Orbital bilden mit dem 2s-Orbital vier gleichwertige  $sp^3$  Hybridorbitale. Ein Beispiel für die  $sp^3$ -Hybridisierung ist des Ethanmolekül (Summenformel:  $C_2H_6$ ), welches zu den Alkanen gehört, siehe Abbildung 2.2(a) und (d). Drei der vier  $2sp^3$  Kohlenstofforbitale überlappen mit den 1s-Orbitalen der Wasserstoffatome. Es entstehen an den  $sp^3$ -s Orbitalüberlappungen

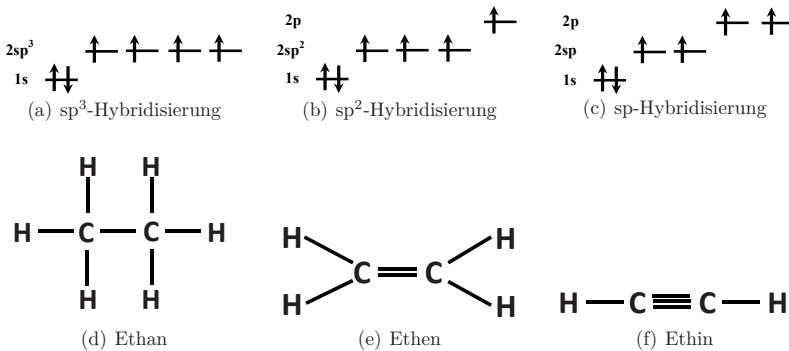


Abbildung 2.2: Elektronenkonfiguration und Strukturformel von  $\text{sp}^3$ -,  $\text{sp}^2$ - und  $\text{sp}$ -Hybridien

drei  $\sigma$ -Verbindungen. Zwischen den zwei Kohlenstoffatomen entsteht eine Einfachbindung durch  $\text{sp}^3$ - $\text{sp}^3$  Orbitalüberlappung. Die vier  $\text{sp}^3$  Hybridorbitale ordnen sich im Raum so an, dass der größtmögliche Abstand zwischen ihnen entsteht. Dies wird durch eine tetraedrische Anordnung erreicht.

Eine  $\text{sp}^2$ -Hybridisierung entsteht, wenn ein 2s-Elektron auf das Niveau des 2p-Orbitals angehoben wird. Das verbleibende 2s-Orbital bildet mit zwei 2p-Orbitale drei  $\text{sp}^2$ -Hybridorbitale. Ein Elektron verbleibt im 2p-Orbital. Ein Beispielmolekül hierfür ist Ethen, siehe Abbildung 2.2(b) und (e) (Summenformel:  $\text{C}_2\text{H}_4$ ). Dieses besteht aus zwei  $\text{sp}^2$ -hybridisierten Kohlenstoffatomen mit parallel zueinander angeordneten p-Orbitalen. Durch die Überlappung der beiden  $\text{sp}^2$ -Orbitale und die Vereinigung der darin befindlichen Elektronen wird die  $\sigma$ -Bindung gebildet. Die  $\pi$ -Bindung entsteht durch die Überlappung der beiden  $2p_z$ -Orbitale. Zwischen den beiden Kohlenstoffatomen entsteht eine Zweifachbindung.

Eine  $\text{sp}$ -Hybridisierung entsteht, wenn ein 2s-Elektron auf das Niveau des 2p-Orbitals angehoben wird. Das 2s- und ein 2p-Orbital werden vereint zu zwei  $\text{sp}$ -Hybridorbitalen. Die restlichen zwei 2p-Orbitale bleiben mit je einem Elektron besetzt. Ein Vertreter dieser Alkinen Gruppe ist das Ethin, siehe Abbildung 2.2(c) und (f) (Summenformel:  $\text{C}_2\text{H}_2$ ). Zwei  $\text{sp}$ -hybridisierte Kohlenstoffatome verbinden sich über eine Dreifachbindung miteinander. Dabei entstehen zwei  $\pi$ -Bindungen durch die Überlappung der zwei p-Orbitale und eine  $\sigma$ -Bindung durch die Überlappung der  $\text{sp}$ -Orbitale. Das Wasserstoffatom ist über eine 1s- $\text{sp}$   $\sigma$ -Bindung an das Kohlenstoff geknüpft.

Quantenmechanisch kann man die Molekülorbitale mit der LCAO-Methode (LCAO, engl. Linear Combination of Atomic Orbitals)) beschreiben. Dabei wird durch Addition bzw. Subtraktion (lineare Kombination) von einem Ein-Elektron Atomorbital das Molekül orbital gebildet, da das Verhalten des Elektrons in der Nähe des Kerns als atomare Wellenfunktion beschrieben werden kann. Durch Addition der beiden Eigenfunktionen wird die Ladungsträgerdichte zwischen den beiden Kernen erhöht. Die Wellenfunktionen überlappen in diesem Bereich. Ein solches Molekül orbital wirkt bindend. Die Addition von Eigenfunktionen entgegengesetztem Vorzeichen (Subtraktion) führt dazu, dass die Ladungsträgerdichte im Zwischenbereich der Kerne zu Null wird. Somit entsteht keine bindende Wirkung. Ein solches Molekül orbital wird als antibindendes Molekül orbital bezeichnet. Orbitalanordnungen bzw. -bindungen mit resultierender Elektronenverteilung (Addition) entlang der Kernverbindungsachse, nennt man  $\sigma$ -Bindung. Die Wellenfunktion der Atomorbitale der Valenzelektronen überschneidet sich knotenfrei zwischen den überlappenden Atomorbitalen. Solche Verbindungen sind bei Raumtemperatur nicht leitfähig, da die Bindungsenergie an das Atom sehr hoch ist und das Elektron dadurch lokalisiert ist. Dagegen sind Orbitalanordnungen, welche senkrecht zur Kernverbindungsachse sind, leitfähig. Dies liegt an der seitlichen Überlappung der Atomorbitale. Die Abbildung 2.3 zeigt die Bindungen an einem Ethen- und an einem Benzol-Molekül. Die Bindungsenergie dieser  $\pi$ -Bindung ist schwach. Die Elektronen in solch einem System bzw. in solch einem  $\pi$ -Orbital sind deshalb delokalisiert. Durch die Delokalisierung spaltet sich das Grundenergieniveau in ein niedrigeres Niveau (bindendes  $\pi$ -Orbital) und ein höheres Niveau (antibindendes  $\pi^*$ -Orbital) auf. Das niedrigere Niveau ist im Grundzustand besetzt und das höhere unbesetzt. Daher tragen diese Niveaus die Bezeichnung HOMO-Niveau (engl. Highest Occupied Molecular Orbital) und LUMO-Niveau (engl. Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Diese

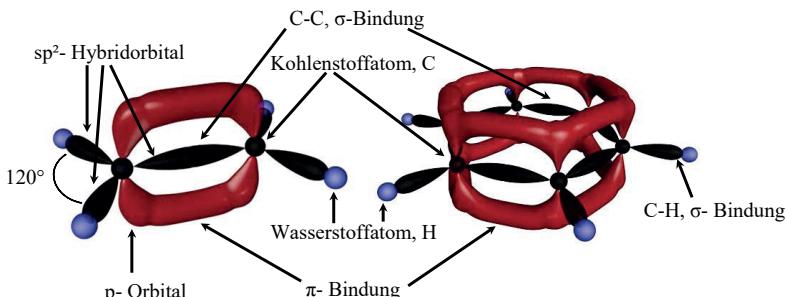


Abbildung 2.3:  $\pi$ - und  $\sigma$ - Bindungen an einem Ethen- (links) und an einem Benzol-Molekül (rechts). Grafik nach [15].

Niveaus entsprechen dem Valenz- und Leitungsband in einem anorganischen Einkristall. Nach dem geltenden Pauli-Prinzip können  $\pi$ -Orbitale nur von maximal zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin besetzt werden. Die Besetzung mit  $\pi$ -Elektronen beginnt auf dem niederenergetisch bindenden  $\pi$ -Orbital.[16, 17]

### 2.1.2 Photolumineszenz

Die optischen Eigenschaften der organischen Materialien hängen maßgeblich von der chemischen Struktur der Moleküle und auch von den quantenmechanischen Eigenschaften der Molekülorbitale ab. Die elektronischen Niveaus innerhalb der Moleküle bestimmen die spektralen Absorptions- und Emissionsbanden. Diese sind, im Gegensatz zu anorganischen Halbleitern, breiter und von einander separierbar. Die spektrale Verschiebung der Absorptions- und Emissionsbande wird Stokes-Shift genannt [18]. Durch das Frank-Condon-Prinzip kann der Stokes-Shift erklärt werden: Die Abbildung 2.4 zeigt die Lennard-Jones-Potentiale für den Grundzustand  $S_0$  sowie den höheren Zustand  $S_1$ . Innerhalb dieser Zustände liegen sogenannte Schwingungszustände ( $S_0^0, S_0^1, S_0^2, \dots$  und  $S_1^0, S_1^1, S_1^2, \dots$ ). Aufgetragen in Abhängigkeit der Ortskoordinate bzw. des Kernradius  $r$ . Wird nun das Molekül angeregt, zum Beispiel durch ein einfallendes Photon, so wird aus dem Grundzustand  $S_0$  ein Elektron in einen Schwingungszustand innerhalb des höheren  $S_1$  Zustands angehoben (blauer Pfeil). Aus einer neuen elektronischen Anordnung folgt eine andere Kernkonfiguration. Daher sind beide Zustände voneinander versetzt. Die Anregung eines Moleküls bzw. die Besetzung eines antibindenden Molekülorbitals mit einem

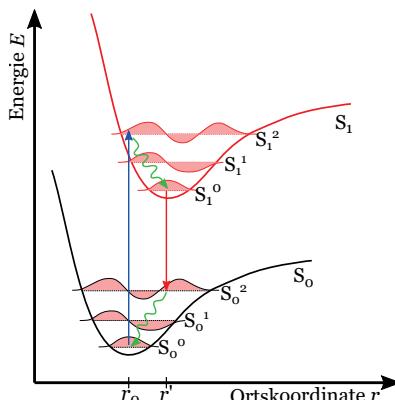


Abbildung 2.4: Absorptions- und Emissionsprozesse von Photonen in einem organischen Molekül nach dem Franck-Condon-Prinzip.

Elektron, führt zu einer Abschwächung der Atombindungen. Die Folge ist eine Vergrößerung der Bindungslänge zwischen den Atomen, wie es die Potentialkurve des  $S_1$ -Zustands zeigt. Innerhalb des angeregten  $S_1$ -Zustandes relaxiert nun das Elektron auf das Grundniveau  $S_1^0$  (grüner Pfeil). Dieser Prozess findet innerhalb von einigen  $10^{-15}$  s statt. Eine Änderung der Kernkoordinaten während des Anregungs- und Emissionsprozesses ist aufgrund der höheren Kernmasse und Trägheit nicht zu beobachten. Unter Emission eines Photons, kann das Elektron wieder in eines der Vibrationsniveaus des Grundzustands  $S_0$  zurückspringen (roter Pfeil). Die Energie des emittierten Photons ist kleiner als die des einfallenden Photons. Die Folge dessen ist, dass solche Materialien für ihre eigene Strahlung transparent sind. Für fluoreszierende Materialien sind Absorptions- und Emissionsspektren im Idealfall spiegelsymmetrisch.[19–21]

Je nach dem welches organische Emittormaterial verwendet wird, muss für die genauere Beschreibung der optischen Übergänge der Elektronenspin berücksichtigt werden. Grundlegend gilt das Pauli-Verbot, welches für zwei Valenzelektronen innerhalb eines Moleküls nur gleichsinnigen oder gegensinnigen Spin erlaubt, abhängig vom energetischen Zustand. Aus der daraus folgenden Spinstatistik ergibt sich ein Singulett- zu Triplettzustandsverhältnis von 1:3. Singulett-Zustände haben dabei den Gesamtspin  $S = 0$  und Triplett-Zustände den Gesamtspin  $S = 1$ . Das Jablonski-Diagramm (siehe Abbildung 2.5) fasst alle strahlende und nicht strahlende Übergänge eines Moleküls zusammen. Die Singulett-Grundzustände  $S_0$  bis  $S_2$  sowie die Triplett-Grundzustände  $T_1$  bis  $T_2$  (dicke Linie) spalten sich in untere vibronische Niveaus auf (dünne Linie). Die Triplett-Niveaus liegen dabei energetisch tiefer als ihre äquivalenten Singulett-Niveaus. Der Absorptionsprozess eines Photons unterscheidet sich kaum von dem oben beschriebenen Prozess. Das Molekül wird dabei wieder in das Singulett-Niveau  $S_1$  oder  $S_2$  angeregt bzw. in eines der vibronischen Zustände (blauer Pfeil), von welchem es dann über Relaxation und/oder innere Umwandlung in den Grundzustand  $S_1$  relaxiert (grüner bzw. grauer Pfeil). An dieser Stelle gibt es drei Möglichkeiten: Neben der thermischen Relaxation kann es strahlend in den Grundzustand  $S_0$  zerfallen (Fluoreszenz, roter Pfeil) oder über eine Spin-Bahn-Umkehr in den energetisch tiefer liegenden Triplett-Zustand  $T_1$  übergehen (graue gestrichelter Pfeil). Letzteres wird Interkombination genannt (ISC, engl. Intersystem Crossing). Aus diesem Triplett-Zustand kann das Molekül in den Singulett-Grundzustand  $S_0$  strahlend zerfallen (roter gestrichelter Pfeil). Dieser Prozess wird Phosphoreszenz genannt. Dies ist eigentlich ein Spin verbotener Übergang und ist nur durch eine erneute Umkehrung der Spins erlaubt (vgl. Pauli Verbot). Zusätzlich sei erwähnt, dass aus dem Triplett-Zustand  $T_1$  durch Einfall eines Photons in ein höheres Triplett-Niveau angehoben werden kann (blauer gestrichelter Pfeil). Man spricht dabei von Triplett-Triplett-Absorption.

Singulett- und Triplett-Übergänge unterscheiden sich in ihrer Zerfallszeit: Währ-

rend Singulett-Übergänge sehr kleine Zerfallszeiten von ca.  $10^{-9}$  s aufweisen, kann bei Triplett-Emittern, aufgrund der geringeren Übergangswahrscheinlichkeit, Zerfallszeiten von  $10^{-6}$  s bis  $10^2$  s gemessen werden [21, 22]. Grundsätzlich gibt es organische Materialien, welche fluoreszent und/oder phosphoreszent emittieren. Dabei beruhen phosphoreszente Emitter meist auf Schweratom- oder Seltenerdmetallkomplexen, welche die Spin-Bahn-Umkehr begünstigen. Zusätzlich sei noch die Forschungsarbeit an TADF-Emittermaterialien (engl. Thermally Activated Delayed Fluorescence) erwähnt [23–25]. Der Triplet-Zustand  $T_1$  wird an dieser Stelle, durch thermische Anregung, wieder in den Singulett-Zustand  $S_1$  gebracht. Dieser Prozess wird umgekehrte Interkombination genannt (RISC, engl. Reverse Intersystem Crossing), welcher zu einer Erhöhung der Fluoreszenz führt. Hierfür werden heutzutage Schweratomkomplexe eingesetzt, welche die RISC-Übergangsrate erheblich begünstigen [26].

### 2.1.3 Intermolekularer Energietransfer

Neben den Energieübertragungsprozessen innerhalb eines Moleküls (vgl. Jablonski-Diagramm im Kapitel 2.1.2) bestehen auch zwischenmolekulare Energietransfermechanismen, auch intermolekularer Energietransfer genannt.

Ein dotiertes Materialsystem, ein so genanntes Gast-Wirt System, besteht aus

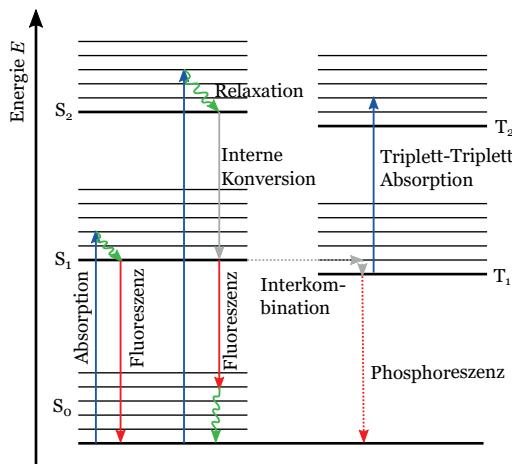


Abbildung 2.5: Das Jablonski-Diagramm zeigt bedeutende energetische Zustände und Übergänge in einem organischen Molekül an.