

# Zusammenfassung

---

---

Optische Spektroskopietechniken werden häufig zur quantitativen Analyse der Stoffzusammensetzung, der physikalischen Eigenschaften und der aus Energie-Materie-Wechselwirkungen hervorgegangenen Phänomene verwendet. Die Nahinfrarot-Absorptionsspektroskopie von menschlichem Gewebe ist von besonderem medizinischem Interesse wegen ihrer Fähigkeit mit Hilfe von Photonen, die nichtinvasiv durch Organe wie das Gehirn oder die Nieren propagiert sind, physiologische und neurologische Informationen selektiv über bestimmte Chromophore im menschlichen Körper zu erfassen. Die Umsetzung dieser Techniken stößt allerdings trotz vieler Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet vor allem aufgrund einer einfachen Tatsache immer noch auf massive Schwierigkeiten: Licht breitet sich in Gewebe nicht geradlinig aus, sondern breitet sich wegen der starken Streuung auf stochastischen Trajektorien aus. Der optische Streueffekt dominiert und ist gewissermaßen verschränkt sich mit der optischen Absorption in diesen Medien. Während sich die meisten quantitativen Analysen auf die Absorptionsspektroskopie stützen, ist die Analyse und Interpretation der somit erzielten Ergebnisse auf Grund dieser Verschränkung mit der Streuung schwierig und dieses Problem bislang nicht zufriedenstellend gelöst. Biomedizinische Anwendungen der Techniken werden durch die Geometrie und Heterogenität von Geweben auf fast jeder Längenskala weiter komplex, was dazu führt, dass die zur Lösung der dahinterstehenden inversen Probleme beim Abrufen der diagnostischen Informationen schlecht gestellt und deren Lösung in der Regel nicht eindeutig ist.

Die vorliegende Dissertation widmet sich der Entflechtung der Effekte von Absorption und Streuung im menschlichen Gehirn und schlägt einen innovativen Ansatz zur Quantifizierung der optischen Absorptions- und Streukoeffizienten mit verbesserter Genauigkeit vor. Insbesondere wird ein neues Konzept zur Integration unterschiedlicher Datentypen aus verschiedenen Messdomänen vorgeschlagen und verifiziert. Der Arbeit liegt eine grundlegende Tatsache zugrunde: Absorption und Streuung sind trotz starker Verschränkung im Kern unabhängig. Und die in den Messungen verschiedener Domänen codierte Komplementarität kann vorteilhaft verwendet werden, um die Wiedergewinnungsgenauigkeit der Unbekannten zu erhöhen und die Komplexität der Inversion zu reduzieren.

Die Arbeit setzt das Konzept im Begriff der räumlich erweiterten Zeitbereichs-Diffusionsoptik um. Durch den Einsatz eines Pikosekunden Pulslasers und einer zeitkorrelierten Einzelphotonenzähltechnik wird der Ansatz an homogenen festen und zweischichtigen flüssigen Phantomen validiert, die die optischen Eigenschaften des menschlichen Gehirns nachahmen. Monte-Carlo-Simulationen werden angewendet, um den zufälligen Photonentransport in trüben Medien zu imitieren und fließen in die räumlich-zeitliche Optimierung des Inversionsverfahrens ein. Die Schätzgenauigkeit der Absorptions- und Streukoeffizienten wird mit einem Niveau von 5 % nachgewiesen. Das untersuchte und hier vorgestellte Konzept und die Berechnungsmethode haben das Potenzial, die Herausforderungen des inversen Problems in der diffusen Optik wie Lösungsuneindeutigkeit und Tiefenstreuungsneutralität zu überwinden.

Schlagwörter:

Pikosekunden diffuse Optik, Nahinfrarotspektroskopie, Monte-Carlo-Gehirnsimulation, räumlich-zeitliche Optimierung, zeitkorrelierte Einzelphotonenzählung.

# Abstract

---

---

Optical spectroscopy techniques are frequently used for the quantitative analysis of substance composition, physical properties, and the phenomena risen from energy-matter interactions. Near-infrared absorption spectroscopy of human tissues is particularly of medical interests for its ability to selectively acquire physiological and neurological information of certain chromophores in the human body, with the help of photons that are non-invasively propagated through organs such as brain or kidney. The implementation of these techniques, despite many research activities in this area, still encounters massive difficulties primarily due to one simple fact: Light no longer travels in a straight line in tissues but rather spreads on stochastic trajectories due to the strong scattering. The optical scattering effect dominates in these media and to some extent is entangled with the optical absorption. While the optical absorption spectroscopy is what most quantitative analyses rely on, the interpretation and analysis of the results are difficult due to this entanglement with scattering and this problem has not yet been satisfactorily solved. Biomedical applications of the techniques are further complex by the geometry and heterogeneity of tissues at almost every length scale, which results in the ill-posedness of solving the underlying inverse problem and thereafter usually the solution's non-uniqueness when retrieving the diagnostical information.

The present thesis is devoted to disentangling the effects from absorption and scattering in human brain and purpose an innovative approach on quantifying the optical absorption and scattering coefficients with improved accuracy. Especially, a new concept of integrating disparate data types from various measurement domains is proposed and verified. The work is based on a fundamental fact: The absorption and scattering, despite heavily entangled, are essentially independent. And the complementarity encoded in the measurements of different domains can be advantageously used to increase the retrieval accuracy of the unknowns and reduce the complexity of the inversion.

The thesis realizes the concept in the term of spatial-enhanced time domain diffuse optics. By deploying picosecond pulse laser and time-correlated single photon counting technique, the approach is validated on homogeneous solid and two-layered liquid phantoms mimicking human brain's optical properties. Monte-Carlo simulations are applied to imitate photon random transport in turbid media and are incorporated into the spatio-temporal optimization of the inversion process. The estimation accuracy of absorption and scattering coefficients is demonstrated at level of 5%. The examined and presented concept and computational method have the potential to overcome the challenges of the inverse problem in diffuse optics such as solution's non-uniqueness and deep scattering neutrality.

Keywords:

picosecond diffuse optics, Near infrared spectroscopy, Monte-Carlo brain simulation, Spatio-temporal optimization, time-correlated single photon counting