

femtoPro: Virtuelle Realität für reales Optik-Praktikum

Tobias Brixner^{1,*}, Stefan Müller¹, Hans-Christian Schmitt¹, Lukas Umlauf¹,
Andreas Müller², Samuel Truman² und Sebastian von Mammen²

¹Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

²Institut für Informatik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

*tobias.brixner@uni-wuerzburg.de

femtoPro (<https://www.femtopro.com>) ist eine interaktive Lehr-Simulation eines Laserlabors in virtueller Realität (VR) und basiert auf der Propagation von Gaußschen Laserstrahlen [1]. Das Modell beinhaltet ultrakurze Laserpulse, deren Modulation durch optische Elemente und lineare sowie nichtlineare Licht-Materie-Wechselwirkung [2]. In über 25 speziell entwickelten Trainingsmissionen erlernt man die korrekte Durchführung von Prozeduren wie die Justage eines Laserstrahls durch Irisblenden, die Verwendung von Linsen und Strahlteilern, Grundlagen der Frequenzverdopplung oder den Aufbau und die Bedienung von fortgeschrittenen Experimenten mit Teleskopen und Interferometern. Die Handhabung optischer Elemente ist der Realität nachempfunden, und die Software liefert Feedback über die richtige Ausführung in Echtzeit [3]. femtoPro ist vielfältig einsetzbar, beispielsweise vorlesungsbegleitend anstatt von Übungsaufgaben oder für Praktika in VR, die aus praktischen oder finanziellen Erwägungen nicht anders realisierbar wären.

In diesem Vortrag steht als dritte Möglichkeit die Kombination mit einem realen Optik-Praktikum im Fokus. Die Studierenden lernen zunächst in femtoPro grundlegende Justiermethoden und wenden diese dann im realen Versuch an. Diese hybride Einbettung von femtoPro in ein reales Praktikum haben wir anhand eines neuen Versuches zum Mach-Zehnder-Interferometer realisiert. Da das Training in einer augensicheren Umgebung stattfindet, führen Fehler zu keiner Gefährdung und werden vielmehr durch audiovisuelles Feedback hervorgehoben. Wir haben die Wirksamkeit von femtoPro im laufenden universitären Lehrbetrieb im Rahmen eines Master-Praktikums mit über 30 Probanden untersucht [4]. Hierzu wurde sowohl ein realer Praktikumsversuch (Abb. 1a) als auch eine femtoPro-Lehreinheit (Abb. 1b) zum Aufbau und der Justierung eines Mach-Zehnder-Interferometers entwickelt.

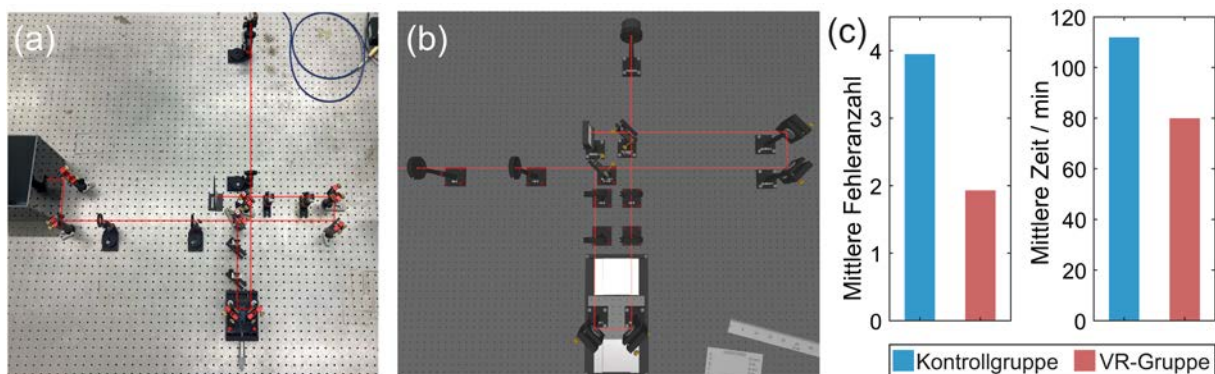


Abb. 1: Studie zum Mach-Zehnder-Interferometer. (a) Realer Praktikumsversuch mit eingezeichnetem Strahlverlauf (rot). (b) Virtueller Aufbau in femtoPro mit sichtbarem Laserstrahl. (c) Studienergebnis zur mittleren Anzahl an Fehlern (links) und der benötigten Zeit (rechts) bei der Durchführung des realen Versuchs. Die Probanden haben sich entweder mit femtoPro (rot) oder ohne femtoPro (blau) auf den Versuch vorbereitet.

Die Studierenden wurden in zwei Gruppen eingeteilt, wobei sich eine Kontrollgruppe mit konventionellen Medien vorbereitete (Skript und Lehrvideo) und die VR-Gruppe zusätzlich ein dediziertes femtoPro-Tutorium absolvierte. Dann führten beide Gruppen den realen Praktikumsversuch durch. Dabei wurden von der Studienleitung die Zeit zum Absolvieren des Versuchs erfasst sowie die Fehler dokumentiert, die bei der praktischen Durchführung gemacht wurden. Die statistische Auswertung (Abb. 1c, links) zeigt, dass die femtoPro-Gruppe (rot) weniger Fehler machte als die Kontrollgruppe (blau). Zu den vermiedenen Fehlern zählte beispielsweise die Grobjustierung eines optischen Elements, während es von einem Laserstrahl getroffen wird, was aus Sicherheitsgründen vermieden werden soll, da dann die Reflektion des Strahles unkontrolliert verläuft. Im femtoPro-Training wird man auf solche Fehler automatisiert hingewiesen, sodass ein Trainingseffekt nachweisbar ist. Darüber hinaus benötigte die Kontrollgruppe im Schnitt 112 ± 39 min für den realen Versuch, die femtoPro-Gruppe nur 80 ± 19 min (Abb. 2c, rechts). Die Ergebnisse zeigen somit, dass die Vorbereitung mit

femtoPro dazu beiträgt, den Versuch sowohl sicherer, zielgerichteter als auch effizienter durchzuführen und dass prozedurales Lernen effektiv gefördert wird. Zusätzliches Feedback aus Fragebögen zeigt zudem, dass die Studierenden, die sich mit femtoPro vorbereiteten, ihre praktischen Fähigkeiten höher einschätzten und das Programm als praktische Ergänzung für das reale Praktikum schätzen.

femtoPro kommt weltweit an mehr als 80 Standorten in der akademischen Lehre zum Einsatz. Es sind nur sehr geringe Investitionskosten erforderlich, da ein Stand-Alone-VR-Headset aus dem Consumer-Bereich (ca. 500 €/Stück) ausreicht. Die Software ist kostenfrei erhältlich für alle Anwender in Forschung, Lehre und Industrie. Wir setzen uns dafür ein, dass Studierende weltweit eine moderne, sichere und zielgerichtete praktische Ausbildung mittels femtoPro erhalten können, die dazu beiträgt, Laserunfälle zu vermeiden und gleichzeitig die Faszination für Forschungsthemen zu erwecken.

- [1] T. Brixner, S. Mueller, A. Müller, A. Knote, W. Schnepf, S. Truman, A. Vetter, and S. von Mammen, *femtoPro: virtual-reality interactive training simulator of an ultrafast laser laboratory*, [*Appl. Phys. B* **129**, 78 \(2023\)](#).
- [2] T. Brixner, S. Mueller, A. Müller, and S. von Mammen, *femtoPro: Real-time linear and nonlinear optics simulations*, [*J. Opt. Soc. Am. B* **42**, 1663–1670 \(2025\)](#), [arXiv:2503.19627 \(2025\)](#).
- [3] A. Müller, S. Mueller, T. Brixner, and S. von Mammen, *A Graph-Based Laser Path Solver Algorithm for Virtual Reality Laboratory Simulations*, [*Simul. Model. Pract. Theory* **144**, 103194 \(2025\)](#), [arXiv:2505.22540 \(2025\)](#).
- [4] H.-C. Schmitt, S. Mueller, L. Umlauf, S. von Mammen, and T. Brixner, *Virtual Reality as a Tool for Enhancing Practical Skills in Physics Education: A Study on a Mach–Zehnder Interferometer Setup*, in preparation (2026).