
Die Realisierung von Robotik und Mechatronik Tele-Experimenten via Internet für internationale Studenten

**Florian Zeiger
Marco Schmidt
Klaus Schilling**

*Institut für Informatik - Robotik and Telematik, Universität Würzburg
Am Hubland, D-97072 Würzburg, Deutschland*

In der Ausbildung von Ingenieuren bilden Experimente mit realer Hardware eine wichtige Ergänzung und eröffnen schon während des Studiums interessante Perspektiven. Dieser Beitrag beschreibt die Implementierung eines virtuellen Labors mit Hardware-Experimenten im Bereich der Mechatronik, welche von vier Universitäten in Deutschland, Spanien und Indien betrieben wird. Im Rahmen dieses virtuellen Labors werden Tele-Experimente zur Steuerung realer Roboter über das Internet bereitgestellt. Sowohl die Experimente, als auch die nötige Hardware-Infrastruktur sowie die logischen und softwaretechnischen Architekturen, wie z.B. die verwendeten Datenbanken und Dienste, für den verteilten Zugriff auf die Ressourcen werden detailliert beschrieben. Am Beispiel von Experimenten mit mobilen Robotern werden dann Details der technischen Umsetzung ausführlich dargestellt. Zum Ende des Artikels werden Erfahrungen aus dem internationalen Betrieb der Tele-Experimente zusammen mit indischen Partnern dargestellt.

EINLEITUNG

Der enorme Anstieg der Kommunikationsmöglichkeiten im modernen Internet ermöglichte in den letzten Jahren eine rasante Weiterentwicklung, auch im Bereich der Teleausbildung. Diese Entwicklung zusammen mit dem Fortschritt im Bereich der Informatik und der Telekommunikation ermöglichten so eine Umsetzung von Tele-Experimenten mit realer Hardware. In vielen Bereichen wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Onlinevorlesungen und Onlineprüfungssystemen entworfen. In dem Bereich der Ingenieurs-Ausbildung sollten jedoch darüber hinaus auch Hardware-Experimente hinzukommen. Hier spielt das Arbeiten und Experimentieren mit realer Hardware eine Schlüsselrolle, wobei deren reale Umsetzung anspruchsvolle Fragestellungen aufwirft [1]. In den letzten 15 Jahren wurden nun viele Bemühungen unternommen, um Techniken zur Fernsteuerung von Robotern über das Internet zu entwickeln [2][3]. Im Jahre 2000 wurden diese Ansätze in verschiedenen Projekten auf ganze Lerneinheiten erweitert [4-11]. Seit Mitte der neunziger Jahre arbeitet unser Team an derartigen Tele-

Experimenten mit realer Roboter Hardware [12-16]. Dabei bieten mobile Roboter ein motivierendes interdisziplinäres Arbeitsgebiet, in dem theoretisch erarbeitetes Hintergrundwissen direkt in die Praxis überführt werden kann [12].

Dieser Artikel präsentiert das *Internationale Virtuelle Labor für Mechatronik*, für das Partner aus Europa (Bayerische Julius-Maximilians Universität Würzburg - Deutschland und Universidad Carlos III de Madrid - Spanien) und Indien (Anna University in Chennai und Thiagarajar College of Engineering in Madurai) acht eigenständige Lerneinheiten im Bereich Robotik und Regelungstechnik entworfen und umgesetzt haben. Alle Lerneinheiten bestehen aus einem Experiment in dem ein realer Roboter über das Internet gesteuert wird. Um Tele-Experimente mit realer Hardware über große Distanzen und im internationalen Kontext bereitzustellen stellte dabei mehrerer zu erfüllende Anforderungen an die Projektpartner. Zum einen musste eine Struktur geschaffen werden, die eine einfache Betreuung der Studenten sowohl am Ort des angebotenen Experimentes, als auch an entfernten Standorten erlaubt, da auch bei Tele-Experimenten eine

Unterstützung der Studenten durch Tutoren notwendig ist. Dies umfasst verschiedene Datenbanken, Server mit den dazugehörigen Diensten und auch Möglichkeiten den Zustand des gesamten Systems zu überwachen. Weiterhin muss auch eine geeignete Infrastruktur und Architektur für das Betreiben des virtuellen Labors bestehen, da hier Experimente, die an verschiedenen Standorten betrieben werden integriert werden und dazu auch eine gemeinsame Benutzer- und Ressourcenverwaltung erforderlich ist. Zum anderen stellen die großen Distanzen der weltweit verteilten Standorte besondere Schwierigkeiten im Bezug auf Verlässlichkeit, Bandbreite und Geschwindigkeit der Kommunikationsverbindung dar. Die Experimente wurden alle in die in Abbildung 1 gezeigte Architektur integriert. Im Falle der beschriebenen Experimente bestand eine der größten Herausforderungen in einer Anpassung an die Qualität und Verfügbarkeit der Internetverbindungen. Möglichkeiten zur Durchführung von Experimenten mit einer großen Verzögerung in der Kommunikationsverbindung oder einer beschränkten Bandbreite bieten geeignete Lösungen um diese Experimente weltweit von jedem Ort mit einer verfügbaren Internetverbindung aus durchzuführen [17][18].

Im Folgenden wird zuerst eine kurze Übersicht über die verfügbaren Experimente gegeben. Die weiteren Abschnitte beschreiben die nötigen Voraussetzungen für ein internationales Tele-Labor und die damit verbundenen technischen Notwendigkeiten

zum Betrieb der verteilten Hardware-Ressourcen. Am Ende des Artikels werden die Erfahrungen aus dem Betrieb des Tele-Labors beschrieben.

DIE EXPERIMENTE DES INTERNATIONALEN TELE-LABORS FÜR MECHATRONIK

Im Rahmen des *European Cross Cultural Program* wurde ein internationales Tele-Labor für Mechatronik entwickelt. Jedes der Experimente ist als eigenständige Lerneinheit zu einem bestimmten Themengebiet konzipiert worden und folgt einer standardisierten Prozedur. Nachdem sich der Student für einen bestimmten Kurs registriert hat stehen ihm die kurs-spezifischen Experimente zur Verfügung. Für jedes Experiment steht ein Tutorial mit dem nötigen Fachwissen und eine Experimentbeschreibung zum Herunterladen bereit. Nachdem der Student sich das nötige Wissen aus dem Tutorial und bei Bedarf auch aus weiterführender Literatur angeeignet hat, muss dann ein kurzer Test absolviert werden. Dieser Test besteht aus einigen multiple-choice Fragen zum Thema, von welchen eine bestimmte Anzahl korrekt beantwortet werden muss. Dieser Online-Test gibt dem Studenten sofort eine Rückmeldung über seinen aktuellen Wissensstand und kann bei Bedarf bis zu dreimal wiederholt werden bevor der Tutor über den Misserfolg unterrichtet wird. Nach dem erfolgreichen Absolvieren dieser Prüfung kann dann Zeit zum Experimentieren mit der Hardware reserviert werden.

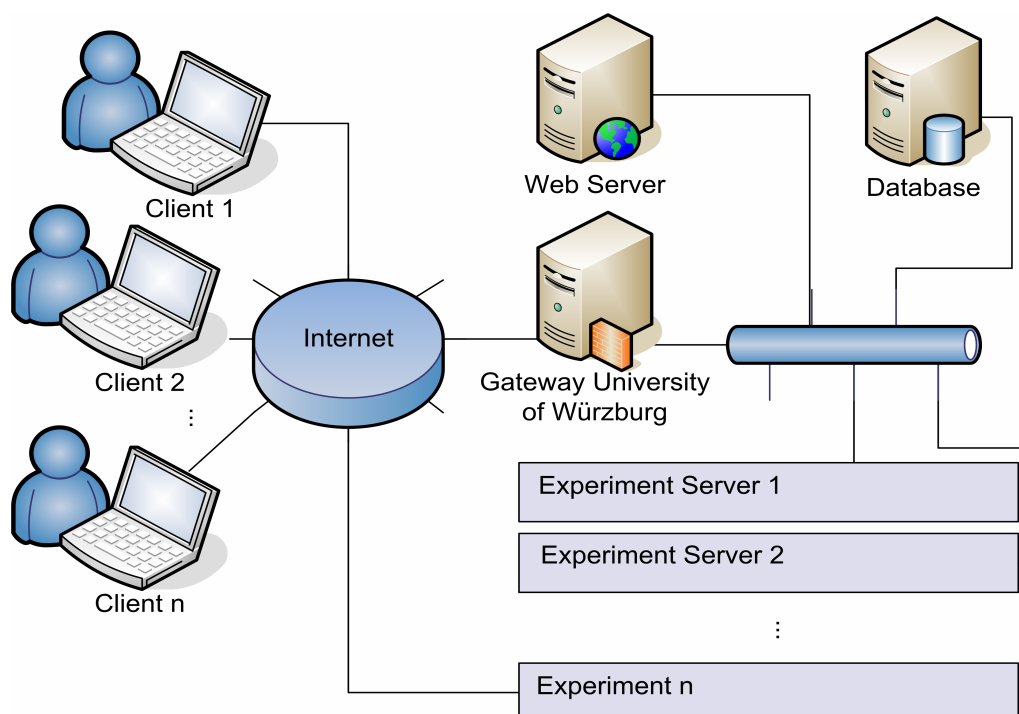


Abbildung 1: Tele-Labor Architektur.

Sobald die Zeitreservierung gültig wird, kann der Student ein Steuerprogramm starten, welches die Steuerung des Roboters erlaubt und die für das Experiment wichtigen Sensordaten zur Verfügung stellt.

Der Lehrstuhl für Robotik und Telematik der Universität Würzburg entwickelte Experimente zur Kinematik und zur Pfadplanung mobiler Roboter:

Kinematik von mobilen Robotern

Dieses Experiment behandelt die Grundlagen der Kinematik von mobilen Robotern. Es wird hier ein MERLIN Roboter (Mobile Experimental Rover for Locomotion and Intelligent Navigation, siehe Abbildung 2) verwendet, der, wie bei einem gewöhnlichen Auto, an der Vorderachse lenkbare Räder besitzt und über die Hinterachse angetrieben wird. Bei diesem Robotertyp können die nicht holonomischen Bewegungsbeschränkungen sehr einfach demonstriert werden. Eine genauere technische Beschreibung des MERLIN Roboters steht unter [19] zur Verfügung. Ein Schwerpunkt dieser Hardware Experimente liegt in der Ausarbeitung und dem Verständnis der idealisierten theoretischen Modelle und den in der Realität existierenden Abweichungen davon. Die durch die Experimente gewonnenen Sensordaten können dann zur Verbesserung der Genauigkeit und der mathematischen Modellierung herangezogen werden.

Pfadplanung eines Mobilen Roboters

Auch im Pfadplanungsexperiment wird der MERLIN Roboter mit seiner Ackerman-Steuerung zur Demon-

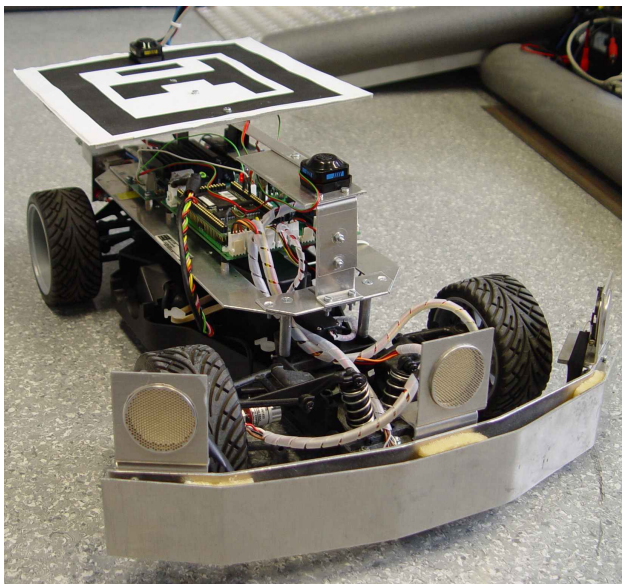


Abbildung 2: Der MERLIN Roboter.

stration der inversen Kinematik dieses Roboters verwendet. Zuerst werden einzelne Bewegungen zu primitiven Manövern, wie der Drei-Punkt-Wende oder dem seitlichen Verschieben kombiniert. Im nächsten Schritt werden primitive Manöver zu komplexeren kombiniert um eine gewünschte Zielposition zu erreichen. Die aus diesen Bewegungen gewonnenen Sensordaten werden dann zu einer detaillierten Fehleranalyse herangezogen. Den Studenten sollen so die komplexen Fragestellungen der inversen Kinematik bei mobilen Robotern und eine Fehlerfortpflanzung näher gebracht werden.

Der spanische Projektpartner, das *Department of System and Automation Engineering* der Universidad Carlos III de Madrid entwickelte ebenfalls Experimente zum Themengebiet der mobilen Roboter. Hier wurde allerdings ein anderer Typ von Roboter verwendet. Der MAGGIE (siehe <http://roboticslab.uc3m.es/>) ist ein mobiler Roboter mit Differentialantrieb, welcher einer anderen Kinematik als der im vorangegangenen Absatz beschriebenen MERLIN folgt. Bei den zwei folgenden Experimenten liegt der Schwerpunkt auf der Sensordatenverarbeitung und der Roboternavigation.

Ereigniserkennung

In diesem Experiment soll der Roboter mit Hilfe seines Laserscanners eine Tür erkennen. Die Studenten sollen den Roboter in einem Labor frei bewegen und die gewonnenen Sensordaten geeignet auswerten. Dazu müssen sie Algorithmen zur Erkennung von Türen und Hindernissen entwickeln welche sie dann auch auf dem Roboter ausprobieren können. In diesem Experiment wird dann deutlich welche Filter- und Messmethoden nötig sind um die rohen Messdaten überhaupt in eine für die Algorithmen geeignete Form zu bringen.

Topologische Navigation

Das Experiment zur topologischen Navigation verwendet einen Algorithmus zur Türeerkennung um einfache Navigationsaufgaben wie das Bewegen des Roboters zu einer Tür und das anschließende Durchqueren dieser Tür. Dabei kann sich der Roboter frei im Raum bewegen und die Studenten müssen die zur Verfügung stehenden Sensordaten in geeigneter Weise verwenden um die Problemstellungen dieser Navigationsaufgabe zu lösen.

Der indische Projektpartner in Chennai, das *Department of Mechanical Engineering* der Anna University, entwickelte zwei Experimente im Bereich der Regelungstechnik. Jedes der Experimente beleuchtet

ein Teilsystem komplexer industrieller Fertigungsmaschinen wie zum Beispiel einer Fräse oder eines Manipulatorarmes:

Motor Regelung

In Fertigungsanlagen werden oft CNC-Fräsen eingesetzt. In diesen Fräsen müssen Elektromotoren genau gesteuert werden um geeignete Drehzahlen zu halten. Dieses Experiment bringt den Studenten die Grundlagen der Regelung von Elektromotoren und Schrittmotoren näher. Auch hier steht dem Studenten eine Bedienoberfläche zur Verfügung, über die er alle Sensordaten auswerten und dem Motor Steuerbefehle geben kann.

Fernsteuerung eines Roboter-Arms

Das zweite Experiment der Anna University verwendet den Roboter aus Abbildung 3. Die Studenten können kleine Steuerprogramme schreiben und die einzelnen Gelenke so ansteuern dass sie einfache Aufgaben wie z.B. das Heben und Bewegen von Gegenständen ausführen können.

Der zweite indische Partner, das *Department of Computer Science and Engineering* des Thiagarajar College of Engineering in Madurai, stellt ein Experiment mit einem kleinen Roboter mit Differentialantrieb, dem *Boe Bot*, und ein Experiment zum Thema *Computer Vision* zur Verfügung.

Wandverfolgung

Das Ziel dieses Experimentes ist es mit verschiedenen Algorithmen eine Wandverfolgung des *Boe Bots* zu ermöglichen. Den Studenten werden eine Programmier-schnittstelle und eine Sensordaten-schnittstelle zur Verfügung gestellt welche über das Internet bedient werden kann.

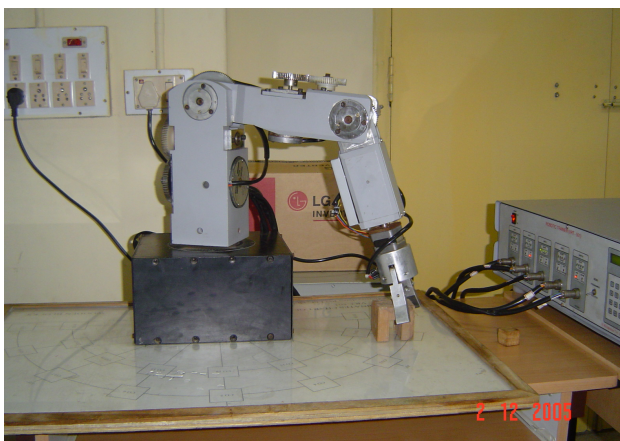


Abbildung 3: Manipulatorarm an der Anna University.

Analyse der Wiederholbarkeit von Bewegungen von Robotern

Hier ist das Ziel eine Auswertung der Wiederholbarkeit und der Genauigkeit von Bewegungsabläufen eines mobilen Roboters. Dazu werden Techniken aus dem Bereich *Computer Vision* eingesetzt. Der Experimentaufbau besteht aus einem mobilen Roboter und einer hoch auflösenden Kamera die über der Experimentierfläche montiert ist. Die Sensordaten verschiedener Bewegungen werden aufgezeichnet und der Student muss diese dann im Hinblick auf Genauigkeit und Wiederholbarkeit analysieren.

VORAUSSETZUNGEN FÜR TELE-EXPERIMENTE

Um nun die möglichen Vorteile von Tele-Experimenten nutzen zu können müssen zuerst einmal einige Voraussetzungen technischer und infrastruktureller Art erfüllt sein. Wichtig für einen zuverlässigen Betrieb sind Sicherheitsaspekte. Diese betreffen zum einen den Roboter, d.h. der Roboter muss durch mechanische, elektronische und softwaretechnische Sicherheitsmaßnahmen so abgesichert werden, dass auch durch eine gegebenenfalls absichtliche Fehlbedienung weder der Roboter noch die Umwelt in irgendeiner Weise Schaden nimmt. So muss z.B. der Fall behandelt werden, in dem der Roboter absichtlich gegen ein Hindernis gesteuert wird. Weiterhin müssen Schutzmaßnahmen vorhanden sein, dass der Motor keinen Schaden nimmt oder die Geschwindigkeit des Roboters bei der Hindernisberührung nicht zu hoch ist.

Zum anderen müssen auch die Sicherheitsaspekte der Software des gesamten Tele-Experiment Portals berücksichtigt werden. Da Studenten hier anerkannte Prüfungsleistungen ablegen, müssen auch Vorkehrungen getroffen werden um allen Prüflingen gleiche Bedingungen zu garantieren. Ein Betrugsversuch muss daher erkannt und verhindert werden. Auch verursacht der große Vorteil der immerwährenden weltweiten Verfügbarkeit einige Probleme. So wird es sich nur um eine Frage der Zeit handeln bis Hacker versuchen sich Zugang zu der Roboter Hardware zu verschaffen. Auch dieses Szenario muss bedacht werden und schon im Voraus Mechanismen implementiert werden um solche Angriffe zu erkennen und gegebenenfalls zu verhindern.

Ein völlig anderer Aspekt ist der große Aufwand um die Experimentier-Hardware zu Warten und zu Pflegen, sowie der Administrationsaufwand zum Verwalten der Studentenzugänge. So müssen für die

Administratoren geeignete Schnittstellen zur Verfügung stehen, um den Verwaltungsaufwand in einem erträglichen Maß zu halten. Das gleiche gilt auch für die Tutoren der einzelnen Kurse. Auch hier darf der administrative Aufwand nicht unterschätzt werden. Diese Punkte sollten unbedingt beachtet werden, da sonst einer der großen Vorteile - das effektive Nutzen der Hardware und die damit verbundene Zeitersparnis - nicht ausgenutzt werden können. Um dies zu erreichen wurde im präsentierten Tele-Labor eine flexible Zuordnung von Tutoren, Lehrern und Studenten ermöglicht. So können die involvierten Tutoren einen schnellen Überblick über den Lernfortschritt der zu betreuenden Studenten erlangen.

Die dritte wichtige Voraussetzung ist die nötige Flexibilität des Systems. Um das Verteilte Entwickeln und Bereitstellen der Experimente zu ermöglichen und um hohe Kosten bei der Erweiterung des Kursangebotes zu vermeiden ist zwingend ein modularer Aufbau mit der damit verbundenen Definition der Schnittstellen notwendig. Hier spielen die festgelegten Schnittstellen zusammen mit einer logischen Trennung der experimentellen und der administrativen Seite eine tragende Rolle. Nur so lässt sich das Ziel eines von Ort und Zeit unabhängigen Bedienens des Experimentes vom Studenten realisieren. Zusätzlich müssen auch noch ganz alltägliche Dinge wie z.B. die Unabhängigkeit vom Betriebssystem des Benutzerrechners oder dessen Computerarchitektur bedacht werden. In der vorliegenden Architektur wurde deswegen ein großer Wert auf die Bedienbarkeit über einen gewöhnlichen Web-Browser gelegt, da in diesem Bereich eine systemübergreifende Standardisierung schon soweit fortgeschritten ist, um die problemlose Bedienung auf allen Benutzerrechnern zu garantieren.

Auch muss in Bezug auf die benutzerfreundliche Auslegung des Angebotes eine möglichst flexible Buchung der einzelnen Reservierungszeiträume möglich sein. Ebenfalls muss man sich auch über die Rolle der Tutoren in diesem System klar werden. Bei einer durchgehenden Verfügbarkeit haben Erfahrungen aus deutschlandweit angebotenen Experimenten gezeigt, dass die Roboter zu jeder Tages- und Nachtzeit benutzt werden.

Bei dem hier bereitgestellten weltweiten Zugang und bei der Benutzung der Experimente durch Studenten auf verschiedenen Kontinenten und somit auch aus verschiedenen Zeitzonen werden die Roboter rund um die Uhr im Betrieb sein. Somit bleibt als einzige sinnvolle Art den Tutor einzubinden eine asynchrone Kommunikation über bewährte

Techniken wie e-mail oder ein in das System integriertes Messaging zwischen dem Tutor und den Studenten.

Der letzte zu berücksichtigende Aspekt betrifft die Umsetzung des Experiments selbst. Die verschiedenen am Experiment beteiligten Komponenten (Hardware und auch Anzeigeelemente auf der Benutzerschnittstelle) sollten so zu bedienen sein, dass eine intuitive Steuerung der Hardware möglich ist und sich die Studenten voll und ganz auf den Lerninhalt des Experiments konzentrieren können.

Auch die Tutorials spielen hier eine große Rolle - je besser deren Struktur, umso leichter wird der Student durch das Experiment geführt, was gleichzeitig auch zu einer Entlastung des Tutors führt. Da man allerdings nicht voraussetzen kann, dass alle Studenten über den gleichen Wissensstand verfügen wurde im vorliegenden Tele-Labor folgender Ansatz gewählt: Die Tutorials geben eine kurze Darstellung über das benötigte Wissen. Sollte das Wissen schon vorhanden sein können diese Kapitel übersprungen werden. Für den Fall dass noch Nachholbedarf besteht, ist zu den einzelnen Themengebieten noch weiterführende Literatur aufgeführt.

DIE ARCHITEKTUR - INFRASTRUKTUR

Um den im folgenden Abschnitt beschriebenen logischen Aufbau zu realisieren ist ein gewisses Minimum an Infrastruktur nötig. Grundlegende Eigenschaften wie Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit und vertretbarer Verwaltungsaufwand, sowie der modulare Aufbau der gesamten Architektur sind hierbei unabdingbar. Abbildung 1 zeigt die Hauptbestandteile des realisierten Systems. Die Systeme aus früheren Projekten wurden weiterentwickelt um die nötige höhere Modularität für den geplanten internationalen Einsatz in Verbindung mit der verteilten Bereitstellung zu erreichen [15][16].

Die im folgenden Abschnitt beschriebene logische Komponente ist dabei auf einem *Web-Server* realisiert worden. In Verbindung mit dem *Datenbank-Server* können so das zentralisierte Resource-Management, die Benutzerverwaltung, die Authentifizierung, das Überwachen des Lernfortschritts der Studenten, die Zugangskontrolle und die Administration des eingesetzten Portals relativ problemlos bereitgestellt werden. Wie man auch noch in Abbildung 1 sehen kann sind die einzelnen Experiment Module völlig eigenständig. Sie benötigen so lediglich eine Internetverbindung und eine übersichtliche Schnittstelle für die benötigte Authentifizierung - diese wird in einem der folgenden Abschnitte genauer beschrieben.

DIE VERWALTUNG - DER LOGISCHE AUFBAU

Die Schlüsselkomponente des vorgestellten Tele-Labors ist der implementierte logische Aufbau (*administrative framework*). Dieser Abschnitt wird eine kurze Übersicht über die wichtigsten Funktionalitäten geben welche den Grundstein für die benötigte Flexibilität und Skalierbarkeit legen. In Abbildung 4 werden die Beziehungen der wichtigsten Komponenten des logischen Aufbaus beschrieben. Auf der untersten Ebene befinden sich die Ressourcen - in unserem Fall sind dies die Roboter. Eine Ressource kann einer Anzahl Experimenten zugeordnet werden, wobei ein Experiment immer nur eine Ressource besitzen darf.

Ein wichtiges Attribut ist der Typ der Ressource. Es gibt zum einen *multiple use* und zum anderen *exclusive resource*. Eine Ressource vom Typ *exclusive resource* kann nur von einem Studenten zur gleichen Zeit genutzt werden - d.h. sollte nur ein Exemplar eines bestimmten Roboters zur Verfügung stehen, wäre dieser natürlich vom Typ *exclusive resource*. Der Typ *multiple use* wurde eingeführt um z.B. entwickelte Simulationsprogramme, die in mehreren Instanzen laufen können, von mehreren Studenten gleichzeitig ausführen zu lassen.

Die Experimente selbst werden in der Komponente *Experiments* repräsentiert. Hier wird dann auch die benötigte Hardware (*Resources*) mit den entsprechenden Beschreibungen und des Tutorials des Experiments in Verbindung gebracht.

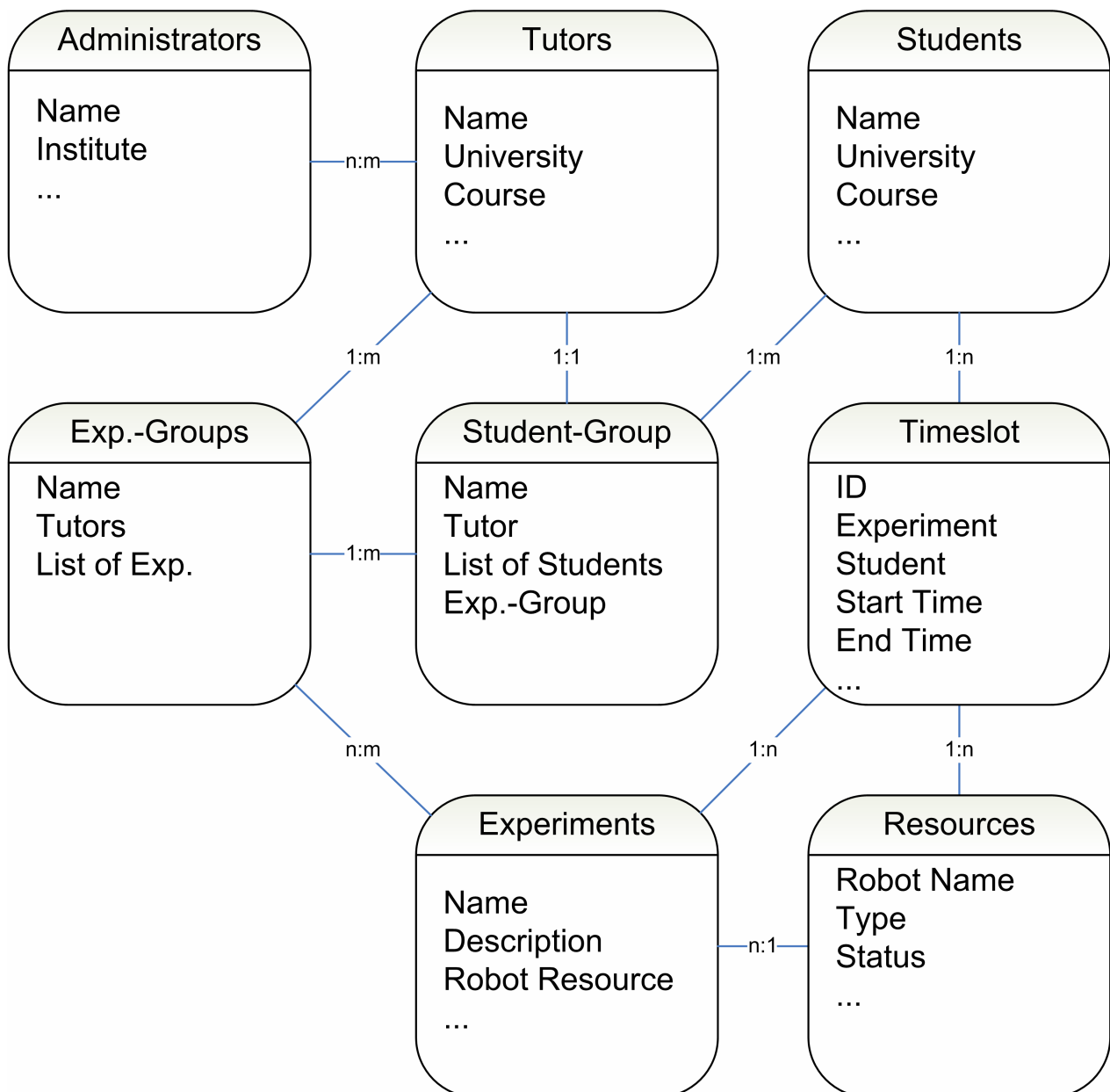


Abbildung 4: Die wichtigsten Beziehungen im logischen Aufbau.

Auf der nächsten Ebene befinden sich die Komponenten *Student Groups*, *Experiment Groups* und *Timeslot*. Die Komponente *Experiment Groups* dient dazu einen Kurs mit einer bestimmten Kombination von Experimenten zu repräsentieren. Sie enthält Elemente des Typs *Experiments* und bekommt einen Tutor zugeordnet - in diesem Fall ist dies dann der Ansprechpartner für technische Probleme. Die Komponente *Student Groups* wird zur Erfassung des Kurses verwendet. Je nach Teilnehmeranzahl werden hier dann Tutoren zur fachlichen Betreuung zugeordnet. *Timeslot* repräsentiert ein reserviertes Zeitintervall für ein Experiment.

Es ist genau einem Student, ein Experiment und eine Ressource zugeordnet. Bei der Implementierung ist auch zu beachten dass hier sowohl der Typ der Ressource als auch die Verfügbarkeit zur gewünschten Zeit beachtet werden muss, da eine Ressource ja auch durchaus von mehreren Experimenten genutzt werden kann.

Des Weiteren existieren auch noch Komponenten für die Studenten (*Students*), Tutoren (*Tutors*) und Administratoren (*Administrators*). *Students* enthält alle persönlichen Informationen über den registrierten Studenten wie z.B. die zugeordnete Universität, der Name und der jeweilige Kursname. Die *Tutors*-Komponente enthält den Namen des Tutors und den zugeteilten Kurs. Die Administratoren sind berechtigt die Tutor-Kurs Zuordnungen und die Studenten-Zuordnungen indirekt festzulegen. Im Vergleich zu früheren Implementierungen verfügt das hier präsentierte System über viele Verbesserungen, die es zu einem mächtigen Werkzeug zum weltweiten Anbieten von Hardware-Experimente mit einem geringen Verwaltungsaufwand und der geforderten Skalierbarkeit machen [16]. Die vorgestellte modulare, aber dennoch übersichtliche Architektur, ermöglicht ein leichtes Erstellen von verschiedenen Kursen mit

einem oder mehreren der vorerst acht erstellten Experimente, wobei dann ein Kurs von ebenfalls mehreren Studentengruppen genutzt werden kann. Abbildung 5 zeigt die Web-Oberfläche für einen Tutor. Hier sieht dieser einen Überblick über alle wichtigen Aktivitäten in der von ihm betreuten Gruppe und erlangt Zugriff auf wichtige Werkzeuge die zum Verwalten und Betreuen seiner Gruppe nötig sind.

So kann in diesem Portal je nach Berechtigung auf Teile der Benutzerverwaltung, die Übersicht über den Zustand der relevanten Hardware, die Aufgabenverteilung und deren Verwaltung zugegriffen werden. Die Rechtevergabe über die jeweiligen Funktionalitäten wird von zuständigen Personen aus der Administratoren-Gruppe vorgenommen.

BEISPIELIMPLEMENTIERUNG EINES EXPERIMENTS AN DER JMUW

Für die Implementierung eines Experimentiermoduls werden mindestens ein Internetzugang und eine logische Einheit, der *robot control server*, benötigt [18]. Der *robot control server* ist für die Verarbeitung der Steuerkommandos zuständig, welche er über das Internet von dem experimentierenden Studenten empfängt. Die Verarbeitung umfasst dabei mehrere Teilschritte, wie Umsetzung von Steuerkommandos, Weiterleitung von Nachrichten und Auswerten von Sensorwerten. Als Schnittstelle zum *robot control server* wurde eine spezielle Anwendung entworfen, die es dem Studenten ermöglicht die gewünschten Befehle einzugeben und die empfangenen Sensorwerte des Roboters zu überprüfen, weiterhin ist die Anwendung für die Authentifizierung zuständig. Diese ist besonders wichtig, da sie den unrechtmäßigen Gebrauch der Hardware durch Dritte verhindert und so auch erst die Koordination von vielen Studenten ermöglicht. Für die Implementierung der Authentifizierung steht das *authentication interface* des *administration framework* zur Verfügung. Um diese Schnittstelle der Authentifizierung möglichst flexibel zu halten und den hohen Sicherheitsanforderungen der Hardware zu genügen, wurde der Authentifizierungsmechanismus auf Basis des http Protokolls aufgebaut. Eine weitere Schnittstelle zur Kommunikation mit den Studenten ist das eingebaute Prüfungsfragen-System. Damit ein Student den Zugang zu einem Experiment erhält, muss er sich zunächst in den zu erarbeitenden Lerninhalt einlesen. Zu diesem Zweck können individuell gestaltete Tutorials im *administration framework* von der Universität bereitgestellt werden. Mit Hilfe einfacher Prüfungsfragen soll der gelesene Inhalt abgefragt werden. Auf diese Weise wird verhindert, dass

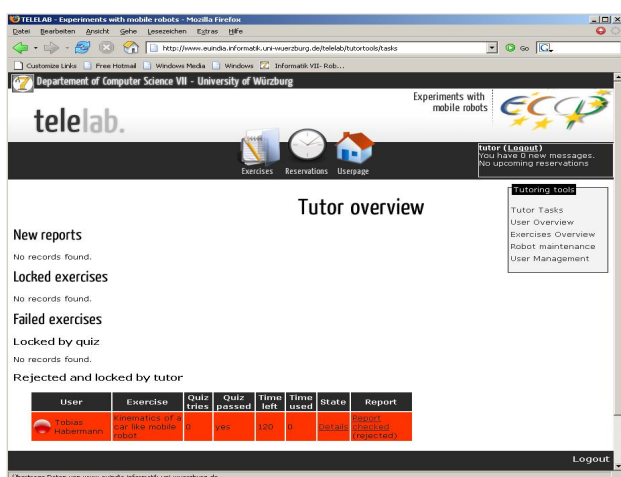


Abbildung 5: Tutoren Web-Oberfläche.

Studenten unvorbereitet die Experimente beginnen und dafür Zeit reservieren. Die Prüfungsfragen müssen im XML Format angelegt werden und können so vom *administration framework* selbstständig für den Test benutzt werden. Bis auf diese wenigen Schnittstellen können die teilnehmenden Partner-Universitäten die Gestaltung ihrer Experimentiermodule vollkommen selbst bestimmen, die Schnittstellen dienen lediglich der Erleichterung ansonsten aufwendiger Arbeitsschritte, sowie der Koordination der Studenten. Der folgende Abschnitt beschreibt im Detail die Realisierung des Experimentmoduls der Julius Maximilians Universität Würzburg.

In der Realisierung des Experiments an der Universität Würzburg sind ebenfalls die oben genannten Schnittstellen implementiert, dabei wurde strikt auf die Trennung des Experimentiermoduls und des *administration framework* geachtet. Die abstrakte Darstellung der Architektur ist in Abbildung 6 gezeigt. Das Experimentiermodul an sich ist wiederum in drei große Teile untergliedert. Teil 1 umfasst die Hardware, in diesem Fall den Roboter MERLIN und die Steuerungseinheit (*robot control*). Mit Hilfe der *robot control* Komponente kann der MERLIN Roboter über das Internet gesteuert werden. Sie *übersetzt* hierfür Befehle aus dem Internet (über TCP/IP) in Befehle für MERLIN (über serielle Schnittstelle). Teil 2 besteht aus verschiedenen Sensor Komponenten, die das Experiment überwachen und Werte zum Ablauf des Experiments aufzeichnen.

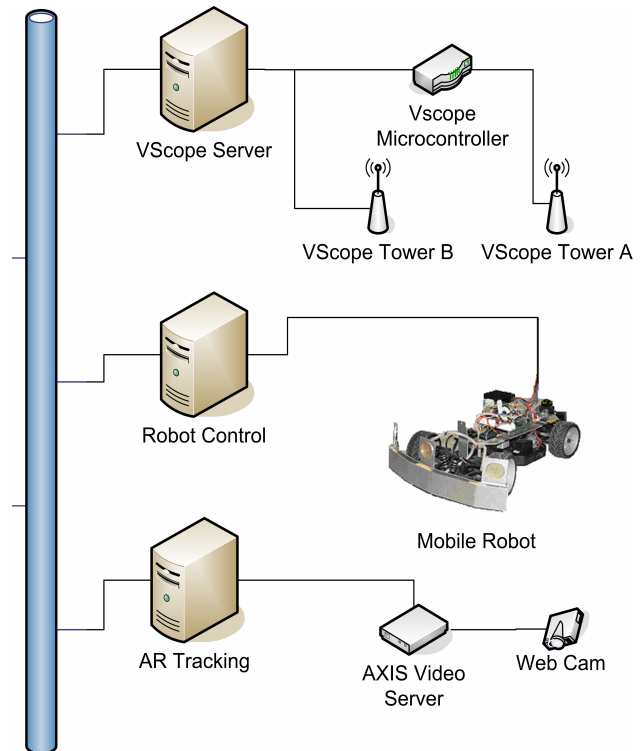


Abbildung 6: Experimentaufbau.

Der letzte und wichtigste Teil ist der *robot control server* (siehe Abbildung 7), welcher die Software und Hardware Komponenten organisiert und synchronisiert. Das Organisieren umfasst zum einen das Sammeln von Sensorwerten und deren Weiterleitung an den Benutzer, sowie auch die

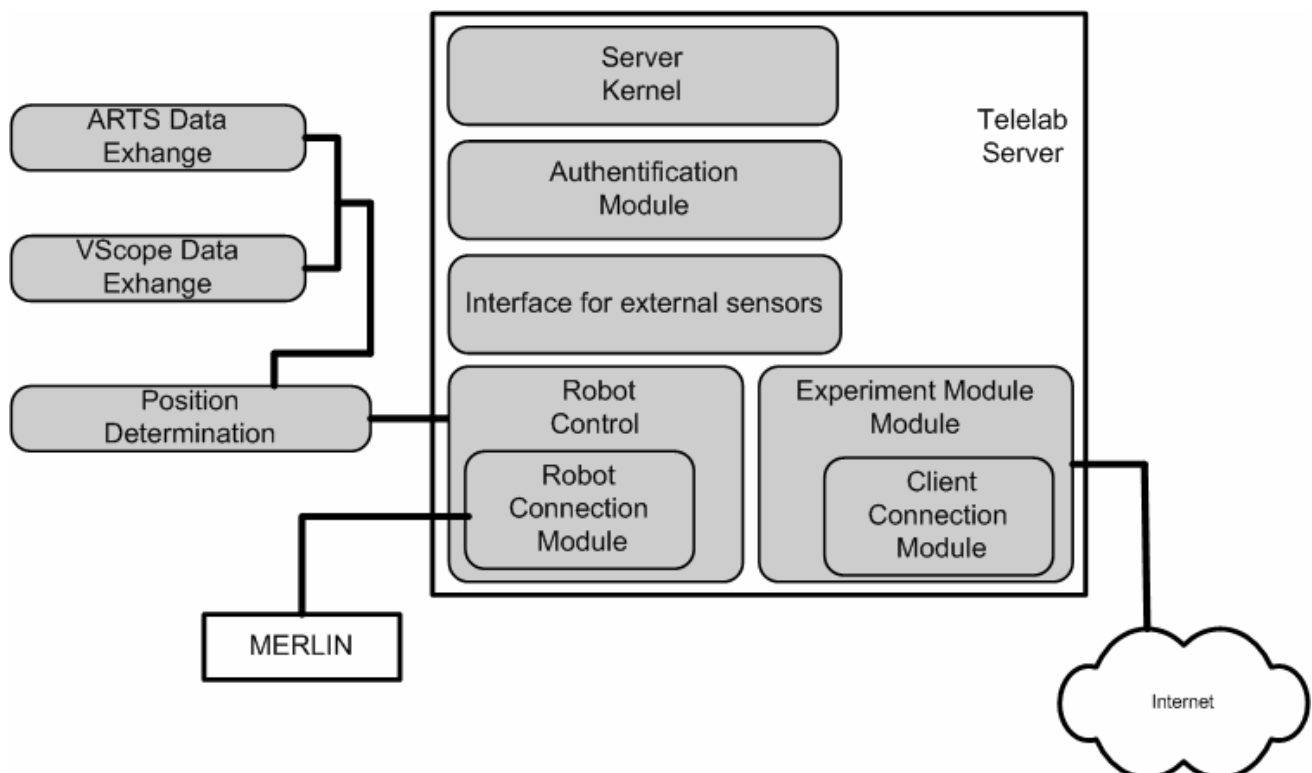


Abbildung 7: Der Robot Control Server in Würzburg.

Weiterleitung von Steuerkommandos an die Hardware. Die Funktionen des *robot control server* müssen deshalb besonders zuverlässig sein, da nur durch seine korrekte Arbeitsweise ein reibungsloser Experimentierablauf garantiert werden kann. Zusätzliche Aufgabe des *robot control server* ist das Ausführen der Authentifizierungsprozedur. Ein sehr nützliches Feature, das weiterhin integriert wurde, ist das eigenständige Erkennen von Fehlern, welche das System zu einer Benachrichtigung des Administrators veranlassen. So können auftretende Fehler (z.B. Ausfall der Stromversorgung) schnell erkannt und behoben werden um den regelmäßigen Betrieb wieder aufnehmen zu können. Die komplette Architektur des Systems wurde in Java geschrieben und ist so unabhängig von dem zugrunde liegenden Betriebssystem. Für das *International Virtual Laboratory on Mechatronics* wurde eine SuSe Linux Distribution als Betriebssystem gewählt.

Ein besonderes Merkmal des *robot control server* ist die Möglichkeit ihn für verschiedene Experimente einsetzen zu können. Natürlich können nicht zwei Experimente mit der gleichen Roboterhardware gleichzeitig durchgeführt werden, aber es ist möglich für Experimente mit komplett unterschiedlichen Lerninhalten diese eine Hardware zu verwenden. Das modulare Design (siehe Abbildung 7) ermöglicht den Einsatz in verschiedenen Experimenten. Normalerweise sollte ein Experiment eine spezialisierte Benutzer-

oberfläche (GUI) für jedes Experiment zur Verfügung stellen, um den Anforderungen des Experimentierablaufs möglichst gut zu entsprechen. Durch die Möglichkeit neue Module in die Experimentierumgebung zu integrieren, können so auch verschiedene Testreihen mit dem gleichen *robot control server* durchgeführt werden.

In Abbildung 7 wird dieses Modul mit *experiment module* bezeichnet, es besitzt eine Instanz des Objekts *Client Connection Module*, welches sich mit dem spezifischen Client Programm verbinden kann. Eine detaillierte Beschreibung der Anforderungen, des Entwurfs und der Implementierung des *robot control server* wird in weiteren technischen Veröffentlichungen publiziert. Teil 3 des Systems, die Sensorik, wird benutzt um den Benutzer einen Eindruck von der Experimentierumgebung zu vermitteln. Dabei werden verschiedene Arten von Sensoren eingesetzt um den Benutzer über die Position und Status des Roboters zu informieren. Darunter befinden sich Hall Sensoren, Gyroskop und Ultraschallsensoren auf dem mobilen Roboter.

Weiterhin werden zwei verschiedene Systeme zur genauen Positionsbestimmung des Roboters bereitgestellt. Dies ist zum einen ein Vscope, welches sehr präzise mit Infrarotsensoren die Position und Orientierung des Roboters messen kann, zum anderen eine Webcam die ebenfalls eine Positionsbestimmung ermöglicht [17]. Eine automatische Nachführung der

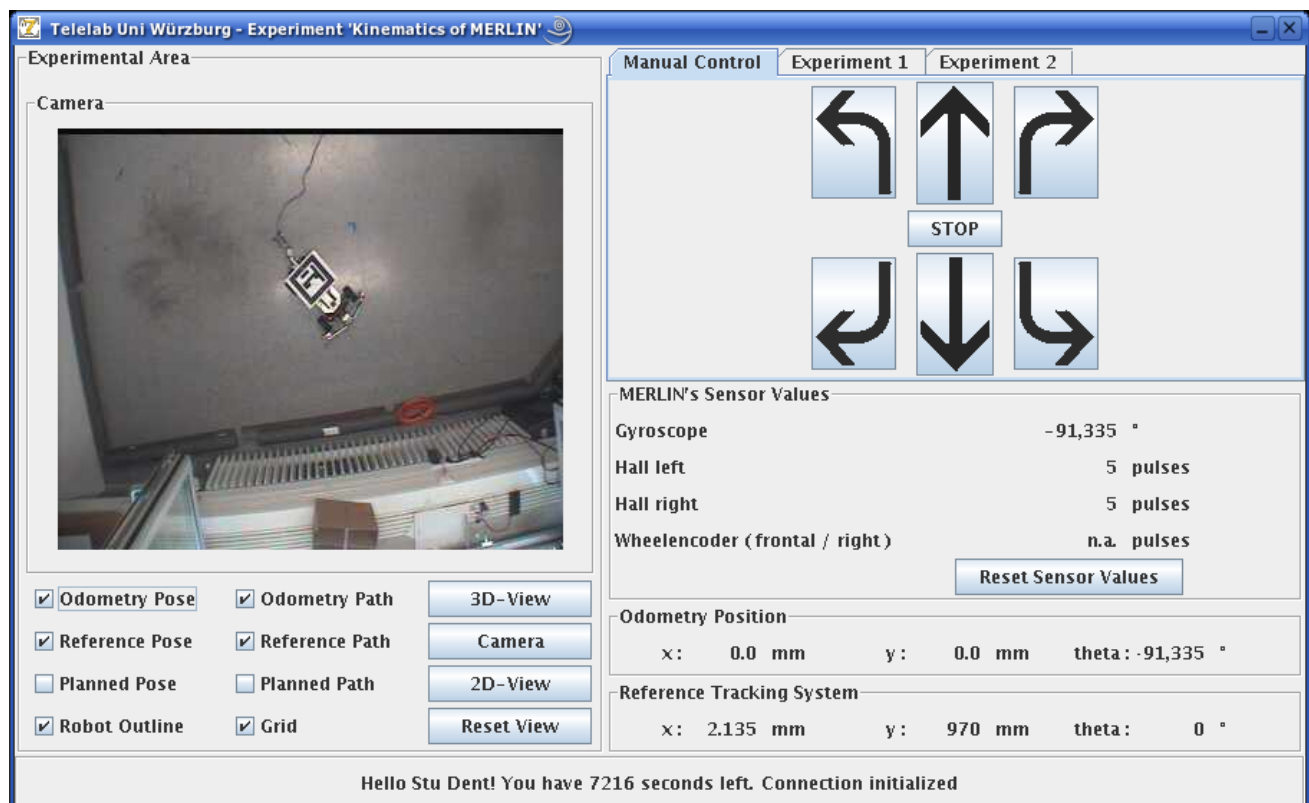


Abbildung 8: Bedienoberfläche mit Videobild.

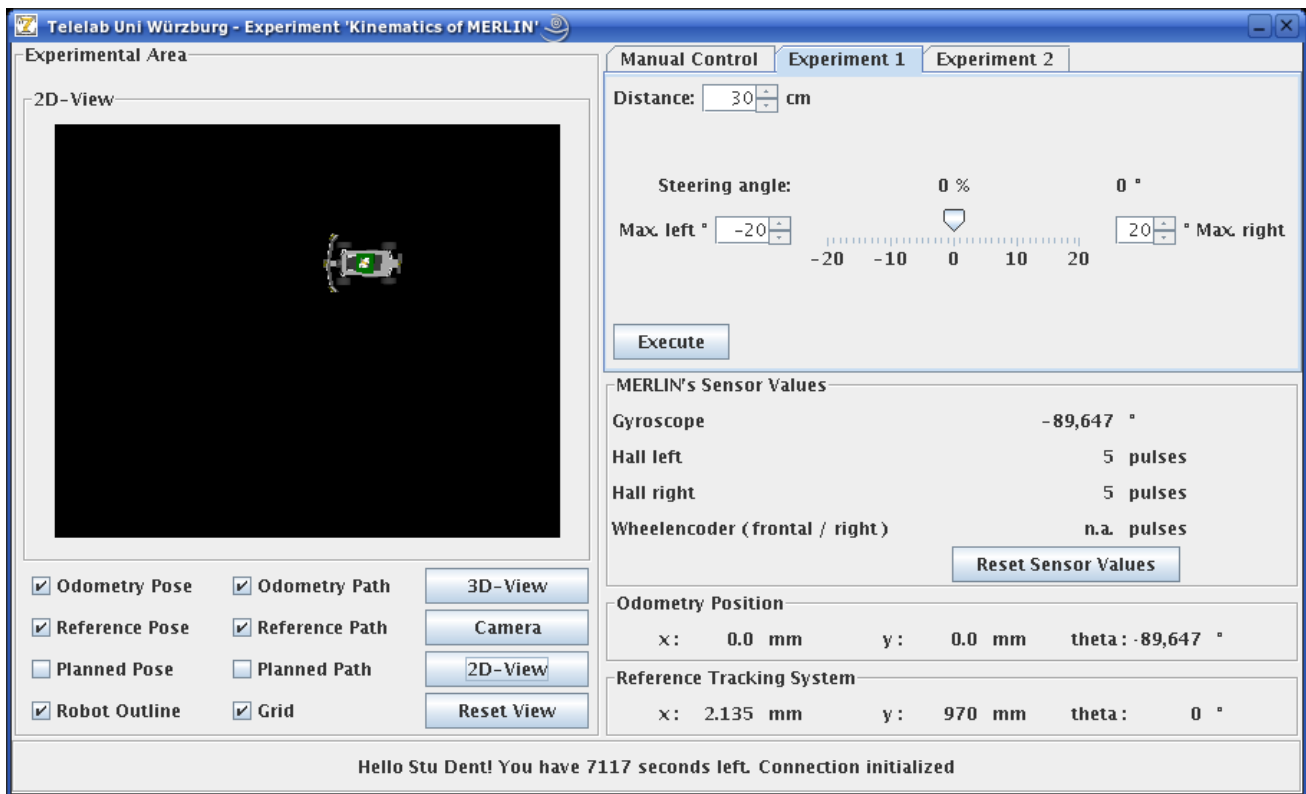


Abbildung 9: Bedienoberfläche mit 2D Experimentumgebung.

Kamera bei Bewegung des Roboters ist implementiert, zusätzlich wird das Kamera Bild über das Internet zum Benutzer übertragen.

GESAMMELTE ERFAHRUNGEN

Bei dem präsentierten internationalen Projekt mussten insbesondere noch neue Probleme hinsichtlich Beschränkungen in der Kommunikationsverbindung berücksichtigt werden - im Gegensatz zu inner-europäischen Verbindungen, die sich durch kurze Verzögerungszeiten, kaum Paketverluste und einer großen Bandbreite auszeichneten. Gerade die durchschnittliche Verzögerung und Paketfehlerrate bei Verbindungen zwischen Europa und Indien schränken das Design der Experimente für Tele-Labors zusätzlich ein.

Das Problem einer zu geringen Bandbreite konnte gelöst werden, indem der bandbreiten-intensive Video-Stream durch eine virtuelle Darstellung des Experiments ersetzt wurde [17]. Um dabei eine möglichst detailgetreue Darstellung zu erzeugen, werden die Positionsdaten der Sensoren für diesen Zweck eingesetzt (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9). Als weitaus schwierigere Probleme erweisen sich die auftretenden Paketfehler und die große Verzögerung in den Griff zu bekommen. Hier wird in Zukunft verstärkt daran gearbeitet die Steuerung oder die Regelung von Robotern zu verbessern.

ZUSAMMENFASSUNG

Die hier vorgestellte Plattform verbindet die Vorteile des Tele-learning mit der hardware-nahen Arbeit an Experimenten. Unter dem Namen *International Virtual Laboratory on Mechatronics* stellen verschiedene Universitäten aus Indien, Spanien und Deutschland Studenten aus aller Welt neue Möglichkeiten des Studiums zur Verfügung. Die Lerninhalte sind überall und ständig verfügbar. Es wird so eine effiziente Nutzung von hochwertiger Hardware zu Ausbildungszwecken ermöglicht. Die durch die großen Distanzen auftretenden Probleme - von der Betreuung der Studenten, über die Verwaltung der verteilten Hardware-Komponenten bis hin zu Problemstellungen im Bereich der Kommunikationsverbindung, lassen sich mit dem hier vorgestellten Framework lösen.

Die modulare Struktur des Systems erlaubt ein individuell zugeschnittenes Design der Lerneinheiten für die Anforderungen der zugrunde liegenden Telekommunikationsstruktur. Alle Experimente können daher auch leicht zu verschiedenen Zwecken kombiniert werden, wie beispielsweise bei virtuellen Klassenräumen oder Tele-Praktika. Die Betreuung der Experimente kann dabei ebenfalls individuell durch eine individuelle Zuteilung von Tutoren gestaltet werden. Die für das *International Virtual Laboratory on Mechatronics* entwickelte Architektur

ermöglicht so die weltweite Vernetzung von Ressourcen um den internationalen Einsatz von Lerneinheiten in der Ausbildung effektiv zu ermöglichen.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des *European Cross Cultural Programme* der EU. Dieser Beitrag stützt sich auf gemeinsame Forschungsaktivitäten mit dem Department of System and Automation Engineering der Universidad Carlos III de Madrid in Spanien, dem Department of Mechanical Engineering der Anna University in Chennai, Indien und dem Department of Computer Science and Engineering des Thiagarajar College of Engineering in Madurai, Indien.

QUELLENANGABEN

1. Dormido, S. (Hrsg.), *Proc. IFAC Workshop on Internet Based Control Education*. Madrid: Pergamon Press (2001).
2. Goldberg, K. und Siegwart, R., *Beyond Webcams - an Introduction to Online Robots*. Boston: MIT Press (2001).
3. Schilling, K., Roth, H. und Lieb, R., Remote control of a *Mars Rover* via Internet to support education in control and teleoperations. *Acta Astronautica*, 50, 173-178 (2002).
4. Schilling, K. und Roth, H. (Hrsg.), *Proc. Inter. Workshop on Tele-Education in Mechatronics Based on Virtual Laboratories*. Weingarten, Deutschland (2001).
5. Weinberg, J.B. und Yu, X., *IEEE Robotics & Automation Magazine*. Special Issue auf Robotics in Education, 10, 2/3 (2003).
6. Casals, A. und Grau, A., *Proc. 1st Workshop on Robotics Education and Training*. RET, Weingarten, Deutschland (2001).
7. Schmid, D., Gruhler, G. und Fearn, A. (Hrsg.), *eLearning*. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel (2003).
8. Marin, R., Sanz, P. und Schilling, K. (Hrsg.), *J. of Robotic Systems*. Special Issue auf Internet und Online Robots für Telemanipulation, 22, 3 (2005).
9. Bicchi, A., Caiti, A., Pallottino, L. und Tonietti, G., Online robotic experiments for tele-education at the University of Pisa. *J. of Robotic Systems*, 22, 4, 217-230 (2005).
10. Schilling, K., Adami, T.M. und Irwin, R.D., A virtual laboratory for space systems engineering experiments. *Proc. 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace*, Bologna, Italy, 326-331 (2001).
11. White, W.E., Zywno, M.S., Brimley, W.J.G. und Northwood, D.O., Integrating new and traditional pedagogies for effective interactive learning in engineering education. *Proc. 12th Canadian Conf. on Engng. Educ.*, Victoria, Canada, 223-228 (2001).
12. Schilling, K., Roth, H. und Rösch, O.J., Mobile mini-robots for engineering education. *Global J. of Engng. Educ.*, 6, 1, 79-84 (2002).
13. Zysko, G., Barza, R., Schilling, K., Ma, L. und Driewer, F., Remote experiments on kinematics and control of mobile robots. *Proc. 5th IFAC Symp. on Intelligent Autonomous Vehicles*, Lisbon, Portugal (2004).
14. Zysko, G., Barza, R. und Schilling, K., TeleLab using non-holonomic car-like mobile robot. *Proc. IFAC Workshop*, Grenoble, France (2004).
15. Zeiger, F. und Schilling, K., Remote laboratories on mobile robotics. *IEEE Computer Society - Technical Committee on Learning Technology (LTT)*, 7, 3 (2005).
16. Zeiger, F. und Schilling, K., Experiments with mobile robots in tele-education. *Proc. 3rd. Deutsche e-learning Fachtagung Informatik (DeLFI 2005)*, Rostock, Deutschland (2005).
17. Sauer, M., Zeiger, F., Driewer, F. und Schilling, K., Remote control on mobile robots in low bandwidth environments. *Proc. Inter. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Barcelona, Spain, 163-168 (2005).
18. Zeiger, F. und Schilling, K., Remote laboratories for mobile robots. *Proc. Research and Education in Mechatronics (REM2005)*, Annecy, France (2005).
19. Schilling, K. und Meng, Q., The MERLIN vehicles for outdoor applications. *Proc. 4th SPIE Conf. on Unmanned Ground Vehicle Technology*, Orlando, USA (2002).

BIOGRAPHIEN



Florian Zeiger war bis 2004 Informatikstudent an der Bayerischen Julius-Maximilians Universität Würzburg. Nach dem erfolgreichen Abschluss begann er im Mai 2004 seine Promotion am Lehrstuhl für Robotik und Telematik. Die derzeitigen Arbeitsgebiete umfassen die Fernsteuerung

und Vernetzung mobiler Roboter, Telematik und Telekommunikation für vernetzte mobile Roboter und Tele-Laboratorien im Bereich der mobilen Roboter.



Marco Schmidt promoviert zurzeit am Lehrstuhl für Robotik und Telematik in Würzburg. Nach dem Absolvieren seines Informatik-Studiums an der Universität Würzburg beschäftigt er sich nun seit Mai 2006 mit den Bereichen Telekommunikation bei mobilen Robotern, Pico-

Satelliten und Tele-Ausbildung mit mobilen Robotern.



Klaus Schilling ist Ordinarius am Lehrstuhl für Robotik und Telematik im Institut für Informatik der Universität Würzburg. Er arbeitete in der Raumfahrtindustrie und war für Machbarkeitsanalysen interplanetarer Raumfahrtmissionen verantwortlich. Die Forschungsschwerpunkte

liegen in den Bereichen Sensor- und Regelungssysteme für autonome und ferngesteuerte mobile Roboter.