

---

# Virtuelle Labors für Experimente in der Mechatronik\*

**Hubert Roth**  
**Otto J. Rösch**  
**Jörg Kuhle**  
**Alexander Prusak**  
**Ana Hernán González**

*Universität Siegen, Hölderlinstr. 3, D-57068 Siegen, Deutschland*

---

Die Universität Siegen nimmt an verschiedenen virtuellen Laborprojekten im Bereich der Regelungstechnik, Mechatronik und Telematik teil. Die Schwerpunkte liegen in der technischen Realisierung der Fernsteuerung von entfernt gelegenen realen Laborexperimenten über das Internet, und deren didaktischer Aufbereitung. Diese Experimente decken den praktischen Teil der Lehre ab. Das eine Experiment behandelt die Pfadplanung mobiler Roboter, das Zweite umfasst die Regelung flexibler Strukturen. Der Zugriff zu den entfernten Laboren wird über ein sogenanntes E-Learning Webportal ermöglicht, welches auch ein Buchungs- und Sicherheitssystem für die Versuche beinhaltet. In diesem Bericht werden zunächst verschiedene nationale und internationale Projekte beschrieben, in welchen die Universität Siegen mitarbeitet. Danach wird der technische Aufbau mit den dazugehörigen Lehreinheiten beschrieben. Abschließend wird die Funktionalität des Webportales vorgestellt, welches alle Lehreinheiten der beteiligten Partner als geschlossene Einheit verwaltet.

---

## **EINLEITUNG**

Die Entwicklung von multimedialen Plattformen zur Fernsteuerung einer realen Hardware ist ein aktuelles Thema, insbesondere bei der Fernlehre in den Ingenieurwissenschaften. Das Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik der Universität Siegen ist an verschiedenen nationalen und internationalen Projekten beteiligt, bei denen Laborexperimente über das Internet ferngesteuert werden. Diese Experimente werden zur Unterstützung der Vorlesungen in der Regelungstechnik und Mechatronik eingesetzt. Die nationalen Projekte sind LearNet (Lernen und Experimentieren an realen technischen Anlagen im Netz) und *Learn2Control* (Multimediale Lernumgebung für projektorientiertes Lernen der Methoden der Regelungstechnik), die internationalen Projekte sind IECAT (Innovative Educational Concept for

Autonomous and Teleoperated Systems) und TEAM (Tele-Education in Aerospace and Mechatronics Using a Virtual International Laboratory). Pädagogisch hochwertige Lehreinheiten in Verbindung mit fernsteuerbarer Hardware stellen innovative Laborexperimente für die Lehre in den Ingenieurwissenschaften dar. Die Einbeziehung einer großen Anzahl von Studierenden an den Partneruniversitäten bildet zusammen mit verschiedenen Mobilitätsprogrammen die Basis für einen regen internationalen Austausch von Studierenden. Insbesondere in den transatlantischen Projekten profitieren Studierende von den fortgeschrittenen Technologien in einer internationalen Umgebung. Bei allen Projekten werden reale Laborexperimente an das Internet gebunden.

Mit der Fernsteuerung und Fernüberwachung mobiler Roboter befasst sich das erste Experiment. Die Aufgabe der Studenten ist Modellbildung sowie die dynamische und kinematische Systemidentifikation unterschiedlicher Parameter eines Roboters. Nach diesen Vorarbeiten kann eine Geschwindigkeitsregelung für den Roboter entworfen werden.

Das zweite Experiment ist eine flexible mechanische Struktur. Diese Testplattform dient zur Schwingungserfassung und, nach dem Entwurf eines

---

\*Dieser Artikel ist eine erweiterte und überarbeitete Version eines auf dem *6<sup>th</sup> Baltic Region Seminar on Engineering Education* (Wismar, Deutschland, 23.-25. September 2002) gehaltenen Vortrages. Der ursprüngliche Artikel wurde durch eine Wahl der Seminarteilnehmer als bester Artikel der Seminarpublikationen mit dem *UICEE Diamant Award* (erste Klasse) ausgezeichnet.

entsprechenden Regelungsgesetztes, zur Vibrationsdämpfung flexibler Strukturen. Ziel der Lehreinheit ist die Systemidentifikation und Regelung dieser flexiblen Struktur. Abschließend soll die Güte des Regelalgorithmus bewertet werden.

Jedes Laborexperiment umfasst eine zusammenhängende und komplette Lehreinheit. Um Studierenden eine Hilfe in den aktuellen Gebieten zu geben, werden Links zu öffentlichen Tutorials und Dokumentationen zu den entsprechenden Lehreinheiten über das Internet bereitgestellt. Bevor Studierende das Experiment online steuern können, muss eine Wissensüberprüfung vorgenommen werden, welche aus Multiple-Choice Fragen besteht.

Aufgrund der Tatsache, dass jedes Experiment nur einmal verfügbar ist, muss eine Zugriffskontrolle implementiert werden. Nur registrierte Studenten bekommen den Zugriff auf das Experiment für eine limitierte Zeit. Deshalb ist die Implementierung der fernsteuerbaren Laborexperimente in einem sogenannten Webportal notwendig, welches die Registrierung und den Zugriff eines jeden Experimentes regelt.

## REGELUNG FLEXIBLER STRUKTUREN

Bei großen flexiblen technischen Konstruktionen wie Gebäuden, Flugzeugen oder Raumfahrtssystemen treten Strukturschwingungen auf. Während für starre Gebilde sehr genaue theoretische dynamische Modelle entwickelt werden können, sind Aufgabenstellungen wie Modellierung, Identifikation und Reglerentwicklung für flexible Strukturen deutlich schwieriger zu lösen. Am Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik an der Universität Siegen wird in einem Laborversuch ein Experiment zur hochgenauen Positionierung und Schwingungsdämpfung bei flexiblen Strukturen entwickelt. Dazu wurde ein metallischer Stab frei schwingend aufgebaut.

Die schematische Darstellung des *Schwingenden Stabes* wird in Abbildung 1 gezeigt. Die Hauptkomponente ist ein Stab aus Aluminium, der direkt an der Ankerwelle eines Gleichstrommotors befestigt ist. Die Anregung des Stabes erfolgt am oberen Ende des Stabes. Der Gleichspannungsmotor bringt als Aktuator ein Drehmoment auf das obere Ende des Stabes auf. Bei einem Vergleich des Stabquerschnittes (4x10 mm) mit der Stablänge (1600 mm), ist leicht erkennbar, dass es sich um ein hinreichend flexibles Gebilde handelt [1]. Das hier beschriebene Experiment geht auf Untersuchungen für die NASA zum Schwingungsverhalten des Hubble Space Telescops zurück [2].

Bei der Durchführung dieses Versuchs sollen die Studierenden die in der Vorlesung erarbeiteten

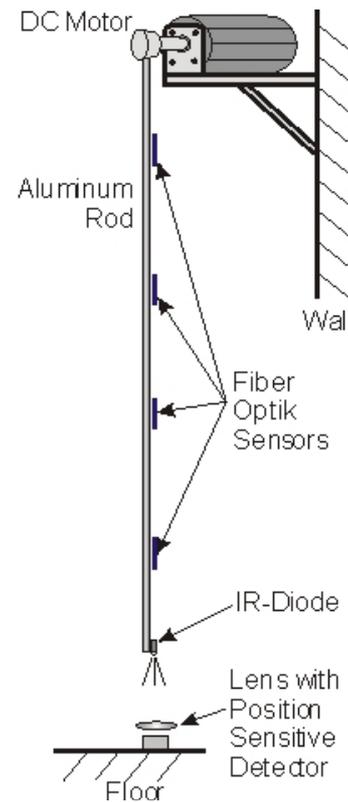


Abbildung 1: Schematische Darstellung des schwingenden Stabes.

Regelungstheorien zur Schwingungsdämpfung an einem realen System anwenden. Dabei müssen sie die Strukturschwingungen des Stabes analysieren, daraus ein theoretisches Modell erstellen, einige Systemparameter identifizieren und schließlich eine Regelung entwerfen und den Algorithmus implementieren. Mögliche Aufgabenstellungen sind z.B. den Stab möglichst schnell in Ruhelage zu versetzen, oder die Stabspitze auf einer bestimmten Position halten. Die erzielten Ergebnisse werden aufgezeichnet und können später mittels der Software *Matlab* mit der Daten der Simulation verglichen werden. Dabei können Rückschlüsse auf das Entwurfsmodell gezogen werden.

## Hardware

Das Experiment ist über zwei Datenerfassungskarten mit einem Server verbunden. Eine Zählerkarte wertet die Signale des Motorencoders aus. Die zweite Schnittstellenkarte ist eine frei programmierbare Digital-Analog - I/O Karte. Sie erfasst die Sensorsignale des Positionssensors (PSD), sowie den tatsächlichen Strom am Motor. Zur Ansteuerung des Motorverstärkers wird ein Analogausgang der Karte verwendet. Ein Operationsverstärker dient als Analog-Motorverstärker. Im Vergleich zu PWM Verstärkern werden keine hochfrequenten Störungen erzeugt.

## Aktuatoren

Ein Gleichspannungsmotor der Firma Maxon dient zur Anregung und Regelung des Stabes. Der 250 Watt Motor hat ein maximales Stillstandsrehmoment von ca. 4 Nm.

## Sensoren

Folgende Sensoren werden zur Messung der Schwingungen verwendet:

- PSD (Position Sensitive Detector) zur Positionserfassung der Stabspitze. An der Stabspitze ist eine senkrecht nach unten strahlende IR-Diode angebracht. Dieser analoge Sensor misst die Position des mit der IR-Diode erzeugten Lichtstrahles. Ein über dem PSD angebrachtes Objektiv erhöht den erkennbaren Arbeitsbereich des Lichtstrahles (Position der Stabspitze). Der lichtempfindliche Analog-Chip mit dem Objektiv ist direkt unterhalb der Stabspitze, auf dem Boden befestigt.
- Zur Winkelmessung der Motorwelle wird ein 4-Quadranten Encoder verwendet, welcher im Motor integriert ist. Bei einer Auflösung von 4000 Impulsen pro Umdrehung wird eine Winkelgenauigkeit von 0.09 Grad der Ankerwelle erreicht.
- Ein Lichtwellenleiter-Sensor wird zur Erfassung der Biegung des Stabes verwendet. Das sogenannte Shape-Tape beinhaltet acht Sensoren in einem Band, jeder Sensor hat eine sensitive Länge von zehn Zentimetern.

## Software

Zur Ansteuerung der Hardware kommt die Software *LabView 6.1* zum Einsatz. Die aktuelle Version ermöglicht das direkte Erstellen von Java-Applets, welche dann über einen Webbrowser geladen werden können (Abbildung 2). Der Browser erhält die volle Kontrolle des *Virtual-Instruments* und kann so die Hardware ansteuern.

Die verwendete Software- und Hardwarekombination ist derzeit nicht echtzeitfähig. Die PCI Schnittstellenkarten sind nicht mit einem eigenen Prozessor ausgerüstet, und werden über den Server unter Windows 2000 gesteuert. Deshalb wird das System zurzeit mit *LabView* nur zur Systemidentifikation verwendet. Eine Erweiterung zur Echtzeit-Regelung des Stabes befindet sich in der Entwicklung, welche dann unter Windows 2000 mit *Matlab* und der Real-Time Windows Target Toolbox realisiert werden kann. Dabei kann auf teure neue

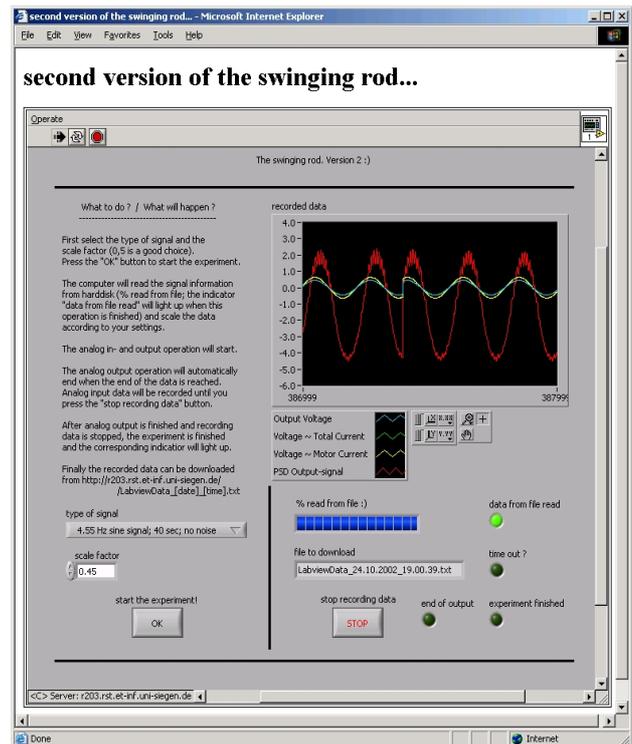


Abbildung 2: LabView Java-Applet zur Fernsteuerung des Schwingenden Stabes.

Hardware verzichtet, und das vorhandene System komplett übernommen werden.

Zur Bearbeitung dieses Experiments benötigt der Benutzer einen Webbrowser und *Matlab*. Um als ersten Schritt eine Systemidentifikation durchführen zu können, wird das System im offenen Regelkreis angeregt. Dazu wird eine *Matlab* Datei verwendet, die einen Vektor enthält, der die Ansteuerung des Motors beinhaltet. Diese Störsignale sind meist sinusförmig, überlagert mit weißem Rauschen.

Auf dem Server liegen mehrere unterschiedliche Dateien, die in einem Auswahlménú selektiert werden können. Danach kann das Experiment über den Browser gestartet werden. Der Client kann die beim Schwingungsexperiment gemessenen Sensordaten (in nahezu Echtzeit) mitverfolgen. Die Messergebnisse werden dabei in einem eigenen Feld graphisch dargestellt. Zusätzlich werden alle Messdaten in eine Datei geschrieben. Für die Systemidentifikation wird diese Datei dann vom Benutzer heruntergeladen und in *Matlab* weiterverarbeitet (Abbildung 3). Die Anregungs-dauer hängt von der Länge der Stördatei ab. Die Abtastrate der Sensordaten, sowie die Ansteuerung des Motors erfolgt mit einer Frequenz von 1 KHz. Als zweiter Schritt wird das mathematisch hergeleitete Modell mit dem identifizierten Modell verglichen, und entsprechend angepasst.

Anhand des ermittelten dynamischen Modells soll als nächster Schritt ein Regler zur Strukturdämpfung

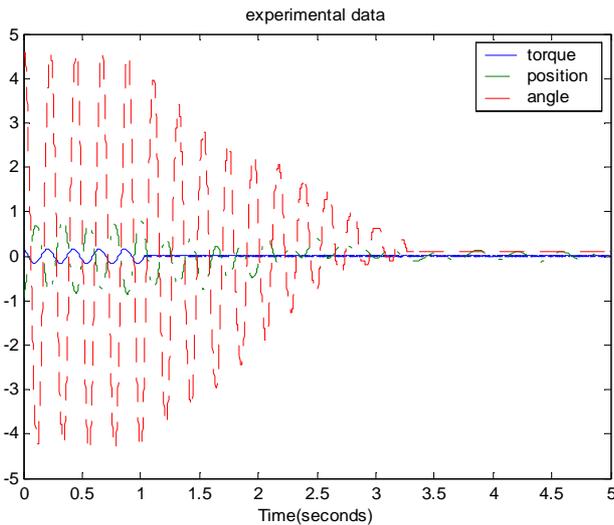


Abbildung 3: Abklingende Schwingung des Stabes.

und hochgenauen Positionsregelung entworfen werden. Der Regler sollte den gesamten Stab in möglichst kurzer Zeit in Ruhelage bringen. Das erarbeitete dynamische Modell mit der Regelung wird in Form einer Simulation am PC nachgebildet, dadurch kann der entworfene Regler getestet und optimiert werden. Der aus der Simulation endgültig gewonnene Regler wird auf den Kontrollrechner am Laborexperiment übertragen und die Regelung über das Internet gestartet. Dabei wird zuerst der Stab in Schwingung versetzt, danach direkt von Störung auf Regelung umgeschaltet. Nun kann durch die Analyse der Sensordaten die Qualität der Regelung ermittelt werden. Während der Versuchsdurchführung werden die Messergebnisse der realen Anlage aufbereitet und in einem Browser in Form von Diagrammen zeitgleich dargestellt. Die Messergebnisse werden auf dem Server gespeichert, von dort kann der Student die Daten lokal auf seinen Rechner laden. Mit diesen Daten soll nun ein Vergleich zwischen den Sensordaten des realen Systems und dem Verhalten der Simulation hergestellt werden. Hierbei kann nun eine Aussage gemacht werden, wie gut die Modellbildung mit dem realen System übereinstimmt.

LabView erlaubt immer nur einem Benutzer die volle Kontrolle über das Experiment. Des weiteren wird über eine Zugangskontrolle zum Experiment sichergestellt, dass immer nur ein Nutzer mit der Hardware arbeiten kann. Ein ähnlicher Experimentaufbau, jedoch mit anderen Sensoren (Beschleunigungssensoren statt des Lichtwellenleiters) wurde auch an der Ohio University realisiert und ist über Internet zugänglich. So können von den Studenten Vergleiche zwischen beiden Sensorsystemen durchgeführt und deren Auswirkungen auf das Regelsystem analysiert werden.

## Entwicklung der Lehreinheiten

Der erste Teil der Lehreinheit beinhaltet das dynamische Modell eines flexiblen Stabes in eindimensionaler Konstruktion. Dieses Modell wird den Studenten nur teilweise zur Verfügung gestellt, wobei die Vervollständigung als Vorbereitung zum Experiment vom Studenten durchgeführt werden soll.

Bei dem für die Lehreinheit verwendeten dynamischen Modell, wird dem Studenten jeder einzelne Schritt verdeutlicht. Der Stab wurde nach der bekannten Methode von Euler-Bernoulli modelliert, wobei die Auslenkung orts- und zeitabhängig nach folgender partieller Differentialgleichung abhängt:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m_o \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Die Lösung erfolgt durch Separation von orts- und zeitabhängigen Funktionen unter Anwendung der Anfangswerte (Zeit) und Randbedingungen für die Ortsfunktion.

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^m \varphi_i(x) \eta_i(t) \quad (2)$$

Für die weitere Verarbeitung zum Zwecke der Systemidentifikation wird zunächst eine Näherung der ersten sechs Modi verwendet.

Das dynamische Verhalten des flexiblen Stabes wird nach der Lagrangeschen - Methode hergeleitet und führt schließlich auf die bekannte Vektor-Differentialgleichung

$$M\ddot{q}(t) + D\dot{q}(t) + Cq(t) + G(q(t)) = B\tau(t), \quad (3)$$

wobei  $q$  der Vektor der generalisierten Koordinaten,  $M$  die verallgemeinerte Massenmatrix,  $D$  die Dämpfungsmatrix,  $C$  die Federmatrix und  $G$  die Gravitationsmatrix beschreibt. Das Verhältnis der Stabquerschnittsfläche zur Stablänge ist sehr klein, deshalb kann der Effekt der Gravitation vernachlässigt werden [3].

$$\ddot{q}(t) \approx -M^{-1}D\dot{q}(t) - M^{-1}Cq(t) + M^{-1}B\tau(t) \quad (4)$$

Diese Form der Differentialgleichung kann einfach in der Modalen Zustandsform zweiter Ordnung ausgedrückt werden. Die Zustandsgleichung in der Modalform sieht nach [4] folgend aus:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{ss} x + B_{ss} \Gamma_m \\ y &= C_{ss} x + D_{ss} \Gamma_m \end{aligned} \quad (5)$$

Angewendet auf die Differentialgleichung aus (4):

$$x^T = [q_0 \quad \dots \quad q_m \quad \dot{q}_0 \quad \dots \quad \dot{q}_m]^T$$

$$A_{ss} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}C & -M^{-1}D \end{bmatrix} \quad B_{ss} = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{bmatrix} \quad (6)$$

Das Zustandsraummodell hat als Ausgang die Position der Motorwelle  $C_{ssa}$  (Winkel), die Winkelbeschleunigung der Motorwelle  $C_{ssv}$ , und die Position der Stabspitze  $C_{ssp}$  (7).

$$\begin{aligned} C_{ssa} &= [1 \quad 0 \quad \varphi'_1(0) \quad 0 \quad \dots \quad \varphi'_m(0) \quad 0] \\ C_{ssv} &= [0 \quad 1 \quad 0 \quad \varphi'_1(0) \quad \dots \quad 0 \quad \varphi'_m(0)] \\ C_{ssp} &= [L \quad 0 \quad \varphi_1(L) \quad 0 \quad \dots \quad \varphi_1(L) \quad 0] \end{aligned} \quad (7)$$

Aus Gleichung (5) ist erkennbar, dass der untere rechte Teil der  $A_{ss}$  Matrix die Dämpfung beinhaltet. Bei der Systemidentifikation müssen diese Werte entsprechend den Daten des Testlaufes angepasst werden. Die Parameter  $j$  aus Gleichung (6) stellen die verschiedenen *Mode-Shapes* dar. Hier ist gut erkennbar, dass alle diese  $j$  mit dem Zustandsvektor multipliziert werden, was wiederum auf Gleichung (2) zurückzuführen ist.

Als Beispiel ist die  $A_{ss}$  Matrix eines Modells sechster Ordnung in Gleichung (8) dargestellt, darin sind also die ersten drei Schwingungsmodi des *Schwingenden Stabes* berücksichtigt.

## MOBILER ROBOTER TOM

Ein weiteres interessantes Gebiet für teleoperative Experimente sind mobile Roboter. An ihnen lassen sich zahlreiche unterschiedliche Aufgaben erstellen. Die Aufgaben für Studenten in Laboren reichen von regelungstechnischen Übungen für Motor-

steuerungen bis hin zu kooperativen Roboteraufgaben. Dabei können unterschiedliche Ziele angefahren werden, Gegenstände aufgenommen und übergeben werden oder auch direkte Motorregler entworfen werden.

An der Universität Siegen kommt der mobile Roboter TOM (Tele-Operated Machine) im Laborbetrieb zum Einsatz (Abbildung 4). Es handelt sich um ein dreirädriges Fahrzeug, welches auf einem 4 m<sup>2</sup> großen Arbeitstisch frei bewegt werden kann. Mit Hilfe dieses Roboters lassen sich Laborexperimente für Studenten sowohl im Bereich der Regelungstechnik als auch der Robotik entwerfen. Derzeit wird der Roboter zu regelungstechnischen Laborexperimenten genutzt.

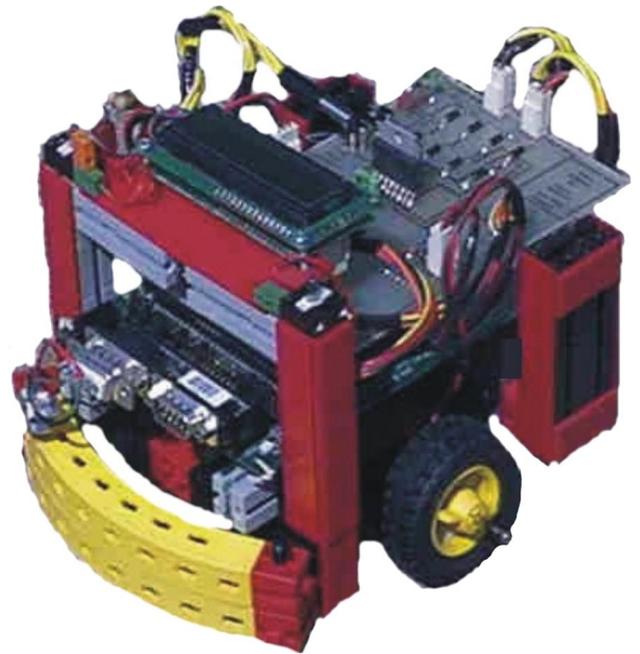


Abbildung 4: Der TOM Roboter.

$$A_{ss} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{a_1 m_b^2 \omega_1^2}{|M|} & \frac{a_2 m_b^2 \omega_2^2}{|M|} & \frac{-m_b^2 d_f}{|M|} & \frac{a_1 d_{11} m_b}{|M|} & \frac{a_2 d_{22} m_b}{|M|} \\ 0 & \frac{-J m_b^2 \omega_1^2 + a_2^2 m_b \omega_1^2}{|M|} & \frac{-a_1 a_2 m_b \omega_2^2}{|M|} & \frac{a_1 d_f m_b}{|M|} & \frac{-J m_b d_{11} + d_{11} a_2^2}{|M|} & \frac{-a_1 a_2 d_{22}}{|M|} \\ 0 & \frac{-a_1 a_2 m_b \omega_1^2}{|M|} & \frac{-J m_b^2 \omega_2^2 + a_1^2 m_b \omega_2^2}{|M|} & \frac{a_2 d_f m_b}{|M|} & \frac{-a_1 a_2 d_{11}}{|M|} & \frac{-J m_b d_{22} + d_{22} a_1^2}{|M|} \end{bmatrix} \quad (8)$$

## Aufbau des TOM Roboters

TOM ist ein dreirädriges Fahrzeug, von denen zwei Räder direkt über die zwei Antriebsmotoren betrieben werden, das dritte Rad ist ein Nachlauftrad und dient lediglich der Stabilisierung des Roboters. Durch die Anordnung der Achsen kann der Roboter, durch gegenläufiges Antreiben der Räder, auf der Stelle drehen. Zur Distanz und Richtungsmessung, und dadurch auch Geschwindigkeitsmessung, verfügt der Roboter über Sensoren (Encoder) [5][6]. Diese Sensordaten dienen als Grundlage zur späteren Modellbildung sowie dem Reglerentwurf. Die Roboterstruktur wurde aus Fischertechnik Bauteilen zusammengesetzt, allerdings besitzt der Roboter zusätzlich einen Mikrocontroller zur Ansteuerung der Motoren über einen Regler, sowie über ein LCD-Display zur Ausgabe der aktuell gespeicherten Roboterbefehle. Der Mikrocontroller ist frei programmierbar und gestattet den Entwurf weiterer Laborversuche und auch die Implementierung anderer Regelalgorithmen, wie beispielsweise Fuzzy Regler. Zudem kann der Roboter mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet werden, die ihm dann über eine entsprechende Programmierung weitere Fähigkeiten ermöglichen. Denkbar ist hier zum Beispiel eine Hinderniserkennung, wie sie in anderen mobilen Robotern an der Universität Siegen bereits vorhanden ist.

Weiterhin ist TOM über ein Kabel mit dem Roboterserver verbunden, um den Roboter an das Internet anzuschließen. Diese Internetsteuerung geschieht über ein Steuerungs-Applet.

Diese Anwendung ist dabei natürlich an den aktuellen Laborversuch, einen Geschwindigkeitsregler, gebunden. Andere Experimente erfordern selbstverständlich einen anderen Aufbau der Benutzerschnittstelle. Derzeit wird im Rahmen einer Diplomarbeit die Steuerung des Roboters über einen Force-Feedback-Joystick entworfen. Solche Anwendungen können also den bisherigen Einsatz eines Applets zur Eingabe von Systemparametern weit übersteigen. Der Roboter ist also eine hinreichend flexible Arbeitsplattform.

Der TOM Roboter stellt ein ferngesteuertes Experiment dar. Trotzdem verfügt er als mobiler Roboter über ein hohes Maß an Bewegungsfreiheitsgraden. Daher ist es unumgänglich, dass der Roboter während des Laborversuchs beobachtet werden muss, sei es zum Anfahren einer Startposition oder zum Beobachten eines Testlaufs. Die Überwachung des Roboters geschieht mit Hilfe einer Internetkamera (Webcam), die ein laufendes Videobild des Roboters liefert (Abbildung 5). Diese Kamera kann vom

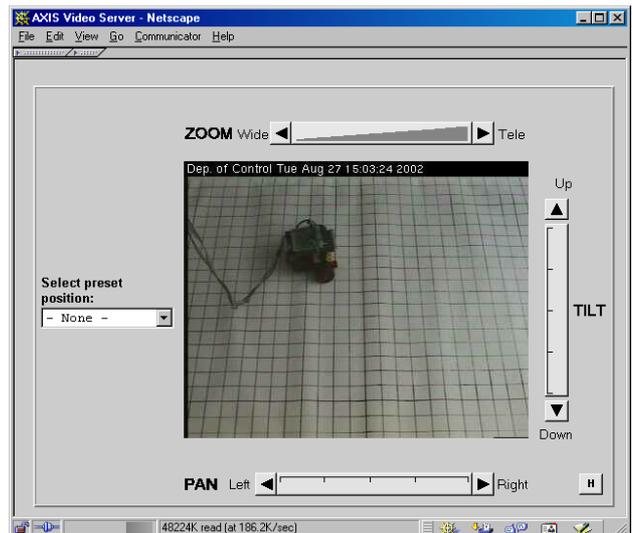


Abbildung 5: Ansicht des Roboters über die Webcam.

Anwender beliebig geschwenkt und gezoomt werden, daher ist eine optimale Beobachtung des Roboters möglich. Weiterhin können durch die hohe Auflösung und einen gerasterten Arbeitsbereich des Roboters Positionsmessungen durchgeführt werden.

## Aktueller Laborversuch

Der TOM Roboter verfügt zurzeit über einen Geschwindigkeits- PI-Regler. Dabei sollen die Studenten zunächst einen Testlauf mit dem Roboter durchführen, um eine Systemanalyse durchführen zu können. Diese Daten werden dem Anwender vom Server über das Java-Applet zur Verfügung gestellt (Abbildung 6). Die graphische Ausgabe eines solchen Testlaufs ist in Abbildung 7 dargestellt.

Die Kurve zeigt den Weg-Zeit-Verlauf des Roboters. Damit kann die aktuelle Geschwindigkeit ermittelt werden. Im Versuchsfeld des Roboters befindet sich nun eine Rampe, über die der Roboter gefahren werden soll. Ziel des Laborversuches ist der Entwurf eines Reglers, um einen Geschwindigkeitseinbruch beim Überfahren der Rampe zu verhindern. Dabei kann über die graphische Ausgabe des Fahrverlaufs eine unmittelbare Abschätzung vorgenommen werden. Zusätzlich erhält der Anwender die Sensordaten auch als Tabelle, damit die Daten in einer Simulations- und Systemanalysesoftware, beispielsweise *Matlab*, weiterverarbeitet werden können.

## Das Steuerungs-Applet

Die Kontrolle vom Anwender über den TOM Roboter erfolgt gänzlich über das Internet, daher muss eine

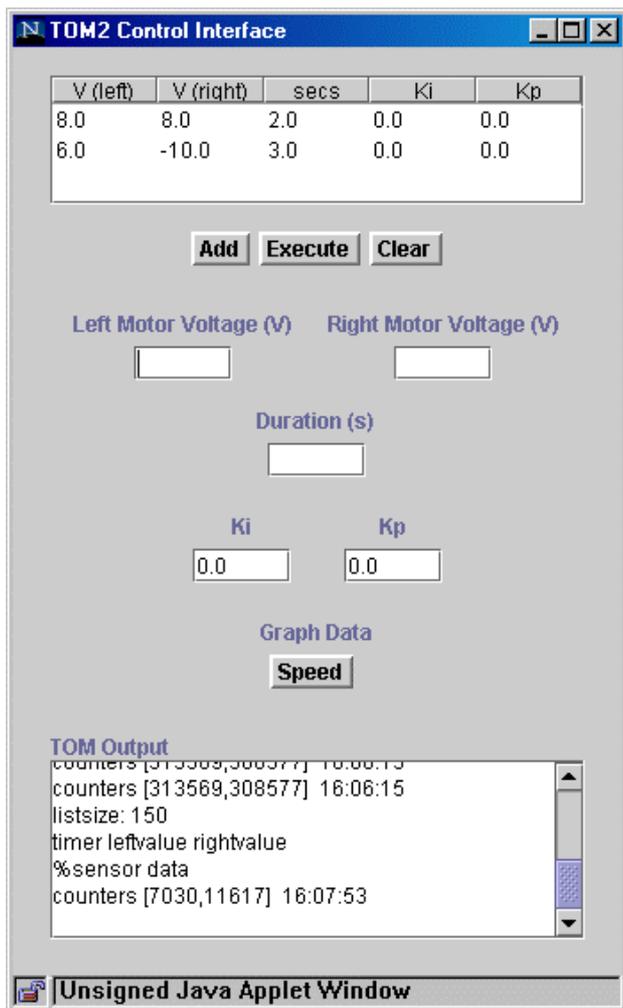


Abbildung 6: Die Benutzerschnittstelle.

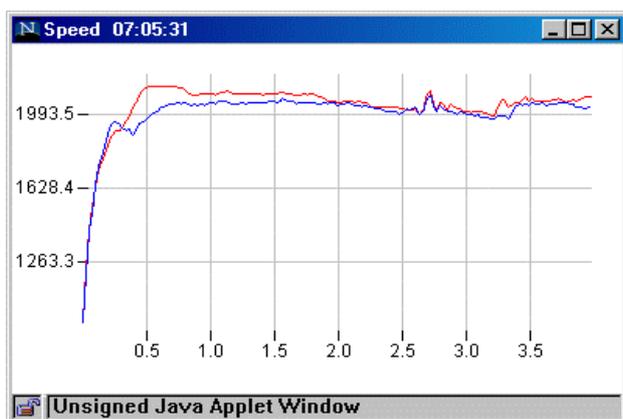


Abbildung 7: Weg-Zeit-Diagramm eines Testlaufs.

systemunabhängige Programmierung erfolgen. Aus diesem Zweck wurde sowohl die Benutzeranwendung als auch der Roboterserver in Java implementiert. Der TOM Server nimmt die Kommandos des Anwenders entgegen und übernimmt die direkte Steuerung des Roboters. Dazu werden Signale wie Zeitdauer, Reglerparameter und Spannungswerte an den Mikrocontroller des Roboters gesandt, die eigentliche

Bearbeitung der Steuerbefehle sowie die Regelung der Antriebsräder übernimmt der Roboter dann selbst, der Server dient lediglich als Kommunikationsschnittstelle zwischen Internet und Roboter.

Die Benutzerschnittstelle auf der Anwenderseite ist über ein Java-Applet realisiert worden, um eine einfache Verfügbarkeit für viele Studenten zu gewährleisten [7]. Zum Ausführen des Experimentes können die Studenten über die Internetseiten des Labors direkten Zugriff erhalten. Innerhalb des Applets können dann einfache Steuerungskommandos über Eingabefelder an den Roboter gegeben werden. Im Beispielversuch zur Implementierung eines Geschwindigkeitsreglers kann die Motorspannung für jedes Antriebsrad im Bereich von  $\pm 12$  V und die Zeitdauer angegeben werden, in der der Roboter sich bewegen darf. Zum anderen können aber auch für PI-Geschwindigkeitsregler die Reglerparameter  $K_i$  und  $K_p$  gesetzt werden.

### Experimentverlauf

Der Einsatz von ferngesteuerten Laborversuchen ermöglicht vielen Studenten die Benutzung eines Experiments, ohne direkt vor Ort sein zu müssen. Da der Student dabei allerdings auf sich selbst gestellt ist, muss die Anleitung zum Experiment und ein Verlauf zur erfolgreichen Durchführung gegeben werden. Diese Online-Unterstützung muss dabei sowohl die Versuchsbeschreibung als auch die Hilfe, die sonst durch einen Laboringenieur gegeben werden könnte, beinhalten.

Um dem Studenten einen sog. *roten Faden* zu geben, an dem er sich durch die Versuchsbeschreibung arbeiten kann, wurde eine virtuelle Welt geschaffen, in der er verschiedene Stationen bearbeiten kann. Dabei werden innerhalb der virtuellen Umgebung einzelne Aufgabenbereiche erst nach erfolgreicher Absolvierung bestimmter Teilaufgaben frei geschaltet.

Es können einige Aufgabenteile, wie beispielsweise das Bearbeiten der einführenden Versuchsbeschreibung, vom Studenten selbst als abgeschlossen gesetzt werden und ein Weitergehen wird ermöglicht. Andere Aufgaben, wie das Einstellen der Systemparameter, können erst nach einer vollständigen und korrekten Analyse als bearbeitet betrachtet werden. Generell kann jeder der Aufgabenteile den Status *bearbeitbar*, *gesperrt*, *bereits abgeschlossen* oder *unter Bearbeitung* annehmen. Diese Zustände werden dem Anwender über die unterschiedliche Farbe der Kugeln, welche die Aufgabenteile darstellen, in der virtuellen Umgebung mitgeteilt.

In Abbildung 8 ist die virtuelle Umgebung zu erkennen. Dabei sind gesperrte Aufgabenteile als rote Kugeln dargestellt, es sind Aufgaben, wie das

Einstellen der Systemparameter, die ohne vorherige Analyse des Systems nicht zu bestimmen sind. Blaue Kugeln sind zurzeit bearbeitbar und stellen den aktuellen Stand des Studenten im Laborversuch dar, wohingegen die gelben Kugeln die erledigten Aufgabenteile widerspiegeln. Grüne Kugeln symbolisieren die derzeit unter Bearbeitung stehende Teilaufgabe. Um die unterschiedlichen Zustände verwalten zu können, verfügt die Umgebung über Javascript Befehle mit Anbindung an *Matlab*. Damit können die analysierten Systemparameter von der virtuellen Laborumgebung überprüft und bewertet werden. Weiterhin kann über die *Matlab* Anbindung der aktuelle Bearbeitungs-zustand des Experiments für jeden Studenten gespeichert werden. So kann ein einmal begonnenes Experiment auch an folgenden Tagen weitergeführt werden, ohne jedes Mal von vorne beginnen zu müssen. Der Student sollte sich an der gleichen Stelle wiederfinden, an der er das Experiment unterbrochen hat.

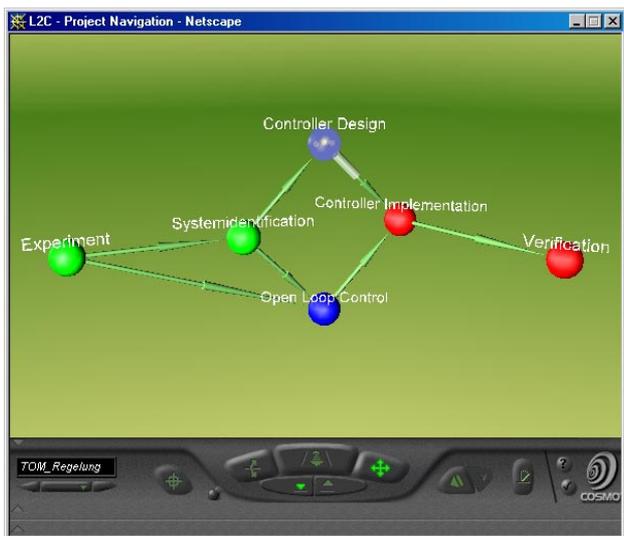


Abbildung 8: Die virtuelle Lernumgebung.

Während der Durchführung des aktuellen ferngesteuerten Experiments zur Erstellung eines Geschwindigkeitsreglers müssen die Studenten verschiedene Stationen durchlaufen:

- Versuchsbeschreibung und Einführung des Experiments lesen, welche die didaktischen Ziele und den theoretischen Hintergrund enthalten.
- Eine Systemidentifikation des Roboters durchführen und diesen in *Matlab* Simulink mit anschließender Verifikation simulieren.
- Aus den gewonnenen Daten mit Hilfe der Ziegler-Nichols-Methode einen Regler entwerfen.
- Nach einem erneuten Testlauf die erhaltenen Sensordaten zur Reglerverifikation mit Hilfe von *MatLab* Simulink einsetzen.

- Einen abschließenden Ablauf des Roboters mit den gewonnenen Reglerparametern durchführen.

**E-LEARNING-PORTAL  
LEARN2CONTROL (L2C)**

Typischerweise assoziiert man mit einem Internet-Portal eine WebSite, die ein *Eingangstor zum Internet* oder einen ersten Anlaufpunkt für das Surfen im World Wide Web darstellen will. Derartige Portale integrieren umfangreiche Dienste, z.B. Suchmaschinen, FAQs, Foren, usw., um das Auffinden von Informationen im Internet zu erleichtern. Eine besondere Form eines Internet-Portals ist das themenspezifische Portal, das sich auf ein spezielles Thema konzentriert und zu diesem umfassende Inhalte in vielfältiger Form liefert.

Ein solches themenspezifisches Portal stellt das e-Learning-Portal Learn2Control dar. Es will Methoden der Regelungstechnik durch projektorientiertes Lernen vermitteln [8]. Mit den Möglichkeiten des Internets kann hiermit eine multimediale Lernumgebung zur Verfügung gestellt werden, mit der Lernen via Internet möglich sein soll. Diese Form des Lernens bietet dem Benutzer, auf der Basis diverser Hilfsmittel, definierte Lernziele eigenverantwortlich zu lösen. Hilfsmittel und Lernziele werden durch den sog. Provider der Lehrinhalte vorgegeben.

Lehrinhalte in Learn2Control (l2c) werden in sog. Lernmodulen angeboten. Grundsätzlich gliedert sich eine Lehreinheit in drei separate Teile: allgemeine Informationen, die Lerneinheit und das Tele-Experiment (siehe Abbildung 9). Die allgemeinen Informationen geben eine grobe Beschreibung der Lehreinheit wieder. Mit der Lerneinheit hingegen sollen einerseits Inhalte der Regelungstechnik vermittelt werden und andererseits dient sie der Beschreibung und der theoretischen Vorbereitung des Tele-Experiments. Hier finden sich Skripte, Manuals, Literaturlisten, evtl. Simulationen, Testfragen und Multiple-Choice-Aufgaben. Das Tele-Experiment schließlich stellt einen realen Laboraufbau dar, der als Fernversuch via Internet gefahren werden kann.

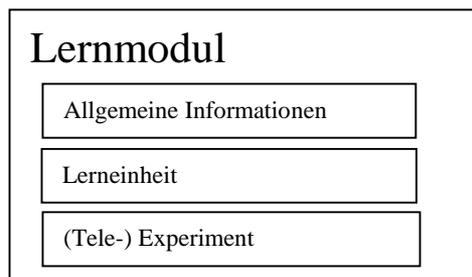


Abbildung 9: Lernmodul, bestehend aus allgemeinen Informationen, Lerneinheit und Tele-Experiment.

Die Architektur von Learn2Control sieht nun vor, dass mehrere Provider eigene Lernmodule auf einem oder mehreren externen bzw. eigenen WebServern zur Verfügung stellen (siehe Abbildung 10). Erstellung und Pflege der Inhalte eines Lernmodules und das *Hosten* liegt also in der Verantwortung des entsprechenden Providers. Die Registrierung und Verwaltung der Benutzer und Lernmodule hingegen obliegen dem übergeordneten e-Learning-Portal Learn2Control.

Ein derartiges verteiltes System an Web-Ressourcen stellt bezüglich Sicherheit und Zugriffsrechten auf Portal-Ressourcen wie auf externe Lernmodule erhöhte Anforderungen. Das Learn2Control-Portal integriert die einzelnen Lernmodule und darüber hinaus besitzt es ein Booking System, Sicherheitssystem, Portal-Service-Module (News, Newsletters, Foren, FAQs, usw.), Registrierung, Login usw.

Das Learn2Control-Portal basiert auf dem Content-Management-System PHPNuke [9]. Als Systemvoraussetzung benötigt es einen WebServer mit eigener MySQL-Datenbank und PHP-Unterstützung. Für die Verwaltung und Zeitreservierung von Tele-Experimenten wurde PHPNuke um ein Booking System und ein entsprechendes Sicherheitssystem erweitert.

### Learn2Control – Booking System

Das Booking System unterscheidet zwischen vier Benutzergruppen: normale WebSurfer, USER, COACH und PROVIDER. WebSurfer sind Internetbenutzer ohne Registrierung welche ausschließlich die allgemeinen Informationen des l2c-Portals und der Lernmodule einsehen können.

Bei der Registrierung als USER muss der Benutzer einerseits einen Betreuer (COACH) seiner Universität/ Fachhochschule mit Namen und Email und andererseits

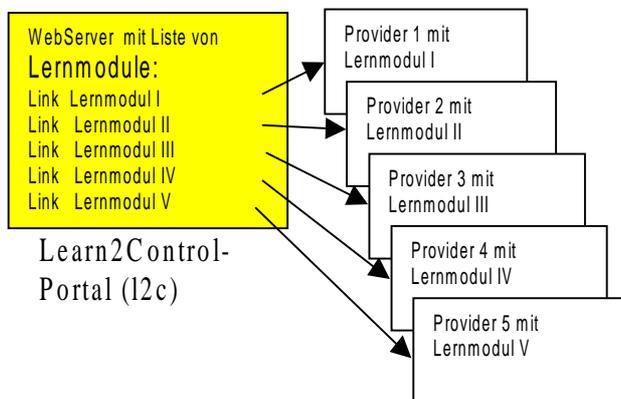


Abbildung 10: Learn2Control-Portal und die extern gehosteten Lernmodule.

das gewünschte Tele-Experiment angeben können. Die Registrierungsdaten erhält der COACH als E-Mail und kann daraufhin den Benutzer innerhalb des Portals freischalten. Mit diesem Status darf der USER nun Lerneinheiten nutzen, Zeitreservierungen für Tele-Experimente vornehmen (siehe Abbildung 11) und dem entsprechend Tele-Experimente durchführen.

Die Registrierung eines COACH verhält sich analog der USER-Anmeldung. Allerdings muss hier als Betreuer derjenige PROVIDER gewählt werden, dessen Tele-Experiment der COACH betreuen möchte.

Ein PROVIDER erstellt und editiert Lernmodule, jeweils bestehend aus allgemeinen Informationen, Lernmoduleile und Tele-Experiment. Jedes dieser Lehreinheitsteile kann er innerhalb des l2c-Portals separat als Link eintragen. Ein PROVIDER wird vom Administrator des l2c-Portals angemeldet oder kann von einem anderen Provider der selben Universität/ Fachhochschule registriert werden.

### Learn2Control – Sicherheitssystem

L2c- und Provider-WebPages sollen stets nach einer Authentifizierung innerhalb des l2c-Portals vom Client genutzt werden können. Derartige WebPages könnten jedoch auch über Bookmark/Favoriten oder sonstige Linklisten unter Umgehung des l2c-Login geladen werden. Unerwünschterweise stehen damit auch unregistrierten Websurfern alle l2c-Ressourcen ohne Beschränkung zur Verfügung.

Daher werden innerhalb des l2c-Portal für ordnungsgemäß autorisierte Benutzer die Benutzerdaten in anonymisierter Form (User- und Session-ID-Nr.) generiert. Diese müssen für die weitere

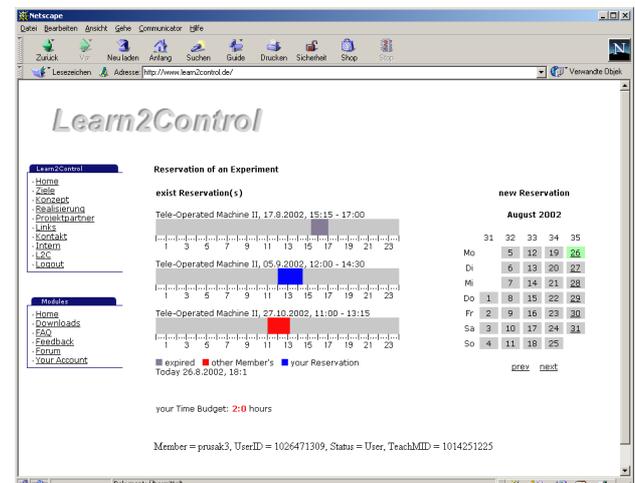


Abbildung 11: Learn2Control-Portal: Übersicht aller Zeit-reservierungen eines Tele-Experiments (Mitte) mit der Möglichkeit weiterer Zeitreservierungen (rechts).

Nutzung sowohl der internen I2c-WebPages, wie auch der externen Provider-WebPages verfügbar sein. Ähnlich der Internet-Cookie-Technik werden daher diese Daten im sog. *Matlab-Workspace* des lokalen Systems des Benutzers gespeichert. Der Benutzer muss also die Software *Matlab*, das dazu passende *Matlab-PlugIn* und den Webbrowser *Netscape 4.7x* auf seinem System installiert haben.

Das Speichern der Daten und deren Überprüfung im I2c-Portal erfolgt in jeweils zwei separaten Schritten. Beim Wechseln von der I2c-Portal-WebPage zur Provider-WebPage gelangt der Benutzer zunächst auf eine sog. Last-WebPage des I2c-Portals. In dieser ist ein JavaScript integriert, welches einen Browser-, Versions- und *Matlab-Plugin*-Ceck durchgeföhrt. Bei erfolgreicher Prüfung wird *Matlab* gestartet und die o.g. Benutzerdaten in den *Matlab-Workspace* geschrieben.

Im nächsten Schritt kann der Benutzer nun zur Provider-WebPage wechseln. Alle jetzt folgenden Provider-WebPages werden innerhalb von Frames dargestellt. Entsprechend Abbildung 12 sind in Frame- und Provider-WebPage diverse I2c-JavaScripts, I2c-Applet und das *Matlab-PlugIn* integriert. Diese, vom I2c-Portal zur Verfügung gestellten Ressourcen stellen in Verbindung mit dem I2c-Portal selbst das

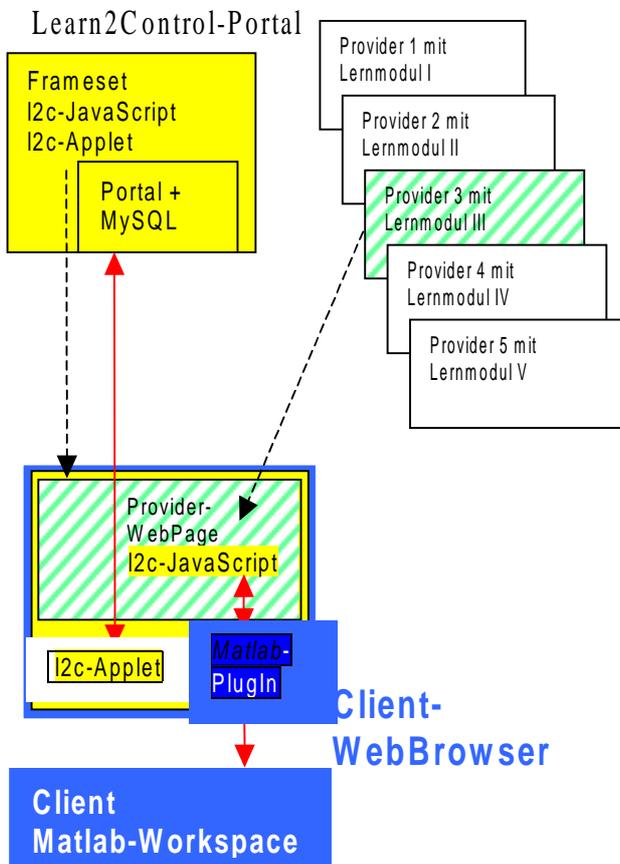


Abbildung 12: Sicherheitssystem mit User-, Zeitreservierungs-Check und Timeout.

Sicherheitssystem dar, mit dem User-, Reservierungszeit-Check und Timeout realisiert werden:

- Der Provider unterscheidet zwischen Lerneinheit- und Tele-Experiment-WebPages, die vom Sicherheits-system unterschiedlich behandelt werden müssen. Der Provider integriert daher ein entsprechendes I2c-JavaScript in seiner Web-Page, worin der Typ der WebPage als Variable gespeichert ist.
- In regelmäßigen Zeitabständen ließt das I2c-Applet den Typ der Provider-WebPage aus diesem I2c-JavaScript, die User- und Session-ID-Nr. via *Matlab-PlugIn* aus dem *Matlab-Workspace* und sendet diese Daten an das I2c-Portal zur Überprüfung.
- Im Falle einer Experiment-WebPage werden die User- und Session-ID auf Gültigkeit geprüft. Darüber hinaus wird die Aktualität der Zeitreservierung getestet. Im Falle einer Lerneinheit-WebPage werden lediglich die User- und Session-ID auf Gültigkeit überprüft.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Lernmodule können in drei Teile unterteilt werden: generelle Laborbeschreibung und Information, eigentliche Lerneinheit und das Experiment selbst. Sowohl die Beschreibungen als auch die Lerneinheiten können als Internetmedien, sprich Webseiten, angeboten werden. Die Laborexperimente hingegen werden nicht als reine Simulation angeboten, sondern stellen vielmehr ein real existierendes Experiment über das Internet ferngesteuert zur Verfügung. Da die Internetnutzung prinzipiell für jedermann möglich ist, werden für das Anbieten von ferngesteuerten Laborversuchen spezielle Anforderungen an das Learn2Control Webportal gestellt. Ein umfassendes Reservierungssystem garantiert hier eine sichere Verwaltung der Benutzer und Ressourcen, in diesem Fall des Roboters oder schwingenden Stabs.

Weitere Arbeiten am schwingenden Stab verbessern und erweitern die Möglichkeiten dieses Laborexperiments. Die gegenwärtige Implementierung des Reglers in einer LabView Programmierumgebung kann die Echtzeitanforderung nicht erfüllen. Diese Problematik kann jedoch durch die Realisierung in *Matlab Simulink* mit Hilfe der *Real-Time Windows Target* Toolbox realisiert werden. Damit lässt sich der Regler mit der vorhandenen National Instruments DAQ Hardware realisieren und kann direkt über Simulink angesteuert werden. Erste Testergebnisse zeigen dabei ein sehr gutes Echtzeitverhalten.

Der Einsatz von mobilen Robotern, in diesem Fall TOM, ermöglicht vielen Studenten den Zugang zu

einer sehr interessanten Technik der heutigen Zeit. Gleichzeitig ist es nicht notwendig, ständig mehrere Roboter für den Laborbetrieb bereit zu halten. Trotzdem ist der Aufbau eines ferngesteuerten Laborexperiments sicherlich aufwendiger, als eine reine Simulation. Im Gegensatz dazu weist jedoch diese Vorgehensweise deutliche Vorteile gegenüber der Simulation auf. Zum einen treten in realen Prozessen unvorhergesehene Eigenschaften und Probleme auf, zum anderen ist für Studenten der Einsatz eines wirklichen Roboters, und sei er auch ferngesteuert, interessanter. Die gut erweiterbare Plattform des TOM Roboters gewährleistet zudem die Entwicklung zahlreicher Experimente in unterschiedlichen Bereichen, so dass Studenten auf lange Sicht die Steuerung von mobilen Robotern von der Regelung bis hin zur Kooperation erlernen können. In nächster Zukunft wird auch ein Laborexperiment zur Sensordatenfusion mit Kalman Filter implementiert werden, welches bereits auf anderen mobilen Robotern am Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik verfügbar ist.

## DANKSAGUNG

Wir danken dem BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), dem UVM (Universitätsverbund Multimedia des Landes Nordrhein-Westfalen) und der Europäischen Kommission für die finanzielle Unterstützung unserer Projekte.

## REFERENZEN

1. Muenst, G. und Roth, H., Sensoring and control for flexible structures. *Workshop on Tele-Education in Mechatronics Based on Virtual Laboratories*, Weingarten, Deutschland, 60 (2001).
2. Irwin, R.D., Adami, T.M., Roth, H., Münt, G. und Rösch, O., Sensor and control concepts for the Internet-based Flexlab experiment. *Workshop on Internet Based Control Education, IBCE'01*, Madrid, Spanien, 231-234 (2001).
3. Gawronski, W.K., *Dynamics and Control of Structures; A Modal Approach*. Heidelberg: Springer Verlag (1998).
4. Rahn, C.D., *Mechatronic Control of Distributed Noise and Vibration: a Lyapunov Approach*. Berlin: Springer Verlag (2001).
5. Everett, H.R., *Sensors for Mobile Robots – Theory and Application*. Wellesley: AK Peters (1995).
6. Schilling, K., Remote sensor data acquisition and control. *Proc. Tunisian-German Conf.: Smart Systems and Devices*, Hammamet, Tunesien, A2 (2001).
7. Overstreet, J.W. und Tzes, A., An Internet-based real-time control engineering laboratory. *IEEE Control Systems Magazine*, Oktober (1999).
8. Learn2Control - Multimediale Lernumgebung für projektorientiertes Lernen der Methoden der Regelungstechnik (2001), <http://www.learn2control.de>
9. PHPNuke, <http://www.phpnuke.de>

## BIOGRAPHIEN



Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth ist Professor an der Universität Siegen für *Regelungstechnik und Mechatronik*. Außerdem leitet er das Steinbeis-Transferzentrum *Angewandte Rechner- und Software-Technologien*.

Er arbeitete fünf Jahre in der Raumfahrtindustrie.

In Lehre und Forschung befasst er sich schwerpunktmäßig mit der Entwicklung effizienter Steuerungs- und Regelungsstrategien für mobile Roboter, bei aktiver Schwingungsdämpfung und in der Raumfahrt.



Otto J. Rösch erhielt sein Diplom im Bereich der Technischen Informatik und den Abschluss als MSc in Mechatronik von der FH Ravensburg-Weingarten.

Er ist gegenwärtig wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik an der Universität

Siegen. Sein Arbeitsgebiet umfasst Ferndiagnose und Fernsteuerung von industriellen Anlagen, sowie die Vibrationsdämpfung flexibler Strukturen.



Jörg Kuhle schloss sein Studium an der Universität Siegen als Dipl.-Ing. ab. Zurzeit ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik an der Universität Siegen. Sein Schwerpunkt liegt im Bereich der mobilen und kooperativen Roboter.



Alexander Prusak schloss sein Studium an der Universität Siegen im Bereich der Nachrichtentechnik als Dipl.-Ing. ab. Er ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik der Universität Siegen. Seiner Hauptarbeitsgebiet:

Robotik und e-Learning via Internet im Bereich Regelungstechnik.



Ana Hernán González ist Studentin der Universität Carlos III in Madrid (Spanien). Sie studiert am dortigen Lehrstuhl für Automatisierungs- und Regelungstechnik. Gegenwärtig absolviert Sie Ihre Diplomarbeit am Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik der Universität

Siegen im Bereich der Schwingungsdämpfung und Feinpositionierung flexibler Strukturen.