

Projektbeschreibung Antragsvorhaben Abrahamczyk-Willmann

**Robotic Tectonics – Roboterbasierte Lehr- und Lernumgebung
für automatisierte Bauprozesse
(Kurztitel: RoboTec)**

1. Rationale

Robotik und Automation sind seit geraumer Zeit zu Schlüsseltechnologien avanciert. Eine zentrale Rolle in diesem Zusammenhang spielen robotische Systeme, die vermehrt in nicht-industriellen Kontexten eingesetzt werden, sondern zunehmend alltägliche Anwendungsbereiche durchdringen [1, 2]. So werden Roboter in der Zukunft eine Vielzahl unterschiedlichster Aufgaben übernehmen – von der Pakettlieferung per Drohne über den mobilen Agrarroboter zur Ackerbearbeitung und den intelligenten Bauroboter bis hin zum Pflegeroboter in der Alten- und Krankenversorgung. Allerdings zeigen aktuelle Analysen, dass Deutschland im internationalen Vergleich im Bereich Robotik zwar gut aufgestellt ist (insbesondere, was „klassische“ Robotikthemen wie Fertigung und Automation angeht [3]), demgegenüber allerdings spürbare Schwächen in Themenfeldern zu beobachten sind, die stark von Entwicklungen und Innovation in den Bereichen kreativer Anwendungen, Mensch-Maschine Interaktion und Künstliche Intelligenz (KI) in der Robotik geprägt sind. Um weiterhin Zugang zu den „smarten“ Aspekten der Robotik zu haben, ist es gerade in der Entwicklung und Vermittlung robotischer Systeme notwendig, auf derlei Themen zu setzen und neuartige, vielseitige Einsatzzwecke und dadurch erforderliche Roboterfähigkeiten zu erkunden.

Ein zentrales Handlungsfeld – und gleichermaßen stellvertretend für die rasant zunehmenden Fähigkeiten im Bereich der Robotik und der Künstlichen Intelligenz – ist der Bausektor [4, 5]. Zwar steigen hier die Einsatzoptionen von autonom handelnden Robotern, beispielsweise für die Ausführung von Montage- und anderen Fertigungsarbeiten; jedoch kommen oftmals repetitive Bauaufgaben oder standardisierte Materialsysteme zum Einsatz. Die Potenziale tatsächlich „smarter“ und flexibel einsetzbarer Robotersysteme sind im Baubereich oftmals ungenutzt und werden als solches nur unzureichend erforscht und vermittelt [6]. Dies mindert die technologische Souveränität von Entwickler*innen und Anwender*innen und verkleinert den Zugang zu Schlüsseltechnologien, die zur Umsetzung gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und ökologischer Prioritäten und Bedürfnisse in Zukunft notwendig sind. Hierzu sind insbesondere die Hochschulen aufgerufen, neuartige Interaktions- und Anwendungsformen zu erkunden und zugleich entsprechende Lehr- und Lernformate zu entwickeln. Hierzu bieten sich insbesondere Industrieroboter (gemäß ISO-Norm 8378 oder VDI-Richtlinie 2860) an, die als programmierbarer Mechanismus unterschiedlichste (z.B. bauliche) Aufgaben übernehmen können und dabei einen gewissen Grad an Beweglichkeit und Autonomie aufweisen. Dadurch wird es möglich, einen Industrieroboter spezifisch zu programmieren (u.a. Manipulationsprozess, Interaktionsmuster etc.) und einen physischen Prozess autonom oder teilautonom ausführen zu lassen [7, 8]. Ein Industrieroboter bildet daher eine quasi „ideale“ Schnittstellentechnologie zwischen Entwurf und Herstellung, zwischen Daten und Materialität und zwischen Planung und Ausführung [9, 10, 11].

Für den Baubereich bedeutet dies, dass damit geschlossene digitale Prozessketten zwischen Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Engineering (CAE) und Computer-Aided Manufacturing (CAM) erstellt werden können und Industrieroboter daher eine Schlüsselfunktion für die bauliche Automatisierung und entsprechenden Schwerpunktthemen wie serielles Bauen oder datengestützte Bauwerkserstellung gelten –

dies nicht nur für standardisierte und konventionelle Produktionsformen, sondern gleichermaßen für anpassbare und kollaborative Arbeitsprozesse.

Durch den technologischen Fortschritt der letzten Jahrzehnte, sind entsprechende Industrierobotersysteme zunehmend verfügbarer, sicherer und anwendungsfreundlicher geworden [12]. Für 2025 prognostiziert die International Federation of Robotics (IFR) für Industrieroboter beispielsweise eine weltweite jährliche Zuwachsrate von 700.000 Einheiten. Hierzu müssen die Bildungsinstitutionen die Studierenden schon jetzt darauf vorbereiten, derlei robotische Systeme und Automationslösungen aktiv mitzugestalten, da sie eine Vielzahl von Sektoren, Anwendungen und insbesondere die Baubranche betreffen werden. Eine besondere Herausforderung liegt auf der Verzahnung der hierfür erforderlichen Wissens- und Kompetenzbereiche (u.a. Ingenieurwissenschaften, Planungswissenschaften, Materialwissenschaften etc.) und die Erarbeitung fachübergreifender Lehr- und Lernformate unter besondere Gewichtung möglicher Praxis- und Anwendungsfelder.



Abb. 1, links: Als Oberassistent des Lehrstuhls für Architektur und Digitale Fabrikation an der ETH Zürich konnte Prof. Willmann bereits zahlreiche robotische Lehr-/Lernprojekte initialisieren, beispielsweise das Projekt "Spatial Aggregations" (Bild: GKR, ETH Zürich); rechts: Gleiches gilt für das Projekt „Design of Robotic Fabricated High-Rises“ am SEC Future Cities Lab in Singapur (Bild: GKR, SEC und ETH Zürich).

Weltweit existieren seit 2005 mehr als 100 Labore und/oder vergleichbare Einrichtungen [13], welche im akademischen Umfeld robotische Systeme zur Vermittlung und Entwicklung neuartiger baulicher Prozess einsetzen (Abb. 1), z.B. ETH Zürich, Universität Stuttgart, RWTH Aachen, Universität Darmstadt, Technische Universität München, Harvard Graduate School, Princeton University, Tongji University etc. Auch die Bauhaus-Universität Weimar (BUW) verfügt über einen entsprechenden Laborbereich, wobei das Thema der kreativen Robotik einen besonderen internationalen Fokus der Professur Designtheorie/Designforschung darstellt und in den letzten Jahren vermehrt den Weg in vielfältige Projekte, Patente, Anwendungen etc. (einschließlich Unternehmensgründung) gefunden hat [14]. Gleiches gilt für die Professur Komplexe Tragwerke, die insbesondere in der Vermittlung und Erprobung robotischer Bauprozesse zur effizienten, präzisen Assemblierung von Brückentragwerken einschlägige Ergebnisse erzielt hat [15]. Die Lehre im Bereich kreativer und kollaborativer Robotik ist aus diesem Grund entwicklungs- und forschungsgetrieben und hat zum Ziel, Studierende unterschiedlicher Fachbereiche für das Thema zu interessieren und an den sich (schnell) weiterentwickelnden Stand-der-Forschung heranzuführen. Die aktive Beteiligung von Lehrenden und ein integrales, gleichermaßen interdisziplinäres Lehr- und Forschungsverständnis schafft dazu die hierfür notwendige Basis.

Für die antragstellenden Professuren Designtheorie/Designforschung und Komplexe Tragwerke ist es daher ein zentrales Anliegen, ein neues (fachübergreifendes) Lehr- und Lernformat für robotische Anwendungen im Baubereich mit Fokus auf einer unmittelbaren Zusammenführung von Design- und Ingenieurwissenschaft zu entwickeln. Allerdings war

dies bisher aus organisatorischen, technischen und finanziellen Gründen nicht zu realisieren; dies insofern, als der Aufbau (einschließlich Aufbereitung, Einrichtung und Erprobung) entsprechender Plattformen und Werkzeuge kaum zu realisieren war und entsprechende Schnittstellen (z.B. Ansteuerung Roboteranlage) bisher nicht zugänglich waren. Existierende (Industrie-)Robotersysteme waren teuer und erforderten zahlreiche sicherheitstechnische und betriebliche Maßnahmen sowie entsprechend aufwändige infrastrukturelle Einrichtungen.

Durch die flächendeckende Einführung sogenannter kollaborativer Industrieroboter (gemäß EN ISO 10218-1 und EN ISO 10218-2) und durch die gleichzeitige Verbreitung offener Programmierschnittstellen (z.B. ROS, HAL etc.) hat sich dies grundlegend verändert [16]. So ist es inzwischen möglich, Studierende direkt mit einem 6-achsigen Industrieroboter interagieren zu lassen; das heißt, diesen zu programmieren und eigene, mitunter neue Produktionsprozesse zu gestalten und zu erproben. Im Sinne zeitgemäßer didaktischer Ansätze ist dies insofern wichtig, als weniger statische Prozess- und Ergebnisvorgaben als vielmehr eigene explorative und experimentelle Herangehensweisen und damit konstruktivistische Lerneffekte [17, 18, 19] zum Tragen kommen. Hinzu kommt die durch einen Industrieroboter ermöglichte unmittelbare Überführung von digitalen Informationen (z.B. Bauteilgeometrie, Aufbauprozess etc.) in eine physische, konstruktive – und in diesem Sinn: tektonische – Entsprechung. Für die Studierenden offenbaren sich innerhalb einer solchen cyber-physikalischen Prozesskette wesentliche Prinzipien, Mechanismen und Anforderungen, sowohl, was das computergenerierte Ausgangsmodell als auch die auszuführende physische Manipulation angeht. Beide Seiten bedingen sich damit wechselseitig und müssen zusammen gedacht, entworfen und erkundet werden [20]. Gleichzeitig lassen sich durch eine solche digital-materielle Synthese neue ästhetische/gestalterische und ebenso funktionale/bauliche Herausforderungen (und Potenziale) ableiten – beispielsweise, wenn es um die robotische Assemblierung nicht-standardisierter Tragwerke durch das automatisierte Positionieren und Fügen von diskreten Bauteilen geht und Fragen nach der baulichen Planung, baulichen Sequenz und schlussendlich den baulichen Eigenschaften zum eigentlichen Entwurfs- und Entwicklungsthema werden. Dies sind für eine Lehrveranstaltung zum Thema „smarte“ Robotik im Bauen wichtige Lernziele und entsprechen dem Constructive Alignment [21] bzw. einer inhaltlichen und methodischen Passung von Lernzielen, Lehr-/Lernaktivitäten und Assessment.

Betrachtet man den aktuellen Stand-der-Lehre, so wird deutlich, dass an verschiedenen Stellen und in unterschiedlichen Disziplinen robotische Ansätze, Systeme und Verfahren bereits zur Anwendung kommen, dass allerdings im Schnittstellenbereich zwischen Design/Planung und Tragwerk/Automation keinerlei weiterführende didaktische Vorhaben und Projekte existieren. Zwar werden an Institutionen wie der ETH Zürich, der Universität Stuttgart, der TU Darmstadt, dem University College London oder der Harvard Graduate School bereits 6-achsige Industrieroboter zur Herstellung skalierter oder realmaßstäblicher Prototypen verwendet [22] und gleichermaßen in der Lehre [23] eingesetzt, unmittelbar fachübergreifende – zwischen Design- und Ingenieurwissenschaft angesiedelte – Lehr- und Lernformate gibt es bisher nicht. Entsprechend wäre ein interdisziplinäres, forschungsbezogenes Lehrmodul zur Vermittlung „smarter“ robotischer Anwendungsformen innovativ und hätte aufgrund des explizit konstruktiv-materialistischen Charakters didaktische Alleinstellung. Hierzu wäre das (vorhandene) robotische Forschungssetup an der Bauhaus-Universität Weimar anzupassen, z.B. Ansteuerung, End-effektor, Peripherie etc., und den Studierenden in diesem Themenbereich erstmals zugänglich zu machen (Abb. 2). Diesbezügliche Aufgabenstellungen würden sich auf den Bereich der robotischen Assemblierung beziehen, indem entsprechende Steuerungsskripte bereits vorhanden sind und der (nicht-standardisierte) Aufbau diskreter Elemente ohnehin einen zentralen Anwendungsfall in der Baurobotik abbildet [24] und fächerübergreifend einschlägig ist [25]. So lernen die Studierenden in den Bereichen Design (z.B. Erstellung von Entwurfsgeometrie, Bauteilen, Prozessabläufen), Robotik (z.B. Ansteuerung, Interaktion, Simulation) und

Tragwerk (Aufbau, Fügung, Tektonik) beziehungsweise entwickeln und erproben ihre Ansätze quasi „live“ im Labor anhand realer Bau- und Prototypensequenzen. Zugleich wären wichtige Inhalte der Programmierung (Tragwerk, Ansteuerung, Simulation) offline möglich und als gesammeltes Studienmaterial digital verfügbar. So können Studierende sich auch asynchron mit Lehrinhalten auseinandersetzen und eigene Robotikprozesse vorab simulieren/virtuell testen (z.B. Simulationsumgebung Universal Robots oder HAL).

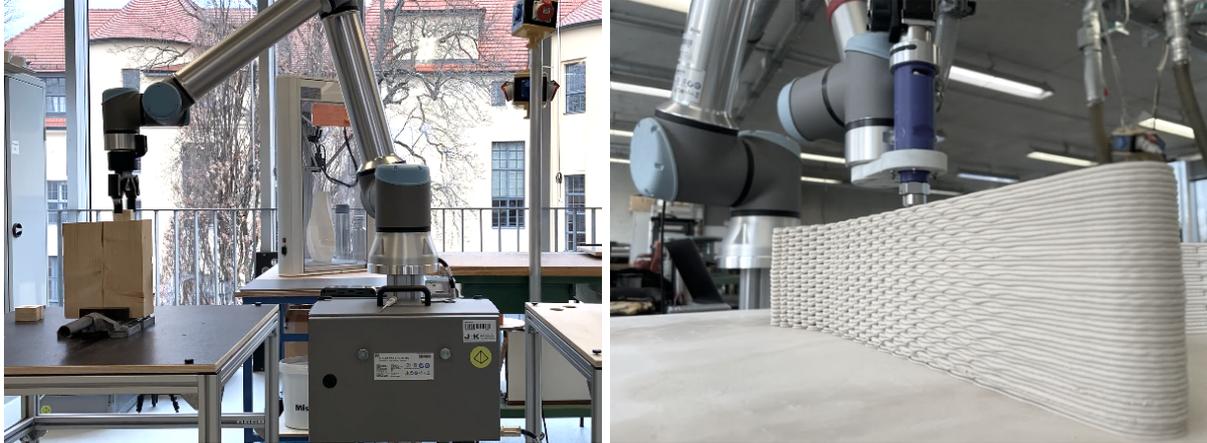


Abb. 2: Existierendes Robotersystem an der Bauhaus-Universität Weimar, bestehend aus: Sechs-achsiger Industriemanipulator Universal Robots UR10e, Robotiq 2-Finger-Greifer 2F-85, vollständige Fabrikationsperipherie sowie Extrusionseinheit und HP Multijet 3D-Drucker 540 zur Vorfabrikation von Assemblierungselementen (Bauhaus-Universität Weimar, 2023).

Es ist davon auszugehen, dass ein solches konstruktivistisches, experimentelles und niederschwellige Lehrformat, einschließlich interaktiver, materieller Ansätze, die Studierenden deutlich motivieren wird und ein weiterführendes Interesse für eine solche zukunftsweisende Schlüsseltechnologie erzeugen kann. Hinzu kommt: Das Modul wird in Englisch unterrichtet und kann an anderen Thüringer Hochschulen, aber auch national und international verwendet und/oder weiterentwickelt werden. Die entsprechenden Lehr- und Lerndaten werden frei zur Verfügung gestellt (Git-Repository) und in einer Open-Access-Publikation veröffentlicht.

Zur Initialisierung des Lehrmoduls und damit verbunden a) der Anpassung des bestehenden Robotik-Setups, b) der Vorbereitung entsprechender Strategien, Materialien und Versuche, und c) der entsprechenden Durchführung und Validierung werden mit dem vorliegenden Antrag entsprechende finanzielle Ressourcen zur Umsetzung ab dem Wintersemester 2024/2025 angesucht.

2. Vorhaben

Ansiedlung und Ausrichtung

Das Modul „RoboTec“ wird in zwei Teilen angeboten. Der erste Teil findet im Wintersemester statt, der zweite Teil im darauffolgenden Sommersemester. Beide Teile umfassen jeweils 6 ECTS und beinhalten wöchentliche Einführungen, begleitende Übungen, vertiefende Projektanteile, ein Abschlussprojekt (Demonstrator), eine mündliche Prüfung und eine Semesterdokumentation. Das Modul ist als Lehrveranstaltung für die Curricula der Masterstudiengänge „Digital Engineering“, „MediaArchitecture“ und „Produktdesign“ an den Fakultäten Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Architektur und Urbanismus sowie Kunst und Gestaltung an der Bauhaus-Universität Weimar angeboten. Studierende können das Modul sowohl im Wahlbereich als auch als Teil ihrer Masterspezialisierung anrechnen lassen. Aufgrund des inhärent interdisziplinären Charakters wird das Modul zusätzlich als „Bauhaus.Modul“ ausgewiesen und zugänglich gemacht.

Eine Teilnahme am Modul ermöglicht den Studierenden eine erstmalige Auseinandersetzung mit dem Thema Robotik – und verbundener Ansätze wie Computational Design, Mensch-

Roboter-Interaktion, Additive Manufacturing, Künstliche Intelligenz, Tragwerksentwurf etc. – und verfolgt gemäß dem „Weimarer Modell“ eine integrative, projektbezogene Herangehensweise. Es ist entsprechend problemlösungsorientiert konzipiert und erlaubt die Berücksichtigung unterschiedlicher Einstiegskompetenzen der Studierenden. Zugleich ermöglicht eine erfolgreiche Teilnahme am Modul eine (konsekutive) Fortsetzung beispielsweise als Vertiefungsmodul, Freies Projekt, Qualifikations- und Abschlussarbeit. Hierzu vermittelt „RoboTec“ die notwendigen theoretischen, methodischen, technischen und angewandten Grundlagen: So werden die Studierenden der unterschiedlichen Fakultäten befähigt, gemeinsam und aktiv an der Konzeption, Umsetzung und Validierung von robotischen Bauprozessen mitzuwirken („learning through robotics“). Hierfür werden die genannten Kompetenzbereiche nicht nur einzeln, sondern in der Gesamtheit benötigt. Es ist daher ein zentrales Anliegen des Moduls, die Studierenden einerseits mit den hierfür notwendigen Grundlagen auszustatten, andererseits konkrete Anwendungsmöglichkeiten in Anschlag zu bringen, welche die unterschiedlichen Ansätze und Herangehensweisen integrieren und vertiefen.

Lehr- und Lernziele

Im Rahmen des Moduls erwerben die Studierenden grundlegende Kenntnisse zu Robotik, einschließlich Steuerung und Mechanik (z.B. Programmierung, API, Inverse Kinematik, Simulation etc.), welche sie zum Entwurf möglicher Assemblierungslogiken und -prozesse und damit zum Entwurf entsprechender automatisiert gebauter, tektonischer Tragwerke befähigen. Gleichzeitig werden experimentelle, materielle Erprobungen durchgeführt (inkrementell), sodass digitaler Entwurf und Planung in realweltlichen (maßstäblich, materialspezifischen etc.) Baubezügen erprobt und angepasst werden; beispielsweise, wenn es um virtuell-/CAD-generierte Bauelemente geht, die aufgrund von auftretenden physischen Positionierungs- oder Fügungsproblemen verändert oder gar neu entworfen werden müssen. Erst daraus ergibt sich ein tiefer angelegter epistemischer, funktionaler und kognitiver Erkenntnisprozess [26]. Zusätzlich werden wesentliche Kenntnisse im Bereich der additiven Bauproduktion und des Tragwerksentwurf vermittelt. Zur Integration der angesprochenen Wissens- und Kompetenzbereiche wird in jedem Semester eine gemeinsame Bauaufgabe („Grand Challenge“) gestellt, welche von den Studierenden in Gruppenkonstellation bearbeitet wird und zu konkreten, messbaren Prototypen führt. Die Modul-Teilnehmer*innen profitieren damit von einer projekt- und anwendungsbezogenen Zusammenführung von theoretischen, methodischen, technischen und anwendungsorientierten Kenntnissen. Zugleich werden sie befähigt, eigene robotische Assemblierungsprozesse zu entwickeln und neue Ideen umzusetzen bzw. existierende Anwendungen zu beurteilen und/oder weiterzuführen. Die im Semester durchgeführten Studien und erarbeiteten Ergebnisse werden dann in einer Abschlusspräsentation und Projektdokumentation reflektiert und mit anderen Teilnehmer*innen und Lehrenden diskutiert.

Alleinstellung und Mehrwert

Das „RoboTec“-Modul soll den Anforderungen einer innovativen Lehrinheit mit konstruktivistischen, fachübergreifenden und zugleich grundlegenden Lehrinhalten gerecht werden. Sicherlich sind einige Bestandteile bereits im Forschungskontext und/oder durch spezialisierte Workshops oder Summer Schools lanciert worden – eine integrale, interaktive und projektbezogene Zusammenführung (einschließlich theoretischer, methodischer, technischer und anwendungsorientierter Elemente) hat bisher noch nicht stattgefunden. Dies zeigen ebenso Studierendenbefragungen der vergangenen Jahre, indem zwar theoretische Grundlagen im Bereich Robotik und/oder anderer automatisierter Systeme online wahrgenommen werden, die tatsächliche Überführung in ein konkretes, experimentelles (und hier: bauliches) Format aber unzureichend stattfindet. Eine solche fehlende digital-materielle bzw. theoretisch-praktische Interaktion vermindert einen Lernerfolg und lässt das Interesse an robotischen Systemen sinken oder mithin ins Leere laufen. Auch ausschließlich multi-medial operierende Lehr- und Lernformate wie Tutorials, Trainings oder Simulationen helfen

kaum weiter, da auch hier die Vermittlung in einem sehr kleinen Ausschnitt und ohne eine tatsächliche, physische Interaktion mit einem robotischen System oder ebensolchen Prozessen und Resultaten stattfindet. Im Gegenteil: Tiefer angelegte Bewusstseins-, Interessens- und Verständnisformen resultieren oftmals aus der (praktischen) Anwendung des (theoretisch) Gelernten, sodass für das Modul eine interaktive Didaktik zentral steht. Zugleich wird damit eine (reale) Berührung der Studierenden mit der Thematik ermöglicht und durch eigene, kreative Projektarbeit weiter gefördert. In diesem Sinne wird das Modul einen nicht nur interaktiven, sondern auch integrativen, konstruktivistischen Ansatz verfolgen, in dem neue Ansätze, neue Methoden und neue Anwendungen von den Studierenden selbst gestaltet, realisiert, getestet oder auch angepasst werden, um damit ein gesamthafes Verständnis für „smarte“ Robotik im Baubereich zu gewinnen und eigene Interessen und Vorschläge einfließen lassen zu können.

3. Umsetzung

Modulkonzeption

Das „RoboTec“-Modul beinhaltet verschiedene Online- und Präsenzphasen sowie entsprechende Übungs- und Projektanteile bzw. Selbstlernkomponenten. Im Vordergrund steht die Vermittlung theoretischer Grundlagen sowie die unmittelbare, experimentelle und interaktive Anwendung durch gemeinsame robotische Bauversuche und -auswertungen (Abb. 3). Hierzu sind folgende Modulbausteine angedacht: *Erstens*, wöchentliche Einführungen (2h, Präsenz/online) zu ausgewählten theoretischen, methodischen, technischen und anwendungsorientierten Themen des robotischen Bauens, insbesondere im Bereich robotischer Assemblierung von nicht-standardisierten Tragwerken aus diskreten Grundelementen; *zweitens*, begleitende Übungen (2h, Präsenz/online) zu den Einführungsthemen, z.B. robotische Steuerung, robotische Manipulation, robotische Fügetechniken etc.; *drittens*, zusammenführende Projektarbeit (5h, Präsenz) in Gruppenkonstellation zur Bearbeitung einer übergreifenden Bauaufgabe, einschließlich prototypische Realisierung/Testung im Modellmaßstab; *viertens*, weiterführende/vertiefende Ausarbeitung (2h, Präsenz) als 1:1 Demonstrator zum Semesterabschluss, einschließlich Schlussbewertung und -verortung; und *fünftens*, zusammenfassende mündliche Prüfung/Endpräsentation (0.5h, Präsenz) und Abschlussdokumentation von Daten/Ergebnissen (0.5h, online).

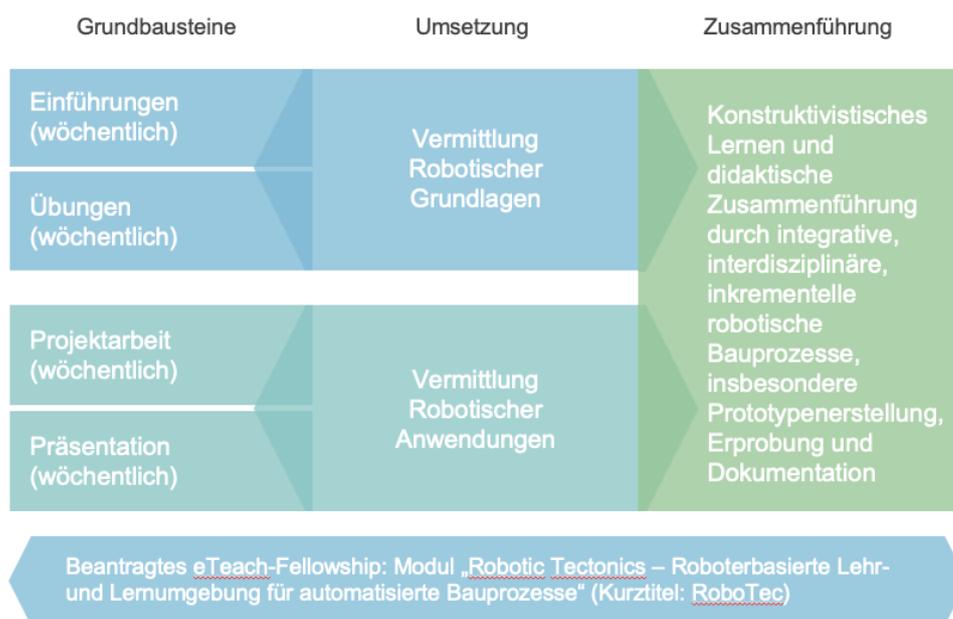


Abb. 3: Konzeption des „RoboTec“-Lehrmoduls, bestehend aus unterschiedlichen Modulbausteinen, die sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Inhalte enthalten und durch die integrative, interdisziplinäre Entwicklung und Erprobung von realen robotischen Bauprozesse zusammengeführt werden (Bauhaus-Universität Weimar, 2024).

Die 5 Modulbestandteile resultieren somit in eine wöchentliche Stundenlast von 10 SWS für Studierende, die ergänzt werden durch weitere 2.5 SWS für das vorbereitende/nachbereitende Selbst- und Eigenstudium. Die insgesamt 12.5 SWS ergeben für ein durchschnittliches Studiensemester mit 13.5-14.5 Wochen eine Gesamtstundenlast von 180 SWS (ergibt 6 ECTS). Damit lässt sich das Modul sowohl konzeptionell, inhaltlich und quantitativ passgenau in die oben genannten, bestehenden Curricula einbetten.

Modulararbeitung

Die angesuchte Fellowship-Förderung soll es erlauben, das beschriebene „RoboTec“-Modul in zwei Semestern zu konzipieren, zu implementieren und zu validieren. Der integrative, interaktive Ansatz des Moduls erfordert verschiedene inhaltliche und methodische Elemente, die in einen didaktischen, operativen Rahmen zu setzen und mittels unterschiedlicher Szenarien zu erproben sind. Folglich ist beabsichtigt, aufeinander aufbauende und zugleich flexible Modulbestandteile/-einheiten zu entwickeln und unterschiedliche Übungs- und Projektaufgaben zu erarbeiten. Um diese Zielsetzung in der vorgegebenen Projektlaufzeit von 12 Monaten zu erreichen, wird eine Untergliederung in 5 Teilziele vorgeschlagen. Diese bauen logisch aufeinander auf und dienen als Grundlage für die Konzeption des Moduls.

1. Definition eines umfassenden didaktischen und technischen Kriterien- und Szenarienkatalogs zur Vermittlung robotischer Assemblierungsprozesse für nicht-standardisierte Tragwerke (Metriken, Typologien, Schnittstellen);
2. Entwicklung eines (experimentellen) robotischen Versuchsaufbaus, einschließlich CAD (McNeel Rhinoceros 3D), CAE (Compas), CAM (ROS, HAL) sowie mechanisch-physische Gesamtintegration;
3. Vorbereitung und Durchführung von 2-4 Lehr-/Lernprojekten, u.a. prototypische Studien und 1:1 Demonstrationen unter besonderer Gewichtung von Mensch-Roboter-Interaktion, technische Funktionalität, bauliche Performanz;
4. Validierung und Überarbeitung mittels Usability-Testungen, Studierendenbefragungen, User Journeys, gezielte Lehr-/Lernzielanpassungen, Erweiterung Versuchsaufbau, zusätzliche Prototypentests, ggf. Upscaling;
5. Dokumentation sowie Wissens- und Technologietransfer durch 1 wissenschaftliche Publikation (national/international), 2-4 Ausstellungsbeiträge und zusätzliche Workshops, ggf. Messebeitrag.

Modulsetup

An der Bauhaus-Universität Weimar stehen zahlreiche Labor-, Werkstatt- und Testeinrichtungen zur operativen Durchführung des Moduls zur Verfügung. Die antragstellenden Professuren können unmittelbar darauf zugreifen. Die Professur Designtheorie/Designforschung verfügt insbesondere über ein Design Research Lab, welches das angeführte Roboter-Setup beinhaltet und den Studierenden unmittelbare Zugangs- und Erprobungsmöglichkeiten erlaubt. Gleiches gilt für programmiertechnische Schnittstellen und Plugins (hier: McNeel Rhinoceros 3D-Grasshopper-HAL) und entsprechende Daten- und Prozessmodelle. Die Professur Komplexe Tragwerke ergänzt das bestehende Setup um Prüfanlagen und Prüfprotokolle bzw. entsprechende Arbeitsplätze und Arbeitsmöglichkeiten. Zugleich bestehende einschlägige Erfahrungen und Werkzeuge im Bereich virtueller Testung und Simulation [27, 28]. Auf dieser operativen Grundlage können die Studierenden unmittelbar befähigt werden und eigene prototypische Bauprozesse und Tragwerke entwickeln. Die Roboter-Programmierung mittels einer bereits definitiver Prozesskette (HAL/URScript/Python) lässt innerhalb des Moduls eine kohärente, robuste und für alle Studierenden verfügbare Daten- und Prozessbasis entstehen, die als Open Source Beitrag auch anderen Gruppen oder Hochschulen zugänglich gemacht werden kann.

Modulimplementierung

Die Implementierung des „RoboTec“-Moduls wird in zwei semestralen, konsekutiven Umsetzungsstufen vollzogen.

- a. Das Wintersemester 2024/25 fungiert als Auftaktsemester. Hier werden die genannten Modulbausteine erstmalig implementiert, getestet und validiert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Ausarbeitung des operativen Robotik-Setup, einschließlich Schnittstellen, der Vermittlung der wesentlichen Grundlagen und der Durchführung entsprechender Übungen und Projektstudien. Die Ergebnisse sollen an der Winterwerkschau/Go-for-Spring präsentiert werden.
- b. Das Sommersemester 2025 fungiert als Iterationssemester. Hier werden die genannten Modulbausteine angepasst, neu getestet und neu validiert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Hochskalierung bisheriger prototypischer Modellstudien und der Erarbeitung eines Demonstrators. Dieser soll an der Summaery und an eTeach-Veranstaltungen präsentiert werden. Hinzu kommt die Erarbeitung einer Gesamtevaluation, einer Projektdokumentation, einer wissenschaftlichen Publikation und die Archivierung der Projektstudien/-ergebnisse in einer Open-Access-Datenbank.

Modulfinanzmittel

Für die Konzeption, Implementierung und Validierung des „RoboTec“-Moduls werden 2x 25 Stellenprozente (TVL 13, Stufe 2 oder höher) über eine Laufzeit von 12 Monaten angesucht. Damit sollen zwei bestehende Mitarbeiter*innen-Stellen von bisherigen Lehrtätigkeiten entlastet bzw. zur Durchführung des Moduls finanziert werden. Hinzu kommen allfällige Verbrauchs- und Dokumentationsmittel (für weitere Informationen: siehe Finanzierungsplan).

4. Ausblick

Mögliche Einschränkungen

Durch die einschlägige Erfahrung der beiden antragstellenden Professuren, ihrer umfassenden Projekt- und Publikationsarbeit und nicht zuletzt durch ihre langjährige Lehrpraxis im Bereich Design/Robotik (einschließlich Bauhaus Lehrpreis) bzw. Bauprozess/Tragwerk sind die Einschränkungen und/oder Projektrisiken sehr gut abschätzbar. Zudem wurden bereits unterschiedliche Forschungs- und Lehrprojekte im genannten Themenbereich und/oder mit dem angeführten Robotik-Setup durchgeführt und entsprechend hochrangig veröffentlicht [29, 30, 31]. Zudem haben bisherige Lehr- und Projektanalysen einen eindeutigen Bedarf für ein solches digital-materielles Lehrmodul im Bereich „smarter“ Robotik bzw. robotischen Bauens ergeben. Konkrete Risiken bestehen demnach lediglich auf organisatorischer Ebene und der „Verschaltung“ der unterschiedlichen Modulbausteine innerhalb eines begrenzten Semesterzeitrahmens. Hierzu ist nicht abschließend geklärt, welche Gruppengrößen zulässig sind und an einem solchen Modul teilnehmen können, ohne dass kompromittierende Auswirkungen (z.B. fehlende Interaktionszeiten) entstehen. Als Risikovermeidungsstrategie wird das Modul im Wintersemester zunächst mit einer Teilnehmer*innen-Anzahl von 8-12 Studierenden durchgeführt, bevor dann, im Sommersemester, ggf. eine größere Anzahl zugelassen wird. Des Weiteren ist einem inkonsistenten Datenhandling vorzubeugen, indem die Studierenden ihre Skripte in einem gemeinsamen Git-Repository ablegen und regelmäßige Datensicherungen durchgeführt werden. Um die vermeintliche (stereotypische) Belegung des Moduls durch ausschließlich männliche Studierende zu vermeiden, wird in der Konzeption, Ausschreibung und Platzvergabe ausdrücklich auf weibliche und diverse Bewerber*innen geachtet bzw. werden diese gezielt angesprochen.

Validierung

Die im Rahmen des Moduls entstehenden Prozesse und Ergebnisse werden integrativ und inkrementell entwickelt, sodass die Ergebnisse aus dem Wintersemester 2024/25 ausgewertet und dokumentiert bzw. als zweite Iteration in das Sommersemester 2025 einfließen können. Daher ist es essenziell, durch qualitative Studierenden-Befragungen bzw. Lehrevaluationen (z.B. Fragebögen, Interviews und Beobachtungen) und zusätzlich durch quantitative Ergebnisvalidierung (z.B. Wissens- und Kompetenzmessung, bauliche Performanz, Tragwerkseigenschaften) einen dynamischen Lehr-/Lernprozess anzustoßen, welcher das beantragte Modul nicht als absolut oder statisch verortet, sondern vielmehr einen Innovationsprozess initialisiert, welche eine nachhaltige Entwicklung (und curriculare Einbettung) ermöglicht. Auch ethische Fragen werden in Feedback-Runden mit den Studierenden thematisiert, beispielsweise Fragen von zukünftigen Autonomieformen, Mensch-Roboter-Beziehungen, Arbeits- und Automatisierungsprozessen etc. Zur Validierung und Sicherstellung der Lernziele wird zusätzlich auf die Unterstützung und Expertise der BUW-Abteilung Universitätsentwicklung flankierend zurückgegriffen.

Nachhaltigkeit

Mit dem beantragten Projekt soll ein robotisches Lehrmodul entwickelt und in zwei Semestern implementiert werden. Alle essentiellen Grundlagen- und Anwendungsinhalte sollen hierzu ausführlich validiert und dokumentiert werden bzw. somit einer größeren und Fakultäts- und Universitätsgrenzen überschreitenden Gruppe an Studierenden und/oder Interessierten zugänglich gemacht werden. Entsprechende Skripte, Schnittstellen, Studien etc. des Moduls sollen daher in einem Git-Repository archiviert und damit nachhaltig zugänglich gemacht werden. Ebenso bildet die Validierung und Dokumentation der Lehrinhalte die Grundlage zur Durchführung unmittelbar anschließender Projekte bzw. Abschluss- und Qualifikationsarbeiten. Gleichzeitig ist das Modul als Baukastensystem konzipiert, der es erlaubt, wesentliche Lehrinhalte modular zu erweitern, anzupassen und/oder in andere Lehr- und Lernbereiche zu transferieren (z.B. als Open Educational Resources, Lizenz CC BY- NC 3.0 DE oder aktueller). Nicht zuletzt deshalb soll das Modul auch über den Förderzeitraum hinaus angeboten und dauerhaft innerhalb der genannten BUW-Studienprogramme implementiert werden. Hierzu soll bei anstehenden Reakkreditierungen überprüft werden, ob (bei einer positiven Validierung/Endvalidierung und Sicherstellung entsprechender Ressourcen) eine nachhaltige Verortung als Pflichtmodul möglich ist.

Transfermöglichkeiten

Mit der Ausrichtung, robotische Bauprozesse in einem interaktiven, integralen Projektmodus gestalten und umsetzen zu können, ist das Modul einerseits explizit auf das Thema „smarte“ Robotik zugeschnitten, wobei andererseits ein solches Lehrangebot an unterschiedlichen Bildungsinstitutionen in Thüringen und darüber hinaus angeboten und adaptiert werden kann. Zum Beispiel lassen sich spezifische Modulbausteine wie maschinelle Ansteuerung, Bauteilgenerierung, Prozesskettenlogik, Additive Fertigung, Tragwerksentwurf etc. separat herauslösen und auch für nicht-robotische Studieninhalte anpassen/nutzen. Demgegenüber ist das Modul in seiner thematischen, methodischen und technischen Ausrichtung deutlich projekt- und anwendungsorientiert ausgelegt, sodass auch außerhochschulische Bereiche profitieren können, z.B. durch Workshops, Weiterbildung, Industrieformate, Messebeteiligungen etc. Zusätzlich beabsichtigt das Modul den Austausch mit anderen eTeach-Fellowships und eTeach-Formaten zu fachspezifischen Diskussionen und ggf. zur Ausarbeitung übergreifender Szenarien und/oder Übertragungen in gemeinsame, weiterführende Lehr- oder Anwendungsfelder. Innerhalb der BUW sind die antragstellenden Professuren durch verschiedene Lehr-, Forschungs- und Transferaktivitäten und ihre engagierte Gremienarbeit bestens vernetzt, sodass zu erwarten ist, dass spezifische Lehr-/Lerninhalte des Moduls auch für andere Kolleg*innen interessant sein könnten. Durch das Design Research Labor der Professur Designtheorie/Designforschung erfährt das Modul im

Falle eines positiven Förderbescheids eine zusätzliche (nationale/internationale) Außenwirkung. Darüber hinaus besteht die Absicht, das Modul mit bestehenden eLearning-Initiativen der BUW in Kontakt zu bringen, um weitere Szenarien, Chancen, aber auch Risiken abzustecken und Synergien zu ermöglichen. Hinzu kommt der regelmäßige Austausch mit externen Kolleg*innen, die im Bereich „smarter“ Robotik bzw. baulicher Anwendung lehren und forschen, z.B. mit Prof. Arash Adel (Princeton University), Prof. Matthias Kohler (ETH Zürich) oder Prof. Norman Hack (TU Braunschweig). Außerdem ist die Professur Designtheorie/Designforschung seit 2016 Mitherausgeber des Springer-Fachjournals „Construction Robotics“ und wird dort über die Projektergebnisse in regelmäßigen Abständen informieren.

5. Literaturverzeichnis

- [1] H.-J. Buxbaum (Hrsg.), *Mensch-Roboter-Kollaboration*, Wiesbaden: Springer, 2020.
- [2] O. Bendel (Hrsg.), *Soziale Roboter: Technikwissenschaftliche, wirtschaftswissenschaftliche, philosophische, psychologische und soziologische Grundlagen*, Wiesbaden: Springer, 2021.
- [3] H. Arnautovic, A. Habegger, S. Haller, *Grundlagen der Robotic Process Automation*. In: J. Schellinger, K.O. Tokarski, K.O., I. Kissling-Näf, (Hrsg.), *Digital Business*, Wiesbaden: Springer, 2021.
- [4] D. Reinhardt, R. Saunders, J. Burry (Hrsg.). *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, Cham/Heidelberg/New York/Dordrecht/London: Springer, 2016
- [5] T. Bock, T. Linner, W. Lauer, N. Eibisch. *Automatisierung und Robotik im Bauen*. In: *Archplus 198/199*, 2010, S. 34–39
- [6] JI. Jäkel, P.M. Zoghian, K. Klemt-Albert, *Anwendungsfelder und Implementierungsmodelle von Robotik im Bauwesen*. In: Haghsheno, S., Satzger, G., Lauble, S., Vössing, M. (eds) *Künstliche Intelligenz im Bauwesen*, Wiesbaden: Springer, 2024.
- [7] F. Gramazio, M. Kohler, *Digital Materiality in Architecture*, Baden: Lars Müller, 2008.
- [8] A. Menges, T. Schwinn. *Manufacturing Reciprocities*. In: *Architectural Design (AD)*, Volume 82, Issue 2, 2012, S. 118–125.
- [9] J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler. *The Robotic Touch. How Robots Change Architecture*, Zurich: Park Books, 2014.
- [10] M. Bechthold, *The Return of the Future: A Second Go at Robotic Construction*. In: *Architectural Design (AD)*, Volume 80, Issue 4, 2010, S. 116–121.
- [11] S. Brell-Cokcan, J. Braumann, *Rob|Arch 2012 – Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, Wien/New York: Springer, 2013.
- [12] T. Bauernhansl, M. ten Hompel, B. Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden: Springer, 2014
- [13] J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne, T. Schork. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Heidelberg/Cham: Springer, 2018.
- [14] Professur Designtheorie, Bauhaus-Universität Weimar: www.uni-weimar.de/designtheory (abgerufen: 01.05.2024).
- [15] L. Abrahamczyk, M. Haweyou, F. Schrödel (2023): *TaskSheet - Science Camp SoSe 2023 an der Hochschule Schmalkalden; Robotik und 3D-Druck im Ingenieurwesen*; <https://www.uni-weimar.de/de/bau-und-umwelt/professuren/komplexe-tragwerke/forschung/aktuelle-projekte/protelc/> (abgerufen: 01.05.2024).
- [16] A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Roman, *Interactive Collaborative Robotics 6th International Conference, ICR 2021*, St. Petersburg, Russia, September 27–30, 2021.
- [17] J. Piaget, *The Psychology of Intelligence*, London: Routledge, 1950.
- [18] M. R. Matthews, *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. Dordrecht: Springer, 2014, S. 1024ff.
- [19] J. Pelech, *The Comprehensive Handbook of Constructivist Teaching: From Theory to Practice*. Charlotte, NC, 2010.
- [20] A. Menges, S. Ahlquist, *Computational design thinking: computation design thinking (AD Reader)*, 1st edn. London: Wiley, 2011.
- [21] J. Biggs, C. Tang, *Teaching for Quality Learning at University: What the Student Does*, Maidenhead: Open University Press, 2011.
- [22] P. Yuan, A. Menges, N. Leach, N. (Hrsg.), *Robotic Futures*, Tongji: Tongji University Press, 2015.
- [23] B. Wibranek, O. Tessmann, *Interfacing architecture and artificial intelligence*, in: A. Imdat, B. Prithwish (Hrsg.), *The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture*, London: Routledge, 2021.
- [24] T. Bonwetsch, *Robotic Assembly Processes as a Driver in Architectural Design*. In: K. Williams (ed.), *Digital Fabrication. Nexus Network Journal*. Birkhäuser, 2014.
- [25] J. Willmann, M. Knauss, T. Bonwetsch, A. Apolinarska, F. Gramazio, M. Kohler. *Robotic Construction. Expanding Digital Fabrication to New Dimensions*. In: *Automation in Construction*, Volume 61, 2016, S. 16–23.
- [26] W. Schnotz, M., Bannert, *Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text- und Bildverstehen*. In: *Experimental Psychology (3)*, S. 217–236, 1999.
- [27] J. Salzinger, I. Kurniawati, L. Abrahamczyk, R. Höffer, *Thinking outside the box Virtual labs in engineering education*. 9th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'23), June 19–22, Valencia, Spain, 2023.
- [28] M. Mirboland, F. Tasliarmut, L. Abrahamczyk, Ch. Koch, *A mixed reality application for holographic structural analysis experiments*, Conference: 2022 European Conference on Computing in Construction, 2022.
- [29] E. Naphausen, A. Muxel, J. Willmann, *New Design Potentials of Non-mimetic Sonification in Human-Robot Interaction*. *J. Hum.-Robot Interact*. August 2023.
- [30] D. Reisach, S. Schütz, J. Willmann, S. Schneider, *A Design-to-Fabrication Workflow for Free-Form Timber Structures Using Offcuts*. In: Turrin, M., Andriotis, C., Rafiee, A. (Hrsg.) *Computer-Aided Architectural Design. Interconnections: Co-computing Beyond Boundaries. CAAD Futures 2023. Communications in Computer and Information Science*, vol 1819. Springer, Cham.
- [31] J. Willmann, *Robotic Brickwork. Towards a New Paradigm of the Automatic*. In: H. I. Foged, (Hrsg.): *Bricks / Systems*. Aalborg: Aalborg Universitetsforlag, 2016. S. 51–64.

Arbeitsplan Antragsvorhaben Abrahamczyk-Willmann

Robotic Tectonics – Roboterbasierte Lehr- und Lernumgebung für automatisierte Bauprozesse (Kurztitel: RoboTec)

1. Arbeitsplan und Meilensteine

Gemäß der im Projektantrag im Abschnitt 3 definierten Ziele und Teilziele ist das Vorhaben in fünf Arbeitspakete (AP) aufgeteilt, welche in mehrere Unteraufgaben, d.h. Tasks (T) untergliedert sind. Abschließend ist jedes Arbeitspaket mit einem klar definierten Meilenstein (M) spezifiziert. Die Meilensteine definieren den Erfolg der Arbeitspakete und umfassen qualifizierbare, didaktisch-empirische Zielsetzungen. Insgesamt baut das Vorhaben auf der konstruktivistischen Vermittlung von wesentlichen Prozesskomponenten (und deren Zusammenführung) robotischer Assemblierungsverfahren auf. Im Vordergrund steht daher die Durchführung mehrerer digitaler/materieller Prototypenstudien, welche experimentell erarbeitet, iterativ realisiert und begleitend validiert werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für eine kontinuierliche und zielgerichtete Entwicklung.

AP 1: Grundlegender Kriterien- und Szenarienkatalog (Monat 1-1)

- T 1.1: Charakterisierung grundlegender Kriterien, einschließlich Didaktikmodell, Lehrtheorie, Mensch-Maschine-Interaktion, Schnittstellen, Peripherie und Sicherheit
- T 1.2: Definition grundlegender Szenarien, einschließlich Lehrformat, Methodologie, Robotik-Setup, bauliche Typologie, Maßstäblichkeit, Logistik und Anwendungsformen
- T 1.3: Zusammenführung der wesentlichen Kriterien und Szenarien zur Ausarbeitung von 2-4 Lehreinheiten, einschließlich interner/praktischer Vortests

Haupt-Meilenstein (M 1): Kriterien- und Szenarienkatalog für die Vermittlung robotischer Assemblierung im Lehr- und Lernkontext sowie Erarbeitung 2-4 Lehreinheiten

AP 2: Einrichtung Versuchsaufbau und Integration (Monat 1-3)

- T 2.1: Implementierung Computer-Aided-Design (CAD) Workflow, mittels bestehender CAD-Umgebung (McNeel Rhinoceros 3D) sowie Schnittstellenausbildung
- T 2.2: Implementierung Computer-Aided-Engineering (CAE) Workflow, mittels bestehender CAE-Umgebung (Compas) sowie ergänzender Programme
- T 2.3: Implementierung Computer-Aided-Manufacturing (CAM) Workflow, mittels bestehender CAM-Umgebung (ROS, HAL, URScript) sowie Integration aller Prozesskomponenten (digital/physisch)

Haupt-Meilenstein (M 2): Entwicklung Versuchsaufbau und Integration aller Prozesskomponenten in funktionales Robotik-Setup, einschl. Ansteuerung, Peripherie

AP 3: Vorbereitung und Durchführung von Lehr-/Lerneinheiten (Monat 3-12)

- T 3.1: Vorbereitung von 2-4 Lehreinheiten im Rahmen bestehender BA/MA-Curricula, vorzugsweise Doppelkombination aus Projekt- und Fachmodulen (18+6 ECTS)
- T 3.2: Implementierung von 2-4 Lehreinheiten ab Wintersemester 2024/2025, einschließlich Robotik-Setup, digitale Prozesskette, materielle Entwicklung
- T 3.3: Realisierung zusätzlicher 1:1 Demonstratoren und Workshops, und insbesondere „Operational Prototype“ sowie einheitliche Lehr-/Lernumgebung

Haupt-Meilenstein (M 3): Umsetzung von 2-4 Lehr-/Lerneinheiten und Prototypenserien sowie Optimierung von AP 1, 2 und 4 als einheitliche, Lehr-/Lernumgebung

AP 4: Validierung und Anpassung (Monat 6-12)

- T 4.1: Validierung der 2-4 Lehreinheiten, u.a. durch qualitative, semi-strukturierte Interviews und Validierungsbögen, einschließlich Auswertung
 - T 4.2: Validierung der Studienergebnisse, Prozessschritte und Prototypen, u.a. durch quantitative Usability-Studien, Testzyklen und Tragwerkbelastungstests
 - T 4.3: Triangulation und Rückführung in die entsprechenden Arbeitspakete und Reiteration bzw. Optimierung u.a. des gewählten Didaktikmodells und Versuchsaufbaus
- Haupt-Meilenstein (M 4): Validierung der Lehr- und Lernergebnisse, sowohl prozess-, wissens- und kompetenz- als auch ergebnisbezogen, dazu Optimierung von AP 1, 2, 3

AP 5: Dokumentation und Transfer (Monat 1-12)

- T 5.1: Fortlaufende Dokumentation der einzelnen Arbeits- und Prozessschritte in Text/Bild/Film/Code mittels Projektdatenbank, Log Files, GitHub
 - T 5.2: Wissenschaftliche Dokumentation durch 1-2 wissenschaftliche Präsentationen und Veröffentlichungen (national/international)
 - T 5.3: Projektbezogene Dokumentation durch Zwischen- und Schlussbericht sowie Teilnahme, Demonstrationen und Veranstaltungen im Rahmen des eTeach-Programms
- Haupt-Meilenstein (M 5): Umfassende und nachhaltige Dokumentation des Vorhabens sowie flankierende Transferaktivitäten durch Workshops und 1:1 Demonstrationen

3. Zeitplan

Arbeitspakete (AP)	Tasks (T)	Q1			Q2			Q3			Q4		
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
AP 1: Kriterien- und Szenarien-katalog	T 1.1 Grundlegende Kriterien u. Schnittstellen	█	█										
	T 1.2 Grundlegende Szenarien u. Anforderungen	█	█										
	T 1.3 Zusammenführung und Ausarbeitung	█	█	█									
AP 2: Versuchsaufbau und Integration	T 2.1 Implementierung Computer-Aided Design (CAD)	█	█	█									
	T 2.2 Implementierung Computer-Aided Engineering (CAE)	█	█	█									
	T 2.3 Implementierung Computer-Aided Manufacturing (CAM)	█	█	█	█								
AP 3: Lehr-/Lerneinheiten	T 3.1 Vorbereitung 2-4 konsekutive Lehr-/Lerneinheiten		█	█	█	█	█						
	T 3.2 Implementierung 2-4 konsekutive Lehr-/Lerneinheiten		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	T 3.3 Zusätzliche Demonstratoren und Workshops				█	█	█			█	█	█	█
AP 4: Validierung und Anpassung	T 4.1 Validierung Lehr-/Lerneinheiten, u.a. qualitativ				█	█	█	█	█	█	█	█	█
	T 4.2 Validierung bauliche Prozesse u.a. quantitativ					█	█	█	█	█	█	█	█
	T 4.3 Triangulation und Rückführung						█	█	█	█	█	█	█
AP 5: Dokumentation und Transfer	T 5.1 Fortlaufende Dokumentation und Archivierung	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	T 5.2 Wissenschaftliche Dokumentation					█	█	█	█	█	█	█	█
	T 5.3 Projektbezogene Dokumentation (eTeach)			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Abb. 1: Zeitplan des Vorhabens „RoboTec“ mit einer Projektlaufzeit von 12 Monaten.

Der Zeitplan (Abb. 1) ist monatsweise gegliedert und aufgeteilt in 4 Quartalstranchen; er baut auf den 5 genannten Arbeitspaketen (AP) und jeweils 3 Tasks (T) auf (siehe Abschnitt 1). Das Farbschema gliedert sich wie folgt: grün/Arbeitspaketleitung Willmann (BUW); türkis/Arbeitspaketleitung Abrahamczyk (BUW); rot/gemeinsame Arbeitspaketleitung. Hinweis: Die jeweils farbig helleren Tabellenelemente entsprechen vorgelagerten/nachgelagerten Arbeiten bzw. Vorbereitungen/Nachbereitungen.