

# Modellbildung im Ingenieurbau

## Vom Bauwerk ins statische Modell und zurück

Dr.-Ing. Okyay Altay  
RWTH Aachen University  
Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik

März 2018

Dieses Lehrvorhaben wurde durch die gemeinsame  
Programmlinie *Fellowship für Innovationen in der digitalen Hochschullehre*  
des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen  
und des Stifterverbandes finanziert.

## **INHALT**

1	Beschreibung der Lehrinnovation.....	1
2	Ziele und Ergebnisse.....	2
3	“Lessons Learnt” und Verstetigung der Lehrinnovation .....	5
4	Übertragung der Lehrinnovation auf weitere Lehr- und Lernsituationen.....	6

# 1 BESCHREIBUNG DER LEHRINNOVATION

Während der Planung eines Bauwerks sind das Dimensionieren von Tragelementen und die Festlegung des Baumaterials die wichtigsten Aufgaben eines Statikers. Hierfür wird das Bauwerk durch ein Tragwerk abgebildet. Als mechanische Modelle erlauben Tragwerke Trag- und Verformungseigenschaften von Bauwerken mathematisch zu erfassen. Mit diesen Modellen kann der Statiker herausfinden, ob die gewählten Tragelemente zur Realisierung des Bauwerks geeignet sind. Der Vorgang bis zur fertigen Auslegung von Tragelementen besteht damit insgesamt aus zwei Schritten: Modellbildung und Bemessung. Der Bemessungsablauf wird in zahlreichen Lehrveranstaltungen detailliert thematisiert. Dagegen wird die Modellbildung im Studium kaum behandelt, weil der hierfür notwendige Lernprozess mit klassischen Mitteln nicht möglich ist.

Zur Lösung dieses Problems wurde im Rahmen dieses durch die Programmlinie *Fellowship für Innovationen in der digitalen Hochschullehre* geförderten Lehrvorhabens eine elektronische, browsergestützte Lernplattform entwickelt. Dabei können Studierende auf Abbildungen von realen Bauwerken den Modellierungsvorgang von Tragwerken interaktiv üben. Die Anwendung erfolgt online und kann damit betriebssystemunabhängig genutzt werden. Die Plattform überprüft dabei die Plausibilität der eingegebenen Modelle anhand vordefinierter Kriterien. Das Programm gibt Feedback über die Richtigkeit des gewählten Tragwerks und fördert den Lernprozess mit Hinweisen zur Verbesserung des Modells. Die Studierende können dann mit dem gewählten Tragwerk die Reaktionen des Bauwerks auf Belastungen ermitteln und mit den Bemessungskriterien überprüfen. Außerdem können sie selber herausfinden, wie das gewählte Tragwerk das Ergebnis beeinflusst. Damit wird der Lernvorgang durch Variieren und Ausprobieren verschiedener Lösungswege spielerisch animiert.

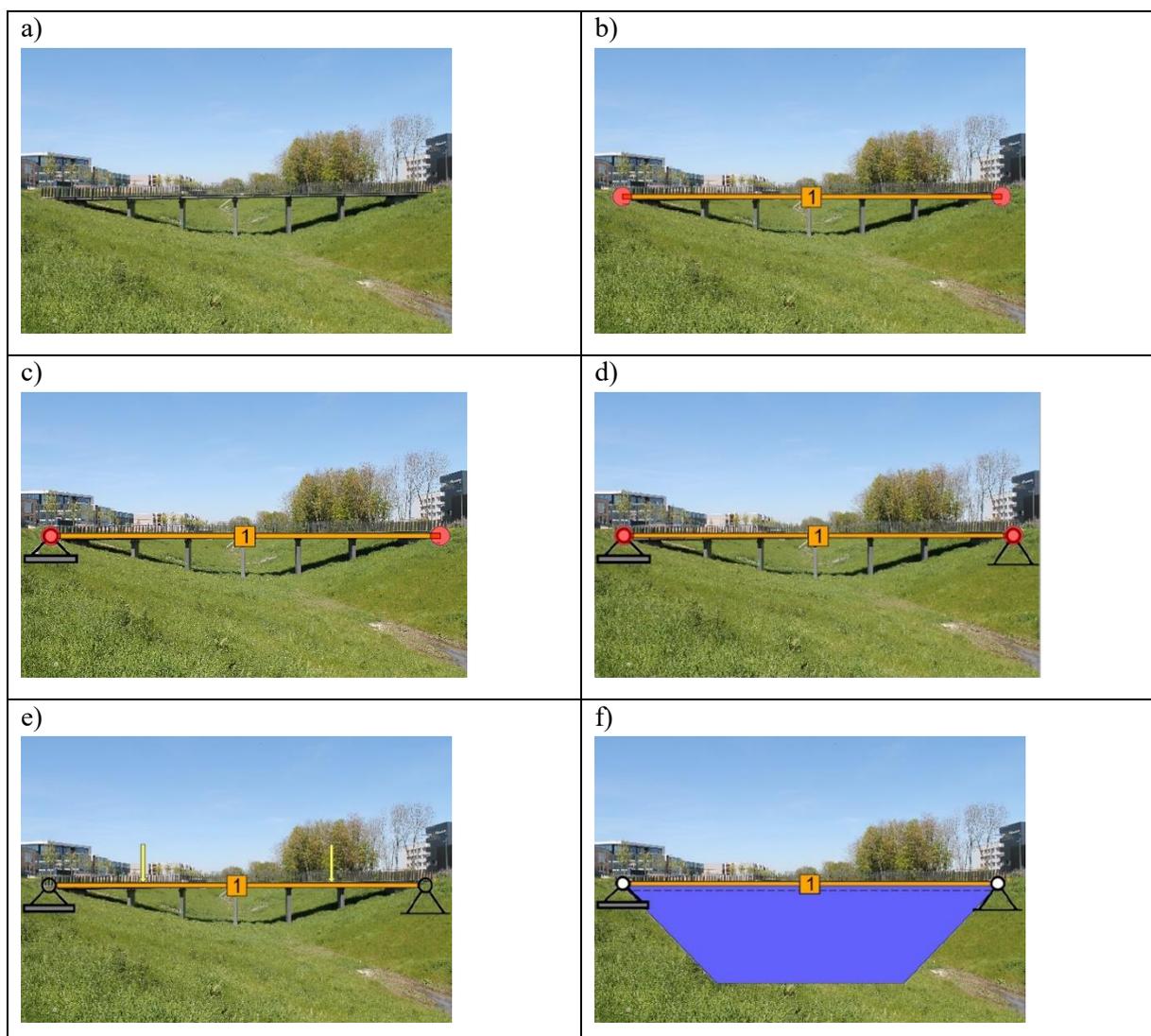
Die entwickelte Lernplattform kann während Vorlesungen eingesetzt werden, um interaktiv Beispiele mit den Studierenden zu üben. Dabei können die Teilnehmer ihre Tragsysteme individuell modellieren und diese anhand Feedbacks der Plattform verbessern. Im Anschluss kann der Dozent mit den Studierenden verschiedene Lösungswege diskutieren. Die Studierenden können die Lernplattform auch zum selbstlernen einsetzen, beispielsweise zur Wiederholung der Lerninhalte nach einer Vorlesung im Rahmen von Hausarbeiten oder als Selbststudium zur Klausurvorbereitung.

Dabei wird nicht nur die Analysefähigkeit der Studierenden gestärkt, sondern durch selbständiges Ausprobieren ein Gespür für das Bauwerksverhalten und die erforderlichen Tragelementabmessungen gefördert. Heutzutage werden zur Auslegung von Tragelementen in der Praxis computerbasierte Rechenmethoden angewendet. Weil die Modellbildung von Bauwerken derzeit im Studium nicht ausreichend geübt werden kann, wird das hierfür notwendige Wissen im Berufsleben erst nach mehrjähriger Erfahrung gelernt. Die Lerninnovation schließt diese Lücke im Studium.

Als Basis für die Lernplattform wurden im Rahmen des Projekts zahlreiche Bauwerke in der Umgebung von Aachen vor Ort aufgesucht und Bildaufnahmen davon erstellt. Dabei wurden Bauwerke anhand Konstruktionstyp untersucht und klassifiziert. Eine Zusammenstellung der analysierten Bauwerke ist im nächsten Abschnitt zu finden.

## 2 ZIELE UND ERGEBNISSE

Die Lernplattform wurde, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, planmäßig entwickelt. Studierende können mit der Lernplattform ihre Tragsysteme anhand verschiedener Bauwerke ausprobieren. Um die Abstraktionsschritte bei der Modellbildung besser zu üben, wurden dabei mediale didaktische Lehrpfade erstellt. Der Ablauf ist in Abbildung 1 zusammengestellt. Dabei wird das reale Bauwerk zunächst im Bildschirm illustriert (Bild a). Die Studierenden können dann die einzelnen Elemente des Tragsystems definieren und anhand Feedbacks des Programms verbessern (Bild b-d). Die Eingabe erfolgt dabei per Maus. Zum Schluss haben die Studierende die Möglichkeiten Lasten zu bestimmen und die Reaktionen des Bauwerks am gewählten Tragwerk zu ermitteln (Bild e,f). Dabei können sie die Modelle ändern, um die Einflüsse auf das Bauwerksverhalten zu untersuchen. In dem unten gezeigten Beispiel wurden beispielsweise die Brückenpfeiler nicht modelliert. Dadurch sehen die Studierende, dass sich die Kräfte im Bauwerk ungünstig verteilen und hohe Momente verursachen (s. Bild f), die dann wiederum in Feldmitte eine große Durchbiegung hervorrufen. Damit wird die Wirkung von Brückenpfeiler visuell dargestellt.



**Abbildung 1: Entwickelte Lernplattform. a) Abbildung des Bauwerks im Hintergrund. b)-d) Definition der Tragelemente: Überbau und Auflager. e) Definition der idealisierten Lasten. f) Ermittlung der Bauwerksreaktion (Hier der Momentenverlauf).**

Für die Lernplattform wurden acht Bauwerke in der Umgebung von Aachen untersucht. Abbildung 2 stellt die untersuchten Bauwerke zusammen. Dabei wurden, neben Bauwerke als Gesamtstruktur, auch dessen einzelne Tragelemente detailliert untersucht. Insbesondere für die Modellierung relevanten Auflager und Anschlüsse dokumentiert. Abbildung 3 zeigt Beispiele zu den untersuchten Tragelementen.



**Abbildung 2: Zusammenfassung der für die Lernplattform untersuchten Bauwerke.**  
**a) Autobahnbrücke A544 Auf der Hüls, b) Burtscheider Viadukt**  
**c) Einkaufswagenunterstand, d) Eisenbahnbrücke de Locht**  
**e) Fahrradunterstand Kerkrade, f) Fußgängerbrücke Campus Melaten**  
**g) Hauptbahnhof Aachen, h) Viadukt von Moresnet**



**Abbildung 3: Für die Lernplattform aufgenommene Tragelemente**  
**a) Brückenpfeiler – Autobahnbrücke A544 Auf der Hül**  
**b) Gelenkanschluss – Einkaufswagenstand**  
**c) Brückenaufleger – Eisenbahnbrücke de Loch**  
**d) Gelenkanschluss – Fahrradunterstand Kerkrade**  
**e) Geländeanschluss – Fußgängerbrücke Campus Melaten**  
**f) Auflager einer Stütze – Hauptbahnhof Aachen**

Die Implementierung der plattformunabhängigen Applikation in Form eines Browsers erfolgte in der Programmiersprache JavaScript. Zu diesem Zweck wurde eine graphische Umgebung entwickelt, welche die Eingabe von zweidimensionalen Tragwerken erlaubt. Als erstes wurde dafür die Eingabemöglichkeit eines Hintergrundbildes implementiert. Dabei wurde als Alternative, unterschiedliche Bildaufnahmen von Bauwerken als Vorlage definiert, wobei der Maßstab zusätzlich definiert wurde, um mit realistischen Größen zu arbeiten. Im nächsten Schritt wurde die geometrische Eingabe des Fachwerks implementiert. Dies geschieht als erstes über Mausklicks auf dem Hintergrundbild in dem die Stabknoten gesetzt werden. Über eine zusätzliche Zahleneingabe lassen sich die Koordinaten der Knoten genauer anpassen. Des Weiteren erfolgt die Implementierung von Auflagern. Diese wurde so umgesetzt, dass einzelne Stabknoten angeklickt werden um somit die Auflager anhand einer vorgegebenen Liste zu definieren. Als nächstes wurde die Vorgabe von Tragwerkslasten programmiert. Über die Wahl der Stäbe lassen sich

Einzel oder Streckenlasten über ein Zahlenfenster eingeben. Dabei wird die Größe der Last als auch die Position gesetzt. Abschließend lassen sich die Lösungen in Form von graphischen Momentverläufen angeben. Hier wird die Möglichkeit anhand von konstanten, linearen und quadratischen Lasten vorgegeben, in der die Extremwerte mit Position gewählt werden können.

Als Erweiterung ist ein FE Rechenkern vorgesehen durch die sich Lösungen in Abhängigkeit der Aufgabenstellung generieren lassen. Somit können Studierende am Modell experimentieren in dem sie Lasten und Auflager ändern. Die Software kann dann anhand der Modifizierungen die richtige Lösung ermitteln welche mit Lösungseingaben der Studierenden verglichen werden kann.

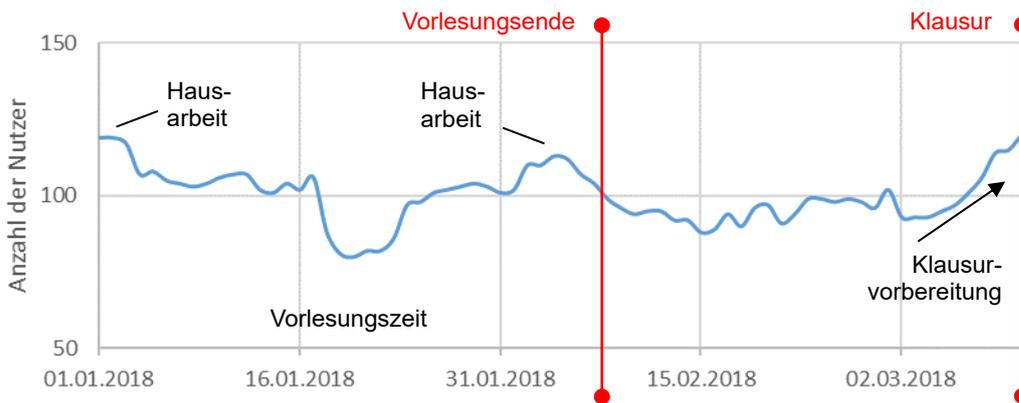
Derzeit wird für die Lernplattform ein Rechenkern entwickelt, der sich Lösungen in Abhängigkeit der Aufgabenstellung generieren lassen. Somit können Studierende am Modell experimentieren in dem sie Lasten und Auflager ändern. Die Software kann dann anhand der Modifizierungen die richtige Lösung ermitteln welche mit Lösungseingaben der Studierenden verglichen werden kann. Bisher muss für jedes Beispiel eine Musterlösung aufbereitet werden, womit die Plattform die Lösungen der Studierenden überprüft. Durch den Rechenkern könnte das Übungspool mit weiteren Beispielen deutlich vergrößert werden. Durch die geometrische Eingabe des Tragwerks lassen sich die Koordinaten der Stabknoten ermitteln, welche mit zusätzlichen Materialparametern die die Bildung der Steifigkeitsmatrix erlauben. Anhand der Vorgabe von Auflagern und Lasten am Tragwerk, wird die Steifigkeitsmatrix auf eine reguläre Matrix reduziert und die rechte Seite des Gleichungssystems entsprechend der Lasten modifiziert. Somit lässt sich das Gleichungssystem lösen wobei die Knotenverschiebungen ermittelt werden. Über eine Nachlaufrechnung werden Anhand der Lösungen die Momentverläufe der einzelnen Stäbe berechnet.

### **3 “LESSONS LEARNT” UND VERSTETIGUNG DER LEHRINNOVATION**

Bei den eingesetzten Lehrveranstaltungen gaben die Studierende für die Lernplattform ein sehr gutes Feedback. Jedoch die begrenzte Anzahl von Beispiele stellt ein Handicap für die Lernplattform dar, was durch den hohen Vorbereitungsaufwand von Musterlösungen resultiert. Hierfür war der Finite-Elemente-Rechenkern vorgesehen. Während dem Projekt stellte sich jedoch heraus, dass die Entwicklung des Rechenkerns deutlich komplexer ist. Mit der Fertigstellung des Rechenkerns kann, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, die Anzahl der Beispiele kontinuierlich mit geringem Aufwand erhöht werden.

Die Lernplattform wird bereits in den Vorlesungs- und Übungsveranstaltungen von Baustatik, einer der Grundfächer des konstruktiven Ingenieurbauwes, eingesetzt. Die vorbereiteten Beispiele sind zeitlos und können über Jahre hinweg ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand genutzt werden. Dadurch ist eine Verstetigung der Lehrinnovation sichergestellt.

Die Lernplattform wurde seit 01.01.2018 durch ca. 130 Studierenden als Lernmittel verwendet. Die Nutzerstatistiken sind in Abbildung 4 grafisch dargestellt. Interessant zu beobachten ist der Anstieg der Nutzeranzahl während der Klausurvorbereitung.



**Abbildung 4: Entwicklung der Nutzerzahlen der entwickelten Lernplattform**

## 4 ÜBERTRAGUNG DER LEHRINNOVATION AUF WEITERE LEHR- UND LERNSITUATIONEN

Die Lernplattform wurde für die Statik-Lehrveranstaltungen entwickelt, kann jedoch mit geringem Aufwand auch auf weitere Vorlesungen übertragen werden. Insbesondere Dynamik-Lehrveranstaltungen können dabei in Frage kommen. Die Studierenden konnten dabei die Lernplattform beispielsweise für die Ermittlung von dynamischen Bauwerksreaktionen auf wind-, erdbeben- und personeninduzierten Anregungen einsetzen. Hierzu wäre nur eine geringfügige Erweiterung der Lernplattform notwendig. Da für das dynamische Bauwerksverhalten neben Steifigkeit insbesondere Verteilung der Bauwerksmasse relevant ist, erleben neue Bauingenieure nach Ihrem Studienabschluss mit der Modellierung der Bauwerksmasse zahlreiche Probleme. Die Lernplattform konnte hier den Studierenden unterstützen, die Modellierung von dynamisch beanspruchten Bauwerken zu üben. Denkbar wäre auch der Einsatz der Lernplattform in den Mechanik-Lehrveranstaltungen von sowohl Bauingenieurwesen- als auch Maschinenbaustudiums.