

KI-Methoden zur Integration tragwerksplanerischen Wissens in frühe Phasen des Gebäudeentwurfsprozesses

Eine frühe Integration der tragwerksplanerischen Expertise in den Prozess des Gebäudeentwurfs ermöglicht eine effiziente Unterstützung der hochkomplexen Planungsentscheidungen. Zur Bereitstellung und Verwendung des dafür geeigneten Erfahrungswissens des Ingenieurwesens wurde ein wissensbasiertes System (WBS) entwickelt. Dieses kann durch den Einsatz von **entwicklungsstufenbezogenen unscharfen Wissensbanken** sowie zugehöriger **Inferenzsysteme** eine **Beurteilung von Tragstrukturen und Vorschläge von Entwurfsoptionen** leisten. Das Entwicklungstufen-system enthält eine Bewertung von Tragsystemen basierend auf der **Possibilitätstheorie** und umfasst Konzepte der **adaptiven Entwicklungsstufen**. Durch den Einsatz der leicht verständlichen Formulierung von Regeln im **Modus Ponens** und von Inferenzmechanismen der **Fuzzy Logic** wird dabei die **Nachahmung des menschlichen Entscheidungsverhaltens** ermöglicht. Zur Akquise des Wissens werden **Parameterstudien mit der Berechnung und Bemessung von Tragelementen des Stahlbetonbaus durchgeführt**. Praxiserfahrungen bestimmen die für die im üblichen Hochbau zu erwartenden Strukturen zu berücksichtigenden Wertebereiche. Mechanismen zur **Berücksichtigung einer möglichen Unwissenheit von Entwurfsgrößen** werden bereitgestellt. Das resultierende WBS ermöglicht schließlich eine Steigerung der Effizienz des Planungsprozesses bereits in frühen Planungsphasen.

Stichworte EarlyBIM; frühe Entwurfsphasen; Tragwerksplanung; wissensbasierte Systeme; adaptive Entwicklungsstufen; Fuzzy Logic; intelligente Ersatzmodelle

AI-methods for the integration of structural design knowledge in early phases of the building design process

The early integration of the structural design expertise in the building planning process allows an efficient support of the involved highly complex decision-making. A knowledge-based system (KBS) is developed for the supply and the usage of suitable engineering experience knowledge. This performs an evaluation of bearing structures and the proposal of design options through the application of development level dependent fuzzy knowledge bases and related inference systems. The levels of development include the assessment of structures based on the possibility theory and comprises concepts of adaptive detailing. An imitation of the human decision-making behavior is achieved by the use of an easily understandable formulation of rules following the Modus Ponens and Fuzzy Logic inference mechanisms. Acquisition of applicable knowledge is based on parametric studies covering the calculation and design of structural elements that initially are carried out for reinforced concrete components. Considerable value ranges are determined based on practical experiences. Additionally, mechanisms for the consideration of uncertain parameters are provided. The resulting (KBS) system enables an efficiency increase in the early planning process.

Keywords EarlyBIM; early planning phases; structural design; knowledge-based systems; adaptive level of development; fuzzy logic; intelligent substitution models

1 Einleitung

1.1 Frühe Phasen des Gebäudeentwurfs

Im üblichen Prozess des Gebäudeentwurfs werden die frühen Phasen – Vor- und Entwurfsplanung – von einem weitgehenden Einfluss gestalterischer und funktioneller Aspekte charakterisiert. Dabei sind wenige und unscharfe Informationen zur Festlegung tragwerksplanerischer Kriterien vorhanden. Diese weisen jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Machbarkeit, den Realisierungsaufwand und die Kosten eines Bauwerks auf. Basierend auf limitierten Informationen müssen somit einflussreiche konstruktive Entscheidungen für die weitere Projektbearbeitung und Baumaßnahme getroffen werden [1]. Demzufolge ist eine **möglichst frühe tragwerksplanerische Unterstützung des Planungsprozesses empfehlenswert**, die eine konsequente Zusammenarbeit aller Planungsbeteiligten erfordert [2, 3].

In den frühen Entwurfsphasen stehen überschlägige Berechnungen sowie insbesondere der **Erfahrungsschatz der Tragwerksplanenden zur Verfügung**. Zur Bereitstellung dieser tragwerksplanerischen Expertise wird eine verwendbare **Wissensformalisierung** benötigt. Diese bestimmt die Ausdrucksweise des Wissens z. B. in Form von Wenn-dann-Regeln, dessen Generierung üblicherweise auf **umfangreichen Tragfähigkeitsanalysen und Simulationen** basiert [4]. Für die Verwendung dieser Wissensbasis ist anschließend ein System zu entwickeln, das zur Verarbeitung und Empfehlung von tragwerksplanerischen Informationen auf Basis der unscharfen Parameter in frühen Phasen fähig ist [5].

1.2 Konzept zur tragwerksplanerischen Entwurfsunterstützung in frühen Entwurfsphasen

Die frühe Bereitstellung der tragwerksplanerischen Expertise in den computergestützten kollaborativen Ent-

wurfsprozess wird durch den Einsatz der vorgestellten KI-Methoden ermöglicht [2]. Dafür wurde ein wissensbasiertes System entwickelt, das durch Integration und Interpretation leicht verständlicher Regelbasen eine **nachvollziehbare Bestimmung von Entwurfsgrößen** leistet [1]. Da das Erfahrungswissen zur Tragwerksplanung i. d. R. von unterschiedlichen Entwicklungsstufen des Entwurfs abhängig ist [6], wurde ein einsetzbares Entwicklungstufensystem identifiziert und an einer exemplarischen Entwurfsgeschichte verdeutlicht. Die implementierte Wissensbasis ist auf diese Stufen bezogen und enthält **materialspezifische unscharfe Wissensbanken**. Entsprechende Inferenzmechanismen ermöglichen die Verwendung des enthaltenen Wissens, das an Grundregeln und ausgewählten Beispielregeln veranschaulicht wird. **Intelligente Ersatzmodelle** umfassen sowohl die Wissensbasis als auch die Inferenzkomponente zur Bereitstellung der tragwerksplanerischen Expertise [7]. Da **frühe Planungsphasen durch Unschärfe von Entwurfsparametern charakterisiert sind** [8], werden Methoden zur Verarbeitung solcher Informationen vorgestellt. Basierend auf tragwerksplanerischem Wissen leistet das entwickelte System schließlich eine Beurteilung von Tragssystemen, Vorschläge von Entwurfsoptionen sowie eine Verarbeitung von Entwurfsänderungen zur Unterstützung des Entwurfsprozesses.

1.3 Grundlagen der implementierten KI-Methoden

Die künstliche Intelligenz (KI) umfasst Methoden, die ein intelligentes Verhalten von Computerprogrammen ermöglichen. Die Verfahren basieren oft auf dem Verständnis von Vorgängen nach einem natürlichen biologischen Vorbild, wobei durch Imitation des Vorbilds oder dessen Funktionalität eine Fähigkeit zur Lösung komplexer Aufgaben erzielt wird [9]. Vielfältig eingesetzte Lern- und Optimierungsmethoden – wie etwa Deep Learning oder evolutionäre Optimierung – erfordern i. Allg. eine Vielzahl von Trainingsdatensätzen sowie einen erheblichen Verarbeitungsaufwand. Im Gegensatz dazu ermöglicht der Einsatz **wissensbasierter Methoden die Verwendung allgemein verfügbarer und transparenter Wissensselemente**.

1.3.1 Wissensbasierte Systeme

Ein bedeutender Teilbereich der KI sind wissensbasierte Systeme (WBS), die auf der Simulation von intelligentem Denken und Handeln durch die Darstellung und Verarbeitung von Wissen basieren. Eine der bewährtesten Formen von WBS sind regelbasierte Systeme, die eine Wissensrepräsentation als Konditionalsätze im Modus Ponens aufweisen. Daraus resultieren intuitive und leicht verständliche Regeln in der Form: „Wenn die Prämisse erfüllt ist, dann schließe die Konklusion.“ Diese Regeln repräsentieren somit Zusammenhänge zwischen Objekten oder Mengen in den Prämissen und Konklusionen. Aus dieser Kombination wird die **Wissensbasis des WBS**

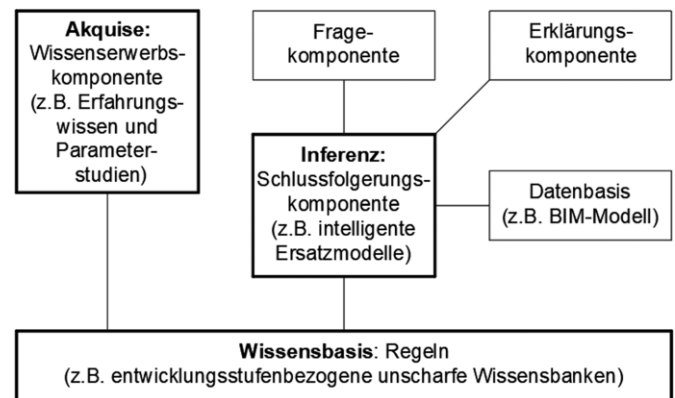


Bild 1 Schematischer Aufbau eines wissensbasierten Systems (basierend auf [10])
Schematic composition of a knowledge-based system

(Bild 1) gebildet. Die Wissenserwerbskomponente umfasst die Strukturierung und Einarbeitung von Wissensselementen, sodass weiteres Wissen in die Wissensbasis integriert und somit zur Verwendung im WBS akquiriert wird. Zur **Interpretation dieses Wissens werden Mechanismen der Logik eingesetzt**, die Bestandteil der Inferenzkomponente des WBS sind. Dabei können **Regelnetzwerke durch die Verketzung von Regeln** gebildet werden [10, 11].

1.3.2 Fuzzy Logic

Die Simulation des menschlichen Entscheidungsverhaltens, das auch bei hochkomplexen Sachverhalten eine Fähigkeit zur Problemlösung und Entscheidungsfindung aufweist, wird durch die Verwendung von unscharfen Mengen nach der **Fuzzy-Set-Theorie** [12] realisiert. Die Fuzzy Logic beruht auf der Erweiterung der klassischen booleschen Mengenlehre, indem die Zugehörigkeit eines Elements zu einer Menge vom herkömmlichen 0 „falsch“ oder 1 „wahr“ auf **kontinuierliche Zugehörigkeitsfunktionen von 0 „gänzlich falsch“ bis 1 „gänzlich wahr“ erweitert wird** (Bild 2). Durch diese **unscharfen Zugehörigkeiten** werden eine außerordentliche Generalisierungsfähigkeit sowie ein stabiles und redundantes Verhalten bei Verwendung der Regeln ermöglicht [13]. Zur Inferenz der Regelbasis, die aus Wenn-dann-Regeln mit Zusammenhängen zwischen unscharfen „fuzzy“ Mengen besteht, werden generalisierte logische Operationen eingesetzt, die die Anwendung der logischen Verknüpfung von Fuzzymengen ermöglichen. Auf dieser Basis wird mit der

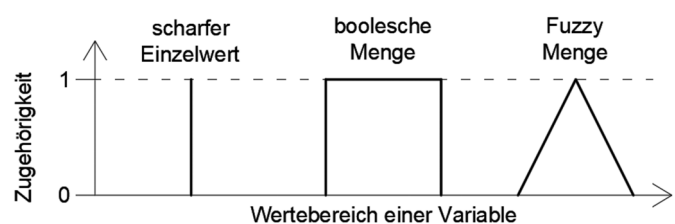


Bild 2 Zugehörigkeit zu unterschiedlichen Mengenarten
Membership to different kinds of sets

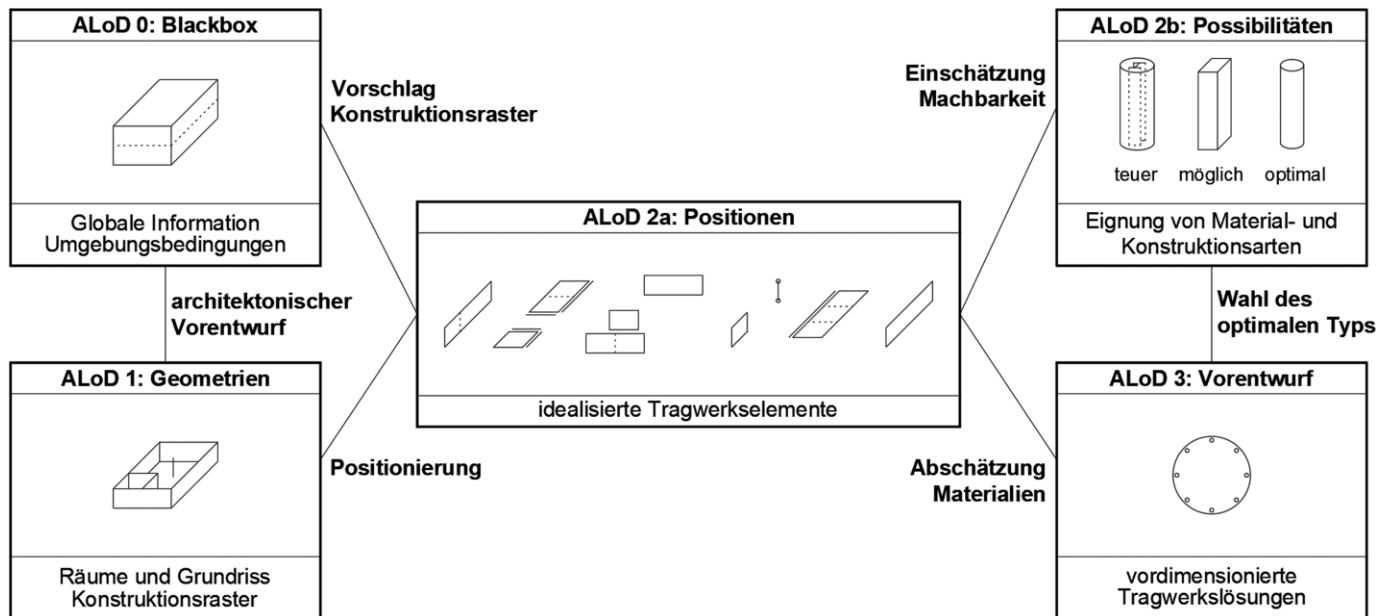


Bild 3 Identifizierte adaptive Entwicklungsstufen für die Sicht der Tragwerksplanung [7]
Identified adaptive levels of development for the structural design perspective

unscharfen Wissensbasis ein approximatives Schließen vollzogen [14]. In einem WBS wird dadurch die Verwendung unscharfer Wissensbanken mit zugehörigen Inferenzsystemen ermöglicht.

1.3.3 Possibilitätstheorie

Basierend auf der Fuzzy Logic wurde die Possibilitätstheorie als eigenständige Unsicherheitstheorie entwickelt [15]. Dabei wird die unscharfe Zugehörigkeit zu einer Menge als Möglichkeit (possibility) definiert, mit der ein Element der Menge angehören kann. Possibilitätsverteilungen sind somit über die Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzymengen definiert. Der Einsatz von Possibilitätsverteilungen ermöglicht die Modellierung der Meinung von sachkundigen Personen als „subjektive Wahrscheinlichkeiten“ [16]. Durch solche Possibilitätswerte können Informationen in ein WBS integriert werden, die in einem Erfahrungsschatz enthalten sind, jedoch keinen stochastischen Charakter aufweisen.

2 Adaptives Entwicklungsstufensystem für den frühen Gebäudeentwurf aus der Sicht der Tragwerksplanung

Ausgehend von der herkömmlichen Vorgehensweise für frühe tragwerksplanerische Bewertungen und Empfehlungen wurde ein Entwicklungsstufensystem für die Tragwerksplanung entwickelt. Basierend auf dem Verständnis von Tragsystemen und dem damit verbundenen Informationsbedarf wurden Anforderungen aus Sicht der Tragwerksplanung analysiert. Daraus resultiert ein System mit fünf adaptiven Entwicklungsstufen (Adaptive Levels of Development – ALoD, Bild 3). Das akquirierte Erfahrungswissen ist den ALoDs zuzuordnen, sodass die intel-

ligenten Ersatzmodelle durch die Inferenz des erhaltenen Wissens eine Erhöhung der Entwicklungsstufe leisten können [7].

2.1 Exemplarische Entwurfsgeschichte für die Entwicklungsstufen

Zu Beginn des Entwurfsprozesses sind die Art, die Nutzung sowie der Umriss des Gebäudes von anderen Projektbeteiligten vorgegeben. Diese allgemeinen Umgebungs- und Randbedingungen sind der ALoD 0 zuzuordnen, die aufgrund der fehlenden Informationen über das Innere des Modells als Blackbox bezeichnet werden kann. Seitens der Architektur werden eine Raumaufteilung und ein Grundriss entworfen (ALoD 1). Dabei können Tragwerksplanende bei Bedarf Lösungen empfehlen, die gemäß ihrem Erfahrungswissen als gut bewertet werden. Im gegebenen Grundriss werden in der Tragwerksplanung die typischen Elemente erkannt und die Positionen identifiziert, die bspw. aus der Theorie und den Tafelwerken bekannt sind (ALoD 2a). Für diese Bauteile kann aus tragwerksplanerischer Erfahrung zunächst festgestellt werden, ob und wie gut diese mit unterschiedlichen Material- und Konstruktionsarten realisierbar sind (ALoD 2b). Des Weiteren kann für diese Elemente abgeschätzt werden, welche Mengen und Massen zur Herstellung in unterschiedlichen Ausführungen erforderlich sind (ALoD 3).

2.2 Bewertung von Tragstrukturen

Eine Repräsentation der Einschätzung der Einsetzbarkeit von Tragstrukturen wird über die Formalisierung als Possibilitätswert mit einem Wertebereich von [0; 1] ermöglicht [16]. Für die tragwerksplanerische Bewertung bedeutet die Possibilität somit die Möglichkeit, einen Entwurf

einzusetzen und basierend auf der Erfahrung auszuwählen. Eine zugehörige Grundregel lautet: „Wenn alle Nachweise erfüllt, dann Verwendung möglich.“ Hohe Possibilitäten werden jenen Tragelementen zugeordnet, die unter den gegebenen Bedingungen bevorzugt eingesetzt werden. Niedrige Possibilitäten bedeuten hingegen, dass die Tragelemente unter den Randbedingungen ungern eingesetzt werden oder nicht realisierbar sind.

2.3 Adaptivität der Entwicklungsstufen

Konzepte mit adaptiven Entwicklungsstufen befähigen das entwickelte ALoD-System zur Berücksichtigung zusätzlicher Parameter, Informationskorrelationen und Entwicklungsstufen des Modells. Durch formatkonforme objektorientierte Methoden können einflussreiche Parameter zwischen den ALoDs abgefragt, ausgewertet oder beeinflusst sowie auf Prozeduren anderer Ersatzmodelle zugegriffen werden. Für die zuverlässige Integration zusätzlicher Informationen werden Schnittstellen bereitgestellt, bspw. zur Anordnung von Einbau- oder Fertigteilen. Die Schnittstellen zwischen Entwicklungsstufen erlauben die Integration von alternativen oder zusätzlichen Ersatzmodellen sowie ergänzenden Entwicklungsstufen. Somit kann bspw. in einem Ersatzmodell ein künstliches neuronales Netz (KNN), das etwa gemäß der Wissensbasis mit den Prämissen als Eingabe- und den Konklusionen als Ausgabewerte in einem überwachten Lernverfahren trainiert wurde, statt des Fuzzy-Inferenzsystems eingesetzt werden. Durch diese Mechanismen wird außerdem die Verwendung des entwickelten WBS für andere Entwicklungsstufensysteme ermöglicht [7].

3 Akquise und Bereitstellung des Wissens

Die Erhöhung des ALoDs und damit die Weiterentwicklung eines Gebäudeentwurfs basieren auf dem Einsatz von tragwerksplanerischem Wissen, welches die Ermittlung der zusätzlichen Informationen aus den begrenzten Modelldaten der niedrigeren Entwicklungsstufe ermöglicht. Geeignetes Ingenieurwissen umfasst u. a. die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit von Tragelementen, wobei die verbindlichen Normen und Richtlinien sowie auch reine Praxiserfahrung einbezogen werden. In Bezug auf die identifizierten ALoDs werden schließlich unscharfe Wissensbanken für unterschiedliche Material- und Konstruktionsarten erstellt, welche die Wissensbasis des wissensbasierten Systems darstellen [7]. Das implementierte Wissen besteht aus einzelnen Regeln im intuitiv und leicht verständlichen Modus Ponens: „Wenn Prämisse im niedrigen ALoD, dann Konklusion im höheren ALoD.“

3.1 Wissensakquise auf der Basis von Parameterstudien

Die Berechnung, Bemessung und Konstruktion von Tragwerken ist ein wesentlicher Bestandteil der trag-

werksplanerischen Tätigkeit. Zur Akquise des tragwerksplanerischen Wissens und anschließenden Regel-formalisierung werden Parameterstudien eingesetzt, wobei die Wertebereiche der Parameter auf der Basis von Erfahrungswissen festgelegt werden. Die in den Studien generierten Entwurfsregeln weisen somit Zusammenhänge der Werte von Entwurfsparametern auf, die zur Formalisierung unscharfer Wissensbanken herangezogen werden.

3.1.1 Bestimmung von Mengen und Massen

In diesen Studien werden die Geometrie, die Einwirkungen sowie das Material eines Bauteils variiert und eine Bemessung nach Eurocode unter Einsatz vereinfachter Nachweise durchgeführt. Die aus dem Bemessungsvorgehen sowie konstruktiven Bedingungen resultierende Bewehrungsmenge bildet die Konklusion der ermittelten Regel für das ALoD 3 (Bild 4). Dieses umfasst zusätzlich die Materialspezifizierung, die unter den Bedingungen erreichte Possibilität sowie ggf. erforderliche weitere Konstruktionsparameter. Eine beispielhafte Regelgrundlage für einachsige gespannte Platten lautet: „Wenn Nutzlast = 3 kN/m² und Plattendicke = 30 cm und Stützweite = 6,4 m, dann Bewehrungsmenge = 128 kg/m³ und Possibilität = 0,95 für C20/25.“

3.1.2 Ermittlung der Possibilitätswerte

Zur Bestimmung der erreichten Possibilität werden Bewertungsanteile ausgewertet, die eine Simulation der Abschätzung von Experten bez. der Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und Ökologie für die einzelnen Parameter darstellen. Dafür werden Possibilitätsverläufe $P_i(x)$ für die Wertebereiche der Parameter formalisiert. Anschließend wird die erreichte Possibilität des Bauteils ermittelt. Dabei wird bei Erfüllung aller erforderlichen Nachweise der Indikator 0,5 ergänzt, indem die Bewertungsanteile durch Einsatz eines kompensatorischen Operators wie folgt zusammengefasst werden (Gl. (1)):

$$P = 0,5 + 0,5 \cdot \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

mit:

$$P_i \in [0; 1]$$

$$P \triangleq \pi_x$$

Mit der max. Possibilität einer Konstruktions- und Materialart wird die Einschätzung der erreichbaren Güte des Bauteils ermittelt. Ausgehend von diesen Einschätzungen werden die Konklusionen der Regeln für das ALoD 2b gebildet. Des Weiteren ermöglicht diese Bewertung die Empfehlung von geeigneten Ausführungen eines Bauteils und von optimierten Konstruktionsrastern für eine Grundfläche. Aus dem somit akquirierten Wissen ergeben sich für das verwendete Entwicklungsstufensystem die Grundregeln zur Erhöhung der ALoDs (Tab. 1).

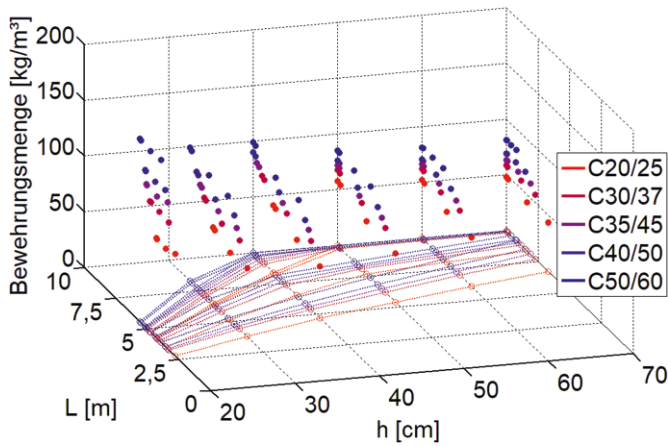


Bild 4 Exemplarische Grundlage für die Regelbasis zur Ermittlung der Bewehrungsmenge einer einachsigen gespannten Vollplatte mit einer Nutzlast von 3 kN/m^2
Exemplary basis of the rule base for the determination of the reinforcement amount of an uniaxially spanned full slab with a live load of 3 kN/m^2

3.2 Bisher berücksichtigte Konstruktionen und Randbedingungen

Zur Entwicklung des wissensbasierten Systems wurden bisher die nachfolgend aufgeführten Tragelemente des üblichen Hochbaus bei der Wissensakquise berücksichtigt:

- kontinuierlich gelagerte, ein- und zweiachsig gespannte sowie punktgestützte Decken als Voll- oder Hohlkörperdecken aus Normalbeton (NC), Spannweite bis 10 m ,
- quadratische und runde Stützenquerschnitte aus NC, Hochleistungsbeton (HPC) sowie ausgewählte Verbundquerschnitte, Abmessungen $20\text{--}80 \text{ cm}$, Höhe bis 4 m ,

- Wände aus NC, Leichtbeton, Porenbeton, Mauerwerk aus Kalksandstein sowie Ziegel, Dicke $17,5\text{--}36,5 \text{ cm}$, Höhe bis 4 m ,
- Einzel- und Streifenfundamente sowie Bodenplatten aus NC.

Die Wertebereiche für die Parameterstudien wurden auf der Basis üblicher Belastungsannahmen (Nutzlast bis 10 kN/m^2) und Bauteildimensionen festgelegt. Die Möglichkeitsanteile zur Bewertung der einzelnen Parameter – wie der Deckendicke und der Betonfestigkeitsklasse – beruhen auf erfahrungsbasierten Einschätzungen zu Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit für den allgemeinen Hochbau.

Als Beispiel wird die Ermittlung der Möglichkeit einer einachsigen gespannten Vollplatte mit einer charakteristischen Nutzlast von $3,0 \text{ kN/m}^2$ vorgeführt. Dafür werden exemplarische Möglichkeitsanteile für den üblichen Hochbau (Bild 5) aggregiert. Diese basieren auf der aus Erfahrungswissen zusammengefassten Bewertungsregel: „Wenn Vollplatte in üblichem Hochbau, dann gute Bewertung von niedrigen Betonfestigkeitsklassen, geringen Plattendicken, hohen Stützweiten und niedrigen Kosten.“ In dem resultierenden Wissen sind die Konstruktionen mit einer hohen Möglichkeit und damit guten Bewertung ersichtlich (Bild 6), die zur Identifikation von Regeln für Vorschläge von Stützenrastern und Deckendicken herangezogen werden, wie bspw.: „Wenn Nutzlast = 3 kN/m^2 und Stützweite = $6,4 \text{ m}$, dann Plattendicke = 30 cm für C20/25.“ Deren Entwurfparameter weisen Wertebereiche mit einer Deckendicke von 20 bis 30 cm , einer Betonfestigkeitsklasse von C20/25 oder C30/37 und Stützweiten von ca. 4 bis 7 m auf.

Tab. 1 Grundregeln für die Wissensbanken
Basic rules for the knowledge bases

Vorhandene Parameter: Prämisse	Ergänzte Parameter: Konklusion
Ermittlung eines Konstruktionsrasters	
ALoD 0: wenn Nutzlast	ALoD 2a: dann Position (Option) und Konstruktionsart (Option) und Geometrie (Option)
Ergänzung einer Mittellinie	
ALoD 1: wenn Position und Last	ALoD 2a: dann Konstruktionsart (Option) und Materialart (Option) und Geometrie
Ermittlung der erreichbaren Möglichkeiten	
ALoD 2a: wenn Position und Last und Geometrie	ALoD 2b: dann Konstruktionsart (Option) und Materialart (Option) und erreichbare Möglichkeit
Ermittlung der Vorentwurfsgrößen	
ALoD 2b: wenn Position und Last und Geometrie und Konstruktionsart und Materialart	ALoD 3: dann Materialklasse (Option) und erreichte Möglichkeit und Bewehrungsmenge

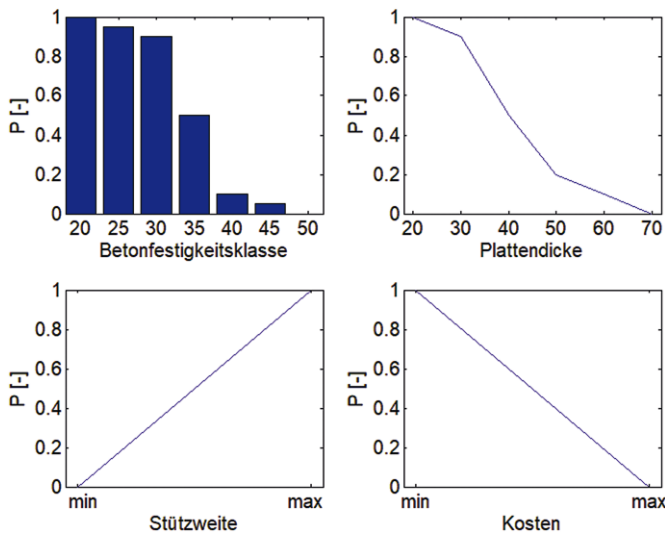


Bild 5 Exemplarisch: Möglichkeitsanteile für eine Vollplatte des üblichen Hochbaus
Example: possibility components for a solid slab of usual building construction

4 Wissensbasierte Repräsentation des Erfahrungswissens

Die Bereitstellung des tragwerksplanerischen Wissens zur Unterstützung des Entwurfsprozesses erfolgt in Abhängigkeit von der Art und der Nutzung des zu entwerfenden Gebäudes. Eine beispielhafte Regel lautet: „Wenn Nutzung = Hotel, dann Nutzlast = 3 kN/m².“ Die intelligenten Ersatzmodelle ermöglichen den Zugriff auf die unscharfen Wissensbanken sowie die Auswertung des enthaltenen Wissens und umfassen somit die Wissensbasis und die Inferenzkomponente des wissensbasierten Systems.

4.1 Intelligente Ersatzmodelle

In Bezug auf das Entwicklungsstufensystem werden drei Ersatzmodelle eingesetzt, um Vorschläge für die zusätzlichen Informationen des nächsten ALoDs wissensbasiert zu ermitteln (Bild 7). Das Ersatzmodell „Raster“ (EMR) liefert die Vorschläge für ein Konstruktionsraster und leistet eine Unterstützung durch die Ergänzung von Mittellinien für ALoD 2a. Die Positionierungsmethode (PM) umfasst übliches Wissen zur Identifikation idealisierter Tragelemente in ALoD 2a für gegebene Grundrissvarianten in ALoD 1. Eine beispielhafte Regel lautet: „Wenn Platte nur auf zwei gegenüberliegenden Seiten gelagert, dann einachsig gespannt.“ Anschließend werden für die ermittelten Tragelemente die max. Possibilitätswerte durch das Ersatzmodell „Possibilität“ (EMP) ausgewertet, die mit dem Einsatz der unterschiedlichen Material- und Konstruktionsarten erreichbar sind. Dabei werden für jedes Element in ALoD 2a Optionen für die unterschiedlichen Arten – wie etwa eine Vollplatte aus Stahlbeton – in ALoD 2b angeboten. Für die in ALoD 2b ausgewählte Art leistet das Ersatzmodell „Vorentwurf“ (EMV) die Er-

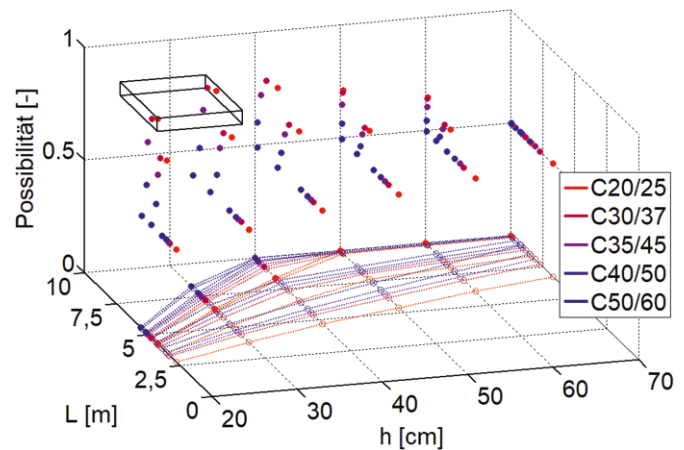


Bild 6 Exemplarisch: Grundlage für die Regelbasis zur Possibilität einer einachsig gespannten Vollplatte (Nutzlast 3 kN/m²)
Example: basis of the rule base for the possibility of an uniaxially spanned full slab (live load 3 kN/m²)

mittlung der Vorentwurfsgrößen. Als Optionen für die Materialspezifikation werden abschließend die erforderlichen Bewehrungsmengen, die erreichten Possibilitäten und ggf. weitere Entwurfsparameter – wie etwa Hohlkörper einer Hohlkörperdecke – für das ALoD 3 vorgeschlagen.

4.2 Verwendung der unscharfen Wissensbanken

Für den Einsatz des gemäß Abschn. 3 akquirierten Wissens werden die aus den Parameterstudien resultierenden Wertekombinationen angesetzt. Dabei sind Abhängigkeiten zwischen den Parametern im Inferenzmechanismus besonders zu berücksichtigen. So ist etwa die erreichbare Stützweite einer Platte abhängig von ihrer Belastung und ihrer Dicke. Zur Verarbeitung solcher Korrelationen wird eine Vorwärtsverkettung vorgenommen, sodass das Schließen der ersten Inferenz zur Prämisse und Konklusion der folgenden Inferenz führt. Beispielsweise werden aus der Belastung und der Dicke einer Platte zunächst die Fuzzymengen der Stützweite sowie die zugehörigen Bewehrungsmengen und erreichten Possibilitäten für eine Betonfestigkeitsklasse approximiert. Durch die folgende Inferenz werden anschließend die gesuchten Ausgabewerte ermittelt und somit die Abhängigkeit im Prozess berücksichtigt. Für eine detaillierte Darstellung der Anwendung sei auf [17] verwiesen.

4.3 Umgang mit der Unschärfe von Parametern

Der Planungsprozess ist charakterisiert durch eine Unschärfe der Entwurfsgrößen [8]. Zur Verarbeitung unscharfer Informationen mit den KI-Methoden werden drei prinzipielle Vorgehensweisen vorgestellt. Falls unscharfe Eingabewerte angegeben werden, die bspw. als Fuzzymenge dargestellt sind, wird die Zugehörigkeit μ_i bei der Fuzzyfizierung mit dem folgenden verallgemeinerten logischen Operator ermittelt (Gl. (2)):

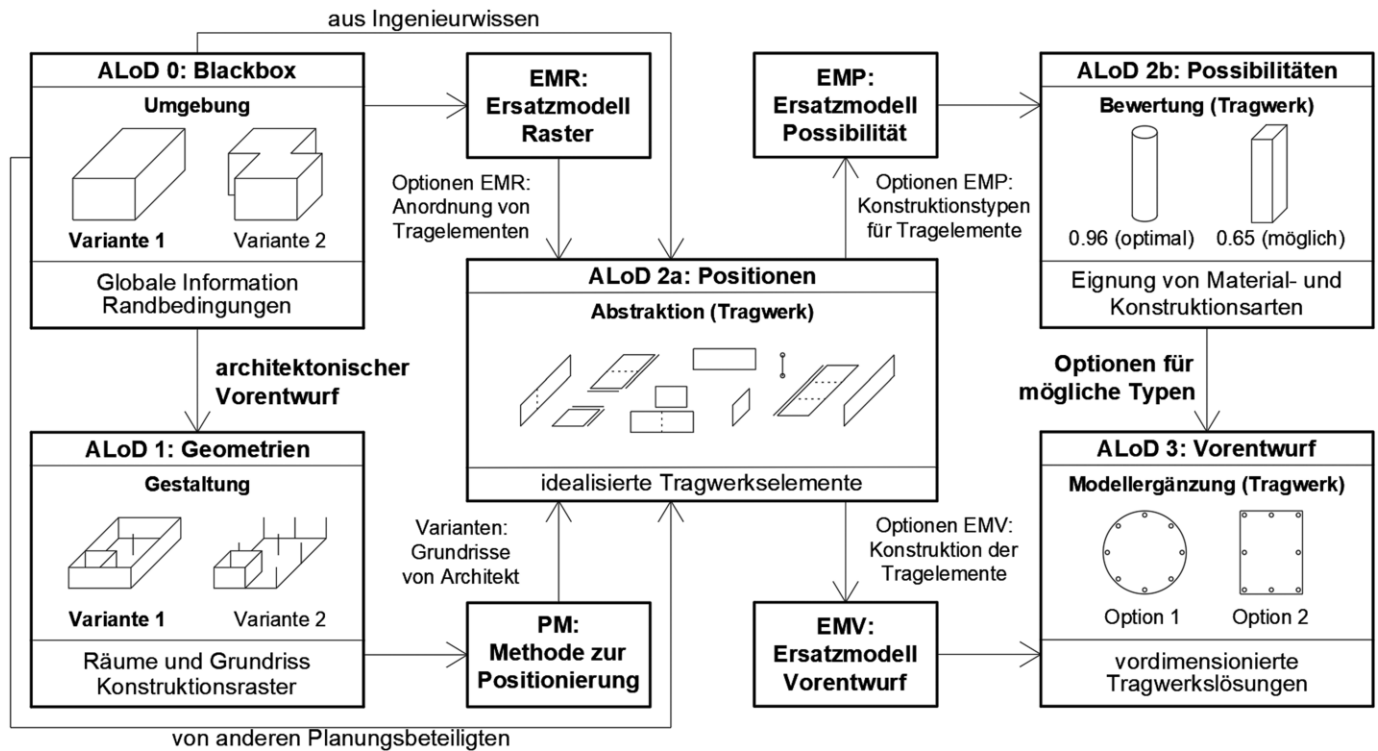


Bild 7 Modell der wissensbasierten Unterstützung des Entwurfsprozesses
Model of the knowledge-based support of the design process

$$\mu_i = \max(\min(\mu_{\text{Regelmenge}}; \mu_{\text{Eingabemenge}})) \quad (2)$$

Ist bspw. für einen Parameter eine relativ kleine Variation zu berücksichtigen, kann diese als Eingabe-Fuzzymenge über den erwarteten Wertebereich formalisiert werden. Durch den Operator wird dann für jede betroffene Regel indirekt jener Wert innerhalb des möglichen Bereichs verwendet, der für die Regel die höchste Zugehörigkeit aufweist. Falls für unscharfe Eingabeparameter jedoch die resultierende Variation der Ausgabewerte zu ermitteln ist, können die Berechnungen mit mehreren scharfen Eckwerten – wie dem Minimum und dem Maximum – durchgeführt werden. Für den Fall, dass das eingesetzte Erfahrungswissen eine Unschärfe in den Ausgabeparametern aufweist, können diese in den Konklusionen der Regeln als Wertebereiche, Fuzzymengen oder Verteilungsfunktionen anstelle der scharfen Ausgabewerte berücksichtigt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte wissensbasierte System leistet die Bereitstellung von tragwerksplanerischem Wissen zur Integration dieser Expertise in den frühen Gebäudeentwurfsprozess. Es wird ein adaptives Entwicklungsstufensystem identifiziert, das aus den Anforderungen an den Informationsbedarf und dem Verständnis von Tragsystemen resultiert. Zur **Formalisierung** des Wissens werden Methoden der **Fuzzy Logic** eingesetzt, die zu **unscharfen Wissensbanken** als Wissensbasis des WBS führen. Dabei erfolgt die **Bewertung von Tragwerken nach der Possibilitätstheorie**. Zur Wissensakquise werden Parameterstudi-

en durchgeführt. Das ermittelte Wissen wird von den intelligenten Ersatzmodellen verwendet, die den Zugriff auf die unscharfen Wissensbanken sowie deren Auswertung ermöglichen. Sie umfassen somit die Wissensbasis sowie die Inferenzkomponente des WBS. Zur Berücksichtigung der Unschärfe von Parametern werden Mechanismen bereitgestellt, die eine **Verarbeitung von Variationen der Entwurfsgrößen ermöglichen**. Das resultierende System leistet schließlich eine Entwurfsunterstützung, indem Entwurfsoptionen mit zugehöriger tragwerksplanerischer Bewertung bereitgestellt werden. Dadurch können die Interdisziplinarität und die Effizienz des Planungsprozesses wesentlich gefördert werden.

Die Übertragbarkeit der entwickelten Methoden auf weitere Baustoffe, Konstruktionsarten und Bauweisen wird zukünftig beispielhaft untersucht. Durch eine linguistische Wissensformalisierung und zugehörige Inferenzmechanismen werden natürlichsprachliche Wissensquellen mit speziellen Ingenieur Erfahrungen erschlossen. Basierend auf der Possibilität werden Modelle entwickelt und in das WBS implementiert, die eine Beurteilung von Gesamttragwerken ermöglichen, die Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Entwurfsprozesses erhöhen und die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Gebäudeplanung verbessern. Abschließend wird die Einsetzbarkeit des resultierenden Systems an beispielhaften Anwendungsszenarien überprüft.

Obwohl das entwickelte WBS eine weitgehende Unterstützung des Planungsprozesses leistet, ist **ein früher Einbezug der Tragwerksplanenden im Gebäudeentwurf unerlässlich**. Nur diese sind dazu in der Lage, die nötigen Er-

fahrungen und das Wissen bereitzustellen, die zu einer Expertise befähigen, die Tragstrukturen und Vorschläge zu kontrollieren sowie das Ingenieurwissen und Systeme, die dieses nutzen, weiterzuentwickeln.

Literatur

- [1] Zhang, J.; Li, H.; Zhao, Y.; Ren, G. (2018) *An ontology-based approach supporting holistic structural design with the consideration of safety, environmental impact and cost*. Advances in Engineering Software 115, pp. 26–39.
- [2] Schnellenbach-Held, M.; Hartmann, M. (2003) *Using Knowledge Based Systems for Building Design in Computer Supported Cooperative Work*. Darmstadt Concrete V18, Darmstadt.
- [3] El-Diraby, T.; Krijen, T.; Papagelis, M. (2017) *BIM-based collaborative design and socio-technical analysis of green buildings*. Automation in Construction 82, pp. 59–74.
- [4] Liu, H.; Ong, Y. S.; Cai, J. (2018) *A survey of adaptive sampling for global metamodeling in support of simulation-based complex engineering design*. Structural and Multidisciplinary Optimization 57, pp. 393–416.
- [5] Schnellenbach-Held, M.; Albert, A. (2003) *Computer-gestütztes Entwerfen im Stahlbetonhochbau mit wissensbasierten Systemen und Fuzzy Logic*. Bauingenieur 78, S. 517–524.
- [6] Maier, J. F.; Eckert, C. M.; Clarkson, P. J. (2017) *Model granularity in engineering design – concepts and frame-work*. Design Science 3, Cambridge.
- [7] Schnellenbach-Held, M.; Steiner, D. (2019) *Structural design in early planning phases using engineering expert knowledge and intelligent substitution models*. Proceedings of the 36th CIB W78 Conference. Northumbria University [eds.], Newcastle, Sept. 18–20, 2019.
- [8] Abualdenien, J.; Schneider-Marin, P.; Zahedi, A.; Harter, H.; Exner, H.; Steiner, D.; Singh, M. M.; Borrmann, A.; Lang, W.; Petzold, F.; König, M.; Geyer, P.; Schnellenbach-Held, M. (2020) *Consistent management and evaluation of building models in early design stages*. Journal of Information Technology in Construction 25, pp. 212–232.
- [9] Wittpahl, V. [Hrsg.] (2019) *Künstliche Intelligenz: Technologie, Anwendung, Gesellschaft*. Berlin: Springer.
- [10] Schnellenbach, M. (1991) *Wissensbasierte Integration und Steuerung computergestützter Entwurfsprozesse im Stahlbetonbau* [Dissertation]. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen am Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Nr. 91-15, Ruhr-Universität Bochum.
- [11] Beierle, C.; Kern-Isbener, G. (2014) *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 5. Aufl. Berlin: Springer.
- [12] Zadeh, L. A. (1965) *Fuzzy Sets*. Information and Control 8, pp. 338–353.
- [13] Schnellenbach-Held, M.; Steiner, D. (2014) *Self-Tuning Closed-Loop Fuzzy Logic Control Algorithm for Adaptive Prestressed Structures*. Structural Engineering International 24, no. 2, pp. 163–172.
- [14] Von Altrock, C. (1995) *Fuzzy Logic*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- [15] Zadeh, L. A. (1978) *Fuzzy Sets as a basis for a Theory of Possibility*. Fuzzy Sets and Systems 1, pp. 3–28.
- [16] Schnellenbach-Held, M.; Albert, A. (2000) *Anwendung der Fuzzy Logic im konstruktiven Ingenieurbau*. Bautechnik 77, H. 1, S. 2–9. <https://doi.org/10.1002/bate.200000020>
- [17] Schnellenbach-Held, M.; Steiner, D. (2021) *Application of AI methods for the integration of structural engineering knowledge in early planning phases* in: Abualdenien, J.; Borrmann, A.; Ungureanu, L.-C.; Hartmann, T. [eds.] *EG-ICE international workshop on intelligent computing in engineering*. Proceedings. 28th EG-ICE, June 30–July 2, 2021. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, pp. 1–11.

Autorin und Autor

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held (Korrespondenzautorin)
massivbau@uni-due.de
Universität Duisburg-Essen
Institut für Massivbau
Universitätsstraße 15
45141 Essen

Daniel Steiner, M.Sc.
daniel.steiner@uni-due.de
Universität Duisburg-Essen
Institut für Massivbau
Universitätsstraße 15
45141 Essen

Dank

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Forschungsvorhabens „Intelligente Ersatzmodelle in der Tragwerksplanung“ entstanden, das Teil der Forschergruppe FOR 2363 ist und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt wird. Für die Unterstützung danken die Verfasser der DFG herzlich.

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schnellenbach-Held, M.; Steiner, D. (2022) *KI-Methoden zur Integration tragwerksplanerischen Wissens in frühe Phasen des Gebäudeentwurfsprozesses*. Bautechnik 99, H. 3, S. 191–198.
<https://doi.org/10.1002/bate.202000090>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 18. September 2021; angenommen: 28. September 2021.