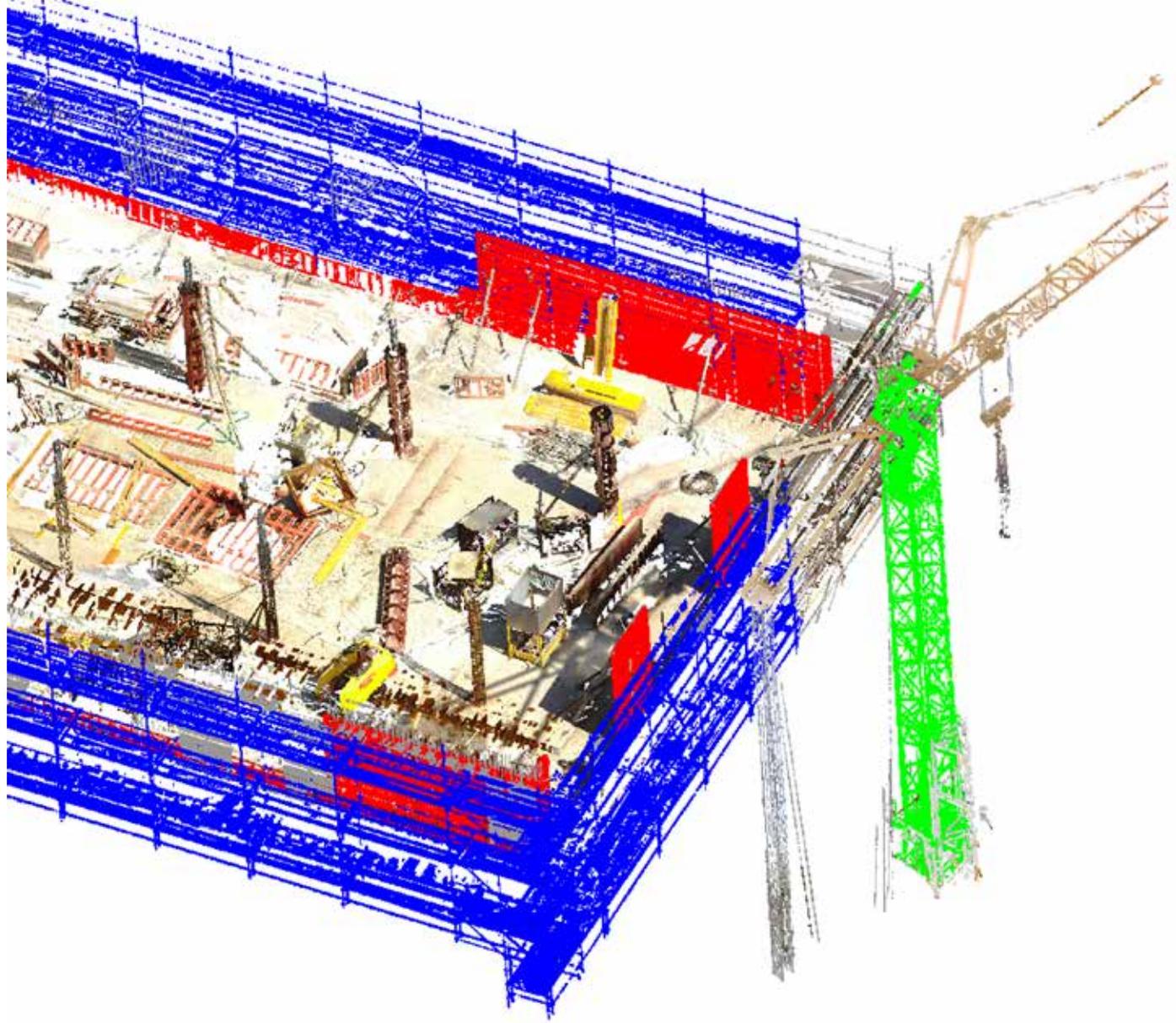


KÜNSTLICHE INTELLIGENZ FÜR DIE GEBaute UMWELT

Künstliche Intelligenz wird auch die Art und Weise, wie wir in Architektur und Bauwesen künftig arbeiten, tiefgreifend verändern. Der Beitrag gibt einen Überblick über die technischen Hintergründe und stellt einige der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten vor, angefangen bei der Bildverarbeitung über die Verarbeitung von Punktwolken bis zur Vorhersage von Personenströmen.



Quelle: Miguel Vega Torres, TU München

Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

ist Leiter des Lehrstuhls für Computergestützte Modellierung und Simulation und Kommissarischer Direktor des Georg-Nemetschek-Instituts an der Technischen Universität München. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des Building Information Modeling, des Erzeugens von digitalen Zwillingen und der Anwendung von Verfahren der Künstlichen Intelligenz im Bauwesen.
andre.borrmann@tum.de

Grundlagen der KI-Verfahren

Viele Analysten sehen Künstliche Intelligenz (KI) als eine der wichtigsten Technologien, die in den nächsten Jahren zahlreiche Industriebranchen erheblich beeinflussen wird. Während einige spezifische Verfahren bereits Anwendungsreife erreicht haben, braucht es bei anderen noch Forschung und Entwicklung.

Die Künstliche Intelligenz ist bereits seit den 1960er-Jahren ein aktives Forschungsfeld, das viele Teilgebiete umfasst. In den frühen Jahren war insbesondere die symbolische KI Gegenstand des wissenschaftlichen Interesses. In diesem Zuge wurden insbesondere Verfahren für das logische Schließen (engl. Reasoning) entwickelt, die in Programmiersprachen wie PROLOG und umfangreiche Expertensysteme für verschiedene Domänen eingeflossen sind. Mit dieser Technologie lässt sich aus vorgegebenem Faktenwissen durch Anwendung von logischen Regeln neues Wissen generieren.

Seit den 1980er-Jahren stehen vor allem Verfahren des Machine Learning im Mittelpunkt der Untersuchungen. Algorithmen des maschinellen Lernens bauen ein Modell basierend auf „Trainingsdaten“ auf, um Vorhersagen oder Entscheidungen zu treffen, ohne explizit darauf programmiert zu sein. In diesem Zusammenhang entstanden verschiedene Ansätze wie Entscheidungsbäume, Support Vector Machines, Bayes-Netzwerke oder evolutionäre Algorithmen. Eine Support Vector Machine dient beispielsweise dazu, Daten selbstlernend zu klassifizieren, indem sie für eine Menge von

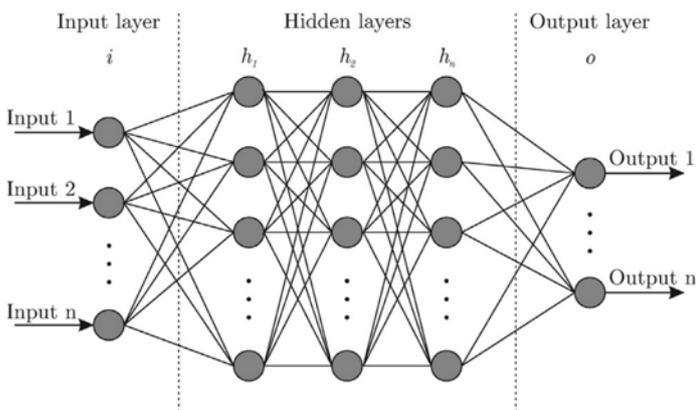
Datenpunkten automatisiert Klassengrenzen findet. Evolutionäre Algorithmen wiederum bilden ein Problem auf eine künstliche Gensequenz ab und machen sich Prinzipien der biologischen Evolution wie Mutation, Rekombination und Selektion zunutze, um für ein gegebenes Kriterium eine möglichst optimale Parameterkonfiguration zu finden.

Zum Machine Learning gehört auch das Prinzip der künstlichen neuronalen Netze (KNN), das sich mittlerweile zu einer der vielversprechendsten Techniken der Künstlichen Intelligenz entwickelt hat. Wesentliche Idee ist dabei die Imitation des menschlichen Gehirns durch den Aufbau eines Netzwerks von miteinander verbundenen künstlichen Neuronen. Im Rechner entsteht ein Graph, dessen Knoten die Neuronen repräsentieren und dessen Kanten der biologischen Axon-Synapse-Dendrit-Verbindung entsprechen. Jede Verbindung wird mit einem Gewicht versehen, das den Einfluss des jeweiligen Eingangssignals auf das Neuron beschreibt. Diese Gewichte werden während des Trainingsvorgangs kontinuierlich angepasst, um am Ende für die präsentierten Eingangsdaten ein korrektes Ausgangssignal zu erzeugen.

Dieses Grundprinzip, das seit den 1980er-Jahren bekannt ist, wurde in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und verfeinert. Ergebnis sind unter anderem die Convolutional Neural Networks (CNN), die für das Deep Learning unter anderem bei der Bildverarbeitung eingesetzt werden. Der Begriff Deep Learning stammt daher, dass eine große Zahl verborgener Schichten (Hidden Layers) zum Einsatz kommt, die eine klar definierte Struktur und Funktion aufweisen. Zusammen bilden die Schichten die Architektur des Netzwerks. Sie selbst sind nicht mehr eindimensional wie noch bei den einfachen KNN, sondern sehr häufig zwei- oder sogar dreidimensional angeordnet.

Zudem wird bei den Verbindungen zwischen den Schichten auf die Erhaltung der Lokalität geachtet. Demnach werden nicht mehr alle Knoten einer Schicht mit allen Knoten der folgenden Schicht verbunden, sondern nur die, die in räumlicher Nähe zueinanderstehen. Bei der Berechnung des Einflusses der vorgelagerten Neuronen kommt die mathematische Operation der Convolution zum Zuge: Die gleitende Multiplikation einer Input-Matrix (die z. B. die Pixel eines Bildes repräsentiert) mit einem Kernel (Filtermatrix) führt Informationen aus benachbarten Neuronen zusammen. Dadurch lassen sich unter anderem Filteroperationen auf Bildern umsetzen, die dann zum Beispiel zur Kantendetektion dienen.

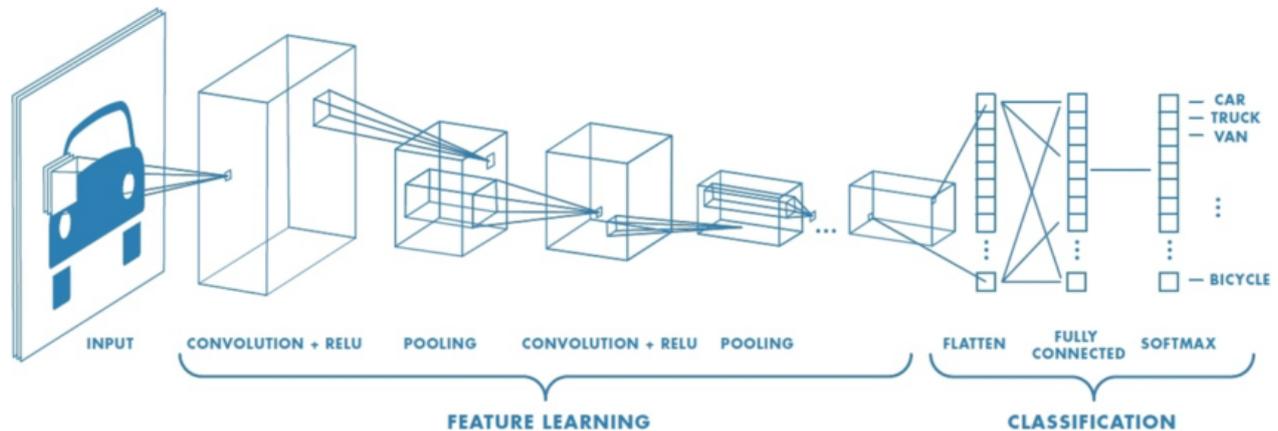
1
Schematische Darstellung
eines künstlichen neuronalen Netzes



Quelle: Bre et al. 2018

2

Typische Struktur eines Convolutional Neural Network (CNN)



Quelle: mathworks.com

Eine typische Anwendung der CNN liegt in der Verarbeitung von Bildern (meist Fotografien). Dabei lassen sich je nach Ziel der Anwendung die Klassifikation, die Detektion und die Segmentierung unterscheiden. Bei der Klassifikation wird ein Bild einer vorgegebenen Kategorie zugeordnet, wie Hund/Katze oder Pkw/Lkw/Fahrrad. Mit der Detektion hingegen lässt sich ein vorgegebener Objekttyp (z. B. ein Kran) auf einem Bild entdecken und der umhüllende rechteckige Bildausschnitt (seine Bounding Box) zurückgeben. Die Segmentierung wiederum geht noch einen Schritt weiter und

identifiziert alle Pixel eines Bildes, die zu einem vorgegebenen Objekttyp gehören.

Neben den CNNs für die Bildverarbeitung gibt es immer ausgeklügeltere Varianten von Deep Neural Networks, die auf bestimmte Fragen und die spezifische Struktur von Eingangsdatensätzen zugeschnitten sind. Dazu gehören beispielsweise KNN für die Verarbeitung von Punktwolken und von Graphen.

Forschungs- und Anwendungsbereiche für die gebaute Umwelt

Das Themen- und Arbeitsfeld der gebauten Umwelt – als Überbegriff für Disziplinen wie Architektur, Bauingenieurwesen, Geodäsie sowie raumbezogene Wissenschaften – ist mit einer Unmenge an Daten verbunden. Diese fallen zum Beispiel bei der Planung, Ausführung und insbesondere beim Betrieb von Bauwerken an. Sie liegen häufig in einer unstrukturierten, rohen Form vor. Hier kommen die Verfahren der Künstlichen Intelligenz beziehungsweise des Machine Learning zum Einsatz: Sie ermöglichen es, Muster und Strukturen in Daten zu erkennen und daraus höherwertige Informationen zu generieren.

Wichtige Anwendungsfelder sind das Erfassen der gebauten Umwelt und das Schaffen von hochwertigen digitalen

Zwillingen für Bestandsbauwerke. Hintergrund ist, dass ein überwiegender Teil der baulichen Infrastruktur in Europa und weiten Teilen der entwickelten Welt bereits seit vielen Jahren existiert und digitale Informationen beziehungsweise Modelle im Regelfall nicht vorliegen. KI-Verfahren können hier sehr gut dazu beitragen, hochwertige digitale Zwillinge weitgehend automatisiert zu erzeugen.

Im Folgenden führt der Autor einige Beispiele zur KI-Forschung aus der Arbeit des Lehrstuhls für Computergestützte Modellierung und Simulation (CMS) an der Technischen Universität München auf, die in das im November 2020 gegründete Georg-Nemetschek-Institut (siehe Infokasten am Ende des Beitrags) einfließen werden.

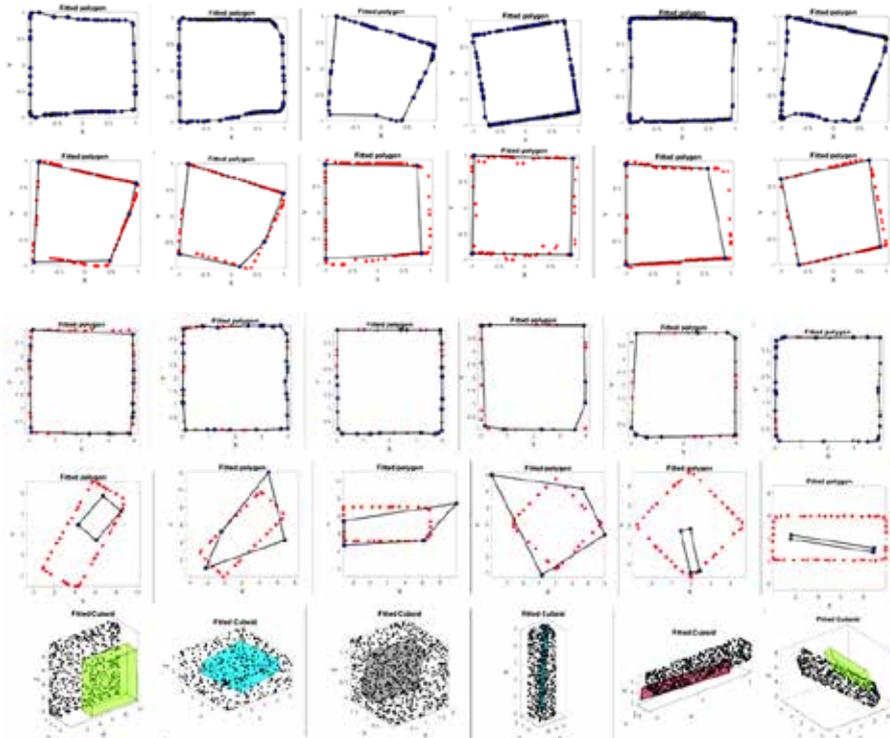
Ein Beispiel für den Einsatz von KI-Verfahren zur Digitalisierung des Bestands ist das Projekt TwinGen. Das Projektteam arbeitet hier unter anderem daran, aus Punktwolken von Brücken hochwertige digitale Zwillinge zu generieren. Der Lehrstuhl CMS hat dazu ein Verfahren entwickelt, bei dem sich hochparametrisierte vorkonfigurierte Modelle von Standardbrücken automatisiert in die aufgenommene Punktwolke einpassen (Mafipour et al. 2021). Dafür kommen unter anderem KI-Verfahren aus dem Bereich der evolutionären Optimierung zum Einsatz. Der Vorteil dieses Top-down-Ansatzes gegenüber den sonst üblichen Bottom-up-Verfahren liegt in der hohen geometrischen, topologischen und semantischen Qualität des entstehenden Bauwerksmodells. Neben der Technischen Universität München (TUM) beteiligen sich an diesem Projekt auch die RWTH Aachen und die Ruhr-Universität Bochum. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) fördert das Vorhaben.

Eine weitere sehr wichtige Quelle für das Erstellen digitaler Zwillinge von Bestandsbauwerken ist die Verarbeitung von vielfach vorliegenden Bauzeichnungen. Im vor kurzem ab-

geschlossenen Projekt RailTwin entwickelten der Lehrstuhl CMS und das Unternehmen Signon erste vielversprechende Ansätze in dieser Richtung. Die Bayerische Forschungsförderung förderte das Projekt. Dabei konzentrierten sich die Arbeiten zunächst auf das Detektieren von Symbolen des Eisenbahnbaus in den Zeichnungen, da diese dank ihrer Standardisierung eine sehr hohe Aussagekraft besitzen. Ein entsprechend trainiertes CNN lieferte sehr gute Ergebnisse (Vilgertshofer et al. 2020).

Ein besonderer Mehrwert entsteht durch die Kombination von Informationen aus Planunterlagen mit Informationen aus Bildern oder Videos. Dieses unter dem Begriff Sensor Fusion bekannte Verfahren kam ebenfalls im RailTwin-Projekt zum Einsatz: Dabei detektiert das entwickelte System Ausrüstungsgegenstände des Schienenbaus in Videos aus Schienenbefahrungen. Im Anschluss gleicht es ihre Existenz und Position mit den Planunterlagen ab (Vilgertshofer et al. 2020). Auf diese Weise lässt sich ein digitaler Zwilling entwickeln, der sich aus Informationen unterschiedlicher Quellen speist.

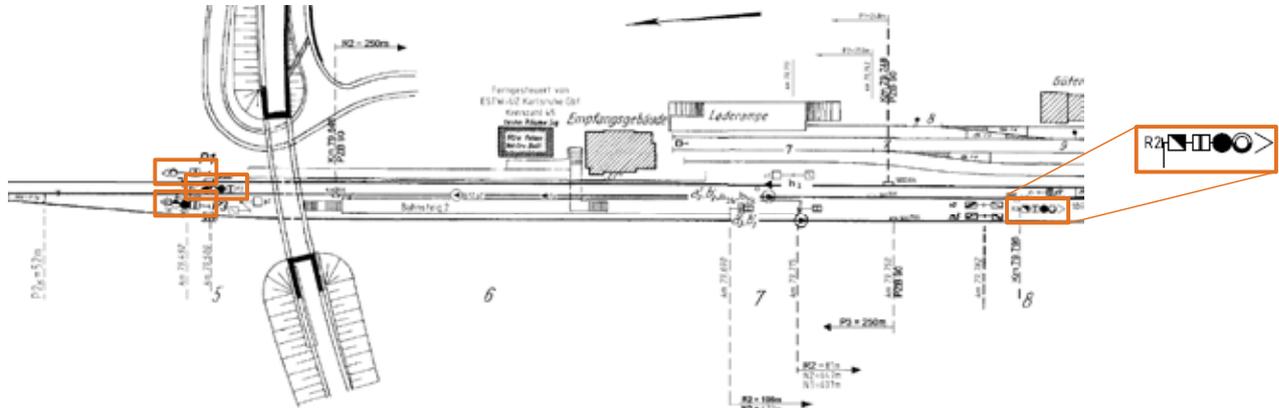
3 KI-basiertes „Model fitting“ im Rahmen des TwinGen-Projekts



Quelle: Mafipour et al. 2021

4

Detektion von Symbolen des Schienenbaus in Planunterlagen



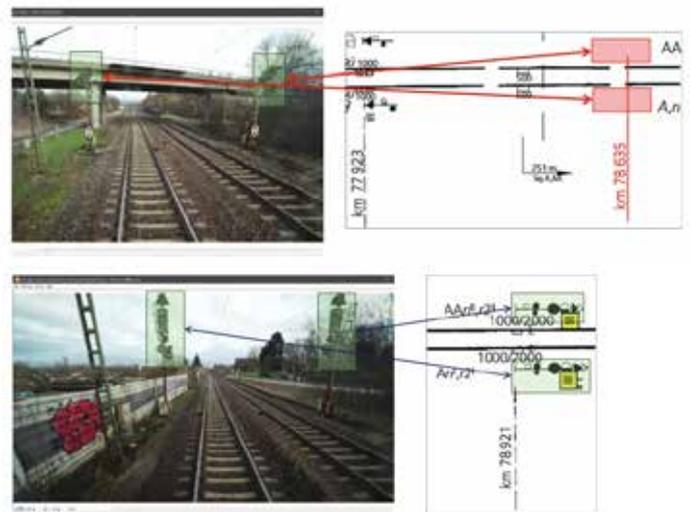
Quelle: Vilgertshofer et al. 2020

Neben der Erfassung der existierenden Bebauung können KI-Verfahren auch den Planungsvorgang unterstützen. Im derzeit laufenden Projekt BEYOND untersucht das Projektteam beispielsweise, wie CNNs rechenaufwändige Personenstromsimulationen ersetzen können. So ließen sich in frühen Phasen des Entwurfs von Bahnhöfen und U-Bahnhöfen schnell unterschiedliche Varianten in Hinblick auf Passagierströme untersuchen (Clever et al. 2021, vgl. Abb. 7). Dafür entwickelt das Projektteam eine KNN-Architektur, die als Input das Bild des Entwurfsgrundrisses verwendet und als Output ein Bild mit vorhergesagten Personenströmen generiert. Dieses Verfahren führte zu ersten vielversprechenden Ergebnissen, die eine hohe Übereinstimmung von Simulation und CNN-Ergebnis aufweisen. Das Projekt führt der Lehrstuhl CMS zusammen mit der Deutschen Bahn und dem TUM-Startup Accu:rate durch. Das BMVI fördert es über sein Programm mFund.

Auch in Bauvorhaben, die auf der modernen modellgestützten Arbeitsweise des Building Information Modeling (BIM) beruhen, müssen aus rechtlichen Gründen neben den Modellen bis auf Weiteres auch Pläne an den Bauherrn, die Genehmigungsbehörden oder die ausführenden Unternehmen übergeben werden. Dabei müssen die Projektteams sicherstellen, dass es keine Inkonsistenzen zwischen den beiden Repräsentationen gibt, um Unstimmigkeiten und daraus resultierende Fehler zu vermeiden. Im Projekt DeepLink untersucht der Lehrstuhl CMS im Auftrag der Allplan GmbH, auf welche Weise sich BIM-Modelle und 2-D-Pläne kombinieren lassen (Trzeciak et al. 2019). Dazu setzen sie KI-Verfahren ein, um entsprechende Objekte in den Plänen zu detektieren und diese Passpunkte mit den Modellen abzugleichen.

5

Abgleich der Position von Ausrüstungsgegenständen in aufgenommenen Videos und in Planunterlagen



Quelle: Vilgertshofer et al. 2020

In der Bauausführung lassen sich KI-Verfahren ebenfalls gewinnbringend einsetzen. Der Lehrstuhl CMS hat dazu Verfahren entwickelt, die die Detektion von Bauteilen und Baubehelfen in Aufnahmen von Krankeras oder Drohnen ermöglichen (Braun et al. 2019). So lässt sich der Baufortschritt automatisiert bestimmen und überwachen oder die Sicherheit auf der Baustelle erhöhen. In Kombination mit einem 4-D-Bauwerksmodell, das die 3-D-Geometrie der Bauteile mit ihren geplanten Bauzeiten verknüpft, hat die TUM zudem Verfahren des automatisierten Trainings entwickelt.

6

Detektion von Bauteilen in Fotoaufnahmen zur Bestimmung des Baufortschritts



Quelle: Braun et al. 2019

Im Übergang von Bauausführung zum Betrieb besteht häufig die Herausforderung, dass die verantwortlichen Akteure die BIM-Modelle der Planung nicht an die tatsächlich ausgeführte Realität anpassen. Entsprechend liegen keine „Wie-gebaut-Modelle“ vor. Eine Masterarbeit, die zusammen mit der ETH Zürich und der Siemens AG betreut wurde, untersuchte daher, wie sich Punktwolken mithilfe von KI-Verfahren semantisch segmentieren und damit Abweichungen zwischen Modell und Realität erkennen lassen (Collins et al. 2021). Dabei kam ein Graph Neural Network für die Segmentierung zum Einsatz. Im Einzelnen wird zunächst die Punktwolke zu einem Dreiecksnetz vermascht und dieses Netz anschließend in einen Graphen überführt, der als Eingangsgröße für das Graph Neuronale Network dient. Resultat ist die korrekte Segmentierung der Punktwolke, das heißt das Zuordnen der einzelnen Punkte zu vorgegebenen Klassen wie Wand, Decke, Treppe und Rohrleitung.

Die aufgeführten Beispiele stellen nur einen kleinen Teil der Anwendungsmöglichkeiten von KI-Verfahren im Bauwesen dar. Der Lehrstuhl CMS und andere Institute und Einrichtungen betreuen derzeit viele weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu diesem Thema. Ein Beispiel sind die Aktivitäten im Bereich der Physics-informed Neural Networks, mit denen sich physikalische Phänomene beschreiben lassen (Raissi et al. 2019). In den entsprechenden KNN-Architekturen kommen dabei häufig physikalisch-mathematisch motivierte Operationen zum Einsatz – beispielsweise zur Bildung der Ableitung von physikalischen Größen in verschiedene Raumrichtungen.

7

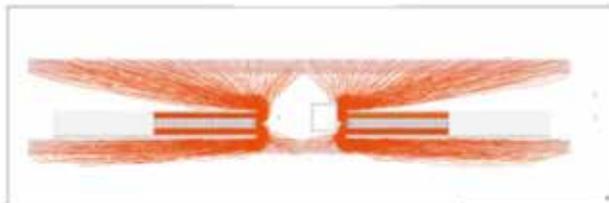
Nutzung eines künstlichen neuronalen Netzes zur Vorhersage von Personenströmen in Bahnhöfen

Floorplan



- floors = 2
- width = 15
- tracks = 2
- length = 150
- height = 25
- stairs = 3
- agents = 20

Simulation



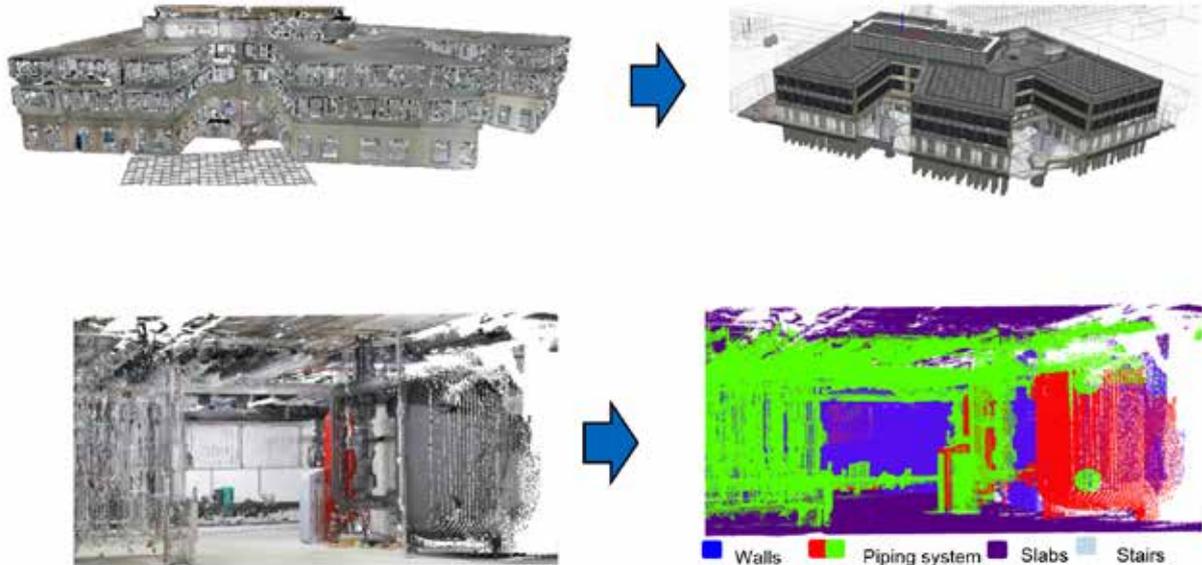
CNN



Quelle: Clever et al. 2021

8

Semantische Segmentierung einer Punktwolke zur Erstellung eines „Wie-gebaut-Modells“



Quelle: Collins et al. 2021

Herausforderungen und Einschränkungen

Die Erwartungen an die Verfahren der Künstlichen Intelligenz sind sehr hoch. Um ihre Möglichkeiten und Einschränkungen realistisch einschätzen zu können, braucht es jedoch ein grundlegendes Wissen über ihre Funktionsweise. Bei einem neuronalen Netz spielt beispielsweise die Phase des Trainings eine sehr wichtige Rolle, während der dem Netz Daten (z. B. Bilder) und die jeweils dazugehörige korrekte Antwort (z. B. eine Klassifikation) präsentiert werden. Für eine hohe Qualität des resultierenden Netzes sind die folgenden Punkte zu erfüllen:

- (a) sehr viele Datensätze für das Training
- (b) die Datensätze decken den Bereich der möglichen Eingangsdaten weitgehend vollständig ab
- (c) die Datensätze sind möglichst ausgewogen

Für (a) ist im Regelfall eine menschliche Bewertung erforderlich, beispielsweise in Form des Labelings – also der manuellen Markierung eines Ausschnitts auf den betreffenden Bildern. Hier liegt eine der Herausforderungen für die Anwendung von KI im Bauwesen, da eine umfangreiche

manuelle Aufbereitung sehr aufwendig und auch entsprechend teuer sein kann. Anders als in anderen Bereichen steht bei den spezifischen Anwendungen des Bauwesens nur in seltenen Fällen eine große internationale Community zur Verfügung, die kostenfrei an Trainingsdatensätzen mitwirkt. Einige Forscherinnen und Forscher setzen daher auf die Generierung und Nutzung von synthetischen Daten für das Training. Damit ist jedoch die nicht unerhebliche Gefahr verbunden, dass diese Daten zu ideal sind, also beispielsweise keine Verschattungen aufweisen. Das trainierte Netzwerk versagt dann bei der Anwendung auf Realdaten. Ebenso kritisch ist das Auftreten eines unbewussten Bias in den Trainingsdaten. Dies betrifft unmittelbar die Forderungen (b) und (c), die auch bei „natürlichen“ Daten eine sorgfältige Auswahl und Überwachung erfordern.

Für einen erfolgreichen Einsatz von KI-Verfahren im Bauwesen braucht es künftig daher öffentlich zugängliche Datenpools, die sich aus aufbereiteten Daten von verschiedenen öffentlichen Institutionen und privaten Unternehmen spei-

sen. Nur so lassen sich die Anforderungen an eine breite Datenbasis zu erfüllen. Das Prinzip der „geteilten Daten“ ist insbesondere vor dem Hintergrund der stark fragmentierten Baubranche eine unumgängliche Notwendigkeit für einen breiten Einsatz von KI-Methoden.

Unabhängig davon sind KI-Verfahren im Wesentlichen statistische Verfahren, die entsprechend wahrscheinlichkeitsbehaftete Aussagen tätigen können. Je nach Anwendungsdomäne ist die Zuverlässigkeit der Vorhersage sorgfältig zu prüfen, bevor derartige Verfahren in die praktische Anwendung gelangen. Dies betrifft vor allem Bereiche, bei denen Leib und Leben von Personen potenziell gefährdet sind – also unter anderem auch Anwendungen im Bereich der baustatischen Berechnungen oder der Bestimmung von Materialeigenschaften.

Fazit

Die Verfahren der Künstlichen Intelligenz zeigen in vielen Bereichen ein erhebliches Potenzial für die weitere Automatisierung und Effizienzsteigerung. Dazu gehören insbesondere auch die gebaute Umwelt und die damit verbundenen Wirtschaftsteile. Hier fallen sehr häufig große Mengen unstrukturierter Daten an, die sich mithilfe von KI-Verfahren zu höherwertigen Informationen verarbeiten lassen. Mögliche Einsatzgebiete erstrecken sich von der Erfassung bestehender Bauwerke und der Erzeugung digitaler Zwillinge über die Teilautomatisierung und Assistenz beim Entwurf und

Damit in Zusammenhang steht, dass KI-Methoden häufig als Black-Box-Verfahren eingesetzt werden, ein genaues Verständnis der Funktionsweise des Netzwerks also nicht besteht. Für manche Anwendungen ist dies auch nicht nötig, solange das Netzwerk im Rahmen einer festgelegten Zuverlässigkeit funktioniert. Für die genannten kritischen Bereiche ist jedoch ein vertieftes Verständnis erforderlich. Das ist auch wichtig, um abschätzen zu können, wie das Netzwerk auf „Outlier“ reagiert – also Eingangsdatensätze, die weit außerhalb des Wertbereichs der Trainingsdatensätze liegen. In diesem Sinne verweisen Forscherinnen und Forscher häufig darauf, dass sich KNN zwar gut für Interpolationsaufgaben einsetzen lassen (also zur Vorhersage von Werten zwischen bekannten Werten), aber nur eingeschränkt für Extrapolationsaufgaben (also zur Vorhersage von Werten außerhalb des bekannten Wertebereichs).

der Planung von Bauwerken bis zur Verarbeitung von Monitoringdaten, die bei Baustellen oder im Betrieb anfallen. Für einen sachgerechten Einsatz braucht es jedoch immer ein vertieftes Wissen über die Verfahren und insbesondere ihrer Grenzen. Um das große Potenzial zu erschließen, ist noch viel Forschung und Entwicklung nötig. Dazu wird das im November 2020 gegründete Georg-Nemetschek-Institut an der Technischen Universität München einen wichtigen Beitrag leisten.

Das Georg-Nemetschek-Institut an der Technischen Universität München (TUM)

Das „Georg Nemetschek Institute of Artificial Intelligence for the Built World“ an der TU München konnte Ende 2020 dank einer umfangreichen Spende der Nemetschek-Innovationsstiftung eingerichtet werden. Kernaufgabe des Instituts ist die Förderung von interdisziplinären Forschungsprojekten, bei denen Forscherinnen und Forscher aus den angewandten Bereichen der gebauten Umwelt mit Grundlagenwissenschaftlerinnen und -wissen-

schaftlern der Informatik und der Mathematik zusammenarbeiten. Neben der wichtigen Grundlagenforschung betreibt das Georg-Nemetschek-Institut auch angewandte Forschung mit industriellen und öffentlichen Partnern. Als Teil der School of Engineering and Design wird das Institut zudem neue Lehrangebote für die Studiengänge Bauingenieurwesen, Umweltingenieurwesen und Architektur schaffen.

Literatur

- Braun, A.; Borrmann, A., 2019:** Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning, *Automation in Construction* 106: 1–13.
- Bre, F.; Gimenez, J. M.; Fachinotti, V. D., 2018:** Prediction of wind pressure coefficients on building surfaces using artificial neural networks. *Energy Build.* 158: 1429–1441.
- Clever, J.; Abualdenien, J.; Borrmann, A., 2021:** Deep learning approach for predicting pedestrian dynamics for transportation hubs in early design phases, 28th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering 2021, Berlin, Germany.
- Collins, F. C.; Braun, A.; Ringsquandl, M.; Hall, D. M.; Borrmann, A., 2021:** Assessing IFC classes with means of geometric deep learning on different graph encodings, Proc. of the 2021 European Conference on Computing in Construction, Greece.
- Mafipour, M. S.; Vilgertshofer, S.; Borrmann, A., 2021:** Deriving Digital Twin Models of Bridges from Point Cloud Data Using Parametric Models and Metaheuristic Algorithms, 28th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering 2021, Berlin, Germany.
- Raissi, M.; Perdikaris, P.; Karniadakis, G. E., 2019:** Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378: 686–707.
- Trzeciak, M.; Borrmann, A., 2019:** Towards Registration of Construction Drawings to Building Information Models using Knowledge-based Extended Geometric Hashing. 26th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering 2019, Leuven, Belgium.
- Vilgertshofer, S.; Stoitchkov, D.; Borrmann, A.; Menter, A.; Genc, C., 2020:** Recognising Railway Infrastructure Elements in Videos and Drawings Using Neural Networks, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction* 172 (1): 19–33.