
Baustelleneinrichtungsplanung mittels Ganzzahliger Optimierung

Katrin Riga¹, Katrin Jahr² und Tobias Dusch³

¹Technische Universität Kaiserslautern · Paul-Ehrlich-Straße 14 · 67663 Kaiserslautern ·
E-Mail: riga@mathematik.uni-kl.de

²Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München ·
E-Mail: katrin.jahr@tum.de

³Technische Universität Kaiserslautern · Paul-Ehrlich-Straße 14 · 67663 Kaiserslautern ·
E-Mail: tobias.dusch@gmx.de

Die Ausführungsplanung für Bauprojekte wird zurzeit weitgehend ohne digitale Unterstützung durchgeführt und ist somit stark vom Fachverstand und der praktischen Erfahrung des Planers abhängig. In diesem Beitrag stellen wir eine mathematische Methode zur Optimierung von Baustelleneinrichtungsplänen am Beispiel der Positionierung von Turmdrehkränen vor. Wir präsentieren ein ganzzahliges lineares Optimierungsmodell zur teilautomatisierten Erstellung von Baustelleneinrichtungsplänen, welches sich besonders durch ein ausführliches Preprocessing der Daten und die Repräsentation der einzelnen Objekte durch konvexe Hüllen auszeichnet. In einer Fallstudie wurden mit einem externen Solver plausible Ergebnisse erzielt.

Keywords: Baustelleneinrichtungsplanung, Optimierung, MIP

1 Einleitung

Das große Potential der fortschreitenden Digitalisierung des AEC Sektors, insbesondere der Bereitstellung umfangreicher Informationen in einem digitalen Gebäudemodell (Building Information Modell – BIM), wird bereits in frühen Planungsphasen von Bauwerken genutzt. Trotz des großen Einflusses der Baustelleneinrichtung (BE) auf die Baustellengemeinkosten und die Produktivität des Bauvorhabens ist die Arbeitsvorbereitung bisher wenig formalisiert und digitalisiert. Die Planung erfolgt zumeist händisch und ohne wissenschaftlich fundierte Unterstützungswerkzeuge. Die Dimensionierung und Positionierung der einzelnen Elemente der BE erfolgt zumeist anhand von Faustformeln und Erfahrungswerten der Planer, es erfolgt keine qualitative oder quantitative Bewertung. Der Erfolg der Ausführungsplanung ist somit vom Fachverstand und der praktischen Erfahrung des Planers abhängig.

In diesem Beitrag stellen wir eine mathematische Methode zur Optimierung von Baustelleneinrichtungsplänen vor. Durch die teilautomatisierte Erstellung von BE-Plänen wird nicht nur der Arbeitsaufwand des Planers deutlich reduziert, es können auch besonders kostengünstige und robuste Lösungen gefunden werden. Zur Formulierung eines ganzzahligen linearen Optimierungsproblems für das Baustellenlayout werden zunächst für alle BE-Gegenstände alle möglichen Positionen auf dem Baufeld bestimmt. Anschließend werden im Preprocessing alle unzulässigen Positionen entfernt (bspw. aufgrund unzureichender Kranüberdeckung oder fehlender Zugänglichkeit), um den Lösungsraum einzugrenzen und das verbleibende Optimierungsproblem effizient mit einem Standard-Solver lösen zu können.

Im ersten Teil des Papers beschreiben wir die verwendeten Methoden. Anschließend stellen wir das entwickelte Modell genauer vor und präsentieren eine Fallstudie. Wir beenden das Paper mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Arbeitsschritte.

2 Methoden

Wie beispielsweise in ABDELMEGID et al. (2015), CHAU (2004) und TAM et al. (2001) werden für Optimierungsprobleme im Bereich der Baustellenplanung in der Literatur sehr häufig genetische Algorithmen verwendet - also Heuristiken basierend auf den genetischen Operationen Selektion und Variation. Algorithmen dieser Klasse enthalten stochastische Komponenten und liefern meist keine Garantie für die Optimalität der gefundenen Lösung (GERDTS & LEMPIO 2011). Außerdem ist die Konvergenz vieler genetischer Algorithmen stark von der Wahl der Parameter abhängig (SCHÖNEBURG et al. 1994). In dieser Arbeit soll das betrachtete Problem deshalb mittels eines gemischt-ganzzahligen linearen Programms gelöst werden. In einem gemischt-ganzzahligen linearen Programm (mixed integer program, MIP) ist eine lineare Zielfunktion über einer Menge zu optimieren, die durch lineare (Un-)Gleichungen beschränkt ist und für die ein Teil der Variablen nur ganzzahlige Werte annehmen darf. Ein gegebenes Optimierungsproblem liegt im Allgemeinen nicht in mathematischer Formulierung vor, auch gegenläufige Optimierungsziele treten häufig auf. Wie beispielsweise in NEMHAUSER & WOLSEY (1988) erläutert, kann ein in der Praxis auftretendes Optimierungsproblem oft auf unterschiedliche Weisen als MIP formuliert werden. Die Auswahl einer geeigneten Formulierung kann dabei jedoch die zur Lösung des MIPs – und damit auch des Ausgangsproblems – benötigte Laufzeit stark beeinflussen. So ist es möglich, dass für eine Formulierung des Problems keine Lösung in angemessener Zeit gefunden werden kann, während eine andere Formulierung bereits nach kurzer Zeit zu einer optimalen Lösung führt. Mit einer guten Formulierung können häufig größere – und damit für die Praxis relevantere – Instanzen gelöst werden. Ein maßgeblicher Vorteil von MIPs ist ihre große Flexibilität. Kleine Veränderungen der Problemstellung wie beispielsweise eine zusätzliche Bedingung können in vielen Fällen relativ einfach berücksichtigt werden, ohne dass eine völlig neue Formulierung gefunden werden muss. Auch können nicht lineare Gleichungen in vielen Fällen durch geschickte Formulierung und mit Hilfe zusätzlicher Variablen linearisiert werden, was auch die Modellierung vieler zunächst nichtlinearer Bedingungen in MIPs erlaubt.

Zum Lösen von MIPs gibt es exakte Verfahren wie zum Beispiel Branch and Bound- oder Branch and Cut-Algorithmen. Diese Verfahren sind beweisbar in der Lage, eine optimale Lösung eines MIPs zu finden oder festzustellen, dass das Problem unbeschränkt oder unlösbar ist (SCHRIJVER 1998). Effiziente Implementierungen dieser Verfahren, die sich generisch zur Lösung beliebiger MIPs einsetzen lassen, stehen in Form verschiedener kommerzieller und quelloffener Softwarepakete zur Verfügung. Diese sind so leistungsfähig, dass in den meisten Fällen bezüglich ihrer Größe anwendungsrelevante Instanzen gelöst werden können. Solche kommerziellen Solver sind beispielsweise Gurobi¹ (in dieser Arbeit verwendet) und CPLEX^{®2}, als alternative Open-Source-Solver stehen unter anderem SCIP³ und CBC⁴ zur Verfügung.

¹ <http://www.gurobi.com/index> (für Forschungszwecke kostenfrei nutzbar)

² <https://www.ibm.com/analytics/data-science/prescriptive-analytics/cplex-optimizer>

Ein weiterer Vorteil beim Verwenden von MIPs wird deutlich, wenn die Qualität einer zulässigen Lösung betrachtet werden soll. Es ist für MIPs zu jedem Zeitpunkt mittels primaler und dualer Schranken ermittelbar, wie weit der Zielfunktionswert der aktuell besten gefundenen Lösung maximal vom optimalen Zielfunktionswert entfernt ist (WOLSEY 1998). Damit besteht die Möglichkeit, einen Lösungsalgorithmus bereits dann zu stoppen, wenn eine hinreichend gute Lösung gefunden wurde – also eine Lösung, deren Zielfunktionswert um nicht mehr als eine vorgegebene (prozentuale) Fehlertoleranz vom optimalen Zielfunktionswert abweicht.

3 Modell

In dieser Arbeit wird ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell für die Baustelleneinrichtungsplanung betrachtet. Erste Ergebnisse für das vorgestellte Modell finden sich in DUSCH (2017).

3.1 Grundlagen

Im Fokus der Betrachtung steht die bezüglich Kostenminimierung optimale Auswahl und Platzierung von Turmdrehkränen, im Folgenden als Krane bezeichnet. Für die mathematische Formulierung relevante Eigenschaften der verschiedenen Kranarten sind dabei die benötigte Stellfläche, die maximale Hakenhöhe, die Auslegerlänge und die maximale Traglast, welche für jede Kranart in Form einer interpolierten Traglastkurve zur Verfügung steht. Nähere Informationen dazu können in SCHACH & OTTO (2008) gefunden werden.

Es ergeben sich die folgenden Bedingungen, die in diesem Modell an zulässige Kranpositionen gestellt werden:

- a) Jeder Punkt in einem Bauwerk muss unter Berücksichtigung eines gegebenen Sicherheitsabstandes von mindestens einem Kran überschwenkt werden können.
- b) Jeder Punkt einer Lagerfläche muss von mindestens einem Kran überschwenkt werden können.
- c) Für jede Baustraße muss es mindestens einen Kran geben, der die gesamte Breite der Straße an einer Stelle überschwenken kann.
- d) Die erforderlichen Stellflächen müssen eingehalten werden (zur Vereinfachung werden alle Stellflächen quadratisch modelliert).
- e) Die ausreichende Tragfähigkeit des Bodens muss gewährleistet sein.
- f) Alle Sicherheitsabstände von einem Kran zu Bauwerken, Baustraßen, Baugruben, Containeranlagen, Lagerflächen und sonstigen Hindernissen müssen eingehalten werden.
- g) Kein Kran darf im Arbeitsprozess eine Containeranlage überschwenken.
- h) Die Hakenhöhe eines Krans muss höher sein als alle im Arbeitsprozess mit einem gegebenen Sicherheitsabstand zu überschwenkenden Hindernisse.
- i) Für jede schwere Last muss es einen Kran geben, der diese unter Berücksichtigung seiner Traglastkurve transportieren kann.
- j) Schwere Lasten sollen ohne Übergabe von einem Kran zu einem anderen transportiert werden können.

³ <http://scip.zib.de/>

⁴ <https://projects.coin-or.org/Cbc>

Im Vergleich mit bestehender Literatur wie beispielsweise HUANG & WONG (2018) ist vor allem das Vorgehen bezüglich potentieller Kranstandorte in diesem Modell hervorzuheben. Mögliche Plätze müssen dem Programm nicht als Eingabe übergeben werden, sondern werden unter Beachtung aller relevanten Bedingungen errechnet. Dies ist ein wichtiger Automatisierungsschritt in der Baustelleneinrichtungsplanung. Erforderlich dafür ist allerdings die Diskretisierung der Baufläche. Dazu wird ein virtuelles Gitter über die Fläche gelegt. Ein Quadrat dieses Gitters entspricht dabei einem Quadratmeter des Baustellenareals. Auf diese Art ist es möglich, im Gitter bestimmte Informationen zu hinterlegen, wie zum Beispiel die Position bereits bestehender Gebäude. Auch bei der Modellierung solcher Objekte wird ein neuer Ansatz verfolgt: Statt wie in der Literatur üblich alle Baustellenobjekte durch Rechtecke zu approximieren, verwendet dieses Modell konvexe Hüllen zur Approximation. Hierdurch können Bauwerke mittels konvexer Polytope und Kreise wesentlich genauer abgebildet werden.

3.2 Preprocessing

Wie in NEMHAUSER & WOLSEY (1988) beschrieben ist die Idee beim Preprocessing, kleine Teilprobleme bereits vor dem Lösen des eigentlichen Problems zu lösen, um so die Problemformulierung zu vereinfachen. Konkret sollen in dieser Betrachtung die folgenden fünf Mengen so konstruiert werden, dass einige der Bedingungen an zulässige Kranpositionen von vornherein von allen Elementen der Menge erfüllt werden.

- LUP* Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ so aufgestellt werden kann, dass die linke untere Ecke seiner Stellfläche an Position (x, y) liegt, mit ART die Menge aller betrachteten Kranarten und $(x, y) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ die Koordinaten einer Position im Gitter.
- $BW_{(a,b)}^{av}$ Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an Position (x, y) in Reichweite des Bauwerkpunktes $(a, b) \in BW$ ist, mit BW die Menge aller (x, y) -Koordinaten, die ein zu errichtendes Bauwerk repräsentieren.
- $Lag_{(a,b)}^{av}$ Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an Position (x, y) in Reichweite des Lagerflächenpunktes $(a, b) \in Lag$ ist, mit Lag die Menge aller (x, y) -Koordinaten, die eine Lagerfläche repräsentieren.
- BS_i^{av} Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an einem beliebigen Punkt die gesamte Breite der Baustraße $i \in \{1, \dots, a_{BS}\}$ überschwenken kann, mit a_{BS} die Anzahl der Baustraßen.
- $T_{(x^{(1)}, x^{(2)}, g)}^{sat}$ Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an Position (x, y) unter Berücksichtigung der Traglastkurve die schwere Last $(x^{(1)}, x^{(2)}, g) \in SL$ von $x^{(1)}$ nach $x^{(2)}$ transportieren darf, mit SL die Menge aller schweren Lasten, dargestellt durch Tripel bestehend aus Aufnahmeort $x^{(1)}$, Einbauort $x^{(2)}$ und Gewicht $g \in \mathbb{N}_+$.

Die Mengenkonstruktion soll an dieser Stelle beispielhaft für eine Bedingung der Menge *LUP* erläutert werden, für die restlichen Konstruktionen sei wiederum auf DUSCH (2017) verwiesen. Für *LUP* sollen alle Kombinationen ausgeschlossen werden, die Sicherheitsabstände nicht einhalten können, die über eine Containeranlage schwenken müssen, die zu nah an zum Überschwenken zu hohen Gebäuden stehen, und die für einen effektiven Einsatz zu weit von einem zu errichtenden Bauwerk entfernt sind. Für das Überschwenken der Containeranlagen wäre das Vorgehen wie folgt: Für jedes Tripel $(x, y, art) \in LUP$ werden die Eckpunkte zu errichtender Bauwerke betrachtet, die in Reichweite des Auslegers liegen.

Von jedem dieser Punkte wird dann ein Rechteck zum Mittelpunkt der Kranstellfläche aufgezo- gen. Im Anschluss ist zu überprüfen, ob in einem dieser Rechtecke ein Punkt $(a, b) \in Con$ enthalten ist, mit Con die Menge aller (x, y) -Koordinaten, die einen Container auf der Baustelle repräsentieren. Ist dies der Fall, so wird das entsprechende Tripel (x, y, art) aus LUP entfernt. Abbildung 1 veranschaulicht ein Beispiel, bei dem ausschließ- lich die Kombination für Kran 1 aus LUP entfernt würde.

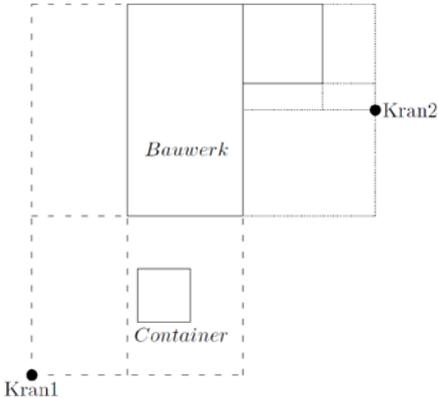


Abb. 1:

Skizze des Verfahrens zum Entfernen aller Kombinationen $(x, y, art) \in LUP$, die Be- dingung g) nicht erfüllen

3.3 Problemformulierung

Für die mathematische Formulierung des Problems werden zusätzlich benötigt:

- $kran_{x,y,art}$ Variable mit Wert 1, wenn ein Kran der Kranart art mit seiner linken unteren Ecke in Punkt (x, y) platziert wird, 0 sonst
- $BW_{missing}$ Menge aller Punkte $(a, b) \in BW$, die nach dem Erstellen einer Lösung nicht in den kombinierten Kranauslegerflächen enthalten sind
- $Lag_{missing}$ Menge aller Punkte $(a, b) \in Lag$, die nach dem Erstellen einer Lösung nicht in den kombinierten Kranauslegerflächen enthalten sind
- BS_i Menge aller (x, y) -Koordinaten, die Baustraße $i \in \{1, \dots, a_{BS}\}$ darstellen

Bedingung (1) setzt Forderung c) um. Sie legt fest, dass es für jede Baustraße mindestens einen Kran gibt, der an einer Stelle ihre gesamte Breite überschwenken kann. Forderungen i) und j) zum Transport schwerer Lasten werden in Bedingung (2) umgesetzt; für jede schwere Last muss es mindestens einen Kran geben, der sie von ihrem Aufnahmeort zum Einbauort transportieren darf.

$$\sum_{(x,y,art) \in BS_i^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a, b) \in BS_i, i \in \{1, \dots, a_{BS}\} \quad (1)$$

$$\sum_{(x,y,art) \in T_{(x^{(1)}, x^{(2)}, g)}^{sat}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (x^{(1)}, x^{(2)}, g) \in SL \quad (2)$$

Entsprechend der Forderungen a) und b) legen die Bedingungen (3) und (4) fest, dass jeder Punkt eines zu errichtenden Bauwerks bzw. einer Lagerfläche von mindestens einem Kran erreicht werden muss.

$$\sum_{(x,y,art) \in BW_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a, b) \in BW \quad (3)$$

$$\sum_{(x,y,art) \in Lag_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a,b) \in Lag \quad (4)$$

Um eine Laufzeit von mehreren Tagen auf Grund der für diese beiden Bedingungen sehr großen relevanten Mengen zu verhindern, werden die beiden Forderungen in der Implementierung in einem ersten Schritt abgeschwächt. Statt aller Punkte eines Bauwerks zu überprüfen, werden im Fall von Polytopen nur die Eckpunkte und im Fall von Kreisen der Mittelpunkt sowie acht auf der Kreislinie gleichverteilt liegende Punkte betrachtet. Als Folge kann es Punkte innerhalb eines Bauwerks bzw. einer Lagerfläche geben, die in einer ersten Lösung von keinem Kran versorgt werden können. Um diese Verletzung der Forderungen zu beheben, werden in einem solchen Fall die Bedingungen (5) und (6) hinzugefügt. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis alle Punkte mit mindestens einem Kran erreichbar sind.

$$\sum_{(x,y,art) \in BW_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a,b) \in BW_{missing} \quad (5)$$

$$\sum_{(x,y,art) \in Lag_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a,b) \in Lag_{missing} \quad (6)$$

Wie in DUSCH (2017) dargelegt, können mittels fünf weiterer Bedingungen mehrere Lösungen aus verschiedenen Kombinationen von Kranarten erstellt werden. Die zu maximierende Zielfunktion (12) setzt sich zusammen aus den negativen Kosten pro eingeplantem Kran, sowie Strafen in dem Fall, dass in den Lösungsvariationen dieselbe Kranart verwendet wird. Die Kosten für einen Kran ergeben sich dabei aus Fixkosten und variablen Kosten je Monat.

$$\max \sum_{(x,y,art) \in LUP} c_{art} kran_{x,y,art} + c^{8,9} f_{x,y,art}^{(8,9)} + c^{10,11} f_{x,y,art}^{(10,11)} \quad (12)$$

4 Fallstudie

Das IP wird mit dem kommerziellen Solver Gurobi auf einem Windows-basierten Computer mit AMD FX 6300 CPU mit 3,5 GHz sowie 16 GB DDR3 RAM gelöst.

4.1 Instanz

In der hier erläuterten Anwendung des Programms wurden die folgenden Kranarten verwendet:

- Liebherr 200 EC-H 10⁵
maximale Ausladung: 60 m, maximale Hakenhöhe: 60 m, erforderliche Stellfläche: 6×6 m, Kosten: 15.000 + 7.500 / Monat
- Liebherr 200 EC-H 10 Litronic⁵
maximale Ausladung: 60 m, maximale Hakenhöhe: 65 m, erforderliche Stellfläche: 8×8 m, Kosten: 20.000 + 9.500 / Monat
- Liebherr 112 EC-H 8 mit Turm 120 HC⁶

⁵ <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/249210/liebherr-200ec-h-10-litronic-datasheet.pdf>

⁶ http://s3-eu-west-1.amazonaws.com/download.niederstaetter.it/Download_it_Liebherr_Obendreher_112_EC-H_8.pdf

maximale Ausladung: 55 m, maximale Hakenhöhe: 48 m, erforderliche Stellfläche: 5×5 m, Kosten: 9.000 + 6.500 / Monat

- Liebherr 112 EC-H 8 mit Turm 185 HC⁶
maximale Ausladung: 55 m, maximale Hakenhöhe: 68 m, erforderliche Stellfläche: 8×8 m, Kosten: 10.000 + 7.000 / Monat

Die einzuhaltenden Sicherheitsabstände liegen jeweils zwischen zwei und fünf Metern (eine genaue Auflistung ist DUSCH (2017) zu entnehmen), der maximale Abstand eines Krans zu einem Bauwerk soll 12 m betragen, die Dauer der Baustelle wird auf 10 Monate angesetzt und es soll lediglich eine Lösung erstellt werden.

Betrachtet wird eine Instanz, die einem realen Bauprojekt nachempfunden ist. Die Bauwerkshöhe beträgt 35 m, schwere Lasten werden nicht berücksichtigt. Für das Projekt wurden insgesamt drei Krane eingesetzt. Das in Kapitel 3 vorgestellte Programm liefert unter Einhaltung aller Forderungen für diese Instanz eine Lösung, die lediglich zwei Krane verwendet (siehe Abbildung 2).

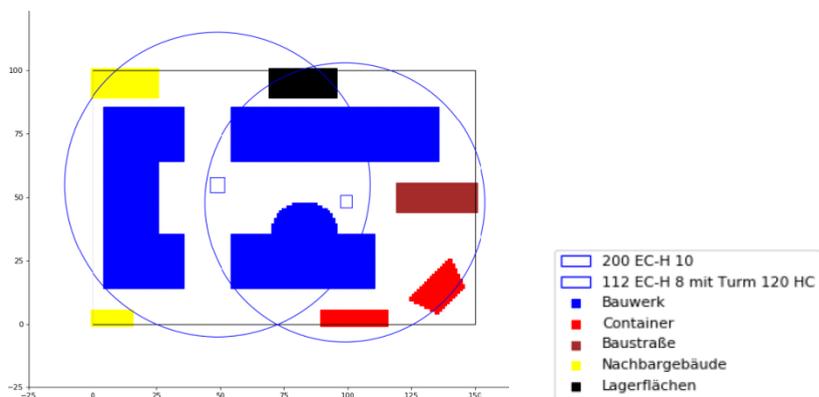


Abb. 2: Instanz mit Lösung

4.2 Resultate

Da alle in Kapitel 3.1 aufgeführten Forderungen entweder als harte Bedingungen in der Problemformulierung eingebracht wurden oder bereits im Preprocessing einfließen, kann jede zulässige Lösung des Modells als sinnvoller, umsetzbarer Plan betrachtet werden. Insbesondere aus finanzieller Sicht stellt eine optimale Lösung auf Grund der im Modell durchgeführten Kostenminimierung eine effiziente Möglichkeit der Kranpositionierung dar. Auch die Laufzeit des Programms für die betrachtete Instanz ist mit 79 Minuten durchaus akzeptabel. Durch eine detailliertere Laufzeitanalyse konnte in DUSCH (2017) bestätigt werden, dass das Modellieren der Baustellenobjekte mittels konvexer Hüllen eine laufzeit-effiziente Alternative zur Darstellung durch Rechtecke darstellt. Außerdem wurde die starke Auswirkung der Größe der Menge *LUP* auf die Gesamtlaufzeit des Programms deutlich.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Modell für die Positionierung von Kranen hebt sich insbesondere durch die Modellierung von Baustellenobjekten mittels konvexer Hüllen, sowie durch den Verzicht auf fest vorgegebene potentielle Kranstandorte ab. Es ist gelungen, ein Programm für die Erstellung umsetzbarer und kosteneffizienter Pläne zur Kranpositionierung zu entwickeln.

Um das Modell zu erweitern und die Baustellenplanung noch umfassender zu automatisieren, wird in einem nächsten Schritt der zeitliche Bauablauf bei der Planung der Krane berücksichtigt. Dazu werden verschiedene Bauphasen betrachtet und Krane so eingesetzt, dass ihre Auslastung mit Blick auf die Minimierung der Kosten möglichst gleichmäßig gegeben ist. Unter diesem Aspekt wäre es zum Beispiel vorstellbar, dass ein Kran nicht für alle Bauphasen aufgestellt wird, sondern nur über den Zeitraum hinweg, zu dem er tatsächlich zum Lastentransport benötigt wird. Auch eine Ausweitung hinsichtlich der zu platzierenden Objekte ist vorgesehen. So sollen nicht nur Krane möglichst wirksam und wirtschaftlich aufgestellt werden, sondern auch Lagerflächen effizient lokalisiert sein. Ein weiterer wichtiger Schritt wird die Eingabeoptimierung sein. Eingaben sollen aus einem niedrig detaillierten BIM Modell des geplanten Bauprojektes bezogen werden, statt wie bisher händisch erfasst werden zu müssen. Die Platzierung einer fest vorgegebenen Menge an Kranen sowie die Auswirkung der Abhängigkeit zwischen Krananzahl und benötigter Bauzeit sind weitere Aspekte des Modells, die einer näheren Betrachtung wert sind.

Literatur

- DUSCH, T. (2017), Optimierungsmodelle für die Positionierung von Baustelleneinrichtungsgegenständen, Bachelorarbeit, Technische Universität Kaiserslautern.
- SCHACH, R. & OTTO, J. (2008), Baustelleneinrichtung. B. G. Teubner Verlag.
- WOLSEY, L. A. (1998), Integer programming. Wiley-Interscience, New York.
- NEMHAUSER, G. L. & WOLSEY, L. A. (1988), Integer and combinatorial optimization. Wiley-Interscience, New York.
- SCHRIJVER, A. (1998), Theory of linear and integer programming. John Wiley & Sons.
- TAM, C. M., TONG, T. K. L. & CHAN, W. K. W. (2001), Genetic algorithm for optimizing supply locations around tower crane. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127 (4), 315-320.
- ABDELMEGID, M. A., SHAWKI, K. M. & ABDEL-KHALEK, H. (2015), GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites. *Alexandria Engineering Journal*, 54 (3), 519-526.
- CHAU, K. W. (2004), A two-stage dynamic model on allocation of construction facilities with genetic algorithm. *Automation in Construction*, 13 (4), 481-490.
- GERDTS, M. & LEMPIO, F. (2011), Mathematische Optimierungsverfahren des Operations Research. De Gruyter.
- SCHÖNEBURG, E., HEINZMANN, F. & FEDDERSEN, S. (1994), Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien. Addison-Wesley, Bonn.
- HUANG, C. & WONG, C. K. (2018), Optimization of crane setup location and servicing schedule for urgent material requests with non-homogeneous and non-fixed material supply. *Automation in Construction*, 89, 183-198.