

Arbeitsorganisatorische und ergonomische Anforderungen an die Mensch-Roboter-Interaktion auf der Baustelle der Zukunft

Jan BRÜNINGHAUS¹, Sven STUMM¹, Jochen NELLES², Alexander MERTENS²,
Christopher M. SCHLICK², Sigrid BRELL-COKCAN¹

¹ *Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion der RWTH Aachen University
Schinkelstraße 1, 52062 Aachen sowie Association for Robots in Architecture,
Gfrornergasse 6/15, 1060 Wien, Österreich*

² *Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen
Bergdriesch 27, 52062 Aachen*

Kurzfassung: Damit die *Baustelle der Zukunft* die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten am Arbeitsplatz verbessert, auf den demographischen Wandel und dem Fachkräftemangel reagiert und den Bedarf des Marktes und die Wünsche an individuell formangepassten Bauteilen niedriger Losgröße erfüllt, werden technologische Entwicklungen und der Paradigmenwechsel weg von der rein manuellen Tätigkeit, hin zur effizienten Mensch-Maschine-Kollaboration benötigt. Dieser Wandel stellt arbeitsorganisatorische und ergonomische Anforderungen an die Mensch-Roboter-Interaktion auf der Baustelle. Am Beispiel der robotergestützten Oberflächenbearbeitung von Naturstein wird die *Baustelle der Zukunft* näher erläutert.

Schlüsselwörter: Mensch-Roboter-Interaktion, Baustelle, Handwerk, Arbeitsorganisation, Ergonomie

1. Einleitung

Im Gegensatz zur klassischen industriellen Fertigung eignet sich die Baustelle aufgrund heterogener Aufgaben und wechselnder Bedingungen wesentlich weniger zur Automatisierung. Daher wird die Arbeit nach wie vor manuell oder mit einfacher technischer Unterstützung ausgeführt. Die technologische Entwicklung und der Paradigmenwechsel weg von rein manuellen Tätigkeiten, hin zur Mensch-Maschinen Kollaboration eröffnen Möglichkeiten für das Bauhandwerk. Ein Anwendungsbeispiel für robotergestützte Arbeit im Umfeld der Baustelle ist die Oberflächenbearbeitung von Naturstein.

Europäische Länder sind traditionelle Nutzer von Naturstein und sieben von zehn Ländern mit dem höchsten Verbrauch pro Kopf sind hier angesiedelt. Der Deutsche Naturwerkstein-Verband bezifferte für 2014 den Verbrauch von Fertigfabrikaten aus Naturstein in Deutschland insgesamt auf über 2 Mio. t. Dabei ist zu beobachten, dass aufgrund deutlich geringerer Lohnkosten immer mehr fertige Steinprodukte aus dem Ausland importiert werden.

Obwohl viele technische Neuerungen, wie automatisierte Säge, Fräs- und Schleifmaschinen, in der steinverarbeitenden Industrie Einzug gehalten haben, so ist es bisher nicht möglich automatisiert Oberflächen zu erzeugen, die dem Aussehen traditioneller Steinmetzarbeiten gleichen. Diese vielfältigen Arbeiten werden auch heute noch nach traditionellen Techniken in Handarbeit erstellt.

Daher wird im Rahmen des im EU-Projekts AROSU ein automatisierter Prozess für genau diesen Bereich entwickelt. Eine Analyse der Werkzeugbewegung im manuellen Prozess ermöglichte die Entwicklung eines Werkzeugs, das die Bewegung des Handwerkzeugs ausführt (Steinhagen et al. 2015). Dieses wird an einem KUKA-Industrieroboter befestigt. Dadurch ist auch die Bearbeitung von freigeformten Oberflächen möglich. Bisherige Ansätze waren immer auf die planare Bearbeitung beschränkt und bildeten die traditionellen Oberflächenstrukturen nur unzulänglich nach. Da die Werkzeugführung durch den Roboter wesentlich steifer ist als die Bewegungsführung mit der menschlichen Hand, ist es mit dem neuen System sogar möglich schräg zu meißeln, wodurch aus einer ebenen Ausgangsfläche ein dreidimensional strukturiertes Ergebnis entsteht (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Beispiele für automatisiert scharrierte Oberflächen auf unterschiedlichen Steinsorten

2. Manuelle Oberflächenbearbeitung von Naturstein (Ist-Zustand)

Die Oberflächenbearbeitung von Naturstein wird derzeit manuell durch den Steinmetz durchgeführt. Mögliche Fertigungsverfahren sind unter anderem Beilen, Stocken und Scharrieren. Im Folgenden wird das Scharrieren näher betrachtet. Die manuelle Oberflächenbearbeitung mit dem Scharrier-Verfahren ist sowohl körperlich anstrengend als auch monoton und zeitaufwendig. So rechnet ein Steinmetzbetrieb z. B. für das Scharrieren eines Quadratmeters mit einem Zeitbedarf von etwa drei Arbeitsstunden, bei denen der Steinmetz kontinuierlich die folgenden Aufgaben durchführt (siehe Abbildung 2):

- 1) Ausführen der Schlagbewegung mit dem Knüpfel, der bei jedem Schlag zur Verhinderung eines ungleichmäßigen Verschleißes leicht gedreht werden muss,
- 2) Abfangen des Meißels, der durch den Schlag innerhalb weniger Millisekunden mit hoher Geschwindigkeit in den Stein hineinarbeitet und wieder herausgeprellt wird,
- 3) Zurückführen des Meißels,
- 4) Ansetzen des Meißels weniger Millimeter neben dem letzten Schlag,
- 5) Ausrichten des Meißels auf den richtigen Winkel.

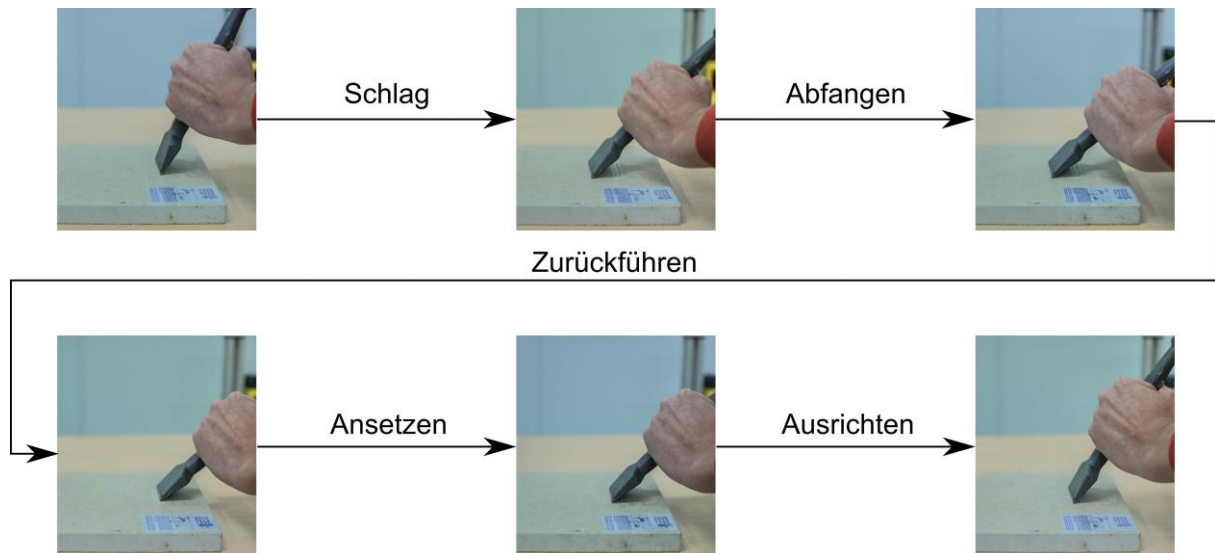


Abbildung 2: Oberflächenbearbeitung eines Natursteines mit dem Scharrier-Verfahren

Der Arbeitsprozess des manuellen Scharrierens (Ist-Zustand) ist anhand der K3-Methode in Abbildung 3 dargestellt (Luczak et al. 1999).

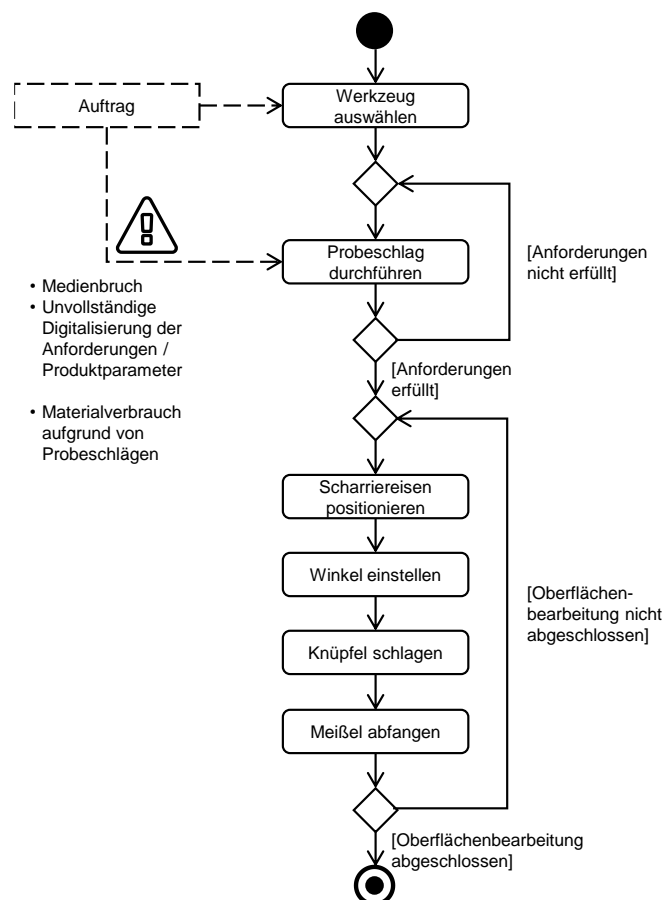


Abbildung 3: Arbeitsprozess der manuellen Oberflächenbearbeitung eines Natursteines mit dem Scharrier-Verfahren gemäß K 3 Modellierung (Ist-Zustand)

Dieser Arbeitsprozess gliedert sich grundsätzlich in die Werkzeugauswahl, das Durchführen von Probeschlägen und die Oberflächenbearbeitung. In Abhängigkeit vom (schriftlichen) Auftrag ist neben dem Oberflächenbearbeitungs-Verfahren ein geeignetes Werkzeug auszuwählen. Darüber hinaus sind zur individuellen Anpassung an die geforderten Kundenwünsche Probeschläge durchzuführen. Diese sind abhängig von den Parametern Material/Steinsorte, dem Oberflächenmuster sowie Breite und Tiefe (d. h. Schlagenergie und Schlagwinkel) der manuellen Scharrier-Schläge (Steinhagen und Kuhlenkötter 2015). Auch bei geübten Arbeitspersonen und entsprechender Erfahrung können hierbei mehrere Probeschläge notwendig sein. Anschließend wird unter Beachtung der entsprechenden Parameter die Oberflächenbearbeitung sukzessive manuell durchgeführt.

Dieser Arbeitsprozess zeigt in Bezug auf den Informationsfluss und die Durchführung der Probeschläge arbeitsorganisatorische und hinsichtlich der Durchführung der Oberflächenbearbeitung ergonomische Verbesserungspotentiale auf. So findet zwischen den Kundenanforderungen und der Produktherstellung ein Medienbruch bei der Informationsweitergabe statt. Weiterhin besteht ein Materialverbrauch aufgrund der notwendigen Probeschläge. Darüber hinaus führt die manuelle Oberflächenbearbeitung zu einer hohen körperlichen Belastung und ist zudem zeitaufwendig und repetitiv.

3. Robotergestützte Oberflächenbearbeitung von Naturstein (Soll-Zustand)

Im Rahmen des AROSU-Projektes wurde der Prozess auf einem KUKA-Roboter umgesetzt und weiterhin eine web2real-Applikation für die Definition der gewünschten Oberflächenstruktur durch den Endkunden entwickelt. Die eigentliche Programmierung der Werkzeugbahnen für den Roboter erfolgt mittels einer Offline-Programmierung. Auch die web2real-Applikation nutzt diese Struktur, für den Benutzer unsichtbar, im Hintergrund um die notwendigen Daten zur Vorabsimulation des Ergebnisses zu generieren. Auf diese Weise können auch komplexe Muster in den Naturstein automatisch eingebracht werden. Das Programmiersystem ist dabei aufgrund der vielfältigen Bearbeitungsmöglichkeiten flexibel und offen gestaltet und erlaubt außerdem die direkte Beeinflussung während des Bearbeitungsprozesses durch mxAutomation ohne das manuell ein neues Programm auf die Steuerung übertragen und dort gestartet werden müsste (Braumann und Brell-Cokcan 2015). Mit der zukünftigen Implementierung des AROSU-Systems geht eine Aktualisierung des Arbeitsprozesses einher. Der Arbeitsprozess für die Roboter gestützte Oberflächenbehandlung (Soll-Zustand) ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die Bearbeitungsbahnen werden entweder direkt von einem Mitarbeiter am Computer geplant oder vom Kunden über die web2real-Applikation definiert und später lediglich von einem Mitarbeiter kontrolliert sowie ggf. angepasst und optimiert. Bei der Fertigung selbst kann auf dem Handbediengerät des Roboters sowohl das CAD-Modell des Ausgangssteins als auch eine Vorabsimulation des gewünschten Prozessergebnisses sowie die Auftragsdaten angezeigt werden. Zur Kalibrierung der Prozessparameter auf den Naturstein sind Probeschläge notwendig. Hierfür soll eine eigene Benutzerschnittstelle am Handbediengerät geschaffen werden, mit der diese Daten einfach für die komplette Bearbeitungsbahn angepasst werden können.

Dieser Arbeitsprozess macht die Informationen für den Steinmetz über das Handbediengerät zugänglich. Auch wenn während der Implementierungsphase nach wie vor Probeschläge notwendig sein werden, ist geplant, dass Kundenwünsche,

Fertigungsparameter und das Resultat der Probeschläge in einer Datenbank erfasst werden. Dies ermöglicht, die Erfahrung der Arbeitspersonen um die Dokumentation vergangener Probeschläge zu ergänzen und somit zukünftige Probeschläge zu verringern. Weiterhin führt die robotergestützte Oberflächenbehandlung zu einem erweiterten Aufgabenspektrum der Steinmetze, die körperlich anstrengende und monotone manuelle Arbeit wird von der Robotersteuerung über das Handbediengerät abgelöst.

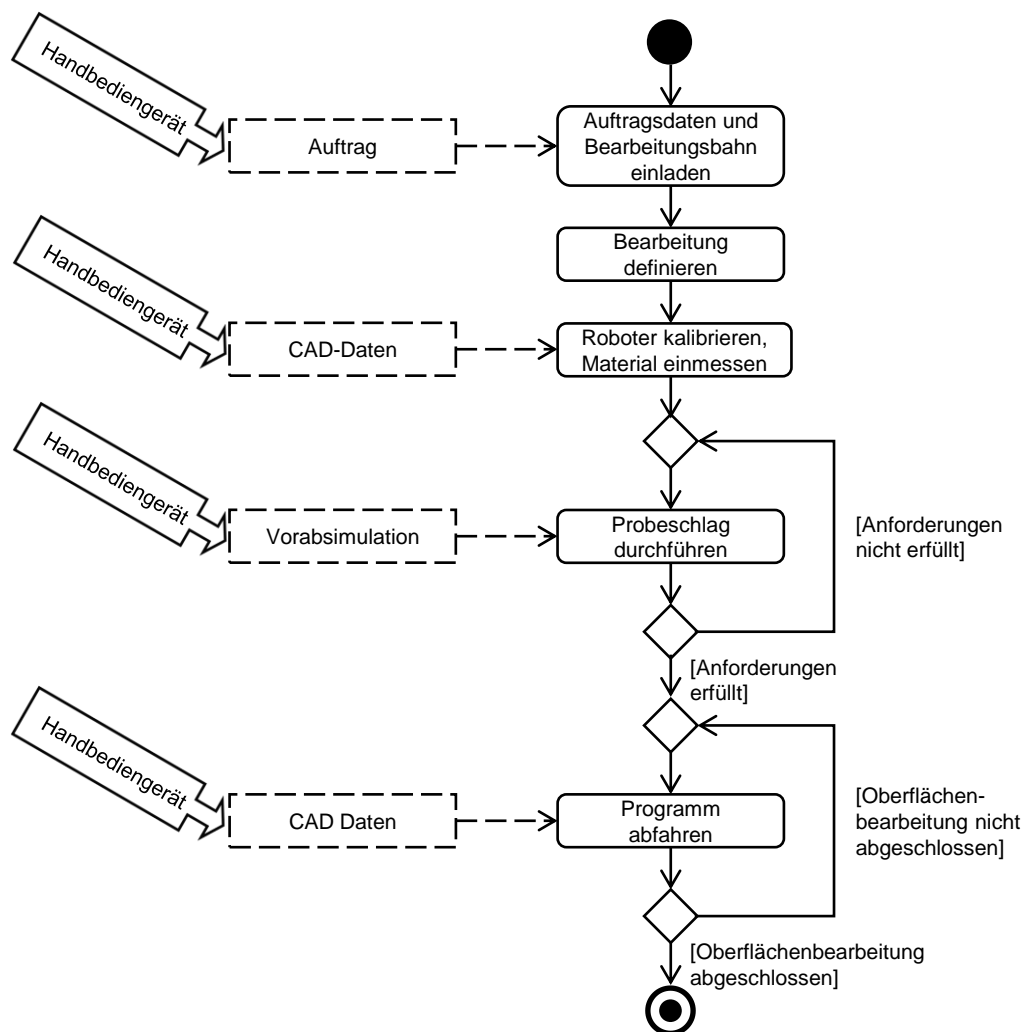


Abbildung 4: Arbeitsprozess der robotergestützten Oberflächenbearbeitung eines Natursteines mit dem Scharrier-Verfahren gemäß K 3 Modellierung (Soll-Zustand)

Obwohl mit diesem neuen System nicht nur Oberflächen erstellt werden können, die den Arbeiten eines Steinmetzes täuschend ähnlich sehen, sondern auch bisher nicht nutzbare Effekte, wie beispielsweise ein schräges Meißeln durch eine Verkipfung gegen die Schneidachse, möglich macht, so wird der hauptsächliche Einsatz in der Bearbeitung von großflächigen Bauteilbereichen liegen. Kleine Feinheiten sind insbesondere aufgrund der Inhomogenität des Naturprodukts bisher nicht wirtschaftlich zu automatisieren und werden daher auch auf absehbare Zeit durch manuelle Handarbeit erstellt werden.

4. Diskussion und Ausblick

Die Baustelle der Zukunft bietet das Potential, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten am Arbeitsplatz zu verbessern, auf den demographischen Wandel und dem Fachkräftemangel zu reagieren und den Bedarf des Marktes und die Wünsche an individuell formangepassten Bauteilen niedriger Losgröße zu erfüllen. Hierzu werden jedoch technologische Entwicklungen und der Paradigmenwechsel weg von der rein manuellen Tätigkeit, hin zur effizienten Mensch-Maschinen Kollaboration benötigt. Die in diesem Beitrag aufgezeigten arbeitsorganisatorischen und ergonomischen Potentiale einer Mensch-Roboter-Interaktion auf der Baustelle sind hierfür lediglich der Anfang. Eine durchgängige Ersetzung repetitiver und körperlich belastender Tätigkeiten durch manuell geleitet und individuell angepasste Automatisierung sowie die angepasste Unterstützung menschlicher Tätigkeiten durch Robotik stellen dabei ein zentrales Instrument um die Baustelle als zukunftssichere Arbeitsumgebung zu gestalten.

Eine erfolgreiche Implementierung setzt unter anderem voraus, dass Steinmetze als Handwerker der Zukunft aufgrund ihrer beruflichen Qualifikation dazu in der Lage sind, die in ihrem Arbeitsumfeld neuen informationstechnischen Systeme sicher zu bedienen. Hierfür ist allerdings eine zielgruppengerechte Nutzerführung notwendig. Roboter- und Programmiersysteme zielen auch aufgrund ihrer Komplexität auf Personen ab, die tagtäglich mit informationstechnischen Systemen arbeiten. Um das neu entwickelte AROSU System für Steinmetze nutzbar zu machen und eine weite Akzeptanz zu erreichen ist daher eine geeignete Benutzungsschnittstelle und Nutzerführung unerlässlich.

5. Literatur

- Braumann, J.; Brell-Cokcan, S.: Adaptive Robot Control - New Parametric Workflows Directly from Design to KUKA Robots, In: Real Time - Proceedings of the 33rd eCAADe Conference, Volume 2, 2015, S. 243-250
- Luczak, H.; Wolf, M.; Schlick, C.; Springer, J.; Foltz, C.: Personenorientierte Arbeitsprozesse und Kommunikationsformen, In: Integration von Entwicklungssystemen in Ingenieur Anwendungen - Substantielle Verbesserung der Entwicklungsprozesse, Hrsg.: Nagl, M.; Westfechtel, B., Springer Verlag, Berlin 1999, S. 403-422
- Steinhagen, G.; Brüninghaus, J.; Kuhlenkötter, B.: Robotergestützte künstlerische Steinbearbeitung, In: Fachtagung Mechatronik 2015, S. 103-108
- Steinhagen, G.; Kuhlenkötter, B.: Analysis of the material removing mechanism for an automated chiselling approach, In: 3rd International Conference on Stone and Concrete Machining, 2015, S. 61-71

Danksagung

This project has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no 606453.