

Diploma Thesis

Einflussfaktoren auf die Produktivitätssteigerung durch Human-Robot Interaction im Bauwesen

submitted in satisfaction of the requirements for the degree
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Diplomarbeit

Factors Influencing Productivity Gains through Human-Robot Interaction in Construction

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Ing. Soleman Haj Bakour, BSc

Matr.Nr.: 12228533

Betreuung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Frank Lulei**
Univ. Ass.in Dipl.-Ing.in **Karina Breitwieser**, MSc
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/YYY, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2025

Acknowledgment

At this point, I would like to express my sincere gratitude to all those who have supported me throughout my studies, especially while writing this diploma thesis.

First and foremost, I would like to thank Univ. Prof. Dr. Ing. Frank Lulei for giving me the opportunity to write this thesis at the Institute of Construction Management and Economics, within the Research Group for Construction Operations and Construction Methods Engineering.

My sincere thanks go to Univ.Ass.in Dipl.-Ing.in, MSc Karina Breitwieser, who has accompanied me from the very beginning of this work. She was a key figure throughout my studies at the Vienna University of Technology as a lecturer and a dedicated supervisor of my diploma thesis.

Furthermore, during my time as a student assistant under her guidance, I was able to deepen my experience in academic work. She played a crucial role in sparking my interest in construction robotics, constantly encouraging me and opening up new routes and insights. For this, and for her always friendly and supportive manner, I am truly grateful.

I would also like to thank Wienerberger, especially Meysam Taghavi and Jörg Reinold, for supporting and promoting the integration of WLTR into my thesis. I would also like to thank Jaromir Sadlon and the team at KM-Robotics for providing valuable information and allowing me to work with the robot.

Special thanks to all the experts for their valuable contributions to this thesis. Your insights and input significantly enriched the quality and depth of the research.

In addition, I would like to thank the entire team at the Institute of Construction Management and Economics for the collegial environment and for allowing me to gain valuable experience in an inspiring academic environment.

Above all, I am deeply grateful to my family — Hussam, Ayat, Fatema, Mohamed Haj Bakour, and Maryam Rojjo — as well as to my flatmates, Philip Moore, Paula Hochstädter, Julia Habel, Rebecca Nolan, and Fabian Tesdorff, and to my friends and fellow students, especially Niklas Jobst, who have accompanied me throughout my studies. I owe the achievement of this milestone largely to all of you. Thank you!

Abstract

We live in a time of transformation, marked by the increasing use of robotics and artificial intelligence. Compared to other industries, the construction sector faces a particular challenge in implementing these technologies due to its complex, dynamic, and often uncontrolled environment. Therefore, this thesis aims to contribute to the gradual integration of robotics into the construction industry—especially regarding productive collaboration between humans and robots.

The theoretical foundations of construction robotics are addressed at the beginning of the thesis. This includes the definition of relevant terms and an introduction to human-robot interaction (HRI), focusing on how humans and robots perceive their environment and respond to one another. Ergonomic aspects play a central role in this, as they significantly influence user experience and system acceptance—especially where a robot is part of that system. Afterwards, current examples of construction robots are presented, and the general central challenges associated with the deployment of construction robots are mentioned.

Methodologically, the thesis relies on a combination of literature review and empirical research. The latter includes several workshops with manufacturers, construction companies, and the Institute of Construction Management and Economics at the Technical University of Vienna, as well as qualitative expert interviews with professionals from both the construction and robotics sectors.

The analysis focuses on safety, training, new role profiles, acceptance, and productivity in the context of human-robot interaction on construction sites. Based on a wide literature review from various industries, the findings are transferred to the construction sector to formulate recommendations for action. These recommendations are intended to serve as a foundation for future developments and to facilitate the integration of robotics in construction.

Topics include health and safety regulations for machinery and construction equipment, risk assessments and mitigation measures, training programs, new professional roles, and strategies for promoting acceptance & trust in robots in the construction context. Productivity serves as the unifying element throughout.

Finally, the insights and recommendations are applied to using the brick-laying robot developed by Wienerberger (WLTR) at a construction site in Pelhřimov. Based on the literature review, assumptions, and a survey of WLTR operators and developers, the recommendations are adapted and presented.

The aspects discussed are considered in the context of human-robot interaction. As this interaction plays a key role in successfully integrating robotics into construction practice—contributing significantly to safety, acceptance, and productivity on construction sites—this thesis focuses on the systematic analysis and design of productive human-robot interaction in the construction industry.

Kurzfassung

Wir leben in einer Zeit des Wandels, die durch den zunehmenden Einsatz von Robotik und künstlicher Intelligenz gekennzeichnet ist. Im Vergleich zu anderen Branchen stellt die Bauindustrie aufgrund ihrer komplexen, dynamischen und oft unkontrollierten Umgebung eine besondere Herausforderung für die Implementierung dieser Technologien dar. Ziel dieser Diplomarbeit ist es daher, einen Beitrag zur schrittweisen Integration der Robotik in die Baubranche zu leisten – insbesondere im Hinblick auf eine produktive Zusammenarbeit zwischen Menschen und Roboter.

Zu Beginn der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen der Baustellenrobotik behandelt. Dies umfasst die Definition relevanter Begriffe sowie eine Einführung in die Mensch-Roboter-Interaktion (HRI), wobei insbesondere untersucht wird, wie Mensch und Roboter ihre Umwelt wahrnehmen und aufeinander reagieren. Ergonomische Aspekte spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie das Nutzererlebnis und die Akzeptanz eines Systems maßgeblich beeinflussen, wo ein Roboter ein Teil von diesem System ist. Anschließend werden aktuelle Beispiele von Baurobotern vorgestellt und allgemein die zentralen Herausforderungen bei dem Einsatz von Baurobotern erwähnt.

Methodisch stützt sich die Arbeit auf eine Kombination aus Literaturrecherche und empirischer Forschung. Letztere umfasst mehrere Workshops mit Herstellern, Bauunternehmen und dem Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Wien sowie qualitative Experteninterviews mit Fachleuten aus der Bau- und Robotikbranche.

Im Fokus der Analyse stehen die Aspekte Sicherheit, Ausbildung, neue Rollenbilder, Akzeptanz und Produktivität im Kontext der Mensch-Roboter-Interaktion auf Baustellen. Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche aus verschiedenen Industriebereichen werden die Erkenntnisse auf die Bauindustrie übertragen, um Handlungsempfehlungen zu formulieren. Diese Empfehlungen sollen als Grundlage für zukünftige Entwicklungen dienen und die Integration von Robotik im Bauwesen erleichtern.

Themen sind unter anderem Sicherheitsvorschriften (Health & Safety Regulations) für Maschinen und Baumaschinen, Risikoanalysen und Risikominderungsmaßnahmen, Ausbildungsprogramme, neue Berufsbilder sowie Strategien zur Förderung von Akzeptanz und Vertrauen gegenüber Robotern im Bauwesen. Die Produktivität gilt dabei als verbindendes Element.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen werden abschließend auf den Einsatz des Ziegelroboters WLTR von Wienerberger am Standort Pelhřimov angewendet. Basierend auf die Literaturrecherche, Annahmen und einer Befragung von Bedienern und Entwicklern von WLTR werden die Handlungsempfehlungen angepasst und dargestellt.

Die angesprochenen Aspekte werden im Kontext der Mensch-Roboter-Interaktion betrachtet. Da diese eine zentrale Rolle für die erfolgreiche Integration der Robotik in die Baupraxis spielt und maßgeblich zur Sicherheit, Akzeptanz und Effizienz auf Baustellen beiträgt, liegt der Fokus dieser Diplomarbeit auf der systematischen Analyse und Gestaltung einer produktiven Mensch-Roboter-Interaktion im Bauwesen.

General Information

The author values diversity and equal treatment. For the sake of readability, gender differentiation has been overlooked throughout this thesis. This decision in no way implies discrimination against any gender.

Also, Artificial intelligence (AI) tools were used to assist in preparing this thesis. DeepL Translator, DeepL Write, and Grammarly were employed exclusively for linguistic assistance with translations, spelling and grammar checks, and the editing of individual sections.

The expert interviews were recorded and then transcribed using the application "Draftsör the transcript feature of Microsoft Teams.

It is important to emphasize that no AI-generated content was fully or directly adopted at any point in the thesis. As a result, no direct citations to the use of AI are provided. AI was used only as a supportive tool to maintain academic standards.

Contents

1	Introduction	15
1.1	Background and Motivation	16
1.2	Research Questions	17
1.3	Research Methodology	18
1.4	Scope of the study	19
1.5	Structure of the Diploma Thesis	20
2	Theoretical Foundations of HRI in the Construction Sector	21
2.1	Definition of Terms	22
2.1.1	General Terms	22
2.1.2	Human-Robot-Interaction Terms	22
2.1.3	Health and Safety Terms	23
2.2	Fundamentals of Human-Robot Interaction	25
2.2.1	Theoretical Models of HRI	25
2.2.2	Cognitive Science Foundations	26
2.2.3	Communication Methods between Humans and Robots	27
2.2.4	Ergonomics and Usability	29
2.3	Applications of Robots in Construction	32
2.4	Challenges of HRI on Construction Sites	34
2.5	Summary of Theoretical Foundations in HRI	37
3	Empirical Research	38
3.1	Workshops	39
3.1.1	Pioneer Project: Construction Automation	39
3.1.2	Brief Description of the Sessions	40
3.1.3	Presented Robots and Automated Systems	44
3.2	Expert Interviews	47
3.2.1	Description of Expert Interview 1 – Jaromir Sadlon	47
3.2.2	Description of Expert Interview 2 – Meysam Taghavi	49
3.2.3	Description of Expert Interview 3 – Wolfgang Hochreiter	51
3.2.4	Description of Expert Interview 4 – Kevin Nikolai	53
3.2.5	Description of Expert Interview 5 – Herbert Meister	57
3.2.6	Description of Expert Interview 6 – Patrik Zips	60
3.2.7	Description of Expert Interview 7 – Karina Schiefer	62
3.3	Summary of Empirical Research on Construction Robotics	65
4	Health & Safety in HRI on Construction Sites	67
4.1	Safety Risks in HRI in Construction	68
4.2	Relevant Safety Standards and Regulations for HRI on Construction Sites	70
4.2.1	History of Safety Standards	70
4.2.2	Overview of International Safety Standards for Robots and Machines	71
4.2.3	Overview of Safety Guidelines in Construction	75

4.3	Risk Analysis and Safety Assessments	78
4.3.1	Methods for Hazard Analysis in HRI	78
4.3.2	Risk Matrix, Prioritization of Risks	80
4.4	Safety Measures to Minimize Risks in HRI on Construction Sites	84
4.4.1	Inherent Safe Design	84
4.4.2	Safeguards and other complementary measures	86
4.5	Suggestions for improving Safety in The Integration of Construction Robots	87
4.5.1	Recommendation for Safety Standards	87
4.5.2	Examples for Risk Analyses in HRI	89
4.5.3	Risk Matrix for Human-Robot Interaction	91
4.5.4	Protective Separation Distance	93
4.6	Summary of Chapter 4: Health & Safety in HRI on Construction Sites	97
5	Acceptance and New Roles through the Integration of Robots	99
5.1	Impact of Robotics on Roles and Tasks	100
5.2	Attitudes and Acceptance of Construction Workers	103
5.2.1	Factors Influencing Workers' Attitudes and Acceptance	103
5.2.2	Challenges in Robot Acceptance and Potential Fears	105
5.3	Training Concepts and Methods for Successful HRI	107
5.4	Suggestions for New Roles, Skills and Strategies for HRI	109
5.4.1	Examples of New Job Profiles in Construction	109
5.4.2	Analysis of Requirements and Skills Necessary due to HRI	110
5.4.3	Training Content and Path Development	113
5.4.4	Course Example for Universities and Universities of Applied Science	114
5.4.5	Developing Strategies to Promote Human-Robot Interaction	117
5.5	Summary of Chapter 5: Acceptance and New Roles through the Integration of Robots	119
6	Productivity in Construction with Respect to HRI	121
6.1	Definition and Importance of Productivity	122
6.1.1	Introduction to Productivity in Construction	122
6.1.2	Typical Productivity Metrics, Quality, and Measurement	123
6.1.3	Challenges in Enhancing Productivity on Construction Sites	124
6.2	Impact of Safety on Productivity: Conflicts and Synergies	127
6.3	Impact of Psychological Effects on Productivity	129
6.4	Impact of Training on Productivity	131
6.5	Impact of Robotics on Productivity Metrics	133
6.5.1	Impact of Robotics on Efficiency and Speed	133
6.5.2	Impact of Robotics on Quality Improvements	134
6.5.3	Relation between Workers Health and Productivity	135
6.6	Interrelationship between Productivity, Safety and Accpetance & Trust	137
6.7	Summary of Chapter 6: Productivity in Construction in the Frame of HRI	139
7	HRI on a Real Construction Site in Pelhřimov	140
7.1	Project Description	141
7.1.1	Local Conditions and Purpose of the Project	141
7.1.2	Technical Conditions of the Site	142
7.2	Safety Measures and their Implementation	143
7.2.1	Actual Safety Situation on the Construction Site	143

7.2.2	Suggestions for Safety on the Construction Site	143
7.3	Implemented Training Programs	150
7.3.1	Actual Training Programs	150
7.3.2	Suggestions for Optimization of Training	150
7.4	Productivity Analysis for the Use of Robots	152
7.4.1	Actual Productivity Situation of WLTR in Pelhřimov	152
7.4.2	Suggestions for Productivity Optimization	154
7.5	Summary of Chapter 7: HRI on Real Construction Site in Pelhřimov	157
8	Outlook and Further Research Needs	159
8.1	Summary of Findings	160
8.2	Outlook on Future Developments and Research Perspectives	163
8.2.1	Project Phases and Robotics	163
8.2.2	Build by Wire	166
8.3	Suggestions for Practical Implementation	169
	Appendices	170
A	Definition of Terms	170
B	Expert Interviews	175
B.1	Expert Interview - Jaromir Sadlon	175
B.2	Expert Interview - Meysam Taghavi	184
B.3	Expert Interview - Wolfgang Hochreiter	193
B.4	Expert Interview - Kevin Nikolai	203
B.5	Expert Interview - Herbert Meister	214
B.6	Expert Interview - Patrik Zips	225
B.7	Expert Interview - Karina Schiefer	234
C	Risk Matrix	247
D	Course Concept	249
E	Checklist for the integration of Robots	251
F	Construction Site's Plans	253
F.1	Floor Plan	253
F.2	Safety Zone for WLTR	255
F.3	3D-View	257
G	Risk Matrix for the Use of WLTR	259
G.1	Risk Matrix for the Use of WLTR	259
G.2	Modified Risk Matrix for the Use of WLTR	261
H	Safety Concept in the Safe Zone of WLTR	263
I	Evaluation Protocol	265
I.1	Evaluation Protocol-English Version	265
I.2	Evaluation Protocol-German Version	269

List of Figures

2.1	Types of human-robot interaction [8, p. 211]	23
2.2	Human-robot interaction [21, p. 86]	27
2.3	Personal space [3, p. 83]	28
2.4	Group formations [3, p. 85]	28
2.5	Pyramid of usability [22, p. 8]	30
2.6	User-centred system design [25, p. 69]	31
2.7	Construction robot market [26]	32
3.1	Digital Findet Stadt logo [43]	39
3.2	Concept of the workshops	40
3.3	WLTR ¹	45
3.4	DokaXbot ²	46
3.5	GreenBuild logo ³	47
3.6	Wienerberger logo ⁴	49
3.7	Doka logo ⁵	51
3.8	Pilz GmbH logo ⁶	53
3.9	Pde logo ⁷	57
3.10	AIT logo ⁸	60
3.11	PORR logo ⁹	62
4.1	EU-Guidelines [49, p. 388]	70
4.2	FMEA concept [59, p. 239]	79
4.3	HAZOP worksheet [59, p. 374]	80
4.4	Inherent, current and target levels of risks [60, p. 156]	81
4.5	Likelihood scales [60, p. 154]	82
4.6	The 4Ts [60, p. 163]	83
4.7	Risks according to the 4Ts strategies	93
4.8	Illustration of spaces [54, Annex-B]	94
5.1	Boston Dynamics Spot ¹⁰	100
5.2	HP SitePrint ¹¹	101
5.3	Schindler R.I.S.E ¹²	101
5.4	Openness scale across different ages for women and men [49, p. 77]	104
5.5	Astro Boy ¹³	105
5.6	Simulated training facility for construction machinery in VR ¹⁴	108
5.7	Fundamentals of construction robotics; course concept	116
5.8	Strategies to promote human-robot interaction	118
6.1	Production factors [90, p. 15]	123
6.2	Relationship between workspace and number of tools - Productivity in the construction industry	124
6.3	Number of workers per crane	125
6.4	Performance characteristics of a robot regarding safety and productivity [92, p. 20]	127

6.5	Operating modes in human-robot interaction [92, p. 20]	128
6.6	Impact of the induction factor	131
6.7	Stakeholders involved to close the skills gap [96]	132
6.8	Error plot computation based on ground truth measurements of the fabricated wall [64, p. 63]	135
6.9	Percentage of employees who frequently work under various environmental conditions	135
6.10	Percentage of employees frequently affected by specific environmental conditions	136
6.11	Share of employees performing physically demanding work in 2022 [103]	136
6.12	Magical triangle and trade-offs in project management	137
6.13	A qualitative illustration of a new magical triangle	138
7.1	3D visualization of the library in Pelhřimov [108]	141
7.2	Floor plan of the construction site in Pelhřimov (see F.1)	142
7.3	4Ts strategy for the use of WLTR in Pelhřimov	146
7.4	Modified 4Ts strategy for the elements (D) and (M)	147
7.5	Safezone and redundant safety levels for WLTR	148
7.6	Safety concept (see appendix H and 6.2)	149
7.7	Work duration for the ground floor – exterior and interior walls	153
8.1	Phases of project development	163
8.2	Draft of checklists for the deployment of robots on construction sites	165
8.3	Three-axis illustration of Build by Wire	168

List of Tables

2.2	Overview of robot applications across different construction sectors	33
2.4	Barriers in human-robot interaction in construction	36
4.1	Types of risks and examples in human-robot interaction on construction sites . .	69
4.2	Safety devices	86
4.4	Proposed safety aspects for robots on construction sites	88
4.5	Risk analysis according to FMEA method	90
4.6	Risk analysis according to HAZOP method	91
4.7	Risk matrix for human-robot interaction	92
5.2	Roles, activities, and skills in HRI on Construction Sites	112
7.1	Risk analysis for WLTR in Pelhřimov according to HAZOP method	144
7.2	Risk matrix for the use of WLTR in Pelhřimov	146
7.3	Information based on video analysis	152
7.4	Comparison of wall construction durations between WLTR and traditional bricklayers	152

Chapter 1

Introduction

In the year 2024, around 30% of construction companies in Germany were severely affected by a shortage of skilled workers. The main factors contributing to this are:

- demographic changes,
- insufficient skills among potential workers,
- and regional differences in the availability of labor.

In addition, construction work is physically demanding and often associated with injuries, which can discourage people from entering the profession. The shortage of skilled workers is leading to a decline in both output and service demand in the construction sector. While measures such as targeted immigration, financial encouragement and attractive training programs can help [1, pp. 7, 16–24, 45], technological advances also offer a promising alternative.

With the ongoing development of new technologies - particularly artificial intelligence and robotics - automation offers a potential solution. Construction robots will likely become a central element on construction sites in the future.

Close human-robot collaboration has gained significant interest worldwide, mainly due to safety features and mechatronic designs that allow robots to work safely in close proximity to humans. However, there are concerns that humans may be reduced to passive operators or servants of robots rather than the opposite or active participants in a collaborative process. For this reason, a well-defined interaction framework is essential [2, p. 1] [3, p. 214].

This thesis addresses human-robot interaction in the construction industry, focusing on safety, new role definitions, acceptance and productivity. Through a combination of literature review, expert interviews and case studies, the aim is to provide key insights to support the development of safe and productive human-robot interaction on construction sites.

The results of this work are intended not only for academic contribution but also to support construction workers, companies, planners and developers in actively shaping the future of construction through intelligent, cooperative robotics on modern construction sites.

1.1 Background and Motivation

The construction industry faces several challenges that significantly impact its productivity and efficiency. From reducing production to a critical shortage of skilled labor, the problems are manifold and complex. Compared to other industries that have successfully implemented automation and robotics systems, the construction industry is lagging behind. However, the dynamic and often unpredictable environment of construction sites requires special analysis and solutions to achieve the best possible results.

Introducing robots and automated systems into the construction industry offers huge potential to address those challenges. Human-robot interaction (HRI) is at the forefront as it represents the interface between human workers and robotic systems. HRI includes technical integration and the social and organizational adaptations required for successful collaboration.

A key aspect of HRI is safety. Construction work is inherently dangerous, and implementing robots can introduce new risks. Therefore, developing safety protocols and guidelines that protect human workers and robots is essential. At the same time, productivity must be increased to improve site efficiency and reduce costs.

Another important factor is the training of construction workers. Successfully integrating robots into the construction process requires that workers have the necessary skills and knowledge to operate these systems effectively. This includes technical operations, understanding safety precautions, and coordination with human colleagues.

Finally, new roles and responsibilities can be introduced on construction sites and in the construction industry. Traditional workflows need to be rethought and adapted to make the best use of the new technologies. This requires redefining tasks and clear communication between all stakeholders.

This diploma thesis focuses on the topics mentioned above. It aims to identify current challenges and develop recommendations for action to enable the successful integration of robots into the construction industry.

Examining these aspects will develop a comprehensive understanding of how HRI can transform the construction industry and contribute to a more efficient, safe, and productive working environment.

1.2 Research Questions

Every element (e.g., human actors, materials, machinery and equipment, processes and workflows, etc.) on a construction site influences the progress of work, and the interaction between these elements is a key factor in the project's success. Integrating construction robots introduces challenges that need to be explored and analyzed. This applies to the construction process and cycle planning (see [4]).

However, the people who interact with robots are at the heart of this process. This interaction raises many questions. This study focuses on four key aspects of human-robot interaction (HRI):

- **Safety in the context of human-robot-interaction:** safety on construction sites is critical to project success. Introducing robots brings new challenges and potential risks, so analyzing these risks and identifying appropriate safety measures is essential. Key research question:
 - How does human-robot interaction affect the overall safety culture on construction sites?
 - Which methods can ensure safe workflow in the context of human-robot interaction on construction sites?
- **Changes in worker roles and attitudes:** the introduction of robots leads to changes in roles on construction sites like in other industries, requiring new skills and adjustments in work processes. This has direct impact on human-robot collaboration and raises the following key research questions:
 - Which factors influence the acceptance of using robots on construction sites, and how can these be improved?
 - Which new roles emerge from the integration of robots in construction, and how can people be prepared?
- **Productivity in construction processes:** the aspects mentioned before - safety and acceptance - significantly impact productivity. Different metrics can be used to assess this impact. Therefore, the following questions need to be investigated:
 - Which impact does safety, psychological effects, training have on productivity on construction sites where construction robots are deployed?
 - Which relationship exists between productivity, acceptance, and safety?
- **Human-robot interaction on a real construction site:** it is important to reflect theoretical foundations in real practice. Therefore, questions such as the following need to be addressed:
 - How could human-robot interaction look like on an actual construction site in terms of safety, training, and productivity?
 - Which suggestions can be implemented to optimize safety, training, and productivity?

Answering these questions provides the first recommendations for the construction industry. However, further research and practical analysis are needed to assess their effectiveness.

1.3 Research Methodology

This study adopts a mixed methods approach to address the research questions, integrating qualitative and quantitative research methods. This combination allows for comprehensive topic exploration using theoretical insights and empirical data collection. The research methodology consists of literature reviews and expert interviews to gain in-depth insights into the current state of robotics integration in construction, as well as workshops with industry stakeholders, including construction companies (e.g. PORR) and manufacturers (e.g. Doka, Wienerberger), to analyze current problems, challenges, and potential applications and impacts of robotic systems.

Several data collection tools will be used to ensure a broad analysis. A wide literature review examines existing research on construction robotics, safety standards, and human-robot interaction in related industries to gain first-hand insight into the feasibility and practical implications of robotic integration on construction sites.

The research process follows a structured approach, beginning with the study and assembly of theories based on relevant literature to establish a theoretical foundation. From those findings, assumptions and recommendations are formulated, developing hypotheses and proposing action plans for integrating robotics into construction workflows. The recommendations are then hypothetically tested in a real-world scenario by mirroring them on a construction site in Pelhřimov, providing practical insights into the applicability and improvement of the proposed recommendations.

One of the main challenges of this study is the fact that robotics is still in a developing stage in the construction industry. Unlike other industries, robotics has not yet been widely implemented on construction sites [5], resulting in a lack of empirical studies and statistical data on its impact. This limitation requires a combination of theoretical analysis and practical validation to draw meaningful conclusions and actionable insights.

By integrating qualitative and quantitative approaches, this methodology ensures an overall understanding of how human-robot interaction can affect construction workers, productivity and safety, ultimately contributing to the advancement of construction automation.

The methodology includes collaborating with construction robotics experts, such as Mr. Jaromir Sadlon from Green Build (see section 3.2.1) and Mr. Niklas Jobst from the Technical University of Vienna. This collaboration resulted in the development of a new concept titled "Build by Wire" (see section 8.2.2). Additionally, Chapter 7 is the product of a collaboration between the author and Mr. Jobst. These collaborations broaden the scope of the thesis by incorporating diverse perspectives into the analysis.

1.4 Scope of the study

This study focuses on integrating robots into construction site work environments, specifically analyzing the impact of human-robot interaction (HRI) on safety, productivity, and worker roles in construction processes. The research examines how robotic technologies affect on-site safety standards, the adaptation and reaction of construction workers to new technologies, and efficiency.

However, the study does not cover the technical design and development of construction robots in detail or provide an in-depth economic analysis of their cost-effectiveness. Most of the available research and data on HRI comes from industries outside the construction sector. Researchers have recently begun adapting its principles to the construction context by focusing on its challenges like safety, Lack of robustness, and fault tolerance. Currently, there are no comprehensive data sets or concrete numerical analyses specific to using robots on construction sites. This lack of industry-specific empirical data limits the ability to draw definitive conclusions based on real-world case studies.

In addition, human responses to new technologies are inherently individual, and there are no large, recognized surveys that focus specifically on construction workers' perception of robotics. As a result, the study can only provide a general perspective rather than a definitive psychological analysis.

Given these limitations, the findings and conclusions of this thesis should not be interpreted as absolute facts but rather as informed suggestions. The aim is to provide insights that contribute to a better understanding of how to interact with construction robots and integrate them, providing a basis for future research and practical applications in the industry.

1.5 Structure of the Diploma Thesis

To improve clarity and understandability, this thesis adheres to a well-defined structure.

Chapter 2 presents the theoretical foundations. Based on relevant literature, it lays the groundwork for subsequent analyses and discussions.

Chapter 3 complements these theoretical insights with empirical methods. It summarizes and analyzes the results of workshops and expert interviews to establish a practical connection.

Chapters 4 through 6 focus on answering the main research questions. These chapters have a consistent structure. They begin with a comprehensive literature review of the relevant topics. Then, they provide concrete recommendations based on the previously obtained findings in a concluding subsection.

Chapter 7 addresses the final research question and takes a slightly different approach. Each subsection focuses on a specific aspect, such as safety, training, or productivity, and consists of two parts. The first part presents survey or video analysis results, and the second part offers practical suggestions derived from the previous chapters.

A brief summary at the end of each chapter (**2-7**) highlights the key information and results covered in that chapter.

Chapter 8 concludes the thesis. It summarizes the main findings and provides an outlook on potential future research directions and opportunities for further developing the topic.

Chapter 2

Theoretical Foundations of HRI in the Construction Sector

In the Iliad, one of the two major ancient Greek poems, Homer describes creatures with twenty legs, whose purpose was to serve the gods on the Olympus. These Creatures are considered the first humanoid robots in the western literature. In the 18th century, Jacques de Vaucanson (1709-1782) invented, with the consulting of doctors and chirurgion, a mechanical duck with 400 parts. The duck could flap its wings, move its body, and eat grain from a person's hand. In 1819, E.T.A. Hoffmann wrote his work *The Automata*, where he described the first fictional steam-powered mechanical humans. The reputation of the term "Robot" derives from the Czech word "robota", which means "forced work". This is by the author Karel Čapek, who introduced the word in his play in 1921, where robots served humans by taking on difficult tasks [6, pp. 23–26].

These individual works were starting points for the foundation and inspired the idea of integrating robots into our lives. Today, these ideas have become a part of reality and can enter our everyday lives at any moment.

For instance, the Chinese Ministry of Industry and Information Technology MIIT has published regulations for the innovation and development of humanoid robots, with plans to start mass production by 2025 [7].

These developments require us to understand the relationship between humans and robots to guarantee optimal integration and highlight the importance of the field of human-robot interaction.

Human-robot interaction is a dynamic and multidisciplinary field that engages in the collaboration and communication between humans and robots. It defines the goal and principles of collaborative robot (Cobots) systems, where humans and robots work together in specific environments [8, p. 211].

In the construction sector, the human-robot interaction has great potential to improve efficiency, safety, and productivity. However, before diving into the specifics of this field, it is essential to clarify some of the fundamental concepts of HRI. This chapter aims to explain the central definitions and basic concepts of the HRI, as well as the associated challenges and chances within the construction sector.

2.1 Definition of Terms

A clear understanding of relevant definitions helps to establish the foundation of any scientific work. This section explains key terms essential for the HRI in the construction sector. By defining terms related to construction sites and concepts of human-robot interaction, a common understanding can be reached, which is important for the following discussion.

2.1.1 General Terms

General terms are essential to understand robotics and automation. These fundamental concepts are necessary to put the specific aspects of human-robot interaction in the context of the construction industry. Some important definitions include:

- **Robot:** ISO 8373 defines a robot as a “programmed actuated mechanism with a degree of autonomy to perform locomotion, manipulation or positioning” [9, p. 1].

The word "robot" can be defined in various ways due to the diverse applications of robots across different fields. Therefore, robots used on a construction site, could be referred to as construction robots.

- **Automation:** automation can be defined as the integration and use of self-regulating machines or processes, often guided by computer programs, to perform operational tasks (e.g., production or data processing) with minimal or no human intervention. Normally in automated systems there are sensors monitoring the operation and can provide real-time data to a control mechanism, which adjusts or maintains process parameters automatically. This is the difference between mechanization, which typically involves using machines to perform manual tasks and automation [10, p. 7].

These types of machines and processes can be integrated on construction sites to achieve a higher degree of automation on construction sites.

- **Human-Machine Interaction:** like the human-robot interaction, human-machine interaction studies the collaboration between humans and machines. It's very important to understand the technical and human limits in relation to software and hardware, such as an interactive product like a laptop [11, p. 105].
- **Ergonomics:** humans interact with different elements of the work system. Ergonomics focuses on the relationship between the human and these elements. The goal is to achieve the best possible optimization of the system and performance, which serves the human well-being [12, p. 5].

2.1.2 Human-Robot-Interaction Terms

The human-robot interaction introduces its own terms, which describe the common work and communication between humans and robots. Important definitions could be:

- **Human-Robot-Interaction (HRI):** ISO 8373 defines HRI as the “Information and action exchanges between human and robot to perform a task using a user interface. An example could be the exchanges through vocal, visual and tactile means” [9, p. 3].

HRI-activities depend on the degree of the relationship between humans and robots, which range from full automated to activity separation, to continued shared tasks, which leads to actual cooperation. (See Figure 2.1)

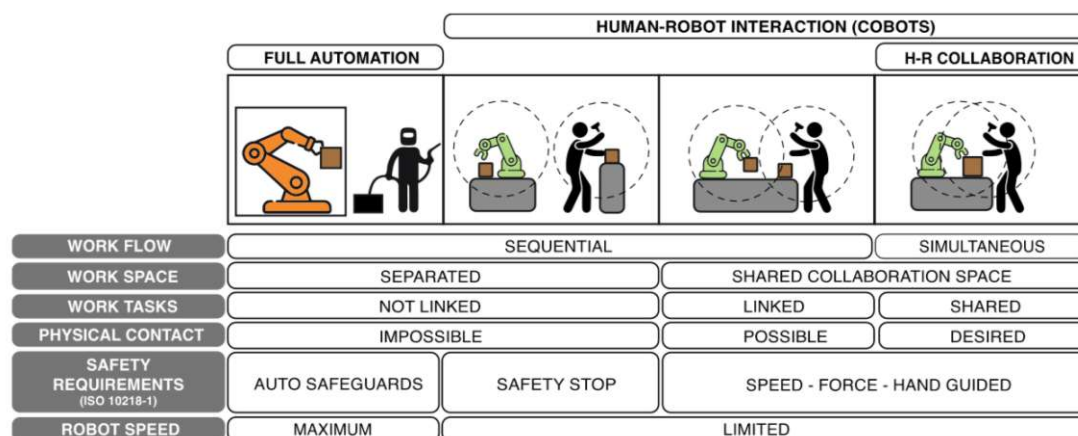


Fig. 2.1: Types of human-robot interaction [8, p. 211]

- Collaborative Robots (Cobots): robots that work side by side with humans in a shared workspace without protective fencing [13, p. 10]. To eliminate safety fences, the robots must have other safety mechanisms.
- Collaborative Workspace: the space in the working area where the robotic system (including the workpiece) and a human can perform tasks at the same time during production [14, p. 2].
- Operator: one of the most important ones is the operator, defined by ISO 8373 as a “person designated to start, monitor, and stop the intended operation” [9, p. 2].
- Cooperation and Collaboration: both words are closely related concepts. Both are built on teamwork between a certain group of parties to achieve pre-defined goals, sharing any risk that may be caused through the process [15, p. 5].
- Autonomy: autonomy refers to the ability of a robot or machine to operate in its own environment without the intervention of an external party such as a human. This allows the autonomous robot or machine to have control over its actions. The level of control is defined as the degree of autonomy [16, p. 76].

2.1.3 Health and Safety Terms

- Protective measure: measure to achieve risk reduction, implemented through:
 - the designer in form of the inherently safe design, safeguarding, complementary protective measures, and information for use.
 - the user by implementing safe working procedures, supervision, use of additional safeguards, use of personal protective equipment, and training.
- Risk: combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm.
- Harm: physical injury or damage to health.
- Hazard: potential source of harm.
- Risk Estimation: defining the likelihood of harm and probability of its occurrence.

- Risk Analysis: a combination of the specification of the limits of the machine, hazard identification and risk estimation.
- Hazard Zone: hazard zone is the danger zone. In case of HRI, this can be within and/or around machinery where a person can be exposed to a hazard. [17, pp. 7–8]
- Protective Separation Distance: shortest allowed distance between any moving dangerous part of the robot system and any human in the collaborative workspace. This value can be fixed or variable [14, p. 2].
- Cybersecurity: protecting individuals, society, organizations, and nations from potential cyber risks, by keeping these risks within an acceptable level. This takes place in the cyberspace - a digital environment including interconnected networks, services, systems, people, processes, and organizations. The risk is, in this case, an effect of uncertainty on these elements [18, pp. 1–2].

In conclusion, this chapter provides an overview of key terms, which can be related to human-robot interaction (HRI), including general definitions, safety-related terms and specific HRI terminology. In addition, other key definitions can be found in relevant standards such as ISO 8373, ISO/TS 15066, or ISO 12100. A comprehensive list of other relevant standards can be found in appendix-A, where terms from various sources have been compiled to ensure a broad and accurate definition of the terminology used.

2.2 Fundamentals of Human-Robot Interaction

2.2.1 Theoretical Models of HRI

Human-Robot Interaction (HRI) is a field of research that studies how humans and robots interact with each other. This section provides an overview of the developments, fundamental forms of interaction, and ergonomic principles required for effective human-robot interaction. HRI needs expertise from diverse fields such as robotics, computer science, psychology, and ergonomics to make sure that robots and automated systems can safely and intuitively assist humans in various tasks.

In addition to a user-centered design and solid technological solutions, a deep understanding of social and cultural contexts is required to achieve high levels of effectiveness in HRI. As the field continues to develop, researchers and industry practitioners are pushing the limits of HRI to balance efficiency, user well-being and acceptance.

Interaction is a case refers to the communication between two entities, whether human or robotic. In the context of HRI, this relationship can take several forms depending on the proximity of the two parties.

According to the Paper “Human-Robot Interaction: A Survey”, HRI can be inspected into two main categories, distinguished by factors such as mobility, physical manipulation, and social interaction:

- Remote Interaction: in this model, as the name suggests, the two parties of the communication are not co-located. The human typically supervises a mobile robot in a scenario, which is often referred to as teleoperation. When the interaction involves a physical manipulator, it is defined as telemanipulation. [19, pp. 204–205]

Robots operating in this mode are not fully automated and rely on the commands from the operator. However, they can sense their environment - usually a challenging one, such as space or deep-sea-locations, and report back to the human. These robots are called tele-robots, and they could be used in assembly lines or packaging. This relationship can be characterized as a master-slave dynamic [20, p. 10].

- Proximate Interaction: conversely, when humans and robots are not spatially separated, the interaction is classified as proximate. This type of interaction involves physical contact, and the relationship takes on the character of robot assistance. Proximate interaction is broader and includes social, emotional, and cognitive aspects. In this scenario, humans and robots work closely together in the same environment, like companions, sharing the same task [19, pp. 204–205].

Robots are considered, in this case, more than just tools. They are partners in achieving a common goal [20, p. 10].

- Hybrid Interaction: with the advancements in the technology and evolving work requirements, a third type of interaction has emerged, which can be described as hybrid interaction. This model is a fusion between the first and second types of interaction. In this model, the operator and the robot are sharing the same physical environment, yet the operator controls the robot remotely using a device such as a tablet. The operator plays a supervisory role, but the interaction is more collaborative, with the robot acting as a partner in completing specific tasks. "hybrid interaction" is a novel concept proposed in this thesis to describe this emerging model in the context of HRI.

2.2.2 Cognitive Science Foundations

Cognitive science is important for understanding human-robot interaction (HRI), which can consist of two fundamental components: action and reaction. In the context of human-robot interaction, this dynamic begins with an action initiated by the human, which the robot perceives and responds to, leading to a subsequent from the human. This loop of action and interaction continues until the task is completed.

Human Perception and Interaction:

Humans interact with their environment by their senses – primarily sight, hearing, and touch. These senses are helpful in establishing communication with robots and enabling effective integration between humans and machines.

- **Sight:** sight is the most used sense in the human-machine interaction, regardless of the type of the machine, whether computer tablet or robot. Humans can recognize visual stimulus through sight, such as text and graphics. The Human eye processes visual information based on several factors, such as color (e.g., RGB color space), movement, and shapes. Design Laws for the sense of sight are:
 - Law of proximity
 - Law of similarity
 - Law of closeness
 - Law of simplicity
 - Law of good continuation
 - Law of connectedness
- **Hearing:** hearing is the second most used sense in HRI. Its role is more limited compared to sight. This sense is critical for capturing sounds issued by machines, which is particularly important in the case of social robots or for addressing safety concerns related to auditory warnings.
- **Touch:** touch is essential for understanding the information given by the physical world around us. Touch is especially important in proximate and hybrid interactions with robots. Through touch, humans can sense factors such as temperature and pressure, which are crucial for direct interaction with robots. [11, pp. 13–25]

Robot Perception and Interaction:

On the side of robots, interacting with humans is facilitated by various sensors that receive and process multiple types of signals, such as visual and audio signals, and tactile inputs, as well as laser reading. The sensors allow robots to perceive human actions and respond accordingly. This interaction occurs normally according to the following processes:

- **Signal reception:** sensors are built in robots and enable them to capture diverse signals depending on the human action. For example, visual signals might be processed by cameras, while auditory signals could be captured by microphones.
- **Signal processing and Feature Extraction:** once signals are received, the processing step starts, where key features extraction will take place. According to the processed data, an appropriate task for the robot to perform will be determined.

- Task execution: this phase comes after the processing. The robot executes the given task through an intermedia layer to indicate the transmission of the data back to the human. This interaction loop continues until the objective is fulfilled. [21, pp. 85–86]

In summary, cognitive science provides us with the fundamental information to understand the loop of action and reaction between human and robots, where both human senses and robotic sensors are playing critical roles in effective communication and task completion.

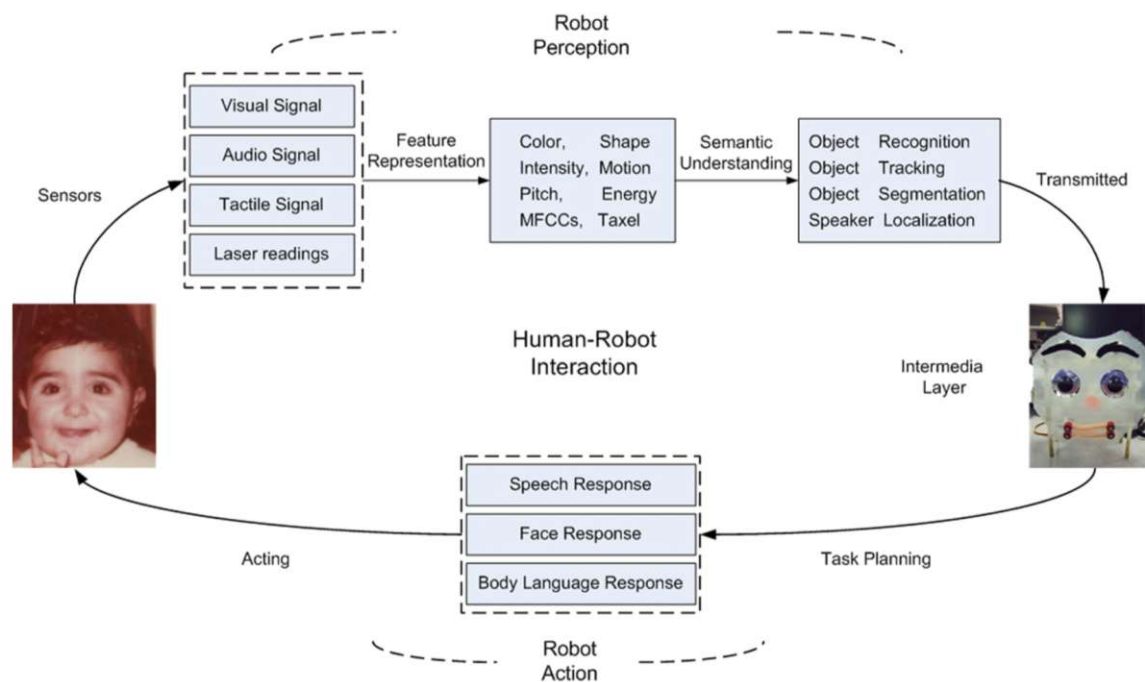


Fig. 2.2: Human-robot interaction [21, p. 86]

2.2.3 Communication Methods between Humans and Robots

Human-robot interaction (HRI) includes different types of communication, which are critical to the effectiveness and acceptance of robots in different environments, including construction sites. This section examines three primary methods of communication:

Spatial Interaction and Proxemics: space plays a significant role in human relationships and interactions, which is why understanding spatial dynamics is essential in HRI. Proxemics studies how humans perceive the room in the relation to others, and how can that impact our behaviors. This could play a role by affecting safety aspects and the acceptance of robots.

For example, studies have shown that the distance and orientation of drones, that move with joggers, can have an impact on the user's experience. When drones fly behind joggers, it will decrease enjoyment. The reason is that the joggers had the feeling, that they have had been chased from the drone. The other way around, when drones are flying in front, the runner will have a more positive feeling. This demonstrates that the spatial relationship between humans and robots can influence human emotions and reactions.

Our judgments are also affected by the spatial dynamics. For instance, in a crowded bus, it is not strange for someone to sit beside us, but if the bus is nearly empty, sitting too close may be considered as impolite. This example highlights the importance of space in human interactions and the need for robots to respect these spatial boundaries to avoid negative impacts on human comfort and acceptance.

As shown in (Fig. 2.3), humans categorize the space around them into four zones based on the proximity of the other subject: intimate space (0 - 0.5m), personal space (0.5 - 1.2m), social space (1.2 - 3.7m), and the public space (beyond 3.7m). Each Zone is specified for certain type of groups and shared information.

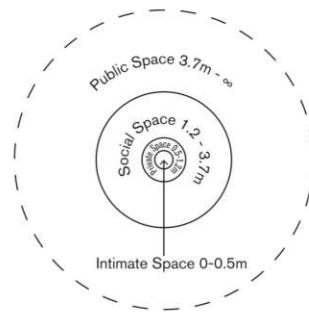


Fig. 2.3: Personal space [3, p. 83]

Spatial dynamics in groups can become even more complex because they react to the space differently. The form configurations of Groups can indicate, if the group is willing to invite new members or not.

These formations create distinct spaces such as the “o-space” (inner space), the “p-space” (occupied space), and the “r-space” (surroundings).

These formations can have a lot of different configurations, as we see in the following figure. Understanding these spatial dynamics is crucial for robots, especially social and collaborative robots, as they share space with humans (see Fig. 2.4).

The robot’s mobility, shape, and size of the robot will determine the appropriate spatial interaction to ensure positive human-robot relationships. Otherwise, the robots’ spatial input will be perceived as disrespectful and will have a negative impact on humans and their acceptance. [3, pp. 82–86]

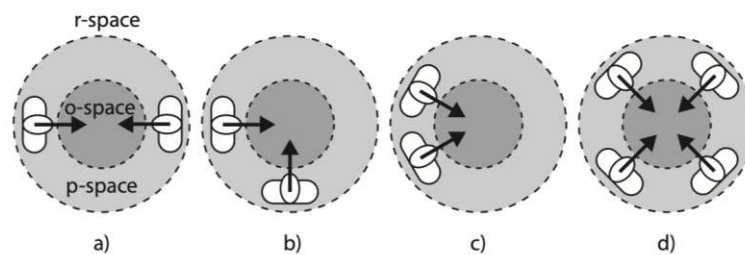


Fig. 2.4: Group formations [3, p. 85]

On Construction sites, these spatial considerations are crucial to ensure that robot-human interactions adhere to safety standards and promote a positive working environment. For example, specific zones could be designated for robots to recognize when a human is approaching and to adjust their operation to a safety mode. This should also be considered from the logistics and design side of the construction project.

Verbal Communication: verbal communication is another essential method of communication between humans and robots. Speech and words are the components of this interaction, and can deliver and share information with low effort, which makes this communication the easiest and highly efficient. Verbal communication capabilities for robots are essential for closing the gap between human expectations and robotic responses. Robot designers must ensure that robots can both produce and understand speech to guarantee smooth and effective communication. [3, pp. 112–113]

Non-Verbal Communication: non-verbal communication depends on our Gestures, gaze, and facial expressions. It completes the verbal communication by emphasizing the meanings and expressing emotions. This type of interaction is crucial for ensuring that the full intent of the message is understood in face-to-face communication.

In HRI, non-verbal communication can indicate whether the person likes the interaction with the robot or not. This helps to guide the actions of the robot. In the social context the non-verbal communication is a key to successful human-robot interactions.

Robots typically use the standard pattern recognition through cameras and sensors, combined with software and machine learning, to understand the human non-verbal cues. [3, pp. 95–97]

While verbal and non-verbal communication may be less critical on construction sites—where an operator often communicates with other workers—they could be more important if future construction robots become more humanoid and fully automated. In such cases, including verbal and non-verbal communication capabilities into the programming of robots would be essential, as construction work often involves working in groups.

2.2.4 Ergonomics and Usability

In the work environment, people interact with various elements, which has a noticeable impact on productivity. Understanding these relationships is essential for designing environments and tools that maximize human performance and well-being.

This approach is represented in the principles of ergonomics, a scientific discipline that focuses on designing work and living environments by analyzing the interactions between people and the elements of a system.

In the workplace, these elements vary from one field to another and include tasks, equipment, services, environmental factors, and their interrelationships. The common goal of ergonomics is to enhance human well-being while optimizing system performance. To achieve this goal, a thorough understanding of both human capabilities and system components, including their strengths and weaknesses, is required.

By applying this knowledge to the design of processes and products, we can enhance positive aspects, push negative factors back, and create technology that can adapt to human needs. The result is efficient, error-free operations that ensure comfort, ease of use and health protection. Ergonomics can be divided into two types:

- Micro-ergonomics (production ergonomics): focuses on surrounding conditions and broader perspectives to improve the work environment.
- Macro-ergonomics (product ergonomics): deals with specific details and decisions related to the design and functionality of individual products. [22, pp. 13–17]

Both types of ergonomics are based on the fundamental principle of understanding human-system interactions, which is particularly important in the context of human-robot interaction, in which humans have unique capabilities such as freedom of movement, detection of errors, sensory perception, learning and adaptability to complex objects and tasks. Critical thinking of humans can also bring innovation, process optimization, and the flexibility to take on different roles. However, humans are restrained by mental and physical limitations that can lead to uneven productivity, mainly when performing monotonous tasks.

In contrast, robots are good at repetitive tasks while maintaining high accuracy and precision. They can handle heavy and dangerous objects in difficult conditions and work continuously without fatigue. However, robots lack the degree of mobility and flexibility that humans possess. In addition, the use of robots requires high set-up costs, extensive planning, and compliance with safety certifications. By understanding these attributes, we can strategically assign tasks to humans or robots based on their strengths and weaknesses to improve productivity, sustainability, and usability. [23, pp. 40–41]

Achieving productivity goals without compromising future generations is a definition of sustainability, which requires balancing economic, social, and environmental factors. This means providing affordable solutions, promoting socially acceptable applications, and minimizing environmental impact to gain public acceptance & trust.

Usability: defined by DIN EN ISO 9241-11, it refers to the effective, efficient, and satisfying use of a specific product in a specific environment by a specific user to achieve specified goals [24, p. 9].

In the context of HRI in construction, robots (products) are used on construction sites (environments) by operators (users) to perform specified tasks such as bricklaying (goal).



Fig. 2.5: Pyramid of usability [22, p. 8]

Understanding the strengths and weaknesses of humans and robots requires active research involving expert interviews, workshops, and collaborative knowledge sharing. Ergonomics must also consider ethical, cultural, legal, and governance aspects.

Ignoring ergonomics can lead to mistrust of systems, negative social impacts, and reduced safety and productivity. Therefore, human-centered design must be prioritized in task and product development. Human-system interaction research should involve users to identify practical improvements. Simulations and functional prototypes are essential for empirical system comparisons.

Finally, field and laboratory evaluations with user participation allow for iterative improvements, focusing on visual, auditory, and haptic perceptions to ensure optimal solutions (see sections 2.2.2 and 2.2.3). [23, pp. 164–166]

By integrating these principles into construction workflows, ergonomic systems can improve the acceptance of robots entering construction sites, enhancing productivity and worker well-being.



Fig. 2.6: User-centred system design [25, p. 69]

2.3 Applications of Robots in Construction

Robots in the construction industry are constantly increasing over time, offering numerous opportunities for automation and optimization of efficiency. An indication of this trend is presented by the growing size of the robotics market, which is expected to be followed by a rising number of deployed robots in construction, as illustrated in the following figure [26]:

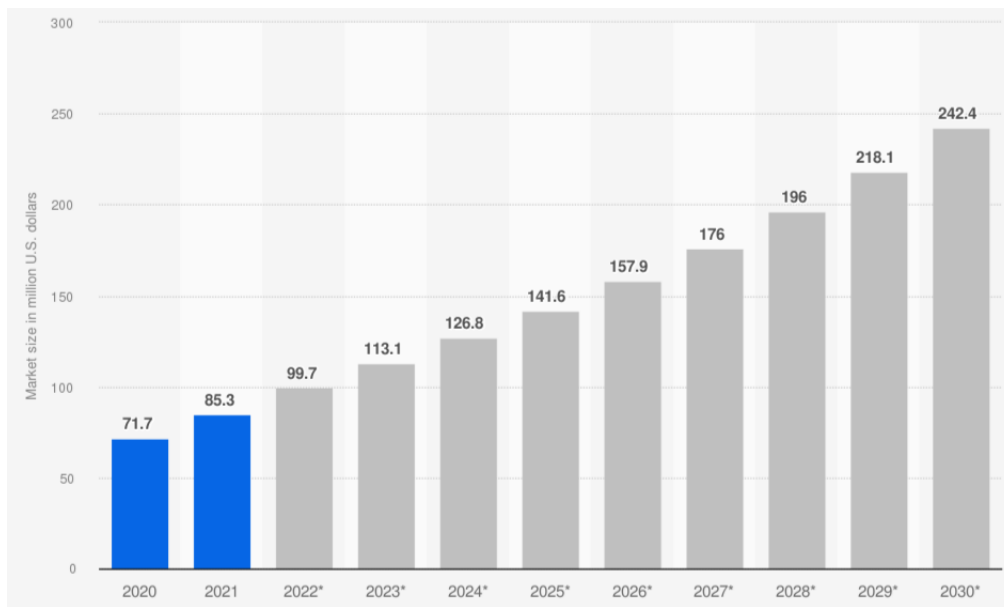


Fig. 2.7: Construction robot market [26]

Three critical factors in construction should be considered and balanced: quality, time and costs. These three elements are referred to as the “magical triangle.” Typically, improving one factor can lead to degrade one or the two other factors. For instance, increasing quality might result in higher costs and longer durations (for more on this topic see 6.6).

However, digitization and robotics in construction are promising to enhance all three aspects at the same time. Robots are therefore being applied in a lot of areas with the aim of reducing labor-intensive tasks, improving quality and increasing overall efficiency. [27, p. 70]

Robots are being used in a wide range of construction activities. The following table presents an overview of various use cases and test of robots in different sectors of the construction industry:

Sector	Robot	Usage	Source
Timber Construction	CNC machines	Automated production of wood frame constructions.	[28, pp. 396–403]
	KUKA Robot Type KR500 FORTEC	Precise glue and mill of wooden cassettes and pallets.	[29]
	Timber Construction Robot	Production of wooden structures.	[30]

Sector	Robot	Usage	Source
Steel Construction	WAAM technology for steel structures	3D printing of steel structures, like the steel pedestrian bridge in Amsterdam.	[28, pp. 396–403]
	TyBot	Tying of steel reinforcement on construction sites.	[31]
	Japanese WR mobile robots	Welding various types of steel columns and beams.	[32, pp. 4–9]
Mass Construction	CONPrint3D process	3D printing concrete walls on-site.	[28, pp. 396–403]
	HADRIAN X	Automated wall construction.	[33]
	WLTR from Wienerberger	Automating the bricklaying process.	[34]
Interior Finishing	Hilti Jaibot	Partial automation of ceiling drilling tasks.	[35]
	Floor Tile Paving Robot R-19	Laying large-format floor tiles.	[36]
	The Canvas robots: CANVAS 1200CX, CANVAS 1550	Drywall finishing process.	[37]
	SurfRobo	Automatic floor finishing by compacting concrete floors.	[32, pp. 4–9]
Other Applications	Drones	Inspection of bridges and infrastructure.	[28, pp. 396–403]
	SMAT System	Automating the entire construction process of high-rise buildings.	[32, pp. 4–9]
	Dokaxbot	Formwork Robot, slab forming at heights of up to 5.2 meters.	[38]
	Boston Dynamics Spot (four-footed robot)	Monitoring and inspection for outdoor and indoor use.	[39]
	HP SitePrint	Autonomous construction site layout.	[40]
	In Situ Fabricator Shindler R.I.S.E	Creating reinforcement cages. Automated preparatory work for elevator construction	[41] [42]

Tab. 2.2: Overview of robot applications across different construction sectors

These robotic applications demonstrate the potential development of the construction process and handle the challenges of the magical triangle by automating complex tasks, ensuring consistent quality, and reducing the time and costs associated with traditional construction methods.

2.4 Challenges of HRI on Construction Sites

The integration of robots into construction sites brings numerous challenges and opportunities. This section highlights key issues, including safety concerns, worker acceptance, the potential to increase efficiency, and technological obstacles, that must be overcome.

Compared to other industries, adopting on construction sites is holding back. This fact has to do with the dynamic and unpredictable nature of construction sites, where each project presents individual challenges. Unlike controlled labor environments in the industrial sector, construction occurs outdoors, where weather conditions -often difficult to predict- play a significant role in daily operations. Additionally, other effects, like using large machines, can cause vibrations that may complicate the work of robots on site.

These unexpected influences can disturb the robotic functionality by disturbing the sensors, compromising quality, or even safety risks, especially in the context of collaborative robots (Cobots). [8, p. 214]

The challenges associated with implementing robots on construction sites vary across different literature sources. This work refers to the literature **“Barrieren und Treiber von Robotik im Bauwesen”** by „Jan-Iwo Jäkel and Katharina Klemm-Albert”, which identifies 52 barriers to integrating robots into construction sites.

The table below presents these challenges, derived from international and national literature analysis. The authors reviewed nine articles and categorized 52 barriers into five distinct groups:

Cluster	Description of Barriers	Source
I. Introduction and Application	Difficulties in applying in complex structures	(Struková and Liška 2012)
	Limited resources of the companies	(Stewart et al. 2004)
	Lack of interoperability between organizational units and general fragmentation of the construction industry	(Stewart et al. 2004)
	Flexible integration into the overall process	(Oke et al. 2017)
	Adaptation of existing procurement methods	(Mistri and Rathod 2015)
	Risk and uncertainty in the transformation process	(Mistri and Rathod 2015)
II. Skeptical Attitude	Concerns of the workers	(Akinradewo et al. 2018)
	Additional rejection of new technologies	(Struková and Liška 2012; Mistri and Rathod 2015)
	Lack of acceptance by employees	(Stewart et al. 2004)

Cluster	Description of Barriers	Source
	Concern for safety Resistance to changes Attitude of management and team members Emotional stress caused by the replacement of people with robots Lack of interest from planners	(Stewart et al. 2004) (Stewart et al. 2004) (Trujillo and Holt 2020) (Oke et al. 2017) (Mistri and Rathod 2015)
III. High Costs	High acquisition and implementation costs High follow-up costs for the maintenance and operation of robots High investment costs for the company Automation of the value chain and interfaces associated with high costs Rejection of public funding Insufficient economic efficiency and associated profitability of introducing a robot to achieve actual cost savings	(Mistri and Rathod 2015) (Struková and Liška 2012; Mistri and Rathod 2015) (Oke et al. 2017) (Mistri and Rathod 2015) (Davila Delgado et al. 2019) (Davila Delgado et al. 2019)
IV. Lack of Knowledge	Adaptation to new process structures Low level of competence in the use of technologies Access to technological knowledge Limited experience in automation Limited practical experience of on-site workers (operational execution) Lack of knowledge among planners about construction methods with the use of robot systems	(Akinradewo et al. 2018) (Stewart et al. 2004) (Trujillo and Holt 2020) (Mistri and Rathod 2015) (Mistri and Rathod 2015) (Mistri and Rathod 2015)
V. Lack of Standardization	Lack of standardized building elements Mostly no standardized processes Lack of references for the design Rapid change and alterations due to high technological advancement	(Mistri and Rathod 2015) (Mistri and Rathod 2015) (Mistri and Rathod 2015) (Mistri and Rathod 2015)

Cluster	Description of Barriers	Source
	New and altered project roles	(Mistri and Rathod 2015)
	Difficulty in procuring robots	(Mahbub 2015)

Tab. 2.4: Barriers in human-robot interaction in construction

This wide analysis shows that the successful implementation of robotics in the construction industry must overcome numerous social, financial, technological, and operational barriers to reach the full potential of robotics in the dynamic nature of construction sites.

2.5 Summary of Theoretical Foundations in HRI

The idea of using robots is deeply rooted in human history, with references as early as Homer's Iliad. Despite this ancient origin, the practical implementation of robots in our lives has experienced a noticeable increase in recent years. This growth underlines the importance of understanding the relationship between humans and robots, which begins with foundational definitions.

The chapter first introduces general terminology, including "robot," "automation," and "human-machine interaction." It then follows more specific definitions related to Human-Robot Interaction (HRI) such as "collaboration" and "collaborative space." Finally, it concludes this section with essential Health and safety (HS) concepts like "hazard" and "risk."

Afterwards, the chapter discusses the theoretical basics of human-robot interaction by categorizing the types of interaction:

- **Remote interaction**, resembling a master-slave model.
- **Proximate interaction**, where robots are treated as cooperative partners.
- **Hybrid interaction** is a suggested concept introduced in this thesis, which combines aspects of remote and proximate interaction.

Understanding human perception and interaction is crucial in HRI. Humans primarily rely on sight, hearing, and touch to perceive their environment. On the other hand, robot perception follows a process: signal reception, signal processing, and task execution.

This helps to build a strong communication ground between humans and robots. The chapter explores spatial interaction and proxemics, highlighting how humans interpret spatial behavior and how these changes across cultures and social groups. It also differentiates between verbal and non-verbal communication and their roles in achieving effective interaction.

A key focus is on ergonomics, with its two types: micro- and macro-ergonomics. The principle is to design systems that use humans' and robots' strengths and avoid their limitations. For example, robots are good at repetitive tasks and don't suffer physical tiredness, while humans offer creativity and flexibility in movement. Therefore, human-centered design is essential to productive collaboration.

To put the growth in robot implementation within construction in context, the chapter also presents various real-world applications of construction robotics. It concludes with a detailed list of challenges for integrating robotics in construction. These include:

- Complex introduction and implementation processes,
- skeptical attitudes toward robotic systems,
- high initial costs,
- lack of knowledge and training,
- absence of standardization.

Together, these insights set the stage for understanding the fundamentals of integrating robotic systems into the construction sector.

Chapter 3

Empirical Research

Due to the lack of practical case studies and real-world examples in the context of human-robot interaction, this thesis uses an empirical research approach to address this gap and gain a deeper understanding of the actual challenges and potentials with the deployment of robots on construction sites to complement the literature review with practice-oriented insights.

The methodological framework consists of a combination of series of workshops and expert interviews with professionals from various sectors, mainly from the construction industry. The workshops took place in 2024 and served to reflect on key questions through collaborative discussion and generate new impulses for the further development of technological and organizational interfaces between humans and robots in construction processes.

In addition, seven expert interviews were conducted. The selected interviews come from different companies, research institutions, and technical backgrounds. This diversity in professional experience and expertise ensures a well-rounded analysis and significantly enhances the validity of the findings

3.1 Workshops

3.1.1 Pioneer Project: Construction Automation

This series of workshops focused on Promoting automation and robots in the construction process, emphasizing the need to integrate all stakeholders into an appropriate cooperative framework. The goal was to find answers on how an efficient integration of construction Robots should be and how we can achieve it. The workshop concept is illustrated in Figure 3.2. The author was actively involved in preparing the workshops, their protocols, and the discussion and will present their content in the following section.



Fig. 3.1: Digital Findet Stadt logo [43]

The workshop series, which consisted of six sessions spread throughout the year, formed the basis of the Construction Automation Pioneer Project. The first session served as an initial event, bringing participants together to establish connections, show areas of interest, start discussion, and define the project's goals. Participants brought diverse expertise in construction robotics, design, digitization, and construction execution.

The **first** workshop focused on refining the collective vision for integrating robotic technologies into the construction industry. Participants engaged in in-depth discussions on key thematic areas to align their goals and set a strategic direction.

The **second** workshop showcased the latest construction robotics and automation innovations, focusing on DOKA's advances. This session emphasized the potential of automation to improve construction site productivity, safety and efficiency.

The **third** workshop focused on the practical implementation of robotics in construction. Discussions covered site preparation, workflow optimization and refining processes to ensure seamless integration.

The **fourth** workshop, hosted at TU-Arsenal, provided a hands-on demonstration of Wienerberger's bricklaying robot (WLTR). This session aimed to address practical issues related to the robot's use and the challenges associated with its use on construction sites.

The **fifth** workshop summarized the key findings of the previous sessions. It explored practical strategies for implementing robotics in construction, focusing on the conditions necessary for successful integration. Discussions underlined the importance of a balanced approach that increases both automation and human expertise while addressing the challenges and opportunities of integrating robotics into construction workflows.

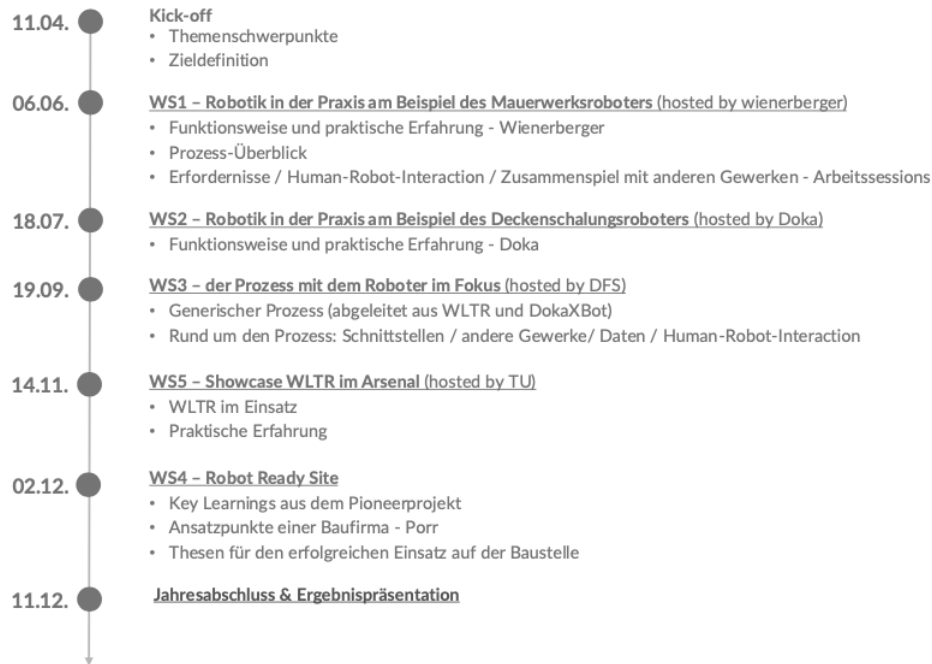


Fig. 3.2: Concept of the workshops

3.1.2 Brief Description of the Sessions

Aims of the Pioneer Project [44]:

Based on the discussions, main areas of focus were identified:

- Improving the efficiency of construction processes: identifying processes that can be optimized through robotics.
- Potential applications for robots: defining ideal conditions for using robots.
- Integrated approach: strengthening the link between planning and execution, optimizing data flow and managing interfaces.
- Perspectives from construction companies: identifying practical approaches to integrating robotics into workflows.
- Theses for successful deployment: suggest strategies to ensure the effective use of robotics on site.

The kick-off workshop participants laid the foundation for further work and development in construction automation, with a clear focus on efficiency, standardization and collaboration.

Key Issues and Results [44]:

- **Robotics integration in construction practice:** large construction projects can benefit significantly from integrating robotics, particularly for repetitive tasks such as surveying and cleaning. The success of these implementations depends on a combination of skilled in-house personnel, close collaboration with project partners and comprehensive project planning. Ensuring that workers are well-trained in robotic operations is essential for smooth integration.

Case studies and application examples demonstrate how robotics can improve workflows and address site-specific challenges in fabrication and construction. These insights contribute to developing "robot-ready projects", where processes are optimized to maximize efficiency and minimize constraints. Although the uniqueness of construction projects makes complete standardization difficult, modular and standardized sub-processes can be implemented to improve consistency.

A key factor in achieving seamless integration is coordinating small, modular processes that help create synergies across different project phases. In addition, test sites provide a controlled, low-risk environment to test new technologies without straining project budgets. Creating synergies between multiple testbeds can further maximize resource efficiency and accelerate innovation in construction robotics.

- **Automated processes:** the analysis of feasible automation processes focused on improving efficiency and enhancing human-robot interaction (HRI) interfaces. A key finding was that automation should start with small but essential processes, as these provide immediate benefits and serve as building blocks for wider implementation. In addition, the integration of digital tools such as SiteLIFE can improve both the operator and worker experience by improving data management and streamlining site workflows.
- **Planning processes and automation:** discussions focused on integrating robotic design, lean principles and Building Information Modelling (BIM) into the design process while ensuring seamless interaction between these elements. The primary objective is to achieve flexible site adaptation and efficient workflows. Several key themes were explored in the workshops:
 - Decentralized production: increasing flexibility by producing key materials, such as bricks, closer to the site. This approach reduces logistical complexity and supports the development of specialized building materials suitable for automated processes.
 - Robot-ready products: standardizing components and adapting them for use with robots improves scalability and flexibility. Examples include DokaXdek products designed to facilitate automated construction processes. Another example is Wienerberger's robot-ready blocks, which are designed for WLTR to make the process more precise and easier to execute. Starting with one type of block, Wienerberger now offers six different robot-ready blocks with varying geometries and applications.
 - Digitization: ensuring smooth data flow and consistent interfaces is critical for effective robotic operations. High-quality data preparation is essential, as poor or incomplete data can cause significant disruption.

- Combined automation: parallel robotic processes can increase efficiency. For example, a bricklaying robot can prepare the surface for the first row of bricks. In contrast, a drilling robot simultaneously creates the necessary holes, optimizing the workflow and reducing wasted time.
 - Logistics and maintenance: proper planning for logistics, cleaning and maintenance is critical, mainly when multiple types of robots are used on site. Proactive preparation minimizes downtime and ensures uninterrupted operations.
 - Efficiency through planning:
 - * Accurate calculations of work volume per area and optimal team sizes are critical for smooth execution.
 - * Robotics should increase the work rate of construction crews to maximize efficiency.
 - * Acceleration of critical path activities is essential to maintain overall project schedules.
 - **Health and safety improvements:** integrating robots into the construction process reduces the need for manual labor, thereby eliminating certain safety risks and protective measures. For example, a drilling robot capable of completing up to 600 holes daily replaces approximately 45 hours of manual labor per worker, reducing the need for fall protection and saving time and money.
- However, ensuring the safety of robotic operations remains a priority. Operators must adhere to safety standards, and working with safety experts is essential to ensure compliance and seamless operations. To further enhance safety and prevent system downtime, clearly defined separation zones between humans and robots should be established. Restricting human access to robot-operated areas minimizes risks and ensures uninterrupted operations.
- **Definitions and standards:** establishing a common understanding of key terms is essential to standardize workflows and ensure consistency across projects. To achieve this, a centralized table of definitions will serve as a reference point. This table will be regularly updated to reflect industry advances and integrate insights from multiple sources for a well-rounded perspective. An Excel document has been created to collect and refine relevant definitions over time (see appendix A).
 - **Collaboration:** early collaboration with project partners fosters innovation and improves overall efficiency. Involving stakeholders from the outset enables better integration of robotic solutions, smoother workflows and optimized construction processes.
 - **Site adaptation:** proper site preparation is essential for the successful use of robots on construction sites. This includes ensuring clear pathways, stable surfaces and efficient logistics to accommodate multiple robots. To facilitate this process, checklists can be used to verify site readiness and maintain an effective workflow. Discussions also highlighted several challenges and considerations, including:
 - Ensuring accurate coordinates for precise robotic operations.
 - Advancing sensor technologies to improve navigation and obstacle detection.
 - Addressing regional differences and specific project requirements.
 - Bridging the gap between BIM design and BIM execution to ensure consistency between digital and physical workflows.

- **Workforce Competence:** to maximize the benefits of robotics in the construction industry, workforce competence must be developed through appropriate training and skills development. Key aspects include:
 - Operator training: skilled operators are critical for managing and troubleshooting robotic systems. Structured training programs ensure they can operate robots efficiently and solve problems as they arise.
 - Robots as a Service (RaaS): providing robots as a service - along with trained operators - reduces barriers to adoption by eliminating the need for companies to invest in extensive training and infrastructure.
 - Skilled labor: beyond operators, general workers should have basic technical skills to support robotic workflows and collaborate with automated systems effectively.
- **Evaluation and feedback loops:** continuous monitoring and feedback mechanisms are critical to optimize robotic workflows in construction. Data collected from robots - such as those used by Wienerberger - can be integrated into digital tools such as SiteLIFE to improve process tracking and efficiency. Direct communication between developers and front-line staff is key in improving robotic applications. This facilitates real-time adjustments and allows for better customization of robotic systems. Without close collaboration, honest and constructive feedback is often delayed or only shared at industry events such as trade shows. Challenges for monitoring tools:
 - The use of video and cameras for surveillance is often restricted by legislation, particularly in countries such as Germany.
 - Despite these restrictions, such technologies play a crucial role in ensuring security and should be implemented within clear legal and ethical guidelines to maximize their benefits.
- **Goals of robotics:** the primary goal of robotics in construction is not necessarily to reduce overall project duration but to increase efficiency and productivity throughout the project lifecycle. Key objectives include:
 - Addressing labor shortages on large projects by automating repetitive and labor-intensive tasks.
 - Providing long-term workforce support to ensure that construction projects remain feasible as skilled labor becomes increasingly rare.
- **Acceptance on construction sites:** the conservative mindset on construction sites often leads to skepticism when it comes to adopting new technologies. Clear communication of automation solutions and their benefits is essential to facilitate acceptance. Several successful approaches have been identified:
 - Get the introduction right: demonstrating tangible benefits through presentations, showcases, and innovation centers (e.g., experience centers) helps stakeholders understand and trust new technologies.
 - Leadership influence: courageous site managers and foremen act as key influencers during the implementation phase, acting as multipliers for cultural change and encouraging wider adoption.

- Targeted training: providing intensive support to selected teams and using them as ambassadors across multiple sites accelerates adoption. A collaborative approach that pairs young digital natives with experienced professionals optimizes resource utilization and promotes mutual learning.
- **Rapid implementation of research results:** to commercialize robotics, the rapid translation of research into real-world applications is crucial. Participants emphasized that gradual integration, rather than disruptive reconditioning, is the most effective approach for construction sites.
 - Small steps first: introducing assistance systems and semi-automation before full robotic deployment allows workers to adapt gradually.
 - Showcase projects: demonstrating real-life use cases helps to visualize the potential of robotics, fostering greater acceptance & trust for further implementation.

These findings highlight that the acceptance of automation and robotics on construction sites depends heavily on practical integration, targeted communication strategies, and active support from senior management. Long-term success depends on the ability to adapt the technologies to the needs of the construction environment and to clearly communicate their added value.

3.1.3 Presented Robots and Automated Systems

As part of the workshops, Wienerberger and Doka presented their innovative robotic systems to give participants a clear vision of the future role of robots in the construction industry. In addition to demonstrating the technical capabilities, discussions focused on the potential for increased efficiency, improved workplace safety and process optimization.

WLTR - The bricklaying robot: WLTR was developed through a partnership between Wienerberger and TU Prague. The focus was on commercial use and rapid deployment on construction sites. WLTR has been operating as a company for two years, offering new services such as "bricklaying as a service".

WLTR's deployment planning is based on end-to-end integration, with all data pre-loaded before deployment, requiring only on-site supervision. Standardized 'Robot Ready Blocks' have been developed specifically to the needs of the robot. These blocks improve efficiency and reduce the potential for errors during construction. Challenges included regional differences in standards and regulations and the time required to develop and adapt blocks for specific projects. According to the Wienerberger representative, a key solution was flexible production capacity to avoid delays.

The robot weighs **2.4 t** and reaches **4 m** horizontally and **3.2 m** vertically. It can perform tasks such as building brick walls, moving horizontally and collecting and monitoring live data. It requires preparation before it can be used. For example:

- Levelling the ground
- Placing the first layer of bricks
- Positioning the robot and pallet of bricks
- Locating the start and end points of the wall, as well as openings such as windows and doors. Laser pointers and sensors ensure precision in brick positioning.

WLTR is currently only operated by personnel trained and certified by Wienerberger. The training takes approximately 5 days and includes technical training and an introduction to the specific requirements of the robot application. Operators work independently and are not directly employed by Wienerberger, allowing flexibility. The operators play a key role in quality assurance, especially when placing the first layer of bricks and adapting to unexpected challenges on site. In the medium term, the goal is establishing operators as supervisors who can monitor multiple robots simultaneously rather than actively managing each process step.



Fig. 3.3: WLTR ¹

DokaXdek: The DokaXdek is not just a robot but an innovative solution for future slab formwork. Based on customer feedback, Xdek is a hybrid system after full automation proved impractical. It combines the following components:

- Xdek: 12m² table formwork (500-600kg) offering flexibility and scalability.
- Smaller elements: 30kg panels for adaptable use.
- I-Frame panels: lightweight and ergonomic components for easy handling.
- DokaXbot: the robot.

DokaXbot has a height range of **2.7-5.7 meters** and meets all safety standards. It reduces the need for manual labor, especially for overhead tasks, by assisting workers with lifting and positioning.

¹Fig 3.3: <https://www.green.build/de>

The first formwork element is positioned manually; DokaXbot then aligns subsequent elements autonomously using sensors. In the future, the robot will have advanced sensors on its head to recognize different formwork systems automatically.

Doka's staffing strategy is based on a mix of freelancers and in-house trained personnel, ensuring flexibility and expertise. The company also offers structured training programs and clear career paths for skilled operators.



Fig. 3.4: DokaXbot ²

²Fig. 3.4: https://www.doka.com/web/media/files/newsroom/D0A_22_Doka_Xpress_1_2022_CEU_221115ca_web.pdf

3.2 Expert Interviews

Additional expert interviews were conducted to broaden the sources for this thesis. As the existing literature focuses primarily on the general use of robots and does not specifically address their use in the construction industry or on construction sites, these interviews were essential to gain practical insights and expert opinions on the subject.

The interviews were conducted both face-to-face and online. The questions asked can be divided into two groups:

- General questions: these were asked of all the experts and covered the key themes of the thesis, including health and safety, training and acceptance, and productivity.
- Specific questions: these were specified to each expert's knowledge and experience.

The following subsections describe the interviews and the expert's responses.

3.2.1 Description of Expert Interview 1 – Jaromir Sadlon

The interview with Mr. Sadlon provided a deep insight into his background, experience with robotics and thoughts on its role in construction. Mr. Sadlon started his career in the automotive industry after studying IT. His career path led him to LEGO, where he quickly rose from Quality Manager to Corporate Director. He worked on major sustainability projects during his work, including a roadmap to make the company CO2-neutral. Although his expertise was not directly in robotics development, he often managed teams and operations that used robotic systems, particularly in automated warehouses.

At LEGO, Mr. Sadlon oversaw a large, fully automated high-bay warehouse equipped with pick-and-place robots. These robots navigated set paths to retrieve and store products, and his primary responsibility was to ensure operational efficiency and reliability. His role focused on optimizing existing equipment and determining whether automation or manual labor was more effective for specific tasks. Mr. Sadlon is now working as a managing director at GreenBuild alongside WLTR the bricklaying robot from Wienerberger.



Fig. 3.5: GreenBuild logo ³

When discussing the risks associated with robots in construction, Mr. Sadlon identified two main concerns: the physical risks that robots pose to workers and the unpredictable behavior of people around robots. He noted that workers who are not trained to operate robots often become fascinated by them, leading to distractions and potential safety hazards. This behavior is particularly evident on construction sites, where even experienced workers may unintentionally ignore safety precautions.

³Fig. 3.5: <https://www.green.build/de>

Mr. Sadlon emphasized that the problem is not necessarily with the robot operators, who are gradually getting used to working alongside automation. Instead, the problem lies with other on-site workers who may shortly ignore safety protocols when encountering a robot. He emphasized that traditional warning signs may not be enough and that more immediate barriers - such as loud alarms or flashing lights - may be needed to ensure safety.

In terms of training, Mr. Sadlon described the approach his company is taking. They are finalizing a comprehensive robot manual, like an equipment manual, with additional appendices detailing workflow and safety procedures. Their training method follows the **"train the trainer"** model, where an operator, after being trained, takes on trainer role and must explain the robot's functions to someone else. This hands-on approach ensures that operators fully understand how the robot works and can confidently train others.

Mr. Sadlon also referred to the Total Productive Maintenance (TPM) system, which is crucial to ensuring the reliability of robotic systems. Operators are expected to continually look for ways to improve operations and perform autonomous maintenance tasks such as cleaning and adjusting components. The robot maintenance team has a structured hierarchy, with the 'most skilled operator', known as the robot centre manager, managing the overall maintenance schedule.

When discussing the skills required for robot operators, Mr. Sadlon highlighted the importance of previous experience in construction works such as masonry or bricklaying. Robots learn by observing human workers, so the more skilled the operator, the better the robot can be trained. This reflects trends in humanoid robot development, where real human demonstrations are increasingly favored over software-based simulations.

Mr. Sadlon himself has been trained to operate robots and believes understanding the technology is essential to effectively promoting it. He also touched on the concept of the 'magic triangle' - cost, quality and time - suggesting that while robots cannot eliminate the trade-offs between these factors, they can significantly reduce their impact. Automation compresses the limitations of the magical triangle by increasing production speed, improving consistency and optimizing costs. However, he noted that while robotized products are currently perceived as high quality, this perception may shift in the future, with handcrafted work regaining value.

When asked about the potential of robotics in construction, Mr. Sadlon emphasized that automation tends to bring improvements rather than revolutionary changes. While robots excel at repetitive tasks such as bricklaying or welding, they are less effective in adaptive and creative roles. He believes that robots will be valuable assistants in site management and coordination, providing data and monitoring progress, but humans will still make the final decision.

Mr. Sadlon also discussed the role of perception in the acceptance of automation. Clients or end users may resist automation if they value human craftsmanship over robotic precision. However, educating stakeholders about the benefits of robotics - such as improved safety, efficiency and consistency - can help drive adoption. Companies should position robots as tools that enhance human capabilities rather than replacements for workers. This approach is important in construction, where the unpredictable nature of sites makes full automation a challenge.

Looking to the future, Mr. Sadlon sees modular construction as a promising way to integrate robotics into industry. Standardized modules, such as prefabricated bathrooms or walls, allow customization without sacrificing mass production efficiency.

By extending this concept, the construction industry could achieve greater automation while maintaining flexibility.

Over the next decade, Mr. Sadlon foresees significant advances in autonomous robotics. Thanks to advanced AI and real-time data, robots will become better at navigating construction sites independently. Prefabrication will also see more robotic involvement, and safety features will be a priority, with robots designed to work safely alongside humans. Ultimately, the path to successful robotic integration in construction lies in collaboration, innovation, and a balance between human and robotic contributions. For the complete Interview with Mr. Sadlon, see appendix B.1

3.2.2 Description of Expert Interview 2 – Meysam Taghavi

Mr. Taghavi began his academic journey with a bachelor's degree in mechanical engineering and started working in industrial production automation. He later completed his Master's in Automation and Robotics and gained his first experience in packaging automation. His entry into construction robotics came through a project involving cable robots for specialized applications in the construction industry. He went on to work on other projects, including bricklaying robots focused on construction automation at Wienerberger.



Fig. 3.6: Wienerberger logo ⁴

Although his career was not originally focused on robotics, his path gradually led him there. During his mechanical engineering studies, the focus was more on production and manufacturing processes. His interest in robotics developed through working with automation systems such as PLC controls and CNC machines, eventually leading to his specialization in construction robotics.

Regarding safety risks in the construction industry, Mr. Taghavi believes that one of the biggest challenges is that, unlike factories, construction sites do not provide a controlled environment. While safety zones in industrial environments are defined with fences and barriers, this structure is often lacking on construction sites, increasing the risk of accidents. Therefore, safety measures such as flexible barriers, clear instructions and training are essential. The biggest challenge, however, is getting workers always to follow these measures. Risks are often underestimated, or safety mechanisms are ignored on purpose, leading to dangerous situations.

In addition to direct collisions between humans and robots, there are also indirect risks. For example, an automated crane or robot transporting heavy materials could malfunction and create a hazardous situation. Another risk relates to potential technical failures, such as electrical faults, which could lead to fires or other hazards. Worker behavior also plays a role, as oversight or overconfidence in technology can lead to accidents.

⁴Fig. 3.6: <https://www.hagebau.at/beratung-wienerberger-dachziegel-an-der-fassade/>

According to Mr. Taghavi, two main groups of workers can particularly face accidents: inexperienced workers who misjudge the behavior and movement patterns of robots and highly experienced workers who become overconfident due to years of practice. A strong safety culture is needed to mitigate these risks, supported by regular training and continuous repetition.

When developing safety concepts for construction robots, there are several approaches: first, inherent safety through the robot's design; second, additional safety measures such as sensors and warning systems; and third, worker training to raise awareness. Mr. Taghavi emphasizes that, ideally, safety should be built into the robot system as much as possible. Virtual safety barriers, emergency stop systems and sensors can significantly reduce risks.

However, not all hazards can be eliminated by design alone, so additional measures are needed. He compares with elevator technology: although warning signs indicate maximum load limits, systems are designed with an extreme safety margin to prevent accidents.

Cybersecurity is another issue that could become important in construction robotics. However, Mr. Taghavi sees a lower immediate risk in this area, as many construction robots are not connected to external networks. While industrial robots in highly automated factories could be potential targets for cyber-attacks, the reason for attacking construction robots is relatively low. Nevertheless, cybersecurity should be considered in future developments.

In terms of training for construction workers, Mr. Taghavi identifies several necessary elements: first, basic technical knowledge about how robots work and their limitations; second, awareness of potential risks, which can be illustrated with real-world data and examples; and third, specialized safety training explicitly focused on accident prevention. He believes that combining theoretical instruction and practical exercises is the most effective learning method.

Mr. Taghavi likes the idea of certification for workers handling robots. A standardized training program could ensure that workers are familiar with basic safety guidelines and best practices. He suggests a model consisting of a general training course for all construction robots and specific modules for different types of robots.

In terms of maintenance, Mr. Taghavi believes that operators and specialized technicians should carry it out. While operators can execute simple tasks such as sensor cleaning and software updates, experts should deal with more complex issues.

Regarding the economic feasibility of construction robots, Mr. Taghavi emphasizes that successful integration requires careful planning. While automation can improve quality, reduce material waste, and lower costs in the long run, factors such as high initial investment, training, and maintenance costs must also be considered. Currently, the main barriers to the overall adoption of construction robots are their high cost, ability to adapt to dynamic site conditions, and workers' hesitance to embrace new technology.

Digitization of construction processes is a key factor in the successful use of robots. Robots cannot be efficiently integrated into construction projects without digital workflows such as BIM and structured project management systems. Mr. Taghavi emphasizes that digitization is a condition for effectively using construction robots.

Mr. Taghavi highlights standardization as the most important measure to accelerate robotics integration. At present, companies are developing individual solutions without uniform guidelines or regulations. Standardized processes, safety regulations and training programs could make it easier for companies to adopt robotics and increase acceptance within the industry.

Finally, Mr. Taghavi sees that robots will likely have a mix of human supervision and autonomous decision-making in the next five to ten years. While robots will increasingly be able to make independent decisions based on artificial intelligence, human supervision will remain crucial - especially in the construction industry, where safety and precision are important. Fully autonomous robots without any human influence are hard to imagine. However, as technology advances, the balance will gradually shift towards greater automation, allowing robots to take on more tasks with less human intervention.

For the complete Interview with Mr. Taghavi, see appendix **B.2**

3.2.3 Description of Expert Interview 3 – Wolfgang Hochreiter

Mr. Hochreiter, an expert in drive technology and automation in construction at Doka, has been working on innovative solutions for formwork systems and shoring for 18 years. During this time, he has implemented numerous projects, particularly in self-climbing systems and infrastructure projects. In recent years, Doka has increasingly focused on traditional concrete construction methods, such as the DokaXdek systems. Despite his expertise in automation and mechanization, he has had little direct experience with construction robots. However, Doka is heavily involved in semi- and fully automated construction processes, particularly in formwork systems.



Fig. 3.7: Doka logo ⁵

When asked about practical experience with construction robots, Mr. Hochreiter cites several examples that are becoming increasingly important. Among the best-known are the Baubot from Fischer and the Jaibot from Hilti, or the automation in elevator construction, for example, in pre-assembly, which is another example of advanced technologies entering the construction site. Mr. Hochreiter emphasizes that automation in construction is still in its early phases. Much of the current development is in industry, and its fully automated manufacturing processes are not yet fully transferable to construction.

Mr. Hochreiter cites acceptance as one of the biggest challenges regarding the risks of direct human-robot collaboration on construction sites. Construction is a very conservative industry where manual labor is deeply rooted.

⁵Fig. 3.7: https://de.wikipedia.org/wiki/Doka_GmbH

Many workers are used to manual work and are likely to be sceptical about automation. Another risk is coordination between different trades, as automation is often developed for individual trades without considering interfaces. In addition, there are still few standardized solutions, such as the combination of formwork and reinforcement.

Acceptance of robots on construction sites is not just a question of technology but also communication. Construction workers cannot be convinced by economic arguments alone. Mr. Hochreiter emphasizes that the emotional perspective is crucial.

Workers need to see the benefits of robots regarding ergonomics and safety. A robot could take over dangerous tasks and help construction workers do their jobs more safely and efficiently. Acceptance is higher if the robot is seen as an assistant rather than a replacement. An example from China, where a competition was held between robots to see which was faster, showed that such approaches create fear among construction workers and undermine acceptance. Instead, the focus should be on improving working conditions and safety.

As construction projects become more complex and customized, existing solutions quickly reach their limits. Nevertheless, Mr. Hochreiter sees automation as an opportunity to improve safety on construction sites. Quality assurance could also be improved through automation, as automated systems can accurately document when and how a task has been performed, reducing errors and improving quality.

Another topic Mr. Hochreiter addressed was the integration of robots into work processes and the training required. In terms of new occupations that could be created through construction robots, he believes there will be a shift in the business model. New jobs will emerge instead of just operating machines that focus on servicing robots. This could include operating, manufacturing or installing components. In his vision, there will be specialization, with construction workers being trained as "robot operators", like the model of a construction machine operator. Mr. Hochreiter is confident that this trend will develop as automation on construction sites matures and construction companies begin to offer training programs for their employees.

The conversation touches on several other key points regarding the integration of robotics in construction and the global landscape of construction automation:

- **The Quality, Cost and Time Triangle:** Mr. Hochreiter believes that while robotics can improve efficiency, the fundamental balance between these three factors will always exist, although it may shift positively with advances in automation.
- **Robots in large and small projects:** Mr. Hochreiter explains that robots are most beneficial for large projects where repetition is common, cost savings are most achievable, and productivity gains are highest. Over time, as automation technology improves, the use of robots could be scaled down to smaller projects.
- **Global differences in robotics development:** when asked about the global race in construction robotics, Mr. Hochreiter provides insights into how countries approach the technology. While China is a leader in patenting automation technology, its actual application on construction sites may still lag behind Europe by several decades. In contrast, the US focuses on profit-driven innovation, emphasizing improving specific aspects of the process rather than systemic improvements.

- **A step-by-step approach to development:** Mr. Hochreiter underlines the importance of a step-by-step approach to developing automation and robotics in construction. He argues that skipping steps could lead to more risks than benefits and emphasizes the need for careful consideration and analysis of each step to build a solid foundation for semi and full automation in the future.
- **AI and worker concerns:** the conversation turns to the role of AI in construction, particularly its integration with robotics. Mr. Hochreiter gives an example of how AI could improve safety, such as an assistance system in an excavator that detects whether a person or robot is near based on arm movements. He acknowledges that AI can be both a blessing and a curse but ultimately sees it as a significant opportunity in construction.
- **Addressing workers' fears:** when asked what else should be discussed, Mr. Hochreiter suggests that workers' fears about automation and robotics should be taken seriously. They advocate clear, simple communication to address these concerns and make complex issues more understandable. By presenting complex issues in an easier-to-understand way, fears will be reduced, and the problem will seem less overwhelming.

Overall, the conversation highlights the need for a careful and methodical approach to integrating robotics and AI into construction while also considering the emotional and ergonomic impact on workers. Mr. Hochreiter is optimistic about the potential of these technologies but also emphasizes the importance of managing fears through clear and accessible communication.

For the complete Interview with Mr. Hochreiter, see appendix **B.3**

3.2.4 Description of Expert Interview 4 – Kevin Nikolai

Mr. Nikolai, an expert with almost 15 years of experience in mechanical engineering and robotics, particularly in the field of six- and five-axis robots for arc welding technology, has specialized in applications such as part feeding, part removal and assembly. After working for various companies, including Pilz and IBF, he has been head of training at Pilz since 2020, where he is responsible for developing certified training programs in machine safety and occupational safety. He also teaches at technical colleges and has recently developed a robotic cell for woodworking that automates monotonous and physically demanding tasks while prioritizing safety.



Fig. 3.8: Pilz GmbH logo ⁶

In the interview, Mr. Nikolai highlights the risks of using robots in unstructured environments such as construction sites. Unlike structured environments such as factories, construction sites have no fixed safety mechanisms, and there is a risk of untrained personnel entering a robot's danger zone. This is particularly problematic for robots that mostly rely on cameras, lidar or radar systems to sense their environment. Whether robots can safely and reliably detect people in such environments is central.

⁶Fig. 3.8: <https://www.pilz.com/de-AT>

Mr. Nikolai sees similar challenges in farming, where autonomous robots apply plant protection products, and there is a risk of untrained personnel or passers-by entering the danger zone.

Mr. Nikolai distinguishes between risks posed by the machine itself and those posed by human behavior. In Austria, employers are obliged to provide safe work equipment.

He emphasizes that keeping with standards and regulations is important when dealing with robots in unstructured environments such as construction sites. The European Union's secondary legislation consists of directives and regulations and provides the legal basis. Regulations have the highest authority and are binding on member states. An example is the machinery directive, which is still in force but will be replaced by the new machinery regulation on 20 January 2027. In Austria, the machinery directive has been transposed into national law as the machinery safety regulation 2010.

It requires that machinery meet the basic safety and health requirements in Annex 1 of the above-mentioned directive. Employers are required to provide safe work equipment, with robots being considered as program-controlled equipment. New equipment must fulfill the minimum requirements of the local legislation, so primarily the employer must ensure that this equipment are CE-certified. However, the CE mark alone is not sufficient; the employer must also check the functionality of the safety devices, especially if the machine is to be used on a construction site. The manufacturer must specify how these safety devices should be tested in the manual.

Another important aspect is confidence in sensors, especially on construction sites. Mr. Nikolai points to the ISO 13849 standard, which deals with the functional safety of control systems. This standard requires robots to be able to detect people and start a safety stop if necessary. The reliability of sensors, controllers and actuators is determined by the so-called Performance Level (PL), which is calculated based on the probability of failure per hour (PFH). A low PFH means a low probability of failure, but there is always an element of uncertainty.

In unstructured environments, environmental factors such as dust or rain can affect sensors, potentially delaying the triggering of safety functions. This is particularly problematic when robots operate in limited spaces, where the safety zone is also limited, and the robot's efficiency can be compromised. Mr. Nikolai mentions that manufacturers such as ABB offer solutions such as the Safe-Move function, which allows virtual safety zones to be defined around the robot.

These safety zones can also be applied to the robot's tool to restrict specific movements. Mechanical axis limits on some robot types are an alternative but can reduce the robot's flexibility in adapting to new environments. Software-based safety zones offer more flexibility but are less dynamic than mechanical solutions. External controls can trigger the switch of different pre-defined safety zones as required, which presents an additional challenge in developing safety-concepts, since a failure in triggering can lead to a corruption of workers safety, such as having moving areas of robots, where it's not allowed to move.

Mr. Nikolai explains his company's modular training approach, which includes both theoretical and practical elements over five days. The first day focuses on the basics of legislation, such as the Europeans secondary law, standards and harmonized standards, and the differences between essential and non-essential modifications to robotic systems. The second day is dedicated to risk assessment, with participants identifying risks and developing solutions in workshops. Hazardous groups such as mechanical, electrical and ergonomic risks will be addressed.

The results are presented in group work, focusing on creating a safety-concept with the aim to improve safety during the work with machinery, while ensuring user-friendliness.

The training is aimed primarily at mechanical engineers, electrical designers and commissioning engineers, and occasionally at project managers and executives such as CEOs and CTOs to raise safety awareness throughout the organization.

From 2027, machines connected to networks must be protected against cyber-attacks, requiring specialized courses to explain the differences between old and new safety requirements.

Mr. Nikolai emphasizes that cybersecurity is also relevant on construction sites, where manipulation can occur not only externally but also locally via USB or ETH ports. To ensure the integrity of safety mechanisms, the functional safety of machines must be protected against such manipulation. A risk assessment is essential to identify specific hazards and potential damage possibilities.

As for introducing robots on construction sites, Mr. Nikolai sees new roles emerging, particularly for skilled workers who can be freed from monotonous tasks by robots to focus on more creative and challenging activities. Robots are not meant to replace human labor, but to complement it. This can lead to greater acceptance as employees realize that the use of robots ensures the future viability of the company and even opens up new career opportunities, such as training to become a robot programmer.

Training plays a key role in building confidence in the technology and allaying fears. Believing the trainer and explaining the 'why' behind the use of robots are crucial to increasing acceptance. Mr. Nikolai emphasizes the importance of making it clear to employees that robots will secure their jobs and provide new opportunities for self-realization.

Mr. Nikolai points out that accepting robots and new technologies is often more difficult among older workers, especially when younger colleagues take the lead. This is not necessarily due to a lack of innovation but because change can be more challenging for experienced workers. However, there are also older colleagues who are very open to new developments, so acceptance depends mainly on individual attitudes.

In terms of training, Mr. Nikolai highlights that formal education, like college or academic degrees are not a requirement for participation. More important is an interest in the subject, communication skills, and a will to get involved. A basic understanding of technical language is important to communicating the content and making the training effective. The aim is to meet participants where they are and to motivate them through practical methods such as workshops and group work.

Robots can potentially improve the three aspects of the magical triangle - time, cost and quality. Mr. Nikolai explains that automation can increase production speed and quality, as seen in manufacturing mobile phones or watches. However, the cost of adapting robots to unstructured environments and programming and maintenance is often high. In addition, the safety of autonomous systems, especially when using AI, is a concern. The possibility of robots behaving unpredictably poses risks and could further increase costs.

Safety measures can reduce productivity in the short term, as machines stop when people approach. In the long term, however, robots can increase productivity by taking over monotonous or physically demanding tasks, allowing humans to focus on more complex and creative activities.

This leads to higher overall productivity and better employee well-being. Mr. Nikolai emphasizes that productivity is not limited to the company's output but also includes employees' personal lives and health.

Mr. Nikolai highlights that training and well-designed safety procedures can narrow the gap between safety and productivity. Safety measures should not be so strict that they unnecessarily restrict work, as this can lead to manipulation or disregard. An example is hearing protection, which, if well designed, for example by incorporating wireless communication, does not reduce productivity. The aim is to design safety measures that protect people without hindering their efficiency.

Regarding risk perception and error avoidance, Mr. Nikolai points to the selective perception of the human brain, which cannot process all information and may, therefore, overlook relevant risks. To avoid this, his company uses the four-eyes principle, where two experts review a risk analysis from different perspectives. This reduces the likelihood of overlooking important risks.

When it comes to productivity and safety with robots, Mr. Nikolai still sees cost as a key factor. He believes that applications need to be cost-effective to be useful and that it is better to bring a product to market at 85-90% maturity than to wait for perfection. This allows early market entry and helps to keep costs low.

Mr. Nikolai believes that integrating automation and robotics into education is crucial for promoting a deeper understanding and acceptance of these technologies. He feels that Europe is following behind Asian countries like China, Taiwan, and Japan, mainly because of strict regulations that suppress innovation. These limitations hinder progress and drive talented individuals to search for opportunities in more welcoming environments. He warns that if Europe doesn't establish a centre of excellence in robotics and automation, it risks falling behind.

Mr. Nikolai expects significant growth in robotics in the next five to ten years while more nations and businesses recognize its advantages and support policy changes. This growth will be particularly noticeable in places like India and China, where rising capital and shifting demographics promote the demand for automation. In Europe, the will for such transformations seems limited. One promising area for growth is service robotics, especially for simple, repetitive tasks that are becoming increasingly challenging for human workers.

To stay competitive on the global stage, Mr. Nikolai believes Europe must reduce bureaucratic obstacles and embrace new technologies. Without improvement, many intelligent individuals may choose to leave Europe, putting it at risk of lagging behind in technological advancement.

For the complete Interview with Mr. Nikolai, see appendix **B.4**

3.2.5 Description of Expert Interview 5 – Herbert Meister

In this interview, Mr. Meister, an experienced civil engineer with more than 27 years of professional experience at PORR and Pde, shares his insights into the use of robotics in construction. Although he has no direct practical experience with robots on construction sites, he is familiar with the subject from lectures at the TU-Graz and the TU-Vienna.

Mr. Meister points out that robotics is already widely used in other industries, such as manufacturing, for example, in the production of formwork by companies such as Doka. There, robots perform repetitive tasks such as welding steel beams, while humans focus on quality assurance and logistics.



Fig. 3.9: Pde logo ⁷

However, Mr. Meister sees a challenge in construction, where the uniqueness and dynamic nature of construction projects make standardization difficult. This makes the use of robots more challenging than in industrial manufacturing.

Regarding the risks of human-robot interaction on construction sites, Mr. Meister distinguishes between direct and indirect interaction. Robots could be more easily integrated into interior construction where the environment is more controlled. However, on a building site with constantly changing conditions, such as open edges or temporary access points, the question is how robots can be programmed to ensure their own safety and the safety of the workers. Mr. Meister points to potential hazards, such as unexpected robot movements that could lead to accidents.

The discussion on safety standards shows that standards such as ISO 10218 for industrial robots cannot be directly applied to construction sites. Mr. Meister emphasizes that construction sites are dynamic environments with constantly changing safety zones. A specific standard for construction robots is needed to ensure the safety of both people and machines. He also highlights the legal challenges, such as harm issues in accidents caused by robots. Mr. Meister sees safety as a combination of technological advances and human behavior.

Robots should be equipped with sensors that allow them to perceive their environment better than humans so that they can detect potential hazards early on. At the same time, he stresses the importance of workers' acceptance of robots. Like the domestication of animals, acceptance could increase as workers learn to handle and control robots. One example would be a robot that reduces speed when a human approaches, allowing for efficient collaboration.

⁷Fig. 3.9: <https://karriere.porr.at/pde>

The introduction of robotics in construction could lead to the emergence of new professions, such as a "robot coordinator". This person would ensure the cooperation and compatibility of different robots on the site. Another key issue is the adaptation of site logistics, as robots can work more efficiently and handle more materials than humans. This will require a redesign of material supply and distribution. In addition, planners must consider how robots work and their speed and compatibility with material properties such as concrete curing. This could lead to fundamental changes in design and construction, with robots becoming an essential part of site set-up.

It is important to reduce fears to increase the acceptance of robots, especially among sceptical individuals. This could be achieved by designing robots to improve safety and health. There are also concerns about job losses, as robots can be more productive and make fewer errors.

Mr. Meister points out that any technological change brings both advantages and disadvantages, and that acceptance depends on people's values and emotions.

The question of what happens to employees who do not want to adapt or evolve is central. Companies must decide how to deal with existing employees when robots are introduced. Mr. Meister emphasizes that automation brings change, often causing uncertainty or fear. However, it is also the responsibility of everyone to prepare for change and acquire new skills. At the same time, there are limits: humans cannot function like machines, and extreme pressure can lead to burnout or mental illness. Therefore, a sensible division of labor and specialization is essential to combine the strengths of humans and machines.

Mr. Meister mentions the historical evolution of the labor market, which is constantly changing, and emphasizes that humans are adaptable. Society must find ways to motivate people and use their potential. Ultimately, the responsibility lies with individuals, businesses, and society. Technology in itself is neither good nor bad - what matters is how it is used and what goals it serves, whether it is increased profitability, improved performance or complementing the existing workforce.

Mr. Meister emphasizes that while training programs for using robots on construction sites are important, clear rules and guidelines are even more important. These should detail how the robots work, what safety clearances need to be maintained and under what conditions they can operate optimally. This includes tolerances, precision requirements and specific operating conditions. Such clear guidelines, for example, in operating manuals, would make it easier for planners and coordinators to manage robot use efficiently and minimize risks.

Regarding productivity and the "magical triangle" of time, cost and quality, Mr. Meister does not see it as a strict rule but as a challenge that can be addressed through process optimization and digitalization. He explains that inefficient processes and waste often drive the competition between these factors. Lean approaches and standardization can improve all three at the same time, as has been seen in industrial development. Mr. Meister points to examples such as the circular economy, which combines high quality with low cost and efficiency. He highlights that the magical triangle can be reshaped through creative solutions and system optimization, redefining the relationship between quality, cost and time.

In terms of site checklists, Mr. Meister stresses the need to plan the use of robots in detail. Each robot has specific requirements for safety, movement and integration into the construction process.

Before checklists can be drawn up, it must be clear what tasks the robot will perform, how it will move and what interfaces with other systems are required. Mr. Meister cites examples such as Wienerberger's bricklaying robot or Hilti's drilling robot, each with different safety and process requirements.

Mr. Meister also focused on the idea that integrating robots into construction planning and execution can only be successful if all parties involved have a thorough understanding of the robots' functions and limitations. This includes safety considerations, such as the need for fall protection or stabilization of robots in dynamic environments. Collaboration between research and practice is also essential. He criticizes that universities and faculties often work in isolation, with too little interaction. Greater collaboration between researchers and companies could speed up and make the introduction of robotics in the construction industry more effective.

The full potential of robots on construction sites can only be realized through clear communication, common standards, and a deep understanding of the technology.

In the interview, Mr. Meister expresses curiosity and openness about integrating robots in construction but does not have a concrete vision of what this might look like. He emphasizes that he wants to learn more about existing technologies and future developments, particularly their applicability to large construction projects. He believes integrating robots could significantly advance research and open up new opportunities.

Looking at the construction industry's future over the next 5 to 10 years, Mr. Meister predicts that finding skilled workers will become more challenging. Issues such as environmental protection, CO₂ reduction and the sustainable use of resources will come to the front. Mr. Meister expects political and tax-related adjustments to compensate for pollution, with these changes being implemented over the long term, possibly more than five years.

When it comes to robotics, in particular, Mr. Meister sees a significant change coming to the construction industry, although the exact speed is difficult to predict. He emphasizes that policy will play a crucial role in recognizing and promoting the potential of robots. However, the question remains whether robots can provide solutions to current challenges or whether they will create new problems, such as increased energy consumption. In renovation and refurbishment, where manual skills remain essential, Mr. Meister sees potential for robots, but only if manufacturers develop them specifically for this purpose.

Finally, Mr. Meister points out that introducing robotics in the construction industry is not a minor improvement but a complete system transformation. This will require the cooperation of many stakeholders, including designers, contractors, authorities, and legislators. Mr. Meister compares this development to historical innovations such as the invention of the car or electric lighting, which also brought significant changes. He supports the idea that universities around the world should work together to further research and develop robotics' potential.

For the complete Interview with Mr. Meister, see appendix **B.5**

3.2.6 Description of Expert Interview 6 – Patrik Zips

The interview with Mr. Zips covered key aspects of robotics and automation in construction and industrial applications. Mr. Zips leads a robotics research group at the Austrian Institute of Technology (AIT) and has extensive experience developing control systems for large machines. What fascinates him most about robotics is its ability to simplify work processes and make dangerous or physically demanding tasks safer.



Fig. 3.10: AIT logo ⁸

A key topic of the discussion was what makes a machine a robot. According to Mr. Zips, the difference lies in autonomy and flexibility. A conventional machine only becomes a robot when it can make independent decisions and adapt to changing conditions. While industrial robots are already well established in well-defined environments such as automotive manufacturing, outdoor automation is more challenging due to dynamic environmental conditions. For example, logistics autonomous systems can work effectively if the environment is controlled and structured. However, when unexpected events occur - such as a hanging plastic sheet - they cannot often respond flexibly.

The example of tiling was given, a task that requires high precision and adaptability. Mr. Zips explains that handling materials such as tile cement is particularly problematic because it is not solid but semi-liquid. In addition, precise measurements for spacing are required, which is difficult to achieve with current robotic systems. Therefore, full automation of the tiling process seems challenging, but sub-processes, such as laying standardized tile patterns, could be robotically assisted.

Another critical topic of the discussion was safety in human-robot interaction. While health risks from machines remain, responsibility shifts with autonomous systems. The question of harm - whether the manufacturer, operator or programmer is responsible in the event of harm - remains unresolved. Safety measures such as the physical separation of robots from humans or the use of safety operators are used to minimize risks.

However, as automation increases, new safety standards and legislation will be developed. Overall, the interview highlighted that automation in the construction industry is promising, but significant challenges remain, particularly in manual tasks, changing environmental conditions and safety issues. Future developments need to focus on improving the flexibility and perception of robots while creating a clear legal framework for their use.

The interview also touched on the challenges and open questions regarding the safety of robots on construction sites. A key issue is that simple warning signals, such as lights or loud alarms, are insufficient to meet legal requirements. There are currently few cases in construction robotics, so the legal situation is unclear.

⁸Fig. 3.10: <https://www.ait.ac.at/en/about-the-ait/brand-identity>

Similar safety mechanisms exist in logistics, such as safety curtains for forklift trucks, but they are expensive.

In addition, weather conditions such as rain or fog pose a challenge to sensor reliability. Although weatherproof sensors are available, they are significantly more costly. Object recognition also has fundamental difficulties: Robots currently cannot reliably distinguish between people and other objects, leading to unnecessary safety stops or potential hazards. Misclassification can lead to accidents.

The acceptance of robots on construction sites also plays a crucial role. Workers are often sceptical about automation, mainly because of fears of job loss or concerns about oversight. A practical example from logistics shows that automated forklifts were initially met with mistrust. This also raises the issue of harm in accidents involving robots. Uncertainty about who will be responsible in the event of an accident discourages companies from using robots on construction sites. The fear of legal consequences, including personal harm, is a significant barrier.

Mr. Zips mentioned that automation in construction will continue to grow in importance, particularly regarding worker skills and site efficiency. A key issue is the shift in skills required: While simple manual labor will remain, skilled workers will increasingly be assisted by intelligent machines. A key idea in this context is the concept of **"one-to-many"** operations, where one operator remotely controls multiple machines. This requires new skills, such as switching between camera systems and control concepts and essential calibration and troubleshooting skills.

As robotization progresses, new job roles will emerge, particularly in machine monitoring and maintenance. One example is the need for robotic engineers on-site or in central control rooms to interfere when machines encounter problems. Studies show that manual intervention is still required despite advanced automation, particularly for collision avoidance and troubleshooting.

Another key issue is productivity in terms of time, cost and quality. While automation can optimize these factors, they cannot be completely disconnected. There are always trade-offs: Higher quality can lead to longer process times, while increased speed increases the likelihood of errors.

Mr. Zips foresees two major trends emerging in the future of construction site automation: The integration of supporting systems such as exoskeletons and just-in-time supply chains. Second, machines have increased flexibility in dealing with unforeseen situations. The shift towards sustainable construction processes, such as optimized recycling strategies, will also be crucial. While construction sites are unlikely to change significantly in the next three years, a transformation is expected within five to ten years, with machines primarily replacing dangerous and monotonous tasks.

For the complete Interview with Mr. Zips, see appendix **B.6**

3.2.7 Description of Expert Interview 7 – Karina Schiefer

Ms. Schiefer has been head of innovation management at PORR for four years and studied civil engineering at the Technical University of Vienna. Her academic focus was on construction operations and site installation, mainly in tunnel construction.

Her dissertation dealt with digitalization in cyclical tunnelling, and the systems she developed are still in use at PORR today, including in the Brenner Base Tunnel. After working in the Digital Unit, she became head of the Innovation Sector and built up a team operating in Germany and Austria.

In cooperation with RWTH Aachen University, she was involved in developing the "Construction Robotics" degree program and, together with her team, works on research projects in the field of construction robotics and automation.



Fig. 3.11: PORR logo ⁹

Ms. Schiefer highlights the challenges and chances of robotics in the construction industry. She sees great potential in optimizing repetitive processes through automation while improving working conditions for construction workers. A key aspect for her is the coexistence of man and machine, with robots taking over mainly physically demanding tasks.

However, the construction industry is complex and influenced by unexpected factors, making automation more challenging than in other industries.

PORR has been involved in several research projects, including 'Construction—Automated Assembly', which aimed to automate assembly processes, particularly in hazardous areas such as disassembling nuclear power stations. Other projects have focused on the automated processing of building components and recycling building materials through robotic disassembling.

A key topic of discussion was the risks associated with human-robot interaction on construction sites. Ms. Schiefer identifies two major challenges: first, workers' uncertainty about their job security, as media discourse often suggests that robots could replace human labor. However, PORR aims to reduce the load on workers and ensure a long-term employment. Second, safety issues are crucial, as construction sites cannot create strictly defined zones for robots as factories can. Acoustic signals, light indicators and clear operating concepts must enable safe interaction.

Ms. Schiefer also emphasizes the need for simple and understandable training materials, such as short TikTok-style videos, to effectively prepare workers for working with robots. Emergency plans are essential to deal safely with unexpected situations.

⁹Fig 3.11: <https://porr.de/unternehmen/>

Ms. Schiefer concludes that fully autonomous construction robots remain distant and that humans will continue to play a central role.

The confidence in sensor technology is not yet 100%, and further technological advances are needed, according to Ms. Schiefer. She compares the automotive industry, where sensors and autonomous systems have improved over time. Similarly, close cooperation between sensor manufacturers and construction companies is needed to improve safety and productivity on construction sites.

A key issue is harm in the event of an accident. Ms. Schiefer explains that, like autonomous driving, no clear regulation exists. She sees shared responsibility between manufacturers, programmers and construction workers, with the key factor being who controls the machine. In the future, only specially trained workers should be allowed to work on "robot-ready" construction sites.

To minimize risk, Ms. Schiefer supports clear system boundaries so that all parties understand what tasks robots can safely perform. Instead of testing new sensors, the focus should be on the necessary technologies to prevent catastrophic accidents. The protection of human workers should always be a priority over technical implementation.

Another challenge is the safety distance around construction robots, which poses difficulties on limited construction sites. Ms. Schiefer refers to her experience in Japan, where strict order and clear rules ensure that safety zones are always maintained. In contrast, the European mentality respects individual freedom over collective safety. To enforce safety measures, it is necessary to develop technological solutions such as lighting systems or motion detection and raise awareness among workers.

Finally, Ms. Schiefer calls for a fundamental change in mindset: those who work with robots must adapt technically and organizationally. Safe operation requires clear rules, fixed safety zones, and a change in attitude so that construction robots can be seen as a helpful addition rather than a hazard.

Different skills are required in construction robotics to integrate innovative technologies into construction practices successfully. Specialized roles act as interfaces between research, construction sites, and manufacturers. Essential skills include technical expertise in construction practices and development teams, the ability to understand construction sites and programming languages, and interdisciplinary collaboration between mechanical engineering, computer science, industrial engineering, and civil engineering.

For construction workers, a solid understanding of robots' use, limitations and benefits is essential for effective integration. Training and education play a key role in this process. Companies such as PORR already use simulators to train construction equipment operators safely, and a similar approach is planned for robotic technologies.

RWTH Aachen University used to offer an interdisciplinary master's program in construction robotics, bringing together students from different disciplines to work on practical research projects in construction robotics. Although the program is currently not being continued, it showed how education in this field could be structured.

In addition, certification program, similar to crane or excavator licenses, could be developed to establish standardized qualifications for working with construction robots.

Practical experience has proven to be effective in learning processes. One example is the "Construction Robotics Internship" at RWTH Aachen, where students gained direct insight into construction sites, identified challenges and developed solutions. The combination of research, development, and practical application enables a productive exchange between experienced professionals and young talents using new methods.

Ms. Schiefer underlines that robots can contribute to increased productivity, not just by their presence but also by the more efficient construction methods associated with their use. Early and detailed planning is necessary to take full advantage of automation. Simulations and large data sets are used to make construction processes faster, more resource-efficient, and more predictable.

She thinks that robots still can't match humans in terms of quality and speed of work unless we modify the processes before and after their tasks. However, she recognizes that machines are great at handling dangerous or physically challenging jobs. This shift can reduce workplace accidents and contribute to a healthier work environment for everyone.

Ms. Schiefer explains that extreme safety requirements could suppress innovation in the interaction between safety and acceptance & trust. Progress is only possible if companies are willing to test new technologies under controlled conditions, even if risks are involved. Acceptance & trust go hand in hand: without trust, there is no acceptance - and the more people accept a technology, the greater their confidence in its safety.

She uses examples to explain how unpredictable human behavior, such as overcoming, can reduce productivity. She distinguishes between intentional interference (e.g. people intentionally stopping autonomous vehicles), necessary activities (which justify slowing down a machine) and unconscious misbehavior (which indicates information deficits). Gradual optimization is, therefore, essential.

In the interview, Ms. Schiefer highlights the importance of checklists as an interface for knowledge transfer between technological solutions and construction companies. There are too few such interfaces, making it difficult for construction companies to find suitable robotic solutions.

To address this, she proposes a standardized 'construction robotics list' - similar to a construction equipment list - that specifies which robotic systems are suitable for which applications. The aim is to provide a neutral, science-based basis for decision-making rather than simply a marketing tool. Looking ahead, Ms. Schiefer supports closer cooperation between suppliers and users to develop practical automation solutions. She emphasizes that Austria has expertise in construction robotics, which should be better integrated into education. She also sees a need for greater independence by developing national solutions rather than relying only on international options.

Ms. Schiefer criticizes the slow rate of innovation and sees change as a great opportunity. Companies and countries with flexible value systems will be more successful by adapting to new conditions in the long run. In her view, robotics is the future and must be actively shaped to fit existing values and principles. For the complete Interview with Ms. Schiefer, see appendix **B.7**

3.3 Summary of Empirical Research on Construction Robotics

Chapter 3 presents the empirical research and describes the results of the workshop and expert interviews. The aim was to gain practical insights for integrating robotics into the construction industry.

A series of five workshops and several expert interviews with professionals from the construction and robotics sectors were conducted to explore the current and future role of robotics in construction.

Both formats include themes and complementary insights, showing that the integration of robotics is not only a technological shift but a comprehensive transformation involving planning, safety, collaboration, and education.

Key Success Factors: across workshops and interviews, the following frequent themes were identified as critical for success:

- **Trained Personnel Skill Development:** specialized training, hands-on exercises, and the formation of mixed teams—experienced workers alongside digitally skilled newcomers—were universally seen as important. This includes models like "Robots as a Service" and continuous feedback loops from site applications.
- **Standardized and "Robot-Ready" Sub-processes:** the importance of breaking down construction processes into well-defined, standardized steps was repeatedly stressed.
- **Planning and Coordination:** strong upfront planning and cross-disciplinary coordination are essential for effective integration.
- **Change Management Acceptance:** both workshops and interviews highlighted that robots should be framed as tools that support rather than replace human labor. Acceptance depends on transparent communication, practical demonstrations, and specified change agents.

Safety Considerations: safety on construction sites was a major focus. While robots can reduce physical stress, they may also introduce new hazards, such as collisions. Strategies discussed included:

- Comprehensive safety strategies (e.g., sensor technology, virtual safety zones, and emergency stop mechanisms)
- The use of legal standards and certification frameworks (e.g., CE certification, ISO 13849, Machinery Directive, as detailed in Interview 4)
- Continuous training and technological monitoring systems

Technological and Economic Integration: robotics must be integrated into strong digital infrastructures, especially Lean and BIM processes. While the initial investment and training requirements may be high, long-term benefits include:

- Increased productivity and quality
- Reduced labor shortages
- Economic viability through scaled deployment and operational efficiency

Real-World Applications: the workshops featured presentations of current robotic systems, such as WLTR by Wienerberger and DokaXBOT by Doka, offering practical examples of ongoing robotic developments and the challenges faced in the field.

A key outcome from both the workshops and the expert interviews is the shared thoughts among participants that the successful integration of robotics requires close collaboration among all relevant stakeholders – from planners and contractors to research institutions and developers of the technologies.

The construction industry faces growing challenges such as skilled labor shortages, rising cost pressures, and increasing demands for quality and sustainability.

To address these issues and stay competitive in the global market, targeted investment in automation and robotics is essential. The results of the workshops can be found in a white paper titled "Construction Automation" [44].

Chapter 4

Health & Safety in HRI on Construction Sites

Ensuring the safety of personnel and equipment must be a priority, while maintaining system functionality and facilitating operation and maintenance.

Any risks posed by the electrical equipment must be evaluated within the overall requirements of the machine risk assessment. This includes:

- Identifying the need for risk reduction;
- Determine appropriate risk reduction measures;
- Define the necessary protective measures

Equipment should be selected based on a risk assessment, in accordance with the intended use of the equipment, and with due regard to the operators involved. [45, pp. 20, 34, 43]

Safety is a critical factor in human-robot interaction (HRI) on construction sites, and there are many questions that need to be answered to ensure a safe working environment. Starting from the fact that construction sites are highly dynamic and unpredictable environments where human workers, heavy machinery and autonomous robotic systems have to coexist. The integration of robotic systems introduces new risks that require careful assessment, mitigation strategies and adherence to established safety standards.

This chapter examines the main safety risks associated with HRI in construction, reviews relevant international standards and regulations, and provides an in-depth analysis of risk assessment methodologies.

It also proposes safety measures to minimize hazards, including inherent safe design principles, safeguards and complementary protection strategies, with the aim of providing a structured approach to understanding and improving safety in the evolving field of construction robotics.

4.1 Safety Risks in HRI in Construction

Compared to other industries, construction is considered one of the most dangerous, with workers exposed to different risks. In Germany, 435 people lost their lives in 2021, of which 85 are in the construction sector - around 20% of the total [46] [47].

Compared to other industries, construction activities take place in a dynamic and sometimes unregulated environment where multiple factors can lead to unforeseen accidents. By contrast, work in other industries - such as factories or laboratories - often occurs in a more controlled environment.

This makes conducting safety assessments much more challenging. In addition, construction sites typically have multiple contractors working at the same time, which means that safety responsibility cannot be assigned to a single individual. On construction sites, accidents can be categorized as follows:

- Falls from ladders, roofs and scaffolding (30%)
- Transport accidents (25%)
- Contact with objects (20%)
- Contact with dangerous substances (15%)

Seventy to eighty percent of these accidents result from non-compliance with health and safety regulations. [10, pp. 146–148]

Poorly planned introduction of new technologies - such as robots - can increase risk by introducing unfamiliar challenges and scenarios, even though robots promise to improve safety on construction sites.

As with any machine, human-robot interaction (HRI) presents a number of hazards. Manufacturers and employers need to ensure that robots meet safety requirements and do not pose a risk to other personnel, especially as the nature of construction sites can lead to more unexpected risks.

DIN EN 60204-1 focuses on general requirements for the electrical equipment of machinery. The standard requires a risk assessment to be executed before a machine is put into service. The main aim of this assessment is to determine whether risk reduction is necessary and, if so, which measures are most appropriate. It must also consider the people who will be operating the equipment.

According to the paper "Safe human-robot collaboration in construction: A conceptual perspective," risks in the context of human-robot interaction fall into three categories: physical risks, psychological risks, and risks related to awareness and attention.

According to DIN 12100, the risk is "the combination of the probability of occurrence of damage and the severity of that damage." Risks can arise in both proximal and distant work contexts, with the probability of physical risks being higher in proximal interactions. These risks can result in physical harm to employees or damage to building components, with negative economic impacts - such as reduced profits - and psychological impacts, including loss of trust on the human side.

Workers can also be endangered by distractions caused by the robot or by work-related stress due to the speed at which the robot operates.

Distant interactions can also lead to robot-related accidents that can injure workers. The types and likelihood of risks can vary depending on the site environment and the kind of work being performed. The table below lists some examples of these risks:

Type of Risk	Examples
Physical Risks	Injuries caused by robot movements Collisions Falling loads Dust emissions
Attentional Costs	Distraction due to visibility Distraction caused by robot operation Cognitive load from new processes
Psychological Impacts	Stress and anxiety Emotional strain due to unexpected outcomes Emotional strain due to unrealistic expectations

Tab. 4.1: Types of risks and examples in human-robot interaction on construction sites

The examples in the previous table can be extended through experience and stimulation with construction robots on building sites.[48, pp. 45–47]

4.2 Relevant Safety Standards and Regulations for HRI on Construction Sites

4.2.1 History of Safety Standards

Safety standards help the fundamental purpose of protecting workers from hazards that can be caused by unsafe working conditions or technologies. They create a framework to minimize accidents, injuries, and health risks. In a constantly changing world of work, these standards guide for employers and employees alike to ensure safe and productive working environments, particularly with the introduction of new technologies, such as robotics.

The development of safety standards has a long history deeply implanted in social and technological change. The first approach can be recognized in historical texts such as the Bible or the Codex Hammurabi. With industrialization, working conditions worsened significantly, leading to systematic reforms.

Fundamental regulations, such as the industrial Code of 1869, were introduced, which defined mandatory safety measures for the first time in the 19th century.

In the 20th century, the development continued with more comprehensive legislation. Later, the European Framework Directive of 1989 led to a harmonized approach within the EU, requiring workers and employers to implement health and safety measures systematically.

Today, we are on the threshold of a new era in which human-robot interaction in the workplace presents new challenges and opportunities. In the face of rapid technological advances, it is necessary to develop and adapt existing safety standards to enable the safe integration of robots into the construction process and to minimize future risks.

The next sub-section analyses and compares workplace safety standards and specific safety standards for machines and robots. The goal is to use this analysis to develop generic proposals for safety standards specifically aimed at working with robots on construction sites. [49, pp. 368–388]

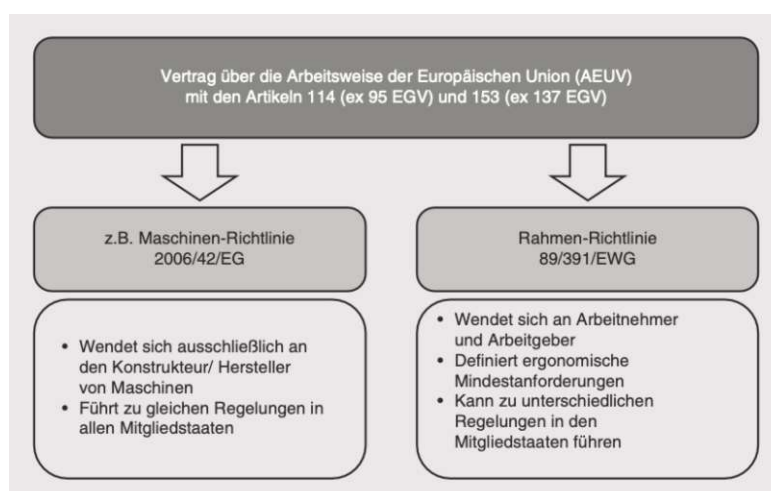


Fig. 4.1: EU-Guidelines [49, p. 388]

4.2.2 Overview of International Safety Standards for Robots and Machines

ISO 10218-1 and ISO 10218-2 safety standards address the safety requirements for industrial robots and their integration into robotic systems. **Part 1** focuses on requirements and guidelines for the safe design of industrial robots to minimize risks. It covers common hazards in machine design and operation and defines appropriate measures [50]. **Part 2** deals with the integration of industrial robots and describes the main hazards and situations that may arise in this context [51]. Both parts aim to eliminate or reduce the associated risks.

ISO/TS 15066 can be seen as complementary to ISO 10218-1 and ISO 10218-2. It is specifically designed to ensure safe human-robot collaboration and has the same objective as the other two standards [52].

ISO 12100 establishes the basic principles and methodology for machine safety internationally. It guides risk assessment and reduction, enabling designers to develop machines that minimize risks to users and others. A key aspect of the standard is identifying hazards early on. For example, when integrating robots, companies must assess risks throughout the machine's life-cycle and eliminate or sufficiently reduce risks. The standard also provides guidelines for documenting and reviewing the risk assessment and mitigation processes [53].

4.2.2.1 Key Aspects of the Standards DIN EN ISO 10218-1, 10218-2 and ISO/TS 15066:

The following subsection summarizes relevant aspects of [54], [55] and [14].

Risk assessment: according to DIN EN ISO 10218-1 and DIN EN ISO 10218-2 a risk assessment should be carried out and consider for collaborative application the following aspects:

- Operators working in the vicinity of the robotic system.
- The technologies used.
- The potential for contact between moving parts of the robotic application and the operator(s).
- The collaborative tasks of the robotic systems.

ISO 12100 adds the following aspects to consider for robotic cells:

- Robotic systems, their movements and high-energy operations.
- The path of the robotic systems.
- The work area of the robotic system.
- End effectors.
- Tasks performed by the robotic systems.

Design and protective measures: these measures deal with the design of robots, including their control systems and safety functions. EN ISO 10218-1 states that the design must minimize or eliminate potential hazards. The following aspects should be considered:

- Materials used
- Mechanical design
- Packaging
- Auxiliary axes
- Component failure
- Cybersecurity

The standard classifies robots based on the maximum achievable TCP speed, the maximum force per manipulator and the total mass of the manipulator's moving parts.

Control systems: robot control can be direct or external, with different requirements. In addition, the operating modes differ between automatic and manual control.

Safety functions: safety functions are listed in a table in Annex C of DIN EN ISO 10218-1. These functions include:

- Position holding
- Speed-level related safety functions
- Monitored stop
- Safety stop
- Safety functions related to locking mechanisms

These functions are necessary for the safe execution of collaborative tasks with robots. They must be specified in the user information and activated when the robot is switched on. The active safety settings and their configuration must be accessible and documented.

Design of collaborative industrial systems: ISO/TS 15066 describes the difference between collaborative and traditional robot operation. The main difference is that in collaborative operation, the robot and the operator share the same workspace, allowing physical contact between them. In traditional robotic systems, risk reduction is typically achieved through safeguards that separate the operator from the robotic system.

In collaborative applications, the design must ensure safety within the shared workspace. Hazards should be eliminated and risks reduced. According to the standard, the following factors should be considered in the design process:

- Boundaries of the workspace
- Workspace access and clearance
- Ergonomic aspects
- Limits of use: collaborative operations should be accessible only to authorized operators with the necessary training and the skills to manage potential intended and unintended contact situations. In addition, a system should be in place to identify personnel entering the collaborative space.

- Time limits and transitions: they consider the duration of the collaborative operation.

Hazard elimination begins with the identification of hazards that may be associated with:

- Robot characteristics: payload, speed, operator location, etc.
- Robot system: lack of ergonomic design, etc.
- Application: process hazards and limitations of personal protective equipment (PPE).

It is also important to identify the tasks involved, including:

- Frequency and duration of operations
- Nature of the tasks
- Additional tasks within the work area
- Number of operators

Once the hazards have been identified, an assessment must be done before risk reduction measures are applied.

Verification and validation of safety requirements and protective measures: According to the standards the manufacturer must ensure that all applicable safety requirements, and protective measures are verified and/or validated. This includes the robot's design, safety functions and safeguards. Verification and validation are done using the following procedures:

- Visual inspection
- Practical tests
- Measurements
- Observations during operation
- Examination of schematics, wiring diagrams and design documentation
- Review of risk assessment
- Review of specifications and user information
- Examination of specifications and user information
- Examination of layout drawings and documentation
- Review of safety-related application software and/or software documentation
- Verification of process simulation models for robot application using virtual commissioning tools

User information: The user information should clearly define the applications for which the robot should not be used. This information must be provided in the language of the country in which the robot is supplied and must include:

- Signals and warnings
- Labels, signs, and written warnings
- Accompanying documentation

4.2.2.2 Key Aspects of the Standard ISO 12100:

The following subsection provides a summary of relevant aspects from [17].

Risk assessment and reduction strategy: the standard provides a structured method of risk assessment consisting of the following steps:

- Determine the limits of the machine
- Identification of hazards and associated hazardous situations
- Risk assessment
- Risk evaluation based on risk analysis
- Risk reduction or elimination based on the decisions made after the risk analysis
- Documentation

It is important to understand that risk reduction follows risk assessment, and both are iterative processes designed to achieve the intended goal.

The absence of protective measures will result in a hazardous situation that can lead to harm. Information is required to analyze risk. According to the standard, this information can be related to:

- The machine itself
- Regulations and standards
- Experience from use
- Ergonomic principles

The risk assessment process must consider all phases of the machine's life cycle and all tasks associated with each phase. In the risk assessment process, two key elements of risk need to be assessed:

- The severity of the harm
- The probability of occurrence

Risk assessment follows the estimation process and determines whether risk reduction is required and what appropriate measures should be applied.

Risk reduction: risk reduction can be achieved by eliminating hazards or reducing the elements of risk. The following order of measures should be applied:

- Inherently safe design measures: these consider factors such as:
 - Geometrical aspects of the machinery
 - Physical aspects such as mass and speed
 - Technical knowledge in machinery design (e.g. emission levels, materials and their properties, mechanical stresses)
 - Choice of technology

- Protective and/or complementary measures: these measures are used when inherently safe design measures cannot eliminate hazards or sufficiently reduce risks (for types of protective measures see 4.4.2).

The standard provides a guideline for selecting appropriate guards using a specified number.

Information for use: information for use should clearly state the safe use of the machine and highlight any residual risks. This information must be comprehensive and easily accessible to the operator.

Risk assessment and risk reduction documentation: documenting the procedures and results of risk assessment and reduction is essential. Documentation should include the following information:

- The machinery tested
- Relevant assumptions (e.g., loads, safety factors)
- Hazards and hazardous situations identified
- The information on which the risk assessment was based
- The intended risk reduction achieved by the protective measures
- The measures implemented
- Residual risks associated with the machine
- The results of the risk assessment

4.2.3 Overview of Safety Guidelines in Construction

Ensuring safety in construction is far from simple, as many factors need to be considered at the same time. For example, it is not enough to focus only on workplace safety; other considerations include employees, neighboring facilities and buildings, machinery, weather conditions and hazardous substances, among others. As a result, the construction sector is controlled by many regulations, laws, and standards that address safety issues on construction sites and provide practical guidance. These can vary from country to country.

This section refers to key points from the Austrian Work Equipment Regulation (AM-VO) and guidelines from the German Social Accident Insurance (DGUV) on construction machinery as examples.

The AM-VO is an Austrian regulation issued under the country's Occupational Health and Safety Act (Arbeitnehmerschutzgesetz, ASchG). It regulates safety and health protection while using work equipment, including construction machinery. It aims to ensure the safe operation, regular inspection, and correct handling of such equipment to prevent accidents and health hazards.

DGUV stands for Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (German Statutory Accident Insurance), which is the organization for German employers' liability insurance associations and public accident insurance institutions.

One of DGUV's responsibilities is the safe use of construction machinery on construction sites. The organization develops rules, regulations and information material to ensure the safe use of construction machinery, covering all aspects that help to prevent accidents and improve safety. Both sets of guidelines are practical and support employers and employees in implementing legal requirements.

The goal of any construction project is to deliver a safe structure at all stages, which can only be achieved by ensuring structural stability and load-bearing capacity. Therefore, designers and structural engineers need to check the stability of buildings, temporary structures, and equipment at every stage of construction. This includes considering loads such as those generated by construction equipment [56, S.22–23, §5 Abs.1].

A wide range of machinery is also used on construction sites, and safe traffic routes must be defined to prevent accidents. The operator must have a sufficiently clear view of the working area; if this is not possible, appropriate devices should be provided. If technical measures are not available, temporary measures can be taken, such as surrounding dangerous areas and using instructors. [56, S.32–34, §7 Abs.1 & 2]

It is, therefore, essential to clearly define danger zones and safe behavior within them and to ensure that machine operators are properly trained [57, p. 62].

Sites must also monitor emissions from construction machines, especially in confined areas. Other issues, such as noise and regular maintenance of construction machinery, also affect workers' health and safety.

Two of the most important pieces of equipment on construction sites are excavators and cranes. **§§ 18 & 19** of the Labor Inspection Act provide safety rules and guidelines using such machinery. These regulations emphasize the following points:

- The loads, attachment and lifting points, weather conditions and method of attachment or lifting must be considered when selecting equipment.
- Ensure safe lifting, moving, and placement of loads by:
 - A load bearing foundation or stable ground.
 - Supervision by a suitably qualified person.
 - Informing workers of safe procedures.
 - Moving loads as instructed by the responsible person and ensuring communication between crane operators, signalers and load handlers.
 - Preventing loads from catching on obstacles and preventing loads from falling or tipping.
 - Monitor loads and associated danger zones.
- Workers should not stand under suspended loads; loads should not be moved directly above people wherever possible.
- Suspended loads should only be moved over protected working areas; if this is not possible, appropriate safeguards must be in place.
- Work instructions and allowed load limits must be clearly defined and strictly adhered to.

- Alternative safety methods, such as safety hooks, should be used to prevent unintentional load release.
- Overlapping work areas must be monitored to avoid collisions.
- Only authorized personnel should operate machinery.
- Machinery safety systems, such as brakes or warning devices, must be checked daily before use.

These regulations clearly show that construction work involves many risks and requires the simultaneous consideration of many factors. The importance of uniform safety standards lies in having a common international regulatory framework that ensures the highest possible level of safety. [58, §18 & 19]

4.3 Risk Analysis and Safety Assessments

4.3.1 Methods for Hazard Analysis in HRI

Risks are inherent in activity and cannot, in theory, be completely avoided. Therefore, it is essential to develop and implement measures to mitigate these risks. However, implementing such measures should be carefully planned and require a risk analysis. This analysis aims to determine the measures necessary to reduce the risks based on the current state of the technology.

In the context of working with machinery, the DIN ISO 12100 standard defines risk analysis in three key steps [17, p. 10] [6, pp. 135–136]:

- Determining the limits of the machine over its entire life cycle: this involves considering all relevant factors and limitations, including spatial and temporal boundaries
- Hazard identification: identifying the potential hazards associated with the machine throughout its lifecycle.
- Risk assessment: this depends on two key factors; the severity of the potential harm, and the likelihood of it's occurring. Severity is influenced by the level of injury to individuals, the number of people affected and the impact on the environment.

These steps fall into two main categories:

- Type or category of analysis: it answers questions like when and what should be analyzed?" and defines the goals of the analysis.
- Techniques or analysis methods: they explains how the analysis will be performed.

There are seven main types of risk analysis and more than 100 different techniques, which can be inductive, deductive, or a combination of both. Deductive methods are based only on existing information, whereas inductive methods can incorporate additional data, making them particularly suitable for hazard identification. [59, pp. 31–32, 48–49]

This work does not rely on existing data, so inductive methods are more appropriate. In this context, two methods will be thoroughly investigated and applied:

- Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)
- Hazard and Operability Analysis (HAZOP)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): this method was developed in 1949 for the US military to assess the effects of system failures. It addresses the following questions:

- What can fail?
- How will it fail?
- How often will it fail?
- What are the consequences of failure?
- What are the reliability/safety consequences of the failure?

The method requires specific information to answer these questions:

- Mission
- System design
- Success and failure limits
- Credible failure modes and their probability of occurrence

The concept of the method is based on a step-by-step analysis: First, the complex system is broken down into different units, which are further broken down into their components (top-down analysis). The components are then analyzed to assess the impact of their failure on the overall system (bottom-up analysis). Finally, a worksheet is created to document all the collected information. [59, pp. 237–239]

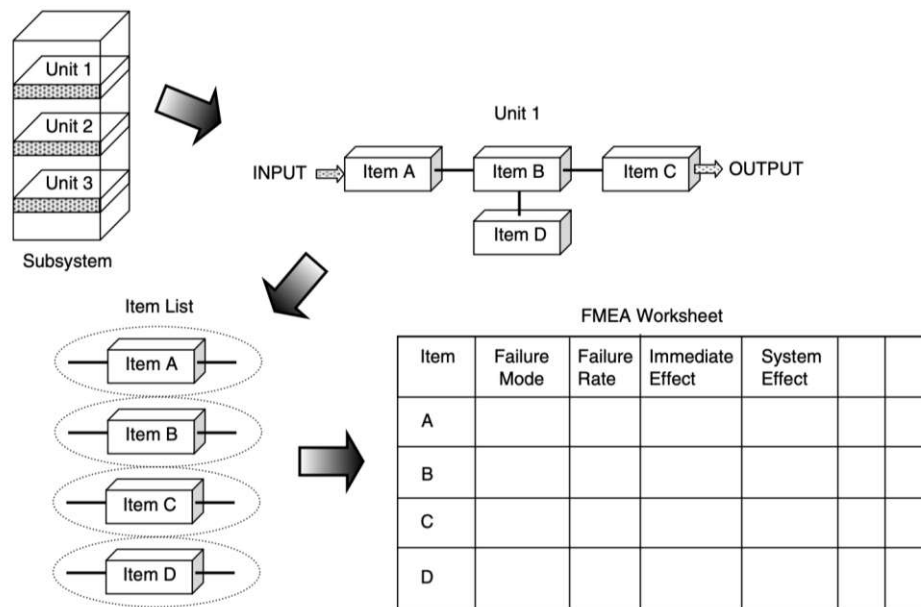


Fig. 4.2: FMEA concept [59, p. 239]

Hazard and Operability Analysis (HAZOP): the second method is Hazard and Operability Analysis. This was developed by the Institute of Chemical Industry (ICI) in the 1970s. Today it is used to identify potential deviations in systems. These deviations are identified through the expertise of specialists in specialised meetings moderated by a team leader. The selection of team members is critical to the success of the HAZOP analysis. The HAZOP process has six steps:

- Establish the HAZOP plan
- Selecting the team
- Define the system elements
- Select the key words
- Perform the analysis

- Document the process

The selection of 'keywords' is a very important part of the process. These are short terms that help to show deviations in the system. A 'keyword' changes depending on the life cycle of the system and the context in which it is used. An example might be the word "more." In the context of central water supply systems, "more" might refer to a higher water flow than designed at installation. The same word might mean "more water consumption" in the context of regular building operations.

Following these six steps, a risk analysis can be done, and the results documented in a specific worksheet. [59, pp. 366–375]

HAZOP Analysis										
No.	Item	Function/ Purpose	Parameter	Guide Word	Consequence	Cause	Hazard	Risk	Recommendation	Comments
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Fig. 4.3: HAZOP worksheet [59, p. 374]

4.3.2 Risk Matrix, Prioritization of Risks

As discussed in previous chapters, risks are assessed based on two factors: the magnitude of potential loss and the likelihood of occurrence. This allows risks to be categorized into different levels, which can be illustrated by using Risk matrices. The level of risk depends on whether safety measures have been implemented and how effective they are. Therefore, risks are usually divided into "inherent risks" and "current risks".

"Inherent risks are those that exist before safety measures are implemented or if all measures fail. "Current risks" describe risks after effective safety measures have been implemented. The risk analysis and planning of safety measures also defines a target risk level, known as the "target level." [60, pp. 155–156]

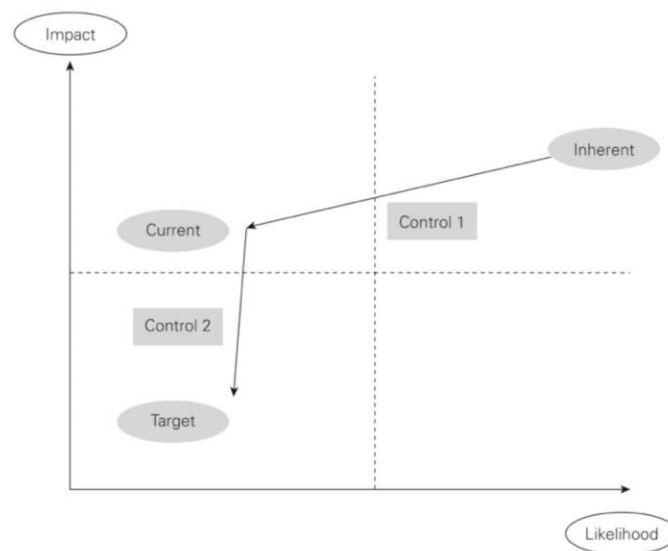


Fig. 4.4: Inherent, current and target levels of risks [60, p. 156]

A risk matrix typically consists of two axes: the horizontal axis represents the qualitative factor of a risk (the magnitude of harm), while the vertical axis represents the quantitative factor (the likelihood of occurrence).

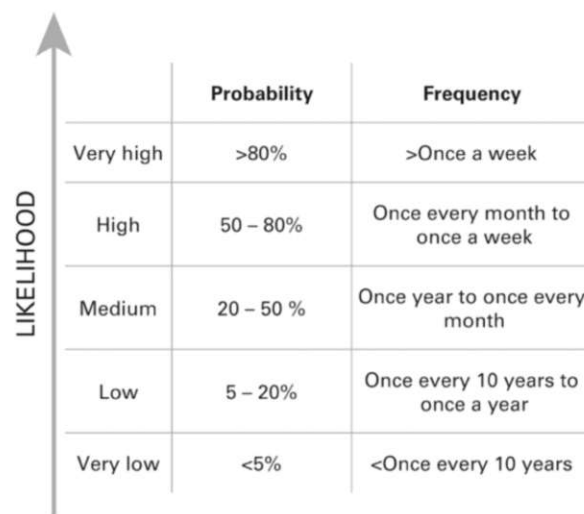
This makes the risk matrix a hybrid of qualitative and quantitative aspects. These axes can be presented in different ways, the most common being a 5x5 matrix where the ratings range from 1 to 5 or from "very low" to "very high".

The impact of a risk may be subjective. However, specific sources provide objective insights into the volume of potential impact. These sources may be relevant to some companies or industries but less helpful to others. Examples include:

- Financial impact
- Infrastructure impact
- Reputational damage
- Market impact

According to ISO 31073, the likelihood of risk is defined as the "chance of something happening." A clear way to express likelihood is to use percentages combined with a rating scale from "very low" to "very high." For example, less than 5% of probabilities are classified as "very low," meaning that the event occurs less than once in ten years.

Probabilities between 5% and 20% correspond to the "low" level, indicating that an event could occur between once in ten years and once a year. The following figure gives a detailed examination. [60, pp. 146–154]



	Probability	Frequency
Very high	>80%	>Once a week
High	50 – 80%	Once every month to once a week
Medium	20 – 50 %	Once year to once every month
Low	5 – 20%	Once every 10 years to once a year
Very low	<5%	<Once every 10 years

Fig. 4.5: Likelihood scales [60, p. 154]

Because risks are influenced by many factors, it is recommended that risk matrices be developed based on input from several experts in different fields. This approach minimizes the likelihood that specific risks will be overlooked. For this reason, risk matrices are often the result of risk assessment workshops. [61, p. 507]

In addition to showing the risk levels, the risk matrix has other uses. It provides an overview of all identified risks and helps to predict appropriate strategies. These strategies are referred to as the "4Ts" [60, p. 161] [62]:

- **Tolerate:** when both the likelihood and impact of the risk are low. It is important the risks should not exceed a defined level; therefore, continuous risk monitoring is essential.
- **Transfer:** when the likelihood is low, but the impact is high. Risk transfer can be achieved through insurance, contractual agreements, or by involving a partner who shares the risk. However, it is important to note that risks can rarely be fully transferred.
- **Treat:** when the likelihood is high, but the impact is low. In risk treatment the organization has to take action on the main root causes that have the greatest effect on the probability and severity of the risk.
- **Terminate:** when both likelihood and impact are high. To eliminate the risk, the associated activity must be stopped or outsourced, and an alternative approach should be identified. If the activity is essential and cannot be terminated, appropriate control measures must be implemented.

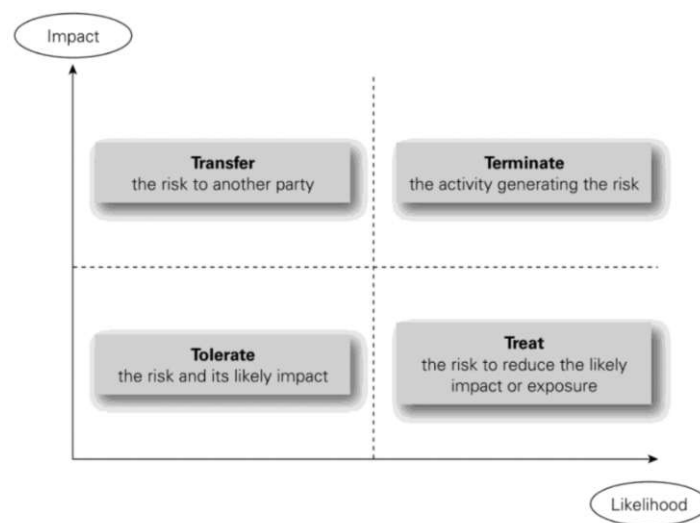


Fig. 4.6: The 4Ts [60, p. 163]

4.4 Safety Measures to Minimize Risks in HRI on Construction Sites

4.4.1 Inherent Safe Design

After the risk analysis, appropriate safety measures can be selected to minimize the risks. As defined, human-robot interaction (HRI) involves two actors - the robot and the human - working in a shared workspace. As mentioned before, risks can arise from this interaction.

Risk mitigation measures vary depending on the work environment, the specific task of the robot, and the activities involved. A solid understanding of these system elements simplifies the selection of the right measures and their specifications. In this study, safety measures are categorized as follows:

- Human safety measures: these measures take the form of training and are discussed in Chapter 5.
- Safety measures relating to the machine.
- Safety measures related to the work area.

As mentioned in ISO 12100, risk reduction can be achieved through two types of measures:

- Inherent measures relating directly to the machine.
- Protective and/or complementary measures that affect the workspace around the machine.

DIN EN ISO 12100 defines inherently safe design as "a protective measure that either eliminates hazards or reduces the risks associated with those hazards by modifying the design or operational characteristics of the machine without the use of separating or non-separating protective devices." [17, p. 20]

The measures may address, for example, the size of the machine as it affects many aspects. To minimize the risks arising from size, appropriate measures should be taken, such as:

- Robot size: large machines can restrict workers' visibility. Therefore, the design of the robot should keep its size as small as possible without affecting work efficiency. Alternatively, other safety measures can be implemented. At the same time, attention must be paid to the distance between moving parts to avoid hazards such as crushing or shearing.
- Sharp edges, corners, and openings should be avoided as they can cause injury.

In addition, measures should be taken to mitigate physical factors. This includes limiting physical properties such as mass, speed, noise, vibration, radiation and pollutant emissions. This requires accurate calculations of limits and the use of appropriate materials, software, and sensors. [17, pp. 30–32]

Inherent safeguards are based on technical knowledge of the machine itself and the technologies used in safety measures, such as:

- Stop functions: operator must be able to stop the robot by an action. This can be achieved, for example, by using emergency stop devices [14, p. 12].

The purposes of stop functions can vary, including:

- emergency situations,
- safeguarding,
- limiting the functionality of the machine,
- responding to safety-related faults,
- or sometimes stopping the machine.

Stop functions can be activated automatically or manually. Their effectiveness depends mainly on the safety distance between the robot and people in the work area, especially in emergency or safety-critical situations.[55, p. 126]

- Speed control: speed control also depends on the safety distance, with a proportional relationship: the higher the speed, the greater the required safety distance. Robots should be provided with speed limits and monitoring systems. The maximum speed of the robot should be defined based on its specific application. The speed can be either constant or variable.
- Sensors: sensors are the key technology that enables machines to perceive their environment. Today, a wide range of sensors are used in various fields. The distribution of their applications is approximately as follows [63, pp. 2–3]:
 - Automotive: 49%
 - Household: 27%
 - Measurement and control 14%
 - Data and communications: 5%
 - Consumer Electronics: 5%

However, sensors do not provide 100% accurate information due to several factors:

- Environmental conditions: 30%
- Sensor reliability: 27%
- Sensor cost: 27%

On construction sites, environmental conditions are often uncontrolled, affecting the quality of the data collected. Sensors alone are, therefore, not enough. This is especially critical as the machine's response - whether to stop or move in a particular direction - depends heavily on the sensor data. To ensure reliable operation of machines on construction sites, additional measures are needed to balance the limitations of sensors.

- Camera systems: cameras act as the "eyes" of robots, providing visual data for various purposes such as navigation and monitoring. The quality of the cameras is an essential factor in the processing of captured images and video, so it is necessary to prioritize their selection and implementation. For example, the In Situ Fabrication Robot developed by ETH Zurich uses cameras for global localization and in-process monitoring [64, p. 61].
- Artificial intelligence (AI): if cameras are the 'eyes' of the robot, then AI is the 'brain' of the robot. AI significantly expands the possibilities for robot use and enhances their technological capabilities. AI plays a key role analyzing captured data, simplifying complex decision-making, making tasks on construction sites easier and optimizing time management. In addition, AI systems can analyze real-time data to identify and mitigate potential hazards [65].

4.4.2 Safeguards and other complementary measures

Safeguards are protective devices used when inherent safety measures are insufficient to eliminate or minimize risks. There are several types of guards, including:

- Moving guards
- Adjustable guards
- Interlocking guards
- Interlocking guards with latching function
- Interlocking guards with start function

The appropriate guard should be selected depending on the robot's moving parts and whether and how often the hazardous area needs to be accessed. In some cases, a combination of different types of guards may be needed. [17, pp. 34–36]

Guards can also be supplemented by other sensitive protective devices to increase safety. These devices should be connected to the robot so that a command can be given at the right time.

Additional safety devices can also be used, especially when an operator needs to work with the robot on a shared task. Examples include:

Function	Device	Source
Movement parameter limiting devices	Limit Switches	[66]
Overload and torque limiting devices	Mechanical load moment limiter	[67]
Devices to prevent collision or interference with other machinery	LiDAR Sensors	[68]
Devices to prevent hazards to pedestrians	Ultrasonic Sensors	[69]
Devices for limiting pressure or temperature	Pressure relief valve	[70]
Emission monitoring devices	Particle sensors	[71]
Devices to prevent unattended operation	3-stage 3PE Tech Pendant	[72]
Devices to limit machine tilt on a slope	Inclinometer	[73]

Tab. 4.2: Safety devices

In addition to the equipment used, other aspects can improve safety on construction sites in the context of human-robot interaction like a protective separation zone (See 4.5.4).

4.5 Suggestions for improving Safety in The Integration of Construction Robots

4.5.1 Recommendation for Safety Standards

Construction robots operate in a dynamic work environment that differs very from laboratory and factory environments. As there is currently limited practical experience with such robots, this paper aims to outline the first steps in developing safety recommendations and guidelines. The core idea is to match safety guidelines for the construction industry and construction machinery with those applicable to industrial robots.

The approach proposed here is to establish a comparative framework between construction robots and conventional construction equipment based on the information in section 4.2. Then, the relevant safety rules from existing standards for construction machinery should be adapted for construction robots.

To date, the most used robots in the construction sector take the following forms:

- A robotic station equipped with a articulated arm, which can be compared to a hydraulic excavator.
- Robots such as the Hydrian-X or 3D printing robots, comparable to a concrete pump
- Cartesian robots, similar in functionality to cranes
- Small mobile robots
- Robot dogs
- Inspection robots, like drones

Considering the points discussed in the previous subsections (see 4.2.2 and 4.2.3), the following measures are proposed:

Aspect from Robot Standards and Machinery Safety	Aspect from Construction Safety Standards	Proposed Safety Points for Robots on Construction Sites
Risk reduction through inherently safe design: Considering geometry, mass, speed, acceleration, and materials.	Ensuring structural stability and load-bearing capacity by considering loads from construction machinery.	Robots must be designed so that their movement speed and load-bearing capacity do not threaten the structural stability of the construction site.
Hazard zones and access restrictions: Defining workspace boundaries and access for authorized personnel.	Clear definition of danger zones for machinery and temporary measures if technical solutions are unavailable.	Robot work areas must be clearly marked and accessible only to authorized personnel.
Ergonomic aspects: Considering operator positions and ergonomic design of robot systems.	Ensuring a clear view for machine operators and providing training for safe behavior.	Robot operators must have a clear view of the work area and use ergonomically designed controls.

Aspect from Robot Standards and Machinery Safety	Aspect from Construction Safety Standards	Proposed Safety Aspect for Robots on Construction Sites
Limits of use: Access to collaborative operations only for trained personnel.	Operation of machinery only by authorized personnel.	Only trained and authorized personnel should operate or work near robots.
Time limits and transitions: Duration of collaborative operations and access controls.	Monitoring overlapping work areas to avoid collisions.	Synchronization of work schedules between robots and machines to prevent collisions.
Path planning and navigation: Defining and securing paths for robotic systems.	Safe traffic routes for construction machinery and prevention of collisions.	Predefined paths for robots with barriers to restrict access by unauthorized personnel and avoid collisions with workers or machinery.
Obstacle detection and avoidance: Sensors to detect and avoid obstacles in the robot's path.	Preventing loads from catching on obstacles and ensuring clear paths for machinery.	Robots must have real-time obstacle detection systems and automatic path adjustment capabilities.
Protective measures: Use of protective devices such as sensors and safety stops.	Daily checks of safety systems like brakes and warning devices.	Robots must be equipped with sensors to detect humans and automatic emergency stop functions.
Hazard elimination through design: Minimizing risks by selecting appropriate materials and design.	Use of secure anchoring and stable foundations for machinery.	Robots on construction sites must have stable platforms and materials that can resist mechanical stresses.
Communication in the workspace: Ensuring communication between operators and robot systems.	Communication between crane operators, signalers, and load handlers for safe load movement.	Introduction of a standardized signaling system for communication between construction workers and operators/robots (e.g., lights on the robot).
Cybersecurity: Protection against unauthorized access and system failures.	No direct equivalent in construction safety standards but monitoring and controlling access to machinery.	Implement security protocols for network security and access controls for construction robots.
Load capacity and loads: Considering payload, speed, and operator location.	Considering loads, weather conditions, and safe movements for cranes and trucks.	Definition of maximum load capacities and speed limits for robots based on construction site conditions.
Operator training and competence: Ensuring operators are trained for handling robots safely.	Training of machinery operators and informing them about safe procedures.	Mandatory training for all operators working with or around robots, including emergency procedures and communication protocols.

Tab. 4.4: Proposed safety aspects for robots on construction sites

As highlighted in the table, integrating robots demands expanding traditional construction safety standards. Key areas such as operator training, path planning, risk reduction through design, and communication protocols must be adapted to ensure a safe working environment. Incorporating protective measures like obstacle detection, cybersecurity protocols, and access restrictions for authorized personnel emphasizes the need for a wide safety framework that aligns with machinery and robotic standards.

Moreover, comparing safety aspects for construction machinery and robotic systems reveals that many existing principles can be extended to cover robots, provided that specific adjustments are made. Therefore, establishing unified safety regulations that combine best practices from both domains is essential for the seamless and secure adoption of robots in the construction industry.

4.5.2 Examples for Risk Analyses in HRI

The first analysis is conducted using the FMEA-method (see 4.3.1). Following approach is conducted:

- By assuming the system is a construction robot, the subsystems could include objects such as sensors, mechanics, or software (**What can fail?**).
- The failure mode describes how these components can fail (**How does it fail?**).
- The failure rate is the probability of a subsystem failing (**How often will it fail?**).
- The direct effect refers to the direct impact of the failure on the system (in this case, the construction robot). This describes the impact on the overall system, which in this scenario could affect the operation of the site (**What is the reliability/safety consequence of the failure?**).

Based on this information, a comprehensive risk analysis can be performed. The results can then be used to define recommended actions to avoid or mitigate the identified risks.

Item	Failure Mode	Failure Rate	Immediate Effect	System Effect	Recommended Action
A. Proximity Sensors	Sensor failure	Medium	Inaccurate obstacle recognition	Increased collision risk	Regular maintenance and calibration
L. Sensors (general)	Calibration failure	Medium	Incorrect data	Incorrect task execution	Regular sensor recalibration
I. Cameras	Poor lighting/vision	Medium	Poor visibility	Incorrect obstacle detection	Use infrared cameras, provide adequate lighting
B. Robotic Arm	Mechanical breakdown	Medium	Movement interruption	Robot downtime	Reduce inspection intervals
J. Robotic Gripper	Excessive gripping force	Medium	Material damage	Damage to fragile materials	Adjust gripper force
F. Internal Hardware	Overheating	Low	Malfunctions	Permanent hardware damage	Temperature monitoring and cooling
E. Battery	Power outage	Medium	Immediate shutdown	Work interruption	Use backup power supply
C. Software Algorithm	Software failure	Low	Malfunction	Delayed or incorrect actions	Conduct thorough software testing
D. Connectivity	Communication failure	Medium	Control interruption	Limited coordination	Implement redundant communication systems
G. Operator Input	Human error	Medium	Incorrect commands	Safety risks	Training programs
H. Data System	Data loss	Low	Loss of information	Interruption of optimization	Backups and secure data storage
K. Weather Resistance	Insufficient waterproofing	High	Robot stops in rain	Work delays	Improve robot weatherproofing

Tab. 4.5: Risk analysis according to FMEA method

The second analysis is done according to the HAZOP method (see 4.3.1). The following table represents a specific work sheet of an HAZOP analysis, which consists of [59, pp. 374–375]:

- No.: reference Number for each analyzed HAZOP-entry.
- Item: item is the analyzed component of the system.
- Function/Purpose: this refers to the item.
- Parameter: it defines a characteristic of the item.
- Guide Word: it helps to understand how the item can deviate from it's purpose.
- Consequence: the answer to the question – what can happen if the parameter deviate?
- Cause: the reason behind the deviation.
- Hazard: the danger resulted from the deviation (even if not immediately critical).
- Risk: it combines the impact with the probability of the hazard.
- Recommendation: it suggests ways to reduce or eliminate the hazard.
- Comments: they help to note insights, special conditions, etc.

The following table could represent the specific work sheet of an HAZOP analysis, and aims to present items that can be analyzed before using robots on a construction site.

These items will vary from one site to another, as each site has its own specific conditions. Therefore, values such as "Guide Word", "Risk" and "Failure Rate" will vary accordingly and other items can be added or removed.

No.	Item	Function/Purpose	Parameter	Guide Word	Consequence	Cause	Hazard	Risk	Recommendation	Comments
1	Proximity Sensors	Obstacle detection	Detection accuracy	Less	Obstacles not detected	Dust or dirt on sensors	Collision with workers or objects	High	Regular sensor cleaning and calibration	Regular cleaning needed
2	Sensors	Data collection	Calibration level	Less	Incorrect data	Faulty calibration	Incorrect task execution	Medium	Regular sensor recalibration	Schedule maintenance checks
3	Cameras	Monitoring	Image quality	Less	Poor visibility	Insufficient lighting	Incorrect obstacle detection	Medium	Use infrared cameras	Provide adequate lighting
4	Robotic Arm	Material handling	Weight limit	More	Overload of robotic arm	Exceeding weight limits	Structural damage or breakage	Medium	Implement load monitoring system	Educate workers on limits
5	Robotic Gripper	Material handling	Grip strength	More	Material damage	Excessive gripping force	Damage to fragile materials	Medium	Adjust gripper force	Test with various materials
6	Internal Hardware	Thermal protection	Temperature level	More	System malfunction	Overheating	Permanent hardware damage	Low	Monitor temperature, implement cooling	Avoid exposure to heat sources
7	Battery	Power supply	Charge capacity	None	Robot stops operation	Battery depletion	Work interruption	High	Use of backup batteries	Monitor battery levels
8	Software Algorithm	Task execution	Computation speed	Less	Delayed or incorrect operation	Bug in the algorithm	Delayed construction processes	Medium	Conduct rigorous software testing	Regular software updates
9	Connectivity	Communication	Signal strength	None	Disruption in robot control	Interference or signal loss	Robot unable to operate	High	Use redundant communication systems	Monitor network health
10	Operator Input	Robot control	Command input	Wrong	Incorrect robot action	Human error	Safety risks, task failure	Medium	Worker training	Include HMI feedback mechanisms
11	Data System	Process optimization	Data integrity	None	Data loss	Storage failure or corruption	Optimization failure	Low	Secure backups and data redundancy	Use secure data protocols
12	Weather Resistance	Outdoor operation	Protection level	None	Robot stops functioning in rain	Inadequate waterproofing	Work delays	High	Improve robot weatherproofing	Use in covered areas

Tab. 4.6: Risk analysis according to HAZOP method

4.5.3 Risk Matrix for Human-Robot Interaction

Following the risk analysis and based on the information provided in chapters 2, 3, and 4, a risk matrix has been developed for 15 different factors. The aim is to identify the most significant risks and determine appropriate strategies to manage them. The risk factors identified are categorized as follows (see appendix C):

- **A:** lack of planner interest
- **B:** cyber security risks
- **C:** lack of references for building design
- **D:** lack of knowledge among designers about construction methods using robotic systems
- **E:** risk and uncertainty in the transformation process
- **F:** lack of standardization and regulation
- **G:** low acceptance by workers
- **H:** sensor failure
- **I:** inadequate training of personnel
- **J:** lack of communication between organizational units
- **K:** influence of environmental factors
- **L:** incompatibility with existing construction methods
- **M:** lack of standardized building elements
- **N:** lack of safety due to restructured environment
- **O:** unexpected worker behavior
- **P:** mechanical failure or in accuracy of robotic arms
- **Q:** errors in software algorithms
- **R:** internal hardware or battery malfunction

The likelihood and impact of these factors were assessed based on the interviews with experts (see 3.2) in the fields of construction, automation, innovation, safety and robotics, resulting in the following matrix:

Factor		Probability				
		1: Very Low	2: Low	3: Medium	4: High	5: Very High
Impact	1: Very Low	-	-	-	-	-
	2: Low	-	F	-	H	M
	3: Medium	J	-	P	G	L
	4: High	E, I	A	Q	D	K
	5: Very High	B	C	R	N	O

Tab. 4.7: Risk matrix for human-robot interaction

Risk categorization according to the 4Ts strategy:

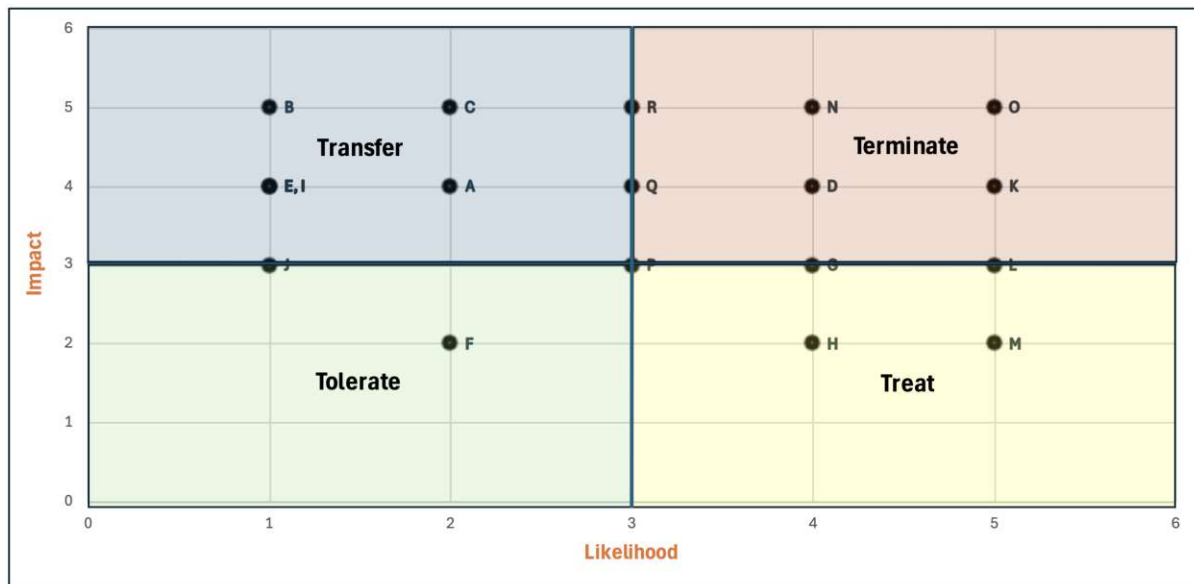


Fig. 4.7: Risks according to the 4Ts strategies

The risk matrix assesses risks based on their likelihood and impact and categorizes them according to the 4Ts strategy (see 4.3.2):

- **Tolerate:** risks with low probability and minimal impact, such as lack of interest from planners (A). These do not require immediate action as their impact on the project is negligible.
- **Transfer:** risks with high impact but low to medium probability, such as cybersecurity risks (B) or lack of standardization (F). These should be mitigated by external experts or insurance solutions.
- **Treat:** risks with high probability but medium to low impact, such as sensor failure (H) or incompatibility with existing construction methods (L). These should be addressed through targeted measures such as technological adaptations or training programs.
- **Terminate:** risks with a high probability and significant impact, such as environmental influences (K) or unexpected worker behavior (O). These require concrete measures to eliminate or minimize them, including improved planning, enhanced safety protocols and specialized training.

It is important to recognize that the risks in the Treat category are mainly technological, whereas the factors in the Terminate category are mainly related to the environment and working conditions on site.

4.5.4 Protective Separation Distance

As highlighted in section 2.2.4, ergonomics plays a crucial role in the interaction between workers and other elements of the working environment. Therefore, consideration of workplace conditions is equally important.

Factors such as lighting, air quality, climate, noise control, breaks, safety distances, and many other ergonomic aspects are very important to optimize safety on construction sites.

Some workers on the site do not work directly with the robot. Therefore, it is essential to establish a clear separation between these people and the robot's work area. This paper will look at the issue of safety distances in more detail.

First, as mentioned above, it is important to ensure sufficient clearance to prevent hazards such as crushing and shearing.

In addition, it is essential to define the robot's work area using a protective separation distance. This distance is defined in ISO/TS 15066 as: "The shortest permissible distance between any moving hazardous part of the robot system and any person in the shared work area." [14, p. 2]

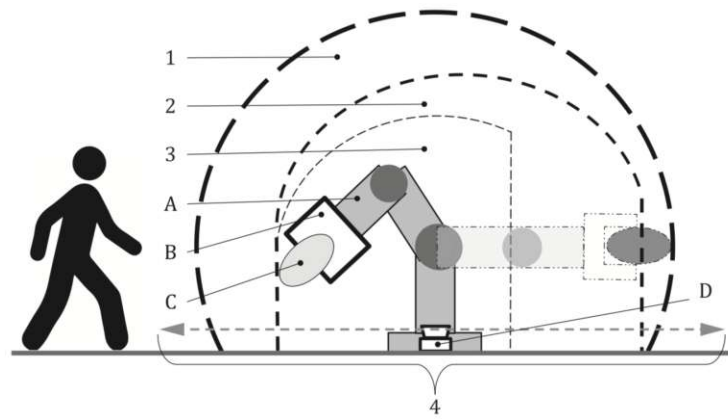


Fig. 4.8: Illustration of spaces [54, Annex-B]

The safety distance can be calculated using the following formula [14, pp. 11–14]:

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \quad (4.1)$$

Where:

- S_h : The operator's position change. This value depends on the operator's speed over time in the direction of the robot system and can be calculated as:

$$S_h = \int_{t_0}^{t_0+T_r+T_s} v_h(t) dt \quad (4.2)$$

Where:

- t : integration variable
- T_r : response time of the robotic system, which includes the time for detecting the operator's position, processing the signal, and activating a stop command.
- T_s : robot stopping time from the activation of the stop command to the robot stopping.
- v_h : speed of the operator within the collaborative workspace. This value can be positive or negative depending on the direction of movement.

Alternatively, the operator's position change can be approximated as a constant value using the average human walking speed (1.6 m/s):

$$S_h = 1.6 \cdot (T_r + T_s) \quad (4.3)$$

- S_r : distance depending on the reaction time of the robot. This distance can also be constant or variable and depends on the speed of the robot (v_r). It can be calculated using:

$$S_r = \int_{t_0}^{t_0+T_r} v_r(t) dt \quad (4.4)$$

or:

$$S_r = v_r(t_0) \cdot T_r \quad (4.5)$$

- S_s : stopping distance of the robot system. This value depends on the speed of the robot (v_s) from the moment the stop command is activated until the robot comes to a complete stop. It can be calculated as:

$$S_s = \int_{t_0}^{t_0+T_r+T_s} v_s(t) dt \quad (4.6)$$

- C : penetration distance or reach, which describes the distance a body part moves into the sensor field before being detected. This value is defined in ISO 13855 and varies depending on the body part, the detection area, and the approach direction [74, p. 37].
- Z_d : positioning uncertainty of the operator, as provided by the sensor system.
- Z_r : positioning uncertainty of the robot system, which depends on the accuracy of the robot's position measurement.

The values for Z_d and Z_r should be provided by the manufacturer and depend on the type and accuracy of the sensors.

Example Calculation for ABB IRB 1090

- $v_h = 1.6$ m/s: Average walking speed of a human being.
- $T = T_r + T_s = (0.2 + 0.1) = 0.3$ s: Total reaction time of the robot (0.2 and 0.1 seconds are assumed values) [75, p. 4].
- $S_h = 1.6 \cdot 0.3 = 0.48$ m.
- $v_r = 250^\circ/\text{s} = 2.53$ m/s (calculated using a radius of 0.58 m, values from ABB IRB 1090 product specification) [76, pp. 41, 46].
- $S_r = 2.53 \cdot 0.2 = 0.51$ m.
- $S_s = 0.4$ m (assumed value).
- $Z_d = 0.05$ m (assumed value).
- $Z_r = 0.03$ m (assumed value).
- $C = 0.85$ m (reach distance of the shoulder) [74, p. 104].

The final calculation gives a total safety distance of:

$$S_p = 0.48 + 0.51 + 0.4 + 0.85 + 0.05 + 0.03 = 2.32 \text{ m} \quad (4.7)$$

This value is based on the length of IRB1090's fully extended arm and requires a safe working area of:

$$A_W = 2.32 + 0.58 = 2.90 \text{ m} \quad (4.8)$$

Within the safety area, the robot must react according to the applicable safety regulations to ensure that there is no risk in the work environment. Possible responses include:

- Reducing speed to a safe level.
- Stopping the robot.
- Switching to a cooperative mode.
- Issuing warning signals in the form of visual, auditory, or haptic cues to alert the person.
- Adjusting the robot's path to avoid the person, thus preventing a collision.
- Other measures.

4.6 Summary of Chapter 4: Health & Safety in HRI on Construction Sites

Chapter 4 addresses the safety-related challenges and solutions associated with human-robot interaction (HRI) on construction sites. It aims to answer two key research questions:

- **How does human-robot interaction affect the overall safety culture on construction sites?**
- **What methods can ensure a safe workflow in the context of human-robot interaction on construction sites?**

The chapter begins by outlining typical categories of construction site accidents and identifying the specific safety risks associated with HRI. According to DIN EN ISO 12100, risks may arise from both direct and indirect interaction with machines. Robotic integration introduces additional hazards, including:

- Physical risks (e.g., injuries),
- Attentional risks (e.g., distraction),
- Psychological risks (e.g., stress, anxiety).

This is followed by an overview of key international safety standards:

- ISO 12100 (general machinery safety),
- ISO 15066 (collaborative robotics),
- ISO 10218-1 and -2 (safety requirements for industrial robots).

Recognizing that construction sites are dynamic and unpredictable environments, the chapter also examines local legal safety regulations—particularly §§18 and 19 of the Austrian Labor Inspection Act—which address unique site-specific factors such as:

- Visibility conditions,
- Weather impacts,
- Load movements of heavy equipment (e.g., cranes, excavators).

The chapter then introduces risk analysis and assessment methods, with a focus on:

- FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – breaking down systems into subsystems to detect possible failure modes.
- HAZOP (Hazard and Operability Analysis) – a team-based method using "guide words" to identify deviations from intended behavior

To support decision-making, a risk matrix is employed to classify risks based on likelihood and impact. Countermeasures are categorized using the 4Ts strategy:

- Tolerate,
- Transfer,
- Treat,
- Terminate.

Further, the chapter discusses mitigation measures that fall into two categories:

- Inherently Safe Design (e.g., size and materials of robots),
- Safeguards (e.g., limit switches, LiDAR sensors) and Complementary Measures (e.g., defined safety zones, alerts).

This part presents the answer for the first research question and concludes that construction robotics introduces new dimensions of safety thinking—based on experiences from industrial automation—which may reshape the construction industry’s approach to risk and protection.

The final section of the chapter proposes practical measures to facilitate the safe integration of robots on construction sites. Building on previously discussed standards and assessments, new construction-specific safety guidelines for robotics are suggested.

Using the FMEA and HAZOP methods, potential risks are identified and matched with suitable mitigation actions. These are visualized in a risk matrix, which helps prioritize reaction according to the 4Ts strategy.

Additionally, based on ISO 15066, the chapter provides a worked-out example of calculating a safety distance around a robotic arm. This calculation helps define a dynamic safety area, enabling planners and manufacturers to build and plan the robotic system and how it can respond safely to human proximity.

Finally, the chapter answers the second research question by presenting recommendations and examples of good practice, forming a foundational approach to safe human-robot collaboration in construction. These depend on cross-industry experiences adapted to the unique challenges of construction sites.

Chapter 5

Acceptance and New Roles through the Integration of Robots

The introduction of robotics in the construction industry transforms work processes and creates new skill requirements for construction workers, which makes new training methods necessary. This change is leading to the restructuring of existing job profiles and work tasks. Targeted training programs for construction workers are essential to ensure successful human-robot interaction (HRI).

First, it analyses the transformations brought by integrating construction robots and how traditional job roles and responsibilities are changing as a result.

It then examines the acceptance of robotics among construction workers, considering factors such as age, experience, cultural background, and media influence. Challenges to positive attitudes, including safety concerns and fears of rapid change, are also considered.

Another focus is on existing training concepts and methods, analyzing theoretical and practical approaches. An example of a master's program at RWTH Aachen University specializing in construction robotics is also presented.

Building on this foundation, the chapter suggests future training methods and work requirements, including proposals for new job roles, continuing education programs, and strategies to enhance human-robot collaboration.

Finally, the chapter presents a proposed course that could be integrated into a master's program. This course, entitled "Fundamentals of Construction Robotics", aims to prepare civil engineers for the integration and application of robotics in construction.

5.1 Impact of Robotics on Roles and Tasks

Robots are increasingly being implemented and developed in the construction industry and on construction sites. This is noticed by the different applications of robots in the construction industry (see 2.3).

To date, robots have mainly been developed for specific tasks, especially for the ones that are repetitive and easy to automate. This relieves workers of specific tasks on construction sites. Below, we analyze some applications to explore potential changes in job roles:

- Boston Dynamics Spot [39]: the robot performs tasks such as
 - Site Inspection: Boston Dynamics Spot can navigate complex construction environments, capturing high-resolution images and 3D scans to monitor progress. Its maneuverability allows it to access areas that are difficult or unsafe areas for humans.
 - Data Collection: the robot is equipped with sensors, Spot collects data that supports decision making and improves the accuracy of project management. This data-driven approach increases the efficiency and predictability of construction operations.
 - Safety Monitoring: Boston Dynamics Spot assesses hazardous areas, minimizing risks to human workers and ensuring compliance with safety regulations. By identifying potential hazards early, it helps prevent accidents.



Fig. 5.1: Boston Dynamics Spot ¹

¹Fig 5.1: <https://bostondynamics.com/news/boston-dynamics-expands-global-sales-of-spot-robot/>

- HP SitePrint [40]: the robot performs tasks such as
 - Floor Layout Marking: the robot prints precise layout designs directly on floors, ensuring accuracy and consistency across the site.
 - Complex Geometry Printing: SitePrint can handle complex designs that are difficult to replicate manually, significantly reducing errors and rework.
 - Time Saving Benefits: the robot speeds up the layout process, allowing other construction activities to start sooner.



Fig. 5.2: HP SitePrint ²

- Schindler R.I.S.E [42]: the robot performs the following tasks
 - Drilling and Anchor Placement: the robot performs accurate drilling and anchor placement for elevator guide rails, ensuring consistency and reducing human error.
 - Guide Rail Installation: it aligns and secures guide rails with high accuracy, achieving a level of precision that is difficult to copy manually.



Fig. 5.3: Schindler R.I.S.E ³

²Fig 5.2: <https://www.hp.com/us-en/printers/site-print/layout-robot.html>

³Fig 5.3: <https://www.schindler.at/de/innovationen/schindler-rise.html>

In all these examples, robots are performing physically demanding tasks. In the first example, inspectors eliminate labor-intensive site visits. HP SitePrint handles the physical aspect of on-site surveying. Schindler R.I.S.E minimizes the traditional manual labor required for elevator installation.

Differences due to the introduction of robots can be observed. Firstly, there is an increase in the amount of work that needs to be done with the machine for the process to be successful with (semi-) automated systems. This means that processes change and more data is required and processed. [77, pp. 3–7]

As a result, workers can focus on other tasks and new activities such as data analysis, management, supervision, robot maintenance, or design optimization. Therefore, we may see a new type of construction site and new roles in the industry. These changes in tasks will change some job titles on construction sites that we already know as new skills and training become essential.

This effect can also extend to other industries, where the demand for robot programmers, machine builders and other roles related to construction robots can emerge or increase due to growing needs.

5.2 Attitudes and Acceptance of Construction Workers

5.2.1 Factors Influencing Workers' Attitudes and Acceptance

If implemented correctly, robots offer many benefits. However, several issues need to be considered to ensure successful integration.

Robots operate in environments populated by human workers, which has a psychological impact that can influence the success of their adoption. A key factor is employees' acceptance of this new technology.

To achieve this, companies need to understand the expectations and needs of their crew. According to DIN 45003:2021, these include [78, pp. 2–3]:

- Financial security
- Social interaction and support
- Personal development
- Equal opportunities and fair working conditions

Every person has a unique personality that influences thinking, emotions, and behavior in different environments, such as the workplace. For example, open-minded people are often creative and open to change, while people may exhibit nervousness or anxiety [49, pp. 75–77].

People are influenced by external factors and their internal personalities, which can result in psychological stress - either positive (e.g., motivation) or negative (e.g., stress) [22, p. 199].

Factors influencing robot acceptance:

- **Age:** there is no universally defined age range for the latter group, but personality assessment methods can reveal characteristic differences between different age groups. For example, openness, a key feature accepting new technologies, tends to decrease with age.

In the human-robot interaction (HRI) context, younger workers may generally be more able to accept and trust robots. In contrast, older workers may feel threatened or excluded due to their long experience, especially when robots take over their roles. This may lead to concerns about their professional future and a loss of control over their work, making the integrating robots a source of stress.

Therefore, establishing appropriate training and communication channels on construction sites or other workplaces is essential to promote acceptance and mitigate potential conflicts. [49, pp. 78–79]

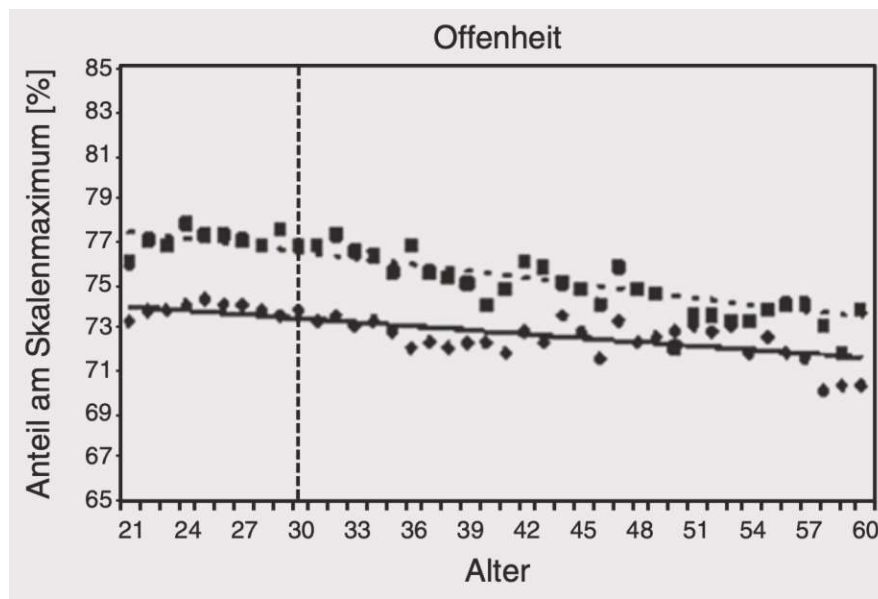


Fig. 5.4: Openness scale across different ages for women and men [49, p. 77]

- **Experience:** it refers to the previous knowledge/background of workers with robots. Workers without previous experience with robots need appropriate training and information to ensure safe and effective collaboration. Those with positive experiences may recognize and appreciate the benefits of robots, especially if they do not threaten their job security. Conversely, negative experiences may arise from various micro-level factors such as noise, radiation, or potentially harmful materials associated with robots. These issues can cause anxiety and have a negative psychological impact on workers [49, pp. 277–378].

It is, therefore, essential to identify the causes of negative experiences, address them transparently and implement measures to turn psychological distress into positive perceptions [22, p. 200].

- **Culture:** humans grow up in specific environments from where they get their beliefs, values and behaviors. As robots become more humanoid, the question arises as to whether the development of such machines will make humans consider themselves as "creators" - a concept that is seen as taboo in many cultures and religions. This could lead to a lack of acceptance towards robots in society and workplaces such as construction sites.

Another issue raised by the development of robotics is whether robots should be given rights in the future. This raises several ethical questions, the answers to which vary from one cultural background to another. Therefore, it is important not to underestimate the influence of culture, but to respect it in order to integrate robots into different cultural environments or work contexts successfully. [79, p. 1503]

- **Media:** media serve as a primary source of information about the world and shapes our opinions. Therefore, it is important to rely on trustworthy sources. This raises concerns about whether the news we consume is real or manipulated. Studies show that 60% of the world's population is uncertain about the authenticity of their media content - in the US, the figure is 72% and in Africa, it is 81% [80, p. 10].

Media also play a crucial role in shaping opinions about robots, as most people have only experienced robots through media portrayals. Robots are often represented in contrasting ways - either as a threat or a valuable help to humanity. There is a marked difference between "Western" and "Japanese" media. While robots are often shown as villains in Western media, such as in **Terminator**, they are more likely to be shown as helpers of humanity like **Astro Boy** in the Japanese media. This may explain why robots are more accepted in Japan than in the West [3, pp. 230–233].



Fig. 5.5: Astro Boy ⁴

In addition, studies are now being conducted to assess workers' acceptance of robots. However, the results of such studies can vary depending on whether employers or independent parties commission them. Therefore, it is important to ensure that these studies are executed objectively and focus on workers' needs [81, p. 15].

The list of factors influencing people's opinions about robots is dynamic and may change over time and place. As mentioned earlier, people often express their reactions to such influences through emotions, which indicate their state of mind and possible future actions. Negative emotions resulting from such influences can have serious consequences - for example, depressed workers who isolate themselves or even commit harmful acts against themselves, robots, or colleagues on the site. This is why it is important to address these issues to identify and mitigate potential risks early. [3, pp. 150–152]

5.2.2 Challenges in Robot Acceptance and Potential Fears

Looking at table 2.4, we can see numerous barriers to integrate robots into construction sites. The following reasons are particularly relevant to the acceptance of robots from the workers' perspective:

- **Safety concerns:** in the context of human-robot interaction (HRI) on construction sites, there are concerns that robots could be injure workers. Therefore, employers must set uniform safety standards that workers must follow. This goes beyond the safe design of the robot.
- **Emotional stress due to fear of robots replacing workers (Worries of workers):** technological development in the car manufacturing industry, represented by the deployment of robots, has met with resistance, with many fearing the loss of their jobs. The question is whether robots have actually led to job losses.

⁴Fig 5.5: [https://astroboy.fandom.com/wiki/Astro_Boy_\(character\)](https://astroboy.fandom.com/wiki/Astro_Boy_(character))

Many factors need to be taken into account to answer this question, such as the size of the company, the potential for automation, which activities or professions are affected, and so on. However, there is still no clear answer to the main question.

On the other side, it is important to mention that using robots also creates new job opportunities that require higher qualifications but also offer better professional benefits. Furthermore, a clear difference between job loss and replacement should be made [6, pp. 186–188].

- **Lack of acceptance:** it has many reasons and factors (see 5.2.1). However, as already mentioned, it is crucial to understand and address the needs and expectations of the workers, according to ISO 45003:2021.

Acceptance leads to trust in robots and promotes effective human-robot collaboration. However, it is important to remember that too much and too little trust can have negative effects. Too much trust can lead to people becoming dependent on robots, while too little trust can lead to robots being used infrequently or not at all [10, p. 202].

- **Rapid changes and modifications due to high technological advances (New and changed project roles):** robots are tools that allow people to maximize their capabilities by replacing physical labor. These tools are evolving rapidly and will soon become everywhere. Therefore, it is important to be prepared. This rapid development can cause anxiety among workers who may not be able to manage with these technologies [82, p. 1500].

It is crucial to focus on human resource development by taking measures to adapt workers' skills to the new requirements [27, p. 104].

This can be achieved through extended training programs. On the manufacturer's side, there should be a recognition that the success of using robots depends mainly on people and that people should be at the center of development [83, p. 281].

- Another aspect raises **the existential question of humanity due to robots**. Scientists propose three theses for the consideration of robots:
 - "Robots are just machines": in this case, robots cannot be held responsible for potential dangers because they are designed and programmed by the manufacturer.
 - "Robots as artificial moral agents": robots are seen as moral agents, capable of performing moral actions, but still lacking free will. However, it can be argued that robots have no initiative and that moral responsibility ultimately lies with humans. It is also important to set clear technical boundaries.
 - "Robots are the evolution of a new species": in the future, robots may develop consciousness and their own morality. However, there is no clear evidence that robots will be able to develop consciousness in the near future. It must also be emphasized that robots have been developed to assist humans, not to compete with them. [79, pp. 1502–1503]

In conclusion, proactive strategies are essential to overcome these challenges. Transparent communication about the long-term benefits of robotics, such as reduced workload and improved working conditions, can decrease fears. Involving employees in the planning and implementation phases of robotics adoption can also encourage a sense of ownership and partnership, which can lead to a more positive outlook. By addressing biases and fears, the construction industry can create a supportive environment for the proper integration of robotics into the workforce.

5.3 Training Concepts and Methods for Successful HRI

Education serves as a fundamental basis for entering the world of work. After successfully completing training programs, an individual should be able to perform the given tasks competently. Training provides knowledge, instructions and guidelines for the professional performance of specific tasks and therefore contributes to the professional development of employees.

There are different methods and principles for getting this knowledge. The two main approaches to teaching can be distinguished as follows: The first approach is based on theoretical foundations, while the second is based on practical experience. These two concepts are often perceived as opposites, leading to a debate about the more effective method. However, this perspective is incorrect, as theory and practice are not opposing sides but rather complementary.

Theory involves analytical reflection that serves as a guide, while practice directly applies that knowledge. While theory focuses on general principles, standard cases, and abstract concepts, practice deals with specific individual cases and concrete applications.

The challenge is integrating these two approaches - moving from the general to the specific and from the rule to the individual case. This transition cannot be mechanical but requires a cognitive and adaptive transformation. Theoretical knowledge must be adapted and reinterpreted to meet practical needs.

Neither method is superior to the other, but they are complementary and necessary to achieve optimal learning outcomes. [84, pp. 133–138]

A good example of integrating new knowledge into the education system is the new M.Sc. Construction and Robotics program at RWTH Aachen University.

The aim of this master's program is to provide architects and civil engineers with the necessary knowledge to work with new technologies such as construction robots.

The master's program consists of mandatory and optional modules ⁵. The mandatory modules focus on the latest technologies and planning methods for the development of digital building production and construction processes and their interrelationships. Current problems and challenges in the implementation of these technologies are also addressed. The optional specializations are categorized as follows:

- Innovation and innovation management
- Foundations of relevant disciplines:
 - Architecture fundamentals
 - Civil engineering fundamentals
 - Fundamentals of mechanical engineering
- Advanced courses in relevant disciplines:
 - Civil engineering
 - Computer engineering

⁵The program is currently not being offered.

- Mechanical engineering
- Architectural studies
- Integrated projects
- Master's thesis

The master's program lasts 4 semesters and is taught in English. Upon completion of the program, students will receive 120 credits. Upon successful completion of the program, graduates will be able to collaborate across disciplines to establish new construction tools, such as robots, on construction sites, thereby driving innovation in the construction industry. [85] [86]

Modern teaching methods and the use of new technologies: different didactic approaches are available for delivering training content, including classical and innovative methods. In particular, it is worth considering new technologies such as Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR), which can significantly enhance training in the field of human-robot interaction.

- VR allows the risk-free simulation of dangerous or complex scenarios, letting learners gain hands-on experience without being exposed to real hazards.
- AR allows overlaying real construction site situations with virtual robotic systems to train and optimize workflows interactively.



Fig. 5.6: Simulated training facility for construction machinery in VR ⁶

These technologies not only deepen the understanding of new work processes but also increase the confidence of construction workers in working with robots. In addition, they offer companies the opportunity to reduce training costs by replacing part of expensive physical simulations or installing costly robotic systems. [87]

⁶Fig 5.6: <https://mixed.de/meta-quest-in-dig-vr-erlebt-ihr-den-alltag-auf-der-baustelle-in-virtual-reality/>

5.4 Suggestions for New Roles, Skills and Strategies for HRI

5.4.1 Examples of New Job Profiles in Construction

Working with robots requires a new type of expertise and training, giving participants new titles and responsibilities. The use of robots on construction sites is a new aspect of the construction industry. Therefore, there is currently no definitive list of job profiles that have emerged as a result. However, the development of such professions should be promoted through cooperation between government institutions, trade unions and companies based on the experience gained.

Traditional professions are being affected by assisted systems and digital control, automated processes, and the increased use of BIM and other digital planning systems [77, pp. 3–7].

Based on section 3.2 and by comparing developments in the construction industry with other sectors and analyzing new tasks, we can already identify some potential job profiles that could emerge in connection with robotics on construction sites:

- **Robot operator:** the operator is responsible for operating, monitoring, and maintaining robotic systems on-site. This role requires special expertise and the ability to respond quickly to operational challenges.
- **Helper:** a support role on construction sites, could be a less experienced operator.
- **Maintenance inspector:** the inspector is responsible for the maintenance of robotic systems, especially off-site and on-site, if needed. This role involves planning and coordinating maintenance schedules with construction projects to ensure the robots remain fully operational.
- **HRI safety manager:** the manager focuses on implementing safety protocols for human-robot collaboration. This role includes conducting risk assessments, planning training content for workers on safety standards, and ensuring compliance with regulatory requirements.
- **HRI trainer/psychologist:** the person is responsible for training workers on how to work with robots. This includes giving instructions, addressing potential psychological risks, and providing support and advice in this area.
- **Automation specialist:** the purpose is to develop and optimize robotic processes. This role requires skills in programming, systems integration and data analysis. This job highlights the shift towards a more technology-oriented workforce in the construction industry.
- **Robot-Oriented Architect:** this role refers to an architect specializing in designing and planning buildings that are optimized for the construction tasks of the used construction robots. The aim is to ensure maximum efficiency cost, time, productivity, and aesthetics efficiency.

Many of these 'new' jobs on construction sites do not involve physically demanding tasks requiring significant amounts of energy. Instead, they emphasize technical knowledge, problem-solving skills, and the ability to integrate man and machine effectively.

The list of professions can be adapted and expanded depending on the application and type of robot. Likewise, roles from other fields could become more integrated into the construction process. For example, more programmers could increasingly work in construction companies and contribute to the development of robotic systems.

Additionally, traditional roles such as master builder and construction process planner may need to adjust their approaches. Integrating robotic systems may require traditional professions to develop new planning strategies, rethink workflows, and collaborate more closely with technical specialists.

Furthermore, advancements such as introducing artificial intelligence (AI) on construction sites or in robotic systems will require professionals with specialized knowledge and could lead to additional new roles such as cybersecurity specialist, ethical robotics consultant, or BIM robotics coordinator. These potential jobs could play a crucial role in the future development and integration of robotics and automation in the construction industry.

With targeted training programs and support from governments, companies, and trade unions, these occupations can not only be defined but also established in the long term.

5.4.2 Analysis of Requirements and Skills Necessary due to HRI

Interactions with robots on construction sites vary according to the roles and responsibilities of the people involved. This means that some workers are more involved with the robots than others. For example, the operator works directly with the robot daily and is responsible for its results. In this case, the operator must have the necessary knowledge and experience to perform his tasks successfully. Specific skills are required, which may be new in the context of construction processes. The same applies to other roles. Therefore, the skills required to perform tasks differ depending on the worker's role. These skills can be categorized as follows:

Job Title	Activity	Required Skills (must to have)	Desired Skills (nice to have)
Operator	Operating, monitoring, and maintaining robotic systems on construction sites.	• Technical knowledge of robotics (T) • Quick problem-solving ability (S) • Basic programming and system control knowledge (T)	• Experience in the construction industry (C) • Familiarity with specific robot models (T) • Communication skills for team collaboration (S)

Job Title	Activity	Required Skills (must to have)	Desired Skills (nice to have)
Helper	Assisting the operator with robot operations and supporting tasks on the construction site.	• Basic understanding of construction processes (C) • Teamwork skills (S) • Willingness to learn new technologies (S) • Awareness of safety protocols (H)	• Initial experience with robotic systems (T) • Physical fitness for construction work (O)
Maintenance inspector	Planning and performing maintenance on robotic systems, coordinating maintenance schedules with construction timelines.	• Strong knowledge of mechanics and electronics (T) • Experience in machinery maintenance (T) • Ability to plan and organize maintenance tasks (S)	• Knowledge of predictive maintenance technologies (T) • Understanding of construction workflows (C) • Problem-solving skills for technical issues (T)
HRI safety manager	Developing and implementing safety protocols, conducting risk assessments, and ensuring regulatory compliance.	• Deep understanding of occupational safety and health standards (H) • Experience in risk assessment (H) • Knowledge of legal and regulatory frameworks (H)	• Awareness of robotics-related hazards (H) • Training program development skills (S) • Strong communication skills (S)

Job Title	Activity	Required Skills (must to have)	Desired Skills (nice to have)
HRI trainer/psychologist	Training workers to interact with robots, addressing psychological risks, and offering support.	• Experience in adult education (O) • Knowledge of psychology in human-machine interaction (O) • Ability to simplify complex information (S)	• Familiarity with specific robotic systems (T) • Empathy and communication skills (S) • Ability to develop tailored training programs (O)
Automation specialist	Developing and optimizing robotic processes, including programming, system integration, and data analysis.	• Advanced programming skills (T) • Experience in system integration (T) • Data analysis expertise (T)	• Understanding of construction processes (C) • Creativity for innovative solutions (S) • Project management skills (O)
Robot-oriented architect	Designing and planning buildings optimized for the construction tasks of robots.	• Architectural expertise (C) • Knowledge of robotics (T) • Building Information Modeling (C)	• Cross-disciplinary collaboration (S) • Innovative thinking (S) • Sustainability practices (C) • HRI and ergonomics knowledge (T, H)

Tab. 5.2: Roles, activities, and skills in HRI on Construction Sites

These skills could be divided into the following categories:

- Technical skills (T): this includes the knowledge and practical skills required to operate the robot system efficiently. It includes understanding how the machine works and its structure and doing minor repairs when necessary.
- Soft skills (S): these include interpersonal skills that are essential for teamwork and effective communication. Such skills are critical for professional interaction with both people and technology.

- Construction and architectural skills (C): this category includes specialized knowledge of construction processes and building design. Such a background can significantly improve the quality of work.
- Health and safety knowledge (H): this includes familiarity with safety standards, proper implementation, and assessing and mitigating risks. Health and safety is critical to the success of a project and helps build acceptance & trust among workers in their interactions with robots.
- Other skills (O): like basic skills that do not fit into the other categories but are still essential for completing tasks. Such skills are often gained at school, while other skills may be developed through study, practical experience, or further training.

Technical and soft skills tend to be as important as the knowledge of construction and architecture. This suggests that more attention should be paid to these skills in education systems, and a new focus should be integrated into construction and architecture curricula.

5.4.3 Training Content and Path Development

Training content should be aligned with the specific tasks that an individual will later perform. A well-structured training should therefore cover both general principles and specialized information related to the job and the use of robots. Training can be divided into modules:

- Technical information on the robot:
 - Design, materials, technical specifications, dimensions, etc.
- Task-specific content:
 - Depending on the type of robot, this may include construction aspects such as tolerances, material strengths, and quality standards.
- Safety and environmental aspects:
 - Safety standards and concepts, interaction with other workers (soft skills), health and safety regulations, etc.

An important aspect of designing training content is defining clear learning objectives that should be achieved on completion. Achievement of these objectives is usually confirmed by a certificate or diploma, which grants the right to practice the profession.

Continuing education and career development: education should not be seen as a closed process, especially in a world where technology and robotics constantly evolve. Therefore, continuous training is essential to keep workers updated regularly. This is achieved through frequent feedback loops and curriculum updates.

A career path can start with professional training and progress to advanced academic degrees such as a master's or PhD in construction robotics or HRI. Lifelong learning ensures that skills are kept up to date and qualifications are continually upgraded [61, pp. 152–153].

If there is an agreement on one idea (see 3.2), it is that low-skilled workers will be most affected by the introduction of robots. This will require them to develop their careers, which can be achieved through training or additional education.

This increases their chances for employment and has additional benefits, such as higher wages and better retirement benefits. It also contributes to workplace safety and increases acceptance and confidence in using robotics. Workers also feel more involved in the innovation process, which enhances their professional identity and self-fulfillment.

5.4.4 Course Example for Universities and Universities of Applied Science

Students are the customers of universities, and to keep up with technological advances and changes in the construction industry, universities should offer courses that prepare students for these developments.

Given the increasing integration of construction robots in industry and the growing attention to automation, AI and robotics, the program could introduce a new course. This would not only broaden students' academic horizons, but also better prepare them for the evolving needs of the industry.

Course proposal: Fundamentals of Construction Robotics:

Given the international relevance of the topic, the course could be offered in English and cover the following content:

- Basics of ergonomics and site setup: ergonomics focuses on adapting working conditions to human needs to improve efficiency and health by minimizing injury and strain. Site setup involves planning and organizing construction sites to ensure a smooth workflow, ultimately increasing site efficiency.
- Introduction to standards and regulations: an overview of relevant safety standards for machinery and site operations. These standards are essential for the approval and implementation of construction robots.
- Fundamentals of health and safety (H&S): the focus is on measures to protect the health and safety of workers on construction sites, methods of risk assessment, and insights into available technologies and methods to minimize risk.
- Process design fundamentals: planning and optimizing workflows to improve efficiency and quality. This aspect explores how the integration of construction robots can lead to productivity gains.
- Introduction to construction robotics: technical knowledge of construction robots, their functionalities, potential applications and limitations.
- Field trip: a visit to a construction site where robots are in use, giving students a practical insight into the theoretical content discussed in class.
- Assessment:
 - Submission of a reflection paper: students will reflect on their experiences, thoughts and suggestions from the field trip.
 - Submission of an example of setting up a construction site with a robot: as part of an exercise, students will design a site setup for different construction phases, considering key aspects such as safety zones, robot movement paths and transport routes.

- Process visualization in different construction phases: to complement the site setup, students will create a process visualization using modeling methods such as BPMN2.0. They will be given relevant information about the robot, its technical requirements and the necessary data and tasks on site.
- Presentation of the submitted work: this explains the submitted tasks and provides students with the opportunity to present their results to others. This not only deepens their understanding of their own work but also strengthens their presentation skills.
- Improving the course: to ensure that the course remains at the forefront of technological advances, continuous optimization is essential. This could be achieved by:
 - Incorporating new standards and regulations
 - Incorporating new examples of emerging construction robots
 - Expanding the scope to include robotics in additional construction phases and not being limited to execution phase (e.g., design, tendering).

Attached you will find a sample concept with the calculation of the workload for the course, where each unit corresponds to 25 hours. Based on this estimated workload, a 3.5 ECTS course could be offered to students (see appendix **D**).

Thematic block		Details	Type	Lecturer	Roll	Number Unit á 3Std	Unit in Total	Day (Example)	Dates (Example)	Number of the Unit	Comment			
A	Kick-off	General Informations about the course	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	1	Monday	03.03.25	1				
B	Basics of Ergonomics and Site Setup	Basics of Ergonomics	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Friday	07.03.25	2				
		Basics of Site Setup	Lecturer-1		1	3								
C	Introduction to Standards and Regulations	Machinery Standards and Regulations	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Monday	10.03.25	4				
		Standards and Regulations in the Building Sector				1						Friday	14.03.25	5
	Reservation Date					0	0	Monday	17.03.25	-				
D	Fundamentals of H&S	H&S Standards and Regulations	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-2	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	3	Friday	21.03.25	6				
		Risk Assessment and Analysis				1						Monday	24.03.25	7
		Methods of Risk Reduction				1						Friday	28.03.25	8
E	Process Design	Basics in Process Design (BPMN2.0)	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-3	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Monday	31.03.25	9				
		Practical Methods and Examples of Process Design				1						Friday	04.04.25	10
G	Basics in Construction Robotics	Technical Knowledge, Potential Application, and Limitations	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-4	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Monday	07.04.25	11				
		Technical Knowledge, Potential Application, and Limitations				1						Friday	11.04.25	12
Easter Vacation (From Monday, April 14, 2025 to Sunday, April 27, 2025)														
H	Field Trip	Construction Site Visit	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	1	Monday	28.04.25	13				
I	Submission of Reflection Paper	Submission			Student	0	1	Friday	02.05.25	-				
	Submission of Construction Equipment Plan					0						Wednesday	07.05.25	-
	Submission of Process Visualization					0								-
	Presentation					Lecturer-1						Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	Friday
Sum							14							

Fig. 5.7: Fundamentals of construction robotics; course concept

5.4.5 Developing Strategies to Promote Human-Robot Interaction

A key element of any strategy is to define a clear objective. In our case, the goal is to enable successful collaboration between humans and robots on construction sites. An example of this could be developing a strategy for the profession of robot operator. This strategy focuses on three key aspects:

- **The path to work:** as mentioned in previous chapters, using robots requires targeted training and education. Different methodological approaches can be followed, divided into several phases:
 - **Phase 1:** the first phase focus on theoretical foundations and simulations using augmented reality (AR) and virtual reality (VR). Participants learn about the design, motion principles, and functionality of the robot without actively operating it. In addition, general safety and first aid courses should be integrated into this part of training (see 5.3).
 - **Phase 2:** practical exercises in controlled environment - the second phase involves gradually increasing interaction with a robot model in a controlled environment. As confidence grows, practical tests are executed on construction sites to demonstrate the benefits of robotics in real work situations.
 - **Phase 3:** real-world site testing - the intensity of interaction increases until operators are ready to work with robots on construction sites. After successfully completing the training and safe operation of the machine, participants are certified to work with robots on construction sites.

Experienced operators can supervise and continuously improve this training through regular feedback sessions with construction workers.

Building the operator's trust in the robot during the training is essential. This can be achieved by positioning robots as supportive tools rather than threats. They should not be seen as competitors to construction workers, but as technologies that take over dangerous or physically demanding tasks, thereby increasing safety and efficiency. Using collaborative robots (Cobots) that work closely with humans promotes more positive perceptions and builds trust.

The design of the robot and its interaction channels play a crucial role in successful collaboration. According to macro-ergonomic principles (see 2.2.4), the robot should be designed in such a way that operators can easily recognize and perform basic maintenance tasks.

This can be achieved through clear drawings and step-by-step instructions. In addition, a support system should be in place to provide technical assistance, either through on-site support or a hot-line.

The operation of the robot must also be user-friendly. A mobile application in the operator's language, together with intuitive touchscreen interfaces, makes the interaction easier. Robots could also be controlled and monitored via smartphones. In addition, their programming and capabilities should be designed to facilitate collaborative work. For example, intuitive navigation systems or flexible adaptation to the dynamic conditions of construction sites could improve efficiency and acceptance.

- **During the actual work:** there are several aspects to consider. Designers need to look at the planning of construction sites and work preparation puts effort into standardizing operative processes as far as possible to enable automation. Integrating and linking BIM models can help visualize workflows and optimize construction progress. A seamless workflow can also be ensured through well-designed takt planning and lean approaches. Robots should be integrated into daily operations in a phased manner, allowing for gradual acceptance. Initially, they could be used for simple, repetitive tasks before gradually taking on more complex activities. Before work begins, it is important to ensure that all necessary safety protocols are in place and that workers have received appropriate training. This creates a safe working environment and increases confidence in the technology.

Another critical aspect of the work is communication with the robot. Visual and audible signals are essential for an easy interaction. Robots should indicate their operating status using color codes or LED displays, such as:

- Green for operational readiness.
- Yellow for a warning or pause.
- Red for malfunction or emergency.

Acoustic warning signals can alert workers to robot movements, while haptic feedback - such as vibrating wristbands or gloves - can provide additional safety measures.

- **After work:** two main aspects take priority:
 - Increasing worker confidence and motivation.
 - Continuous improvement of robot technology.

Regular feedback from operators is essential in order to identify challenges and develop solutions. This should be done in open discussions where mistakes and problems are discussed in a constructive way without assigning blame. Ongoing training and motivation methods ensure that workers feel involved in technological development. Success stories and positive experiences of human-robot interaction (HRI) can also help to reduce fears and increase employee motivation.

This approach can lead to long-term, successful collaboration between humans and robots on construction sites.

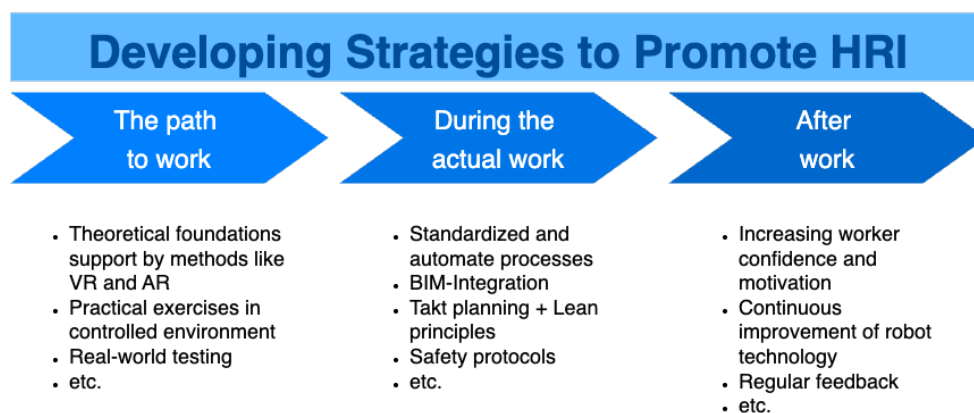


Fig. 5.8: Strategies to promote human-robot interaction

5.5 Summary of Chapter 5: Acceptance and New Roles through the Integration of Robots

Chapter 5 addresses the following research questions:

- **What factors influence the acceptance of using robots on construction sites, and how can these be improved?**
- **Which new roles are emerging from the integration of robots in construction, and how can people be prepared?**

The chapter begins with a theoretical foundation, demonstrating how robots—through concrete examples—take over certain tasks on construction sites. This shift allows human workers to focus on other responsibilities, requiring a rethinking and redefinition of existing roles to maintain productivity.

The chapter then explores various human-centered factors that influence acceptance. Empirical findings highlight the impact of (see 5.2.1):

- Age (younger workers tend to be more open-minded).
- Experience (past negative encounters reduce acceptance; these can be related to micro-ergonomic conditions like noise and vibration).
- Cultural background shapes attitudes toward technology and can vary between regions.
- Media play a central role in shaping these perceptions, influencing public trust and openness toward robotics in the workplace. Japan, for instance, typically shows robots as helpful companions, whereas in Western media, they are often represented as threats.

Before proposing solutions, the chapter discusses the emotional and psychological challenges workers face:

- Job insecurity and fear of replacement.
- Safety concerns, especially regarding trust in robotic systems.
- Adaptability stress, as workers fear being left behind in a fast-paced technological transformation.

To overcome these fears, the chapter stresses that robots should be framed as collaborative tools, not replacements and that safety remains a human-led responsibility.

Next, the chapter handles training strategies as a pathway to build acceptance and confidence. It highlights the complementary roles of theoretical and practical learning—both necessary to equip workers with the knowledge and experience needed to interact safely and effectively with robots. Modern tools like virtual reality (VR) and augmented reality (AR) can also support the training methods.

The second research question is addressed through suggestions of emerging roles resulting from robotic integration. New professions like robot operators and specialization courses within architecture and civil engineering are introduced. These roles require new technical and soft skills.

The chapter proposes a training curriculum covering:

- Robot design and technical specifications,
- Task-specific requirements (e.g., tolerances, materials, quality),
- Safety and environmental factors (regulations, human interaction, occupational health).

It emphasizes the importance of continuous education, supported by governments, professional interest groups (e.g., unions), educational institutions, and companies, to ensure workforce safety and sustainable adaptation.

To promote human-robot interaction (HRI), the chapter outlines strategic approaches, including:

- Transparent communication:
 - Clarity of purpose and function of robots
 - Information sharing
 - Openness about risks and changes
 - Trust building
 - Feedback mechanism
- User-friendly interfaces
- Emphasis on robotic systems as supportive tools
- Training programs that foster inclusion and participation

Finally, students should be prepared for the evolving construction industry and therefore, the chapter presents a course concept for universities and universities of applied science, aimed at future engineers.

Chapter 6

Productivity in Construction with Respect to HRI

The construction industry faces the demand to increase productivity while managing the growing labor shortage. In this context, the integration of robotics into construction processes is becoming increasingly important. This chapter examines the impact of human-robot interaction on productivity in the construction industry and highlights several key factors that determine this impact.

First, productivity and its metrics are defined, and the challenges of optimizing productivity on construction sites are discussed. Safety measures play a critical role, as well-organized safety measures can prevent accidents, improve employee acceptance and eventually increase productivity. In addition, psychological factors such as worker acceptance & trust in construction robots are analyzed, as these aspects significantly influence the successful implementation of robotic technologies.

Another focus is on the importance of training programs for the effective use of construction robots. Appropriate training can improve cooperation between humans and robots and thus increase productivity. This work also examines how robots affect productivity metrics such as speed, efficiency and quality. At the same time, the impact of robots on workers' health is considered.

Finally, a new definition for the factors of the "magical triangle" in construction is proposed that combines productivity, acceptance & trust and safety. The relationship between these factors is investigated to develop a theoretical understanding of the dynamics of human-robot interaction in construction.

6.1 Definition and Importance of Productivity

6.1.1 Introduction to Productivity in Construction

To evaluate how efficiently processes are being carried out, they need to be measured and analyzed. Construction productivity is a reference point for planning, estimating costs and optimizing workflows. Construction productivity is the relationship between outputs and inputs [88, pp. 51–52].

$$\text{Productivity} = \text{Output} / \text{Input} \quad (6.1)$$

Inputs could refer to materials, equipment, and other resources, and outputs in construction represent the completed construction work, even if they refer to an element or group of elements of the building. Depending on the factor being measured, productivity could be viewed in different ways, such as:

- Labor productivity: usually refers to the number of products produced by an employee in a given period.
- Capital productivity: the rate of return on capital invested.
- Material productivity: how many products are produced per unit of input material.
- Resource productivity: more than material productivity, considering transformed materials, waste, energy and more.
- Machine productivity: similar to labor productivity, but in this case, it refers to the hours worked by a machine (e.g. robot). [89, pp. 53, xxi]

However, the nature of work in the construction industry is such that productivity levels vary between project phases. Typically, the early phase involves setting up and adaptation, leading to lower levels of productivity. In the main construction phase, productivity levels peak, while in the final phase there is a decline due to reduced labor and detailed finishing work. Productivity is therefore considered to be a dynamic value.

$$\text{Productivity} = 1 / \text{Exp}_x \quad (6.2)$$

The site manager must ensure that these levels are optimized throughout these phases [88, pp. 51–52].

This means that the elements of the production factors (labor, materials, and machinery) are analyzed and used efficiently to achieve overall productivity on the site [90, p. 17].

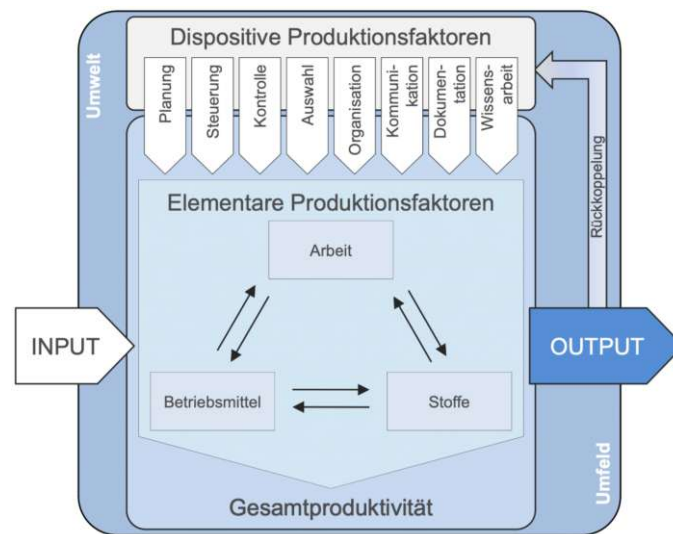


Fig. 6.1: Production factors [90, p. 15]

Robots can be seen as machines and have the potential to increase productivity by reducing manual labor, increasing precision and standardizing processes. Despite this potential, the adoption of robotics in the construction industry has been slow compared to other industries such as automotive. A survey of major construction companies in Europe found that while companies recognize the benefits of automation, concerns such as high costs and technical risks are hindering adoption [91, p. 1].

Ensuring optimum productivity requires continuous monitoring and control. Mechanization, efficient workplace design and improved working conditions contribute increase technical productivity. Additionally, maintaining high productivity levels requires proactive management through process optimization, employee motivation, and technological advancements like robotics [90, pp. 11, 18].

6.1.2 Typical Productivity Metrics, Quality, and Measurement

Productivity in construction is measured by a variety of metrics, including performance, effort and quality metrics. These indicators help to quantify efficiency, guide resource allocation and optimize construction workflows.

- Performance values: expressed in quantities produced over units of time (e.g. cubic meters of concrete per hour). These values can be estimated from:
 - Data from previous projects
 - Machine manuals and design literature
 - Analytical methods to determine productivity per unit of production
 - Trial runs and simulations
- Effort values: these values are critical to construction planning because they affect labour productivity and project performance. Effort values can be determined using:
 - Expert estimates
 - Estimating manuals

- Nomograms and calculations
 - Post construction reporting
 - Industry standard tables
 - Manufacturer specifications
 - Workflow simulations
- Quality as a productivity measure: construction productivity is also assessed in terms of the quality of execution, by analyzing the differences between the quality agreed in the contract and the quality executed. [90, pp. 44–50]

Advances in robotics offer new ways to improve productivity measurement. Automated monitoring systems, real-time performance tracking and AI-driven analytics can provide deeper insights into labor efficiency and machine utilization. By integrating robotics with digital design, companies can achieve constant productivity outcomes.

6.1.3 Challenges in Enhancing Productivity on Construction Sites

Working on construction sites is considered to be hard work and comes with its own set of challenges. As a result, we are faced with various factors that can lead to productivity losses in both the short and long term. The main causes can be categorized as follows [90, pp. 65–92]:

- Types of disturbances: a disturbance can be understood as a deviation from the planned output. We can distinguish between the following types:
 - Interruption: work stops completely.
 - Extension: work progresses more slowly than planned.
 - Acceleration: work is done faster than planned.
- Workgroup size: productivity highly depends on the optimum number of people per team. A group that is too small or too large can lead to productivity losses. This could also apply to construction robots, as they must operate efficiently within a specific environment and a defined number of interactions, especially if the robot is considered a team member and not just a machine.

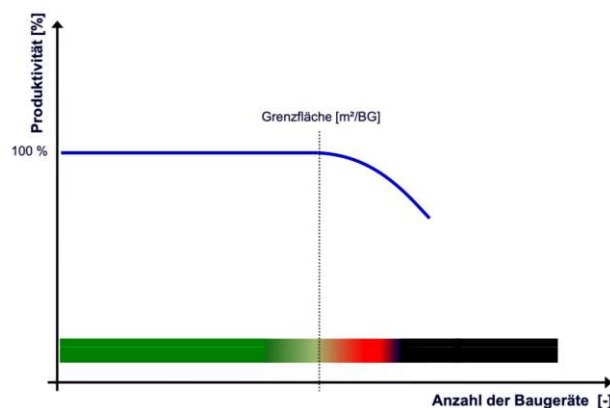


Fig. 6.2: Relationship between workspace and number of tools - Productivity in the construction industry

- Minimum workspace for equipment and robots:
 - Sufficient workspace must be provided to allow safe and efficient operation.
 - Insufficient workspace results in lost productivity and may limit the use of construction robots.
 - Construction robots often require designated movement zones and safety distances to operate efficiently. These aspects need to be planned in advance, and instructions must be distributed to all workers.
- Weather conditions: the main difference between factories and construction sites is that we are forced to work in an unexpected environment due to weather changes. Like any other machine or worker, robots can be affected by these conditions.
 - Temperature: extreme temperatures affect work performance.
 - Precipitation: rain, snow or hail can interrupt work and limit the use of construction robots.
 - Wind: strong wind conditions hinder crane operations and can destabilize autonomous machines.
- Working hours: longer working hours can lead to exhaustion and increased error rates, requiring additional corrective work. Robots are not affected by these factors in the same way as human workers, which is one of the advantages of using robots. However, working standards make it difficult to take advantage of robots' power, such as the need for robots to be supervised by operators with limited working hours.
- Changing work locations: unplanned transitions between work areas result in downtime and lost productivity. In such cases, construction robots often require reprogramming or adjustments to navigation parameters, especially if they are heavy to transport, so it is very important that they can navigate and move.
- Lead time and planning quality: poor planning leads to delays and frequent adjustments during the construction phase. Detailed pre-planning is essential for the use of robots, as unstructured site conditions can significantly limit their efficiency.
- The number of workers per crane: the allocation of workers per crane can cause significant delays. This can also affect the use of robots as they are often integrated into synchronized workflows with other workers, machines and cranes.

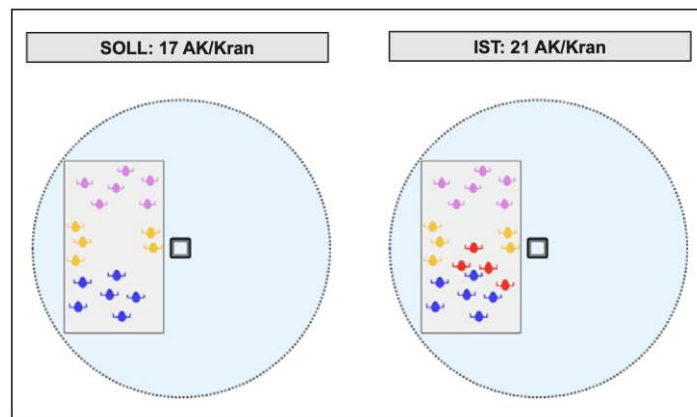


Fig. 6.3: Number of workers per crane

- Impact of layout: the shape of the building can significantly impact productivity. Complex floor plans require frequent adjustments to construction processes and influence the movement patterns and operation of autonomous machines and robots. Lack of freedom of movement in current robots is essential in this regard; therefore, robots are productive in repetitive tasks involving types of building elements that do not require special maneuvers or adjustments.

Robots are not widely used on construction sites, so there are not enough studies on their productivity beyond the technical data provided by designers. This thesis addresses the following points:

- Technical limitations of construction robots: many robots are not yet suitable for all construction tasks. Limitations in mobility, sensor technology or decision-making capabilities can reduce the efficiency in certain construction phases.
- Knowing the benefits of robotics and seeing its potential, the question must be asked. Why haven't we seen more widespread use of robotics on construction sites?
According to the paper "Robotics and automated systems in construction: Understanding industry specific challenges for adoption," contractors have no strong motivation and see no need to improve productivity through robotics. This may be related to the fact that access to labor in the past has not been difficult, so the pace of automation has been slow and there hasn't been a need to adopt robotics [91, p. 6].
- In addition, uncontrolled environments on construction sites could be a reason for stakeholders and investors to be cautious.

To achieve greater productivity in the construction industry, the first step is to change this mindset so that the industry can move more quickly in the right direction. This demands the courage to invest in and implement construction robots.

6.2 Impact of Safety on Productivity: Conflicts and Synergies

It is important to consider the interaction between productivity and safety requirements carefully. As mentioned above, productivity depends on several factors, such as the size of the work area and the number of workers involved. To maintain high efficiency, work interruptions should be minimized. At the same time, safe interaction with robots requires specific constraints, such as safety distances and speed reductions. Depending on the situation, this can lead to a complete stop of operations. Two key aspects can be derived from this [92, pp. 15–16]:

- The safety characteristics of a robot system
- Productivity features of a robotic system

There is a trade-off between these two aspects: increasing safety can reduce productivity and vice versa. Therefore, it is important to design the process flow and the working environment accordingly.

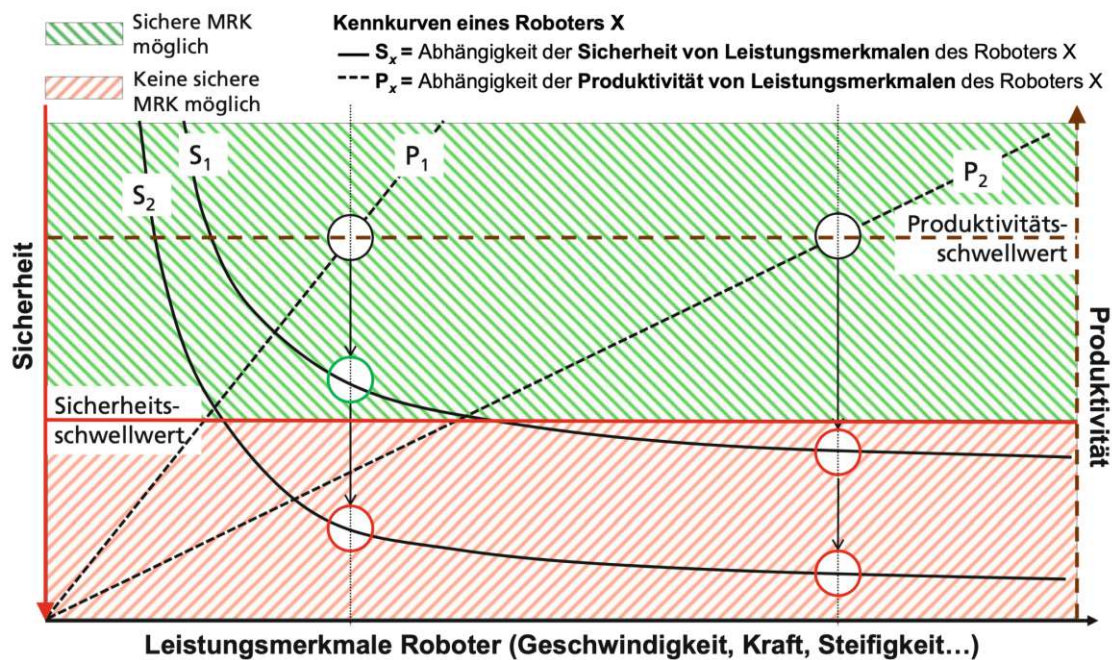


Fig. 6.4: Performance characteristics of a robot regarding safety and productivity [92, p. 20]

According to the standards, there are four safe operating modes for human-robot collaboration:

- If there is no direct contact between the human and the robot, a safety-monitored stop must be implemented. This stop is activated as soon as a predefined distance is exceeded.
- Instead of coming to a complete stop, the robot's speed can be adjusted according to the person's proximity — the closer a person is, the slower the robot moves.
- Another mode is to control the robot manually, which results in a loss of productivity.
- A potential solution to improve efficiency is to combine power and force limitation with manual control, enabling autonomous human-robot collaboration.

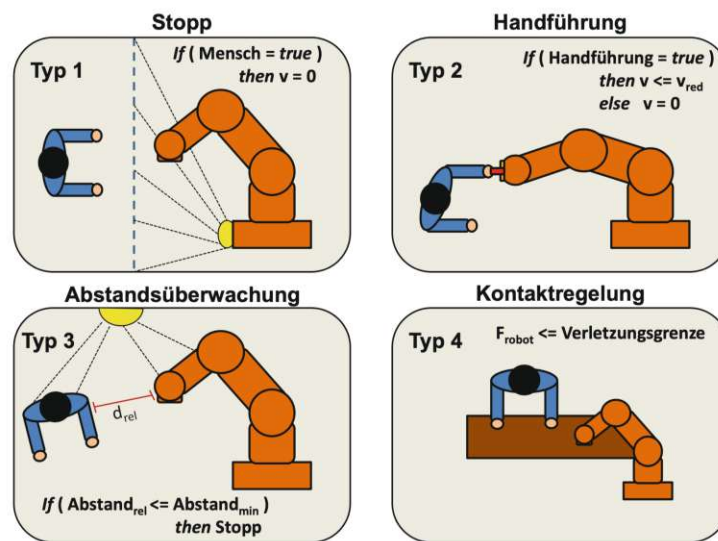


Fig. 6.5: Operating modes in human-robot interaction [92, p. 20]

It is important to plan the available space and its efficient use on construction sites to maintain and increase productivity. Planners should carry out this task, whose aim is to structure work areas and processes so that unnecessary delays are avoided.

In addition, clear rules must be established for proper robot speeds, which can vary depending on the application. Finally, consistent safety requirements are needed to ensure both worker protection and high levels of productivity. [23, pp. 23, 309]

6.3 Impact of Psychological Effects on Productivity

In the previous chapter, 5.2.1, we can see that the introduction of robots on construction sites has psychological effects on workers that affect their performance and, thus, productivity. These effects are particularly significant in human-robot interaction (HRI). Interacting with robots on construction sites requires technical knowledge and an adjustment in how workers work and their mental state.

Workers may feel overwhelmed by interacting with robots, leading to stress and anxiety. These emotional states can have a negative impact on the psychological state of workers. Such feelings lead to a reduction in productivity. They can also increase accident rates, putting the workers and their colleagues at risk.

Another source of psychological stress is the fear of losing one's job. This uncertainty strengthens negative reactions, further reducing productivity. [93]

The impact of these psychological stresses can be noticed in decreased motivation, which is a key factor in achieving productivity goals. Motivation can be broken down into three main categories [94, p. 1]:

- Amotivation: lack of motivation.
- Extrinsic motivation: motivation influenced by external factors and focused on avoiding consequences or gaining rewards.
- Intrinsic motivation: motivation that comes from within, where the activity is perceived as interesting or fulfilling.

To promote productivity, organizations should actively address these psychological factors and take appropriate action.

Early detection and intervention: the first step to improvement is identifying signs of mental strain early. Workers often give signals that can indicate stress, anxiety or worry. A promising method for determining such conditions is the analysis of bio-signals, which can be captured through bio-nosing, signal processing and classification. These signals could even be transmitted to robots, which could adjust their responses based on this input. Exactly how the robot reacts will depend on its type, for example, whether it is a robotic arm or a mobile robot [10, p. 185].

Building trust in human-robot collaboration: another important factor affecting productivity is trust in the robot. Trust is a fundamental element of successful human-robot collaboration. It is just as important for decision-making as stress, anxiety, or worry. Like these emotions, trust can be measured using EEG (electroencephalogram) recordings. Confidence can be assessed based on three main factors [10, pp. 201–204]:

- People-related factors: these include aspects such as training, expertise, situational awareness and demographic information.
- Robot-related factors: these include behavior, reliability, level of automation, failure rates, false alarms, transparency and attribute-based characteristics such as robot type, location, and adaptability.

- Environmental factors: these include teamwork, culture, communication, shared mental models, task types, task complexity and multitasking

The first two points are not necessarily about constantly measuring anxiety, trust or stress levels on construction sites. Instead, companies should know that these factors are measurable and that they can develop strategies to respond to them.

Promoting trust and motivation: other studies have proposed solutions to promote trust between workers and robots, such as using semi-autonomous robots where humans have some control. Such systems could increase workers' confidence by allowing them to control the machine [10, pp. 209–211]. Training programs also play an important role. They improve workers' experience and skills and increase their motivation and, thus, productivity. Support from supervisors through recognition and appreciation can further enhance this process [94, p. 10].

More detailed information on the effect of training programs can be found in section 6.4.

Again, it is important to emphasize that when a company focuses on the well-being of its employees, it creates a win-win situation by improving their psychological state and productivity. This also impacts other aspects, such as the company's image, and much more.

6.4 Impact of Training on Productivity

When starting a new job, employees face several challenges. These arise mainly from a lack of practical experience and the specific conditions of each job, which require practice and learning before tasks can be performed correctly. This impacts resources such as time and cost and, thus, productivity. Therefore, a structured induction phase is essential to overcome these initial challenges.

Training exposes employees to scenarios that are as close to reality as possible, allowing them to understand their tasks before performing them in a real work environment.

This reduces uncertainty and ensures that workflows are not performed for the first time under real conditions - a principle that also applies to working with robots. By training in controlled environments, workers develop confidence in handling robots, which can positively impact their performance in real-life situations. Training should be seen as a necessary part of the onboarding process.

The impact of onboarding is particularly evident when looking at disruptions. A key benefit of training is that it reduces the frequency of these disruptions as people become familiar with similar situations and know how to respond effectively.

The following graph shows how the onboarding effect impacts the time taken per unit of a repetitive task. Curve 1 shows that task completion time decreases with repeated performance. While the actual work speed can only be increased to a limited extent, training significantly reduces delays, interruptions and waiting times. [90, pp. 80–82]

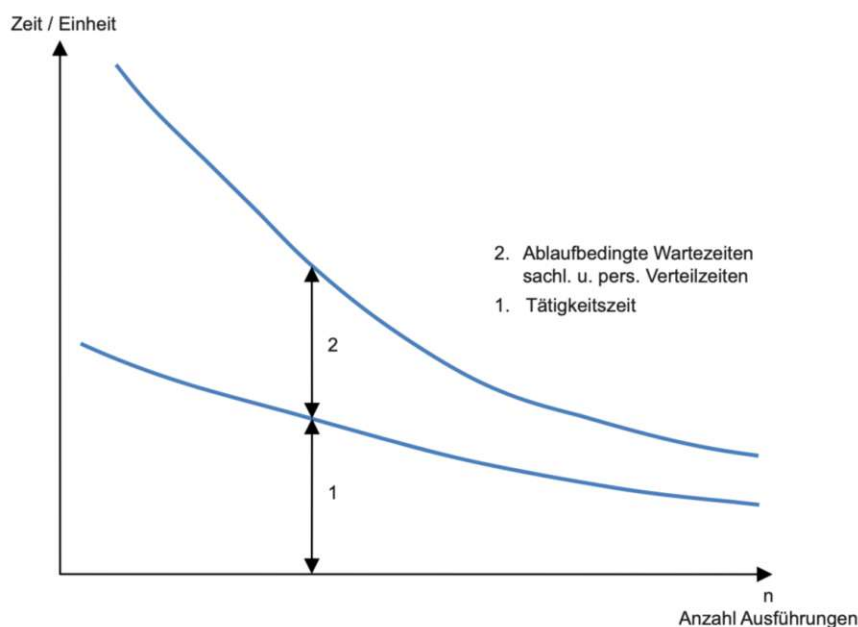


Fig. 6.6: Impact of the induction factor

As construction work is often carried out in teams, it is crucial that team members work together effectively. Targeted training can support this process. In addition, strong leadership plays an essential role in promoting a productive working environment. **A good-functioning team is a productive team** [95, p. 2].

Another benefit of training programs that has a positive is social rationalization, which contributes to personal fulfilment and overall productivity improvements [90, p. 32].

But where should training programs start, and who should deliver them? Education, training and professional development all play a crucial role in team development. This process begins at home, continues through schools, universities and institutes, and includes government programs that work together to ensure a well-trained workforce [96].

It is particularly important to integrate training into all phases of system development and testing, rather than introducing it after implementation. This will ensure the effective use of newly introduced systems (see 5.3 and 5.4.5).

Training programs focus on specific topics. A notable example is safety training for working with robots on construction sites. In this context, training experts and safety specialists should collaborate during the system development phase rather than afterwards to ensure more effective safety and training strategies. [61, pp. 434–442]

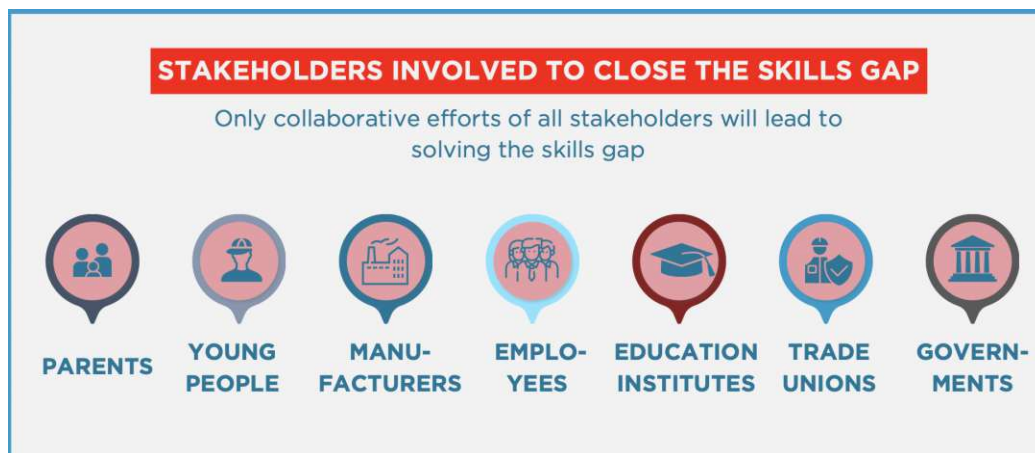


Fig. 6.7: Stakeholders involved to close the skills gap [96]

As the construction industry moves forward, integrating new technologies such as robotics is an important step in increasing productivity. However, this requires well-trained and experienced workers, which is essential for the effective use of these technologies. One way to improve worker skills and experience is through targeted training programs [97, p. 12].

6.5 Impact of Robotics on Productivity Metrics

6.5.1 Impact of Robotics on Efficiency and Speed

One of the biggest expectations for using robots in the construction industry is to improve efficiency and speed. This raises the key question of what specific tasks robots can effectively perform in this context.

Efficiency means achieving optimum results with minimum resource consumption [98]. On the other hand, speed refers to the time saved in performing the task, which depends on factors such as the number of repetitions, necessary corrections, interruptions and pauses. The nature of the task itself also plays a crucial role.

A prime example of efficiency gains in construction is prefabrication. This process is characterized by computer-controlled mass production based on standardized steps and elements. This allows the use of new materials and methods that are more resource-efficient than traditional construction techniques.

While prefabrication takes place in a controlled environment with clearly defined conditions, the situation on construction sites is much more complex. Many factors can have a negative impact on efficiency. One potential solution is the targeted use of robots. To be effective, however, robots must meet certain requirements: they must be easy to use, cost-effective and available at an appropriate level of automation. [32, p. 17]

To date, few empirical studies that provide concrete figures on the productivity gains from the using robots. One such study, "Safety, Quality, Schedule, and Cost Impacts of Ten Construction Robots," examines the impact of ten construction robots compared to traditional methods.

The results show that the use of robots improves construction schedules by an average factor of **2.3**, with a median improvement of **1.4**. A key reason for this is that robots were often used to support workers rather than replace them entirely. Analyzing and addressing the underlying factors is crucial to maximize potential benefits. Human-robot interaction (HRI) research can provide valuable insights.

The studied robots were deployed indoors and outdoors, depending on their specific functions. While most were semi-automated, drones were fully autonomous. In addition, many of these technologies are still under development and continue to benefit from global pilot projects. [99, pp. 184–185]

Another study suggests that using machines on construction sites can increase productivity by up to **80%**. A notable example is Arup's 3D-Printed Steel Components project, which achieved a **75%** weight reduction and **40%** material savings [100, pp. 19–22].

Further productivity gains are being pursued through the use of multi-agent control systems. These systems coordinate human and robot collaboration by collecting, prioritizing and distributing tasks based on workload, skill and urgency. The expected result is a reduction in interruptions and an optimization of material use and logistics [88, pp. 180–181].

Overall, integrating robotics into construction processes has the potential to significantly increase efficiency and speed. However, this requires a detailed analysis of workflows and the identification of tasks best suited for robotic implementation.

Robots are particularly effective at performing repetitive and precise tasks that can be easily automated. Their key strength is that they can perform such tasks without exhaustion, allowing human workers to focus on more complex, flexible tasks and prepare and supervise robotic operations (see 2.2.4).

6.5.2 Impact of Robotics on Quality Improvements

Quality management and control play a necessary role in all industries. Organizational measures are needed to ensure the required quality, which is defined as the conformance of the delivered performance to established standards. This includes:

- The state of the technology
- Relevant standards
- Specific quality requirements defined by the contract.

If quality is deviated from the required level, appropriate action must be taken, which in some cases may have a financial impact.

In the construction industry, several professions work simultaneously on the same site or building elements. Clear rules, such as tolerances, are needed to ensure smooth collaboration. These do not define quality itself but ensure that quality standards are met.

Quality management in construction involves various procedures and methods for controlling and monitoring quality on construction sites. [101, p. 158]

Robots can support these tasks by performing live monitoring and collecting relevant data. Some robots are equipped with high-precision sensor systems that enable exceptional accuracy. Two examples illustrate how the use of robots can significantly improve quality through high precision:

- Automated insertion in structural metal fabrication: two-thirds of workers using an automated system confirmed its high accuracy and reported increased productivity [81, p. 11].
- DFAB House: load-bearing concrete wall was constructed using a double-curved steel reinforcing mesh, produced using mesh forming technology. The wall was built by a robot with an accuracy of 98% (see figure 6.8) [64, pp. 62–63].

However, it is important to note that robots are not yet widely used on real construction sites, which could affect quality values due to the existing challenges (see section 2.4). Nevertheless, the results so far provide valuable insights into the potential quality improvements that can be achieved with robotics but a further research and practical application on construction sites is required.

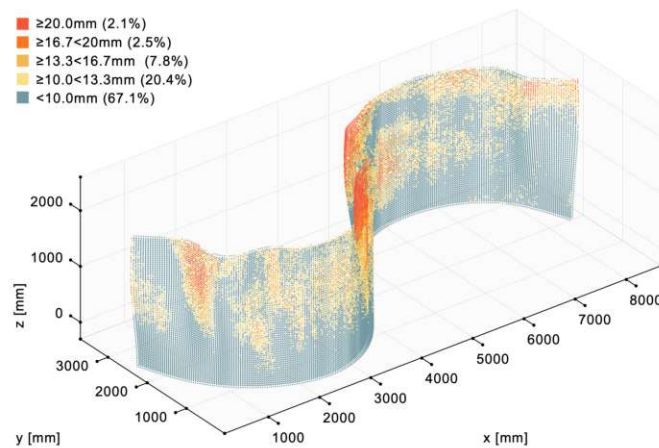


Fig. 6.8: Error plot computation based on ground truth measurements of the fabricated wall [64, p. 63]

6.5.3 Relation between Workers Health and Productivity

Work can generally be divided into two categories: physical and cognitive work. This classification does not imply that tasks are exclusively physical or mental but that one aspect dominates the task. Both categories impose stress on workers, whether physical or psychological. Chapter 5 discusses some psychological effects of introducing robots.

In the construction industry, many tasks require significant physical effort, straining muscles, tendons, the skeletal system, and breathing. Comparing construction work with other occupations gives insight into the extent of this physical stress. For example, in 2012, **72%** of construction jobs involved lifting and carrying heavy objects, compared with only **21%** in other professions. The following graph illustrates the differences in task types between construction and other industries.

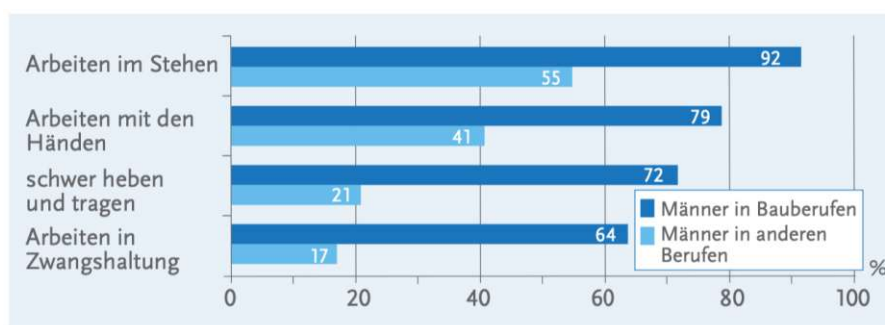


Fig. 6.9: Percentage of employees who frequently work under various environmental conditions

In addition, construction workers face challenging site conditions. Environmental factors such as weather, dust, and noise further impact their health. Recent data confirms this harsh reality: construction workers spend almost half of their working hours performing physically demanding tasks. [102]

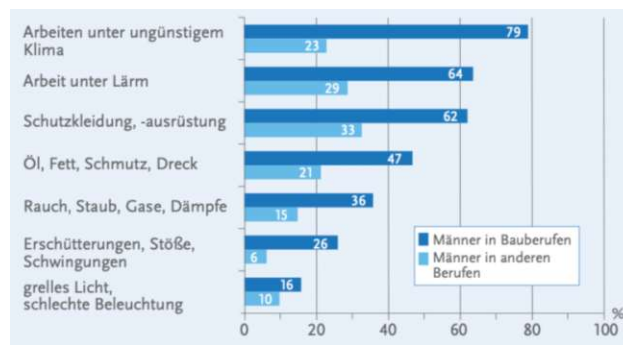


Fig. 6.10: Percentage of employees frequently affected by specific environmental conditions

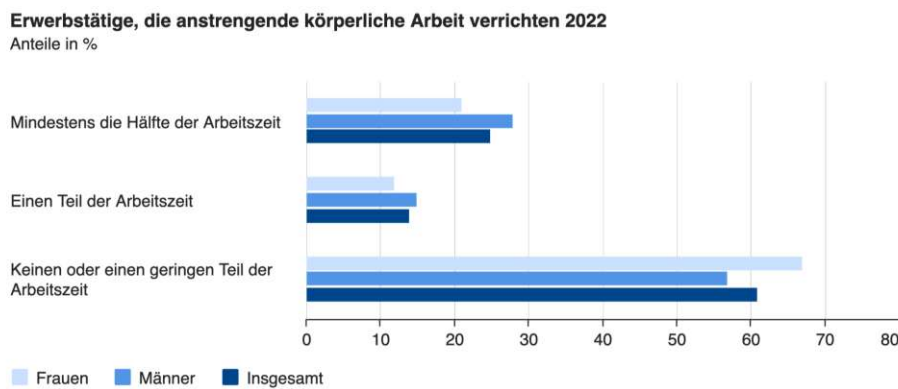


Fig. 6.11: Share of employees performing physically demanding work in 2022 [103]

According to ISO 45003, organizations and companies are responsible for identifying risks and implementing preventive measures. While this standard focuses primarily on mental stress, it recognizes that physical overwork can contribute significantly to mental stress. An effective countermeasure is to support workers with appropriate tools and equipment [78, pp. 7–17].

Machines and robots offer a possible technological solution. Bricklaying, for example, involves repetitive bending, lifting, and carrying of bricks weighing up to **25kg**, which leads to heavy pressure on the hands and arms. Wienerberger's robot (WLTR) is an example of a machine that can significantly reduce this stress [104, p. 5].

Reducing physical strain has additional benefits. It can reduce psychological stress and the risk of accidents, injuries, and fatalities. These issues not only affect the well-being of workers but also have financial importance for companies, including the cost of filling the gap due to a lack of skilled workers, salary payments, lost productivity, and legal consequences [61, p. 535].

This work aims to suggest a new perspective on productivity - one that focuses on worker health. While productivity is traditionally measured in terms of resources such as time, cost, materials or other outputs, reducing physical and mental strain could be an additional metric. By reducing the workload through robotic assistance, workers can save more energy for other tasks, ultimately increasing overall output. In addition, a reduction in physical strain can lead to improved motivation and job satisfaction, which can have a positive impact on workers' personal lives and consequently on the quality of their work.

6.6 Interrelationship between Productivity, Safety and Acceptance & Trust

Projects are defined by the objectives they seek to achieve, which is reflected in their final outcome. However, a project's success depends on three key factors: time, quality and cost.

Each project has deadlines or milestones that represent the time factor. Each project also has a budget that must be adhered to. Finally, there are specific requirements that define the expected quality.

These three factors are related and influence each other, a relationship commonly illustrated by the so-called 'magical triangle' of project management. They are interdependent in such a way that improving one factor often results in a trade-off with one or both of the others. Some examples of these relationships are:

- Higher quality usually requires more time and/or higher costs.
- Shorter project schedules may result in higher costs or lower quality.
- Cost reductions can result in either lower quality or longer project duration.

This relationship forms a triangular framework that tends to remain constant.

The advantage of this model is that it allows for prioritization of key issues and efficient resource planning based on stakeholder requirements. This, in turn, increases project success rates by carefully balancing the three factors. This balancing act is a key responsibility of the project manager, who typically fixes one factor while leaving the others variable.

Such trade-offs often lead to deviations from initial estimates. The challenge is to understand and manage these deviations to achieve the best possible outcome within the given conditions. [105, pp. 80–81], [106, pp. 16.0–16.01]

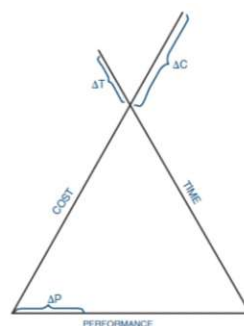


Fig. 6.12: Magical triangle and trade-offs in project management

The introduction of robots offers the potential to improve all three factors at the same time, thereby reducing the "impact" of the magical triangle. However, this innovation also introduces new challenges and dependencies. Three key aspects come into focus due to the topics covered in this thesis:

- Productivity
- Safety
- Acceptance & Trust

Implementing safety measures can increase both productivity and acceptance of robotics. At first glance, this seems to contradict the basic principles of the magical triangle.

The first relationship is between safety and acceptance & trust. The concept is that trust in a system or environment increases as the level of safety increases, meaning that initial safety improvements lead to a significant increase in trust, due to consideration of worker safety concerns (see 5.2.2). Trust grows with safety, however, according to the sections 2.2.4 and 5.2, at a certain point, excessive safety measures can also have a negative impact on productivity. This is why there is a balance to be maintained between safety and trust: Too many safeguards can cause workers to resist automation out of frustration.

The second relationship is between safety and productivity. It describes how productivity changes as safety increases. At low levels of safety, productivity is low because workplace accidents or unsafe conditions can reduce the efficiency. As safety increases, productivity increases until an optimal balance between safety and productivity is reached.

If extreme and unnecessary safety measures are implemented, safety will continue to grow, but productivity will begin to decrease. This may be due to increased interruptions, for example.

Similarly and according to section 5.2.2, acceptance & trust are essential for gaining productivity but too much acceptance & trust in robots can lead to overconfidence or over relying on robots, creating new risks.

This dynamic between the three mentioned factors can lead to the emergence of a new "magical triangle" characterized by a critical tipping point: beyond a certain threshold, further optimization no longer produces positive results but instead leads to a counterproductive impact. The task of management is to identify this tipping point and to adapt the three factors to the specific conditions of each project to maximize the positive effects of each factor.

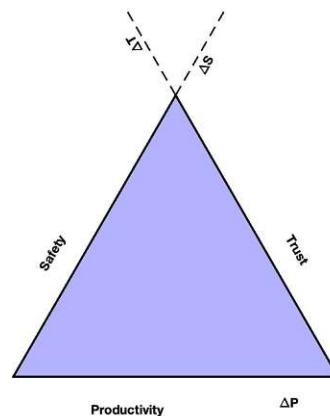


Fig. 6.13: A qualitative illustration of a new magical triangle

6.7 Summary of Chapter 6: Productivity in Construction in the Frame of HRI

This Chapter addresses the research questions:

- Which impact does safety, psychological effects, training have on productivity on construction sites where construction robots are deployed?
- Which relationship exists between productivity, acceptance, and safety?

Building on a theoretical introduction to the concept of productivity in construction—including definitions, metrics, and common challenges—the chapter analyzes how key factors influenced by robotics impact productivity.

The discussion begins by showing that safety is essential for smooth site operations and directly contributes to increased productivity, if safety is implemented in a worker-friendly and well-balanced way. Overregulation, by contrast, can lead to delays and demotivation.

Psychological factors show a similarly dual nature: stress, fear of job loss, or distrust in new technologies can negatively impact productivity, whereas targeted measures—such as transparent systems, trust-building training, semi-autonomy, and supervisor recognition—can boost motivation and performance.

Another key aspect examined is the training of workers in using new technologies. Well-structured training programs reduce delays during the onboarding phase and increase safety and worker well-being—both of which contribute to higher productivity. The chapter emphasizes that training should not be isolated but integrated into long-term strategic systems.

The impact of construction robotics on traditional productivity metrics—such as efficiency and quality—is then explored. Robots offer great potential for increased speed and precision, yet they face challenges in the complex and dynamic environment of construction sites.

Therefore, systems must be user-friendly, cost-efficient, and feature an appropriate degree of automation. Early case studies like the DFAB House have already shown promising results [30] [41].

Additionally, the chapter proposes a new approach to measuring productivity: worker health as an indirect productivity metric. Robots can take over physically demanding tasks, leading to healthier work conditions—thus increasing motivation and work quality and reducing downtime due to absences and accident-related costs.

In conclusion, the chapter answers the initial research question and expands the traditional understanding of construction project management. Through a qualitative analysis of the interrelationship between productivity, safety and acceptance & trust, the chapter presents a new "magical triangle" concept in construction robotics. The model balances the previous interrelationship, highlighting a critical tipping point beyond which further optimization becomes counterproductive.

Chapter 7

HRI on a Real Construction Site in Pelhřimov

While the previous chapters of this thesis focused on the theoretical foundations for human-robot interaction (HRI) on construction sites, this chapter is dedicated to a real-world case study: the deployment of the bricklaying robot WLTR on an active construction site in Pelhřimov, a town in southern Czech Republic. This chapter aims to transfer the theoretical findings into a practical context and assess how these aspects can be implemented and developed in practice.

The chapter begins by presenting the project setting, including a description of the site and its surroundings. Key aspects include the construction grid and the dimensions of the walls to be built.

A central focus is the safety situation on the construction site during the use of the robot. Based on the insights provided by the WLTR operators, the chapter explores the safety aspects that were followed. Based on this qualitative input, a structured safety analysis is performed, including the development of a risk matrix. Two representative risk elements are identified and evaluated in relation to different construction phases. In addition, a safety zone around the robot's operating area is calculated in accordance with relevant standards, allowing the hazard zones to be defined for future implementations.

Another important aspect covered is the training of construction personnel. Feedback from WLTR operators offers an understanding of this training and where improvements may be needed. Based on the theoretical requirements for HRI training programs discussed in previous chapters, concrete suggestions are made to develop further and enhance these initiatives - to increase acceptance, competence, and safety awareness when working with robotics in the field.

The chapter concludes with an analysis of the productivity of the WLTR deployment. This section draws on findings from another master's thesis discussing the same use case [107]. Quantitative data on work speed and wall output are used to evaluate the impact of robotic integration on construction productivity. Based on this analysis, the chapter suggests possible measures for optimizing productivity in future robotic applications.

Overall, this chapter bridges a part of the gap between theory and practice - a necessary step to accurately assess the real-world applicability and impact of HRI concepts on construction sites.

7.1 Project Description

7.1.1 Local Conditions and Purpose of the Project

The construction site is located in Pelhřimov, a small town of about 17,000 inhabitants and 100 km south of Prague. The mild Central European climate allows a reliable assessment of the weather conditions during the construction phase. The site is in an industrial area with access to essential infrastructure and services. It is also directly connected to a passable road, ensuring efficient delivery of construction materials and waste removal.

The project includes the construction of a library. The new building will serve as the main depot for the Museum of the Pelhřimov Mountains, which, according to the project, will also include specialized workshops for the restoration and preservation of artefacts, with a large part of the regional archaeological collections concentrated here. In addition, the museums in Třebíč and Havlíčkův Brod and the art gallery in Havlíčkův Brod will use the facilities in Pelhřimov as secondary storage.

The new building will be constructed on the site of the former workshops of the Pelhřimov industrial secondary school on K-Silu street after the demolition of the existing dilapidated building.



Fig. 7.1: 3D visualization of the library in Pelhřimov [108]

Funding for the project, including storage and other facilities, will be provided entirely by the Vysočina region, with an estimated budget of 269 million Czech crowns. According to Karel Janoušek, the building will be designed in a simple and functional style that blends in a harmonic style with the existing industrial environment. The site also offers pleasing open space for possible outdoor storage or future building expansion.

This project underlines the Vysočina region's commitment to preserving and promoting its cultural heritage by providing modern facilities for the storage and care of valuable historical objects. [107] [108]

7.1.2 Technical Conditions of the Site

The proposed building consists mainly of two main areas. The first area is the entrance, which is made up of a rotated section and a section parallel to the storage area. The storage area has the largest surface area of the entire building and is the main subject of this study (see appendix **F.1** and **F.3**). The following quantities refer to this storage area.

For the building's structural framework, a solution with reinforced concrete columns was chosen. These columns are arranged in a regular grid of 6m x 6m and are 40cm thick. A total of 54 reinforced concrete columns are used.

The external and internal walls of the storage area will be constructed with Wienerberger Porotherm bricks. Porotherm Dryfix foam will be used as a binder. The Dryfix foam is also from Wienerberger and is specially developed for robots. Looking at the floor plan, it is clear that the north and south walls are constructed identically, as are the east and west walls.

The lengths of the walls vary, but the height of the walls is always 3.25m, which is ideal for the use of the WLTR system. The length of the warehouse is approximately 48m, while the width is approximately 37m. The following chapters handle the general situation on the construction site regarding health safety, training of the workers, and productivity considering the use of WLTR from Wienerberger. [107]

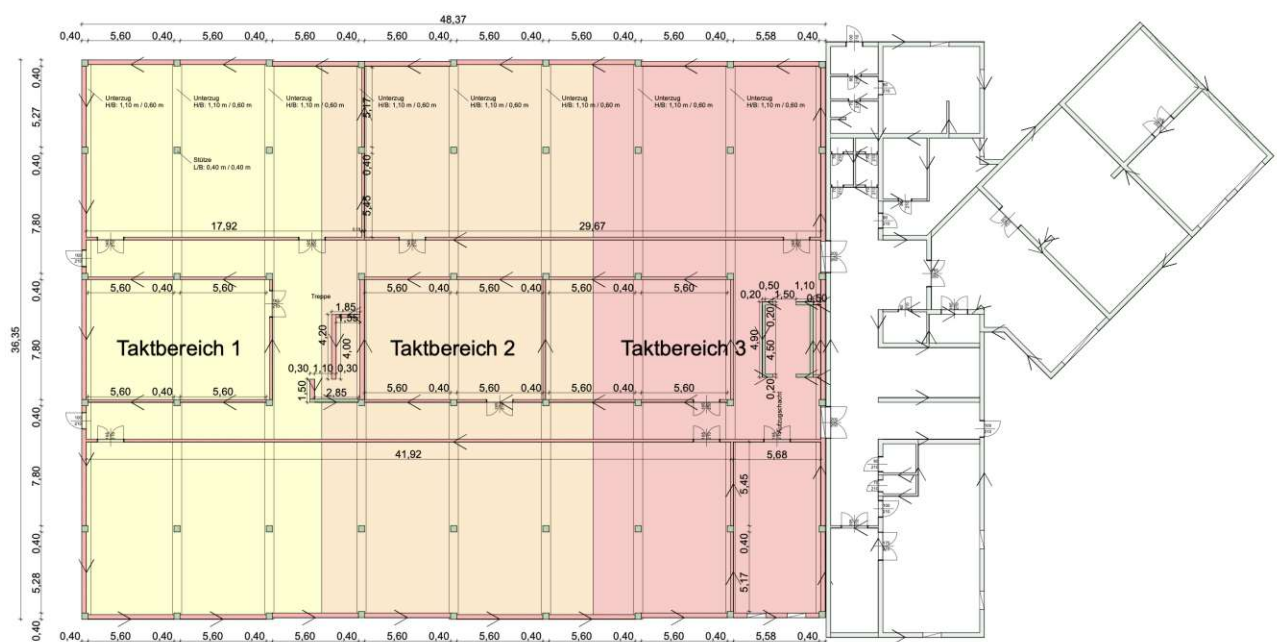


Fig. 7.2: Floor plan of the construction site in Pelhřimov (see **F.1**)

7.2 Safety Measures and their Implementation

7.2.1 Actual Safety Situation on the Construction Site

The site visit took place in August. At that time, the work included structural tasks such as the constructing brick exterior walls, installing ceiling supports, reinforcement, formwork and concrete work.

A survey of WLTR operators working on site was conducted to gain a better understanding of the safety situation on site. The WLTR team confirmed that WLTR complies with European regulations for the use of robots. The safety measures implemented on the site include:

- Four emergency stop buttons.
- The operator is provided with a chip to start the robot. In this case, the operator is responsible for safety on the site.
- To ensure safety, the robot has two modes: bricklaying and manipulation modes. Bricklaying mode is an autonomous mode, while manipulation mode requires the operator to keep their hand on a safety button (dead man's switch). If the operator takes his hand off the button, like in an emergence, the robot will immediately stop working.

The safety distances have not yet been defined, but the site has used warning tape to mark the robot's working area. In the future, a fence will be installed to ensure safety on the site (the distance is measured at 177 cm from the pallet). Additional personal protection measures such as protective clothing or training are not required.

The operators have confirmed that there are no health risks associated with the use of WLTR, such as noise or vibration and at the time of our visit, there were no documented accidents related to the use of WLTR.

7.2.2 Suggestions for Safety on the Construction Site

Three robots were working at the same time. In such situations, it is essential to have a comprehensive safety concept in place that takes into account a wider risk scenario for the interfaces between the robots. This starts with a safety analysis to identify the risks.

7.2.2.1 Risk Management

The analysis begins with the identification of potential risks that could arise from three factors (see 4.4.1):

- **Human factors:**
 - Insufficient training and experience of workers in handling the robot
 - Miscommunication between human and robot/operator
 - Carelessness or misjudgment of hazards
 - Worker fatigue and lack of concentration
- **Use of the machine and robot:**
 - Malfunctions or technical defects of WLTR
 - Uncontrolled movements of WLTR due to software or sensor faults
 - Insufficient clarity of the shared work space between humans and WLTR

- **Working environment and site conditions:**

- Weather conditions such as rain, snow or high winds
- Poor lighting or visual obstructions
- Trip and fall hazards due to dispersed construction materials and tools.

Once the risks have been identified, a risk assessment is done to determine the necessary protective measures. Chapter 4 outlines the principles of risk assessment. The HAZOP concept of risk analysis is used to understand the analysis better (see 4.3.1 and 4.5.2). This results in the following table:

No.	Item	Function / Purpose	Parameter	Guide Word	Consequence	Cause	Hazard	Risk	Recommendation	Comments
1	Sensors	Data collection	Calibration level	Less	Incorrect data	Faulty calibration	Incorrect task execution	Low	Regular sensor recalibration	Schedule maintenance checks
2	Robotic Arm	Material handling	Weight limit	More	Overload of robotic arm	Exceeding weight limits	Structural damage or breakage	Low	Implement load monitoring system	Educate workers on limits
3	Robotic Gripper	Material handling	Grip strength	More	Material damage	Excessive gripping force	Damage to fragile materials	Medium	Adjust gripper force	Test with various materials
4	Internal Hardware	Thermal protection	Temperature level	More	System malfunction	Overheating	Permanent hardware damage	Low	Monitor temperature, implement cooling	Avoid exposure to heat sources
5	Battery	Power supply	Charge capacity	None	Robot stops operation	Battery depletion	Work interruption	Medium	Use of backup batteries	Monitor battery levels
6	Software Algorithm	Task execution	Computation speed	Less	Delayed or incorrect operation	Bug in the algorithm	Delayed construction processes	Medium	Conduct rigorous software testing	Regular software updates
7	Connectivity	Communication	Signal strength	None	Disruption in robot control	Interference or signal loss	Robot unable to operate	Medium	Use redundant communication systems	Monitor network health
8	Operator Input	Robot control	Command input	Wrong	Incorrect robot action	Human error	Safety risks, task failure	Medium	Worker training	Include HMI feedback mechanisms
9	Data System	Process optimization	Data integrity	None	Data loss	Storage failure or corruption	Optimization failure	Low	Secure backups and data redundancy	Use secure data protocols
10	Weather Resistance	Outdoor operation	Protection level	None	Robot stops functioning in rain	Inadequate waterproofing	Work delays	High	Improve robot weatherproofing	Use in covered areas
11	Training of Workers	Robot control	handling problems	Lacking	Deviation from expected outcome	Lack of Training	Safety risks, task failure	Medium	Training certification	Plan regular training sessions
12	Attention of Workers	Complete tasks safely	avoiding danger zones	Low	Injuries, Delays	Lack of Training, Lack of Communication, Lack of attention	Safety risks, task failure	High	Safety instructions	Monitor workload
13	Safe Zone	Safe work environment	Zone boarder	not defined	Injuries, Delays	No specific regulation for construction industry	Safety risks, task failure	High	Define the safe zone, Safety instructions	Consider site conditions
14	Material and Personnel	Work completion	Organization	Chaotic	Delays	Lack of order and communication	Tripping and falling hazards, productivity losses	High	Order regulations, regular inspections and communication	Define clear responsibilities for order, lean room principle

Tab. 7.1: Risk analysis for WLTR in Pelhřimov according to HAZOP method

Based on the analysis, risk mitigation measures can be categorized as follows:

- **Technical measures:**
 - Safety distance: should be defined and clearly implemented.
 - Regular maintenance and diagnosis of the robots: Ensured by the presence of WLTR operators on site. This should also be considered at other sites.
 - Sensor-based barriers: Already built into the WLTR system
 - Use of safety shutdown and emergency stop systems: Already in place on site
- **Organizational measures:**
 - Training and instructions for the safe use of WLTR: Not currently available on site. Regular communication sessions, such as lean room meetings, can ensure this.
 - Establish and follow work instructions for working with robots: Instructions are given to operators and workers who interact directly with the robot.
 - Establish and follow work instructions for working around robots: Other workers who perform task on the construction site are provided with instructions how to behave around the robot.
 - Regular safety inspections: These can be carried out, for example, by the site safety officer or site coordinator to identify new risks.
- **Personal protective measures:**
 - Protective clothing such as helmets, gloves and goggles: These were not required on the site but necessary for personal safety, especially if safety distances have not yet been defined.

The interesting thing about this risk analysis is that we can see that the high risks come from factors related to the environment, rather than from the robot's hardware or software. This is due to the dynamic and unpredictable nature of construction sites and human behavior. The probability of other risks is relatively low because the robot was tested in the factory before being used on several pilot sites.

Based on the factors listed in the previous table, together with some elements from section 4.3.2 and information provided by the WLTR manufacturers, the following risks should be considered:

- A: cybersecurity risks
- B: lack of references for building design
- C: lack of standardization and regulation
- D: inadequate training of personnel
- E: lack of communication between organizational units
- F: influence of environmental factors
- G: lack of standardized building elements
- H: lack of safety due to restructured environment

- I: unexpected worker behavior
- G: mechanical failure or in accuracy of robotic arms
- K: errors in software algorithms
- L: internal Hardware or Battery malfunction
- M: collision with personnel or machines

The risk matrix prevails the following assessment (see appendix G.1):

Factor		Probability				
		1: Very Low	2: Low	3: Medium	4: High	5: Very High
Impact	1: Very Low	-	-	-	-	-
	2: Low	-	C	-	-	-
	3: Medium	G	L	-	-	-
	4: High	A	J	D	M	E
	5: Very High	K	B	F	H	I

Tab. 7.2: Risk matrix for the use of WLTR in Pelhřimov

Risk categorization according to the 4Ts strategy:

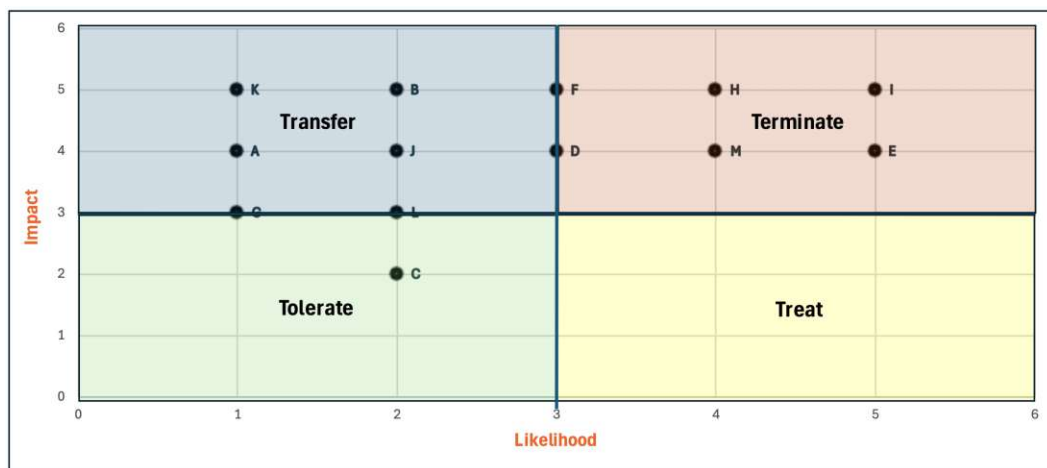


Fig. 7.3: 4Ts strategy for the use of WLTR in Pelhřimov

Examining the following elements in more detail:

- **D**: inadequate training of personnel. This factor was assigned a likelihood of (3) and an impact of (4). However, the likelihood is expected to decrease over time as personnel gain more experience with the WLTR, which in turn reduces the likelihood of operational errors.
- **M**: collision with personnel or machines. The likelihood of this factor is also subject to change and is highly dependent on site-specific conditions.

For example, if WLTR operates near construction roads, the probability of collision increases. Similarly, as the number of trades and workers on site increases, so does the potential for collisions.

As a result, the risk matrix based on the 4T approach can vary significantly depending on the construction phase (see appendix G.2).

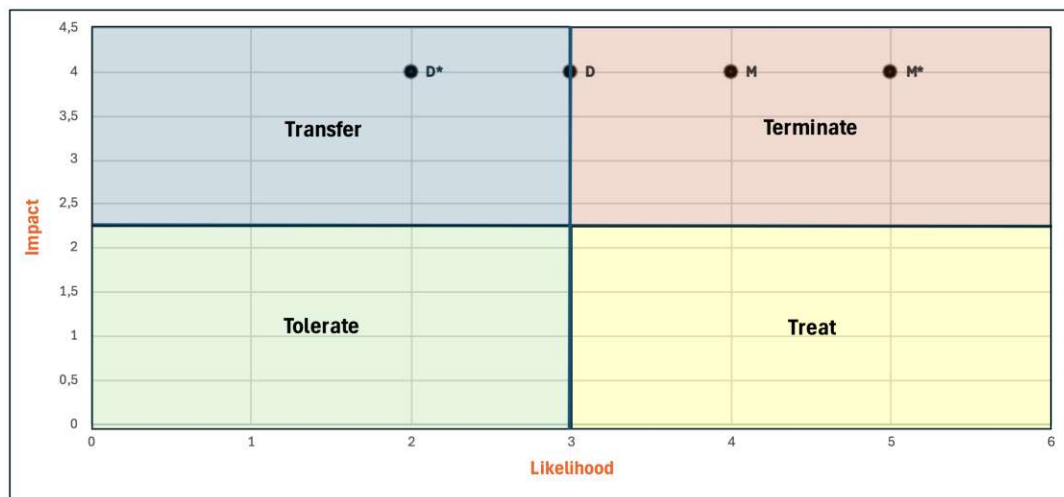


Fig. 7.4: Modified 4Ts strategy for the elements (D) and (M)

These considerations should be integrated into the risk analysis. Therefore, it is critical to continuously monitor, evaluate, and update the risk analysis throughout the various phases of the project.

Each site requires different safety measures, and each robot varies according to its type and application, leading to different safety considerations. However, it is essential to do a thorough risk analysis based on the robot, the technical data, and the construction experience, supported by communication between all trades on the site during all phases of construction.

7.2.2.2 Safety Distance for WLTR

ÖNORM B 15066 provides steps for calculating the safety distance in the case of collaborative work (see section 4.5.4). The formula for calculating the safety distance is as follows:

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \quad (7.1)$$

Unfortunately, WLTR manufacturers are not allowed to provide values for calculating the safety distance. Therefore, the values are determined by video analysis and assumptions to understand the safety distance and its impact on site operations.

The WLTR moves at approximately $90^\circ/s$, which is equivalent to 7.85 m/s. This was taken from video analysis. Other values used to calculate the safety distance include:

$$v_h = 1.6 \text{ m/s} \quad (7.2)$$

(Average walking speed of a human being [14, p. 13])

$$T = T_r + T_s = (0.2 + 0.1) = 0.3 \text{ sec.} \quad (7.3)$$

(Total reaction time of the robot [75, p. 4], assumed values 0.1 and 0.2)

$$S_h = 1.6 \times 0.3 = 0.48 \text{ m} \quad (7.4)$$

$$v_r = 90^\circ/\text{sec} = 7.85 \text{ m/s} \quad (7.5)$$

with a radius of 4m (calculated value through video analysis).

$$S_r = 7.85 \times 0.2 = 1.57 \text{ m} \quad (7.6)$$

$$S_s = 0.4 \text{ m} \quad (\text{assumed value}) \quad (7.7)$$

$$Z_d = 0.05 \text{ m} \quad (\text{assumed value}) \quad (7.8)$$

$$Z_r = 0.03 \text{ m} \quad (\text{assumed value}) \quad (7.9)$$

$$C = 0.85 \text{ m} \quad (\text{reach distance of the shoulder [74, p. 104]}) \quad (7.10)$$

The final calculation gives a total safety distance of 3.38 metres:

$$S_p = 0.48 + 1.57 + 0.4 + 0.85 + 0.05 + 0.03 = 3.38 \text{ m} \quad (7.11)$$

This value is based on the length of WLTR's fully extended arm and requires a safe working area for WLTR of:

$$A_W = 3.38 + 4 = 7.38 \text{ m} \quad (7.12)$$

The following figure shows the required safe area on the construction site according to ÖNORM B15066 (see appendix **F.2**):

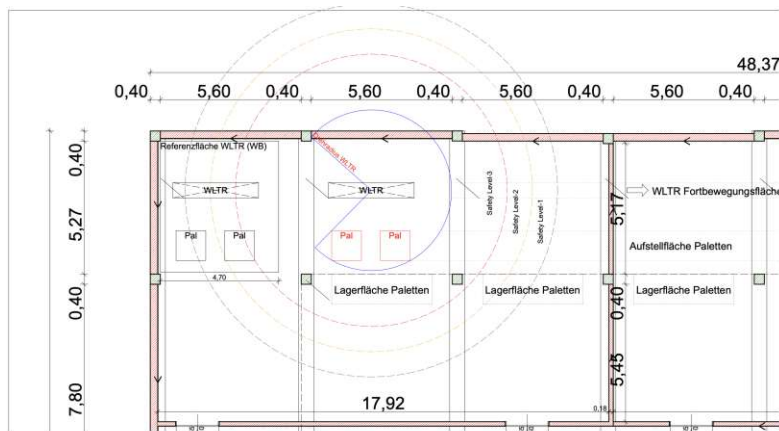


Fig. 7.5: Safezone and redundant safety levels for WLTR

As can be seen in the previous photo, a robot's safe working area takes up too much space on the site, especially as not one but three robots were working at the same time.

Therefore, it is important to consider the safety zone, which can vary depending on the technical information of the robot, the number of workers and robots, the type of activity and many other factors.

Suggested Measures:

- **Dynamic safety distance:** in the robot's working area, the robot's reaction will change depending on the proximity of workers. This could mean that the robot system's first reaction is to send a light or voice signal to the worker.

If the worker does not respond and continues approaching the robot, the second reaction is to reduce and limit the robot's speed. In case of extreme proximity, an emergency stop function will be activated.

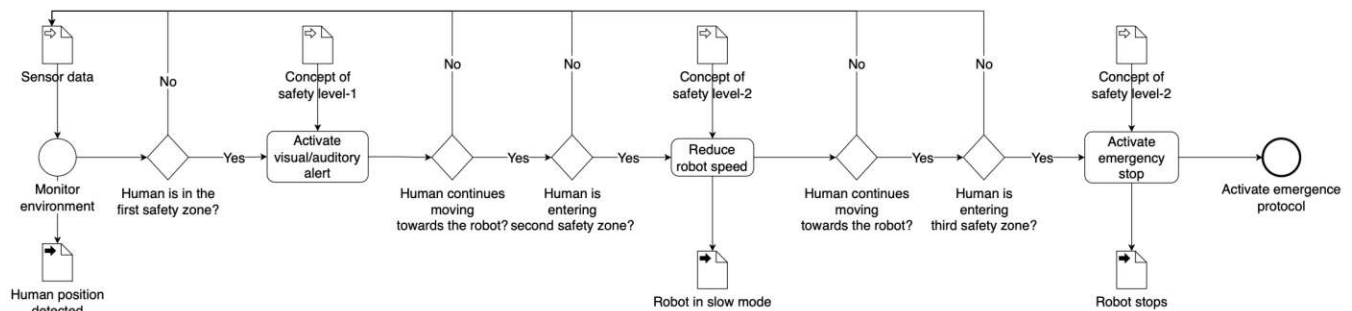


Fig. 7.6: Safety concept (see appendix H and 6.2)

- **Redundant safety levels:** Other aspects that consider both safety and space requirements on the site:
 - Level 1: the first level consider the direction of movement of the robot. WLTR requires a 270° radius of rotation to perform its tasks. The remaining area of the circle can be used for other purposes, such as the operator's station. In addition, this area can be considered a safe work area without additional safety measures.
 - Level 2: the robot does not extend beyond the outer edges of the pallets in the direction of the pallets. This could save space on the site.
 - Level 3: the safe working area behind the wall is no longer based on the calculated safety distance for the robot. it is defined based on the risk of the wall collapsing.

These levels and the dynamic safety distance depend on the robot's reaction time, the functionality of its sensors, and other influencing factors, such as weather conditions.

7.3 Implemented Training Programs

7.3.1 Actual Training Programs

The training programs are designed to prepare site workers and operators for the effective and safe use of WLTR. They are done by the manufacturer's team or by experienced operators and cover the following key areas:

- **Site safety:** participants learn how to work safely with the robot, including identifying hazards and following safety protocols.
- **Robot operation:** the processes and applications of the robot are explained in detail to provide an in-depth understanding of its functionality.
- **Technical training:** the training includes information on the main components of the robot, their maintenance, and how to solve problems.

The training lasts approximately one week and combines theoretical and practical elements. This allows participants to immediately apply and reinforce what they have learned. At the end of the training, there is a test where the participants have to build a wall with the robot. At the end of the training program, success will be documented through certificates of participation and attendance records.

Ideally, participants should have bricklaying experience and a basic knowledge of applications and equipment.

The costs involved only cover the working time (approximately one week) and materials used during the training.

7.3.2 Suggestions for Optimization of Training

The following recommendations can be implemented to improve the training further and adapt it to the needs of participants, technological developments and the requirements of construction sites:

- **Broaden the content of the training:**
 - Deepen the safety training: additional risk assessment and emergency response modules could be added to enhance site safety further.
 - Troubleshooting training: dedicated fault diagnosis and troubleshooting module could promote operator independence in handling the robot.
- **Flexibilization of training formats:**
 - Hybrid training: in addition to classroom training, online modules could be offered to deliver theoretical content more flexibly. This would reduce on-site time and make the training accessible to more participants.
 - Modular training: training could be divided into smaller, independent modules that can be combined according to the needs and prior knowledge of the participants.

- **Improve documentation and tracking:**

- Digital certificates: introducing digital training certificates could simplify documentation and improve tracking of training outcomes.
- Feedback system: systematic post-training feedback system could help to identify weaknesses and continuously optimize training content.

- **Long-term support and training:**

- Refresher courses: regular refresher courses could be offered to ensure that operators keep their knowledge up to date and learn about new safety regulations, guidelines and features of the robot.
- Mentoring program: experienced operators could mentor recruits to encourage knowledge transfer within the company.

Implementing these recommendations can make training more effective and flexible, ultimately leading to positive outcomes such as increased productivity, acceptance, and better robot handling on construction sites. Chapter (5) consists of more detailed information and suggestions that can be useful in this context.

7.4 Productivity Analysis for the Use of Robots

7.4.1 Actual Productivity Situation of WLTR in Pelhřimov

The building under consideration has two main areas: the entrance and the warehouse, which occupies the largest part of the building, and is the focus of this work.

Productivity on the construction site can be evaluated using various metrics, such as time spent, work quality, and interruption frequency.

Due to the lack of detailed productivity data from the operators, this analysis focuses on video analysis, which allows a temporal study of work processes. This research does not consider other aspects, such as quality control or interruptions, due to a lack of data.

WLTR performs the core process of bricklaying autonomously, while skilled workers still need to perform manual tasks such as laying the first row of bricks, connecting anchors, and cutting bricks.

Video analysis was used to record the time that WLTR took to complete each task. It was found that the robot took approximately 45 seconds to lay two bricks. The documented durations show that WLTR's work process has almost no variation in execution, indicating the high consistency and reliability of WLTR. The following values can be derived from this:

Description	Value
Performance Value	10,0 m ² /h
Effort Value	0,10 h/m ²

Tab. 7.3: Information based on video analysis

According to calculations in Niklas Jobst's thesis [4], WLTR works about three times faster than a team of three masons. While the robot maintains a constant output of around 10.0 m²/h, the output of a team of masons varies depending on factors such as team size, experience and the use of additional equipment.

The advantage of WLTR is its speed and ability to relieve human workers of physically demanding and repetitive tasks. The lengths of the walls vary, but in all cases, the height is 3.25m, which is an ideal dimension for using WLTR. The calculations result in the following tables:

Walls	Length (m)	High (m)	Duration WLTR (h)	Duration Bricklayer (h)
Wand 1	5,6	3,25	4,20	13,44
Wand 2	7,8	3,25	5,85	18,72

Tab. 7.4: Comparison of wall construction durations between WLTR and traditional bricklayers

Another perspective in days can also be presented as follows, which gives a better overview of how the WLTR is faster than the bricklaying team:

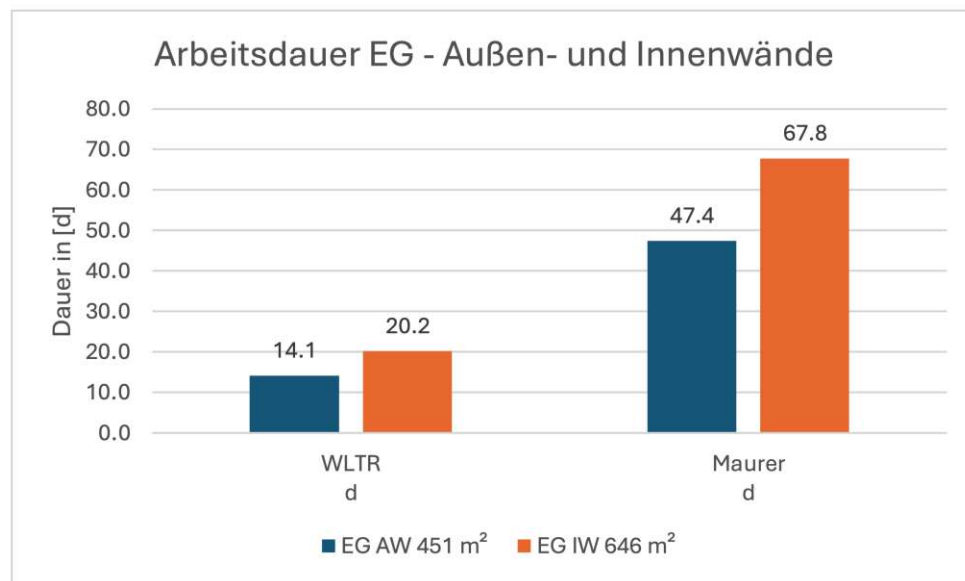


Fig. 7.7: Work duration for the ground floor – exterior and interior walls

The following factors of human labor, which have a significant impact on productivity, are considered irrelevant due to using WLTR:

- Learning curve effect
- Experience of the team
- Fatigue/physical fitness
- Age
- Correction of mistakes
- Need for a ladder or similar climbing aid
- Effects of extreme heat or cold

Although WLTR does most of the masonry work, manual labor is essential. These include cutting blocks for wall ends and corner joints, carrying out the connection between the walls and concrete beams, laying the first layer of blocks and setting up and securing ladders for working at height. These preparatory operations are critical to overall productivity and must be carefully planned and executed.

Another aspect of using WLTR is improving worker safety and health by taking over physically demanding and dangerous tasks. However, safety requirements such as setting up and securing work areas must still be followed to prevent accidents. Work areas can have a negative impact on productivity by increasing interruptions. This is an important aspect to consider in future work to improve productivity further (see 6.2).

The productivity analysis shows that using WLTR significantly increases efficiency on site. The robot takes over most of the masonry work, while manual support tasks remain necessary. The combination of robotic and manual labor results in a significant increase in productivity and a reduction in the workload for human workers. [4]

7.4.2 Suggestions for Productivity Optimization

To further increase productivity when working with WLTR, the following recommendations can be implemented:

- **Optimize preparatory operations:**
 - Pre-cut bricks: to increase efficiency, bricks required for wall ends and corners should be cut and positioned in advance. This will reduce waiting times and interruptions while the robot is working.
 - Structured workflows: manual preparation tasks, such as laying the first row of bricks or connecting anchors, should be carried out on days when the WLTR is not in use to avoid conflicts and downtime. This approach can also be applied to other tasks.
- **Improve working areas:**
 - Define clear working areas: to minimize interruptions, work areas for WLTR and manual labor should be clearly defined and separated. This will prevent workers from interfering with each other and with the work of WLTR.
 - Safety and accessibility: work areas should be designed to be safe and easily accessible. This will reduce the time needed to set up and secure ladders or other aids. A key factor in site safety is effective and regular communication between trades, which also has the benefit of ensuring smooth operations.
- **Training and induction of personnel:**
 - Training for skilled workers: skilled workers should receive targeted training to help them perform manual tasks more efficiently. This includes understanding the operation of WLTR to enable better coordination.
 - Take advantage of the learning curve effect: regular training and knowledge sharing can influence the learning curve effect to increase productivity in the long term.
 - Targeted site induction: new employees will receive an introduction to the site and their tasks. In this context, regulations and rules for working with or around the robot are essential.
- **Technical adaptations and updates:**
 - Software updates: regular updates to WLTR software can further improve the robot's efficiency.
 - Technical adaptation: improving the accuracy of laser positioning could increase quality of bricklaying.
 - Building Information Modelling (BIM) integration: using BIM data to control and plan robots on construction sites can significantly increase efficiency. BIM enables more accurate planning and execution of construction processes by providing digital models that the robot can use to perform its tasks more accurately and quickly.
 - Integration of additional functions: integrating functions such as automated brick cutting or anchor connection could further reduce the need for manual intervention.

- **Data analysis and continuous improvement:**

- Regular video analysis: continuous video analysis can identify further optimization potential. This enables data-driven, decision-making and continuous improvement of work processes.
- Feedback loops: a system should be implemented to regularly gather feedback from workers to identify practical challenges and suggestions for improvement. Creating an evaluation sheet is essential to improving the use of WLTR. The sheet may include the following:
 - * General information about the project and the people involved, such as the project name, the location of the deployment, and the role of the person involved.
 - * Overall impression of the use of WLTR.
 - * Efficiency and productivity: this refers to whether the robot accelerated work and task completion, and whether the use of WLTR improved the completion of other tasks. Other information, such as the number of interruptions, the reason for each interruption, and their duration, can be documented.
 - * Safety and collaboration: this section addresses safety-related issues such as how safe employees felt while working with the robot, how closely they worked with the robot, and any safety-related incidents.
 - * Usability and understandability: whether the robot was easy to use and understand.
 - * Finally, participants in the evaluation can provide suggestions for improvement and additional comments to enhance the human-WLTR interaction.

Some of these points are taken from the paper "The USUS Evaluation Framework for Human-Robot Interaction" [109]. Attached is an example of an evaluation protocol for the use of WLTR in English and its German translation (see **I.1** and **I.2**).

- **Reduce interruptions:**

- Schedule breaks and maintenance: breaks and maintenance should be scheduled to not interrupt the operation of WLTR. This could be achieved by using buffer times or by carrying out maintenance in parallel.
- Minimize external disturbances: external disruptions, such as material shortages or adverse weather conditions, should be minimized through careful planning and preparation.
- Standardize interfaces and protocols: introducing standardized communication protocols between different robotic systems and construction management software. This allows systems to work more smoothly together and reduces compatibility issues.

- **Improving human-robot interaction:**

- Combine with takt planning: this can optimize the deployment of tasks on-site for the most effective results. Further research is needed, and analysis should be carried out based on individual project and site conditions.
- Parallelize tasks: building on the previous point, multiple WLTR units should be used in parallel to increase overall productivity. However, this requires careful coordination and planning.

- Use downtime: downtime of WLTR, such as during manual preparation, should be used to complete other tasks, such as preparing materials for the next operation.

Implementing these recommendations will further increase productivity when working with WLTR. The combination of optimized preparation, improved workspaces, staff training, technical adaptations, BIM integration, interface standardization and continuous data analysis will lead to more efficient use of the robot and reduced workload for human workers.

However, all of these measures start with a willingness to invest, which is the first step in enabling the integration of construction robots into the construction industry. This includes investment in both research and improvement of robotic systems.

7.5 Summary of Chapter 7: HRI on Real Construction Site in Pelhřimov

Chapter 7 focuses on the practical application of WLTR on an active construction site in Pelhřimov and answers the following questions:

- **How could human-robot interaction look like on an actual construction site in terms of safety, training, and productivity?**
- **Which suggestions can be implemented to optimize safety, training, and productivity?**

The chapter aims to reflect on the key findings from the previous theoretical chapters within the context of this real-world deployment and derive recommendations.

The first question is answered in the first subsection of each section by summarizing the responses provided by the WLTR operators and analyzing productivity through video analysis and a comparison of the WLTR's speed to that of a human bricklaying crew.

The second question is then answered in the respective second subsection by presenting suggestions based on the findings of the previous chapters of this thesis.

During the pilot project, three WLTR robots were deployed at the same time. The manufacturers implemented several safety measures, including four emergency stop buttons and an access authorization system via chip, which allowed for a clear assignment of responsibility to specific operators. Two operational modes were defined: "Bricklaying" and "Manipulation." However, a clear, standardized definition of the safety distance was lacking; instead, the work zone was only marked with warning tape.

A comprehensive risk assessment for 14 potential hazards using the HAZOP method was conducted. Measures were then categorized into technical, organizational, and personnel-related proactive measures. A risk matrix was created to prioritize risks, classifying hazards based on likelihood of occurrence and impact. The reaction strategy was then aligned with the 4Ts strategy (Tolerate, Treat, Transfer, Terminate).

Two risk factors were given particular attention: collisions with personnel or machinery and insufficient training. The probability of these risks' occurrence changes over time, highlighting the need for continuous risk reassessment throughout the project life-cycle.

Additionally, based on given information and technical assumptions, a theoretical safety distance of **7.38** meters per robot was calculated. As this space is often non practical on actual construction sites, alternative approaches were proposed, such as dynamic safety zones or redundant safety levels.

WLTR manufacturer offer training programs covering safety, robot operation, and technical knowledge. The training typically lasts no more than one week, with prior experience in bricklaying being highly useful. Based on survey results from operators/manufacturers and chapter 5, several enhancements are recommended:

- Expanding the content to include interdisciplinary topics,
- Increasing flexibility of the format (e.g., hybrid learning methods),
- Integrating theory and practice phases,
- Implementing feedback systems for continuous improvement,
- Providing long-term learning support through refresher courses and mentoring programs.

The productivity analysis is based on the thesis by Niklas Jobst, which shows that WLTR is unaffected by many common causes of productivity losses. This confirms the robot's potential for enhancing on-site productivity. To fully use this potential, the following optimization strategies are proposed:

- Enhancing preparatory work to minimize inactive time,
- Improving the work zone layout (e.g., defined zones, safety infrastructure),
- Applying technical upgrades such as regular software updates, integration of BIM models, and sensor-based data analysis,
- Using an evaluation protocol provided in the appendix,
- Reducing interruptions through planned maintenance, minimized external disruptions, and standardized interfaces and protocols.

Despite limited available data, this chapter describes the valuable insights into a practical deployment of construction robotics. The chapter highlights critical implementation factors and tries to cover a part of the gap between theory and practice by reflecting on theoretical principles through a real-world case study.

Chapter 8

Outlook and Further Research Needs

8.1 Summary of Findings

Construction robots are new elements that promise significant benefits. However, they also bring new challenges, especially in process design, which concerns both the process itself and the surrounding environment.

This thesis identifies the potential effects of introducing robots on construction sites in terms of safety, acceptance & new roles and productivity and thus provides a basis for further developments. It explores the fundamentals of human-robot interaction (HRI), including the different categories of interaction such as remote and proximate interaction. With advances in technology, the concept of hybrid interaction is then proposed.

To understand these interaction types, it is essential to examine how humans and robots perceive and engage with their environment. These basic principles are closely related to ergonomic design, which aims to create systems in which all components interact efficiently to enhance human well-being and productivity at work. In addition, the thesis addresses current applications and challenges of robotics in the construction industry.

The literature review is complemented by empirical research methods, including a summary of workshops and expert interviews. The participants, who all have a background in construction, automation or mechanical sectors, highlighted several key areas that need to be considered for the successful integration of robotics in construction, for example:

- Personnel training and education
- Standardized and "robot-ready" sub-processes
- Effective planning and coordination
- Change management and acceptance
- Safety considerations, including comprehensive strategies, adherence to established standards, ongoing training, and implementation of monitoring technologies.

The experts agreed that the construction industry is likely to see a significant increase in automation and robotics applications in the coming years. To prepare for this shift, they emphasized the importance of supporting collaboration, increasing investment, and targeted research and innovation.

In terms of H&S, robots can improve the level of safety on construction sites by taking over dangerous and difficult tasks from workers - tasks that could otherwise lead to accidents - and by working more precisely, for example with the help of sensors.

However, their introduction can also create new risks if the implementation (whether the interaction is direct or indirect) is not well thought out. These risks can be physical, economic or psychological (see 4.1).

To avoid such risks, a framework defined by safety standards is needed. This thesis proposes an approach to derive new safety rules for the use of construction robots based on existing safety standards for machines, collaborative robots, and construction machines.

The method involves comparing the form of construction robots with existing construction machines and combining aspects from standards to formulate rules adapted to construction sites (see 4.5.1). It is important to consider the inherent design of robots, complementary safety measures, user information, interaction types, processes and project phases.

These aspects can be addressed through risk analysis. Several methods are available for this purpose. The thesis presents an example using the FMEA and HAZOP methods. The goal is to analyze the system and identify risks either through "key words" or by breaking the system down into smaller units. Appropriate safety measures are then selected to reduce or eliminate the likelihood or impact of the identified risks whenever possible.

One such safety measure is the definition of the work or danger area during the robot's operation. The ISO/TS 15066 standard provides formulas for calculating the safety zone. Within this zone, the robot's responses can vary depending on, for example, the approach distance, speed or force. The robot's speed can be reduced, work modes adjusted, or paths modified accordingly.

Safety risks can also be reduced through an appropriate training program. Such a program is necessary because robots affect construction work by taking over certain tasks, shifting the focus of workers to other activities, and possibly creating new roles. The successful introduction of construction robots depends on gaining the acceptance & trust of workers. This can be achieved by understanding their needs and concerns. Factors such as age, culture, media influence, and previous experience are important to consider, as they can lead to challenges such as safety concerns, fear of job loss, stress due to rapid change, and more.

An effective training approach helps to address these challenges. This thesis proposes a combination of theoretical and practical approaches, supported by modern methods such as Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR), to provide workers with new education and training opportunities.

New professions may emerge, such as operator, HRI trainer, automation specialist or robot-oriented architect, requiring new competencies and skills. It is important to note that in addition to traditional construction skills, additional skills - technical, soft skills, construction-specific knowledge, and health and safety knowledge - will be required. All these aspects have a significant impact on productivity.

Productivity, defined as the relationship between input and output, can be measured using various metrics such as performance and effort values, and quality. The thesis also identifies challenges that can lead to productivity losses on construction sites.

The relationship between productivity and safety is characterized by both conflicts and synergies. While safety measures can increase productivity, excessive and unnecessary measures can decrease productivity due to frequent interruptions. The critical point between increasing and decreasing productivity must be identified for each project and each project phase.

Acceptance & trust have a similar impact: low levels of trust and acceptance can reduce productivity because the integration of construction robots would fail due to worker resistance. On the other hand, too much trust and acceptance can lead to over-reliance on robots, which can also have a negative impact on productivity.

Training programs are therefore essential. They teach workers about the risks associated with robot use and how to operate the robots to achieve their best potential - improving efficiency, work speed and work quality.

To move from general concepts to specific applications, it is crucial to reflect theoretical findings through practical case studies. In this context, WLTR - the bricklaying robot developed by Wienerberger - was used on a real construction site in Pelhřimov.

Interviews with the robot's on-site operators provided insights into the safety measures and training programs implemented. In addition, a video-based productivity analysis provided comparison between WLTR and a traditional human bricklaying crew. Based on the collected information from literature, workshops, expert interviews, and other findings in this thesis, recommendations for practical implementation were developed.

In terms of safety, a risk analysis was conducted, and a risk matrix was made. This matrix helped to identify appropriate reaction strategies. It is essential to monitor safety throughout all phases of the construction project, as the likelihood of certain hazards may vary depending on the construction phase, which in turn requires dynamic and adaptive risk management strategies.

As mentioned earlier, training programs play a critical role in improving site safety. To maximize their impact, training content should be expanded and delivered using a variety of methods and formats. In addition, these programs should be in long-term development plans to ensure sustainable knowledge transfer and skill improvements.

In terms of productivity, WLTR offers specific advantages because it is not influenced by human factors that typically affect performance, such as age, physical tiredness, or lack of experience (see Section 6.1.3). To further improve productivity, several measures are recommended: optimizing preparatory tasks, improving workspace conditions, training personnel effectively, performing technical updates, using data analysis to monitor performance, applying continuous improvement strategies, reducing work interruptions, and increasing robot utilization.

While these recommendations are for WLTR, many of them can be adapted to other robotic systems used on construction sites.

Construction robots, like other machines, are tools that can drive progress on construction sites. To achieve the best possible results from the use of robots, it is crucial to plan each process carefully and to consider the environment around the robot, as this environment represents a key difference from stationary industrial environments. Humans are an integral part of these processes and environments, and construction robots are designed to assist - not replace - humans. This requires the workforce to grow along with technological advances. A healthy pace of development, with gradual innovation and system improvements that keep people at the center, is the path to a positive human-robot interaction.

8.2 Outlook on Future Developments and Research Perspectives

8.2.1 Project Phases and Robotics

The integration of robotics on construction sites will have a significant impact on various project phases. In Austria, ÖNORM B 1801-1:2022 defines six phases of project development [110, p. 7]:

- Development phase
- Preparation phase
- Preliminary design phase
- Design phase
- Execution phase
- Completion phase

Gliederung		Projektphase					
ÖNORM B 1801-1		Entwicklungsphase	Vorbereitungsphase	Vorentwurfsphase	Entwurfsphase	Ausführungsphase	Abschlussphase
Leistungsmodelle gemäß 3.17		Phase 1 Projektvorbereitung		Phase 2 Planung (Vorentwurf, Entwurf, Einreichplanung)		Phase 3 ^a , Phase 4 ^b	Phase 5 Projektabschluss
Handlungsbereich							
Qualität	Qualität	Qualitätsziel	Qualitätsrahmen	Vorentwurfsbeschreibung	Entwurfsbeschreibung	Ausführungsbeschreibung	Qualitätsdokumentation
	Quantität	Quantitätsziel	Raumprogramm	Vorentwurfsplanung	Entwurfsplanung	Ausführungsplanung	Planungsdokumentation
Kosten	Kosten	Kostenziel	Kostenrahmen	Kostenschätzung	Kostenberechnung	Kostenanschlag	Kostenfeststellung
	Finanzierung	Finanzierungsziel	Finanzierungsrahmen	Finanzierungsplan			
Termine	Termine	Terminziel	Terminrahmen	Grobterminplan	Genereller Ablaufplan	Ausführungsterminplan	Terminfeststellung
	Ressourcen	Ressourcenziel	Ressourcenrahmen	Ressourcenplan			

Gliederung	
Baugliederung	1. Ebene
	2. Ebene
	3. Ebene
	4. Ebene: Elementtyp
Leistungsgliederung	Leistungsposition

^a Phase 3: Ausführungsvorbereitung

^b Phase 4: Ausführung

Fig. 8.1: Phases of project development

In particular, introducing robotics will change the traditional planning and execution processes, especially when it comes to increasing productivity.

In the planning phase, the first question is whether robotics can be applied to a given project. This depends on the type of work involved, project requirements, funding and other factors. A feasibility study is essential. The next step is to plan the optimal use of robotics, including workflows and methods. The building design should be adapted for robotic integration, with BIM simulations providing valuable support.

Some robots are limited by specific conditions, requiring preparatory measures. These include training programs for workers, as well as process-specific adaptations such as workspace preparation and safety measures.

In addition, the transportation of the robots and coordination with site logistics and teams must be carefully planned and executed.

During the execution phase, the impact of robotics varies depending on the type of robot used and its requirements. The main difference is that large parts of the processes and workflows are no longer done by humans but by robots.

An important accompanying aspect is quality control and inspection. Some of these tasks can be performed by specially designed robots. Alternatively, robots can collect and organize data, allowing human workers to focus on analyzing and verifying the data. This significantly reduces manual labor.

Robots can also be used in the operation and maintenance phases, especially for recurring tasks. For examples on applications of robots see sections **2.3** and **5.1**.

In collaboration with Niklas Jobst, a checklist for the use of robots on construction sites was developed. We analyzed the different phases and defined activities for each phase, considering the integration of robots. For example:

- Preliminary planning: construction processes should be analyzed and planned according to the requirements of robots. This includes evaluating the benefits of robotic processes versus manual labor to make informed decisions. Other considerations include maintenance planning, cost estimating, and interfaces with other trades.
- Planning and design: this phase involves detailed considerations, including selecting appropriate sensors and employee training.
- Tendering and awarding: technical requirements of robotic solutions are incorporated into the bidding process to identify the most appropriate vendor.
- Execution planning and site preparation: protective measures must be defined and implemented to prepare the site for robotic operations. Other preparatory activities are also required.
- Documentation: tracking construction activities can be simplified and more detailed with real-time robot tracking.
- Project completion: the final phase can be enhanced with "lessons learned" sessions focusing on the robot integration experience.

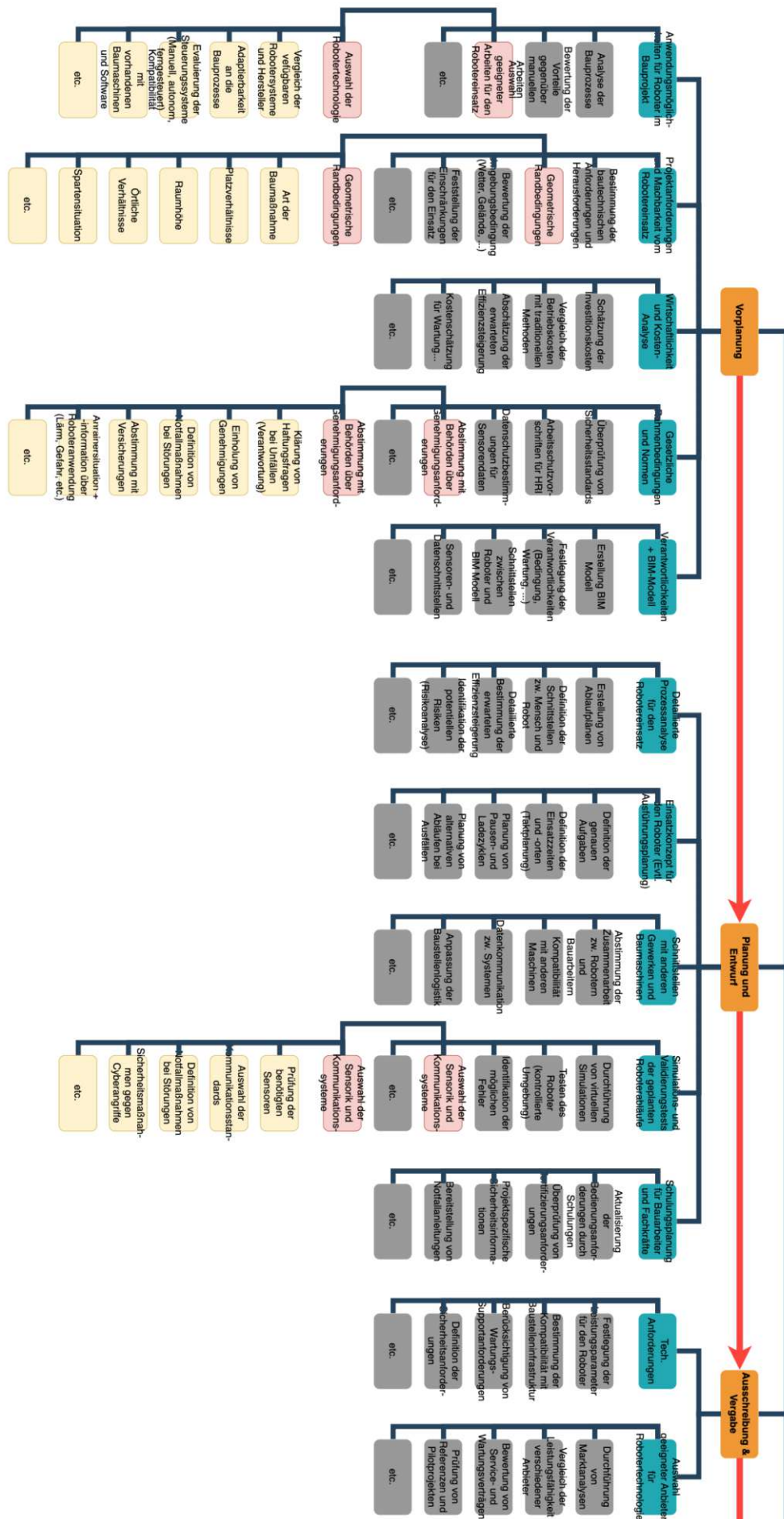


Fig. 8.2: Draft of checklists for the deployment of robots on construction sites

See Appendix (E) for a more detailed breakdown of each phase. This table is a dynamic reference that evolves with experience and can be continuously updated and refined. In summary, the integration of robotics affects all phases of construction. While the impact may vary from project to project and phase to phase, a fundamental change is unavoidable.

This wide analysis of the project phases shows that the integration of robotics involves technical and organizational changes and has a significant impact on the productivity of construction projects. A key factor is the knowledge required during the planning phases to prepare for each phase of the project effectively.

Therefore, human-robot collaboration is not a subsequent thing but a key success factor for the future of digital construction. It enables effective human-robot interaction and thus contributes to improving productivity.

8.2.2 Build by Wire

The integration of robots and technological advances opens new horizons. There are many questions and suggestions for future research and applications, such as the creation of checklists to facilitate the implementation of construction robots on construction sites. Another example is to validate the data and findings discussed in this thesis through real-world applications, including field experiments, data analysis, and surveys.

This section is dedicated for a new concept made possible by the use of construction robots: **"Build by Wire"**.

The idea of "Build by Wire" was developed in collaboration with Jaromir Sadlon of GreenBuild (see section 3.2.1), and inspired by the concepts of **"Fly by Wire"** (aviation) and **"Drive by Wire"** (automotive). To apply this idea to the building industry, it's important at the beginning to understand the principles behind these systems.

Key Principles of "Fly by Wire" [111, p. 115]:

- Electronic signal transmission: instead of mechanical connections, pilot control commands are sent via electrical signals to actuators that move the control surfaces.
- Use of computers: flight control computers process the pilot's inputs.
- Redundancy: fly-by-wire systems are designed with multiple redundancies to ensure safety. There are often several parallel systems so that a failure in one component does not lead to loss of control.
- Feedback systems: the system continuously collects data from sensors (e.g., speed, flight attitude, pressure) and adjusts control commands accordingly, optimizing stability and performance.
- Assistance systems: systems like "envelope protection" prevent the pilot from executing maneuvers that exceed the structural or aerodynamic limits of the aircraft.
- Flexibility and adaptability: the system can be programmed to provide different control characteristics depending on flight mode or conditions (e.g., takeoff, landing).

Integration of this system has Benefits like weight reduction, improved stability and maneuverability, leading to increased safety.

Key Principles of “Drive by Wire” [112]:

- Electronic signal transmission: mechanical connections are replaced by electrical or electronic systems. Sensors capture driver inputs (e.g., steering movements, acceleration), which are processed by control units.
- Use of computers: driver inputs are interpreted, optimized, and converted by an Electronic Control Unit (ECU) into electrical commands for actuators.
- Redundancy: drive-by-wire systems incorporate redundant sensors, control units, and power supplies to ensure safe operation. In case of failure, a “fail-safe” mechanism is typically activated, allowing for basic control or emergency shutdown.
- Feedback systems: electronic feedback mechanisms provide information to enhance system performance.
- Assistance systems: these systems enable the integration of modern driver assistance systems (e.g., autonomous driving).
- Flexibility and adaptability: the system can be adapted to different driving conditions or modes (e.g., autonomous driving, sport mode).

The system has also the advantages of weight reduction and higher precision. We can notice through the principles the similarity between “**Drive** by Wire” and “**Fly** by Wire”.

These systems have led to modern autonomous driving and flying systems. A repeated pattern emerges - an “**X** by Wire” system, where “**X**” stands for a variable that can be replaced by a core activity.

Regarding construction, this could lead to the concept of “Build by Wire,” which presents an system that assists humans in building processes.

Like autopilot or auto drive, construction activities could be optimized through automation – with the principles of “Build by Wire” as a concept and construction robots as the enabling tool.

This thesis presents the idea and vision behind “Build by Wire”. Its realization, however, depends on further research and development to define the theoretical and practical framework.

Examples to demonstrate feasibility of this principles:

- Tunnel boring machines: highly automated operations and machines.
- ABCSystem (Japan): high-rise buildings constructed with minimal human intervention [113].
- Construction robots: enabling automation in construction processes.
- LiReCon-system by Liebherr: remote-controlled machines equipped with sensors and cameras [114].

A conceptual representation of "Build by Wire" was created by Mr. Niklas Jobst. The next step is to evaluate the limitations, advantages and disadvantages of such system to ensure that it is feasible in the construction process and beneficial to humans, starting with workers on construction sites.

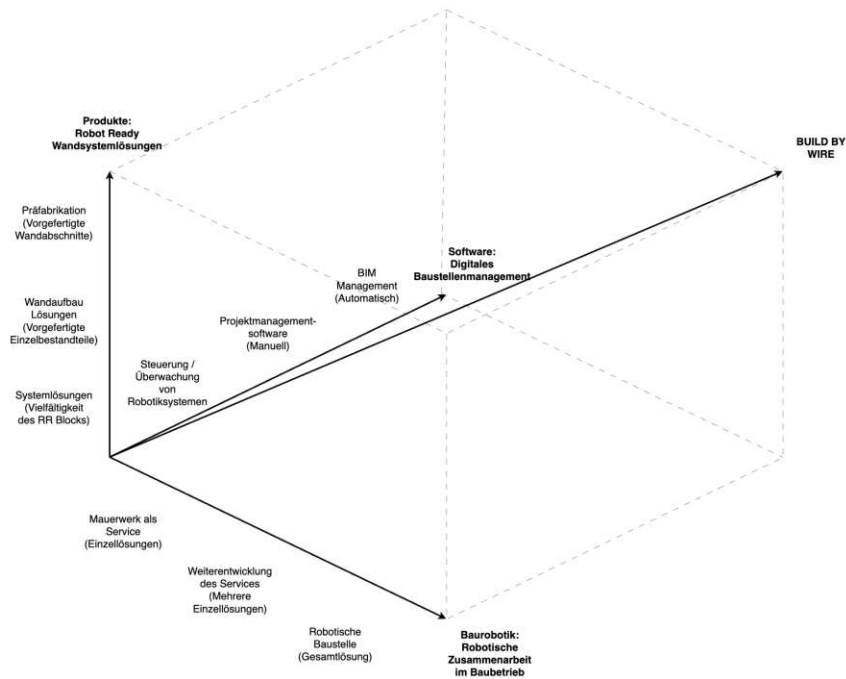


Fig. 8.3: Three-axis illustration of Build by Wire

8.3 Suggestions for Practical Implementation

In practice, experience with construction robots is still limited. Therefore, it is recommended to promote development and start pilot projects where the impact of the use of robots becomes noticeable.

In the context of H&S, international cooperation between countries is essential to develop a new and adapted standard specific for construction robots. The advantage such an approach is that the introduction of standards can be accelerated and applied consistently worldwide. In terms of risk analysis, experts and experienced professionals from various fields can contribute their knowledge to help construction sites identify risks early and select appropriate measures to prevent potential hazards.

The definition of new occupations and roles is based on the sociology of education. This involves identifying new skills and quantifying them. It involves defining the tasks to be performed by robots, identifying the required skills and competencies, and building an appropriate training system. This requires cooperation between various educational institutions, manufacturers, trade unions, and representatives of workers, employers, and construction companies. Such cooperation should be characterized by transparency and mutual appreciation to achieve the best results.

In terms of acceptance & trust, it is recommended that companies address the needs and concerns of their employees, offer training programs, and make them feel an included part of this development - one that is about support, not replacement. Positive stories and experiences should be highlighted, and negative ones acknowledged and learned from to avoid similar situations in the future. Respecting the cultural backgrounds and concerns of employees is critical in this process.

Productivity gains can be achieved by understanding the potential of construction robots. This requires a series of real-world applications supported by meaningful data. It is therefore essential to encourage research in this direction. In addition, it also requires the courage to invest and make decisions that allow the use of construction robots in the field.

In conclusion, this thesis proposes to take the opportunities offered by the use of construction robots, especially since the field is still in its early stages. However, due to the rapid technological development, there should also be international collaborations that keep pace with this progress and a support for research and universities.

Appendix A

Definition of Terms

Begriff	Normen	Google / Wikipedia	Andere Quellen	Eigene Worte (Niklas) evtl. als Denkanstoß, <i>Ergänzung K</i>	Zusammenfassung wichtigsten Punkte
Prozess	ÖNORM A 9009: Satz von Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Input in Ergebnisse umwandelt, wobei die Inputs für einen Prozess sind üblicherweise Ergebnisse anderer Prozesse	Ein Prozess (von lateinisch procedere, „vorwärts gehen“) kann als ein Verlauf, eine Entwicklung oder ganz allgemein als ein System von Bewegungen bezeichnet werden. Vergleichbare Begriffe sind auch „Hergang“, „Fortgang“, „Ablauf“ und „Vorgang“.	Projektmanagement im Bauwesen(S.12): "Jede Prozessphase muss nach bestimmten Hauptmerkmalen gesteuert werden. Diese Hauptmerkmale werden im Sinne des Projektmanagements "Prozesse" genannt. Folgende Prozessarten unterscheidet man nach dem Wissenkanon des Projektmanagements: (Ziele, Strukturplan, Qualitäten, Kosten/Finanzen, Ablauf und Termine, Ressourcen, Verträge und Nachforderungen, Risiken, Organisation, Information / Dokumentation und Kommunikation)	Ein stetiger Vorgang, welcher durch gezielten Einsatz von Inputs einen oder mehrere Ergebnisse bringt.	Ein Prozess ist ein kontinuierlicher Vorgang, der sich über eine gewisse Zeit erstreckt und eine Reihe zusammenhängender und sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten umfasst. Das Ziel eines Prozesses besteht darin, durch den gezielten Einsatz von Inputs ein spezifisches Ergebnis oder Ziel zu erreichen. Dabei werden die Inputs in Ergebnisse umgewandelt, wobei diese Inputs oft Ergebnisse anderer Prozesse sind.
Bauprozess	-	Bauprozess kann zwei verschiedene Aussagen bezeichnen: Zunächst kann Bauprozess projektbezogen verwendet werden. In diesem Fall ist das gesamte Verfahren zur Herstellung eines Bauwerks, von der Bauplanung über die Bauausführung bis zur Baunutzungsphase gemeint.	Projektmanagement im Bauwesen (S.261): In der Phase der Bauausführung sind die Bauprozesse durch die Bauunternehmung zu gestalten	Der stetige Vorgang einer Baustelle, welcher durch gezielten Einsatz von Materialien, Personal und Geräten ein Leistungsziel herbeiführt.	Ein Bauprozess umfasst alle Aktivitäten, die zur Errichtung eines Bauwerks führen, von der Planung und dem Entwurf über die Materialbeschaffung und Bauausführung bis hin zum Abschluss. Dabei finden diese Prozesse direkt auf der Baustelle statt und beinhalten auch vor- und nachgelagerte Abläufe wie Lieferprozesse und Entsorgung. Bauprozesse erfordern den gezielten Einsatz von Materialien, Personal und Geräten durch die Bauunternehmung, um das gewünschte Leistungsziel zu erreichen.
Baublauplan	-	Unter Bauablauf (auch Baufortschritt) versteht man im Bauwesen alle Projektphasen der Bauausführung im Bauprozess eines Bauvorhabens, die letztlich zu seiner Fertigstellung und Bauabnahme führen.	-	Ein vor Baubeginn definierter Ablauf von Teilprozessen zur Erreichung eines Leistungsziels.	Der Bauablauf beschreibt die zeitliche Abfolge von Projektphasen und Aktivitäten während der Bauausführung eines Bauvorhabens, von der Baugenehmigung über den Baubeginn bis hin zur Fertigstellung und Inbetriebnahme des Bauobjekts. Dabei umfasst er die Organisation und Koordination verschiedener Bauphasen, um das Projekt termingerecht und effizient abzuschließen. Der Bauablauf wird durch einen vor Baubeginn festgelegten Ablauf von Teilprozessen gestaltet, die auf das Erreichen eines Leistungsziels abzielen.
Bauverfahren/Baumethode	-	Der Begriff Bauverfahren (auch Baumethode) beschreibt die Summe aller Vorgänge und Arbeitsweisen zur Herstellung einer Konstruktion oder eines Bauwerks. Er ist nicht zu verwechseln mit dem Bedeutungsinhalt der Bauweise, die die festgelegte Anordnung von Konstruktions- oder Bauelementen beschreibt. Die Anwendung ingenieurmäßiger Methoden und Prinzipien zur Planung und Umsetzung eines Bauverfahrens nennt man Bauverfahrenstechnik.	Baulexikon 2016: Summe der Technik und technischen Einrichtungen zur Erstellung von Bauwerken und Bauwerksteilen	Ein vordefiniert praxisbezogener Arbeitsprozess, welcher als Bestandteil eines Bauprozesses dient.	Eine Baumethode, auch als Bauverfahren bezeichnet, umfasst alle Vorgänge und Arbeitsweisen zur Errichtung eines Bauwerks. Sie bestimmt den Bauablauf und die Organisation der Baustelle und kann traditionelle Techniken, moderne Verfahren wie vorgefertigte Bauweise oder innovative Ansätze wie modulare Konstruktion umfassen. Die Baumethode ist nicht mit der Bauweise zu verwechseln, welche die Anordnung der Bauelemente beschreibt. Sie beinhaltet auch ingenieurmäßige Methoden und Prinzipien zur Planung und Umsetzung des Bauprozesses.
Lean Construction	-	Lean Construction ist die Adaptierung der aus dem Toyota-Produktionssystems stammenden Lean-Prinzipien auf den Baubereich. Neben der Bezeichnung Lean Construction kommt auch die Bezeichnung Lean Management im Bauwesen zum Einsatz.	DA TU-Wien: "Die offiziellen Begründer von Lean Management James P. Womack und Daniel T.Jones definieren: Lean Management ist keine generell anwendbare Methode, sondern ein Dankansatz mit verschiedenen Wirkprinzipien, die im Unternehmen vor Ort individuell umzusetzen sind.	Eine Arbeitsmethode, welche Zeit, Qualität und Kosten durch kooperative Zusammenarbeit aller Baubeteiligter hinsichtlich deren Effizienz optimiert.	Lean Construction ist eine Managementphilosophie im Baumanagement, die darauf abzielt, Zeit, Material und Arbeitskräfte auf einer Baustelle so effizient wie möglich einzusetzen. Basierend auf den Lean-Prinzipien des Toyota-Produktionssystems, fördert sie die Minimierung von Verschwendung und die Maximierung von Wert für den Kunden durch kontinuierliche Verbesserung, Zusammenarbeit und effiziente Ressourcennutzung. Lean Construction optimiert Zeit, Qualität und Kosten durch kooperative Zusammenarbeit aller Baubeteiligten und passt Lean-Management-Prinzipien individuell auf Bauprojekte an.
Digitalisierung	-	Unter Digitalisierung (von lateinisch digitus „Finger“ und englisch digit „Ziffer“) versteht man die Umwandlung von analogen, d. h. stufenlos darstellbaren Werten bzw. das Erfassen von Informationen über physische Objekte in Formate, welche sich zu einer Verarbeitung oder Speicherung in digitaltechnischen Systemen eignen. Die Information wird hierbei in ein digitales Signal umgewandelt, das nur aus diskreten Werten besteht. Zunehmend wird unter Digitalisierung auch die Nutzung primär digitaler Repräsentationen, zum Beispiel durch Digitalkameras oder digitale Tonaufzeichnungssysteme verstanden. Die Möglichkeit der Informationstechnischen (Weiter-)Verarbeitung ist ein Prinzip, das allen Erscheinungsformen der Digitalen Revolution und der Digitalen Transformation im Wirtschafts-, Gesellschafts-, Arbeits- und Privatleben zugrunde liegt.	Agile Digitalisierung im Baubetrieb (S.86): Unter Digitalisierung wird die Verbindung von Menschen, Systemen und Maschinen ohne „Reibungsverluste“ verstanden. Daraus resultiert ein ganzheitliches Zusammenspiel aller relevanten Beteiligten, Informationen, Maschinen und Materialien, die zur Erstellung des Produktes oder der Dienstleistung notwendig sind.	Umwandlung analoger Daten in Digitale bzgl. Speichern, Archivieren, Einlesen, Weiterverarbeiten.	Digitalisierung bezeichnet die Umwandlung analoger Informationen, Prozesse und Systeme in digitale Formate, die für die Speicherung, Verarbeitung und Übertragung in digitalen Systemen geeignet sind. Dies beinhaltet den Einsatz von Technologien wie Computern, Software, Internet und Mobilgeräten. Digitalisierung umfasst die Erfassung physischer Objekte in digitale Formate, die Nutzung primär digitaler Repräsentationen sowie die Verbindung von Menschen, Systemen und Maschinen zu einem reibungslosen Zusammenspiel aller relevanten Beteiligten zur Erstellung von Produkten oder Dienstleistungen.
Konnektivität	-	Die Konnektivität umfasst digitale Netzwerke, von mobilen und festen Strukturen bis hin zum Internet, einschließlich Kabeln und Satelliten. Über seine technologischen Facetten hinaus verkörpert die Konnektivität jedoch eine tiefgreifende menschliche Dimension.	Homeoffice und mobiles Arbeiten im Team effektiv umsetzen: Die Zusammenarbeit mit Kollegen, die Kommunikation mit Kunden und Geschäftspartnern, der Zugriff auf aktuelle Dokumente – all dies erfordert eine Netzverbindung für Sprach- und Datenkommunikation. Im Homeoffice ist dies meist ein DSL- oder Kabelanschluss, unterwegs Mobilfunk oder das WLAN-Netz im Hotel oder der Flughafenlounge.	Verbindungsqualität (Netzwerkbildung) zwischen Menschen, Maschinen, Objekten, IT-Lösungen, etc.	Konnektivität bezeichnet die Fähigkeit von Menschen, Maschinen und Geräten, sich über digitale Kommunikationstechnologien zu vernetzen und Daten auszutauschen. Dies umfasst Netzwerke wie das Internet, mobile und feste Strukturen sowie Technologien wie das Internet of Things (IoT), das physische Objekte mit Sensoren und Software vernetzt. Konnektivität ermöglicht die Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen Kollegen, Kunden und Geschäftspartnern, unabhängig von Ort und Zeit, und ist essenziell für den Zugriff auf Dokumente und die Nutzung von IT-Lösungen. Sie umfasst sowohl technologische als auch menschliche Dimensionen und beeinflusst die Qualität der Verbindungen zwischen allen beteiligten Einheiten.
Mechanisierung	-	Unter Mechanisierung versteht man in der Industrie die Unterstützung der menschlichen Arbeitskraft durch den Einsatz von Maschinen und technischen Produktionsanlagen über den einfachen Werkzeuggebrauch hinaus.	Quellen: Das Mechanisiertwerden	Körperliche Arbeiten durch den Einsatz von Geräten vereinfachen.	Mechanisierung bezeichnet den Einsatz von Maschinen und mechanischen Geräten zur Unterstützung und Erleichterung menschlicher Arbeit in der Industrie. Dies geht über den einfachen Werkzeuggebrauch hinaus und umfasst verschiedene Stufen, von Handarbeit bis zu integrierten Systemen. Durch die Mechanisierung werden Prozesse automatisiert, die Produktivität gesteigert und die physische Arbeitsbelastung der Menschen reduziert.

Begriffe Erweiterung					
Begriff	Normen	Google / Wikipedia	Andere Quellen	Eigene Worte (Niklas) evtl. als Denkanstoß, Ergänzung K	Zusammenfassung wichtigsten Punkte
Maschinisierung	-	Ersatz manueller Arbeiten durch Maschinen. Menschliche Arbeitskraft ist nicht voll ersetzt, sondern auf eine andere (höhere) Ebene verdrängt (Kontrolltätigkeit). Maschinisierung gestattete historisch die Entwicklung der Fabrik aus Handwerk und Manufaktur.	-	Körperliche Arbeiten durch den Einsatz von technischen Maschinen vereinfachen und beschleunigen.	Maschinisierung bezeichnet den weiterführenden Schritt der Mechanisierung, bei dem Maschinen nicht nur zur Unterstützung, sondern zur Führung von Werkzeugen eingesetzt werden. Dabei wird die menschliche Arbeitskraft nicht vollständig ersetzt, sondern auf eine höhere Ebene der Kontrolle und Überwachung verlagert. Dieser Prozess umfasst den allgemeinen Einsatz von Maschinen, unabhängig von deren Automatisierungsgrad, und ermöglicht die Beschleunigung und Vereinfachung körperlicher Arbeiten.
Automatisierung	-	Automatisierung ist sowohl die Bezeichnung für einen Arbeitsprozess (das Automatisieren) als auch für dessen Arbeitsergebnis (automatisierte Arbeitsobjekte). Der Begriff Automatisierung dient zugleich zur Charakterisierung wirtschaftlich-technologischer Entwicklungsphasen („Zeitalter der Automatisierung“) und ist auch Gegenstand sozialpolitischer Diskussionen, speziell philosophischer Debatten bis hin zur künstlerischen Verarbeitung.	Automation and Robotics in the Architecture, Engineering, and Construction Industry (S.6): Automation has been defined historically as the application of automated pro- cesses and machines, principally for production or data-processing operations that demand limited or no human interference during routine procedures [22]. Automation is also defined as a process of implementing autonomous devices to execute production-related operations automatically through a feedback process in which sensors monitor the operations of a system and transmit indicators to a com- puterized device that instinctively controls the operation [23]. Furthermore, automation is defined as the performance of an apparatus, process, or system operated by an automatically controlled mechanical or electronic device designed to supplant human labor [24].	Teilprozesse durch den Einsatz von softwaregestützter sich wiederholender Technik “verselbstständigen”.	Automatisierung bezeichnet den Prozess, bei dem gesamte Arbeits- und Steuerungsprozesse von Menschen auf künstliche Systeme übertragen werden, um menschliche Intervention bei wiederholbaren Aufgaben zu minimieren oder zu eliminieren. Dies kann unterschiedliche Stufen umfassen, wie Teil- oder Vollautomatisierung. Automatisierung kann sich sowohl auf den Arbeitsprozess als auch auf das Arbeitsergebnis beziehen und spielt eine bedeutende Rolle in der wirtschaftlich- technologischen Entwicklung.
M2M (Machine to machine) Communication	-	Machine-to-Machine (M2M) steht für den automatisierten Informationsaustausch zwischen Endgeräten wie Maschinen, Automaten, Fahrzeugen oder Containern untereinander oder mit einer zentralen Leitstelle, zunehmend unter Nutzung des Internets und Zugangsnetzen wie dem Mobilfunknetz. Eine Anwendung ist die Fernüberwachung, -kontrolle und -wartung von Maschinen, Anlagen und Systemen, die traditionell als Telemetrie bezeichnet wird. Die M2M-Technologie verknüpft dabei Informations- und Kommunikationstechnik.	Machine-to-machine (M2M) communications : architecture, performance and applications (1.1.1): M2M generally refers to information and communications technologies (ICT) able to measure, deliver, digest, and react upon information in an autonomous fashion, i.e., with no or really minimal human interaction during deployment, configuration, operation, and maintenance phases.	Datengestützte Kommunikation zwischen Maschinen zum Austausch und zur Verarbeitung.	Machine-to-Machine (M2M) bezeichnet den automatisierten Informationsaustausch zwischen Endgeräten wie Maschinen, Automaten, Fahrzeugen oder Containern untereinander oder mit einer zentralen Leitstelle, häufig unter Nutzung des Internets und Mobilfunknetzen. Diese direkte Kommunikation und Datenübertragung erfolgt ohne menschliche Interaktion und ermöglicht Anwendungen wie Fernüberwachung, -kontrolle und -wartung von Maschinen und Anlagen. M2M-Technologie verknüpft Informations- und Kommunikationstechnik und operiert weitgehend autonom, von der Messung und Datenübermittlung bis zur Reaktion auf Informationen.
Maschine	-	Eine Maschine (entlehnt aus französisch machine, von lateinisch machina, dieses von altgriechisch μηχανή μέχανή, deutsch ‚Werkzeug‘, ‚künstliche Vorrichtung‘, ‚Mittel‘[1][2]) ist ein technisches Gebilde mit durch ein Antriebssystem bewegten Teilen. Maschinen werden als technische Arbeitsmittel vor allem für mechanische Einwirkung verwendet.	<u>Duden: mechanische, aus beweglichen Teilen bestehende Vorrichtung, die Kraft oder Energie überträgt und mit deren Hilfe bestimmte Arbeiten unter Einspannung menschlicher Arbeitskraft ausgeführt werden können</u>	Technisches Hilfsgerät, welches Energie nutzt um betrieben zu werden und damit für eine bestimmte Anwendung entworfen ist.	Eine Maschine ist ein technisches Gebilde, das aus miteinander verbundenen Teilen besteht, von denen mindestens eines beweglich ist. Sie dient dazu, eine bestimmte Arbeit zu verrichten, indem sie Energie in Bewegung, Kraft oder andere Formen von Arbeit umwandelt. Maschinen bestehen aus Komponenten wie Motoren, Getrieben, Sensoren und Steuerungen, die zusammenarbeiten, um eine bestimmte Funktion auszuführen. Sie können entweder manuell bedient oder über Automatisierungssysteme gesteuert werden.
Gerät	-	Als Gerät wird in der Technik ein Gebrauchsgegenstand bezeichnet, der dem Menschen als Werkzeug, Vorrichtung oder Ausrüstungsgegenstand dient.[1] Die wissenschaftliche Beschäftigung mit Geräten erfolgt im Rahmen der Ergologie (Arbeits- und Gerätekunde).	<u>Duden: [beweglicher] Gegenstand, mit dessen Hilfe etwas bearbeitet, bewirkt oder hergestellt wird.</u>	Datenumsetzendes technisches Hilfsgerät, welches nicht unbedingt der direkten Anwendung dient.	Ein Gerät ist ein technisches Gebilde, das aus miteinander verbundenen Teilen besteht und für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt ist. Es kann sowohl ein physisches Werkzeug, Instrument oder eine Maschine sein, die für eine spezifische Funktion oder Tätigkeit verwendet wird, als auch ein signalumsetzendes oder informationsverarbeitendes technisches Gebilde. Im technischen Kontext dient ein Gerät dem Menschen als Werkzeug, Vorrichtung oder Ausrüstungsgegenstand und kann für die Bearbeitung, Bewirkung oder Herstellung von Dingen verwendet werden. Es umfasst bewegliche Gegenstände, die eine bestimmte Aufgabe erfüllen, sowie datenumsetzende technische Hilfsgeräte, die nicht unbedingt für die direkte Anwendung bestimmt sind.
Werkzeug	-	Ein Werkzeug ist ein nicht zum Körper eines lebenden oder künstlichen Organismus gehörendes Objekt, mit dessen Hilfe die Funktionen des Körpers erweitert werden, um auf diese Weise ein unmittelbares Ziel zu erreichen.[1] Dieses Ziel ist in Handwerk und Industrie die Veränderung eines Werkstücks.	<u>Duden: für bestimmte Zwecke geformter Gegenstand, mit dessen Hilfe etwas [handwerklich] bearbeitet oder hergestellt wird.</u>	Vom Menschen gefertigtes Arbeitsmittel zur Vereinfachung körperlicher Aufgaben und zum Verarbeiten von Materialien.	Ein Werkzeug ist ein speziell entwickelter Gegenstand, der dazu dient, eine bestimmte Aufgabe oder Tätigkeit durchzuführen. Es kann von Hand oder mit einem elektrischen Antrieb betrieben werden und zielt darauf ab, die Arbeitsleistung zu vereinfachen, insbesondere bei der Veränderung oder Bearbeitung von Werkstücken in Handwerk und Industrie.
Bauhilfsfahrzeug (Baumaschine)	-	-	-	Maschine, welche auf Baustellen unter menschlicher Steuerung zum Einsatz kommt und dabei Hilfsarbeiten ausführt.	Ein Bauhilfsfahrzeug ist ein Fahrzeug oder Gerät, das auf Baustellen eingesetzt wird, um unterstützende oder ergänzende Funktionen auszuführen. Im Gegensatz zu schweren Baumaschinen sind Bauhilfsfahrzeuge in der Regel kleiner, handgeführt oder leicht zu bedienen. Diese Werkzeuge sind flexibel einsetzbar und können je nach Bedarf mit verschiedenen Anbaugeräten oder Werkzeugen ausgestattet werden.

Begriffe Erweiterung					
Begriff	Normen	Google / Wikipedia	Andere Quellen	Eigene Worte (Niklas) evtl. als Denkanstoß, Ergänzung K	Zusammenfassung wichtigsten Punkte
Roboter	ISO 8373: Programmed actuated machinery with a degree of autonomy to perform locomotion, manipulation or positioning	Ein Roboter ist eine technische Apparatur, die üblicherweise dazu dient, dem Menschen häufig wiederkehrende oder gefährliche mechanische Arbeit abzunehmen. Roboter können sowohl ortsfeste als auch mobile Maschinen sein. Sie werden von Computerprogrammen gesteuert.	Automation and Robotics in the Architecture, Engineering, and Construction Industry (5.6): A robot is defined as a machine that moves independently and executes complex tasks typically assigned to humans [17]. It is also defined as an automatic device that carries out complicated tasks that are often repetitive. A robot is usually programmed via automatic controls that enable it to imitate the human range of motions, equipped with multi-functional handlers explicitly intended for moving materials, instruments, or parts required to complete tasks. Robotics has been defined as the science of designing, manufacturing, and operating robots computed intelligently to complete tedious tasks, simulated via automated controls [18]. In several industries, robots are employed to execute jobs considered dangerous and monotonous, and as these technologies advance, robots are expected to be used to complete more complex jobs tasks. Another definition of robotics is the domain that permits the fabrication of robots [19].	Eine softwaregestützte Maschine, welche in der Lage ist, die programmierten Tätigkeiten in einem räumlichen Kontext selbstständig auszuführen. Der Automatisierungsgrad und der Grad an Mobilität ist nicht vorgegeben.	Ein Roboter ist eine programmierbare Maschine, die in der Lage ist, Aufgaben autonom oder halbautonom auszuführen, oft durch mechanische Bewegung. Er kann ortsfest oder mobil sein und wird von Computerprogrammen gesteuert, um wiederkehrende oder gefährliche Arbeiten zu übernehmen. Roboter sind darauf ausgelegt, Aufgaben effektiv zu erledigen, die typischerweise Menschen vorbehalten sind, und werden in vielen Branchen eingesetzt
Articulated Robot	ISO 8373: Manipulator which has two parallel rotary joints	An articulated robot is a robot with rotary joints (e.g. a legged robot or an industrial robot). Articulated robots can range from simple two-jointed structures to systems with 10 or more interacting joints and materials. They are powered by a variety of means, including electric motors. Some types of robots, such as robotic arms, can be articulated or non-articulated.	Robot motion planing (5.24): An articulated Robot is made of several moving objects (A1,...,Ap) (called links) connected by joints e.g. revolute joints (hinges) and prismatic joints (sliding joints). Each joint constrains the relative movements of the two objects it connects. Atypical example of an articulated robot is a robot arm	Gelenkige Robotersysteme, welche vor allem in der Fertigungsindustrie vorkommen.	Ein artikulierter Roboter ist ein industrieller Roboter, der aus mehreren Gliedmaßen oder Gelenken besteht, die sich um Achsen drehen können. Diese Gelenke ermöglichen dem Roboter eine große Bewegungsfreiheit und Flexibilität, ähnlich der Beweglichkeit des menschlichen Arms. Artikulierte Roboter werden häufig in der Fertigungsindustrie für komplexe Aufgaben wie Montage, Schweißen oder Materialhandhabung eingesetzt. Sie können aus einfachen Strukturen mit zwei Gelenken bis hin zu Systemen mit zehn oder mehr Gelenken bestehen und werden oft von Elektromotoren angetrieben.
Articulated Arms		An Articulated robotic arm is a type of industrial robot that's designed like a human arm and has different segments that are known as links. These links are usually connected by joints that give this robotic arm more flexibility and precision. They can either be rotary joints (revolute) or linear (prismatic joints). Generally, these industrial robotic arms have around two to six links (sometimes more) that grant them a certain degree of freedom (DOF) for movement. The most common configurations are 4-DOF and 6-DOF, with the latter having more flexibility than the other.		Gelenkige mechanische Arme, welche Bewegungen in mehreren Achsen und Positionen ausführen können.	Ein artikulierter Arm ist ein mechanischer Arm, der in der Robotik verwendet wird und aus mehreren Gliedern besteht, die durch Gelenke verbunden sind. Diese Gelenke ermöglichen Bewegungen in mehreren Achsen, wodurch komplexe Bewegungen und Positionierungen ausgeführt werden können. Artikulierte Arme bieten hohe Flexibilität und Präzision und werden häufig in industriellen Anwendungen eingesetzt. Sie verfügen typischerweise über zwei bis sechs Glieder, was ihnen einen bestimmten Bewegungsfreiraum (Degrees of Freedom, DOF) verleiht, wobei Konfigurationen mit 4-DOF und 6-DOF am häufigsten sind.
Robotic arm (arm / primary axes)	ISO 8373: Interconnected set of links (4.7) and powered joints of the manipulator (4.14), between the base (4.9) and the wrist (4.3)	A robotic arm is a type of mechanical arm, usually programmable, with similar functions to a human arm; the arm may be the sum total of the mechanism or may be part of a more complex robot. The links of such a manipulator are connected by joints allowing either rotational motion (such as in an articulated robot) or translational (linear) displacement. The links of the manipulator can be considered to form a kinematic chain.		Gelenkiger Roboterarm, welcher Bewegungen und damit Arbeiten in mehreren Achsen und Positionen ausführen kann.	Ein robotischer Arm ist eine mechanische Vorrichtung, die dazu dient, Werkzeuge oder Greifer zu tragen und zu bewegen. Er ähnelt in seiner Struktur einem menschlichen Arm und besteht aus Gelenken, die Bewegungen in mehreren Achsen ermöglichen. Diese Gelenke, auch Primärachsen genannt, bestimmen die grundlegenden Bewegungsmöglichkeiten des Arms, wie Rotation, Schwenken und Biegen. Ein robotischer Arm kann entweder die gesamte mechanische Vorrichtung oder ein Teil eines komplexeren Roboters sein.
Degrees of freedom (DOF)	ISO 8373: One of the variables (maximum number of six) required to define the motion of a body in space. Note 1 to entry: because of possible confusion with axes (5.3), it is advisable not to use the term degree of freedom to describe the motion of the robot.	In physics, the degrees of freedom (DOF) of a mechanical system is the number of independent parameters that define its configuration or state. It is important in the analysis of systems of bodies in mechanical engineering, structural engineering, aerospace engineering, robotics, and other fields. In mechanics, degrees of freedom (DOF) is the number of independent variables that define the possible positions or motions of a mechanical system in space. DOF measurements assume that the mechanism is both rigid and unconstrained, whether it operates in two-dimensional or three-dimensional space. The number of degrees of freedom is equal to the total number of independent displacements or aspects of motion.	Die sechs Freiheitsgrade, englisch six degrees of freedom (6DOF), beziehen sich auf die Bewegungsfreiheit eines starren Körpers im dreidimensionalen Raum. Ein Körper mit Bewegungsfreiheit in sechs Freiheitsgraden kann seine Position durch Translationen entlang der drei lotrechten Achsen vor/zurück, hin-/auf/hinter und links/rechts sowie seine Orientierung durch Rotationen um die drei lotrechten Achsen, bezeichnet als rollen (Rotation um die Längsachse), nicken (Rotation um die Querachse) und gieren (Rotation um die Hochachse), frei verändern.	Ein Maß, wie frei ein Mensch oder ein Roboter im 3D-Raum agieren kann	Der Begriff "Degree of Freedom" (DOF) beschreibt die Anzahl der unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten, die ein System oder eine Struktur hat. Im Kontext von Robotern oder mechanischen Systemen bezieht sich DOF auf die Anzahl der unabhängigen Richtungen, in denen sich ein Objekt bewegen kann, einschließlich der sechs Freiheitsgrade (Translationen entlang und Rotationen um die drei Achsen), die die vollständige Bewegungsfreiheit im dreidimensionalen Raum definieren.
Operator	ISO 8373: Person designated to start, monitor and stop the intended operation	This position is responsible for providing general robotic and automation oversight and support for manufacturing operations. The individual will run the automated equipment while leading some programming and other necessary steps to set up the machine. Also, robotics operators perform general machine oversight and basic work cell installation and updates. Lastly, robotics operators are responsible for routine and preventative maintenance of automated equipment.		Ein Mensch, welcher im Umgang mit dem automatisierten System geschult ist und dieses somit ordnungsgemäß betätigen und steuern kann. Der Operator bringt dabei auch die menschliche Komponente der Erfassung und Bewertung komplexer Situationen ein und trifft Letztentscheidungen.	Ein Operator ist eine Person oder eine Maschine, die eine bestimmte Aktion oder Operation ausführt. Im Kontext von automatisierten Systemen ist der Operator oft dafür verantwortlich, die Ausrüstung zu starten, zu überwachen und zu stoppen, sowie grundlegende Wartungs- und Programmieraufgaben durchzuführen.
Robotics Human-Interaction	ISO 8373: Information and action exchanges between human and robot to perform a task by means of a user interface. Example: Exchanges through vocal, visual and tactile means.	Human-robot interaction (HRI) is the study of interactions between humans and robots. Human-robot interaction is a multidisciplinary field with contributions from human-computer interaction, artificial intelligence, robotics, natural language processing, design, psychology and philosophy. A subfield known as physical human-robot interaction (pHRI) has tended to focus on device design to enable people to safely interact with robotic systems.		Das Interaktionsverhalten zwischen Roboter und Mensch stellt einen wichtigen Faktor für die Prozessentwicklung dar, da der Einfluss des Menschen wesentlich auf einen Prozess wirkt. Innerhalb eines Prozesses kann es effizient sein, komplexere Arbeitsschritte bei dem Menschen zu belassen. Das Zusammenspiel Roboter-Mensch wird durch die Effizienz des jeweiligen stands der Technik bestimmt. Im Zuge der Entwicklungsstrategie für Roboter kann sich diese Human-Robot Interaction verschieben.	Robotic-Human-Interaction (HRI) beschreibt die Interaktion zwischen Robotern und menschlichen Benutzern in Arbeitsumgebungen oder anderen Kontexten, bei denen sie zusammenarbeiten oder kooperieren. Dies beinhaltet den Austausch von Informationen und Aktionen über Benutzerschnittstellen und umfasst Bereiche wie Sprach-, visuelle und taktile Kommunikation.
Vollautomatisierung	ISO 8373: Operating mode in which motions are determined by combination of the autonomous task program and manual user inputs given at the same time			Ein Vorgang wird nicht vollumfänglich automatisiert, da menschlicher Einfluss notwendig ist. Gewisse Abschnitte laufen automatisiert.	Teilautomatisierung bezeichnet die Einführung von Automatisierungstechnologien, bei denen einige, aber nicht alle Aspekte eines Prozesses oder einer Aufgabe automatisiert sind, sodass menschliche Intervention weiterhin erforderlich ist.
Wartung	ISO 8373: Operating mode in which robot function accomplishes its assigned mission without direct human intervention	Vollautomatik bedeutet, dass technische Anlagen, Maschinen oder sonstige Arbeitsgeräte ihre Arbeitsleistung ohne Hilfe des Menschen oder von Personal autonom erfüllen können. Pendant ist die Halbautomatik.	Ein System wird nach DIN 19233 nur dann als „vollautomatisiert“ bezeichnet, wenn sein Automatisierungsgrad 100 % beträgt [3]. Vollautomatik ist daher kein Pleonasmus, weil sie einen Automatisierungsgrad von 100 % erfordert und alle darunter liegenden Systeme teilautomatisiert sind. Bei Vollautomatik müssen Menschen oder Arbeitskräfte lediglich die Überwachung des Systems übernehmen.	Ein Vorgang wird vollumfänglich automatisiert, wenn die Maschine / der Roboter einen Prozess von Anfang bis Ende selbstständig abwickelt.	Vollautomatisierung bezeichnet die vollständige Automatisierung eines Prozesses oder einer Aufgabe, bei der keine menschliche Intervention mehr erforderlich ist, sobald das System eingerichtet ist.

Begriffe Erweiterung					
Begriff	Normen	Google / Wikipedia	Andere Quellen	Eigene Worte (Niklas) evtl. als Denkanstoß, Ergänzung K	Zusammenfassung wichtigsten Punkte
Autonomie	ISO 8373: Ability to perform intended tasks based on curred state and sensing, without human invention	Als Autonomie bezeichnet man den Zustand der Selbstbestimmung des freien Willens, deren der Mensch als vernünftiges Wesen fähig ist.	-	Selbstständiges und unabhängiges Handeln.	Autonomie bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, unabhängig und selbstständig zu handeln, ohne kontinuierliche externe Steuerung oder Intervention.
Automatisierungsgrad / -level	-	Der Automatisierungsgrad (englisch degree of automation) ist eine betriebswirtschaftliche Kennzahl, welche das Maß der Automatisierung in einem Unternehmen angibt. Der Automatisierungsgrad ist das Maß für die Ausstattung eines Unternehmens mit selbständig arbeitenden Maschinen nach dem neuesten Stand der Technik.[2] Er gibt letztlich an, ob und inwieweit das Personat durch Produktionsmittel ersetzt worden ist.	-	Ein Maß dafür, wie hoch das selbstständige Arbeiten ausgeprägt ist. Liegt zwischen teilautomatisiert und vollautomatisiert.	Der Automatisierungsgrad ist ein Maß dafür, wie weit ein Prozess oder eine Aufgabe automatisiert ist. Dies wird normalerweise auf einer Skala von teilweise automatisiert bis vollständig automatisiert bewertet.
Prefabrication	-	<u>ist in der Produktionswirtschaft derjenige Teil der Produktion, der sich mit der Fertigung von den für die Produktion erforderlichen Bauteilen befasst. Vorfertigung gibt es in Produktionsbetrieben mit mehreren Fertigungsstufen.[1] Die Fertigungsstufe mit Vorfertigung ist der Hauptfertigung vorgelagert. In der Vorfertigung werden Einzelteile, Baugruppen oder Bauteile so aufbereitet, dass sie Bestandteil eines Endproduktes werden können. Das Zusammenfügen einzelner Teile und Schichten zu einem ganzen Bauteil wird als Vorfertigung bezeichnet.[2]</u>	-	Vorfertigung / Zusammenbau von Bauteilen, bevor sie an ihren finalen Bestimmungsort im Bauwerk eingebracht werden. Vorfertigung kann "off-site" oder auch "on-site" eingetaktet werden. Der Fertigungsgrad von Bauteilen ist dabei nicht definiert und wird von der Effizienz des Montageablaufes und ähnlichen Randbedingungen bestimmt.	Prefabrication, auch bekannt als Vorfertigung oder Fertigbau, ist ein Prozess in der Bauidustrie, bei dem Bauelemente oder ganze Baueinheiten unter kontrollierten Bedingungen in einem Werk oder einer Fabrik vorproduziert werden. Diese vorgefertigten Teile werden dann zur Baustelle transportiert und dort montiert. In der Produktionswirtschaft bezieht sich der Begriff auf den Teil der Produktion, der sich mit der Herstellung von Bauteilen für die Produktion befasst. Prefabrication kann "off-site" oder "on-site" erfolgen, wobei der Fertigungsgrad der Bauteile von verschiedenen Faktoren abhängt, darunter die Effizienz des Montageablaufs und andere Randbedingungen.
Cartesian Arm	-	<u>A Cartesian coordinate robot (also called linear robot) is an industrial robot whose three principal axes of control are linear (i.e. they move in a straight line rather than rotate) and are at right angles to each other.[1] The three sliding joints correspond to moving the wrist up-down, in-out, back-forth. Among other advantages, this mechanical arrangement simplifies the robot control arm solution. It has high reliability and precision when operating in three-dimensional space.[2] As a robot coordinate system, it is also effective for horizontal travel and for stacking bins.[3]</u>	-	-	Ein Cartesischer Arm, auch bekannt als kartesischer Roboter oder linearer Roboter, ist ein Roboter, dessen Bewegungen auf drei linear verschiebbaren Achsen basieren, die den X-, Y- und Z-Achsen des kartesischen Koordinatensystems entsprechen. Im Gegensatz zu rotierenden Achsen bewegen sich diese Achsen in geraden Linien, was eine einfache und präzise Bewegung ermöglicht. Diese mechanische Anordnung erleichtert die Steuerung des Roboterarms und bietet hohe Zuverlässigkeit und Präzision im dreidimensionalen Raum. Cartesianische Arme finden Anwendungen in verschiedenen Bereichen wie Montage, 3D-Druck, Pick-and-Place-Aufgaben und der Maschinenbeschickung.
Exo-Skelett	ISO 8373 (Robotic device): Mechanism developed with robotic technology, but not fulfilling all characteristics of a robot. Exampel: Teleoperated remote manipulator, haptic device, end-effector, unpowered exoskeleton	Ist eine äußere Stützstruktur für einen Organismus. Bei vielen Tierarten ist ein natürliches Exoskelett als Teil des Körpers anzutreffen. So bilden die Gliederfüßer, zu denen u. a. Insekten, Spinnentiere, Krebse und Hummer gehören, den größten Stamm des Tierreichs. Die hier behandelten künstlichen, maschinellen Exoskelette sind hingegen vom menschlichen Körper getragene mechanische Strukturen, die relativ leicht entfernbar sind. Sie werden deshalb auch als Roboteranzüge bezeichnet. In der Medizin sind Orthesen seit langem im Einsatz. In diesem Bereich stellen Exoskelette eine zusätzliche Möglichkeit der Hilfsmittelversorgung dar.	Robotics and automated systems in construction: Understanding industry- specific challenges for adoption (S.3): Exoskeletons are wearable devices that work together with the user as opposed to a robot which performs the task autonomously instead of the worker. Exoskeletons are mechanical devices, worn by the worker, which amplify human performance. Exoskeletons can help construction workers to reduce the high-impact of their job and to improve their productivity by allowing them to lift heavy loads, reduce fatigue, fa- cilitate the use of tools in awkward positions, etc. [10,27]. Exoskeletons can also contribute to reduce injuries and to maintain a healthier workforce [4].	Ein mit Hydraulik und Maschinentechnik ausgestatteter Anzug, welcher die menschliche Arbeitskraft erhöht und gleichzeitig den menschlichen Körper schonen soll.	Ein Exo-Skelett, auch bekannt als Roboteranzüge, ist eine äußere Struktur oder ein Gerüst, das um den Körper getragen wird, um die Kraft zu verstärken, Bewegung zu unterstützen oder den Träger zu schützen. Diese mechanischen Strukturen können am Körper getragen werden und dienen dazu, die Bewegungen des Trägers zu unterstützen oder zu verstärken
Ergonomie	ISO 26800: Arbietswissenschaft (en: ergonomics, human factors). Wissenschaftliche Diziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst, und der Berufszweig, der Theorie, Grundsätze, Daten und Verfahren auf die Gestaltung von Arbeitssystemen anwendet mit dem Ziel, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren. Anmerkung: Diese Definition stimmt mit der durch die International Ergonomics Association festgelegten Definition überein	Ist die Wissenschaft von der Gesetzmäßigkeit menschlicher bzw. automatisierter Arbeit. Ziel der Ergonomie ist es, die Arbeitsbedingungen, den Arbeitsablauf, die Anordnung der zu greifenden Gegenstände (Werkstück, Werkzeug, Halbzeug) räumlich und zeitlich optimiert anzuordnen sowie die Arbeitsgeräte für eine Aufgabe so zu optimieren, dass das Arbeitsergebnis (qualitativ und wirtschaftlich) optimal wird und die arbeitenden Menschen möglichst wenig ermüden oder gar geschädigt werden, auch wenn sie die Arbeit über Jahre hinweg ausüben. Auch die physiologische Anpassung von Sitzmöbeln, Geräten, Türgriffen etc. außerhalb der Arbeitswelt wird häufig als Ergonomie und die Gegenstände selber werden als ergonomisch bezeichnet.	Ergonomie Grundlagen Unterlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation (S.13-14): Ergonomie ist die wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechsel- wirkungen zwischen Mensch und Technik befasst. Wirtschaftlichkeit und Humanität sind zwei Zielsetzungen, die gleichrangig bei der Gestaltung von Arbeitssystemen und Pro- dukten verfolgt werden. Hierzu ist Wissen um menschliche Leistungsvoraussetzungen und ökonomische Zusammenhänge notwendig. Die Erkenntnisse der Ergonomie werden durch Empfehlungen und Methoden bei der Gestaltung von Produkten (Waren und Dienstleis- tungen) und Prozessen umgesetzt. Ergonomie ist ein Kennwort, das sich aus dem griechischen (Ergon= Arbeit und nomos=Gesetz; Gesetzmäßigkeit) zusammensetzt. Ergonomie kann damit als die Lehre von der menschlichen Arbeit bezeichnet werden.	Optimale Gestaltung der Arbeitsumwelt, sodass keine Schäden durch Über- oder Fehlbelastungen am menschlichen Körper entstehen. Diese erstreckt sich von der Sitzposition im Büro bis hin zur Gestaltung des Arbeitsraums auf Baustellen.	Ergonomie bezieht sich auf die Gestaltung von Arbeitsumgebungen, Produkten und Systemen, die an die Bedürfnisse, Fähigkeiten und Einschränkungen der Menschen angepasst sind, um die Effizienz, Sicherheit und Komfort zu verbessern. Diese wissenschaftliche Disziplin betrachtet die Wechselwirkungen zwischen Menschen und ihren Arbeitsumgebungen oder anderen Systemen und wendet Theorie, Prinzipien, Daten und Verfahren an. Dies kann die Anpassung von Möbeln, Werkzeugen, Geräten und der Arbeitsumgebung beinhalten
Business I	-	-	PORR Group: People Business – die Maschinen sind nur Hilfswerkzeuge und werden von Menschen bedient. Die teuerste Gleisbaumaschine ist nur so produktiv wie die Bediener, die diese Maschine führen. Der Mensch steht im Mittelpunkt des Handelns. Die Positionen in einem Bauprojekt werden vom jeweiligen Menschen sehr unterschiedlich interpretiert. Zum einen gibt es unterschiedliche Führungsstile, zum anderen spielt die Erfahrung eine große Rolle und letztendlich ist auch immer das Gegenüber von entscheidender Bedeutung	Der Mensch bildet den wichtigsten Bestandteil, indem er Aufgaben und Prozesse wesentlich prägt. Der Mensch ist weiterhin in vielen Branchen der wesentliche Faktor, wenn es um Effizienz, Optimierung oder Innovation geht.	Der Mensch bildet den wichtigsten Bestandteil, indem er Aufgaben und Prozesse wesentlich prägt. Der Mensch ist weiterhin in vielen Branchen der wesentliche Faktor, wenn es um Effizienz, Optimierung oder Innovation geht.

Appendix B

Expert Interviews

B.1 Expert Interview - Jaromir Sadlon

Transcript: Expert Interview Jaromir

Soleman Haj Bakour:

Hello Jaromir, Could you please start by telling me a bit more about yourself? Besides your experience at Wienerberger, KM Robotics, and Greenbuild, have you had any experience with using robotics in construction preparation or on-site?

Jaromir Sadlon: Hi, sure. I started my career back in 2000 while I was still studying at the university. I studied IT, and during that time, I moved to England for a student internship. It was originally planned to be six months, but I ended up staying for six years. After completing my bachelor's degree, I started working in the automotive industry. When I was living in England, I met my wife. We had our first child there, but after a while, we started to feel homesick. We decided to move back to the Czech Republic because we wanted to raise our child closer to family and in the environment, we grew up in. Interestingly, my son is now studying at the London School of Economics, so history seems to be repeating itself in some way. After moving back to the Czech Republic, I began searching for a job. I landed a role at Lego, where I was steadily promoted. Within a year, I went from being a quality manager to a corporate director. I stayed with Lego for six years. After nearly 18 years in large corporations, though, I started to feel tired of only being able to focus on a small part of the bigger picture. So, I decided to switch to consultancy, where I could work on larger-scale transformation projects. I've worked on a variety of impactful projects with strong mandates from general managers and CEOs. One example was with Wienerberger Czech Republic, where I developed a long-term strategy for making the company CO2-neutral and even CO2-negative. This involved collaborating with all departments, managers, and on-site teams to create a 10-year roadmap for sustainability.

During that time, I got to know a lot of people at Wienerberger. Some of them later became mentors or coaches for me. Eventually, the CEO of Wienerberger Czech Republic approached me about an innovation project and asked me to take it on, believing I was the right person for the job.

At that point, I didn't have any experience with robotics. However, I was deeply familiar with the company's processes and had built strong relationships within the organization, despite being an external consultant. That trust and familiarity allowed me to take on the role and contribute to their innovation efforts.

Soleman Haj Bakour: So, if I've understood correctly, aside from Wienerberger, KM Robotics, and Greenbuild, you didn't have any prior experience with robotics? Not even during your time at Lego?

Jaromir Sadlon: Well, I wouldn't say I had no experience. I've always worked with or managed teams and factories that used robots. At Lego, for example, we had a fully automated warehouse filled with pick-and-place robots. But I was never directly involved in the development of the robots themselves. My role was more focused on the operational reliability and efficiency of the equipment.

One of the warehouses I managed was massive—about 80 meters tall, 150 meters long, and 30 meters wide. It was a high-bay warehouse where robots moved along specific paths to retrieve or place boxes of Lego bricks. These robots operated within the warehouse, navigating to specific locations to pick up or drop off items. My job was to ensure the operational excellence of that system.

For me, it was always a question of efficiency: is it better to use a person or a robot for a specific task? If a robot, how much more efficient will it be? Maysam, for instance, explained to me that while a robot arm can achieve seven degrees of freedom, a human arm has 25. So, it's not always about using the most advanced robotics—it's about figuring out what's "good enough" or most applicable for the task at hand.

In my career, whether at Lego, in the automotive industry, or elsewhere, I've always worked with robots in some capacity. However, my role has been focused on optimizing existing equipment rather than developing new robotics technology. For example, at Lego, we even had robotic farming systems. But again, I wasn't involved in innovation—I was focused on improving the efficiency and reliability of what was already in place.

Soleman Haj Bakour: I don't know if you remember the topic of my diploma thesis, but it focuses on human interaction with robots, particularly concerning new roles, productivity, and safety. From what I understand, we might have some shared interests here. I'd like to start with the topic of safety. Let's say a robot is introduced to a construction site. From my experience, it's still a relatively new concept here in Europe. And because it's such a new element, we don't fully understand all the risks yet. For example, a fatal accident is a fatal accident, whether caused by a crane or a robot. But do you think there are unique risks that robots introduce when it comes to health and safety?

Jaromir Sadlon: Absolutely, but I think you have to approach this from two angles. First, there's the risk posed by the equipment itself—what the robot can do to a person. Second, there's the risk posed by the person—their behavior around the robot. Humans, by nature, are still very fascinated by robots when they see them in action. It's almost like seeing someone who is your "type" of person—you can't help but stare because you're so fascinated. I've noticed something similar on construction sites. People may not exactly fall in love with a robot (of course not!), but there's a parallel. When they see a robot working, they're captivated, and suddenly, their usual behavior changes, even if they've been trained.

Soleman Haj Bakour: That's interesting. The first point you raised, about looking at the risks from two perspectives, reminds me of how safety standards are typically structured. There's the inherent design of the robot itself—things like the materials, safety features, and engineering considerations—and then there's the user side of things. What's really surprising is that, as you said, people still get distracted despite having been trained. You'd expect training to prepare them for this, especially if they've had some hands-on practice with the robots.

Jaromir Sadlon: The distraction usually doesn't come from the operators themselves. They're trained, and they understand the risks. Over time—say, after six months of working with the robot—they become more comfortable and less unsure because they know the robot's movements and behaviors, which are often repetitive. What I see more often is fascination among other workers who are present on the site but aren't the robot's operators. These people act like they're completely unaware of the risks. It's as if they suddenly become "blind" when they see the robot, and their IQ drops drastically. They behave in ways that you wouldn't expect—almost like they're hypnotized by the robot.

Soleman Haj Bakour: But does this behavior improve over time?

Jaromir Sadlon: That's an excellent question—and honestly, I don't think this aspect has been researched enough. Most studies focus on the operator and the robot, assuming that the safety measures around the robot will prevent everyone else from getting hurt. But in my experience, that's not always the case.

When people are fascinated by something, they're willing to do almost anything to get closer to it. For example, even if there's a barrier saying, "Don't cross," they'll find a way to bypass it. It's not about deliberately breaking the rules—it's more unconscious. They're not thinking, "I'm going to disobey this rule." They're just so captivated by the robot that they don't even realize they're breaking the rules.

Soleman Haj Bakour: So, it's more about unconscious behavior rather than intentional rule-breaking?

Jaromir Sadlon: Exactly. Intentional rule-breaking is a different behavior entirely. If someone deliberately crosses a barrier or interacts with the robot in a prohibited way, they're fully aware of the risks involved. They know the robot could harm them, and they're making a conscious decision to take that risk.

What I see more often, though, is unconscious rule-breaking. People aren't even aware they're doing it—they're just so fixated on the robot that they keep moving closer, without realizing they've crossed a safety boundary. I'm not sure how to fully explain this behavior, but I see it all the time on construction sites. It's a type of distraction or fascination that overrides their usual awareness of safety rules.

Soleman Haj Bakour: When we talk about safety, there's the safety of the equipment itself and the safety of the operator. But now that I think about it, there's actually a third aspect: the "information for use." This is mentioned in standards, but I feel like it could go beyond simply providing information on-site, like putting up a sign or giving instructions. Maybe it's something more comprehensive, like educating workers or even creating a sort of "parenting" approach for the workplace. What do you think about this?

Jaromir Sadlon: I'm not sure if you've had the chance at your university to discuss the mental state of workers when they're exposed to this kind of fascination. It reminds me of people watching SpaceX land its rockets on those chopsticks. You can see the awe on their faces—they're mesmerized by the complexity and beauty of it. It's almost like magic to them. That same kind of reaction happens with robots on construction sites.

Soleman Haj Bakour: That's a great comparison. But it brings me to the next question: What can we actually do to prevent these issues? Whether it's the physical risks from the robot or the distraction, which can also lead to physical harm, how can we address these risks? Are there technologies, strategies, or other solutions that could help?

Jaromir Sadlon: To stop this fascination-driven behavior, I think the key is making the technology more common. You see this with operators—they're fascinated when they first start working with robots, but after some time, they get used to them, and the fascination fades. However, for workers who encounter robots for the first time and become distracted, we need something more immediate and impactful. In my opinion, there has to be a very strong wake-up call when someone crosses a certain line. This wake-up call could be a loud sound, a flashing light, or something else unpleasant that snaps them out of their distraction. Signs warning about robots are important, but I think we need something more radical to make people cautious.

Soleman Haj Bakour: That makes sense. From your experience, since you work in business development, do you have insight into the kinds of training sessions that are being conducted for working with robots? Are there formal exams or evaluations at the end of these sessions, or is the training more hands-on?

Jaromir Sadlon: Right now, we're in the process of finalizing the robot's official manual. It will be fully validated by external parties and ready by mid-February. This manual will be similar to the one you get when you buy a washing machine, but we're adding attachments that detail specific workflows and safety processes, which we're developing together with Niklas. At the end of our training courses—manual or no manual—we use a method called "train the trainer." In this method, the operator switches roles with the trainer. The trainer acts like a new operator, and the trained operator has to explain everything they've learned in their own words. It's a bit like at university, where your teacher gives you knowledge, you study it, and then you demonstrate your understanding in an exam.

Soleman Haj Bakour: I hadn't thought about it like that, but you're absolutely right. This approach could even motivate students to think differently and see things from another perspective. It's an interesting concept.

Jaromir Sadlon: The difference, though, is that in our case, the training is very hands-on and physical, while at university, it's more theoretical.

Soleman Haj Bakour: Based on my experience so far, I've noticed that when someone undergoes this training, they essentially become an operator. The role of an operator on a construction site is relatively new, and at the university, we typically discuss it in a limited sense—perhaps as an assistant or support worker. However, do you think the introduction of robots on construction sites will lead to the creation of new roles and job opportunities beyond that of an operator?

Jaromir Sadlon: Yes, absolutely. In this context, there is a concept known as Total Productive Maintenance (TPM), which is a systematic approach to equipment upkeep. Within TPM, there are various pillars, and an operator must be capable of handling at least two of them. The first involves continuously improving their work—if an operator notices that a specific part of the robot could function better in a different way, they need to report it. The second is autonomous maintenance, meaning they must follow set procedures, such as cleaning, lubricating, tightening, or adjusting components at the end of each shift.

Beyond operators, there is also a structured hierarchy. We have external operators, who perform these two basic maintenance pillars and are in constant interaction with the equipment, always looking for ways to improve it. Then, at a higher level, there is a role we refer to as the Head of the Robotic Center. This individual is the most skilled operator and is responsible for managing the maintenance schedule of all robots. They don't directly supervise the operators but focus on ensuring the reliability and proper functioning of the equipment.

Soleman Haj Bakour: I see—we keep discussing the role of the operator and, at most, the head of the robotic center. But are there any specific skills that an operator should have before starting their training?

Jaromir Sadlon: Ideally, operators should already be skilled masons or bricklayers. Robots learn from humans, so the more proficient a person is in the task that the robot is designed to perform, the better they can train and supervise it. This is a common challenge in robotic training. For example, when developing humanoid robots in the U.S., they initially trained them using only software-based simulations, which proved to be too slow. Now, the approach has shifted towards real-world learning, where robots observe and mimic human behavior directly. This significantly speeds up the learning process compared to artificial simulations.

Soleman Haj Bakour: That's true. Have you personally attended any of these training sessions?

Jaromir Sadlon: Yes, I've been trained on the robot. You can't sell an idea like this without knowing how to use it yourself.

Soleman Haj Bakour: Let's move on to another topic. We've already discussed training and safety, so now I'd like to focus on the third subject of my thesis: productivity. At university, we learned about the magic triangle, which consists of three interconnected factors: cost, quality, and time. Traditionally, improving one of these aspects often comes at the expense of the other two. However, digitalization has been presented as a potential solution to break this constraint. Do you think robots could also help overcome this trade-off and offer a real solution?

Jaromir Sadlon: That's an interesting perspective—I've never thought about it in those terms before. Even digitalization itself affects cost, time, and quality depending on how and where it is applied. It's not a universal solution.

If we look at robotization, the trade-offs of the magic triangle may not disappear entirely, but rather, the triangle could shrink. This means that cost, time, and quality will still influence each other, but their overall impact will be reduced. I first encountered this concept in the automotive industry, where we often told customers:

- If you want something cheap, don't expect it to be high quality or fast.
- If you want something fast, it won't be cheap and may affect quality.
- If you want something high quality, it will take time and won't be cheap.

In my opinion, robotization won't eliminate this dynamic but will compress it—imagine the triangle shrinking by 50%. Robots can deliver faster production, more customization, and higher quality. However, the way we perceive quality will evolve over time. Today, products made by robots are often seen as higher quality than those made by humans, but in 50 years, the perception might shift—handcrafted work could become the premium standard again.

Regarding cost, it remains a complex factor, influenced by inflation, social status, and wages. What is considered cheap for one person might not be for another. However, time is the one constant factor for everyone.

So, will robots increase productivity? Yes, especially for processes that are well-suited for automation. But when it comes to quality, it depends. In certain areas, robots will provide higher quality, faster production, and lower costs. However, the scope of automation is still limited, though it will expand over time.

There's also the perception shift—operators who work with robots daily no longer see them as fascinating but as standard tools. For them, the speed, quality, and efficiency of robots are simply the norm. Over time, as robots become more common, our expectations will adjust accordingly.

Soleman Haj Bakour: So if I understand correctly, the perception of the robot's impact on the magic triangle depends on the context. While it may shrink the triangle in certain areas by improving cost, time, and quality simultaneously, this isn't universal across all applications. Do you think there are specific construction processes where robots will undeniably break this "curse," or will they only offer incremental improvements?

Jaromir Sadlon: I would say it's incremental in most cases. If you think about repetitive processes like bricklaying or automated welding, robots can certainly achieve better consistency, reduce costs over time, and speed up production. But in tasks that require adaptability, creativity, or responding to unexpected issues, robots might not be as effective—at least not with current technology.

Soleman Haj Bakour: That's an interesting perspective. So would you say that robots are more suitable for tasks that are highly standardized or repetitive? And what about tasks like site management or coordination? Could robots help with that?

Jaromir Sadlon: You're absolutely right—standardized tasks are their strength. As for site management or coordination, I believe robots can assist but not take over. You'd still need humans to make decisions based on intuition, experience, and the unique nature of each project. Robots might help in providing data, monitoring, or even simulating construction sequences, but the actual decision-making will stay human-driven for now.

Soleman Haj Bakour: That's a valid point. You mentioned earlier that perception might shift over time, like how people may see robot-built structures as less valuable than human-made ones. Do you think this will affect the adoption of robots in construction?

Jaromir Sadlon: Yes, definitely. Perception plays a huge role in adoption. If clients or end-users value the craftsmanship of human work more than the precision of robots, they may push back against automation in certain areas. But that also depends on how we educate people about the benefits of robotics. If they see the improved safety, efficiency, and quality, they might appreciate it more. The key is to strike a balance between tradition and innovation.

Soleman Haj Bakour: That's a fascinating take. This balance you mentioned—how do you think companies should approach it? Should they focus on promoting robots as tools that assist humans, or should they aim for full automation in the future?

Jaromir Sadlon: I'd say promoting robots as tools that assist humans is the way to go, at least for now. Full automation might work in factories or controlled environments, but construction sites are dynamic and unpredictable. Showing how robots can enhance human capabilities rather than replace them could help gain acceptance. For instance, highlighting how robots reduce physical strain on workers or improve safety could make them more appealing.

Soleman Haj Bakour: I completely agree. This aligns with my research focus on Human-Robot Interaction and safety. It seems like successful adoption depends not only on the technology but also on the way we integrate it with human workflows.

Jaromir Sadlon: Exactly. And that's why your research is so important. Understanding the human element in robotics will shape how these systems are designed and implemented. It's not just about the machines—it's about how people interact with them, trust them, and adapt to them.

Soleman Haj Bakour: So would you say that in construction, we're far from reaching this kind of standardization? Because as you said, in the automotive industry, it's all about standardization, and that allows for better planning and less doing. But in construction, every project seems to be unique, which makes this standardization so difficult. What do you think is the path forward for achieving something like this in construction?

Jaromir Sadlon: You're absolutely right. Construction projects tend to be unique because of different client requirements, site conditions, and regulations. But I believe the path forward lies in modular construction. The idea is to create standard modules that can be assembled in different ways to achieve customization without losing the benefits of standardization. Prefabricated bathrooms, for example, are just the beginning. If you could extend that concept to kitchens, entire walls, or even structural systems, you could achieve more standardization. The second important aspect is digitization. Digital tools like Building Information Modeling (BIM) can help streamline planning and coordination, making it easier to identify opportunities for standardization and prefabrication. It's also about changing the mindset in the industry—moving from treating every project as a bespoke challenge to embracing the idea of platforms and repeatable processes.

Soleman Haj Bakour: I totally agree. BIM has already helped us a lot in terms of planning and collaboration. But still, when we bring in robotics, it seems like there's a whole new level of integration and coordination required. Do you think the current level of adoption of digital tools in construction is enough to support widespread robotization?

Jaromir Sadlon: Not yet. While BIM and other digital tools are helping, they're still underutilized in many parts of the construction industry. The key to integrating robotics lies in creating what I would call a "robot-ready" construction process. That means every aspect of the project—from design to assembly—needs to consider the capabilities and limitations of robots. For example, designs must be simplified and standardized to suit robots, and the supply chain needs to ensure the availability of materials that robots can handle efficiently. Another challenge is the interoperability of systems. Robots, BIM models, and project management tools all need to communicate seamlessly. This requires setting industry-wide standards, which is a huge challenge because the construction industry is so fragmented. But the companies that can figure this out will have a big competitive advantage.

Soleman Haj Bakour: So, in this case, companies that invest in both digitization and robotics will probably lead the transformation of the construction industry?

Jaromir Sadlon: Exactly. Those companies will likely set the benchmark for what's possible in construction. They'll be the ones to drive down costs, improve safety, and deliver projects faster. But it's a big leap, and it requires strong leadership and a willingness to invest in the long term. It's not just about buying robots or software—it's about changing the entire approach to how projects are designed, planned, and executed.

Soleman Haj Bakour:

Thank you for sharing that perspective. It's really interesting to think about the transition from factory robotics to construction robotics. Controlling the external environment versus internal systems seems like a massive challenge, especially with the unpredictable conditions on a construction site. Do you think there's a specific way manufacturers or developers can address these environmental challenges effectively, maybe through better materials, smarter sensors, or different design strategies?

Jaromir Sadlon: Absolutely, there are a few ways this could be addressed. For instance, using more robust materials that can withstand harsh weather conditions is critical. Additionally, implementing redundant systems or fail-safes in case one component fails due to environmental factors is key. Smarter sensors and AI that can predict and adapt to changes in the environment, like unexpected rain or dust storms, could also play a big role. Modular designs for robots could help too—allowing for easier maintenance or swapping out components that are affected by specific environmental challenges.

Soleman Haj Bakour: I see, so it's a combination of designing for durability and integrating intelligence into the system. I wonder, with your experience, how much of this is driven by construction companies pushing for more adaptable robots versus manufacturers leading the charge?

Jaromir Sadlon: That's a great question. Right now, most of the push comes from manufacturers, in my opinion. Construction companies are usually conservative; they want solutions that are proven to work and have a clear return on investment. Manufacturers, on the other hand, are taking the risks and innovating because they see the long-term potential of robots in construction. If construction companies start actively collaborating with manufacturers, sharing their pain points and needs, I believe the pace of innovation could accelerate significantly.

Soleman Haj Bakour: It makes sense that collaboration is key. Maybe as more pilot projects succeed, companies will feel more comfortable adopting these technologies. To wrap up, I'd like to ask something a bit more forward-looking. If you had to predict, say, the next 10 years in construction robotics, what are the biggest advancements you think we'll see?

Jaromir Sadlon: Over the next decade, I think we'll see significant advancements in autonomous systems. Robots will become better at understanding and navigating construction sites independently, using advanced AI and real-time data from drones or IoT devices. There will also be more integration between robots and other technologies, like augmented reality for better human-robot collaboration. Prefabrication might see more robotic involvement, creating modules off-site with higher precision and then assembling them on-site with minimal human effort. Lastly, safety will be a huge focus—designing robots that are inherently safe to work alongside humans without constant monitoring:

Soleman Haj Bakour: Those are exciting possibilities! It's reassuring to see that safety and collaboration remain central in the future of construction robotics. Thank you so much for sharing your insights, Jaromir. I've learned a lot, and I think this discussion will really help me shape my diploma thesis and beyond.

Jaromir Sadlon: You're welcome, Soleman! Best of luck with your thesis. It's great to see someone so passionate about this field. Keep asking those "stupid" questions—they often lead to the most interesting insights.

B.2 Expert Interview - Meysam Taghavi

Transcript: Expert Interview Meysam

Soleman Haj Bakour: Let's start from the beginning. We've known each other for a long time, including through Walter and other projects like DFS. But I'd like to know more about your background—your studies, your expertise, and your experience with robotics.

Meysam Taghavi: I did my bachelor's in mechanical engineering and initially worked in automation for factory production. Later, I completed my master's in automation and robotics and worked briefly in packaging automation. After that, I started working on a construction robotics project involving cable robots for special applications in the construction industry—specifically for installing aluminum-framed glass facades using a cable robot at the Technical University of Learning.

That was my first step into construction robotics. Later, I continued working on projects related to brick-laying robots, focusing on automation in masonry construction.

Soleman Haj Bakour: So, from what I understand, your work has always been closely related to robotics.

Meysam Taghavi: Not entirely from the beginning. My bachelor's studies in mechanical engineering focused more on production and manufacturing processes, not robotics directly. Later on, I got involved in automation—working with PLCs, CNC machines, and other automated systems—which gradually led me into robotics and, eventually, into construction robotics.

Soleman Haj Bakour: So initially, you worked more with automation in factories, and then you transitioned to robotics on construction sites. We'll get back to that later. You already know a lot about my master's thesis, which focuses on three main topics: safety, training, and productivity. I'd like to start with safety.

Robots on construction sites are a relatively new development, which means there are risks we may not fully understand yet. You have worked on multiple construction sites and have been involved in developing these robots. In your opinion, what are the main risks associated with using robots in construction?

Meysam Taghavi: One of the biggest risks is that, unlike in factories, where robotic workspaces are usually fully enclosed and fenced off, construction sites often lack such controlled environments. This increases the possibility of accidents between workers and robots.

To mitigate this, we can implement safety measures such as flexible barriers, clear safety instructions, and training programs. However, the biggest challenge is ensuring that workers actually follow these safety measures.

From my experience, people often underestimate the risks, thinking, *"I'll just be careful, nothing will happen."* This attitude is a major cause of accidents, even in factories where robots and heavy machinery operate in well-defined safety zones. In some cases, workers even bypass safety mechanisms, disabling protective measures, which could also happen in construction. Preventing these behaviors is critical.

Soleman Haj Bakour: I see. So, the direct risk is the interaction between humans and robots. But are there also indirect risks when a robot is operating on a construction site?

Meysam Taghavi: Yes, definitely. The risk isn't limited to direct contact between robots and humans. For example, if an automated crane or a robotic system is transporting heavy materials and something falls, it can cause serious injuries. Another indirect risk could be an electrical failure in the robot's system, leading to a fire or other hazardous situations. Additionally, workers' behavior plays a role. If they assume that nothing will happen and approach a moving robot carelessly, they expose themselves to unnecessary risks.

Soleman Haj Bakour: What do you think causes workers to take such risks? And how can we prevent it?

Meysam Taghavi: This happens mainly with two types of workers: inexperienced ones and highly experienced ones.

- **Inexperienced workers** often have incorrect assumptions about a robot's movement, speed, or operational hazards, leading to accidents.
- **Experienced workers**, on the other hand, tend to become overconfident. They might think, *"I've been doing this for 20 years; I know how robots work."* This is similar to driving—when someone has driven for many years, they may take risks, thinking they have full control.

The key to prevention isn't just setting rules—it's about building a strong safety culture. Regular training and reinforcement are essential. If workers repeatedly receive training and reminders, safety becomes second nature to them. In companies like Amazon, for example, safety protocols are constantly reinforced until they become part of the workplace culture.

Soleman Haj Bakour: I've always thought that because robots are new on construction sites, people are naturally curious and want to get close to them, touch them, or see how they work. But you also mentioned that experienced workers can pose a risk due to their overconfidence, which I hadn't considered before.

Regarding safety measures, I've heard about three main approaches:

1. **Inherent design safety**—designing robots to be intrinsically safe.
2. **Complementary safety measures**—such as safety zones, sensors, or additional protections.
3. **User safety training**—ensuring workers understand the risks and how to work safely with robots.

In your opinion, what should we focus on for construction robots? What safety measures should be incorporated into the robot's design, and what external measures should be implemented on-site?

Meysam Taghavi: The primary risk is that, unlike factory environments where robots operate in fenced-off areas, construction sites are open and dynamic. This increases the chance of accidents involving human workers and robots.

There are measures to mitigate these risks, such as setting up safety zones, using warning signals, and providing clear instructions. However, the biggest challenge is ensuring that workers actually follow these safety guidelines. Many people underestimate the dangers, thinking, "I'll just be careful, nothing will happen." This mindset often leads to accidents, even in controlled factory environments.

In factories, even though robots are enclosed in cages, safety measures can still be bypassed—such as when someone disables a safety system. On construction sites, these risks are even higher because of the unpredictable environment.

Soleman Haj Bakour: Beyond direct interactions between humans and robots, are there any indirect risks that robots might pose on construction sites?

Meysam Taghavi: Yes, absolutely. Even if a worker isn't directly interacting with a robot, they could still be at risk. For example, if a robotic crane is carrying a heavy load and something goes wrong—perhaps the load is not secured properly—it could fall and injure someone nearby. Another example is electrical hazards: if a robot has an electrical failure or sparks a fire, it could endanger the entire site.

Additionally, workers may assume that robots are predictable, but mechanical failures, software bugs, or unexpected power losses can all create dangerous situations.

Soleman Haj Bakour: What do you think are the main reasons why workers might get too close to robots, despite knowing the risks? How can we prevent this?

Meysam Taghavi: There are two common types of workers who take unnecessary risks:

1. **Inexperienced workers:** They don't fully understand how robots move, how fast they operate, or the potential dangers. They often have incorrect assumptions.
2. **Experienced workers:** They become overconfident after years of working with robots, thinking, "I've been doing this for 20 years, I know how it works." This is similar to experienced drivers who speed because they feel in control.

Preventing this behavior isn't just about setting rules—it's about fostering a strong safety culture. The key is continuous training and reinforcement. If workers repeatedly hear about safety risks and see examples of past accidents, they're more likely to take precautions seriously.

Soleman Haj Bakour: I initially thought workers would be drawn to robots out of curiosity, since they're a new technology on construction sites. But you're saying that even experienced workers pose a risk because they might ignore safety measures. That's interesting.

From a safety perspective, we have different approaches:

1. **Inherent design:** Designing robots to be as safe as possible.
2. **Complementary safety measures:** Using safety zones, sensors, and warning systems.
3. **User training and awareness:** Educating workers on how to interact with robots safely.

Which of these approaches do you think is most effective?

Meysam Taghavi: Ideally, safety should be built into the robot itself as much as possible. If a robot has built-in safety features—such as virtual safety barriers, sensors, and emergency stop mechanisms—then safety is less dependent on human behavior.

However, not all risks can be addressed through design alone. Some safety features might be too expensive or could interfere with the robot's functionality. In those cases, complementary measures like warning systems and clear instructions become necessary.

A good example is elevator safety: although signs might say, "Maximum capacity: 10 people," the system is actually designed to handle much more than that. If 12 people enter, the elevator won't simply fall—it will stop moving or issue a warning. Similarly, robots should be designed with safety margins that prevent catastrophic failures, even if human error occurs.

Soleman Haj Bakour: What about cybersecurity? How does it play a role in robotic safety?

Meysam Taghavi: Cybersecurity could become a concern if robots are connected to external networks, like cloud servers. If someone gains remote access to a robot, they could potentially manipulate its controls, introduce malware, or cause disruptions.

That said, I'm not sure how realistic this risk is in construction. Unlike industrial robots in highly automated factories, many construction robots operate in local environments without internet connectivity. The question is: what would be the motivation for hacking a construction robot? If there's no financial or strategic gain, cyberattacks might not be a major concern.

Soleman Haj Bakour: We've talked a lot about training. What types of training programs do you think should be conducted for construction workers working with robots? And in what format?

Meysam Taghavi: I'm not an expert in training methods, but from my perspective, there are a few key elements that should be included:

1. **Basic technical knowledge:** Workers should understand how robots function, their operating speeds, and their limitations.
2. **Risk awareness training:** Just like in driving courses, workers should see real-world data. For example, in driving courses, you learn that if you're traveling at 100 km/h, your stopping distance is a certain number of meters. Similar concepts can be applied to robots—for instance, how fast a robotic arm moves and how much force it exerts.
3. **Dedicated safety training:** A separate course should focus solely on safety, ensuring that workers fully grasp the importance of safety measures. This could be a one-day intensive course, with reinforcement in regular training sessions.

Soleman Haj Bakour: That makes sense. When we conducted our robot training, did the operators receive any formal training, or was it more hands-on learning?

Meysam Taghavi: I think the training for your robot was mostly hands-on, but ideally, it should combine both theoretical and practical elements. It's important to show workers real examples so they can visualize the consequences of ignoring safety guidelines.

Soleman Haj Bakour: So, based on your experience so far, do you think there should be some kind of certification or standardized training program for workers who will be operating or working alongside robots on construction sites?

Meysam Taghavi: Yes, I believe a certification or at least a structured training program would be beneficial. It ensures that operators or workers are aware of safety protocols, operational guidelines, and best practices when working with robots. It could be something like a short course where they learn both theoretical and practical aspects.

Maybe something similar to what we have for construction machinery operators, where they receive a certificate after completing the training.

Soleman Haj Bakour: That makes sense. Do you think such a certification should be general for all construction robots, or should it be specific to each type of robot?

Meysam Taghavi: I think there should be a general certification that covers fundamental topics such as safety, interaction with robots, and emergency handling. But then, there could be specialized modules for different types of robots, like bricklaying robots, concrete printing robots, or autonomous vehicles on site. The operator training should depend on what kind of robot they will be working with.

Soleman Haj Bakour: That's a good point. We talked about maintenance before, but how much of the maintenance do you think should be handled by the operator on-site versus specialized technicians?

Meysam Taghavi: Basic maintenance, like cleaning the sensors, checking for loose connections, or simple software updates, can be done by the operator. But for more complex issues, like hardware failures or major software problems, you would need a specialist. It depends on the complexity of the robot and how much training the operator has received. Ideally, the operator should have enough knowledge to diagnose common issues and know when to call a technician.

Soleman Haj Bakour: Okay, so to summarize, we need different roles: operators, safety officers, maintenance personnel, and maybe even supervisors if robots become widely used. We also need structured training and possibly certification. Do you think we are missing anything critical?

Meysam Taghavi: Hmm... maybe just one more thing: regular updates and refresher courses. Technology changes fast, and construction sites are always different. So even if someone is certified, they should have periodic training to stay updated with new developments. And feedback from operators should be collected to improve future training sessions.

Soleman Haj Bakour: That makes sense. Thanks for your insights! where robotics could play a key role. Because, in theory, if you automate certain tasks on a construction site, you can improve quality by reducing human errors, reduce costs in the long run, and potentially speed up processes. But from your experience, do you think this is actually the case in real construction projects? Or do you see trade-offs where improving one factor negatively affects the others?

Meysam Taghavi: Yeah, I know the triangle you're talking about, and it's true that improving one factor often means compromising another. But in the case of robotics, I think it depends on how well the integration is planned. If a robot is implemented properly, you can actually achieve improvements in all three areas—maybe not to the maximum extent, but at least to a good balance.

For example, in some cases, automation can improve quality while also reducing costs, because you have less material waste and more precision. But then, you might have higher initial costs for investment and training. Similarly, if a robot speeds up a task but requires a lot of maintenance, then time savings might be offset by downtime. So, I would say that it's not an automatic win for all three factors, but with the right planning and adjustments, you can optimize them to a good extent.

Soleman Haj Bakour: That makes sense. So in your opinion, what are the biggest barriers right now that prevent robots from being widely used on construction sites? Is it more about costs, technology, or maybe resistance from workers?

Meysam Taghavi: I think there are a few key barriers. One is definitely cost—both the initial investment and ongoing maintenance. Many construction companies are hesitant to spend money on something that might take years to pay off.

Then, there's the adaptability of robots. Unlike factories, where everything is controlled and predictable, construction sites are constantly changing. The environment is rough, and conditions are different every day. That makes it harder for robots to operate efficiently without human supervision or adjustments.

And yes, there's also some resistance from workers, but I wouldn't say it's the biggest issue. Like I mentioned before, once they understand that robots are there to assist, not replace them, they are more accepting. The bigger challenge is actually making sure that construction sites are ready for automation—things like proper digital planning, stable infrastructure, and people trained to work with robots.

Soleman Haj Bakour: That's a great point. So do you think digitalization and robotics should go hand in hand? Like, is it necessary for companies to first have a good digital workflow before they can really benefit from robots?

Meysam Taghavi: Absolutely! If you try to use robots without a proper digital workflow, you will run into a lot of inefficiencies. For example, if a construction company still relies on paper-based planning and manual coordination, then a robot won't be able to fully integrate into the workflow.

But if you have BIM (Building Information Modeling), digital site plans, and structured project management tools, then robots can work much more effectively. They can get precise instructions, adjust to changes, and even communicate with other digital tools. So I would say that digitalization is almost a prerequisite for construction robotics to work efficiently.

Soleman Haj Bakour: That's very insightful. Maybe one last question on this: If you could change one thing in the industry right now to accelerate the adoption of robots, what would it be?

Meysam Taghavi: I would say standardization. Right now, every company is kind of experimenting with their own solutions, and there are no clear industry-wide standards for using robots on construction sites. If there were standardized processes, safety regulations, and training programs, it would be much easier for companies to adopt robotics without so much uncertainty.

Soleman Haj Bakour: Yeah, I think robotics definitely has a political dimension. If you look at countries like China or the US, you see a very strategic approach to innovation. China, for example, heavily subsidizes robotics development, both in manufacturing and in construction. They are not just experimenting; they have a clear industrial policy to dominate this market in the coming years. The US also has big tech companies investing in automation, but the approach is often more driven by private companies rather than government initiatives. In Europe, I think we are somewhat behind.

We have great research institutions, and we do a lot of innovation, but the transition from research to real-world application is often too slow. Funding for startups and scaling new technologies is not as aggressive as in China, for example. Also, regulations in Europe are quite strict, which is good for safety but sometimes slows down adoption.

So what do you think Europe should do differently to stay competitive in robotics?

Meysam Taghavi: First, we need to speed up the process of bringing new technologies to the market. That means supporting startups, creating test environments for new robots, and reducing bureaucratic hurdles. If a company wants to test a construction robot in China, they can do it in weeks; in Europe, it might take months or even years because of regulations.

Second, we need more collaboration between universities, startups, and large construction companies. In China, the government pushes these collaborations aggressively. Here, it often depends on individual companies taking the initiative, which means progress is slower.

Third, we should invest more in training. If we want to compete with China and the US in robotics, we need a workforce that is skilled in automation, AI, and robotics. That requires changes in education, both at universities and in vocational training.

And finally, Europe needs a clear long-term strategy. We should not just react to what China or the US is doing; we should define our own vision for robotics in construction and invest accordingly.

Soleman Haj Bakour: That's a good point. So, if I understand correctly, the issue is not that we don't have the technology, but that we are too slow in bringing it to the industry and scaling it up?

Meysam Taghavi: Exactly! We have world-class research, but the gap between research and real-world application is too big. If we fix that, I think Europe can still be a leader in construction robotics.

Soleman Haj Bakour: Yeah, I've seen that video. It's interesting that Japan was already experimenting with fully automated construction decades ago, but it didn't really become mainstream. Do you think that has changed now? I mean, with modern AI, better robotics, and all the advancements we have today, is it more realistic to have fully automated construction sites?

Meysam Taghavi: The technology has improved a lot, yes, but the challenge is still cost and flexibility. In a factory, you can automate almost everything because the environment is controlled, predictable, and repeatable. But on a construction site, things change all the time. The weather, terrain, unexpected obstacles—those are things robots still struggle with.

Another problem is scalability. Even if you automate one construction project, that doesn't mean the next one will be the same. You might need different robots, different setups, and so on. So full automation is possible, but whether it makes sense economically is another question.

Soleman Haj Bakour: Yeah, I get that. So instead of full automation, do you think we will see more human-robot collaboration? Like, instead of replacing workers, we give them robotic assistants to make their work easier?

Meysam Taghavi: Exactly. That's the more realistic approach. We're seeing more exoskeletons, robotic arms, and autonomous equipment that assist workers rather than replace them. That way, you get the benefits of automation while keeping human flexibility.

Another trend is modular construction and prefabrication. The more we can build in controlled factory environments, the easier it is to automate. So instead of trying to fully automate a traditional construction site, we might shift more work to offsite factories where robots can be used more effectively.

Soleman Haj Bakour: That makes a lot of sense. So, in a way, instead of trying to make construction sites more like factories, we are moving parts of construction into actual factories.

Meysam Taghavi: Exactly! That's a much more achievable goal in the short term.

Soleman Haj Bakour: Yeah, that makes sense. So you're saying that the more natural the interaction, the more effective the collaboration between humans and robots?

Meysam Taghavi: Exactly. If you think about it, communication is one of the biggest barriers. Right now, when you operate a machine, you have to learn how to use the interface, press buttons, maybe even program it. But if you can just talk to a robot naturally, like you would to a human colleague, then it becomes much easier to integrate robots into construction.

Soleman Haj Bakour: That's an interesting thought. So in a way, the more we make robots behave like human workers, at least in terms of interaction, the smoother the adoption will be?

Meysam Taghavi: Yes, but not necessarily by making them look human. It's more about making the instructions intuitive. Think about how workers communicate on-site—hand signals, short verbal commands, gestures. If robots could understand these naturally, without needing complex programming, that would be a big step forward.

Soleman Haj Bakour: I totally agree. I guess that would also make robots more accepted by workers, right? If they don't feel like they have to "learn" how to use a robot but can just interact with it like a colleague?

Meysam Taghavi: Exactly. And that's a big challenge today. Many workers are skeptical of robots, either because they think they will take their jobs or because they seem complicated to use. If we change that, if robots become just another tool that makes life easier, adoption will happen much faster.

Soleman Haj Bakour: Makes sense! So, if we imagine a perfect scenario in the future—how do you see human-robot interaction on construction sites?

Meysam Taghavi: I think it will be a mix. We will still have humans doing creative and problem-solving tasks, while robots take over repetitive, heavy, or dangerous jobs. But the key will be seamless interaction—humans and robots working together smoothly without the need for complex instructions or technical barriers. Just like how we use tools today, but on a whole new level.

Soleman Haj Bakour: I see what you mean. So, it's not just about the physical strength of a robot, but also about its intelligence, right? The more it starts to seem "smarter," the more people might be wary of it?

Meysam Taghavi: Exactly. When it's a machine that just does what it's built to do, people can accept it because it feels predictable. But once AI is involved and it starts making its own decisions, that's when people start thinking about what it means. It's no longer just a tool—it becomes something that could potentially have its own "thoughts" or logic. That's a big psychological barrier.

Soleman Haj Bakour: Yeah, it's like the difference between a machine being a simple tool and it becoming something that's perceived as autonomous. That shift could really change how people interact with robots.

Meysam Taghavi: Exactly. And in construction, that change could be huge. Right now, we think of machines as just tools to make things more efficient. But with AI, machines could start to make decisions about how to carry out tasks or even handle unexpected situations. That's when the real debate will start about how much we trust them.

Soleman Haj Bakour: Yeah, it's a bit like the trust we put in technology. We trust a crane to lift heavy loads, but trusting an AI to make decisions about how to construct something—well, that's a whole new level.

Meysam Taghavi: Exactly. The key is how we, as humans, adapt to these machines. If we learn to trust their judgment based on their learning and data, it will become more acceptable. But if they still seem like black boxes to us, it's harder for people to feel comfortable with that level of autonomy.

Soleman Haj Bakour: So, do you think that in 5-10 years, we'll see a mix of human oversight with robots making some autonomous decisions, or do you think we'll lean more towards robots doing the job without as much human interaction?

Meysam Taghavi: I think we'll see a mix. Robots will become more autonomous in the sense that they can make decisions based on AI, but there will still be human oversight. Especially in construction, where safety and accuracy are so critical, it's hard to imagine fully autonomous robots without some level of human input. But as the technology improves, the balance will shift more toward robots handling tasks with less human intervention.

Soleman Haj Bakour: That makes sense. I think that balance will be key for the smooth integration of robots into construction sites. It's all about trust and collaboration between humans and machines.

Meysam Taghavi: Exactly. The future of construction will be about humans and robots working together, each doing what they do best. The more we understand each other's strengths and weaknesses, the more effective the collaboration will be.

Soleman Haj Bakour: Thank you very much for your time and the conversation

Meysam Taghavi: You are welcome!

B.3 Expert Interview - Wolfgang Hochreiter

Transcript: Expert Interview Wolfgang

Soleman Haj Bakour: Vielen Dank noch einmal für deine Zeit! Das ist wirklich eine große Hilfe und eine wertvolle Ergänzung für meine Diplomarbeit. Kurz zur Einordnung: In meiner Diplomarbeit hatte ich die Idee, Experten zu befragen, die ich während meiner Arbeit kennengelernt habe und mit denen ich im Bereich Baurobotik in Kontakt gekommen bin. Dann fangen wir ganz am Anfang mit einer kurzen Vorstellung an, und danach starte ich mit meinen Fragen.

Wolfgang Hochreiter: Mein Name ist Wolfgang Hochreiter. Ich bin seit 18 Jahren bei Doka tätig und beschäftige mich mit Antriebstechnik und Automatisierung im Baubereich, insbesondere in den Bereichen Schalungssysteme und Traggerüste. In diesem Zusammenhang haben wir bereits zahlreiche Projekte realisiert – insbesondere im Bereich selbstkletternde Systeme und Infrastrukturprojekte. In letzter Zeit haben wir uns auch zunehmend mit klassischen Betonbauverfahren befasst, beispielsweise mit dem DokaXdek-System.

Soleman Haj Bakour: Das heißt also, deine Arbeit hat nicht direkt mit Robotern zu tun, oder habe ich das falsch verstanden? Oder hast du dennoch Erfahrungen mit Baurobotern gesammelt?

Wolfgang Hochreiter: Direkte Erfahrungen mit Baurobotern in der Praxis habe ich bisher noch nicht so viele. Aber bei Doka beschäftigen wir uns intensiv mit der Mechanisierung sowie mit teil- und vollautomatisierten Prozessen im Baubereich – insbesondere im Schalungswesen.

Soleman Haj Bakour: Verstehe. Auch wenn deine Erfahrung mit Baurobotern begrenzt ist, welche Roboter hast du bereits auf Baustellen im Einsatz gesehen? Neben den Robotern, die ihr bei Doka nutzt – gibt es weitere Beispiele?

Wolfgang Hochreiter: Ja, es gibt zahlreiche Beispiele, die öffentlich vorgestellt und am Markt repräsentiert werden. Dazu gehören beispielsweise der Baubot von Fischer oder der Jaibot von Hilti.

Ein weiteres spannendes Thema ist die Automatisierung im Aufzugsbau, wo die Vormontage zunehmend teil- oder vollautomatisiert abläuft. Generell ist der eigentliche Bauprozess jedoch immer noch stark manuell geprägt.

Was meine Erfahrung mit Robotik betrifft, so habe ich vor allem im industriellen Umfeld Kontakt mit vollautomatisierten Fertigungsprozessen und teilautomatisierten Industrieanlagen gehabt. Im Bauwesen hingegen ist die Automatisierung noch sehr eingeschränkt. Vieles befindet sich noch in der Test- und Forschungsphase.

Soleman Haj Bakour: Gut, dann habe ich jetzt einen ersten Eindruck von deinem Hintergrund. Ich würde nun tiefer in die Themen meiner Diplomarbeit einsteigen. Ich weiß nicht, ob du dich noch daran erinnerst, aber meine Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Human-Robot-Interaction im Bauwesen, speziell in drei Bereichen:

1. Sicherheit (Health and Safety)
2. Schulung und veränderte Rollen
3. Produktivität

Lass uns mit dem Thema Sicherheit beginnen. Wie du bereits erwähnt hast, steckt die Implementierung von Robotern auf Baustellen noch in den Kinderschuhen. Daher sind potenzielle Risiken möglicherweise noch nicht vollständig bekannt. Man könnte sich Verletzungsrisiken oder andere Gefahren vorstellen.

Was denkst du – welche Risiken könnten sich aus der direkten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter auf Baustellen ergeben?

Wolfgang Hochreiter: Ich möchte etwas weiter ausholen. Robotik – oder besser gesagt die Mechanisierung, Teil- und Vollautomatisierung – bringt sowohl große Chancen als auch Risiken mit sich.

Eines der größten Risiken ist die Akzeptanz. Das Bauwesen ist ein sehr konservativer Bereich, in dem handwerkliche Arbeit tief verwurzelt ist. Viele Arbeiter sind es gewohnt, Aufgaben manuell auszuführen, und stehen Automatisierung daher skeptisch gegenüber.

Ein weiteres Risiko sehe ich in der Koordination zwischen verschiedenen Gewerken. Wir kennen alle BIM und das theoretische Modell, wie es funktionieren könnte. In der Praxis sind die Anwendungsbereiche jedoch noch sehr begrenzt. Gewerke betrachten Automatisierung oft nur für ihren eigenen Bereich und entwickeln Insellösungen, ohne Schnittstellen zu berücksichtigen. Ein Beispiel aus unserer Praxis: die Kombination von Schalung und Bewehrung. Wie bringt man beides effizient zusammen, ohne neue Risiken zu schaffen? Bisher gibt es kaum standardisierte Lösungen dafür. Es gibt zwar erste Ansätze, beispielsweise Bewehrungsroboter – ich kenne ein Unternehmen in den USA, das solche Roboter für Brücken und große Bauwerke einsetzt. Aber sobald die Strukturen komplexer und individueller werden, stoßen diese Roboter an ihre Grenzen.

Gleichzeitig bietet die Automatisierung aber auch enorme Chancen, insbesondere im Bereich der Sicherheit. Durch Mechanisierung und Robotik können Arbeiter aus gefährlichen Bereichen herausgenommen werden.

Ein Beispiel aus der Industrie: In Stahlwerken wurde früher der Abstich von flüssigem Stahl manuell durchgeführt – eine extrem gefährliche Arbeit. Heute übernehmen Maschinen diese Aufgabe, was die Sicherheit erheblich verbessert hat.

Ich bin überzeugt, dass sich eine ähnliche Entwicklung auch auf Baustellen durchsetzen wird. Ein klassisches Beispiel sind auskragende Schalungen. Heute müssen Arbeiter Bewehrungen, Anschlusskästen und Schalungen oft in gefährlicher Höhe manuell anbringen. Wenn solche Prozesse automatisiert werden, könnten Unfälle drastisch reduziert werden.

Ein weiterer Vorteil der Automatisierung ist die Qualitätssicherung. Automatisierte Systeme dokumentieren präzise, wann und wie eine Arbeit ausgeführt wurde. Dadurch lassen sich Fehler minimieren und die Qualität der Bauausführung verbessern.

Ich sehe dabei insbesondere auch den Einsatz von Kameras im Zusammenspiel mit Sensorik. Es gibt inzwischen ein Kamerasystem von der Firma Liebherr mit einem Sichtfeld von 140 Grad – das ist sehr viel. Dieses System arbeitet mit KI und erkennt beispielsweise anhand des Unterarms eines Menschen, ob sich jemand im Gefahrenbereich befindet. In solchen Fällen erfolgt eine automatische Abschaltung. Genau das ist für mich die Verbindung – Sensorik in Kombination mit KI. Das ist ein enorm wichtiges Thema, das im Bereich Sicherheit riesige Potenziale eröffnet.

Soleman Haj Bakour: Ja, das glaube ich auch. Ich weiß nicht mehr genau, wo ich das mal gehört habe – ich glaube, jemand von Wienerberger hat mal gesagt, dass sie KI momentan noch nicht verwenden dürfen, einfach aus Datenschutzgründen oder in diese Richtung.

Wolfgang Hochreiter: Ja, sprechen wir da von einem allgemein verfügbaren KI-System, wie man es am Markt findet – also ChatGPT, Co-Pilot oder Ähnlichem? Oder reden wir von etwas Eigenem, wie es Liebherr macht? Liebherr entwickelt ja eigene Systeme. Ich habe erste Funktionsmuster gesehen – das waren riesige Rechner, wirklich große Dinger, keine einfachen kleinen Kisten. Dazu gab es kleine Kameras, aber die eigentliche Herausforderung waren diese massiven Rechner.

Das heißt, der Hauptfokus der Entwicklungsarbeit lag gar nicht auf der Kamera. Die hatten sie relativ schnell funktionsfähig – also was Baustellentauglichkeit betrifft: passende Auflösung, geeigneter Fokus, und Anpassung an äußere Bedingungen, wie zum Beispiel beheizte Linsen, damit die Linse nicht beschlägt. Das haben sie alles schon sehr gut umgesetzt. Aber der größte Aufwand war die KI – beziehungsweise das Rechensystem – so weit zu verkleinern bzw. zu miniaturisieren, dass es praktikabel wurde.

Inzwischen sind sie da schon sehr weit. Ich bin gespannt auf die nächste Bauma-Messe. Wenn ich den zuständigen Entwicklungsleiter dort treffe, frage ich ihn sicher: „Wo ist denn der Rechner jetzt?“ Und ich hoffe, er zeigt dann auf ein kleines Kästchen und sagt: „Das da ist er.“

Soleman Haj Bakour: Ja, ich hoffe, dass ich auch Zeit habe, hinzufahren – oder besser gesagt: Es ist genau an einem Tag, an dem wir hier eine Vorlesung haben, deswegen mal schauen. Vielleicht sehen wir uns ja dort, wenn wir beide hinfahren – das wäre wirklich super. Ich habe gehört, von uns fährt ein Bus am 7.4., aber wie gesagt – an dem Tag haben wir eine Vorlesung, und wir müssen dabei sein. Es ist zwar Arbeit, aber eben auch Schulung bzw. Training – also auf jeden Fall verpflichtend. Und das bringt uns auch schon zum nächsten Thema: Schulungen. Wenn ich an Bauroboter und die Arbeit damit denke, denke ich immer zuerst an Operatoren – und dann vielleicht an eine Helfer, aber bestimmt entstehen auch neue Berufe rund um diese Maschinen. Was denkst du, welche neuen Berufe könnten dabei entstehen – oder anders gefragt: Welche könnten gebraucht werden?

Wolfgang Hochreiter: Da möchte ich etwas weiter ausholen. Aktuell kennen wir im Bau vor allem Dienstleistungen wie Bewehrung herstellen, Einbauteile produzieren oder verbauen – oft Aufgaben, die man auch mit wenig Vorwissen ausführen kann. Mein Zugang ist: Es werden definitiv neue Geschäftsmodelle entstehen – und damit auch neue Kompetenzen. Was meine ich damit? Wenn man jetzt zum Beispiel einen Roboter an eine Baufirma verkauft, dann fragt sich die Firma oft: „Was soll ich damit anfangen?“ Denn diese Maschinen sind derzeit noch zu komplex für die herkömmliche Bauarbeit. Dieser Wissens- und Fähigkeits-Gap lässt sich nicht sofort überbrücken – also muss man über Dienstleistung nachdenken. Das bedeutet: Der Operator kommt mit dem Roboter – das wird meiner Meinung nach der erste Schritt sein. Statt direkt zu fragen, welche Berufe entstehen, würde ich eher fragen: Welche Geschäftsmodelle entstehen? Zuerst wird es darum gehen, eine fertige Wand oder ein Bauteil als Dienstleistung herzustellen. Sobald dann Know-how aufgebaut ist und die Lücke kleiner wird, könnten Baufirmen auch bereit sein, eigene Fachkräfte auszubilden – nicht im Sinne eines klassischen Baumaschinenführers, sondern eines Roboteroperators oder wie man das nennen mag. Langfristig sehe ich ein Modell ähnlich wie bei den Paragraf-20-Ausbildungen: Es gibt eine Grundschulung und dann eine spezifische Maschinenausbildung. Dabei entstehen dann zwei Rollen: Der Auszubildende und der eigentliche Anwender – also der Operator.

Soleman Haj Bakour: Da habe ich auch mal eine Idee gehabt. In Workshops zum Thema „Robotics-oriented Design“ habe ich darüber nachgedacht, ob es nicht so etwas wie einen „Robotik-orientierten Ingenieur“ geben sollte – also jemanden, der bei der Gebäudeplanung direkt berücksichtigt, wie man mit Robotern am besten bauen kann. Sozusagen ein „robot-oriented architect“, der sich überlegt, wie ein Gebäude gestaltet sein muss, damit Roboter effizient arbeiten können – mit maximaler Produktivität, hoher Qualität und möglichst geringen Kosten. Ich kann mir gut vorstellen, dass man Architektur oder Bauingenieurwesen studiert und sich dann im Master auf so etwas spezialisiert.

Wolfgang Hochreiter: Ja, das sehe ich genauso. Aber soweit sind wir noch nicht. Zuerst müssen wir uns mit dem großen Markt beschäftigen. Man kann sich vorstellen, dass das ein riesiger Markt wird – aber wir müssen ihn von Grund auf aufbauen. Wir können nicht einfach automatisieren, nur um zu automatisieren. Es muss einen klaren Nutzen geben. Was ist dieser Nutzen? Sicherheit? Wirtschaftlichkeit? Das wird ganz oben stehen. Erst wenn der Business Case funktioniert, wird Automatisierung durchkommen – dann vielleicht als nächstes Sicherheit, und danach möglicherweise der Facharbeitermangel. Der wichtigste Punkt wird aber Produktivität sein. Wie kann ich dem Kunden den Nutzen vermitteln, dass er ein Bauwerk günstiger errichten kann? Das ist es, was der Kunde will: Kosten sparen. Ein Gebäude möglichst effizient mit geringem Kapitaleinsatz zu errichten – das ist die zentrale Aufgabe.

Soleman Haj Bakour: Ja, das stimmt. Vielleicht eine etwas andere Frage – nicht direkt zur Produktivität, aber dennoch wichtig: Es geht um Akzeptanz. Selbst wenn wir den Kunden von der Technik überzeugen – was ist mit den Bauarbeitern?
Glaubst du, dass Bauarbeiter sich beschweren, wenn Roboter auf die Baustelle kommen? und falls ja – wie können wir diese Akzeptanz fördern?

Wolfgang Hochreiter: Ich denke da in zwei Richtungen. Erstens: Die Bauarbeiter werden wir nicht mit wirtschaftlichen Argumenten überzeugen – Punkt. Diese Argumente gelten für den Betreiber oder Investor, aber nicht für den Bauarbeiter. Den holen wir nur über die emotionale Ebene ab.

Ich habe ein Beispiel gesehen, wie man es nicht machen sollte – in China. Da gab es einen Wettbewerb zwischen zwei Robotern: Wer ist schneller? Das ist völlig gescheitert. Sowas führt sofort zu Angst, und damit ist die Akzeptanz dahin.

Man muss also emotional ansetzen – über Ergonomie, über Erleichterung bei der Arbeit. Hochqualifizierung bedeutet auch mehr Verantwortung, mehr Einkommen. Sicherheit ist ein weiterer Punkt: Wenn ich als Bauarbeiter nicht ständig in gefährliche Situationen muss – zum Beispiel bei schlechtem Wetter – dann verändert das meinen Blick auf die Technik. Natürlich gibt es Risiken, aber die Intention der Roboter ist nicht, jemanden zu ersetzen, sondern zu unterstützen. Über diesen Weg kann man Akzeptanz erreichen.

Soleman Haj Bakour: Du hast gerade die Ergonomie erwähnt. Es geht ja auch darum, dass man alles um den Menschen herum entwickelt. Deshalb ist es auf jeden Fall wichtig, die Arbeiter in den Prozess zu integrieren, damit sie sich nicht ausgeschlossen fühlen. Vielleicht – wenn du das so siehst...

Ein zweiter Aspekt ist die Emotion: Man sollte sich vielleicht überlegen, wie man das Wort „ersetzen“ verwendet, weil ich glaube, das führt dazu, dass sich Bauarbeiter ausgeschlossen fühlen. Es gibt einen Unterschied zwischen „ersetzen“ und „ausschließen“ – Jobverlust und Jobersatz sind zwei verschiedene Dinge.

Wolfgang Hochreiter: Aber dafür fehlt oft das Verständnis. Du musst dir vorstellen, wir arbeiten mit Bauarbeitern, und ohne das jetzt abwertend zu meinen: Die meisten haben keinen Studienabschluss. Der Punkt ist, dass bei vielen Bauarbeitern das Verständnis für solche Entwicklungen einfach nicht vorhanden ist. Sie verstehen nicht, wie das Ganze funktioniert. Deshalb müssen wir eine andere Sprache sprechen und unsere Argumente anders aufbauen. Übrigens bin ich nicht ganz deiner Meinung, dass man den ganzen Prozess um den Menschen herum denken sollte. Ich glaube eher daran, den Bauprozess selbst von Grund auf neu zu denken und dann die richtigen Schritte zu setzen. Den Menschen auf der Baustelle muss man ein Umfeld bieten, in dem man sie emotional abholen kann.

Soleman Haj Bakour: Ja, ich meine, für mich ist das Thema wirklich schwierig, weil ich auch nicht genau weiß, wie ich es in meiner Diplomarbeit formulieren soll. Die Entwicklung geht in allen Bereichen rasant voran, und ich merke selbst, dass man einfach mehr leisten muss. Die Menschen mit weniger Erfahrung werden am stärksten davon betroffen sein. Deshalb denke ich, es gibt so etwas wie ein „Entweder-oder“: Wenn du dich bewiesen hast, bleibst du; wenn nicht, wird es schwierig. Weißt du, was ich meine? Es wird immer schwieriger für diejenigen, die nicht mit der Entwicklung Schritt halten. Deshalb fällt es mir schwer, das in Worte zu fassen.

Wolfgang Hochreiter: Das ist die klassische Leistungsgesellschaft, ja. Ich würde aber das eher positiv formulieren. Die Konsequenzen würde ich nicht betonen. Ganz ehrlich, diese Konsequenzen gibt es in jeder Branche: Wenn du dich nicht weiterentwickelst, bleibst du irgendwann zurück. Das ist ein generelles Thema der Leistungsgesellschaft. Wir sehen das auch bei der Altersarbeitslosigkeit – viele Menschen fallen aufgrund fehlender Weiterentwicklung aus dem Arbeitsleben heraus. Aber wir müssen Wege finden, wie wir diese Menschen weiterhin produktiv einsetzen können.

Hier müssen wir wirklich positiv ansetzen. Wir bieten den Menschen die Möglichkeit zur Weiterbildung. Mit dieser Weiterbildung steigt auch ihr Einkommen – und sie können ihren Wohlstand verbessern.

Soleman Haj Bakour: Ja, das stimmt. Auf jeden Fall spannend. Das bringt uns auch zum nächsten Thema: Produktivität. An der Uni haben wir etwas über das „magische Dreieck“ gelernt. Das ist ein Dreieck aus Qualität, Kosten und Zeit. Diese drei Faktoren hängen zusammen. Wenn ich einen verbessere, wirkt sich das negativ auf die anderen beiden aus. Wenn ich zum Beispiel die Qualität erhöhen will, brauche ich mehr Zeit und mehr Geld. Deshalb, wenn ich einen dieser Faktoren verbessern will, dann braucht es eben mehr Zeit und mehr Geld. Uns wurde auch gesagt, dass Digitalisierung und Automatisierung versprechen, dieses Problem des magischen Dreiecks zu lösen. Denkst du, Bauroboter können dieses Problem lösen? Also, dass sie gleichzeitig Zeit, Kosten und Qualität verbessern können?

Wolfgang Hochreiter: Glaub mir, ich habe mich damit gerade nicht intensiv beschäftigt. Um es kurz zu machen: Ich glaube persönlich nicht, dass dieses Dreieck jemals an Gültigkeit verlieren wird. Was passieren wird, ist, dass wir die Ebene verschieben, auf der das Dreieck wirkt. Mit Automatisierung auf der Baustelle werden wir irgendwann eine Effizienzsteigerung erreichen. Aber der Anspruch, Kosten zu minimieren, Zeit zu optimieren und Qualität zu maximieren, wird immer bestehen bleiben. Das Dreieck wird nie vollständig aufgelöst, weil der Anspruch immer gleich bleibt.

In dieser Welt – ich würde sagen, es ist eine Art Flucht – wir setzen das Dreieck einfach auf ein höheres Technologielevel. Aber ehrlich gesagt: Wir bewegen uns in der Baubranche... warte kurz... sagen wir mal, sehr optimistisch formuliert, in Richtung Industrie 3.0. Wir haben das gerade mal angekratzt. Wenn du heute eine SPS programmierst – sagen wir mal, du steuerst damit einen klassischen Bagger – dann ist das Technologielevel 1. Da wird eine händische Bewegung maschinell umgesetzt. Aber da ist nichts programmiert – das ist ein direkter Übersetzer.

Wir befinden uns also irgendwo auf dem Weg zu Industrie 3.0. Die eigentliche Herausforderung wird Industrie 4.0 sein. Was ich damit sagen will – und das ist meine persönliche Meinung: In der Baubranche wird oft schon von „Digitalisierung“ gesprochen, wenn ein Sensor drahtlos Daten an ein Smartphone überträgt. Aber das ist nichts anderes als smarte Visualisierung. Das hat mit echter Digitalisierung noch nichts zu tun. Und ich sehe auch große Hersteller, die unter dem Schlagwort „Digitalisierung“ smarte Visualisierungen anbieten, aber ohne interdisziplinäre Abhängigkeiten. Diese existieren nicht – und damit sind wir wieder am Anfang. Wir müssen die interdisziplinäre Verkettung von Bauprozessen – wie Bewehrung und Schalung – wirklich integrieren. Aber haben wir das mit der heutigen Digitalisierung tatsächlich schon erreicht?

Soleman Haj Bakour: Und wenn wir von diesem ganzen Prozess wirklich profitieren wollen... Wie, deiner Meinung nach, sollte man die Aufgaben definieren, für die Roboter jetzt gut geeignet sind? Welche Aufgaben können Roboter aktuell übernehmen und welche sollten sie in Zukunft übernehmen können?

Wolfgang Hochreiter: Es gibt darauf keine pauschale Antwort, das hängt stark vom jeweiligen Bauprozess ab. Ich gebe dir ein Beispiel: Im Betonbau und im Fertigteilbau gibt es große Vorteile durch den Einsatz von Robotern. Momentan wird oft noch in Schwarz-Weiß gedacht – entweder oder. Aber den Bauprozess wirklich neu zu denken, bedeutet für mich ein „sowohl als auch“. Man sollte das Beste aus der alten Welt mit neuen Technologien kombinieren, um einen hoch effizienten Bauprozess zu schaffen. Das sehen wir zum Beispiel bei Nadine – Roboter oder Vollautomatisierung werden dann besonders interessant, wenn sie die Effizienz des aktuellen Bauprozesses übertreffen. Sobald Roboter die Effizienz steigern, werden sie wertvoll. Der Roboter von Wienerberger beispielsweise errichtet eine Mauer. Aber was wäre, wenn wir ein ganzes Haus automatisiert herstellen wollen? Die Frage ist: Wo lässt sich der Bauprozess sinnvoll automatisieren? Wo können wir menschliche Ressourcen einsparen und stattdessen effizienter einsetzen?

Soleman Haj Bakour: Das ist ein interessanter Punkt. Kann man das so zusammenfassen: Es geht darum, den passenden Automatisierungsgrad zu definieren?

Wolfgang Hochreiter: Ja, wir befinden uns gerade in einer Findungsphase. Wir haben mit ersten Tests begonnen, aber im Grunde stehen wir noch am Anfang. Ich habe beispielsweise über die Vision einer vollautomatischen Schalung nachgedacht. Aber das bringt dem Kunden allein noch nichts. Die zeitintensiven Schritte sind das Einbringen der Bewehrung, der Einbauteile, des Betons und dessen Aushärtung. Die Schalung ist nur ein notwendiges Mittel, um den Beton in Form zu bringen. Die Bewehrung ist notwendig, um die Statik zu sichern. Die zentrale Frage bleibt also: Wo genau lassen sich Roboter wirklich effizient einsetzen? Ich weiß es selbst noch nicht genau, aber wir haben zumindest einen Anfang gesetzt: nämlich mit Bauhilfsfahrzeugen, die Deckentische positionieren. Das ist ein erster Schritt – bis zur Vollautomatisierung ist es aber noch ein weiter Weg.

Soleman Haj Bakour: Ja, da frage ich mich auch... keine Ahnung. Ich sehe manchmal die Projekte von Doka auf LinkedIn. Zuletzt war da ein großes Projekt in Dubai oder so. Es gab viele Unterschriften und Beiträge dazu. Da frage ich mich: Sind Roboter nur für solche hochkomplexen Projekte mit riesigem Budget gedacht, oder könnten sie auch bei kleineren, normalen Projekten eingesetzt werden? Zum Beispiel beim Bau eines Einfamilienhauses?

Wolfgang Hochreiter: Genau diese Diskussion hatten wir gestern. Der Einstiegspunkt sollte dort sein, wo viele Wiederholungen vorkommen – denn dort ist das Potenzial für Wirtschaftlichkeit und Produktivitätssteigerung am größten. Bei jeder Wiederholung spart man Zeit. Deshalb haben wir bei Doka beschlossen, mit Projekten zu beginnen, bei denen viele gleiche Elemente vorkommen – also mit hoher Wiederholungsrate. Wenn das funktioniert, kann man das System weiterentwickeln und auch auf kleinere Serien anwenden. Und irgendwann erreicht man auch Projekte mit höherer Individualität. Wir sagen aber ganz klar: Der Bauprozess, wie wir ihn heute kennen, wird nicht für immer so bleiben. Ich glaube nicht, dass er in 10 oder 15 Jahren noch so aussieht wie jetzt. Alle denken bereits darüber nach, wie man ihn effizienter gestalten kann – besonders im Hinblick auf Klimaziele. Der Wandel wird kommen, ob wir wollen oder nicht.

Soleman Haj Bakour: Das macht Sinn, ja. Ich hätte noch zwei Fragen, die nicht direkt mit meiner Masterarbeit zu tun haben, aber aus Gesprächen und Erfahrungen hervorgegangen sind. Die erste Frage haben wir ganz am Anfang kurz angerissen: Der Gedanke, dass der Mensch gewissermaßen das Risiko darstellt. Kannst du dir vorstellen, dass es in X Jahren Baustellen ohne Menschen gibt?

Wolfgang Hochreiter: Ja, definitiv. Ich erkläre dir gerne, warum ich da so schnell „ja“ sagen kann. Wenn man sich den Tunnelbau anschaut – also mit diesen riesigen Tunnelbohrmaschinen – sieht man, wie weit die Automatisierung bereits ist. Ganz vorne bei der Maschine gibt es meistens nur jemanden, der den Prozess aus der Steuerzentrale überwacht. Die ganze Maschine, inklusive dem Tübbing-Einbau, ist ein hochautomatisierter Prozess. Also ja, ich kann mir das definitiv vorstellen. Nicht bei jedem Bauprojekt, nicht bei jedem Gebäudetyp – aber es wird Baustellen geben, bei denen man ohne Menschen auskommt. Ein weiteres Beispiel ist der 3D-Druck im Bauwesen. Auch hier wird der Prozess immer weiter automatisiert. Die größte Herausforderung besteht aktuell in der Koordination der Bauteile, die vom 3D-Drucker erstellt werden – das erfordert noch etwas Planung. Aber das ist eine reine Prozessfrage, und die Branche weiß, wie man das lösen kann. Warum also nicht?

Soleman Haj Bakour: Ich muss sagen, ich fand die Idee sehr spannend, als sie aufkam. Ich habe dann angefangen, ein bisschen zu recherchieren, was notwendig wäre, um das umzusetzen. Dabei bin ich auf ein Bauprojekt in Japan aus dem Jahr 1993 gestoßen, bei dem tatsächlich ein Gebäude ohne Personal vor Ort gebaut wurde – ein Hochhaus. Ich kann dir den Link schicken; es

gibt ein 130-minütiges Video dazu oder auch 2–3 wissenschaftliche Artikel. Ich habe sie noch nicht im Detail gelesen, aber ich finde es faszinierend, dass das damals, also vor über 20 Jahren, schon möglich war.

Wolfgang Hochreiter: In Japan gab es bereits in den 1980er-Jahren solche Projekte. Japan war in diesen Bereichen immer ein Vorreiter – mit wirklich spannenden Projekten. Zwar teuer, aber dennoch machbar. Ich suche gerade nach dem Namen eines dieser frühen Projekte, finde ihn aber im Moment leider nicht. Aber ja, es ist klar, dass es solche Entwicklungen gegeben hat.

Soleman Haj Bakour: Ich fand es einfach interessant, dass das damals schon umsetzbar war. Klar gibt es Gründe, warum das nicht weiterverfolgt wurde – unter anderem die Kosten. Aber mit der heutigen Robotik und Automatisierung bewegen wir uns vielleicht langsam wieder in diese Richtung.

Wolfgang Hochreiter: Ich denke, die Entwicklung ist nach wie vor im Gange – aber möglicherweise geschieht sie unter unserem "zentraleuropäischen Blickwinkel". Ich bin überzeugt, dass in Japan die Technologie bereits fertig entwickelt ist, bevor Unternehmen oder Baufirmen beginnen, sie aktiv voranzutreiben.

Soleman Haj Bakour: Meine zweite Frage, die nicht direkt mit meiner Masterarbeit zu tun hat, kommt aus einem Paper, das ich über Robotik allgemein gelesen habe – also nicht nur Bauroboter. Dort wurde geschrieben, dass China ab 2025 mit der Produktion von Robotern beginnt und diese ab 2027 auf dem Markt sein werden. Du warst letztes Jahr in den USA, und ich habe den Eindruck, dass das Thema Bauroboter – ähnlich wie bei Elektroautos – auch eine politische Dimension haben könnte. Vielleicht sagen wir eines Tages: „Wir wollen nicht den gleichen Fehler machen wie bei den E-Autos, dass wir zu weit hinten sind, obwohl wir am Anfang ganz vorne waren.“ Deshalb wollte ich dich fragen: Was hast du in den USA erlebt? Was machen die Amerikaner anders? Was machen die Europäer? Und was passiert in China? Nicht unbedingt politisch betrachtet, sondern in Bezug auf Baurobotik und diese gesamte Entwicklung – machen wir da vielleicht etwas falsch?

Wolfgang Hochreiter: Ich glaube nicht, dass jemand etwas „falsch“ macht. Was für uns falsch wirkt, kann in anderen Märkten völlig normal sein – das hängt ganz vom technologischen Stand ab. Was ich aber beobachtet habe, ist, dass ein großer Unterschied zwischen der Realität und dem besteht, was in Präsentationen gezeigt wird. China ist führend bei der Automatisierung auf Baustellen. Wenn man sich die Patente anschaut, kommen 90 von 100 aus China. Aber mein Chef war im November auf der Bauma in Shanghai und meinte, der technische Stand dort sei 30 Jahre hinter Europa. Und wenn die Bautechnologie schon 30 Jahre hinter der Industrie ist – wo stehen sie dann tatsächlich? Dieser Unterschied ist enorm.

In den USA gibt es einen starken Innovationsdrang, aber nicht, weil sie den Planeten retten oder das „Richtige“ tun wollen – es geht ihnen ums Geldverdienen. Ob das System der Umwelt hilft oder nicht, interessiert nicht – Hauptsache, es bringt Profit. Wir hatten z. B. zwischen 2010 und 2015 großen Erfolg mit unseren Systemen in den USA. Irgendwann sagten die Baufirmen zu uns: „Das System ist toll, aber könnt ihr es schneller klettern lassen? Wir verlieren Zeit, während es sich bewegt.“ Wenn man die Zeit von 45 auf 15 Minuten reduziert, spart man viele Stunden – und die Leute können früher anfangen zu arbeiten. In Mitteleuropa geht es oft um die Geschwindigkeit des gesamten Prozesses, in den USA eher um die Optimierung einzelner Schritte. Es geht also nicht um richtig oder falsch – es sind einfach unterschiedliche Herangehensweisen mit verschiedenen Prioritäten.

Soleman Haj Bakour: Ich finde es sehr spannend, wie du mit „richtig“ und „falsch“ oder ihren Synonymen umgehst. Es ist nicht unbedingt negativ oder positiv, sondern einfach eine Frage der Perspektive. Das habe ich jetzt schon zwei- oder dreimal bei dir bemerkt. Das muss ich auch noch lernen, ehrlich gesagt.

Wolfgang Hochreiter: Wie gesagt, es ist meine persönliche Interpretation von Tatsachen. Ich will nicht beurteilen, ob ein Bauverfahren in den USA besser ist als hier. Natürlich habe ich eine Meinung, aber es geht nicht um richtig oder falsch – es ist einfach eine andere Art, wie die Industrie funktioniert. Zum Beispiel war der klassische Maschinenbau in Europa den USA immer 20 Jahre voraus – und ist es auch heute noch. In den USA arbeitete man in der Automobilindustrie mit Hydraulikantrieben bei einem Systemdruck von 70–80 Bar, während man in Deutschland bereits auf 200 Bar gegangen ist, um die Bauteile kleiner und effizienter zu machen. In den USA hat sich das nicht durchgesetzt. In Steyr gibt es z. B. die Firma GFM, die Kurbelwellenfräsmaschinen herstellt. In den USA verfolgten sie dabei völlig andere Maschinenbaukonzepte als in Europa. Das war interessant zu sehen. Ist das richtig oder falsch? Keine Ahnung. Tatsache ist, dass die Firma auf beiden Märkten gutes Geld verdient hat – und die Kurbelwellen funktionieren überall.

Soleman Haj Bakour: Sehr spannend. Jetzt komme ich leider zu den Abschlussfragen. Das Gespräch war wirklich schön, aber irgendwann muss man es leider beenden. Was sind deine Wünsche für die Baubranche – insbesondere im Hinblick auf Human-Robot-Interaction und Bauroboter?

Hochreiter, Wolfgang: Mein Wunsch ist eigentlich nur einer: „Step by step.“ Die Betrachtung jedes einzelnen Entwicklungsschritts. Aus meiner Sicht bringt das Überspringen von Schritten mehr Risiken als Vorteile. Mein großes Anliegen ist, dass wir in unserem Unternehmen eine solide Basis schaffen, auf der später Semi- und Vollautomatisierung aufbauen können. Jeder Schritt sollte gut reflektiert und analysiert werden, bevor man weitermacht. Das ist mein Wunsch.

Haj Bakour, Soleman: Zweite Frage: Das Thema AI in Kombination mit Robotik. Ich persönlich glaube, dass das ein Grund sein könnte, warum Bauarbeiter Angst haben oder haben könnten. Was könnte man tun, um diese Angst etwas zu entschärfen?

Hochreiter, Wolfgang: Ich habe ein praktisches Beispiel: Ich hatte dazu eine anregende und spannende Diskussion mit Kollegen. Wir haben über AI und die Integration von Kamerasystemen gesprochen und festgestellt – das ist eigentlich gar nicht so blöd. Zum Beispiel erkennt ein Assistenzsystem im Bagger anhand der Armbewegung, ob es sich um einen Menschen handelt. Wenn sich dagegen ein Roboterarm bewegt, erkennt das System, dass es kein Mensch ist. Das ist natürlich ein sehr emotionales Thema. Es ist definitiv Fluch und Segen zugleich. Aber für die bevorstehenden Anwendungen sehe ich in AI eine riesige Chance.

Haj Bakour, Soleman: Da fällt mir noch etwas ein – auch wenn es das Gespräch ein wenig verlängert, ich hoffe, das ist okay. Ich wollte das eigentlich schon früher ansprechen, habe es aber vergessen. Es geht um Produktivität. Wir haben über Kosten, Qualität und Zeit gesprochen. Dabei ist mir aufgefallen, dass man Produktivität vielleicht anders betrachten sollte. Wenn ich einen Roboter habe, der z. B. Schalungen trägt oder Ziegelsteine bewegt, und ich nur danebenstehen und beobachten muss, dann bin ich nach acht Stunden immer noch fitter, als wenn ich die ganze Zeit körperlich gearbeitet hätte. Diese Form von Produktivität sollte nicht nur im Hinblick auf Kosten, Qualität und Zeit gesehen werden, sondern auch im Hinblick auf die Gesundheit der Arbeiter.

Wolfgang Hochreiter: Das ist ein ergonomisches Thema. Und damit sind wir bei einem aktuellen Business Case. Die Risiken und Folgekosten, die durch den Verlust der Gesundheit entstehen, werden häufig auf die Allgemeinheit abgewälzt. Die direkten Lohnkosten sind klar definiert, aber die langfristigen Folgen durch ergonomisch schlechte Arbeitsbedingungen – wie Fehlbelastungen – zeigen sich oft erst später. Diese Risiken werden durch pauschale Beiträge von der Gesellschaft getragen.

Was die Künstliche Intelligenz betrifft: Sie ist im Grunde eine Art Interpretation oder Zusammenstellung von Suchergebnissen in einer Datenbank. Das Ergebnis wird aber immer noch vom Menschen interpretiert und angewendet. Daher sehe ich KI eher als ein Assistenzsystem, das den Menschen unterstützt. Ich sehe in meiner Rolle deutlich mehr Chancen als Gefahren.

Soleman Haj Bakour: Ja, ich denke auch, am Ende muss man sich bewusst machen, dass Maschinen und Programme dafür da sind, uns zu unterstützen. Wir entscheiden, wie sie eingesetzt werden, und es liegt an uns sicherzustellen, dass sie keinen Schaden anrichten, sondern uns helfen. Das ist unsere Verantwortung als Menschen. Jetzt zur letzten Frage: Was denkst du, was sollte in diesem Themenfeld noch mehr angesprochen oder beachtet werden?

Wolfgang Hochreiter: Wie gesagt – die Ängste der Menschen. Diese müssen ernst genommen und gezielt mit Information angesprochen werden. Der Mensch hat das Bedürfnis, für komplexe Themen einfache Antworten zu bekommen – das liegt in unserer Natur. Unsere Aufgabe ist es, diese komplexen Themen so aufzubereiten, dass sie verständlich werden. Auch wenn wir nicht alles auf einmal beantworten können, sollten wir zumindest Teilantworten so kommunizieren, dass sie nachvollziehbar sind. Ziel ist es, die Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass das Thema nicht mehr als *komplex*, sondern nur noch als *kompliziert* erscheint – denn komplizierte Dinge kann man leichter erklären.

Soleman Haj Bakour: Vielen Dank Wolfgang. Das war ein schönes und bereicherndes Gespräch mit dir. Das wird mir sehr in meiner Diplomarbeit helfen.

Wolfgang Hochreiter: Bitte, sehr gerne!

B.4 Expert Interview - Kevin Nikolai

Transcript: Expert interview Kevin

Soleman Haj Bakour: Ich würde mit einer kurzen Vorstellung starten.

Kevin Nikolai: Genau, ich bin im Bereich Maschinenbau seit fast 15 Jahre tätig. Aufgewachsen bin ich mit Robotik, hauptsächlich mit Sechssachsrobotern, aber auch mit Fünf-Achsen-Robotern im Bereich der Lichtbogenschweißtechnik. Ich habe viel mit Applikationen im Bereich Bauzuführung, Bauteilentnahme und Bauteilbestückung in Kombination mit Schweißen gearbeitet. 2018 bin ich zu Pilz gewechselt, nachdem ich kurz vorher bei einem anderen Unternehmen im Bereich Automation gearbeitet habe, aber es gab einige zwischenmenschliche Probleme, die mich zur Entscheidung gebracht haben zu gehen. Bei Pilz habe ich bis 2019 gearbeitet und war dann für sieben Monate bei IBF, einem Unternehmen, das Software für Risikobeurteilung mit Fokus auf die Abbildung von Maschinen entwickelt. 2020 bin ich dann wieder zu Pilz zurückgekehrt, nach einer Umstrukturierung und einem Wechsel in der Geschäftsführung. Seitdem bin ich als Head of Training für die Trainingsabteilung verantwortlich, mit dem Schwerpunkt Maschinensicherheit und Arbeits-sicherheit. Ich bin auch zertifizierter TÜV-Ausbilder. In dieser Funktion haben wir spezielle Ausbildungsprogramme entwickelt, die sowohl intern als auch extern zertifiziert werden können. Wir bilden jedes Jahr etwa 700 bis 970 Personen in der Privatwirtschaft aus. Zusätzlich unterrichte ich an der FH Technikum Wien und in St. Pölten Themen wie Maschinenbau und Industrial Security. Letztes Jahr habe ich nebenberuflich mit Partnern eine Roboterzelle entwickelt, die jetzt seit Mai ohne größere Probleme läuft. Diese Zelle wird in der Holzverarbeitung verwendet, um Menschen von monotonen und körperlich belastenden Aufgaben zu entlasten. Das Thema Sicherheit ist hierbei ein zentraler Punkt, da die Flexibilität und Effizienz der Mitarbeiter erhöht wird und die Aufgaben automatisiert werden.

Soleman Haj Bakour: Wenn ich das richtig verstehe, hast du viel mit Robotern und Roboterzellen in industriellen Umgebungen gearbeitet, was ein großer Unterschied zu unserem Bereich ist, da wir in der Bauindustrie tätig sind. Ich würde jetzt zum Thema Sicherheit kommen. Die Einführung von Robotern auf Baustellen ist für uns als Bauingenieure noch neu, deshalb stellt sich die Frage: Welche Risiken, direkt oder indirekt, können durch die Arbeit mit Robotern entstehen, deiner Meinung nach?

Kevin Nikolai: Der große Unterschied ist, dass man in der Robotik zwischen strukturierten und unstrukturierten Umgebungen unterscheidet. Eine Baustelle ist eine unstrukturierte Umgebung, in der es keine festen Schutzmechanismen gibt, wie es in einer Fabrik oder einem Unternehmen der Fall ist. Auf Baustellen könnte es auch vorkommen, dass ungeschultes Personal in den Gefahrenbereich eines Roboters kommt. Das ist ein großes Risiko, besonders bei Robotern, die mit Kameras, Lidar- oder Radarsystemen arbeiten. Die Frage ist, ob der Roboter in solchen unstrukturierten Umgebungen sicher arbeiten kann und ob er in der Lage ist, Menschen zu erkennen und sich entsprechend sicher zu verhalten. Ein weiteres Beispiel ist die Landwirtschaft, wo ich ein Unternehmen kennengelernt habe, welches autonome Roboter zum Sprühen von Pflanzenschutzmittel herstellt. Auch hier stellt sich die Frage, was passiert, wenn ungeschultes Personal oder Passanten in den Gefahrenbereich geraten.

Soleman Haj Bakour: Du sprichst also von unterschiedlichen Risikostrukturen, wie zum Beispiel Risiken, die von der Maschine selbst oder von den Menschen ausgehen. Wie siehst du diese beiden Unterschiede?

Kevin Nikolai: In Österreich gilt, dass der Arbeitgeber Arbeitsmittel gemäß der Arbeitsmittelverordnung bereitstellen muss. Bei Robotern stellt sich daher die Frage, ob der Roboter in einer unstrukturierten Umgebung sicher ist. Wenn der Roboter selbstständig lernt oder unvorhersehbare Bewegungen macht, kann das zu Problemen führen. Auf der anderen Seite gibt es auch das Risiko, dass Menschen, die nicht ausreichend geschult sind, unachtsam werden und sich in einer unsicheren Umgebung aufhalten.

Besonders bei Robotern, die nicht starr programmiert sind, sondern die Bahnplanung deren Bewegungen auf Ermittlung von Kamera/Sensorwerten basiert, kann es zu unvorhersehbaren Bewegungen kommen, die gefährlich sein können, wenn Personen nicht achtsam sind.

Soleman Haj Bakour: Ich war letztes Jahr in Tschechien, wo ich mit einem Roboter von Wienerberger auf einer Baustelle gearbeitet habe. Wir haben mit den Arbeitern ein Interview geführt und gefragt, ob es bisher Unfälle mit Robotern auf Baustellen gegeben hat. Sie haben „nein“ geantwortet, und ich habe auch nicht viel darüber im Internet oder in Berichten gefunden. Weißt du, wie oft Unfälle mit Robotern auf Baustellen oder in anderen Bereichen passieren?

Kevin Nikolai: Leider kann ich dir keine genauen Zahlen zu Unfällen auf Baustellen nennen, da das nicht mein Kerngebiet ist. Aber in der Maschinenbauindustrie gibt es Unfallstatistiken, die jedoch nicht speziell auf Roboter eingehen. Meistens geht es in den Statistiken um den Umgang mit Maschinen und Handwerkzeugen. Es ist oft nicht klar, ob der Unfall direkt mit der Maschine oder mit der Arbeit im Umfeld der Maschine zusammenhängt. In den USA gibt es genauere Statistiken, aber ich habe diese derzeit nicht zur Hand. Ich kann dir aber auf jeden Fall weiterhelfen, wenn ich die Daten nachsehen kann.

Soleman Haj Bakour: Du hast von Verordnungen gesprochen. Welche Normen würdest du empfehlen, wenn sich jemand mit Robotern in diesem Bereich beschäftigen möchte? Ich denke, die Normen 10218-1 und -2 wären auf jeden Fall relevant, oder?

Kevin Nikolai: Im Prinzip gibt es zwei Hauptakteure: den Hersteller von Robotern selbst und den Systemintegrator dieser Robotersystemen. Grundsätzlich folgt das Ganze einem Top-down-Prinzip. Das bedeutet, es gibt eine Hierarchie bei der Steuerung von Haftung, und die beginnt im sogenannten Sekundärrecht der Europäischen Union. Das Sekundärrecht umfasst Richtlinien und Verordnungen. Hierarchisch gesehen hat die Verordnung die höchste Stellung im Sekundärrecht. Die Europäische Kommission oder das Europäische Parlament erlassen diese Verordnungen, die den Mitgliedstaaten der EU vorschreiben, wie sie diese Gesetze einhalten müssen. Konkret wird zum Beispiel die neue Maschinenverordnung ab dem 20. Januar 2027 in Kraft treten, aber aktuell gilt noch die Maschinenrichtlinie. Diese Richtlinien müssen von den Mitgliedstaaten in nationales Recht überführt werden. In Österreich bedeutet das, dass wir die Maschinenrichtlinie als Maschinen-Sicherheitsverordnung 2010 übernehmen. Die Wirtschafts- und Arbeitsministerien sind dafür verantwortlich, diese Umsetzungen vorzunehmen. Die Maschinenrichtlinie besagt einerseits, dass Maschinen die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen erfüllen müssen. Dies ist in Anhang 1 des Gesetzes festgelegt. Andererseits gibt es Anforderungen für den Arbeitgeber, der sicherstellen muss, dass er seinen Arbeitnehmern sichere Arbeitsmittel zur Verfügung stellt. Ein Roboter zählt zu den programmgesteuerten Arbeitsmitteln. Wenn ein neues Arbeitsmittel hinzukommt, ist laut Arbeitnehmerinnenschutzgesetz eine Kennzeichnung erforderlich, und zwar gemäß Anhang CE. Der Arbeitgeber muss sicherstellen, dass die Maschinen einer CE-Zertifizierung unterliegen, was bedeutet, dass der Hersteller ein Konformitätsbewertungsverfahren durchgeführt hat. Jedoch darf sich der Arbeitgeber nicht nur auf dieses CE-Zeichen verlassen, sondern muss die Funktionsfähigkeit der Schutzeinrichtungen vor der Übergabe an die Mitarbeiter überprüfen. Das ist besonders wichtig, wenn das Arbeitsmittel auf einer Baustelle eingesetzt wird. Dazu gehört auch, dass der Hersteller in seinem Handbuch angibt, wie die Schutzeinrichtungen ordnungsgemäß zu prüfen sind. In Bezug auf Robotik in unstrukturierten Umgebungen muss der Roboter in der Lage sein, Personen zu erkennen, zum Beispiel durch Lidar-Systeme, Kameras oder Ultraschallsensoren. Diese Systeme müssen dann regelmäßig geprüft werden, was spezielle geeichte Messgeräte erfordert.

Soleman Haj Bakour: Du hast auch andere interessante Punkte angesprochen, wie zum Beispiel das Vertrauen in Sensoren. Ich denke, das ist besonders relevant, wenn man an Baustellen denkt, da diese eine sehr dynamische und unstrukturierte Umgebung sind. Es gibt dort viele Faktoren wie Regen oder Nebel, die das Umfeld verändern.

Daher stellt sich die Frage, ob wir den Sensoren vertrauen können, dass sie unter diesen Bedingungen korrekt arbeiten und die richtige Reaktion der Maschine auslösen. Was denkst du darüber?

Kevin Nikolai: Prinzipiell ist es gleichgültig, ob die Umgebung strukturiert oder unstrukturiert ist, denn es gibt Normen, die sich mit der funktionalen Sicherheit von Steuerungssystemen befassen. Eine wichtige Norm ist die ISO 13849, die sich mit sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungssystemen beschäftigt. Das bedeutet, der Roboter muss in der Lage sein, zu erkennen, ob sich eine Person annähert, und bei Bedarf eine Sicherheitsstoppfunktion auszulösen. Diese Funktion wird durch eine Schutzeinrichtung aktiviert, was in den EU-harmonisierten Normen erwähnt wird. Es ist wichtig, dass die Sensoren in Kombination mit der Steuerung und der Aktorik des Roboters zuverlässig zusammenarbeiten, sodass ein gewisser Performance Level erreicht wird. Dieser Performance Level wird durch eine sogenannte Fehlerwahrscheinlichkeit pro Stunde (PFH) berechnet. Ein niedriges PFH bedeutet, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass Fehler in den Sensoren oder der Steuerung auftreten. Allerdings gibt es immer noch eine Restfehlerwahrscheinlichkeit. In unstrukturierten Umgebungen wie Baustellen kann es jedoch problematisch sein, vor allem wenn elektronische Systeme durch Staub oder Regen beeinträchtigt werden. In solchen Fällen könnte es sein, dass die Sensoren, wie zum Beispiel LiDAR-Scanner, nicht die gewünschte Leistung erbringen, was zu Verzögerungen beim Auslösen von Sicherheitsfunktionen führt. Besonders problematisch ist dies, wenn der Roboter in engen Räumen arbeitet und die Sicherheitszone zu klein ist, um einen Menschen darin zuzulassen. Das kann die Effizienz des Roboters stark beeinträchtigen, was in der Technologiebranche eine Herausforderung darstellt.

Soleman Haj Bakour: Ich habe ein ähnliches Problem in meiner Diplomarbeit, da die Normen wie ISO 15066 bereits eine Formel zur Berechnung des Sicherheitsabstands vorgeben. Bei meiner Berechnung komme ich auf einen Sicherheitsabstand von 3 Metern, wenn man den ausgestreckten Arm des Roboters berücksichtigt. Insgesamt ergibt sich daraus ein Sicherheitsabstand von etwa 8 Metern auf der Baustelle. Das stellt meiner Meinung nach ein großes Problem dar, weil es schwierig ist, diesen Abstand einzuhalten, vor allem, wenn sich andere Arbeiter in diesem Bereich bewegen, zum Beispiel beim Arbeiten mit Bewehrung. Wenn der Roboter in einem solchen Fall stoppt, hilft mir das wenig. Daher war meine Überlegung, den Sicherheitsabstand redundant zu gestalten, das bedeutet, innerhalb von 1 Meter sollte der Roboter langsamer werden oder sogar stoppen. Eine andere Möglichkeit wäre, dass der Roboter innerhalb bestimmter Bereiche gar keine Bewegung ausführt, wenn ein Mensch in der Nähe ist.

Kevin Nikolai: Bei Robotern gibt es je nach Hersteller unterschiedliche Möglichkeiten. Zum Beispiel bieten Hersteller wie ABB eine "Safe-Move"-Funktion, mit der man virtuelle Schutzbereiche um den Roboter setzen kann, ähnlich einer unsichtbaren Sicherheitszone. Diese Schutzzonen können auch auf das Werkzeug des Roboters angewendet werden. Man kann den Roboter so programmieren, dass er in bestimmte Bereiche nicht vordringt, oder bestimmte Achsenbewegungen einschränkt. Eine andere Möglichkeit ist es, die mechanische Begrenzung der Achsen direkt auf der Baustelle zu nutzen, was eine dauerhafte Lösung darstellt. Der Nachteil dabei ist, dass solche mechanischen Einschränkungen die Flexibilität des Roboters bei der Adaption an neue Umgebungen, zum Beispiel durch Kamerasysteme, einschränken können. Eine softwarebasierte Sicherheitszone ist flexibler, bietet jedoch derzeit nicht die gleiche Dynamik. Man kann eine externe Steuerung verwenden, um die Sicherheitszone je nach Bedarf anzupassen.

Soleman Haj Bakour: Wir haben vorhin das Wort Vertrauen erwähnt. Ich möchte es jetzt im Zusammenhang mit einem anderen Thema wieder aufgreifen, nämlich Schulungen und neuen Rollen. Könntest du mir mehr über das Trainingsprogramm und die Methoden in deiner Firma erzählen, die zur Schulung von Mitarbeitern verwendet werden?

Kevin Nikolai: Also, in der Regel sind eintägige Schulungsformate, die täglich stattfinden, eher Monologe, auch wenn wir natürlich den Dialog mit den Kunden anstreben und dieser auch aufgrund der Fragen immer zustande kommt. Es ist dann meistens eine reine Wissensvermittlung, da das Thema sehr umfangreich ist und an einem Tag nicht vollständig abgedeckt werden kann. Deswegen bieten wir ein Modulares Schulungskonzept an, das fünf Tage dauert, von Montag bis Freitag. Am ersten Tag behandeln wir das Thema Legislative: Was ist Sekundärrecht, was ist eine Norm, was sind harmonisierte Normen und welche Vorteile bieten diese im Vergleich zu nicht harmonisierten? Eine wichtige Frage ist auch, was passiert, wenn ein Roboter-System schon existiert und ich Veränderungen vornehmen möchte. Wann ist es eine sogenannte wesentliche Veränderung? Am zweiten Tag, primär ein Dienstag behandeln wir dann Risiko-Beurteilungen. Es gibt einen etwa 90-minütigen Vortrag, und dann geht es in den Workshop-Teil, bei dem jeder für sich selbst Risiken entdecken muss. Es gibt verschiedene Gefährdungsgruppen wie mechanische, elektrische, ergonomische Gefährdungen und viele mehr. Jeder sucht dann 2-3 Risiken und arbeitet sie aus. Es gibt auch Gruppenarbeiten, bei denen die Gruppen vom Trainer vorgegeben werden. Dabei werden zum Beispiel mechanische Gefährdungen nicht mehr bearbeitet, da diese durch die Bewegung des Roboters einfach zu erkennen sind. Der Fokus liegt aber auch verstärkt auf Ergonomie und anderen Bereichen wie etwa Risiken durch Stromquellen beim Schweißen. Es gibt auch einen "Share-Part", bei dem die Gruppen ihre Ergebnisse präsentieren. Beim Sicherheitskonzept geht es darum, die besten Lösungsansätze zu finden, die die Sicherheit verbessern. Die Usability muss immer im Vordergrund stehen, da Sicherheit eine Barriere sein kann, die das System in der Benutzung einschränkt.

Soleman Haj Bakour: Wer besucht normalerweise die Schulungen oder das Training?

Kevin Nikolai: Das ist tatsächlich sehr unterschiedlich. Primär sind es Konstrukteure aus dem Maschinenbau, Elektrokonstrukteure und auch Techniker für Inbetriebnahmen. Ab und zu auch Personen aus dem Projektmanagement, wenn sie sich auch technisch interessieren oder in kleineren Unternehmen tätig sind, wo sie eine breitere Rolle übernehmen. Es gibt auch spezielle Kurse für Führungskräfte wie CEOs und CTOs, um das "Spirit of Safety" von oben nach unten in der Organisation zu verbreiten.

Soleman Haj Bakour: Die Welt von Maschinen und Robotern entwickelt sich ja immer weiter. Deshalb gehe ich davon aus, dass es auch Auffrischungen der Schulungen oder Informationen gibt. Was würdest du sagen, wie oft sollte man eine Auffrischung machen, oder ist es nur ausreichend, etwas zu lesen? Gibt es auch neue Kurse?

Kevin Nikolai: Es gibt tatsächlich eine Herausforderung, vor allem durch die neue Maschinenverordnung, die am 29. Juni 2023 in Kraft trat. Ab dem 20. Januar 2027 gelten neue Anforderungen zu IT- und OT-Security. Maschinen, die mit Netzwerken verbunden sind, müssen gegen mögliche Angriffe geschützt werden, damit Hacker nicht in die Systeme eindringen können, besonders in sicherheitskritischen Bereichen wie der Energie- oder Wasserversorgung. Daher braucht man neue Kurse, um die Unterschiede zwischen alten und neuen Sicherheitsanforderungen herauszuarbeiten. Das ist auch meine Aufgabe, zum Beispiel mit den Änderungen durch den Brexit, der Großbritannien aus dem europäischen Gesetzesrahmen herausführt. Diese Unterschiede werden in speziellen Kursen behandelt.

Soleman Haj Bakour: Du hast Cybersecurity erwähnt. Einige Experten sagen, dass Baustellen nicht unbedingt ein Risiko für Cyberangriffe darstellen, weil sie nicht mit externen Netzwerken verbunden sind. Siehst du das auch so, oder sollte man auch dort Wert auf Cybersecurity legen?

Kevin Nikolai: Laut der Maschinenverordnung müssen wir uns vor Korruption schützen. Das bedeutet nicht nur, dass jemand extern auf die Maschinen zugreifen kann, sondern auch, dass jemand vor Ort, etwa durch USB-Ports oder ETH-Ports, in das System eindringen könnte.

Die funktionale Sicherheit, also die Sensorik und Steuerung der Maschinen, muss vor Manipulationen geschützt werden. Oft haben Maschinen vor Ort Ports, über die Manipulationen möglich sind. Deshalb ist Cybersecurity auch für Baustellen wichtig, um zu verhindern, dass Schutzmechanismen ausgeschaltet werden. Das Risiko hängt immer vom Maschinen-Typ und der spezifischen Anwendung ab. Es muss immer eine Risikoanalyse gemacht werden, um die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadenspotenzial zu bewerten.

Soleman Haj Bakour: Das bedeutet also, wie du vorhin mit den Sensoren gesagt hast: Wenn es Fehler gibt, gibt es immer ein Restrisiko. Wie hoch das ist, hängt davon ab, und man könnte auch den Wert schätzen.

Kevin Nikolai: Ja, du hast die zwei Themen angesprochen, die als Hilfestellung dienen. Der aktuelle Stand der Technik ist nach wie vor im Entwurf, aber du kannst den Entwurf bereits herunterladen. Die ISO TS 15066, die du angesprochen hast, behandelt die mechanischen Kraftgrenzwerte und ist mittlerweile in diese Norm integriert worden, vor allem für kollaborative Systeme. Wenn man dieser Norm folgt, kann man dem System vertrauen, es ist funktional sicher. Diese Leistungsniveaus sind festgelegt. Zum Beispiel gibt es das höchste Leistungsniveau „Emil“ (E), das bedeutet, dass das System in der Lage ist, Fehler zu erkennen und sicher zu handeln. PLd ist fast das höchste, übertroffen wird es durch das PLe. Das System kann Fehler sicherheitsgerichtet erkennen und sicher anhalten. Die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler im System ist sehr gering, wenn es nach dieser Norm entwickelt wurde, und solche Systeme kann man vertrauen.

Soleman Haj Bakour: Wenn wir wieder auf das Thema Schulungen zurückkommen, spricht man bei uns oft von einem „Operator“ des Roboters oder einem Helfer. Denkst du, dass die Einführung von Robotern auf Baustellen neue Rollen mit sich bringen wird? Welche könnten das aus deiner Erfahrung sein?

Kevin Nikolai: Ich denke, für jemanden, der zum ersten Mal mit Robotern zu tun hat, gibt es zwei Perspektiven. Viele Leute sind zunächst skeptisch, weil sie Angst haben, dass der Roboter ihre Arbeit ersetzt. Wenn jemand aber ein hohes Skillset hat, wie ein guter Fliesenleger, der vielleicht immer wieder dieselben monotonen Aufgaben erledigt, könnte der Roboter ihm dabei helfen. Der Fliesenleger kann sich dann auf kreativere Aufgaben konzentrieren, was zu einer Akzeptanz des Roboters führt. Wenn der Roboter die wiederkehrenden Aufgaben übernimmt, kann sich der Arbeiter auf die anspruchsvolleren Dinge konzentrieren, die er eigentlich gerne macht. Der Roboter wird dann zur „Hilfskraft“, die die monotone Arbeit übernimmt. Das habe ich selbst bei Schweißern erlebt: Statt immer die gleiche Naht zu schweißen, konnte der Roboter diese Routinearbeit übernehmen, und der Schweißer konnte mich auf komplexere Aufgaben konzentrieren.

Soleman Haj Bakour: Ich habe mich mit einigen Berufen beschäftigt und dabei die ISO 45003 gefunden. Diese Norm beschäftigt sich mit der Psychologie der Arbeiter und deren Risiken, die sowohl extern als auch intern sein können. Arbeitsmittel sind ein Beispiel für diese Risiken. Ich frage mich, ob Schulungen helfen können, das Vertrauen zu stärken und Ängste zu verringern. Was denkst du darüber?

Kevin Nikolai: Ja, das ist ein sehr wichtiger Punkt. Die Person, die die Schulung gibt, sollte glaubwürdig sein. Wenn die Teilnehmer Vertrauen in den Trainer haben, wird die Schulung erfolgreicher sein. Es geht nicht nur darum, das Thema zu vermitteln, sondern auch um die zwischenmenschliche Beziehung. Ich glaube, es ist wichtig, den Leuten klarzumachen, warum der Roboter eingesetzt wird. Wir haben einen demographischen Wandel, immer weniger Menschen sind in der Lage, die Arbeit zu leisten, und das Unternehmen muss wettbewerbsfähig bleiben. Roboter sollen nicht den Menschen ersetzen, sondern als Erweiterung des Menschen dienen. Das ist entscheidend, um die Arbeitsplätze zu sichern.

Wenn die Leute verstehen, dass es um die Zukunft des Unternehmens geht, steigt die Akzeptanz. Ein einfacher Arbeiter könnte durch die Weiterbildung zum Roboterprogrammierer sogar ein höheres Gehalt erzielen, weil dieser Job technisch anspruchsvoller ist.

Soleman Haj Bakour: Selbstverwirklichung.

Kevin Nikolai: Genau.

Soleman Haj Bakour: Ich habe gelesen, dass niedrigqualifizierte Arbeiter stärker beeinflusst werden. Wie du gesagt hast, ist es wichtig, Roboter zu haben, um die Arbeit effizienter zu gestalten. Unternehmen müssen sich weiterentwickeln, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Aber ich denke, es ist auch wichtig, dass der Mensch sich weiterentwickelt – egal, ob er ein „einfacher Baustellenarbeiter“ ist oder nicht. Es ist das Problem, das ich in meiner Diplomarbeit formulieren möchte: Der Mensch muss sich weiterentwickeln, sonst bleibt er zurück.

Kevin Nikolai: Du bist ein gutes Beispiel für gelungene Integration. Du bist aus Syrien geflüchtet, hast die Sprache gelernt und bist jetzt studentischer Mitarbeiter. Du kannst Menschen, besonders einfache Baustellenarbeiter, sehr gut erreichen. Wenn jemand wie du, der diese Reise gemacht hat, von Veränderungen spricht, wird das viel glaubwürdiger. Es ist einfacher, Akzeptanz zu schaffen, wenn du aus eigener Erfahrung sprichst.

Soleman Haj Bakour: Hast du bemerkt, dass die Akzeptanz bei bestimmten Arbeitern schwierig ist? Liegt das am Alter oder an anderen Faktoren?

Kevin Nikolai: Ja, das kommt vor. Wenn jemand schon sehr lange in seinem Beruf arbeitet und dann ein junger Kollege kommt, der die Führung übernimmt, ist die Akzeptanz schwieriger. Gerade bei älteren Mitarbeitern, die schon sehr viel Erfahrung haben, ist der Wandel oft schwer. Aber das bedeutet nicht, dass sie nicht auch innovativ sein können. Ich habe zum Beispiel auch einen älteren Kollegen, der sehr innovativ ist. Es hängt vom Einzelnen ab, aber Veränderung ist für ältere Mitarbeiter oft eine größere Herausforderung.

Soleman Haj Bakour: Und die Arbeit, die diese Schulungen oder Trainings machen sollten, die sollten Sie übernehmen, oder gibt es bestimmte Anforderungen oder Kompetenzen, die die Personen haben müssen, oder kann im Prinzip jeder daran teilnehmen?

Kevin Nikolai: Also prinzipiell glaube ich, dass es keine Rolle spielt, ob man maturiert oder studiert hat. Ich habe es selbst nicht gemacht und probiere immer noch viel aus. Aber die wichtigste Voraussetzung ist die Sprache. Die Basis der Kommunikation muss natürlich stimmen, das heißt, die Person, die mir gegenübersteht, muss ein gewisses Verständnis für das Thema haben. Es geht um ein Grundvokabular, also ein Verständnis dafür, was jemand anderes mir erklärt. In Workshops will man ja auch mit Papier und Stift arbeiten, um das Verständnis zu fördern. Wichtig ist, dass die Person sich einbringt und aktiv mitmacht, und nicht einfach nur das Training absitzt. Ich glaube, das ist die Mindestvoraussetzung, um die Leute gut abzuholen. Ich persönlich denke auch, dass es keine Rolle spielt, ob jemand keinen Schulabschluss hat oder viel Wissen mitbringt. Wichtig ist das Interesse am Thema, die Kommunikation und dass man den anderen Menschen erreicht. Wenn das vorhanden ist, kann man viel erreichen.

Soleman Haj Bakour: Dann gibt es auf jeden Fall auch noch das Thema Produktivität. Robotertechnologie verspricht viel. Am Anfang gibt es oft diese Versprechen, dass sie Zeit und Kosten gleichzeitig verbessern können. Wir haben an der Uni etwas über das „magische Dreieck“ gelernt, vielleicht kennst du das auch, aber vermutlich unter einem anderen Zusammenhang. Das „magische Dreieck“ hat drei Ecken: Qualität, Kosten und Zeit. Wir haben gelernt, dass die Digitalisierung eine Lösung für dieses Problem bieten kann. Roboter bringen ebenfalls das Versprechen mit, diese drei Punkte vom magischen Dreieck zu verbessern. Siehst du das auch so? Glaubst du, dass Roboter gleichzeitig die Zeit und die Qualität verbessern können?

Kevin Nikolai: Ja, ich denke, das ist tatsächlich möglich. Es kommt natürlich immer darauf an, was man unter Qualität versteht. Man muss nicht zwangsläufig langsamer sein. Mit Automatisierung ist es durchaus möglich, in einem sehr schnellen Zyklus qualitativ hochwertige Geräte zu produzieren, wie es bei Handys oder Uhren der Fall ist. Die Produktion muss schnell sein, um eine große Menge des Marktes zu bedienen, aber es wird trotzdem hohe Qualität in Bezug auf Verarbeitung und Materialien erreicht. Das muss man nicht ausschließen. Die Herausforderung bei Robotern ist jedoch oft der Kostenfaktor. Wenn man in unstrukturierten Umgebungen arbeitet, ist es schwierig, die Kosten zu kontrollieren. Roboter müssen oft an die Umgebung angepasst werden, was zusätzliche Kosten verursacht. Auch die Technik, also Programmierung und Wartung, sind nicht billig. Aber die Frage, die wir uns stellen müssen, ist auch, wie sicher Roboter sind, wenn man sie mit KI ausstattet. Wenn der Roboter autonom fährt, wie sicher sind dann die Systeme? Könnte er seine Sicherheitsvorkehrungen ändern? Das Thema wird wieder komplex, vor allem mit Blick auf die potenziellen Risiken, die auftreten könnten. Man kann sich fast Szenarien wie in „iRobot“ oder „Terminator“ vorstellen, wo die Maschinen anfangen, unvorhersehbar zu handeln. Und diese Unsicherheiten könnten die Kosten weiter steigern. Es ist ein spannendes Thema, aber es bleibt eine Herausforderung.

Soleman Haj Bakour: Glaubst du, dass das Thema KI und Robotik auch mit der Kultur zu tun hat? Zum Beispiel wird in Japan Robotik ganz anders dargestellt als in westlichen Filmen wie „Terminator“ oder „iRobot“. Hat diese kulturelle Perspektive einen Einfluss darauf, wie wir Roboter wahrnehmen?

Kevin Nikolai: Ja, definitiv. Es hat einen kulturellen Einfluss. Japan hat eine andere Haltung zu Robotern, und das sieht man auch in ihren Filmen und der allgemeinen Kultur. Japaner sind in der Regel Pazifisten und versuchen, sich aus globalen Konflikten herauszuhalten. In westlichen Kulturen, vor allem im radikalen Kontext, gibt es dagegen oft Ängste und Skepsis gegenüber Robotern und KI. Das führt dazu, dass Roboter in westlichen Filmen oft als Bedrohung dargestellt werden. Es ist ein Spannungsfeld, das sowohl kulturell als auch politisch bedingt ist. Und in Bezug auf die Sicherheit gibt es natürlich auch Bedenken, wie sich Roboter in bestimmten Umfeldern verhalten könnten.

Soleman Haj Bakour: Wie wirken sich Sicherheitsmaßnahmen auf die Produktivität aus? Was sind deine Erfahrungen – steigern oder senken Sicherheitsmaßnahmen die Produktivität?

Kevin Nikolai: Sicherheitsmaßnahmen können die Produktivität in erster Linie verringern. Wenn sich eine Person einem Roboter oder einer Maschine nähert, bleibt diese stehen. Während des Stillstands arbeitet die Maschine natürlich nicht, was die Produktivität sinken lässt. Langfristig gesehen könnte sich diese Situation jedoch ausgleichen. Roboter können auch dazu beitragen, dass Menschen komplexere Aufgaben übernehmen und so die Gesamtproduktivität des Unternehmens gesteigert wird. Es könnte also eine Verbesserung geben, wenn der Mensch weniger mit repetitiven, physischen Aufgaben beschäftigt ist. Wenn der Roboter gefährliche oder schwere Arbeit übernimmt, könnte der Mensch produktiver werden, indem er sich auf andere, kreative Aufgaben konzentriert. Insgesamt könnte dies die Produktivität des Unternehmens steigern, da die Menschen länger arbeiten können, ohne sich körperlich zu überlasten. Sicherheitsmaßnahmen sorgen dafür, dass der Mensch nicht gefährdet wird, und das kann die langfristige Produktivität fördern.

Soleman Haj Bakour: Vielleicht könnte man in diesem Zusammenhang auch das Mindset ändern und Produktivität anders definieren. Produktivität bedeutet vielleicht nicht nur Output oder die Anzahl produzierter Produkte, sondern auch, wie gesund und effizient jemand arbeitet. Wenn der Roboter schwere Arbeiten übernimmt, bin ich am Ende des Tages produktiver als wenn ich diese Arbeit selbst gemacht hätte. Auch wenn ich in der Firma nicht direkt produktiver bin, könnte ich in anderen Bereichen, zum Beispiel zu Hause oder in meiner Freizeit, produktiver sein.

Kevin Nikolai: Genau, vor allem bei schweren Arbeiten auf Baustellen. Mit zunehmendem Alter nimmt die Muskulatur ab und die Regeneration wird langsamer. Wenn Roboter diese schwere Arbeit übernehmen, können die Arbeiter länger produktiv bleiben, ohne sich körperlich zu überlasten. Das steigert nicht nur die Produktivität im Unternehmen, sondern auch im Privatleben. Wenn es den Menschen gut geht, sind sie auch in der Arbeit motivierter und damit produktiver. Unternehmen sollten diesen Zusammenhang erkennen, denn die Produktivität ist nicht nur auf die Arbeit im Betrieb begrenzt, sondern wirkt sich auch auf das gesamte Wohlbefinden aus.

Soleman Haj Bakour: Jetzt geht es um den Einfluss von Schulungen auf die Aktivität. Das haben wir auf jeden Fall schon gesagt. Sicherheitsmaßnahmen und Produktivität stehen irgendwie gegeneinander. Wie kann ich den Unterschied dazwischen, dieses Loch, ein bisschen reduzieren? Was könnte man da machen?

Kevin Nikolai: Also, meiner Meinung nach geht das fast nur durch Schulung. Sicherheitsmaßnahmen müssen natürlich immer sinnvoll gestaltet werden. Es geht nicht darum, Maßnahmen zu treffen, die keinen weiterbringen. Sicherheitsmaßnahmen sollten auch nie dazu führen, dass sie so strikt sind, dass sie Menschen in ihrer Arbeit zu stark einschränken. Wenn man Maßnahmen so auslegt, dass sie in letzter Instanz vielleicht die letzte Restwahrscheinlichkeit noch eliminieren, dann führt das zu einem falschen Ansatz. Wir versuchen das in unseren Schulungen zu vermitteln. Wenn wir eine Risikoanalyse durchführen und einen Multiplikationswert erhalten, der zum Beispiel 1500 ergibt, dann sagen wir immer, dass Sicherheitsmaßnahmen nicht null sein sollten. Es muss immer eine gewisse Restwahrscheinlichkeit und ein gewisses Restrisiko bestehen bleiben, damit Menschen in ihrem natürlichen Handeln nicht zu sehr eingeschränkt werden. Wenn wir das zu stark regulieren, wird entweder die Sicherheitsmaßnahme manipuliert oder komplett ignoriert. Das geht den Menschen irgendwann einfach am Allerwertesten vorbei. Ich denke, die größte Herausforderung ist, wie man diese Maßnahmen so gestaltet und gleichzeitig Schulungen anbietet, damit die Menschen, die sie umsetzen und einhalten sollen, verstehen, warum diese Maßnahmen wichtig sind, ohne die Produktivität zu stark einzuschränken. Ich glaube, der Schutz des Menschen ist wichtig, aber es ist auch entscheidend, die Barrieren, die vermeintlich durch Sicherheitsmaßnahmen entstehen, aufzulösen. Ein gutes Beispiel ist der Gehörschutz. Wenn ich Gehörschutz trage, wird meine Produktivität nicht wirklich beeinträchtigt, vielleicht wird die Kommunikation auf der Baustelle schlechter, aber es gibt ja auch Gehörschutz mit Funk, sodass man trotzdem kommunizieren kann. Das bedeutet, dass der Schutz des Menschen nicht seine Produktivität einschränken muss, wenn er gut umgesetzt ist.

Soleman Haj Bakour: Das stimmt. Das Beispiel zeigt es ganz gut. Wenn ich etwas immer wieder tue, wird es irgendwann zur Routine, aber Fehler passieren trotzdem. Wenn ich nicht genug Erfahrung habe, ist das Risiko definitiv höher, aber auch bei Routine kann das Risiko bestehen. Siehst du das genauso oder ist es für dich absolut gleich?

Kevin Nikolai: Das sehe ich tatsächlich genauso. Ich komme aus der Robotik. Ich habe als Junior Consultant bei Pilz angefangen und mich bis zum Head of Training hochgearbeitet. In der Robotik habe ich viel Erfahrung mit Normen und Gesetzen, aber die Risiko-Wahrnehmung verändert sich je nach Kontext. Es gibt in Wikipedia einen sehr guten Abschnitt über Risiko-Management, der beschreibt, wie wichtig es ist, bei der Risikoanalyse und -minderung keine selektive Wahrnehmung zu entwickeln. Das passiert, weil unser Gehirn nicht alle Informationen verarbeiten kann. Es nimmt nur das auf, was für uns relevant erscheint. Wenn ich also stark im Bereich Robotik involviert bin, übersieht mein Gehirn möglicherweise Dinge, die für eine andere Anwendung sehr wichtig sein könnten. Diese selektive Wahrnehmung kann dazu führen, dass man wichtige Risiken übersieht. Bei Pilz haben wir ein Vier-Augen-Prinzip, um solche Fehler zu vermeiden. Wenn ein Kunde eine Risikoanalyse in Auftrag gibt, wird diese nie ohne eine zweite Meinung durchgeführt. Zwei verschiedene Experten überprüfen die Analyse aus verschiedenen Perspektiven, um Fehler zu vermeiden.

Soleman Haj Bakour: Ich komme auf meine letzte Frage zurück. Ich habe zu Beginn des letzten Themas über Produktivität im Zusammenhang mit dem "magischen Dreieck" in meiner Diplomarbeit gesprochen, und ich möchte ein bisschen außerhalb des Rahmens denken. Wir hatten Qualität, Kosten und Zeit. Wenn wir jetzt Roboter einbeziehen, haben wir vielleicht ein neues "magisches Dreieck", wobei Produktivität und Sicherheit die beiden Ecken sind. Was könnte die dritte Ecke sein? Für mich sind es immer noch Kosten. Siehst du das anders oder würdest du sagen, wir sollten uns von diesen Dreiecken entfernen?

Kevin Nikolai: Das hat auf jeden Fall Berechtigung. Wenn ich eine Idee habe oder in einem bestimmten Bereich tätig werden möchte, ist das Thema Ökonomie unvermeidlich. Kosten sind immer noch ein wichtiger Faktor. Der Punkt ist, die Kosten so niedrig wie möglich zu halten, damit eine Anwendung sinnvoll wird und nicht nur die Anbindung vorhanden ist, sondern der Nutzen auch tatsächlich da ist. Das bedeutet, die Anwendung muss genutzt werden und darf nicht nur entwickelt und dann ungenutzt in der Schublade verschwinden. Ich glaube, das Wichtigste ist, dass man nicht ein Produkt entwickelt, das 100 % perfekt ist, sondern besser, wenn es schon zu 85 oder 90 % ausgereift ist und dann auf den Markt geht, um den ersten Kontakt mit dem Markt zu haben, die Kosten zu Beginn gering zu halten und es zu etablieren. Kosten bleiben also immer ein Thema im Zusammenhang mit Qualität und Zeit. Und was deine letzte Frage betrifft, was ich gerne ändern würde: Ich bin auch sehr viel in Bildungseinrichtungen unterwegs, von der Mittelschule bis hin zu HTLs und Fachhochschulen. Es gibt eine pädagogische Hochschule in Niederösterreich, in der Kurse zur Maschinensicherheit und allgemeinen Sicherheit angeboten werden. Ich denke, es ist sehr wichtig, dass das Thema Automation und zukünftige Technologien, einschließlich Human-Robot Interaction (HRI), bereits in der Schulbildung und den weiterführenden Schulen angesprochen wird. Es muss eine breitere Akzeptanz und ein besseres Verständnis für Technologien wie Roboter geben. Besonders die Jugendlichen, die in das Berufsleben eintreten, sollten über Praktika oder durch ihre Ausbildung frühzeitig mit solchen Technologien in Berührung kommen. Europa hinkt da im Vergleich zu asiatischen Ländern wie China, Taiwan oder Japan hinterher, was den Fortschritt in der Robotik betrifft. Besonders regulative Hürden und Bürokratie bremsen uns hier. Ich wünsche mir, dass im Bildungssystem mehr Fokus auf diese Themen gelegt wird. Roboter werden nicht dazu da sein, den Menschen zu ersetzen, sondern der Mensch, der keine KI oder Automatisierung nutzt, wird ersetzt. KI sollte als Partner gesehen werden, der den Menschen in seinem Arbeitsalltag unterstützt.

Soleman Haj Bakour: Das beantwortet eigentlich auch meine zweite Frage. Ich habe mal einen Artikel gelesen, in dem es um die Entwicklung von Robotern in China ging, insbesondere im Hinblick auf die Massenproduktion. China plant, ab 2025 Roboter in der Massenproduktion zu produzieren und bis 2027 auf dem Markt zu haben. Dabei ging es auch um Social Robots und nicht nur um Industrieroboter. Ich denke, es gibt hier auf jeden Fall einen politischen Aspekt, ähnlich wie bei E-Autos. Wir sollten den Fehler nicht wiederholen und zu spät mit der Forschung und Integration beginnen. Deshalb ist es wichtig, dass Automatisierung und Robotik ein Teil unseres Lebens und der Ausbildung werden. Du hast ja auch erwähnt, dass du viel unterwegs bist – wie siehst du die internationalen Unterschiede, besonders zwischen Europa, den USA und China, bezüglich der Integration von Robotern?

Kevin Nikolai: Meiner Meinung nach liegt es an der Regulierungsstruktur und Bürokratie. Ich habe viele deutsche Freunde, die selbstständig sind und berichten, wie komplex es ist, ein Unternehmen zu führen. Die vielen Dokumentationspflichten beschränken die produktive Zeit, die sie auf das Vorantreiben von Unternehmen und Technologien verwenden können. Wenn ich mir die asiatischen und amerikanischen Märkte anschau, ist es dort viel einfacher, ein Unternehmen zu gründen oder ein Startup zu starten. In Europa, und besonders in Deutschland, gibt es viele künstliche Hürden, die den Fortschritt hemmen. Diese Hürden und die Bürokratie führen dazu, dass viele kluge Köpfe nach Asien oder Amerika auswandern.

Wenn Europa nicht bald ein Kompetenzzentrum für diese Technologien entwickelt, wird es von anderen Ländern überholt. Besonders in Europa, wenn man sieht, wie schwierig es ist, Innovationen ohne massive bürokratische Hürden umzusetzen, verliert man schnell den Anschluss.

Soleman Haj Bakour: Ich habe mal einen Satz in einem Buch gelesen, der mir im Kopf geblieben ist: „Roboter verbreiten sich, ob man es mag oder nicht, und wir brauchen einfach nur den Mut, sie einzusetzen.“ Und ich glaube, dass der Staat hier auch Mut zeigen sollte, um solche Innovationen zu fördern. Er sollte einfach Entscheidungen treffen, um neue Technologien wie Robotik zu unterstützen. Und das ist aus meiner Sicht sehr wichtig. Meine letzte Frage: Wie siehst du die Entwicklung von Robotik in den nächsten fünf bis zehn Jahren?

Kevin Nikolai: Ich glaube, dass Robotik exponentiell zunehmen wird, weil immer mehr Menschen umdenken. Wenn man den politischen Wandel in Europa betrachtet, versuchen viele Staaten, ihre Wirtschaft zu stärken und Reformen durchzuführen, um wieder mehr Investoren ins Land zu holen. Diese Reformen sind notwendig, um die Grundlage für eine bessere wirtschaftliche Zukunft zu schaffen. Ich kann mir gut vorstellen, dass Robotik aufgrund des demografischen Wandels und des zunehmenden Wohlstands in Ländern wie Indien und China, wo es eine große Motivation gibt, das Leben zu verbessern, weltweit weiter an Bedeutung gewinnt. In Europa hingegen ist die Bereitschaft für solche Veränderungen oft noch nicht so stark ausgeprägt, was dazu führen könnte, dass wir in Europa hinter anderen Ländern zurückbleiben. Das Thema Robotik wird vor allem in Bereichen wie Service-Robotik explodieren, besonders bei einfachen und monotonen Tätigkeiten, die immer schwieriger mit menschlicher Arbeit zu bewältigen sind. Das wird meiner Meinung nach ein großer Bereich der Robotik in der Zukunft.

Soleman Haj Bakour: Das bringt mich zu einer weiteren Frage, die ich kürzlich in einem Artikel über Roboter in China gelesen habe. In dem Artikel wurde beschrieben, dass China ab 2025 Roboter in der Massenproduktion einsetzen will, mit dem Ziel, diese Roboter bis 2027 auf den Markt zu bringen. Dabei ging es vor allem um Service-Roboter und nicht unbedingt um Industrieroboter. Ich denke, das könnte auch politische Auswirkungen haben, ähnlich wie bei der Entwicklung von Elektroautos. Vielleicht sollten wir nicht den Fehler wiederholen, Technologien zu spät zu integrieren und zu spät zu forschen. Deswegen könnte es sinnvoll sein, Robotik als Teil unseres Lebens und unserer Ausbildung zu betrachten. Was denkst du darüber, auch im internationalen Vergleich, beispielsweise zwischen Europa, den USA und China?

Kevin Nikolai: In meinen Augen gibt es große Unterschiede, besonders aufgrund der Bürokratie und der Regulierung. In vielen europäischen Ländern, wie auch in Deutschland, ist es für Unternehmen schwierig, sich selbstständig zu machen oder schnell zu wachsen, da sie viel Zeit mit administrativen Aufgaben verbringen müssen. In asiatischen Ländern und den USA ist es viel einfacher, ein Unternehmen zu gründen und schnell von Investoren oder staatlichen Subventionen zu profitieren. In Europa gibt es diese Unterstützung nicht in gleichem Maße. Das hindert uns daran, ein wettbewerbsfähiges Kompetenzzentrum für neue Technologien zu entwickeln, wodurch diese Technologien möglicherweise leichter in anderen Ländern umgesetzt werden, während wir in Europa ins Hintertreffen geraten. Wenn wir das nicht ändern, werden möglicherweise kluge Köpfe aus Europa abwandern und die technologische Entwicklung in Europa weiter ausbremsen.

Soleman Haj Bakour: Vielen Dank für deine Zeit und die vielen wertvollen Informationen. Das wird definitiv in meine Diplomarbeit einfließen. Es war sehr aufschlussreich, mit dir zu sprechen.

B.5 Expert Interview - Herbert Meister

Transcript: Expert Interview Herbert

Soleman Haj Bakour: Hallo Herbert, also wir kennen uns ja jetzt schon etwas besser als die anderen Experten, die ich bisher interviewt habe. Dennoch möchte ich mit einer kurzen Vorstellung starten. Könntest du uns etwas über deine Erfahrung im Bauwesen erzählen? Und hast du bereits Erfahrungen mit Robotik gemacht?

Herbert Meister: Ich habe zuerst an der HTL Mödling Tiefbau gelernt und anschließend Bauingenieurwesen studiert. Seit Februar 1998 arbeite ich bei der PORR – also mittlerweile seit 27 Jahren. Mit Robotik selbst hatte ich bisher noch keine direkte Erfahrung. Ich kenne das Thema nur aus Vorträgen an der TU Graz und der TU Wien. Dabei ging es meist um theoretische Aspekte. Auf der Baustelle habe ich den Einsatz von Robotern bisher nicht live erlebt – ich kenne es also nur aus Beobachtungen bei anderen Branchen und Präsentationen.

Soleman Haj Bakour: Gab es in diesen Vorträgen etwas, das dich besonders fasziniert hat? Oder was interessiert dich generell an Robotik?

Herbert Meister: Was ich spannend finde, ist, dass in anderen Branchen Robotik schon viel intensiver eingesetzt wird. Gerade in der Industrie sieht man das häufig. Nehmen wir zum Beispiel die Herstellung von Schalungen – da gibt es unglaublich viele Maschinen und auch Roboter. Natürlich hängt es davon ab, wie genau man den Begriff „Roboter“ definiert. Aber wenn wir davon ausgehen, dass ein Roboter sich in mehreren Achsen bewegt, immer wiederkehrende Prozesse ausführt und dabei eigene Kontrollmechanismen besitzt, dann sehen wir das in der Industrie häufig.

Ein gutes Beispiel ist Doka. Dort gibt es Schweißroboter, die Stahlträger bearbeiten. Die Rohmaterialien werden eingelegt, und am Ende kommt eine fertig geschweißte Stahlstütze heraus. Faszinierend dabei ist, dass kaum noch Menschen direkt Hand anlegen. Stattdessen übernehmen sie nur noch die Qualitätssicherung und die Logistik.

Ich habe mich oft gefragt: Warum werden solche Maschinen eigentlich nicht auf der Baustelle eingesetzt? Der Grund liegt vermutlich darin, dass die Bauindustrie eine sehr konservative Branche ist. Viele Bauleiter sehen ihre Projekte als Abenteuer – jedes Bauprojekt ist einzigartig, abhängig von Witterung, Standort und vielen anderen Faktoren. Das unterscheidet die Bauindustrie stark von der Industrieproduktion, wo die Prozesse standardisiert und wiederholbar sind.

Soleman Haj Bakour: Vielleicht ist es inzwischen sogar notwendig, Robotik im Bauwesen stärker zu nutzen. Gründe dafür könnten der Fachkräftemangel und die technologische Entwicklung sein. Große Bauunternehmen müssen wettbewerbsfähig bleiben, und neue Technologien könnten hier ein entscheidender Faktor sein. Aber wir wissen auch, dass der Einsatz von Robotern auf Baustellen noch relativ neu ist. Es gibt erste Beispiele, wie Walter von Wienerberger oder Doka, aber es bleibt eine offene Frage, welche Risiken die direkte und indirekte Interaktion mit Robotern auf Baustellen mit sich bringt. Was denkst du darüber?

Herbert Meister: Bevor ich darauf eingehe, könntest du kurz definieren, was du unter direkter und indirekter Interaktion verstehst?

Soleman Haj Bakour: Klar. Direkte Interaktion bedeutet, dass der Abstand zwischen Mensch und Roboter sehr gering ist – sie arbeiten möglicherweise sogar am selben Ort und an derselben Aufgabe. Indirekte Interaktion wäre zum Beispiel, wenn ich mich auf der Baustelle befinde, aber nicht direkt mit dem Roboter arbeite.

Herbert Meister: Verstehe. Die Risiken hängen stark vom Einsatzbereich ab – ob ein Roboter im Rohbau oder im Innenausbau eingesetzt wird, macht einen großen Unterschied. Im Innenausbau gibt es oft geschützte Bereiche, Schutzvorrichtungen an Fenstern oder Absturzkanten, was die Sicherheitsmaßnahmen erleichtert. Im Rohbau hingegen ist die Situation viel dynamischer. Schutzgeländer werden gebaut und abgebaut, je nach Baufortschritt. Es gibt ständig offene Absturzkanten oder provisorische Aufstiege.

Hier stellt sich die Frage: Kann ein Roboter so programmiert werden, dass er nicht nur seine eigene Sicherheit gewährleistet, sondern auch Rücksicht auf andere Bauarbeiter nimmt? Was passiert, wenn ein Mensch einem Roboter ausweicht und dabei selbst in eine gefährliche Situation gerät? Könnte der Roboter unabsichtlich eine Bewegung ausführen, die jemanden zum Stolpern oder Stürzen bringt? Das sind große Herausforderungen.

Soleman Haj Bakour: Genau. Es gibt bereits Sicherheitsnormen für Maschinen, zum Beispiel die ISO 10218 für Industrieroboter. Aber diese Normen sind auf standardisierte Umgebungen ausgerichtet, nicht auf die dynamische Umgebung einer Baustelle. Denkst du, dass es eine neue Norm speziell für Bauroboter braucht?

Herbert Meister: Ich kenne die Bauarbeiterschutzverordnung sehr gut. In der Industrie gelten jedoch andere Regeln, da Produktionsstätten statische Umgebungen sind. Dort gibt es feste Sicherheitsbereiche, klare Abtrennungen zwischen Menschen und Maschine. In einer Fabrik bleibt die Umgebung konstant, während sich auf einer Baustelle ständig alles verändert. Es gibt keine fixen Sicherheitsbereiche – ein Kran oder eine Kreissäge kann plötzlich woanders stehen. Deshalb wird es sicherlich eine große Herausforderung, eine allgemeingültige Sicherheitsnorm für Baustellenroboter zu entwickeln.

Soleman Haj Bakour: Genau das ist der Punkt. In einer Fabrik ist die Umgebung kontrollierbar und vorhersehbar. Auf einer Baustelle haben wir dagegen ständig wechselnde Bedingungen.

Herbert Meister: Ja, in der Produktion wird extrem viel Zeit in die Planung investiert – nicht nur für Effizienz, sondern auch für Sicherheit und Qualität. Auf Baustellen gibt es zwar ebenfalls Planungen, aber diese können nur einen kleinen Teil der möglichen Situationen abdecken. In der Realität gibt es ständig unvorhergesehene Änderungen.

Soleman Haj Bakour: Stimmt. Wir haben im Bauwesen Sicherheitsmaßnahmen wie Schutzabstände oder Absperrungen. Glaubst du, es gibt eine Möglichkeit, diese Regeln mit den Sicherheitsstandards aus der Industrie zu kombinieren?

Herbert Meister: Wenn Mensch und Roboter direkt zusammenarbeiten, muss der Roboter mindestens genauso zuverlässig sein wie ein menschlicher Arbeiter. Das ist aber nicht so einfach – auf einer Baustelle arbeiten oft Hunderte von Menschen zusammen, und sie müssen alle so agieren, dass sie sich nicht gegenseitig gefährden. Die Frage ist: Dürfen wir einem Roboter dieselben Fehler erlauben wie einem Menschen? Wenn ein Arbeiter einen Fehler macht und ein Unfall passiert, gibt es eine klare Haftung. Wie wäre das bei einem Roboter? Wer trägt die Verantwortung, wenn es zu einem Schaden kommt? Das sind juristische Fragen, die geklärt werden müssen.

Soleman Haj Bakour: In meiner bisherigen Forschung habe ich versucht, Sicherheitsnormen aus der Maschinenrichtlinie auf Bauroboter anzuwenden. Ich habe mir zum Beispiel Sicherheitsvorgaben für Bagger angesehen – sie haben ebenfalls bewegliche Arme, ähnlich wie viele Bauroboter. Aber ich denke, dass letztendlich Praxiserfahrungen notwendig sind, um sinnvolle Sicherheitsmaßnahmen zu definieren. Würdest du sagen, dass die Sicherheit eher von der Technologie oder vom Menschen abhängt?

Herbert Meister: Beides spielt eine Rolle. Technologie kann Sicherheit verbessern, aber sie muss richtig angewendet werden. Letztendlich hängt viel davon ab, wie gut die Menschen mit den Robotern zusammenarbeiten und welche Regeln sie befolgen.

Wir sollten Roboter so ausstatten, dass sie mindestens so gut wahrnehmen wie ein Mensch – oder sogar besser. Es gibt bereits Autos, die ihre Umgebung erfassen, etwa durch Sensoren in den Seitenspiegeln, die anzeigen, wenn sich ein anderes Auto auf gleicher Höhe befindet. Wenn wir ähnliche Sicherheitsmaßnahmen für Roboter einbauen, könnten sie sicherer agieren als Menschen. Dabei geht es nicht nur darum, den Menschen vor Robotern zu schützen, sondern auch den Roboter selbst sowie andere Maschinen auf der Baustelle. Roboter sind teuer, und es wäre sinnvoll, sie ebenfalls vor Schäden zu bewahren. Wir müssen also überlegen, wie wir Schutzmechanismen für alle Beteiligten schaffen können.

Soleman Haj Bakour: Vielleicht könnte man die Zuverlässigkeit der Roboter durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) erhöhen. KI könnte es dem Roboter ermöglichen, Menschen in seiner Umgebung zu erkennen und entsprechend zu reagieren. Allerdings könnte es dabei Akzeptanzprobleme geben. Ich kann mir vorstellen, dass Bauarbeiter skeptischer gegenüber autonomen, KI-gesteuerten Robotern sind als gegenüber Robotern, die weiterhin menschliche Kontrolle benötigen.

Herbert Meister: Das Problem ist oft, dass Menschen Dinge ablehnen, die sie nicht vollständig verstehen. Das sieht man auch in der Natur: Der Mensch hatte ursprünglich Angst vor gefährlichen Tieren wie Wölfen, konnte sie aber domestizieren, sodass sie heute als Hunde an unserer Seite leben. Vielleicht ist das ein Modell für die Mensch-Roboter-Interaktion: Wenn wir lernen, mit Robotern umzugehen und sie kontrollieren zu können, könnte die Akzeptanz steigen. Ein Beispiel wäre ein Roboter, der so programmiert ist, dass er langsamer wird, sobald sich ein Mensch ihm zu sehr nähert. Nicht, weil der Mensch gefährdet ist, sondern weil der Roboter dann seine Leistung reduziert. Das könnte dazu führen, dass Arbeiter intuitiv verstehen, dass ein gewisser Abstand notwendig ist – nicht aus Angst vor einer Gefahr, sondern um den Roboter effizient arbeiten zu lassen.

Soleman Haj Bakour: Ja, das ist ein guter Ansatz. Langfristig wird die Erfahrung mit Robotern eine große Rolle spielen. Die Akzeptanz kommt durch Training, Schulungen und viele Testläufe unter verschiedenen Bedingungen. Bevor ein Roboter sicher mit Menschen zusammenarbeiten kann, müssen viele Tests durchgeführt werden – zum Beispiel bei unterschiedlichen Wetterbedingungen.

Ich denke auch, dass diese Entwicklung neue Berufe schaffen wird. In der Bauindustrie hört man zum ersten Mal von „Operatoren“, also Personen, die Roboter steuern und überwachen. Es könnte auch Helfer geben, die aus dem Baugewerbe kommen und einfache Aufgaben übernehmen, die noch manuell erledigt werden müssen, wie das Erstellen einer Sauberkeitsschicht.

Darüber hinaus könnte es spezialisierte Architekten geben, die Gebäude so planen, dass sie optimal für den Einsatz von Robotern geeignet sind – zum Beispiel mit langen, geraden Wänden oder ohne komplizierte Ecken.

Herbert Meister: Ja, wenn mehrere Roboter gleichzeitig auf der Baustelle arbeiten, wird es wahrscheinlich einen „Roboter-Koordinator“ brauchen. Diese Person müsste sicherstellen, dass verschiedene Roboter kompatibel sind und effizient zusammenarbeiten.

Ein weiteres großes Thema ist die Baustellenlogistik. Während sich Menschen selbst organisieren können, um Materialien und Werkzeuge zu holen, müssen wir überlegen, wie Roboter an das benötigte Material gelangen. Wenn ein Roboter beispielsweise dreimal so viel Material verarbeiten kann wie ein Mensch, dann müssen wir die gesamte Baustellenlogistik anpassen.

Das bedeutet, dass auch die Planung betroffen ist. Planer müssen künftig berücksichtigen, wie Roboter arbeiten, welche Geschwindigkeiten sie erreichen können und ob die Bauprozesse mit den Materialeigenschaften – etwa der Aushärtung von Beton – kompatibel sind. Das könnte dazu führen, dass sich sowohl die Planung als auch die Bauausführung grundlegend verändern.

Soleman Haj Bakour: Auf jeden Fall, aber ich denke, ein wichtiger Punkt, den du erwähnt hast, ist die Koordination mehrerer Roboter auf der Baustelle. Insbesondere, wie das Material zu ihnen kommt und wie das mit Sicherheitsaspekten verbunden ist. Ein Beispiel wäre die Reduzierung der Geschwindigkeit von Robotern aus Sicherheitsgründen. Das ist eine Herausforderung. In meiner Diplomarbeit habe ich zum Beispiel den Sicherheitsabstand für einen bestimmten Roboter berechnet. Es gibt Normen, die das regeln. Auf einer Baustelle könnte ein Sicherheitsabstand von 8 Metern erforderlich sein. Der Roboter selbst benötigt vielleicht nur 3 Meter, aber wenn sein Arm eine Reichweite von 4,5 bis 5 Metern hat, dann summiert sich das mit den 3 Metern auf 8 Meter.

Herbert Meister: Das bedeutet, dass der Roboter als Teil der Baustelleneinrichtung betrachtet werden müsste. Er wäre dann quasi ein Baustellengerät, das entsprechend in die Planung integriert werden muss.

Soleman Haj Bakour: Genau, das ist der Punkt. Nehmen wir als Beispiel den Schalungsroboter von Doka. Wenn dieser in der Nähe eines anderen Roboters, z. B. von Eisenberger, arbeitet, könnte es sein, dass der Sicherheitsabstand von 8 Metern gar nicht eingehalten werden kann. In einem geschlossenen Raum wird das noch schwieriger.

Herbert Meister: Und dann gibt es sogar Fälle, wo Roboter übereinander arbeiten, etwa wenn einer die Deckenschalung verlegt. Da stellt sich die Frage: Kann der Roboter bereits verlegte Schalungsteile weiterverarbeiten, obwohl die Gefahr besteht, dass er versehentlich gegen die Deckenkonstruktion fährt und sie umwirft?

Soleman Haj Bakour: Genau, das ist das Problem. Alles miteinander zu verknüpfen und es normgerecht zu gestalten, ist eine große Herausforderung. Aber ich denke, ein grundlegendes Risiko ist die menschliche Präsenz auf der Baustelle. Ich habe mehrfach gehört: Wenn wir eine wirklich sichere Baustelle wollen, dann müssten wir den Menschen dort entfernen. Der Mensch selbst ist der größte Risikofaktor. Was denkst du darüber?

Herbert Meister: Ich denke, es liegt in der Natur des Menschen, Fehler zu machen. Wir können gar nicht erwarten, dass Menschen fehlerfrei arbeiten. Der Mensch ist kreativ und individuell – jeder ist einzigartig. Man kann Menschen nicht einfach vergleichen. Maschinen hingegen sind standardisiert. Wenn wir 1.000 identische Roboter bauen, werden sie sich in ihrem Verhalten kaum unterscheiden. Menschen hingegen sind nicht berechenbar. Ein Mensch kann nur sich selbst kontrollieren, von außen kann das kaum gesteuert werden. Das macht den Menschen souverän, aber auch fehleranfällig. Menschen handeln nicht nur vernunftbasiert – wir sind wahrscheinlich mehr Homo Emotion als Homo Sapiens. Unsere Gefühle beeinflussen uns stark.

Soleman Haj Bakour: Und genau diese Emotionen entscheiden darüber, ob Menschen Roboter akzeptieren oder ablehnen. Das Wort „kontrollieren“ ist vielleicht nicht ganz passend, aber es geht darum, Menschen in Richtung Akzeptanz von Robotern zu orientieren. Wie kann man ein positives Gefühl gegenüber Robotern fördern – vor allem bei Menschen, die eher skeptisch sind?

Herbert Meister: Bei jeder Veränderung gibt es Befürworter und Gegner. Das ist ganz normal. Jede Veränderung bringt Vorteile für manche und Nachteile für andere. Die Akzeptanz hängt von den Gefühlen und Werten der Menschen ab.

Negative Gefühle sind oft mit Ängsten verbunden – zum Beispiel Angst um die eigene Sicherheit oder Gesundheit. Wenn wir Roboter so gestalten, dass sie Sicherheit und Gesundheit fördern, könnten wir Ängste abbauen.

Aber es gibt auch eine andere Angst: die Angst, den Job zu verlieren. Wenn Roboter produktiver, fehlerfreier und ohne Arbeitszeitgesetz arbeiten, kann das Druck auf Arbeitnehmer ausüben.

Dann stellt sich für sie die Frage: „Habe ich in fünf Jahren überhaupt noch einen Job?“

Planer haben vielleicht andere Sorgen. Sie müssen möglicherweise noch mehr Aspekte berücksichtigen, wodurch ihre Arbeit komplexer wird. Wer bezahlt sie dann für den zusätzlichen Aufwand? Die Bauunternehmen, die durch Roboter Arbeitskosten sparen, oder vielleicht der Bauherr? Jede Veränderung hat auch wirtschaftliche Auswirkungen.

Soleman Haj Bakour: Genau. Und manche Menschen wollen ihren Job einfach nicht verändern.

Herbert Meister: Das kann auch daran liegen, dass sie keine Perspektive sehen, wie ihr Job sich verbessern oder sie mehr verdienen könnten.

Soleman Haj Bakour: Ich bin bei der Formulierung meiner Diplomarbeit auf ein Problem gestoßen. Es gibt mehrere Quellen, die darauf hinweisen, dass insbesondere wenig erfahrene Mitarbeiter negativ von Robotern beeinflusst werden. In manchen Fällen kann das sogar zum Verlust des Arbeitsplatzes führen. Das liegt wahrscheinlich daran, dass Roboter bei bestimmten Aufgaben sehr effizient sind. Dennoch sind sie nicht universell einsetzbar. Die Frage ist, was passiert mit Menschen, die ihren Job nicht anpassen oder sich nicht weiterentwickeln wollen? Bedeutet das zwangsläufig, dass sie den Anschluss verlieren?

Herbert Meister: Das ist eine zentrale Frage. Unternehmen müssen überlegen, wo sie hinwollen. Wenn ein Bauunternehmen zum Beispiel Roboter für den Bau einsetzen will, muss es sich fragen: Was mache ich dann mit meinen bestehenden Mitarbeitern? Behalte ich sie? Setze ich sie anders ein? Automatisierung bringt zwangsläufig Veränderungen mit sich, und Veränderungen erzeugen oft Unsicherheit oder sogar Angst. Menschen empfinden Dinge, die sie nicht verstehen, als Bedrohung. Das ist wie ein Kind, das sich vor einem Monster in der dunklen Speisekammer fürchtet – sobald das Licht angeht, ist das Monster verschwunden. Verstehen wir eine Technologie, können wir sie auch nutzen.

Soleman Haj Bakour: Wenn wir über Gefühle in diesem Zusammenhang sprechen, dann ist es auch wichtig zu berücksichtigen, was Unternehmen mit betroffenen Mitarbeitern machen. Ein Beispiel: Eine Baufirma setzt einen Mauerroboter ein. Was passiert dann mit den Maurern? Die ISO-45003 befasst sich mit der psychischen Gesundheit am Arbeitsplatz. Unternehmen tragen eine gewisse Verantwortung, sich um das Wohlbefinden ihrer Mitarbeiter zu kümmern. Roboter fallen hier unter die Kategorie "Arbeitsmittel". Deshalb sehe ich es als Aufgabe der Unternehmen, Trainingsprogramme anzubieten, sodass Maurer beispielsweise zu Maschinen-Operatoren umgeschult werden. Sie könnten dann die Qualitätssicherung übernehmen. So bleiben qualifizierte Arbeitskräfte im Unternehmen, während einfache Hilfskräfte zunehmend ersetzt werden. Doch was passiert mit denen, die sich nicht weiterbilden wollen?

Herbert Meister: Hier stellt sich die Frage, ob Unternehmen wirklich für diese Entwicklung verantwortlich sind. Ist es nicht letztendlich die Aufgabe jedes Einzelnen, sich auf Veränderungen vorzubereiten? Wenn ein Job durch Automatisierung wegfällt, muss sich der betroffene Mensch die Fähigkeiten aneignen, um etwas anderes zu tun. Das ist eine ideologische Diskussion – nicht jeder sieht sich selbst in der Verantwortung, sich anzupassen.

Soleman Haj Bakour: Ich spüre das in meinem eigenen Leben. Man muss sich ständig weiterentwickeln, um mithalten zu können. Zum Beispiel wird heute im Bauwesen immer mehr Programmierwissen verlangt – vor zehn Jahren war das noch kein Thema. Wenn jemand diese Fähigkeiten nicht mitbringt, kann ich ihn in meinem Team nicht gebrauchen. Das ist der Druck der Leistungsgesellschaft.

Herbert Meister: Es gibt aber auch Grenzen. Maschinen können in Sekundenbruchteilen Tausende von Bildern analysieren, während das menschliche Auge nur eine begrenzte Menge an Informationen verarbeiten kann. Das Gleiche gilt für Hören, Sehen und Muskelkraft. Unser Gehirn ist begrenzt. Wenn wir uns zu sehr auf das Leistungsprinzip fixieren, treibt das Menschen in Burn-out oder psychische Erkrankungen. Die steigenden Zahlen solcher Erkrankungen zeigen, dass der Mensch nicht wie eine Maschine funktionieren kann.

Deshalb sollte die Arbeitsteilung so gestaltet sein, dass sich Menschen mit ihren Fähigkeiten ergänzen. Ein Bauingenieur muss nicht zwingend programmieren können, genauso wie ein Fliesenleger kein Architekt sein muss. Wir brauchen Spezialisierung und eine sinnvolle Aufgabenverteilung. Früher waren 90 % der Menschen in der Landwirtschaft tätig, heute sind es nur noch 3 %. Trotzdem gibt es keine 87 % Arbeitslose, sondern viele neue Berufe. Die Gesellschaft hat sich weiterentwickelt.

Ein weiteres Problem ist das Missverständnis über Multitasking. Viele glauben, dass das Gehirn mehrere Aufgaben gleichzeitig verarbeiten kann, aber das ist nicht der Fall. Stattdessen schaltet das Gehirn schnell zwischen den Aufgaben hin und her. Das kann auf Dauer krank machen.

Deshalb müssen Arbeitsumgebungen so gestaltet sein, dass sie menschenfreundlich bleiben. Systeme sollten auch menschliche Fehler zulassen und korrigieren, anstatt Perfektion zu verlangen. Denn letztendlich ist der Mensch kein Roboter.

Soleman Haj Bakour: Ja, auf jeden Fall. Ich sehe das als eine Herausforderung, besonders bei meinem Thema „Human-Robot Interaction“. Für mich persönlich ist es schwierig, Formulierungen zu finden.

Herbert Meister: Ich finde es gefährlich, sich selbst durch Meinungen oder Annahmen einzuschränken. Wenn es so kommt, dass Roboter künftig einfache Tätigkeiten übernehmen und Menschen diese nicht mehr ausführen, dann ist es umso wichtiger, den Menschen bewusst zu machen, dass jeder ein enormes Potenzial hat. Niemand ist zu 100 % ersetzbar. Man muss den Menschen frühzeitig bewusst machen, dass sie ihre Potenziale nutzen sollten.

Wir haben heute bereits das Problem, dass 300.000 Arbeitslose vorhanden sind, während es gleichzeitig viele offene Stellen gibt, die nicht besetzt werden können, weil diese Arbeitslosen nicht die passenden Qualifikationen haben. Das ist ein fundamentales Problem unserer Zeit. Wenn man sich die Entwicklung ansieht: Früher hatte jedes Einkaufszentrum Kassierer, heute gibt es immer mehr Selbstbedienungskassen. Banken hatten früher viel mehr Angestellte, heute erledigen Maschinen einen Großteil der Aufgaben. Solche Veränderungen passieren ständig. Seit 1955, als Österreich eigenständig wurde, hat sich der Arbeitsmarkt massiv verändert. Wir haben heute viel mehr Akademiker, mehr Menschen mit Weiterbildungen und neue Berufsbilder. Das zeigt, dass der Mensch sehr anpassungsfähig ist.

Natürlich gibt es immer Bevölkerungsgruppen, die durchs Raster fallen, aber oft liegt der Grund nicht nur in körperlichen oder geistigen Einschränkungen. Eine dritte, oft unterschätzte Komponente ist die psychische Gesundheit. Viele Menschen haben Probleme, weil sie demotiviert oder depressiv sind und nicht an sich selbst glauben.

Die entscheidende Frage ist: Wie geht unsere Gesellschaft damit um? Und ist es überhaupt relevant, ob Roboter kommen oder nicht? Viel wichtiger ist doch, wie wir Menschen erziehen und motivieren, damit sie ihr Potenzial nutzen und sich weiterentwickeln.

Soleman Haj Bakour: Ja, das ist definitiv eine ethische und gesellschaftliche Frage. Ich finde es schwierig, dieses Thema objektiv darzustellen. Ich denke, es gibt Gemeinsamkeiten, aber man muss bei der Ausbildung und dem Training ansetzen – schon von klein auf. Bildungsprogramme müssen frühzeitig beginnen und die Menschen vorbereiten.

Herbert Meister: Ja, aber die Verantwortung liegt nicht bei einer einzelnen Person. Ein Unternehmen ist für seine Mitarbeiter verantwortlich, so wie ich als Abteilungsleiter für mein Team zuständig bin. Aber ich kann nicht für alle Menschen draußen verantwortlich sein, die keinen Job haben. Ich kann vielleicht jemanden einstellen, aber meine Möglichkeiten sind begrenzt.

Technologie an sich ist weder gut noch schlecht – es kommt darauf an, wie der Mensch sie nutzt. Die Frage ist: Was ist das Ziel des Robotereinsatzes? Geht es darum, profitabler zu werden, mehr Leistung zu erbringen oder schlichtweg bestehende Arbeitskräfte zu ersetzen?

Soleman Haj Bakour: Ja, das ist ein wichtiger Punkt. Eine der Herausforderungen bei der Akzeptanz von Robotern ist, dass wir nicht immer wissen, wie sie in bestimmten Situationen reagieren. Aber letztlich sind sie programmiert – sie tun nur das, was wir ihnen beibringen. Deshalb liegt es in unserer Verantwortung, wie wir diese Technologie einsetzen. Und zurück zu den Trainingsprogrammen: Welche Inhalte sollten sie haben? Wer sollte daran teilnehmen? Sollten sie sich an Operatoren richten oder an Koordinatoren, die den Einsatz von Robotern auf Baustellen steuern? Was denkst du dazu?

Herbert Meister: Training oder Schulungen sind zwar wichtig, aber es wäre noch viel wichtiger, klare Regeln für den Umgang mit Robotern festzulegen. Es sollte genau beschrieben sein, wie ein Roboter funktioniert, welche Sicherheitsabstände eingehalten werden müssen und welche spezifischen Vorgaben es für seinen Einsatz gibt. In der Betriebsanleitung gibt es zwar oft schon Richtlinien, aber diese sollten konkreter sein, z. B. ob man sich einem Roboter von hinten nähern darf oder nicht.

Wichtig ist außerdem, dass definiert wird, welche Erwartungen man an den Roboter haben kann, welche nicht und unter welchen Bedingungen er optimal funktioniert. Dazu gehören Toleranzen, Präzisionsanforderungen und die Voraussetzungen für seinen effizienten Einsatz. Wenn man diese Bedingungen versteht, kann man auch besser planen, wie der Roboter eingesetzt werden soll.

Ein Beispiel aus der Praxis: Beim Bau von Betonwänden muss ein bestimmter Abstand zum nächsten Gebäude eingehalten werden, oft 80 cm bis 1 m. Planer gehen oft von geringeren Abständen aus, was in der Realität zu Problemen führt. Ein Roboter könnte hier neue Möglichkeiten schaffen, indem er beispielsweise Schalungen anbringt, die mit weniger Abstand auskommen. Entscheidend ist zu verstehen, wo Roboter Einschränkungen gegenüber Menschen haben und wo sie Vorteile bieten.

Soleman Haj Bakour: Wenn ich das richtig verstehe, gibt es zwei Ebenen: eine allgemeine, in den grundlegenden Rahmenbedingungen festgelegt werden, und eine spezifische, die je nach Aufgabe, Umgebung oder Projekt unterschiedlich ist. In Bezug auf Trainingsinhalte sollte man sich also fragen, welche allgemeinen Kenntnisse über Roboter erforderlich sind und welche spezifischen Kenntnisse für bestimmte Anwendungen notwendig sind.

Ich würde gern das nächste Thema ansprechen: Produktivität. An der Universität haben wir das sogenannte „magische Dreieck“ von Zeit, Kosten und Qualität kennengelernt. In einem Skript stand, dass die Digitalisierung das Problem dieses Dreiecks lösen könnte. Die Idee ist, dass eine Verbesserung eines Faktors (z. B. Qualität) oft zu einer Verschlechterung eines anderen Faktors (z. B. Zeit oder Kosten) führt. Durch Digitalisierung und Automatisierung könnte man das möglicherweise auflösen. Roboter versprechen beispielsweise höhere Qualität und niedrigere Kosten, weil sie effizienter arbeiten.

Ich erinnere mich, dass ein Professor das Thema angesprochen hat, aber ich bin mir nicht sicher, wie er es genau gemeint hat. Denkst du, dass Roboter tatsächlich das Potenzial haben, das „magische Dreieck“ zu durchbrechen?

Herbert Meister: Ich denke nicht, dass das Dreieck eine starre Regel ist. Der Grund, warum man denkt, dass Qualität, Kosten u. Zeit immer miteinander konkurrieren und somit ein statisches Dreieck vorhanden wäre, besteht darin, dass viele meinen, dass die Arbeitsprozesse heute schon hoch effizient wären!

Viele Tätigkeiten sind nicht perfekt organisiert, und das führt zu unnötigen Kosten und Verzögerungen. Wenn man Standards verbessert, also Prozesse optimiert und effizienter macht, dann verändert sich das magische Dreieck.

Ein gutes Beispiel ist die industrielle Entwicklung: Im Mittelalter musste man für Produkte sehr viel bezahlen, und sie wurden mit großem Zeitaufwand hergestellt. Heute können wir mit modernen Methoden schneller, günstiger und in besserer Qualität produzieren.

Lean-Ansätze zielen genau darauf ab: Sie reduzieren Verschwendung und führen zu einer Veränderung der Beziehung zwischen Qualität, Kosten und Zeit. Sie verbessern gleichzeitig alle drei Faktoren und bringen Vorteile für Kunden, Unternehmen und Mitarbeiter. Wenn wir also das gesamte System betrachten und es verbessern, können wir mehr Wertschöpfung erzielen, ohne dass zwangsläufig Kosten oder Zeit steigen.

Ein weiteres Beispiel: Viele Produkte könnten viel langlebiger sein, aber sie werden absichtlich weniger haltbar gebaut, um den Konsum anzukurbeln. Wenn wir jedoch

Kreislaufwirtschaftskonzepte nutzen (z. B. Recycling), können wir hohe Qualität mit niedrigen Kosten und Effizienz kombinieren.

Das „magische Dreieck“ ist also nicht in Stein gemeißelt, sondern kann durch kreative Lösungen und Prozessoptimierungen verändert werden.

Soleman Haj Bakour: Das magische Dreieck ist nicht starr, sondern flexibel. Es hängt stark davon ab, wie kreativ man ist und wie man Systeme gestaltet. Lean-Ansätze bieten dafür eine gute Grundlage, weil sie es ermöglichen, Prozesse effizienter zu machen.

Ich denke auch darüber nach, ein neues „magisches Dreieck“ zu definieren. In meiner Forschung beschäftige ich mich mit Sicherheit und Produktivität auf Baustellen. Oft werden diese beiden Faktoren als gegensätzlich betrachtet – höhere Sicherheit bedeutet oft mehr Vorschriften und dadurch möglicherweise weniger Produktivität. Aber ich denke, dass eine sichere Baustelle auch produktiver sein kann: Wenn es keine Unfälle gibt, gibt es auch keine Unterbrechungen, und dadurch steigt die Effizienz.

Es kommt also darauf an, wie man Sicherheit und Produktivität miteinander verbindet, anstatt sie als Gegensätze zu sehen.

Herbert Meister: Eine Herausforderung ist die Absicherung und die damit verbundenen Kosten. Eine gesicherte Arbeitsweise führt oft zu einer Verlangsamung, weil sich die Arbeiter nicht sicher fühlen. Sie müssen vorsichtiger arbeiten und aufpassen, damit kein Unfall passiert. Das macht eine Baustelle im Grunde weniger produktiv aufgrund dieser Unsicherheit. Wie stark sich das auf die Produktivität auswirkt, lässt sich wahrscheinlich schwer sagen. Wir müssen beides messen und darauf achten, dass wir nichts übertreiben.

Soleman Haj Bakour: Das Problem für mich ist, dass es bisher keine konkreten Zahlen zu Robotern auf Baustellen gibt. Das ist ein echtes Problem, aber es ist okay. Ich versuche, ein neues Modell für das „magische Dreieck“ zu entwickeln. Zum Beispiel könnte die Produktivität eine Ecke sein, die Sicherheit eine andere, aber ich bin noch auf der Suche nach der dritten Ecke. Die Frage ist, was die dritte Ecke sein könnte. Es geht darum, dieses Verhältnis zu verstehen, wo eine Verbesserung in einem Bereich eine Verschlechterung in einem anderen zur Folge hat. Das ist etwas, worüber ich nachdenke.

Herbert Meister: Vielleicht gibt es keinen dritten Faktor. Die Frage ist, ob man überhaupt einen dritten Faktor braucht.

Soleman Haj Bakour: Wenn es ein Dreieck sein soll, dann vielleicht schon. Meine Idee war, die Produktivität weiter zu unterteilen, weil die Produktivität von mehreren Faktoren abhängt, zum Beispiel von der Einarbeitungszeit und der Qualität der Arbeit.

Herbert Meister: Es geht darum, den Zusammenhang zwischen Produktivität und Sicherheit zu finden, um dies bestmöglich zu vermitteln. Die Frage ist, ob es wirklich ein Dreieck ist oder ob diese Faktoren vielleicht eher eine Funktion sind. Eine optimale Sicherheit führt zu höherer Produktivität, da Unsicherheiten die Arbeitsprozesse verlangsamen.

Wenn die Sicherheitsmaßnahmen zu hoch sind (also ein immer größerer Aufwand betrieben wird, ohne jedoch die Sicherheit für die Arbeiter selbst tatsächlich zu erhöhen) oder zu niedrig ist, sinkt die Produktivität. Ich denke, es könnte eine lineare Beziehung geben, aber es ist auch wichtig zu verstehen, dass diese drei Faktoren immer in jeder Produktion miteinander verbunden sind.

Soleman Haj Bakour: Zurück zu den Fragen. Wir hatten Workshops und bei einem der letzten haben wir das Wort „Checklisten“ mehrmals betont. Wir brauchen Checklisten für Baustellen. Was denkst du, wann und warum sollten diese Checklisten zum Einsatz kommen, speziell bei der Bauvorbereitung und der Bauausführung?

Herbert Meister: Jeder hat wahrscheinlich ein anderes Bild vor Augen, wenn er an einen Bohrroboter von Hilti oder den Ziegelroboter von Wienerberger denkt. Ein in einem Symposium in Graz vorgestellter Roboter sieht fast menschlich aus, weil er wie ein Mensch gebaut wurde, der ein Paket trägt. Es gab einen Vortrag dazu, und das Programmierproblem war nur ein Kreis. Man muss wissen, wie man diese Roboter ausstattet, um sicherzustellen, dass sie sicher arbeiten können. Ein weiteres interessantes Beispiel war der Roboter, der in Graz vorgestellte Roboter konnte im Wald trotz unebenen Bodens gehen. Selbst bei einem Stoß von außen konnte er sein Gleichgewicht halten und sich selbst stabilisieren. Die Frage ist, ob wir für Roboter auf Baustellen Absturzsicherungen bauen müssen oder ob sie an etwas befestigt werden müssen, wenn sie sich bewegen.

Das ist eine interessante Frage, auch wenn ein Roboter vom dritten Stock fällt. Aber es hängt alles davon ab, welchen Roboter man hat. Man muss den Arbeitsprozess mit dem Roboter konkret durchdenken, um zu verstehen, was er auf der Baustelle tun soll, welche Checklisten gebraucht werden, welche Informationen ausgetauscht werden müssen und welche Verantwortung jeder hat. Wichtig ist, dass man den Roboter genau kennt, was er tut, wie er sich bewegt, welche Abstände er braucht und welche Arbeit er ersetzt. Dann kann man die Rahmenbedingungen auf der Baustelle definieren und überlegen, welche Tools und Schnittstellen nötig sind. Man könnte sogar darüber nachdenken, wie der Roboter in die Bauplanung integriert wird, sodass er automatisch weiß, was zu tun ist. Aber all das kann man erst verstehen, wenn man weiß, wofür der Roboter eingesetzt wird und wie er funktioniert.

Soleman Haj Bakour: Es braucht konkrete Projekte, bei denen Roboter eingesetzt werden, um ein klares Bild davon zu bekommen, wofür sie genutzt werden können. Wenn man diesen Ziegelroboter aus Wien betrachtet, kann man sich fragen, wie er in verschiedenen Bereichen der Baustelle eingesetzt wird.

Wenn man diese konkreten Anwendungen hat, kann man überlegen, welche Checklisten nötig sind und was der Roboter leisten muss. Man muss auch überlegen, wie diese Roboter sicher und effizient arbeiten können und welche Herausforderungen es dabei gibt. Die Einführung von Robotern wird definitiv Veränderungen bringen, und es wird wichtig sein, diese Veränderungen zu bedenken und die richtigen Checklisten und Sicherheitsmaßnahmen zu entwickeln.

Herbert Meister: Ja, es gibt schon Roboter auf dem Markt, aber es ist noch schwer, sie in der Bauindustrie zu integrieren, weil die Firmen oft nicht wissen, wie sie diese Technologien effektiv einsetzen können. Es braucht also mehr Klarheit darüber, welche Roboter bereits nützlich und produktiv sind. Aber dazu müssen wir auch genau wissen, welche Aufgaben der Roboter übernehmen soll und wie er sich auf der Baustelle bewegt, welche Anforderungen es an ihn gibt und wie er mit anderen Systemen integriert werden kann. Wir müssen auch sicherstellen, dass Sicherheitsfragen immer berücksichtigt werden, wenn wir solche Technologien einführen.

Soleman Haj Bakour: Ich hatte tatsächlich auch die Idee, eine Art Plattform zu entwickeln, die sich ausschließlich mit Baurobotern beschäftigt, also eine Art Suchmaschine, die ähnlich wie Google funktioniert, aber speziell für Bauroboter. Man könnte eine Liste von Robotern erstellen und ihre jeweiligen Fähigkeiten beschreiben. Das würde helfen, Checklisten zu entwickeln, zum Beispiel: "Hier ist eine Checkliste für diesen speziellen Roboter."

Herbert Meister: Ich glaube, die Universitäten und Fakultäten arbeiten oft isoliert und tauschen sich zu wenig aus. Wenn sie sich besser vernetzen würden, könnte man viel mehr erreichen. Es wäre wichtig, dass sich die Forscher, die schon Erfahrung in diesem Bereich haben, mehr austauschen. Dann könnten wir alle viel schneller vorankommen.

Soleman Haj Bakour: Was sind deine Wünsche bezüglich der Roboter im Bau?

Herbert Meister: Ich habe noch keine konkrete Vorstellung, aber ich bin sehr neugierig. Ich möchte mehr darüber erfahren, was es schon gibt und was in den nächsten Jahren möglich sein wird. Wir arbeiten immer wieder an großen Projekten, und es wäre sehr interessant zu wissen, ob wir schon Roboter integrieren können. Das würde die Forschung erheblich voranbringen.

Soleman Haj Bakour: Wo siehst du den Baubereich in den nächsten 5 bis 10 Jahren?

Herbert Meister: Ich denke, es wird schwieriges, gutes Personal zu finden. Zudem wird der Neubau massiv zurückgehen, während Sanierung und Revitalisierung steigen werden. Das Thema Umweltschutz wird in den nächsten Jahren viel stärker in den Fokus rücken, und es wird auch Änderungen in der Besteuerung geben, um die durch Umweltverschmutzung verursachten Schäden auszugleichen. In den nächsten 5 bis 10 Jahren wird sich viel verändern, auch in Bezug auf den CO₂-Ausstoß und den Einsatz von Rohstoffen. Ich glaube, dass es möglicherweise länger als 5 Jahre dauert, bis sich diese Veränderungen wirklich durchsetzen.

Soleman Haj Bakour: Und spezifisch auf die Robotik?

Herbert Meister: Wir stehen vor einem starken Wandel, der kommen wird, aber es ist schwer vorherzusagen, ob er in fünf oder zehn Jahren eintritt. Die Frage ist, wie schnell die Politik erkennt, dass es Potenzial gibt und inwiefern Roboter Lösungen für diese Herausforderungen bieten können. Wenn Roboter wirklich helfen, wird das ein Brandbeschleuniger sein. Aber es stellt sich auch die Frage, ob Roboter die Situation verschärfen, zum Beispiel durch höheren Energieverbrauch. Beim Thema Sanierung und Revitalisierung sind handwerkliche Fähigkeiten nach wie vor sehr wichtig, und hier kann der Maschineneinsatz oft noch nicht alles übernehmen. Es kann Potenzial für Roboter geben, aber die Frage ist, ob die Hersteller in diese Richtung entwickeln.

Soleman Haj Bakour: Das ist definitiv die entscheidende Frage, und es ist interessant, dass du die Politik erwähnst. Ich denke, es braucht Mut, solche Technologien einzusetzen und auch entsprechende Regeln zu schaffen, die uns helfen, zu lernen, ob es funktioniert oder nicht. Ich habe zum Beispiel gelesen, dass in China bereits 2025 die Massenproduktion von Robotern starten soll.

Wir sprechen dabei nicht nur von Baurobotern, sondern auch von sozialen Robotern, die in den Alltag integriert werden. Es geht darum, früh zu agieren, bevor wir das gleiche Problem wie bei Elektroautos bekommen. Wenn wir in Deutschland spät anfangen, könnte das zu ähnlichen Verzögerungen führen. Deswegen ist es wichtig, dass Universitäten, Politiker und Unternehmen zusammenarbeiten, um voranzukommen. Meine letzte Frage an dich: Kannst du dir vorstellen, in der Zukunft eine Baustelle ohne Menschen zu haben?

Herbert Meister: Das hängt stark vom Bauverfahren ab. Wenn Roboter einen klaren Kostenvorteil bieten – sagen wir, 30 % günstiger als Handwerker – wird der Druck auf Planer steigen, Roboter in den Planungsprozess einzubeziehen. Der Kostendruck in der Wirtschaft wird so etwas vorantreiben. Wenn Roboter wirklich einen Mehrwert bringen und Qualität, Zeit und Kosten verbessern können, dann wird es zu einer Veränderung des gesamten Systems kommen. Aber Unternehmen werden das nur dann tun, wenn es ihren Gewinn steigert. Die Frage ist, ob es energieeffiziente Roboter gibt, die auch mit erneuerbaren Energien betrieben werden können, was für den Baubereich entscheidend wäre.

B.6 Expert Interview - Patrik Zips

Transcript: Expert Interview Patrik

Soleman Haj Bakour: Hallo Patrik, Fangen wir an mit einer kurzen Vorstellung. Was fasziniert dich am Thema Robotik und Automatisierung? und was machst du beruflich?

Patrik Zips: Also, ich bin verantwortlich für die Forschungsgruppe "Variation" im Bereich Robotik. Ich habe Automatisierungstechnik studiert und meinen Master in diesem Bereich gemacht. Danach habe ich meine Promotion bei Andreas Kugel geschrieben, und zwar im Bereich der Trajektorien Planung für Fahrzeuge, insbesondere für Lastwagen mit Anhängern. Seit acht Jahren bin ich bei AWO tätig, wo wir diese Gruppe aufgebaut haben. Seit fünf Jahren spezialisiere ich mich darauf, Regelungen für große Maschinen zu entwickeln.

Neben dem Automobilbereich, der in Graz natürlich viele Herausforderungen bietet, ist es besonders spannend, weil es oft schmutzig und anspruchsvoll ist. Es gibt viele Menschen in der Umgebung, und die Akzeptanz der Technologie ist eine große Herausforderung.

Auf der einen Seite haben wir die Robotik und ihre Umgebung, auf der anderen Seite sind diese Maschinen ursprünglich nicht für die Automatisierung, sondern für den menschlichen Betrieb geschaffen worden.

Sie müssen jedoch sehr präzise arbeiten, zum Beispiel beim Aufnehmen von Paletten, wo man nur eine Toleranz von plus/minus 5 cm hat. Das erfordert eine hohe Präzision, zum Beispiel beim Steuern eines Gabelstaplers.

Was mich an Robotik fasziniert, ist, dass wir damit Jobs erleichtern können, die niemand mehr machen möchte. Das sind oft repetitive, gefährliche oder körperlich anstrengende Arbeiten, wie Kranarbeiten oder Hebearbeiten. In der Forstindustrie gibt es zum Beispiel viele tödliche Unfälle, und hier kann die Automatisierung helfen, die Sicherheit zu erhöhen. Auch auf Baustellen passieren viele Fehler, oft wird geschlampt oder gepusht. Die Automatisierung kann hier die Qualität steigern und die Sicherheit verbessern.

Soleman Haj Bakour: Du hast das Wort "große Maschinen" erwähnt. Sind große Maschinen für dich gleichzusetzen mit Robotern, oder siehst du das anders?

Patrik Zips: Wir machen große Maschinen zu Robotern. Ein Roboter ist im Grunde ein starkes System, das angetrieben ist, um eine Bewegung auszuführen. Das können wir auf jede Maschine übertragen. Aber der Unterschied zwischen einer Maschine und einem Roboter liegt im Assistenzbetrieb und der Autonomie. Ein Roboter wird erst dann zu einem Roboter, wenn er mehr Autonomie, Flexibilität und Intelligenz mitbringt. Der Unterschied zwischen AMRs (Autonome Mobile Roboter) und herkömmlichen Maschinen liegt genau in dieser Flexibilität und der Autonomie der Maschine.

Soleman Haj Bakour: Was fasziniert oder motiviert dich besonders? Ist es die Sicherheit für die Mitarbeiter oder die Erleichterung der Arbeit? Welche Aufgaben und Prozesse können schnell und einfach automatisiert werden? Worauf sollten wir uns zuerst konzentrieren?

Patrik Zips: Automatisiert werden können vor allem Prozesse, die in einer gut definierten Umgebung stattfinden. Ein klassisches Beispiel ist der Industrieroboter in der Automobilindustrie. Der Roboter führt den ganzen Tag die gleiche Bewegung aus, zum Beispiel das Anbringen einer Autotür an exakt der gleichen Stelle. In solchen Umgebungen, die indoor und kontrolliert sind, können wir bereits gut automatisieren. Sobald wir jedoch nach draußen gehen, ändern sich die Bedingungen. In der Logistik ist die Automatisierung schon weit fortgeschritten, aber meist nur in Bereichen, die sehr gut definiert oder umgebaut wurden. Zum Beispiel stehen Paletten oft auf exakt der gleichen Stelle, mit einer Toleranz von nur wenigen Zentimetern. Sobald jedoch etwas unvorhergesehenes passiert, wie eine herunterhängende Plastikfolie, die ein Mensch problemlos umgehen würde, traut sich die Maschine nicht mehr weiterzufahren. Die Maschine kann nicht unterscheiden, ob ein Hindernis fest oder weich ist, und benötigt dann die Bestätigung eines Menschen.

Wenn ich schnell Ergebnisse in der Automatisierung erzielen möchte, suche ich mir Prozesse, die immer gleich ablaufen. Ein gutes Beispiel ist der Roboter bei Wienerberger, der Ziegel verarbeitet.

Dort ist der Prozess sehr klar definiert: Die Palette steht immer rechts, die Wand links, und der Roboter weiß genau, wo er den nächsten Ziegel platzieren muss. Allerdings ist es nicht mehr ganz so trivial, da der Roboter in einer Umgebung arbeitet, in der etwas schiefgehen kann. Zum Beispiel könnte eine Palette verschoben sein oder ein Ziegel kaputt. Hier muss die Automatisierung viele Eventualitäten abfangen, um den Prozess zuverlässig zu gestalten. Grundsätzlich können repetitive Aufgaben, die für Menschen ermüdend sind, gut automatisiert werden. Das ist der erste Ansatz, um schnelle Erfolge zu erzielen.

Soleman Haj Bakour: Das Wort mit den Paletten und den Toleranzen von plus/minus 2-3 cm – mein Kopf funktioniert so, dass ich manchmal bestimmte Beispiele heranziehe, wie zum Beispiel Fliesenarbeiten.

Stellen wir uns vor, wir haben in der Zukunft Roboter, die Fliesenarbeiten übernehmen. Bisher habe ich noch keinen Roboter gefunden, der das macht, aber ich weiß, dass Fliesenarbeiten ein Prozess sind, der sich wiederholt, aber sehr präzise sein muss. Da kommen wir wieder auf diese Toleranz von plus/minus 3 cm. Jetzt gespiegelt auf Fliesenarbeiten: Ich finde ehrlich gesagt, dass Roboter in diesem Fall Schwierigkeiten haben werden. Wie könnte man handwerkliche Arbeiten wie diese am besten mit der Technologie verknüpfen?

Patrik Zips: Das Thema Fliesenlegen ist eine große Herausforderung, vor allem wegen des Fliesenklebers. Alles, was nicht fest, sondern flüssig oder halbflüssig ist, ist schwierig zu handhaben – sowohl beim Auftragen als auch bei der Analyse. Fliesenlegen erfordert eine gewisse Fingerfertigkeit.

Wenn der Fliesenkleber nicht gleichmäßig aufgetragen ist, schwimmt die Fliese ein bisschen darauf herum. Das bedeutet, dass ein automatisiertes System nicht nur die Fliese platzieren, sondern auch den 3 mm Abstand für die Fuge korrekt einrichten muss. Es reicht nicht, einfach hinzufahren, die Fliese loszulassen und zu hoffen, dass es passt. Ich muss den Zustand messen und beurteilen können.

Aber in einer schwierigen Umgebung – wo kann ich mein Messsystem oder meine Kamera am Roboter anbringen? Wenn die Kamera hinten am Roboter ist, sehe ich die Fliese nicht mehr, weil sie schon verlegt ist. Die große Frage ist also: Wie kann ich die Umgebung sinnvoll wahrnehmen? Der Mensch hat hier einen Vorteil, weil er mit seinen Augen und Händen arbeiten kann. Ein Roboter hingegen hat Schwierigkeiten, den Abstand zwischen den Fliesen und den Fugen zu messen, besonders wenn Hindernisse im Weg sind.

Ein weiteres Problem ist die Flexibilität. Der Mensch kann die Fliese nochmal anheben und nachjustieren, aber das ist für einen Roboter sehr schwer. Das Ausmessen des Raumes und die Feinheiten beim Fliesenlegen sind komplex. Es reicht nicht, dass der Roboter die Fliese einfach nur legt. Er muss sie auch zurechtschneiden, ausmessen und auf Unterschiede in der Wand reagieren können. Das sind alles Herausforderungen, die den Prozess sehr komplex machen.

Ein realistischer Ansatz wäre, nur Teile des Prozesses zu automatisieren, wie es zum Beispiel bei Wienerberger der Fall ist. Dort legt der Roboter die einfachen Ziegel, während der Mensch die schwierigen Teile übernimmt, wie das Schneiden oder das Verlegen der ersten Reihe. Aber wenn ich den gesamten Prozess automatisieren will, wird es schwierig, besonders wenn es nur um wenige Fliesen geht. Bei Fliesen ist es oft so, dass nicht so viele auf einer Wand sind wie bei Ziegeln, was die Automatisierung weniger rentabel macht.

Ein weiteres Problem ist die Wahrnehmung des Systems. Eine Stereo-Kamera braucht Strukturen, um die Tiefe zu berechnen. Wenn die Wand weiß und strukturlos ist, kann das System keine Tiefe messen und nicht beurteilen, ob die Fliese eben liegt oder nicht. Auch wenn die Wand unsauber verputzt ist, wird es für das System schwierig, die Oberfläche zu analysieren. Das sind alles Hindernisse, die die Automatisierung von Fliesenarbeiten sehr komplex machen.

Soleman Haj Bakour: Also haben wir viele Grenzen und Schwierigkeiten, besonders im Bauwesen. Du hast erwähnt, dass Outdoor-Bedingungen, wie das Wetter oder die Art der Tätigkeit, zusätzliche Herausforderungen darstellen. Das sind alles Fragen, die beantwortet werden müssen.

Aber ich würde jetzt gerne auf ein anderes Thema kommen, nämlich Sicherheit. Du hast am Anfang erwähnt, dass die Zunahme der Automatisierung und der Einsatz von Robotern und großen Maschinen Risiken mit sich bringt, die wir noch nicht vollständig kennen. Was sind deiner Meinung nach die Risiken, die bei der Interaktion mit Robotern entstehen könnten – sowohl direkt als auch indirekt?

Patrik Zips: Gesundheitliche Risiken für den Menschen ändern sich nicht, egal ob die Maschine manuell oder automatisch gesteuert wird. Was sich ändert, ist die Verantwortung. Wenn ein Mensch mit einem Gabelstapler oder einer Walze einen anderen Menschen verletzt, liegt in 90 % der Fälle menschliches Versagen vor. Hier gibt es klare Regelungen, wie das gesetzlich und versicherungstechnisch abläuft.

Die Frage ist: Wer ist haftbar, wenn ein autonomer Roboter einen Schaden verursacht? Ist es der Betreiber, der Verkäufer, der Programmierer oder die Firma dahinter? Wie kann man beurteilen, wer wirklich schuld ist? Gibt es Fahrlässigkeit? Das sind alles Fragen, die noch nicht geklärt sind. Im Moment regeln wir das bei autonomen Maschinen so, dass sichergestellt wird, dass kein Mensch in die Nähe kommt, wo ihm Schaden zugefügt werden könnte. Oder wir setzen einen Safety Operator ein, der einen Knopf gedrückt halten muss, damit die Maschine fahren darf. In manchen Fällen kann man dann sagen, dass der Operator schuld ist, wenn etwas schiefgeht, und nicht der Programmierer. Aber das sind alles noch offene Fragen, besonders im Bereich der Sicherheit und der Haftung.

Soleman Haj Bakour: Könnte man auch zu dem Punkt kommen und sagen, dass der Arbeiter schuld war, wenn ein Schaden zugefügt wurde? Zum Beispiel, wenn es nur ein Lichtsignal oder ein akustisches Signal gibt, das sagt: "Hier darf ich nicht weiterarbeiten", aber der Arbeiter ignoriert es und macht trotzdem weiter. Ist dann der Arbeiter schuld, oder wie sieht die rechtliche Lage aus?

Patrik Zips: Wenn es nur ein Lichtsignal oder ein akustisches Signal gibt, reicht das meines Wissens nicht aus, um die rechtlichen Anforderungen zu erfüllen. Es muss eine physische Trennung geben, zum Beispiel ein Zaun.

Ein dünnes Absperrband reicht nicht aus. Die Rechtslage ist hier noch nicht vollständig geklärt, da es bisher keine Präzedenzfälle gibt. Die allgemeine Meinung ist, dass ein virtueller Zaun oder ein Signal allein nicht ausreicht.

In der Logistik gibt es zum Beispiel Gabelstapler, die mit Sensoren ausgestattet sind. Diese haben oft einen Sicherheitsvorhang, der zertifiziert ist. Wenn dieser Vorhang unterbrochen wird, bremst das System sofort ab und fährt erst wieder, wenn der Bereich frei ist. Das Problem bei solchen Lösungen ist, dass sie sehr teuer sind, besonders wenn sie zuverlässig und für den Außenbereich geeignet sein müssen.

Ein weiteres Problem ist die Abdeckung. Bei mobilen Robotern, die mit einer Geschwindigkeit von 2-3 km/h fahren, ist es schwierig, den gesamten Arbeitsraum abzudecken. Zum Beispiel bei einem Ladekran, der in einem dreidimensionalen Arbeitsraum von 20 Kubikmetern arbeitet, ist es eine große Herausforderung, diesen Bereich vollständig abzusichern.

Ein weiterer Punkt ist die Effizienz. Wenn ich zum Beispiel Paletten in einen Lastwagen laden muss, muss ich sehr nah an die Wand heranfahren. Unser System kann das im Moment nicht, weil es Sicherheitsbedenken gibt. Das bedeutet, dass es Einschränkungen im Betrieb gibt, die die Produktivität beeinträchtigen.

Soleman Haj Bakour: Das ist tatsächlich eines der Themen, die ich in meiner Diplomarbeit zur Sicherheit behandelt habe. Es gibt die Norm ISO 15066, die für die kollaborative Arbeit mit Robotern gilt. Diese Norm gibt eine Formel vor, wie man den Sicherheitsabstand berechnen kann.

Ich habe das mit angenommenen Werten berechnet und bin auf einen Sicherheitsbereich von 8 m gekommen – das sind 3 m Abstand plus 5 m für den Arm des Roboters. Das Problem ist, dass 8 m auf einer Baustelle viel zu viel sind, besonders wenn mehrere Roboter im Einsatz sind. Zum Beispiel auf der Baustelle in Pelhřimov, wo drei Roboter gearbeitet haben, wäre das ein riesiger Bereich.

Deshalb habe ich mir die Frage gestellt, ob man den Sicherheitsbereich reduzieren könnte. Zum Beispiel könnte man im ersten Meter oder halben Meter ein Signal geben, das den Arbeiter warnt, dass er einen verbotenen Bereich betritt. Dann könnte man die Geschwindigkeit reduzieren und erst bei weiterer Annäherung einen Sicherheitsstopp auslösen. Das müsste natürlich mit echten Werten berechnet werden, auf die ich leider keinen Zugriff habe.

Ein weiteres Problem ist das Wetter. Können wir den Sensoren vertrauen, wenn es regnet oder neblig ist?

Patrik Zips: Es gibt Sensoren, die für Regen zertifiziert sind und selbst überprüfen, ob das Signal noch zuverlässig ist. Das Problem ist, dass diese Sensoren sehr teuer sind – etwa fünfmal so teuer wie normale Sensoren.

Wir haben gerade ein Projekt gestartet, das von der FFG gefördert wird und sich genau mit diesen Fragen beschäftigt: Wie kann man die Sicherheit beurteilen, testen und zertifizieren? Was sind die rechtlichen Auswirkungen, und wie kann man die Wahrnehmung und Automatisierung anpassen, um diese Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen? An dem Projekt sind auch eine Rechtsanwaltskanzlei und Maschinenhersteller beteiligt.

Die erste Fragestellung ist, ob man den Sicherheitsbereich reduzieren kann, indem man den Roboter bei Annäherung langsamer fahren lässt, anstatt sofort zu stoppen. Das ist der einfachste Ansatz, den wir in den nächsten zwei Jahren untersuchen werden.

Soleman Haj Bakour: Es gibt noch einen anderen Punkt: In der Norm ISO 15066 geht es hauptsächlich um die horizontale Annäherung. Aber was ist mit der vertikalen Annäherung? Zum Beispiel bei dem Roboter von Doka, den ich gesehen habe, stellt sich die Frage, wie man den Sicherheitsabstand bei Arbeiten an der Decke sicherstellt. Das ist eine andere Art der Annäherung und erfordert eine direkte Interaktion zwischen den Gewerken. Kann man da überhaupt von einem Sicherheitsabstand sprechen, wenn man oben arbeiten muss, zum Beispiel beim Eisenlegen?

Patrik Zips: Meines Erachtens gibt es im Moment keine andere Lösung, als sicherzustellen, dass der Arbeitsbereich frei von Menschen ist. Das ist die aktuelle Formulierung in den Normen. Aber wenn wir produktiv automatisieren wollen, brauchen wir andere Überlegungen. Es funktioniert nicht, wenn ich in alle drei Dimensionen 8 m Sicherheitsabstand haben muss. Das wäre übertrieben, besonders wenn der Roboter jedes Mal stoppt, weil ein Blatt oder ein Eichhörnchen vorbeifliegt. Hier brauchen wir neue Konzepte, sowohl technisch als auch rechtlich.

Soleman Haj Bakour: Ich stelle mir auch die Frage: Wenn wir Roboter einsetzen, müssen wir uns Gedanken darüber machen, wie die Sicherheit gewährleistet wird. Zum Beispiel, wenn ich eine Palette habe, die von einer Person gewechselt werden muss, und in Zukunft ein Roboter diese Aufgabe übernimmt – brauchen wir dann immer noch einen Sicherheitsabstand und Geschwindigkeitsreduzierung? Vor allem, wenn zwei Roboter über IoT miteinander kommunizieren. Denke ich, dass wir das im Moment noch nicht brauchen?

Patrik Zips: Das Problem ist, dass ich sicherheitstechnisch nicht unterscheiden kann, ob es ein Roboter oder ein Mensch ist. Der einzige sinnvolle Ansatz im Moment ist, alles als potenziell gefährlich zu behandeln. Wenn ein Hindernis erkannt wird, muss das System anhalten, weil es nicht sicherstellen kann, ob es sich um einen Menschen handelt. Auch wenn das System zu 95 % zuverlässig ist, gibt es immer noch die Frage, was mit den 5 % falschen Erkennungen passiert. Was, wenn ein Objekt fälschlicherweise als Mensch erkannt wird oder umgekehrt? Das ist ein großes Problem, besonders auf Baustellen, wo es kaum Erfahrungswerte gibt.

Soleman Haj Bakour: Ich erinnere mich an einen Bericht aus Südkorea, wo ein Mensch von einem Roboter als Gemüsekiste erkannt und überfahren wurde. Solche Vorfälle zeigen, dass es bei der Sicherheit noch viele offene Fragen gibt, die beantwortet werden müssen. Ich denke, im Bauwesen oder auf Baustellen sind wir noch ganz am Anfang und haben kaum praktische Erfahrungen mit der Automatisierung.

Patrik Zips: Das liegt auch daran, dass sich viele nicht trauen, Roboter auf die Baustelle zu bringen. Die gesetzlichen Vorschriften, wie zum Beispiel der 8-Meter-Sicherheitsabstand, machen es schwierig, produktiv zu arbeiten. Der Gesetzgeber hat keine praktischen Erfahrungen mit Baumaschinen, und das bremst die Entwicklung aus.

Soleman Haj Bakour: Ich denke, ein Teil der Lösung ist Mut – natürlich mit Vernunft. Aber es gehört Mut dazu, neue Technologien zu etablieren. Allerdings ist es auch ein Risiko, besonders für diejenigen, die die Verantwortung tragen. Wenn etwas schiefgeht, könnte man sogar beruflich oder rechtlich in Schwierigkeiten geraten. Ich weiß nicht, ob ich mich trauen würde, das Risiko einzugehen.

Patrik Zips: Ja, das ist ein großes Problem. Wenn ich als Person verantwortlich bin und etwas passiert, könnte ich sogar ins Gefängnis kommen, wenn Fahrlässigkeit nachgewiesen wird. Das ist eine große Hürde, die viele davon abhält, Roboter auf Baustellen einzusetzen.

Soleman Haj Bakour: Okay, lassen wir das Thema Sicherheit und kommen wir zu einem netteren Thema: Akzeptanz. Warst du schon mal auf Baustellen oder hast praktische Erfahrungen damit, wie Arbeiter auf Automatisierung oder Roboter reagieren?

Patrik Zips: Ich war nicht oft produktiv auf Baustellen tätig, aber wir haben zum Beispiel bei einem großen Logistikbetreiber einen Versuch gestartet. Dort gab es ein Hochregallager, in dem Paletten bis zu 12 Meter hoch gestapelt wurden. Die Staplerfahrer arbeiteten sehr schnell und nicht immer regelkonform, um ihre Arbeit in der vorgegebenen Zeit zu erledigen. Wir haben dort vor zwei Jahren einen automatisierten Stapler getestet.

Die Arbeiter haben den Stapler gesehen, gelächelt und sind weitergefahren. Die erste Reaktion war Besorgnis, aber die zweite war, dass sie dachten, sie würden einen neuen Job übernehmen. Die größte Angst war, dass ihre Jobs überflüssig werden könnten. Aber in Wirklichkeit suchen wir nach Lösungen, um gefährliche oder anstrengende Jobs zu automatisieren, für die man schwer Personal findet. Zum Beispiel das Tragen von 40 kg schweren Ziegeln – das ist weder lustig noch gesund, und auf Dauer schadet es dem Körper. Hier kann die Automatisierung helfen. Ein weiteres Problem ist die Angst vor Überwachung. Wir haben einmal ein Kamerasystem auf einem manuell gesteuerten Stapler installiert, um Daten für das Training eines KI-Systems zu sammeln. Der Betriebsrat hat ein halbes Jahr lang diskutiert, ob das erlaubt ist, weil die Fahrer Angst hatten, dass der Arbeitgeber jede ihrer Bewegungen auswerten könnte. Diese Angst vor Überwachung ist ein großes Hindernis, selbst wenn wir versprechen, dass die Daten anonymisiert und verpixelt werden.

Es ist eine Herausforderung, das Vertrauen der Arbeiter zu gewinnen, besonders bei den weniger erfahrenen Mitarbeitern, die oft als erste von der Einführung von Robotern betroffen sind.

Soleman Haj Bakour: Ich denke, die weniger erfahrenen Arbeiter sind oft die ersten, die von der Einführung von Robotern betroffen sind. Vielleicht könnte man ihnen eine weitere Ausbildung anbieten, um ihnen zu zeigen, dass die Roboter da sind, um sie zu unterstützen und nicht, um sie zu ersetzen.

Man könnte ihnen erklären, dass die Roboter die Jobs übernehmen, die niemand machen will, und dass sie dadurch entlastet werden. Aber ich glaube, es ist wichtig, den Arbeitern auch neue Möglichkeiten zu bieten, zum Beispiel durch Weiterbildungen.

Patrik Zips: Die meisten Leute, die in solchen Jobs arbeiten, bleiben oft nur 2-3 Jahre und wechseln dann den Job. Zum Beispiel braucht man fünf Jahre, um ein guter Kranfahrer zu werden. Unsere Systeme sollten das Niveau eines erfahrenen Kranfahrers erreichen, aber trotzdem brauchen wir weiterhin Hilfsarbeiter für einfache Aufgaben.

Die Automatisierung betrifft also nicht unbedingt die billigen, schlecht ausgebildeten Jobs, sondern eher die Fachkräfte, die mehr Erfahrung und höhere Löhne haben.

Soleman Haj Bakour: Ich möchte ein Beispiel aus unserem Studium nehmen. In den letzten Jahren gibt es die Tendenz, dass wir mehr Programmieren lernen, auch wenn es nur Grundlagen sind. Ich glaube, das kommt daher, dass alle Firmen, egal in welcher Branche, eine IT-Abteilung haben.

Ich denke, dass auch Bauingenieure ein gewisses Grundwissen in diesem Bereich haben sollten. Mit der zunehmenden Automatisierung und dem Einsatz von Robotern wird dieses Wissen auf jeden Fall benötigt, um zu verstehen, wie alles funktioniert.

Jetzt zurück zu den Kranfahrern oder Bauarbeitern: Was denkst du, welche neuen Kompetenzen und Informationen werden in Zukunft notwendig sein, um auf der Baustelle immer am Ball zu bleiben?

Patrik Zips: Es geht in Richtung "One-to-Many"-Operationen. Das bedeutet, dass ein Operator nicht nur eine Maschine bedient, sondern mehrere gleichzeitig. Im Idealfall sitzt dieser Operator nicht mehr auf der Baustelle, sondern in einem gemütlichen Büro in Wien, Berlin oder wo auch immer. Er hat einen bequemen Sessel und bedient die Maschinen aus der Ferne.

Der Operator überwacht die Funktionen der Maschinen und greift nur ein, wenn die Maschine nicht weiterkommt. Zum Beispiel, wenn ein Hindernis wie eine Plastikplane im Weg liegt, muss der Mensch entscheiden: Ist das eine Gefahr für die Maschine? Ist es eine Gefahr für die Umwelt? Kann ein Schaden entstehen?

Die Kompetenzen, die hier gefragt sind, sind zum Beispiel die Fähigkeit, zwischen verschiedenen Maschinen und Kamerasystemen umzuschalten und unterschiedliche Steuerungskonzepte zu bedienen. Vielleicht operiert man nicht mehr nur aus der Fahrerkabine, sondern nutzt neue Systeme für die Fernbedienung. Ein weiteres großes Thema ist die Kalibrierung. Wenn die Maschine einen kleinen oder größeren Fehler hat, muss der Operator in der Lage sein, diese Probleme selbst zu beheben oder zumindest grundlegende Eingriffe vorzunehmen.

Soleman Haj Bakour: Also, wie ich das verstehe, gibt es zwei Punkte: Die Idee von "One-to-Many", bei der ein Mensch von einem entfernten Ort aus mehrere Roboter gleichzeitig bedient, ist eine spannende Vision. Aber die Beschreibung dieser Tätigkeiten lässt mich vermuten, dass wir dadurch neue Berufe im Bauwesen erleben werden. Welche Art von Berufen könnten das sein?

Patrik Zips: Für unseren Stapler haben wir drei Interventionslevel definiert, die hier interessant sein könnten. Wir haben festgestellt, dass bei 60 Paletten, die in 240 Minuten abgeladen wurden, 17 manuelle Eingriffe notwendig waren. Von diesen 17 Eingriffen waren 60 % auf Kollisionsvermeidung zurückzuführen, 30 % darauf, dass die Maschine eine Aufgabe nicht erfüllen konnte, und 12 % darauf, dass die Maschine nicht weiterfahren konnte.

Wir haben auch eine Kategorie für einfache Eingriffe definiert, wie zum Beispiel das Drücken eines Knopfs, um die Maschine freizugeben. In 35 % der Fälle war ein Operator notwendig, der mit der Maschine umgehen kann – jemand, der vielleicht einen Staplerführerschein hat und mit den neuen Steuerungskonzepten vertraut ist. In 6 % der Fälle war ein Robotic Engineer erforderlich, der tiefer in den Code der Maschine eingreifen konnte.

Auf großen Baustellen könnte es in Zukunft einen Robotic Engineer geben, der vor Ort ist und bei Problemen wie GPS-Fehlern oder Neustarts der Anlage eingreifen kann. Alternativ könnte dieser Engineer auch aus einer Zentrale zugeschaltet werden. Auf jeden Fall wird es jemanden auf der Baustelle brauchen, der grundlegendes Verständnis für die Maschinen hat, um sie neu starten oder Service durchführen zu können. Das wird auf Baustellen unerlässlich sein, besonders wenn es um komplexe Systeme geht.

Soleman Haj Bakour: Wahrscheinlich brauchen wir ein zweites Interview, aber ich möchte noch ein Thema besprechen, und zwar Produktivität. Das ist eines der drei Hauptthemen meiner Diplomarbeit. An der TU haben wir etwas über das "magische Dreieck" gelernt – es hat auch andere Bezeichnungen, aber mir gefällt der Begriff. Es geht um die drei Faktoren Zeit, Kosten und Qualität.

Das bedeutet, wenn ich einen Faktor verbessern will, verschlechtern sich oft die anderen beiden. Zum Beispiel: Wenn ich die Qualität erhöhen will, brauche ich mehr Zeit oder höhere Kosten. Man sagt, dass Digitalisierung und Automatisierung dieses Problem lösen können. Ich würde sogar behaupten, dass Robotik auch versucht, dieses Problem zu lösen. Würdest du das auch so sehen, oder siehst du das anders?

Patrik Zips: Ich glaube nicht, dass das Problem vollständig gelöst werden kann.

Automatisierung vergrößert eher die Amplitude des magischen Dreiecks. Wenn ich zum Beispiel die Zeit reduziere, spare ich Geld, aber die Qualität könnte darunter leiden. Mit Automatisierungssystemen kann man diese Amplitude etwas ausdehnen, aber es gibt immer noch Kompromisse.

Wenn ich robuster sein will, muss ich langsamer fahren, weil bei höherer Geschwindigkeit mehr Fehler passieren können. Zum Beispiel müssen wir in Kurven langsamer fahren, um sicherzustellen, dass wir die geplante Bahn einhalten. Je schneller wir sind, desto mehr externe Einflüsse können uns beeinträchtigen.

Ein praktisches Beispiel: Wenn ein Stapler eine Palette erkennt, könnte er eine Minute stehen bleiben, um viele Bilder aufzunehmen und den genauen Standort der Palette zu berechnen. Das ist ähnlich wie beim menschlichen System, aber es kostet Zeit.

Ich könnte das Automatisierungssystem mit Sensoren vollstopfen, um die Qualität zu erhöhen, aber das würde die Kosten in die Höhe treiben. Diese Entscheidungen müssen oft schon in der Designphase getroffen werden. Ich glaube ehrlich gesagt, dass dieses Problem nie vollständig gelöst wird. Die Beziehung zwischen Zeit, Kosten und Qualität wird immer bestehen bleiben.

Soleman Haj Bakour: Die Beispiele, die du genannt hast, erinnern mich an etwas, das ich in meiner Diplomarbeit geschrieben habe. Ich habe versucht, ein neues magisches Dreieck zu definieren, das aus drei Themen besteht: Akzeptanz (Vertrauen), Sicherheit und Produktivität. Ich wollte herausfinden, ob diese drei Faktoren eine ähnliche Beziehung haben wie Zeit, Kosten und Qualität. Was ich herausgefunden habe, ist, dass die Beziehung hier tatsächlich anders ist. Zum Beispiel kann man Produktivität und Sicherheit betrachten: Es gibt einen Punkt, an dem die Produktivität maximal ist, aber ab einem bestimmten Punkt kann zu viel Sicherheit die Produktivität negativ beeinflussen. Das gleiche gilt für Vertrauen: Wenn ich zu viel Vertrauen in den Roboter habe, könnte das die Sicherheit beeinträchtigen, weil ich mich zu sehr auf den Roboter verlasse. Siehst du das auch so?

Patrik Zips: Ja, ich denke, Sicherheit und Vertrauen hängen eng zusammen. Je sicherer ein System ist, desto mehr Vertrauen habe ich in es. Aber es gibt einen Punkt, an dem zu viel Sicherheit die Produktivität verringert. Zum Beispiel, wenn ich jeden Unterbrechungsfall durch einen Sicherheitsbereich definiere, verlängere ich die Unterbrechungen und verringere damit die Produktivität.

Ein Beispiel: Wenn ich sage, dass ich sicher bin, indem ich jedes Mal unterbreche, wenn jemand in meinen Arbeitsbereich kommt, dann sinkt meine Produktivität. Hier muss man tiefer in die Definitionen dieser Begriffe eintauchen und sie wissenschaftlich erweitern, um die Beziehungen besser zu verstehen.

Soleman Haj Bakour: Das ist tatsächlich eines der Probleme meiner Diplomarbeit. Es gibt einfach zu wenig Definitionen und Zahlen, besonders auf Baustellen. Ein Kommilitone von mir, Niklas, forscht auch im Bereich Robotik, aber er konzentriert sich mehr auf Prozesse und Taktplanung. Wir haben beide versucht, das Thema zu analysieren, aber unsere Ansätze sind sehr unterschiedlich. Bei ihm gibt es viele Berechnungen und Analysen, während ich mich mehr auf theoretische Aspekte konzentriere.

Ich denke, wir müssen diese Begriffe besser definieren, besonders in Bezug auf Baustellen, wo es kaum Daten gibt. Aber ich komme langsam zum Abschluss: Was sind deine Wünsche für die Automatisierung auf Baustellen, und wie siehst du die Bauindustrie in den nächsten zehn Jahren?

Patrik Zips: In den nächsten 20 Jahren hoffe ich, dass Maschinen den Menschen unterstützen werden. Einerseits durch passive Elemente wie Exoskelette, die Teile der Arbeit übernehmen, zum Beispiel das Heben von Ziegeln, während der Mensch sie noch positioniert. Andererseits durch die Übernahme von Logistikprozessen, damit ich produktiver arbeiten kann. Zum Beispiel könnte ein autonomes System mir neue Ziegel bringen, wenn ich nur noch zwei übrig habe. Ich hoffe, dass wir in Richtung einer Just-in-Time-Lieferung gehen, die realisierbar ist, und dass mehr Systeme unterwegs sind, die keine zusätzlichen Arbeiter benötigen. Gleichzeitig sollte der Mensch der Maschine helfen können, zu verstehen, warum etwas falsch gemacht wurde, um die Produktivität zu steigern.

Ein weiterer Punkt ist die Flexibilität der Maschinen. Maschinen sind prinzipiell starr, aber wir müssen ihnen beibringen, mit unvorhergesehenen Situationen umzugehen. Das ist etwas, was wir in einem praktischen Umfeld wie der Baustelle ständig brauchen werden.

Wie wird die Baustelle in Zukunft aussehen? In den nächsten drei Jahren wird sie wahrscheinlich ähnlich sein wie jetzt. In fünf Jahren könnte es kritisch werden, ob sie sich verändert. In zehn Jahren hoffe ich, dass alle gesundheitsschädlichen Jobs – sowohl körperlich als auch geistig – von Maschinen übernommen werden. Das betrifft Jobs, die den Rücken und die Arme belasten, aber auch repetitive Aufgaben, die psychische Probleme verursachen können.

Auf der anderen Seite hoffe ich, dass Digitalisierung und Logistik so gut zusammenarbeiten, dass die Produktivität deutlich steigt. Wir müssen auch das Konzept des Abrisses ändern, denn in Zukunft wird es mehr um Rückbau gehen. Das ist im Moment nicht finanzierbar, aber mit neuen Konzepten und Automatisierung könnten wir die Produktivität steigern.

Soleman Haj Bakour: Super, das hoffe ich auch.

B.7 Expert Interview - Karina Schiefer

Transcript: Expert Interview Karina

Soleman Haj Bakour: Hallo Karina, Ich freue mich auf eine kurze Vorstellung von deiner Seite.

Karina Schiefer: Mein Name ist Karina Schiefer. Ich leite seit vier Jahren das Innovationsmanagement bei der Porr und arbeite insgesamt seit sechs Jahren für das Unternehmen. Mein akademischer Hintergrund: Ich habe Bauingenieurwesen an der TU Wien studiert. Davor absolvierte ich die HTL für Tiefbau in der Leberstraße in Wien. Während meines Studiums lag mein Fokus auf Baubetrieb und Baustelleneinrichtung, insbesondere auf dem Tunnelbau. Durch Professor Jodl wurde mein Interesse an diesem Bereich verstärkt. Ich war auch als Assistentin am Institut tätig und schrieb meine Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der Porr. Meine Diplomarbeit behandelte die Digitalisierungspotenziale im zyklischen Tunnelvortrieb mit der NADM-Methode. Ich arbeitete dazu im Forschungstunnel "Nordrhein-Tunnel" und entwickelte Handlungsempfehlungen zur Digitalisierung der Ortsbrust. Die entwickelten Systeme wurden umgesetzt und haben sich bewährt. Ich leitete zweieinhalb Jahre lang ein siebenköpfiges Projektteam als Product Ownerin. Das entwickelte System wird bis heute auf allen Tunnelvortriebsbaustellen von Porr eingesetzt, einschließlich des Brennerbasistunnels – was mich besonders freut, denn für Tunnelbauer ist das „der Place to be“. Mein Weg führte mich dann in die Digital Unit und schließlich in den Innovationsbereich der Porr. Ich habe mich in diesem Bereich weitergebildet und erhielt die Aufgabe, ein Innovationsteam aufzubauen und Innovationsmethoden im Unternehmen zu etablieren. Heute leite ich ein neunköpfiges Team, das in zwei Ländern vertreten ist – Deutschland und Österreich. Wir arbeiten jedoch für den gesamten Porr-Konzern. In Deutschland sind wir an der RWTH Aachen aktiv, wo wir 2019 das Studium „Construction Robotics“ mitgestaltet haben. Ich durfte dort als Vortragende tätig sein. Unsere Forschungsbaustelle umfasst 10.000 m² und wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für individualisierte Bauproduktion unter Leitung von Prof. Sigrid Brell-Cokcan entwickelt. Zwei meiner Mitarbeiterinnen arbeiten weiterhin vor Ort an der RWTH Aachen und forschen im Bereich „Construction Automation and Robotics“ – also genau das richtige Thema für unser heutiges Gespräch.

Soleman Haj Bakour: Wie du sagtest, Innovation kann vieles sein. Automatisierung kann Robotik bedeuten, aber wir können uns auch von anderen Bereichen inspirieren lassen. Meine erste Frage ist eine klassische: Was fasziniert dich an Robotik besonders? Und was motiviert dich, in den Bereichen Automatisierung und Robotik zu arbeiten?

Karina Schiefer: In der Bauindustrie ist Robotik ein spannendes, aber für viele noch sehr fernes Zukunftsthema. Gerade diese Herausforderung finde ich interessant – etwas Wirklichkeit werden zu lassen, das heute noch nicht existiert.

Warum speziell im Bauwesen? Ich sehe zwei Aspekte:

- Die Menschen im Bauwesen: Menschen, die auf Baustellen arbeiten, sind oft schöpferische und rebellische Persönlichkeiten. Sie erschaffen in kurzer Zeit beeindruckende Bauwerke, die unseren Planeten nachhaltig verändern. Ein Tunnel zum Beispiel bedeutet, dass man an einem Ort ist, an dem zuvor kein Mensch war – das ist faszinierend. Die Kombination aus Menschen und Robotik stellt für mich die Königsdisziplin dar: eine Koexistenz, in der Mensch und Maschine gemeinsam einen Mehrwert schaffen.
- Technologie und Prozesse: Um einen Prozess mit einer Maschine zu erleichtern, muss man ihn sehr gut verstehen. Der Prozess muss wiederholbar, standardisierbar und planbar sein. Hier liegt die große Herausforderung in der Bauindustrie: Oft gibt es unvorhersehbare Faktoren, verspätete Planungen oder laufende Änderungen. Das steht im starken Gegensatz zur Automobilindustrie, wo klare Standards herrschen.

Meine Motivation liegt darin, Ungewissheit zu reduzieren, Menschen in ihrer Arbeit zu entlasten und letztlich die Bauindustrie effizienter zu gestalten. Robotik kann repetitive oder körperlich belastende Aufgaben übernehmen, sodass Menschen sich auf spannendere Tätigkeiten konzentrieren können – und dabei gesund alt werden.

Soleman Haj Bakour: Ich stimme dir absolut zu. Ein weiterer Punkt, den ich für möglich halte, ist, dass Robotik langfristig zur Senkung der Baukosten beitragen könnte – und damit indirekt vielleicht sogar zur Reduzierung der Immobilienpreise. Wenn Robotik effizient etabliert wird, könnte sie Kosten sparen. Natürlich muss das erst noch bewiesen werden, aber es ist eine Überlegung wert.

Karina Schiefer: Ja, das könnte sein. Allerdings wird es wohl noch viel Zeit brauchen, bis wir tatsächlich eine Kostenersparnis durch Robotik sehen. Es gibt viele Einflussfaktoren, die nicht direkt mit der Bauweise zu tun haben – etwa Materialpreise, Transportkosten und Logistik.

Soleman Haj Bakour: Das stimmt. Deshalb ist es wichtig, alle relevanten Aspekte genau zu untersuchen und zu verstehen.

Du hast erwähnt, dass du Teams in Deutschland und Österreich leitest und mit der RWTH Aachen zusammengearbeitet hast. War das im Rahmen von Forschungsprojekten?

Karina Schiefer: Ja, wir waren an Konsortialprojekten im Center Construction Robotics beteiligt, aber auch an bilateralen und direkten Forschungsprojekten. Diese Projekte führten teilweise zu Pilotierungen, die direkt auf Baustellen getestet wurden.

Soleman Haj Bakour: Okay, und wie war das genau? Ihr wart also direkt auf Baustellen tätig? Kannst du mir vielleicht mehr über eure Erfahrungen erzählen? Welche Projekte habt ihr konkret umgesetzt?

Karina Schiefer: Meinst du im Sinne von Forschung auf Baustellen oder in welchem Kontext?

Soleman Haj Bakour: Ja, genau. Also speziell das, was ihr in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen gemacht habt.

Karina Schiefer: Einer unserer Hauptbereiche war „Construction – Automated Assembly“. Dabei ging es darum, Bauteile automatisiert zu montieren, insbesondere in gefährlichen Bereichen wie dem Rückbau von Atomkraftwerken. Ziel war es, diese Prozesse zu automatisieren, um gesundheitliche Risiken für Menschen zu minimieren.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Bauteilannahme und Montage – also der Frage, wie angelieferte Bauteile weiterverarbeitet werden, insbesondere was am Kran hängt und wie der gesamte Ablauf automatisiert werden kann, auch durch Robotik.

Außerdem haben wir uns mit Revitalisierung und Recycling beschäftigt, speziell mit Ansätzen zur automatisierten Demontage von Innenausbauelementen. Dabei geht es darum, Baumaterialien sortierter und weniger zerstörerisch abzubauen als bisher, wo noch viel manuelle Arbeit nötig ist. Roboter können dabei mehr Kraft aufbringen und das Material gezielter separieren.

Soleman Haj Bakour: Okay, sehr spannend!

Warum ich das frage: Ich möchte darauf aufbauen und das Thema in meiner Diplomarbeit weiter vertiefen.

Karina Schiefer: Das waren im Wesentlichen die drei Hauptbereiche.

Soleman Haj Bakour: Lass uns mit dem Thema Sicherheit bei Baurobotern beginnen. Wir haben ja bereits erwähnt, dass Bauroboter ein wichtiges Zukunftsthema sind und eine neue Technologie auf Baustellen darstellen.

Wir können uns bereits einige potenzielle Risiken vorstellen, aber mich interessiert besonders deine Einschätzung: Welche Risiken entstehen aus deiner Sicht durch die direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter? Und können auch bei einer indirekten Interaktion Risiken auftreten?

Karina Schiefer: Ich sehe verschiedene Risiken, die berücksichtigt werden müssen, um Robotik auf Baustellen sicher und erfolgreich einzusetzen.

Ein erstes Risiko ist die Angst der Arbeiterinnen und Arbeiter vor Ort. Diese Ängste werden derzeit medial verstärkt – es gibt Hersteller, die Roboter mit dem Versprechen bewerben, dass sie schneller als Menschen arbeiten können. Das kann den Eindruck erwecken, dass menschliche Arbeitskräfte überflüssig werden.

Das führt zu Unsicherheiten: Werden sie ihren Job verlieren? Wird ihre Qualifikation in Zukunft noch gebraucht?

Daher müssen wir in der Kommunikation über den Einsatz von Robotik auf Baustellen besonders sensibel vorgehen. Es geht nicht darum, Menschen zu ersetzen, sondern ihre Arbeit zu erleichtern und sie zu unterstützen.

Unsere Vision bei PORR ist es nicht, Personal zu reduzieren, sondern vielmehr, die bestehende Belegschaft gesund und leistungsfähig bis ins hohe Pensionsalter zu begleiten – ohne körperliche oder mentale Belastungen.

Zudem wird aufgrund des demografischen Wandels die Zahl der Arbeitskräfte auf Baustellen weiter sinken. Daher brauchen wir neue Technologien wie Robotik, um auch mit weniger Personal weiterhin produktiv zu bleiben.

Das zweite Risiko betrifft die direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter.

Hier stellt sich die Frage: Was ist planbar und was nicht?

Es gibt standardisierbare und gut vorhersagbare Prozesse, aber auch unvorhersehbare Situationen, auf die wir vorbereitet sein müssen.

Ein Roboterarm kann beispielsweise nicht eigenständig erkennen, ob sich eine Person im Weg befindet – dafür sind entsprechende Sensoren notwendig, um die Sicherheit zu gewährleisten.

In Fabriken lässt sich dieses Problem relativ leicht lösen, indem Menschen aus bestimmten Bereichen ausgeschlossen werden („Dark Factories“). Doch auf Baustellen ist das nicht realistisch. Wir können keine Zonen einrichten, die nur für Roboter zugänglich sind.

Stattdessen müssen wir durch Sicherheitsmaßnahmen wie akustische Signale, Lichtanzeigen und klare Bedienkonzepte sicherstellen, dass Menschen und Roboter gefahrlos zusammenarbeiten können.

Ich bin überzeugt, dass wir noch weit von vollständig autonomen Robotern entfernt sind. Ein Mensch wird weiterhin benötigt, um den Betrieb zu überwachen und sicherzustellen, dass alle Gewerke und beteiligten Personen sich sicher im Umfeld der Maschinen bewegen.

Darüber hinaus brauchen wir einfache, verständliche Schulungsmaterialien – keine dicken Handbücher, sondern kurze, einprägsame Videos, die leicht zu konsumieren sind, etwa im Stil von TikTok. Die Inhalte müssen verdeutlichen:

- Wo darf ich mich auf der Baustelle bewegen?
- Wo sollte ich Abstand halten?
- Was passiert, wenn ich mich zu nah an einen Roboter herabewege?
- Wie verhindere ich, dass der Roboter unabsichtlich gestört oder unterbrochen wird?

Zusätzlich muss es Notfallpläne geben, falls doch einmal eine unerwartete Situation eintritt.

Soleman Haj Bakour: Du hast das Wort „Sensoren“ erwähnt, insbesondere in anderen Industrien oder in Fabriken. Wir wissen, dass Baustellen sehr dynamische Umgebungen sind, in denen sich die Bedingungen ständig ändern.

Ich bin kein Sensorik-Experte, aber meiner Meinung nach spielen Sensoren eine entscheidende Rolle, weil sie für Roboter quasi die Augen sind. Sie ermöglichen es Robotern, ihre Umgebung wahrzunehmen und mit ihr zu interagieren.

Die Frage ist jedoch, ob wir diesen Sensoren in solch einem variablen Umfeld wirklich vertrauen können – zum Beispiel bei Regen, Nebel oder anderen schwierigen Wetterbedingungen. Das ist besonders wichtig in Bezug auf die Sicherheit. Was denkst du dazu?

Karina Schiefer: Vertrauen in die Sensorik ist ein wichtiger Faktor. Ich denke, dass wir derzeit noch nicht bei 100 % sind – und vielleicht werden wir das auch nie erreichen.

Ein Vergleich: Früher hatten Autos nur einfache Einparkhilfen mit akustischen Signalen. Das war nicht besonders präzise, aber es hat zumindest eine Orientierung geboten. Heute gibt es autonomes Fahren, und Autos bewegen sich in einer Umgebung, die einer Baustelle ähnelt – sie müssen mit wechselnden Bedingungen, Menschen, Nässe, Staub und Nebel zurechtkommen.

Auch wenn es auf Baustellen vielleicht noch herausfordernder ist, entwickelt sich die Sensorik weiter und wird zunehmend an diese Umgebungen angepasst.

Seit 2022 sehe ich einen klaren Trend zur Robotik auf Baustellen. Dabei müssen Sensorik-Hersteller eng mit Bauunternehmen als Prozessverantwortlichen zusammenarbeiten, um Lösungen kontinuierlich zu verbessern.

Es gibt bereits gute Sensoren, aber wir sind noch nicht auf dem gewünschten Niveau in Bezug auf Produktivität und Sicherheit. Das Vertrauen wird mit der Zeit wachsen, sobald die Technik besser funktioniert.

Soleman Haj Bakour: Das heißt, das ist also eher eine Frage der zukünftigen Entwicklung der Sensorik. Aber ein weiteres wichtiges Thema ist die Verantwortung im Falle eines Unfalls. Wer trägt dann die Schuld?

Ist es der Programmierer? Der Sensoren Hersteller? Oder vielleicht der Bauarbeiter, der eine Sicherheitsregel bewusst missachtet hat?

Wie siehst du die Verantwortlichkeiten in diesem Bereich?

Karina Schiefer: Das ist eine sehr schwierige Frage, und ich kenne bisher keine klare Antwort darauf. Man kann hier Parallelen zum autonomen Fahren ziehen – auch dort ist noch nicht eindeutig geklärt, ob der Hersteller, der Fahrer oder jemand anderes für Unfälle haftet.

Für mich ist die zentrale Frage: Wer hat die Kontrolle? Wer die Kontrolle über eine Maschine hat, trägt auch einen großen Teil der Verantwortung.

Wahrscheinlich wird es in Zukunft Baustellenstandards geben, nach denen nur bestimmte „Robot-Ready“-Baustellen oder speziell geschulte Arbeiter mit Robotern arbeiten dürfen.

Der Hersteller kann sich aus meiner Sicht nicht völlig aus der Verantwortung ziehen, da Fehler, die in der Maschine oder der Programmierung liegen, nicht von Bauarbeitern erkannt oder verhindert werden können.

Es wird eine gemeinsame Verantwortung geben, und wir werden noch viel lernen müssen, um damit umzugehen.

Soleman Haj Bakour: Die rechtliche Frage bleibt jedoch eine große Herausforderung. In meinem Bachelorstudium hatten wir nur einen Kurs dazu, und ich bin mir sicher, dass es in anderen Industrien bereits gesetzliche Regelungen gibt.

Sicherheit ist ein großes und wichtiges Thema.

Du hast bereits einige Punkte zur Risikovermeidung erwähnt, aber ich würde gerne noch einmal konkret nachfragen: Welche technologischen Lösungen oder Maßnahmen wären notwendig, um die Risiken im Umgang mit Robotern auf Baustellen zu minimieren?

Karina Schiefer: Wichtig sind klare Systemgrenzen – alle Beteiligten müssen wissen, was das System leisten kann und wo seine Grenzen sind.

Es muss transparent gemacht werden, welche Einsätze für die Roboter geeignet sind und welche nicht.

Zudem braucht es Zeit für Schulungen und Aufklärung, damit Sicherheitsaspekte nicht ignoriert werden.

Technologisch gesehen müssen wir uns stärker auf notwendige Sensorik konzentrieren, statt immer nur neue Sensoren hinzuzufügen und zu testen, ob es reicht.

Das Hauptziel muss sein, tödliche Unfälle zu verhindern. Ein einziger solcher Fall würde das Vertrauen in die Technologie massiv beschädigen und könnte dazu führen, dass niemand mehr bereit ist, neue Lösungen zu testen. Deshalb müssen wir sehr sorgfältig vorgehen.

Soleman Haj Bakour: Die Frage: Was ist planbar und was nicht?

Das ist für meine Diplomarbeit besonders relevant. Es gibt eine Norm, die eine Formel zur Berechnung eines Sicherheitsabstands vorgibt. Ich habe sie mit angenommenen Werten getestet – nicht mit echten Werten, aber mit realistischen Annahmen basierend auf anderen Robotern.

Dabei kam ich auf einen Sicherheitsabstand von 3 Metern, plus 5 Meter für den Arm von (Walter), also insgesamt 7,38 Meter.

Ich finde diesen Wert ehrlich gesagt viel zu hoch – insbesondere, wenn mehrere Roboter auf einer Baustelle eingesetzt werden. Letzten Sommer waren Niklas und ich in (Pelhřimov), wo es (drei Roboter) auf der Baustelle gab. Wenn jeder Roboter einen Sicherheitsbereich von 7 Metern hat, ist das eine enorme Einschränkung.

Natürlich handelt es sich dabei um eine horizontale Annäherung – es gibt aber auch vertikale Annäherungen, wie etwa bei Doka.

Ein gutes Beispiel, um diese Problematik zu verdeutlichen, ist der Bewehrungsbau: Hier arbeiten oft mehrere Gewerke gleichzeitig, beispielsweise die Eisenbieger. Die Frage ist: Kann man das planen (Sicherheitsabstand von 7,38 Meter) oder nicht? Macht es Sinn oder nicht?

Was würdest du in einer solchen Situation empfehlen, wenn der Platz knapp ist und es zu Kollisionen zwischen den Gewerken kommen könnte?

Karina Schiefer: Ja, ca. 8 Meter sind tatsächlich eine große Einschränkung. Aber für mich steht hier der Schutz der Menschen an erster Stelle – vor der technischen Umsetzung. Wenn dieser Abstand erforderlich ist, dann muss er eingehalten werden. Ich sehe das nicht als Hindernis, sondern als Herausforderung – insbesondere in Europa.

Ich hatte die Gelegenheit, im Rahmen meines Lean-Baumanagement-Studiums nach Japan zu reisen und dort mehrere Baustellen zu besichtigen – im Rahmen einer WKO-

Wirtschaftsdelegation. Ich war überrascht, dass Japan trotz seiner technologischen Fortschritte keinen wesentlich höheren Digitalisierungsgrad auf Baustellen hat. Die Maschinen und Prozesse sind unseren sehr ähnlich.

Der große Unterschied liegt in der Organisation der Menschen vor Ort. Wir haben alle Gewerke und alle Bauphasen gesehen – von Brückenbau über Hochbau, Fundamentierungen bis hin zu Rückbauarbeiten.

Ich glaube nicht, dass wir in Österreich jemals japanische Standards haben werden – unsere Mentalität ist einfach anders.

Aber: In Japan wäre es kein Problem, einen definierten 8-Meter-Radius um eine Maschine einzuhalten – niemand würde diesen Bereich betreten.

Das ist eine Frage der Einstellung und Organisation.

In Japan gibt es markierte Gehwege – selbst auf Bewehrungsflächen von 2000 m². Diese Bereiche sind absolut frei von Material und Hindernissen, sodass man sich dort sicher bewegen kann.

Das bedeutet, dass man nicht überall hinmuss – und dass die Menschen sich bewusst zurückhalten, wenn es notwendig ist.

Dieses Denken muss sich auch bei uns durchsetzen, wenn wir mit Baurobotern arbeiten wollen.

Wir können nicht erwarten, dass alles so bleibt wie heute und gleichzeitig modernste Maschinen einsetzen. Wir müssen uns anpassen – genauso wie die Maschinen.

Es muss klare Regeln für die Interaktion mit Robotern geben – sowohl für die Menschen als auch für die Maschinen.

Andere Länder zeigen, dass das möglich ist – und das gibt mir große Hoffnung.

Soleman Haj Bakour: Ja, das stimmt auf jeden Fall.

Mein Vorschlag wäre, eine ****redundante Sicherheitsmaßnahme**** einzuführen:

Statt den Roboter sofort zu stoppen, könnte es eine ****mehrstufige Sicherheitsreaktion**** geben:

- Erstes Warnsignal – damit die Person selbst reagieren** kann.
- Reduzierte Geschwindigkeit des Roboters – falls sich die Person weiter nähert.
- Kompletter Stopp – wenn die Person sich nicht zurückzieht.

Das könnte eine sinnvolle Lösung sein.

Karina Schiefer: Ja, es ist wichtig, dass es klare Sichtfelder gibt.

Wenn Menschen nicht eindeutig erkennen können, ob sie sich im richtigen oder falschen Bereich befinden, wird es schwierig.

Hier könnten Beleuchtungssysteme helfen – zum Beispiel Blinklichter, die aufleuchten, wenn jemand sich nähert.

Zusätzlich könnte es ein System geben, das erkennt, wer in den Bereich eintritt, um daraus Lernprozesse abzuleiten:

- Warum ist diese Person in den gesperrten Bereich gegangen?
- War es bewusst oder versehentlich?
- Kann eine Nachschulung helfen?

In Europa könnte sich das schwieriger gestalten als in anderen Ländern, weil bei uns oft das Individuum im Mittelpunkt steht, anstatt das große Ganze.

Ein Beispiel dafür: In Japan gibt es kaum Verkehrsverstöße – dort fährt niemand zu schnell oder bei Rot über die Straße. In Europa wissen wir zwar, dass 130 km/h das Tempolimit ist, aber viele halten sich nicht daran.

Diese Mentalität ist eine Herausforderung für Sicherheitsmaßnahmen im Bauwesen – denn Bauroboter können eine große Gefahr darstellen, wenn Menschen sich nicht an Regeln halten. Deshalb braucht es ein Umdenken – der Selbstschutz muss wichtiger sein als der kürzeste Weg oder Bequemlichkeit.

Soleman Haj Bakour: Sicherheit ist ein sehr wichtiges Thema, und meiner Meinung nach muss man in allen Bereichen einfach ausprobieren. Es ist essenziell, neue Technologien direkt auf die Baustelle zu bringen. Du hast Schulungen und Nachschulungen erwähnt, was eine gute Überleitung zum nächsten Thema ist: Neue Rollen und Schulungen.

Du hast mit Aachen zusammengearbeitet? Das finde ich spannend!

Du hast erwähnt, dass du mit zwei Teams und insgesamt neun Personen gearbeitet hast. Das ist nicht wenig – ihr habt bestimmt einiges gelernt.

Was braucht es, damit jemand in diesem Bereich arbeiten kann? Welche Kompetenzen sind notwendig?

Ein Beispiel: Ich kenne Elke, sie kommt – genau wie ich – aus dem Bauwesen. Welche neuen Kenntnisse musste sie sich aneignen, um in diesem Bereich arbeiten zu können, sei es in der Automatisierung oder speziell in der Robotik?

Und das bringt mich zur zentralen Frage: Welche Kompetenzen benötigen Bauingenieure oder Bauarbeiter in diesem Kontext?

Karina Schiefer: Das ist eine wichtige Frage, und es gibt verschiedene Ebenen und Rollen, die sich in diesem Bereich entwickeln.

Du hast Elke als Beispiel genannt. Ich denke nicht, dass jeder das gleiche Wissen haben muss wie jemand, der direkt im Innovationsmanagement oder im Construction Automation and Robotics-Team arbeitet. Diese neuen Rollen sind Schnittstellenfunktionen – man ist quasi Botschafterin, Übersetzerin und Fachexpertin gleichzeitig.

Ziel ist es, Robotik in die Baupraxis zu bringen und die Bedürfnisse der Baustellenmitarbeiter: innen so zu vermitteln, dass sowohl Forschung und Entwicklung (an Universitäten) als auch Hersteller und Start-ups sie verstehen.

Die entscheidende Frage ist: Was braucht es, damit Bauroboter tatsächlich einsatzfähig auf Baustellen werden? Dafür sind folgende Kernkompetenzen essenziell:

- Technisches Verständnis auf detailiertem Niveau – sowohl für die Baupraxis als auch für die Entwicklungsteams.
- Sprache der Baustelle sprechen – verstehen, wo die Herausforderungen liegen.
- Sprache der Programmierer: innen und Hersteller verstehen – wissen, wohin sich der Markt entwickelt.
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit – Robotik in der Baubranche kann nur gemeinsam weiterentwickelt werden, nicht durch isolierte Lösungen.

Es braucht Basis-Skills aus mehreren Bereichen: Maschinenbau, Informatik, Wirtschaftsingenieurwesen und Bauingenieurwesen. Man muss auch das Baustellenumfeld selbst kennen – um zu verstehen, welche Herausforderungen Bauarbeiter haben.

Für Baustellenmitarbeiter: innen braucht es ein fundiertes Verständnis über den Einsatz, die Grenzen und die Vorteile von Robotern im Vergleich zu anderen Maschinen.

Das ist entscheidend für Ausschreibungen und Planungen: Wenn man nicht genau weiß, wann eine Lösung tatsächlich passt, wird sie oft aus Prestige Gründen oder falschen Annahmen implementiert – dann ist es kein „Solution Fit“.

Das Ziel ist nicht, einfach nur Roboter einzuführen – sondern bestehende Probleme effizienter zu lösen. Bisher konnte man auch bohren, schleifen oder vermessen, aber mit höherem Ressourcenaufwand und oft weniger Präzision. Die Robotik soll genau hier ansetzen und einen echten Mehrwert schaffen.

Daher ist eine entsprechende Schulung und Ausbildung auf allen Ebenen essenziell:

- HTL, Lehre und Universitäten sollten darauf ausgerichtet sein, die Auswahl und den sinnvollen Einsatz von Robotern zu vermitteln.
- Baustellen-Teams müssen spezifische Schulungen für den sicheren Umgang mit den neuen Maschinen erhalten.

Ein gutes Beispiel ist Porr – wir haben bereits einen Baugeräte-Simulator für bestehende Maschinen. Dadurch können Lehrlinge lernen, wie sie Baugeräte bedienen, ohne Schaden anzurichten. Das gleiche Prinzip wollen wir für Robotik-Technologien anwenden, um das Wissen in den Baustellen-Teams zu verankern.

Soleman Haj Bakour: Also braucht es definitiv Schulungen – verstehe ich das richtig? Bedeutet das auch eine kontinuierliche Nachschulung?

Karina Schiefer: Ja, 100%! Und es wird nicht mit einer einmaligen Schulung getan sein. Es braucht kontinuierliche Fort- und Weiterbildung, weil wir noch am Anfang dieser Entwicklung stehen.

Mit jedem neuen Gerät, jedem neuen Gewerk und jedem neuen Anbieter müssen alle Beteiligten ihr Wissen ergänzen – vom Auftraggeber bis zur Baustelle.

Das ist ein langer Weg, und es gibt viele Hürden. Aber es ist eine notwendige Entwicklung.

Soleman Haj Bakour: In meiner Masterarbeit schlage ich vor, dass Universitäten spezielle Kurse zu diesem Thema anbieten.

Ich sehe das ähnlich wie du – es geht um eine gemeinsame Sprache für alle Beteiligten:

- Programmierer:innen
- Hersteller
- Baustellenmitarbeiter:innen

Vor 20 Jahren hätte niemand gedacht, dass Grundlagen der Programmierung im Bauwesen eine Rolle spielen. Heute ist das anders.

Mein Vorschlag ist nicht gleich ein eigener Studiengang, aber zumindest einige spezialisierte Kurse mit ECTS-Punkten, um das Thema sinnvoll in die Lehre zu integrieren.

Du hast erwähnt, dass in Aachen etwas Ähnliches gemacht wurde. Kannst du mir dazu mehr erzählen? Vielleicht kann ich einige Ideen übernehmen.

Karina Schiefer: Ja, dazu gibt es den Masterstudiengang "Construction Robotics" an der RWTH Aachen.

- 4 Semester, 90 ECTS
- Interdisziplinär: Studierende aus Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau und Informatik arbeiten zusammen.
- Projektbasiertes Lernen: In jedem Semester gab es Teams aus diesen vier Disziplinen, die reale Forschungsprojekte zu Baurobotik bearbeitet haben.
- Beispiele für Projekte:
 - o Mobile Fabriken
 - o Arbeitssicherheit
 - o VR-gestützte Trainingssysteme (z. B. ein Spiel, bei dem man sich zuerst korrekt ausrüstet, bevor man eine Maschine bedienen kann)

Leider wird der Studiengang derzeit wegen interner Umstrukturierungen nicht weitergeführt – aber das liegt nicht am Inhalt. Ich halte das Konzept für extrem wertvoll, weil es genau diese Spezialist:innen ausbildet, die wir in Bauunternehmen, Planungsbüros und bei Herstellern brauchen.

Für andere Ausbildungsbereiche könnte man eine Zertifizierung nach Vorbild eines Kran- oder Baggerscheins entwickeln – eine Art "Robotik-Operator-Lizenz".

Bei Porr nutzen wir ein internes System namens I-Shape, in dem alle Ausbildungen und Zertifizierungen unserer Mitarbeitenden dokumentiert sind. So wissen wir genau, wer welche Maschinen bedienen darf.

Wir wünschen uns, dass auch die Hersteller solche Schulungsangebote mitentwickeln, sodass Baustellen-Teams vor der ersten Nutzung eines Roboters entsprechende Einführungen und Zertifizierungen durchlaufen können.

Soleman Haj Bakour: Aus deiner Erfahrung heraus, welche Lehrmethode hältst du für die beste? Du hast VR-Games erwähnt, aber es gibt auch Theorie und Praxis. Welche Methode hat sich für dich am besten bewährt?

Karina Schiefer: Ich würde nicht sagen, dass es eine beste Methode gibt, aber für mich funktioniert besonders gut ein praxisnahes „Hands-on“-Lernen in einem geschützten Umfeld. Studierende sollten die Möglichkeit haben, Dinge auszuprobieren, viele Fragen zu stellen und von echten Fachleuten auf der Baustelle zu lernen.

Wir haben an der RWTH Aachen ein „Construction Robotics Internship“ angeboten, bei dem über 30 Studierende auf Baustellen praktische Erfahrungen gesammelt haben. Sie wurden zu Beginn intensiv auf ihre Aufgaben vorbereitet und haben dann durch Beobachtung, Gespräche und aktives Mitarbeiten relevante Problemstellungen identifiziert und Lösungen entwickelt. Dabei wurden auch Prototypen gemeinsam mit den betroffenen Personen vor Ort erarbeitet.

Diese Kombination aus Forschung, Entwicklung und Praxis hat sich als äußerst effektiv erwiesen, insbesondere durch den Austausch zwischen erfahrenen Fachkräften („alte Hasen“) und jungen Studierenden mit neuen Perspektiven und technologischen Ansätzen.

Zurück zur TU Wien: Ich sehe eine große Lücke, was praxisnahe Programme wie das Construction Robotics Internship betrifft, und ich wäre sehr interessiert, daran mitzuarbeiten. Dafür braucht es aber die richtigen Köpfe an der TU Wien. Ich habe gesehen, dass dort gerade ein neuer Masterstudiengang für Digitalisierung im Bau gestartet wurde, allerdings nicht mit Fokus auf Robotik.

Soleman Haj Bakour: Danke, zurück zum nächsten Thema: Produktivität. Produktivität ist für mich der Hauptgrund, warum Roboter auf Baustellen eingesetzt werden. Wir haben an der Uni das „magische Dreieck“ gelernt: Zeit, Kosten und Unsicherheit. Die Digitalisierung verspricht, dieses Verhältnis zu verbessern. Meine Frage ist: Können Roboter dazu beitragen, diese Probleme zu eliminieren?

Karina Schiefer: Ich erwarte mir einen Produktivitätsschub, aber nicht nur durch den Roboter selbst, sondern durch die damit einhergehenden veränderten Prozesse. Um Roboter effizient einzusetzen, braucht es eine frühzeitige, detaillierte Planung. Dadurch verlassen wir das klassische rollierende Planungsprinzip und wissen bereits zu Projektbeginn, was, wann und wie gebaut wird – mit enormem Datenhintergrund und Simulationen. Der Produktivitätsgewinn entsteht also nicht nur durch den Roboter, sondern durch eine ganzheitlich effizientere Bauweise, die ressourcenschonender, schneller und besser planbar ist.

Soleman Haj Bakour: Es gibt verschiedene Werte, Produktivität zu messen – etwa durch Unterbrechungen, Verschwendungszeit, Geschwindigkeit oder Qualität. Meine Frage basiert auf folgender Annahme: Wenn ein Roboter die gleiche Qualität und Geschwindigkeit wie ein Mensch erreicht, können wir dann nicht trotzdem sagen, dass wir produktiver geworden sind, da nicht mehr der Mensch, sondern eine Maschine arbeitet?

Karina Schiefer: Woran misst du die Produktivität in diesem Fall?

Soleman Haj Bakour: An der Gesundheit.

Karina Schiefer: Ja, in Bezug auf die Gesundheit absolut! Wenn der Mensch nicht mehr im Dreck und Staub steht und körperlich entlastet wird, bringt das einen großen Vorteil. Aber ich glaube nicht, dass Roboter derzeit gleich schnell, präzise und effizient wie Menschen arbeiten – zumindest nicht ohne eine grundlegende Veränderung der vor- und nachgelagerten Prozesse. Das wäre für mich eine Utopie.

Soleman Haj Bakour: Ich denke, wenn Roboter bestimmte Aufgaben übernehmen, insbesondere Hebetätigkeiten oder andere repetitive und unbeliebte Aufgaben, dann hat die mehrere Vorteile. Erstens müssen Menschen keine körperlich belastenden Arbeiten mehr verrichten und können sich auf andere Tätigkeiten konzentrieren. Zweitens sind die Arbeiter am Ende des Tages weniger erschöpft, können ihr Privatleben aktiver gestalten und sind insgesamt zufriedener. Und ein zufriedener Mitarbeiter ist letztlich auch produktiver. Es geht also nicht nur um körperliche, sondern auch um psychologische Gesundheit. Diese beiden Aspekte sind eng miteinander verknüpft. Wenn Bauarbeiter weniger erschöpft sind und ihre Tätigkeiten angenehmer werden, kann das zu einer höheren Produktivität auf der Baustelle führen. Sie arbeiten effizienter und schneller, weil sie zufriedener sind. Ich hoffe, du verstehst, worauf ich hinaus will?

Karina Schiefer: Ja, das ist eine schöne Vorstellung. Wenn wir das erreichen, hätten wir eine gesteigerte Produktivität, weniger Arbeitsunfälle und gesündere Kollegen. Gefährliche oder körperlich schwere Arbeiten würden dann von halbautomen oder vollautomatischen Maschinen übernommen werden. Aber das ist natürlich ein ideales Szenario.

Soleman Haj Bakour: Ich komme zurück zum eigentlichen Thema. In den Interviews versuche ich, keine klassischen Frage-Antwort-Situationen zu schaffen, sondern ein offenes Gespräch zu führen. Wir waren bei der Produktivität und haben vorher auch Sicherheit, Vertrauen und Akzeptanz angesprochen. Meine Frage ist: Wie hängen diese drei Faktoren zusammen?

Ich erinnere mich an den letzten Workshop, in dem ich von "zu viel Sicherheit" gesprochen habe. Stephanie hatte mich da korrigiert – zu Recht. Aber dennoch denke ich, dass es einen Punkt gibt, an dem zu viele Sicherheitsmaßnahmen einen negativen Einfluss auf die Produktivität haben können. Genauso kann auch zu viel Vertrauen zu einem negativen Effekt führen. Würdest du das auch so sehen?

Karina Schiefer: Ja, ich denke, dass ein zu hoher Sicherheitsanspruch uns in der Forschung und Praxis tatsächlich bremsen kann.

Wir stehen vor einem Henne-Ei-Problem: Wenn wir neue Technologien nur dann testen dürfen, wenn bereits alle denkbaren Sicherheitsvorkehrungen erfüllt sind – die es aber noch gar nicht gibt –, dann kommen wir nicht voran.

Deshalb brauchen wir Vorreiter, die bereit sind, diese neuen Technologien zu erproben, selbst wenn das mit Risiken verbunden ist. Natürlich müssen die Beteiligten über die Risiken informiert werden, aber genau diese Tests sind notwendig, um Vertrauen aufzubauen. Sicherheit, Vertrauen und Akzeptanz wachsen gemeinsam. Ohne Vertrauen gibt es keine Akzeptanz. Und je höher die Akzeptanz ist, desto mehr Vertrauen haben die Menschen in die Lösung und die Sicherheitsmaßnahmen.

Ein Beispiel: Es gibt Systeme, die Maschinen automatisch verlangsamen, wenn sich ein Mensch nähert. Das erhöht die Sicherheit, senkt aber die Produktivität. Aber die eigentliche Frage ist: Warum musste der Mensch überhaupt in diesen Bereich?

Es gibt drei Szenarien:

- Absichtliches Stören – wie beim Test des autonomen Busses in der Seestadt Wien. Menschen haben sich absichtlich in den Weg gestellt, um den Bus zu stoppen. Das ist ein reines Akzeptanzproblem.
- Notwendige Tätigkeit – Ein Mensch muss wirklich in den Bereich, weil es keinen anderen Weg gibt. Dann ist die Reduktion der Maschinenleistung gerechtfertigt.
- Unbewusstes Verhalten – Eine Person betritt den Bereich, ohne zu wissen, dass sie dadurch die Maschine verlangsamt. Das zeigt ein Informationsdefizit.

Letztlich hängt es immer von der Umgebung, der Tätigkeit und den Menschen ab, nicht nur von der Maschine selbst.

Die Optimierung dieser Faktoren braucht Zeit. Aber lieber starten wir sicher und passen uns schrittweise an, als durch ein Unglück zu lernen, dass unsere Maßnahmen nicht ausreichen.

Soleman Haj Bakour: „Ich verstehe das, aber was den Punkt mit zu viel Vertrauen betrifft – glaubst du nicht, dass es auch zu einer Verringerung der Produktivität führen könnte? Es muss nicht zwangsläufig so sein, aber es könnte passieren. Ich gebe ein Beispiel: Wir haben das auf der Baustelle erlebt. Ich selbst habe aktiv an der Herstellung mitgewirkt und weiß daher genau, wie die Maschine funktioniert.“

Es gibt oft Leute, die sagen: ‚Ich arbeite schon seit drei, vier oder fünf Jahren mit dieser Maschine und kenne sie in- und auswendig.‘ Doch genau dieses zu große Vertrauen – nicht nur in die Maschine, sondern auch in sich selbst – kann dazu führen, dass man kleine, aber wichtige Details übersieht.

Ein gutes Beispiel ist ein erfahrener Koch: Er kocht jeden Tag und weiß genau, was er tut, aber genau deshalb denkt er manchmal nicht an bestimmte Dinge. Und dann passiert es – er schneidet sich in den Finger oder verbrennt sich.“

Karina Schiefer: „Ja, genau! Das passiert oft. Ein erfahrener Koch kann sich trotzdem schneiden oder verbrennen. Das Problem liegt für mich weniger im Vertrauen selbst, sondern eher in der Selbstüberschätzung. Man denkt: ‚Ich mache das jeden Tag, ich kenne das auswendig‘ – und genau dieses Denken führt zu Fehlern.“

Das sieht man auch bei Verkehrsunfällen: Die meisten Unfälle passieren, wenn jemand allein auf einer leeren Straße fährt. Warum? Weil man sich weniger konzentriert. Auch viele Unfälle auf dem Weg zur Arbeit passieren auf den letzten Metern vor dem eigenen Zuhause. Die Menschen sind in einer vertrauten Umgebung, überschätzen ihre Routine und werden nachlässig.

Dasselbe gilt für Baustellen. Ich habe einmal einen jungen Kollegen im Tunnelbau verloren. Er arbeitete in einer zyklischen Mannschaft im Vortrieb und führte jeden Tag dieselbe Tätigkeit mehrfach aus. Doch eines Tages war er für einen Moment unachtsam – und das hat ihn das Leben gekostet.

Solche Unfälle passieren auch im Umgang mit Baumaschinen: Wie bewegt man sich um einen Bagger oder einen Bohrwagen? Wie steigt man sicher von einer Maschine ab? Viele erfahrene Maschinenführer verletzen sich, weil sie sich in ihrer Routine zu sicher fühlen – sie sitzen seit 40 Jahren auf dem Bagger und machen plötzlich einen fatalen Fehler.

Das Problem ist also nicht das Vertrauen in die Maschine, sondern die Selbstüberschätzung. Diese Art von Selbstvertrauen in die eigenen Handlungen kann gefährlich sein. Daher sollten Sicherheitsmechanismen eingebaut werden – so wie das Piepsen eines Kühlschranks, wenn die Tür offen bleibt. Etwas, das so nervig ist, dass es die Menschen daran erinnert, vorsichtig zu sein – und das man nicht einfach abschalten kann. Besonders in der Zusammenarbeit mit Robotern könnte das ein wichtiger Sicherheitsfaktor sein.“

Soleman Haj Bakour: „Ja, auf jeden Fall. Wir haben jetzt drei wichtige Themen besprochen, und ich sehe, dass unsere Zeit knapp wird. Ich hatte noch spezifische Fragen vorbereitet, aber ich denke, dass wir sie im Laufe des Gesprächs ohnehin schon beantwortet haben – was ich sehr gut finde. Eine Frage hätte ich aber noch, und sie betrifft Checklisten. Ich erinnere mich, dass du im Dezember sehr stark auf die Bedeutung von Checklisten hingewiesen hast. Ich hatte damals schon Fragen dazu formuliert, und du hast damals betont, wie wichtig sie sind – was ich sehr zu schätzen weiß.

Also: Welche Tipps würdest du für die Erstellung solcher Checklisten geben? Niklas und ich haben heute darüber gesprochen und uns überlegt, dass wir erst einmal die verschiedenen Phasen analysieren und dann ins Detail gehen. Wie würdest du eine Checkliste strukturieren?“

Karina Schiefer: „Für mich sind Checklisten eine Schnittstelle für Wissenstransfer. Momentan gibt es noch zu wenige solcher Schnittstellen zwischen den technologischen Lösungen auf dem Markt und den Bauunternehmen, die sie anwenden.

Es gibt bereits viele Start-ups, die an Robotik-Lösungen für Baustellen arbeiten, zum Beispiel Walter, Baubot, Jailbot, Tiny Mobile Robots oder Schwarmbohrer. Auf der anderen Seite gibt es die Bauunternehmen, die diese Technologien nutzen sollen. Die Checklisten und Guidelines müssen als Übersetzung dienen, um festzulegen, welcher Roboter zu welchem Bauprojekt passt. Unser Ziel ist es, nicht nur Baustellen und Menschen ‚robotik-ready‘ zu machen, sondern auch die Roboter selbst ‚baustellen-ready‘. Denn viele Lösungen, die als einsatzbereit beworben werden, sind aus Sicht der Baustellenarbeiter nicht wirklich praxismäßig.

Ein gutes Beispiel ist Wienerberger. Sie wissen genau, in welchen Bereichen ihre Lösungen funktionieren, aber dieses Wissen bleibt oft intern. Wir brauchen eine öffentlich zugängliche Datenbank, ähnlich der Baugeräteleiste, in der standardisierte Informationen zu Baurobotern festgehalten werden.

Unser Ziel ist es also, eine ‚Baurobotik-Liste‘ zu erstellen – ein standardisiertes Verzeichnis, das klar definiert, welche Systeme für welche Einsatzbereiche geeignet sind. Es soll eine neutrale, wissenschaftlich fundierte Entscheidungsgrundlage bieten – nicht bloß ein Marketinginstrument der Hersteller.

Ich hoffe, dass wir dieses Projekt bis September abschließen können. Die Baustellentests mit Baubot und Doka X-Pod werden uns dabei helfen, die Anforderungen besser zu verstehen. Indem wir diese Tests begleiten und dokumentieren, können wir die Checklisten optimieren und sicherstellen, dass sie in der Praxis funktionieren.“

Soleman Haj Bakour: „Ja, das klingt sehr gut. Ich bin froh, dass wir dieses Projekt gestartet haben. Da wir uns dem Ende des Gesprächs nähern, habe ich noch eine abschließende Frage: Welche Wünsche hast du für die Zukunft? Und wie siehst du die Entwicklung der Baurobotik in den nächsten zehn Jahren?“

Karina Schiefer: „Mein Wunsch ist, dass Anbieter und Anwender enger zusammenarbeiten, um praxisnahe Automatisierungslösungen zu entwickeln. Es wäre ideal, wenn alle Beteiligten an einem Tisch sitzen würden, um Risiken zu verteilen und ineffiziente Prozesse zu vermeiden. In Wien und Österreich haben wir sehr viel Fachkompetenz in diesem Bereich. Mein Wunsch wäre, dass wir diese Kompetenzen bündeln und in die Ausbildung integrieren – ähnlich wie im Bereich der Construction Robotics. Wir müssen sicherstellen, dass es ausreichend qualifizierte Fachkräfte gibt, die mit diesen Technologien umgehen können. Meine Hoffnung ist, dass wir dadurch unabhängiger werden. Angesichts der globalen Entwicklungen und wirtschaftlichen Unsicherheiten wäre es wichtig, dass wir unser Wissen, unsere Produktion und unsere Fachkräfte hier vor Ort halten. Wir sollten uns nicht darauf verlassen, dass Lösungen aus anderen Ländern zu uns kommen – wir müssen sie selbst entwickeln.“

Soleman Haj Bakour: Ja, das verstehe ich vollkommen. Genau das mag ich so sehr an diesen Experteninterviews – jeder bringt kleine, aber besondere Nuancen in die Diskussion ein. Besonders wenn du den Aspekt unserer Werte ansprichst, finde ich das sehr wichtig. Ich kann aus meiner Erfahrung sagen, dass es große Unterschiede zwischen verschiedenen Regionen gibt: Die Amerikaner machen es anders als die Chinesen, und im Nahen Osten läuft es wiederum anders als in Europa.

Karina Schiefer: Ja, genau das fließt auch in meine Überlegungen mit ein – insbesondere in Bezug auf Sicherheit, Vertrauen und Wertigkeit. Das Leben eines Menschen ist wertvoll und muss geschützt werden, und dieser Wert steht für mich über jedem Projektfortschritt. In anderen Wertesystemen sieht man das oft anders. Würden wir einfach darauf warten, dass sich Robotik aus diesen Systemen zu uns entwickelt, dann hätten wir keine Möglichkeit zur Mitgestaltung. Dann müssten wir deren Werte übernehmen, und das wäre aus meiner Sicht schade. Ich möchte diesen Aspekt daher besonders betonen und fest verankert sehen. Ich wünsche mir, dass diese Entwicklungen schneller vorangehen – aktuell passiert mir das alles zu langsam. Wir befinden uns in einer Welt mit vielen Krisen und Veränderungen. Der Mensch sucht Stabilität, aber Veränderung ist immer schwierig. Doch gerade in der Innovationsarbeit sehe ich in Veränderungen eine große Chance. Unternehmen und Länder mit flexiblen Wertesystemen, die sich auf ihre zentralen Prinzipien konzentrieren, werden langfristig bestehen und sich anpassen können. Bei der PORR haben wir unsere fünf Prinzipien, die uns leiten. Robotik ist zweifellos die Zukunft, und wir müssen sie aktiv gestalten, anstatt uns ihr einfach nur anzupassen. Wir sollten sie so organisieren, verwalten und nutzen, dass sie mit unseren Werten und Vorstellungen übereinstimmt.

Soleman Haj Bakour: Vielen Dank Karina für deine Zeit und deine Erfahrung. Das war mir eine Freude

Karina Schiefer: Danke!

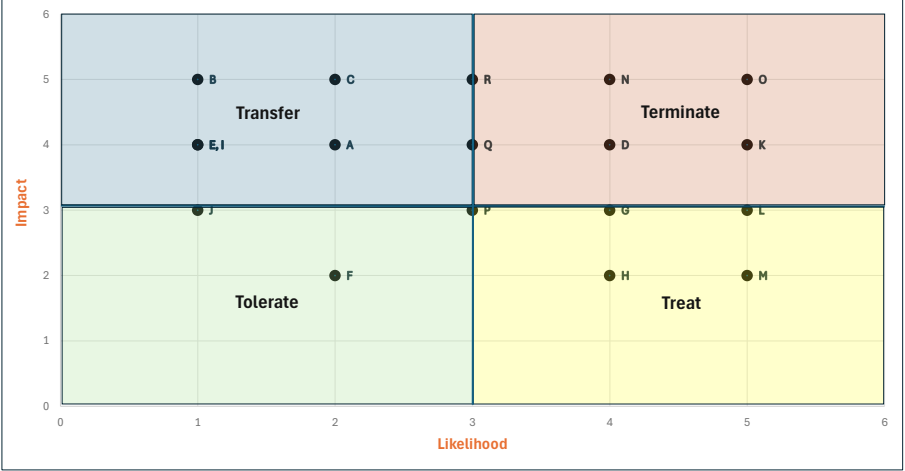
Appendix C

Risk Matrix

Factor		Probability				
		1: Very Low	2: Low	3: Medium	4: High	5: Very High
Impact	1: Very Low	-	-	-	-	-
	2: Low	-	F	-	H	M
	3: Medium	J	-	P	G	L
	4: High	E, I	A	Q	D	K
	5: Very High	B	C	R	N	O

- A: Sensor failures
B: Mechanical failure or in accuracy of robotic arms
C: Errors in software algorithms
D: Lack of communication between organizational units
E: Internal Hardware or Battery malfunction
F: Lack of planer Interest
G: Inadequate training of personnel
H: Lack of knwoledge among planners about construction methods with the use of robot systems
I: Cybersecurity risks
J: Lack of refrences for the design
K: Influence of environmental factors
L: Incompatibility with existing construction methods
M: Lack of standadized buidling elements
N: Lack of safety due to restructured environment
O: Unexpected behavior of workers
P: Risk and uncertainty in the transformation process
Q: Lack of standardization and regulation
R: Low acceptance by workers

Probability (X)	Impact (Y)	Wert
2	4	A
1	5	B
2	5	C
4	4	D
1	4	E, I
2	2	F
4	3	G
4	2	H
1	4	E, I
1	3	J
5	4	K
5	3	L
5	2	M
4	5	N
5	5	O
3	3	P
3	4	Q
3	5	R



Appendix D

Course Concept

Appointments: Lecture times: 2 times a week, 3 hours each with a 15-minute break.

Evaluation:

Submission of a Reflection Paper	Description content and reflection on the field trip
	Length: 5000-6000 characters without spaces (equivalent to 4-5 pages)
	Length: 5000-6000 characters without spaces (equivalent to 4-5 pages)
	Brief summary of the main points Critical reflection on the content and findings Own thoughts Outlook for future developments
Construction Site Equipment	Plan and design a site setup for different construction phases
Process Visualiza	Process visualisation using modelling methods such as BPMN
Presentation	Presentation of the submitted assessments (Reflection Paper and Construction Site Equipment)

Thematic block		Details	Type	Lecturer	Roll	Number Unit à 3Std	Unit in Total	Day (Example)	Dates (Example)	Number of the Unit	Comment
A	Kick-off	General Informations about the course	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	1	Monday	03.03.25	1	
B	Basics of Ergonomics and Site Setup	Basics of Ergonomics	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Friday	07.03.25	2	
		Basics of Site Setup		Lecturer-1		1				3	
C	Introduction to Standards and Regulations	Machinery Standards and Regulations	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Monday	10.03.25	4	
		Standards and Regulations in the Building Sector				1		Friday	14.03.25	5	
	Reservation Date					0	0	Monday	17.03.25	-	
D	Fundamentals of H&S	H&S Standards and Regulations	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-2	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	3	Friday	21.03.25	6	
		Risk Assessment and Analysis				1		Monday	24.03.25	7	
		Methods of Risk Reduction				1		Friday	28.03.25	8	
E	Process Design	Basics in Process Design (BPMN2.0)	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-3	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Monday	31.03.25	9	
		Practical Methods and Examples of Process Design				1		Friday	04.04.25	10	
G	Basics in Construction Robotics	Technical Knowledge, Potential Application, and Limitations	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-4	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	2	Monday	07.04.25	11	
		Technical Knowledge, Potential Application, and Limitations	Teaching assignment, Guest lecture			1		Friday	11.04.25	12	
Easter Vacation (From Monday, April 14, 2025 to Sunday, April 27, 2025)											
H	Field Trip	Construction Site Visit	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1	1	Monday	28.04.25	13	
I	Submission of Reflection Paper		Submission		Student	0	1	Friday	02.05.25	-	
	Submission of Construction Equipment Plan					0		Wednesday	07.05.25	-	
	Submission of Process Visualization					0				-	
	Presentation	Presentation of the Submitted Tasks	Teaching assignment, Guest lecture	Lecturer-1	Internal lecturer, External lecturer, Guest Lecturer	1		Friday	09.05.25	14	
Sum							14				

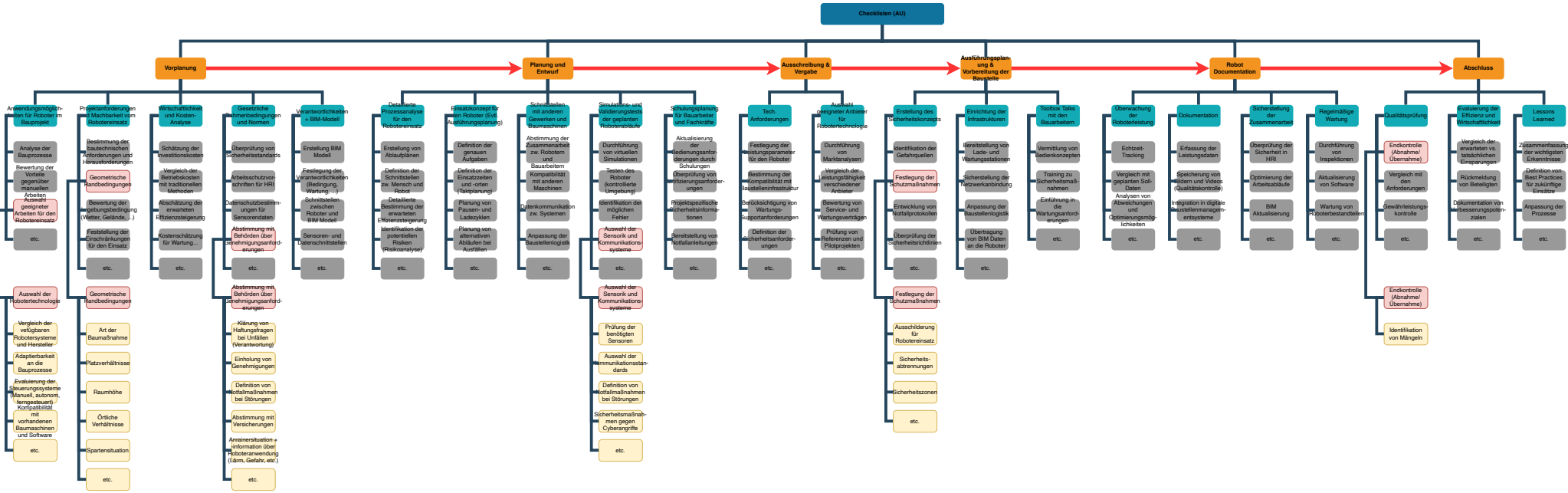
Element	Hours	Comment	Points	%
Presence	31,5	75% Considered for ECTS but not graded	0	0%
Submission of Reflection Paper	16	Description content and reflection on the field trip (1-Student)	15	15%
Submission of Construction Equipment Plan	24	In a group of two	30	30%
Submission of Process Visualization	8	In a group of two	25	25%
Presentation	8	In a group of two	30	30%
Effort for LV	87,5		100	100%

1 25 ECTS
3,5 87,5 ECTS LV Gesamt

One ECTS point represents 25 real hours of 60 minutes of actual work on the part of the student

Appendix E

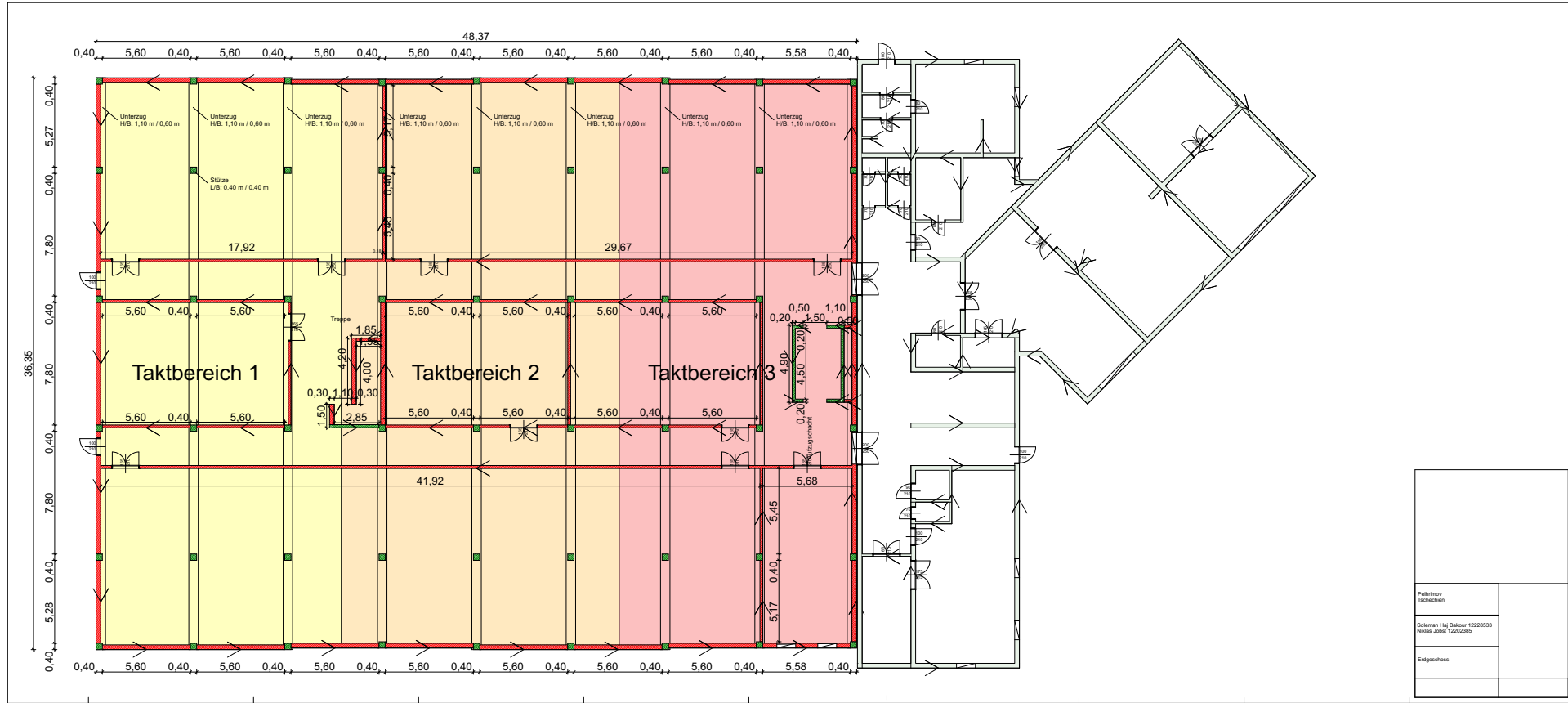
Checklist for the integration of Robots



Appendix F

Construction Site's Plans

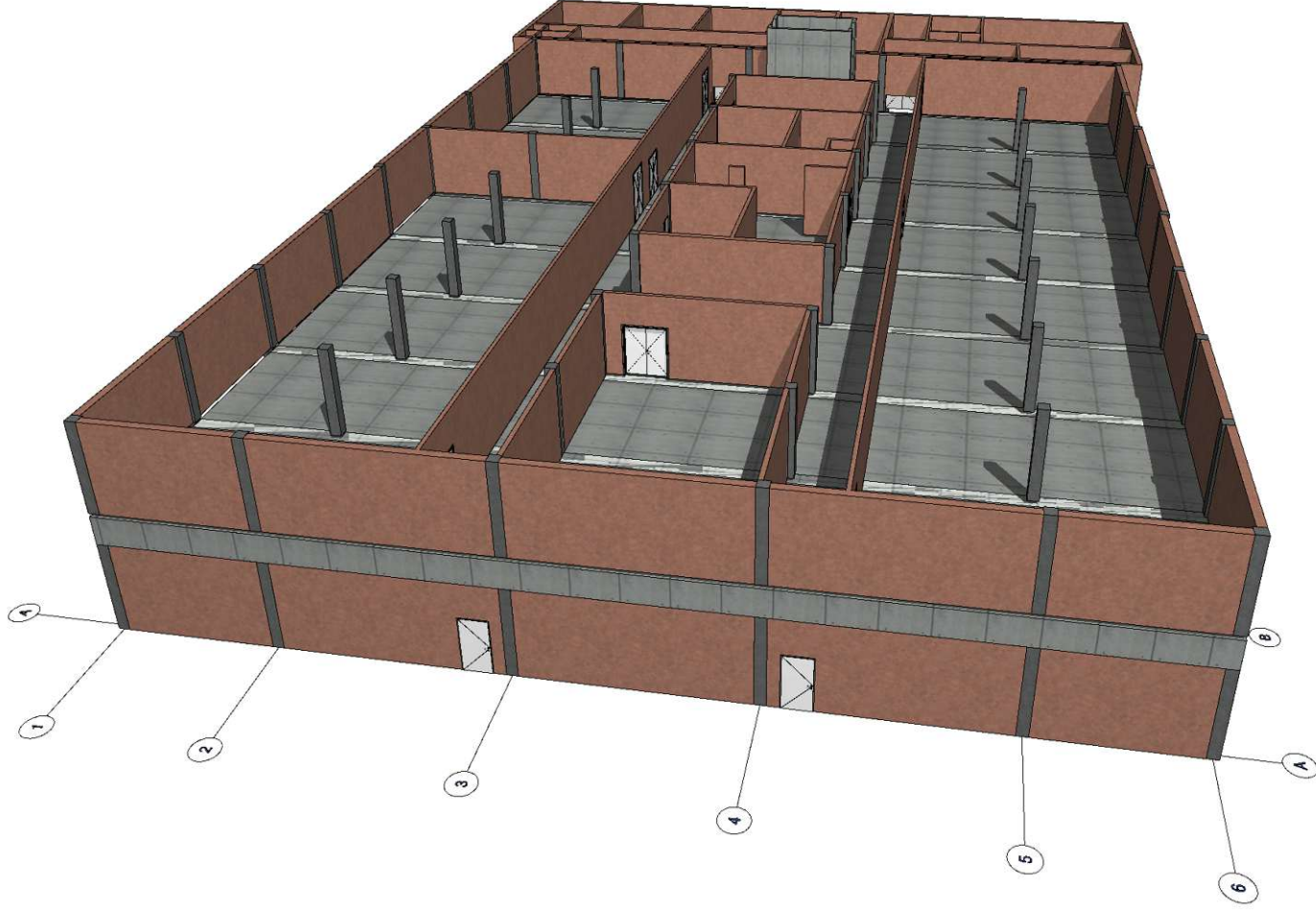
F.1 Floor Plan



F.2 Safety Zone for WLTR



F.3 3D-View



Appendix G

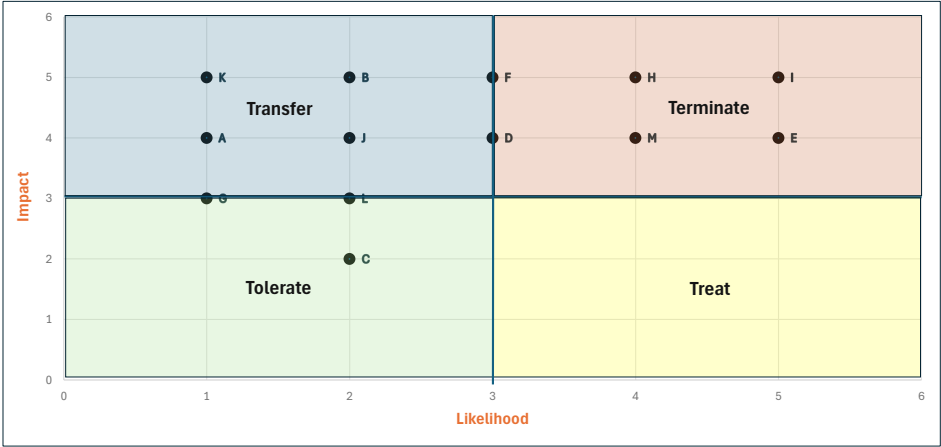
Risk Matrix for the Use of WLTR

G.1 Risk Matrix for the Use of WLTR

Factor		Probability				
		1: Very Low	2: Low	3: Medium	4: High	5: Very High
Impact	1: Very Low	-	-	-	-	-
	2: Low	-	C	-	-	-
	3: Medium	G	L	-	-	-
	4: High	A	J	D	M	E
	5: Very High	K	B	F	H	I

- A: Cyber security risks
B: Lack of references for building design
C: Lack of standardization and regulation
D: Inadequate training of personnel
E: Lack of communication between organizational units
F: Influence of environmental factors
G: Lack of standardized building elements
H: Lack of safety due to restructured environment
I: Unexpected worker behavior
J: Mechanical failure or in accuracy of robotic arms
K: Errors in software algorithms
L: Internal Hardware or Battery malfunction
M: Collision with personnel or machines

Probability (X)	Impact (Y)	Wert
1	4	A
2	5	B
2	2	C
3	4	D
5	4	E
3	5	F
1	3	G
4	5	H
5	5	I
2	4	J
1	5	K
2	3	L
4	4	M

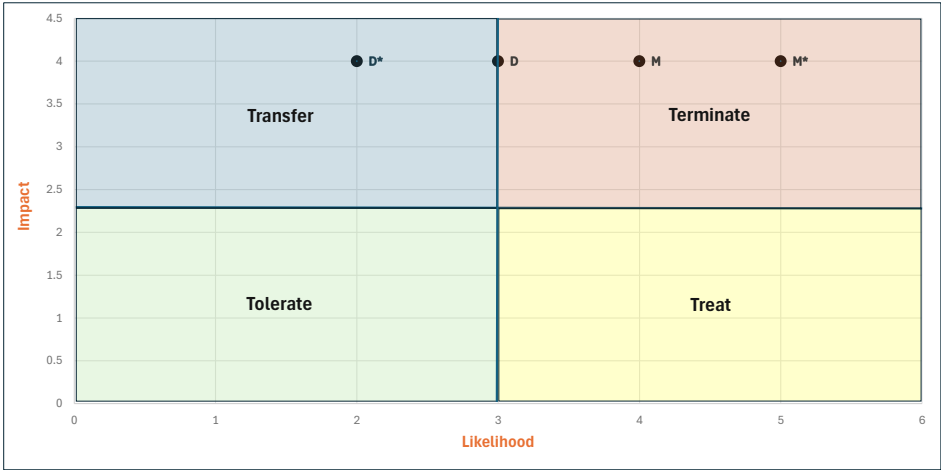


G.2 Modified Risk Matrix for the Use of WLTR

Factor		Probability				
		1: Very Low	2: Low	3: Medium	4: High	5: Very High
Impact	1: Very Low	-	-	-	-	-
	2: Low	-	-	-	-	-
	3: Medium	-	-	-	-	-
	4: High	-	D*	D	M	M*
	5: Very High	-	-	-	-	-

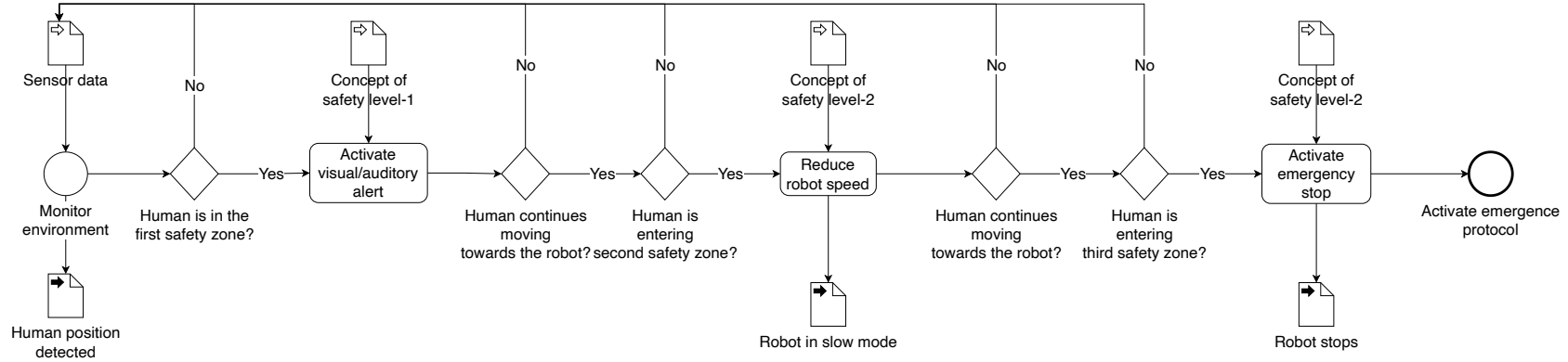
D: Inadequate training of personnel
M: Collision with personnel or machines

Probability (X)	Impact (Y)	Wert
3	4	D
4	4	M
2	4	D*
5	4	M*



Appendix H

Safety Concept in the Safe Zone of WLTR



Appendix I

Evaluation Protocol

I.1 Evaluation Protocol-English Version

Evaluation Protocol: Use of WLTR on the Construction Site in Pelhřimov

1. General Information

- Project Name:
- Date of Robot Deployment:
- Construction Site Location:
- Name of Worker:
- Position/Role on the Construction Site:

2. General Impression:

2.1. Have you worked with WLTR on a construction site before?

☐ Yes ☐ No

2.2. How would you rate the overall impression of WLTR's deployment?

☐ Very Good ☐ Good ☐ Neutral ☐ Poor ☐ Very Poor

Comment: _____

2.3. How useful was WLTR in performing complex or multiple tasks?

☐ Very Useful ☐ Useful ☐ Somewhat Useful ☐ Useless

Comment: _____

2.4. Could you imagine using WLTR for other tasks?

☐ Yes ☐ No ☐ Maybe

Which ones?: _____

2.5. How has the integration of WLTR affected the freedom, relationships, and overall quality of life at the workplace?

☐ Positive ☐ Neutral ☐ Negative

Comment: _____

2.6. How has WLTR affected your working conditions, such as in terms of contracts, wages, and organization?

☐ Positive ☐ Neutral ☐ Negative

Comment: _____

3. Efficiency & Productivity:

3.1. Has WLTR improved or accelerated the workflow?

☐ Yes, significantly ☐ Yes, Somewhat ☐ No, No Change ☐ No, it was negative

Comment: _____

3.2. How timely was the WLTR's support? Has it improved your performance?

☐ Yes, significantly ☐ Yes, Somewhat ☐ No, No improvement

Comment: _____

3.3. Has WLTR deployment allowed other tasks to be completed faster?

☐ Yes ☐ Partly ☐ No

Comment: _____

4. Safety & Collaboration:

4.1. Did you feel safe during the WLTR's deployment?

☐ Yes ☐ Partly ☐ No

Comment: _____

4.2. Were there any safety-related situations or uncertainties from your perspective?

☐ Yes ☐ No

If yes, please describe: _____

4.3. How was the collaboration or coexistence between humans and WLTR?

☐ Smooth ☐ Acceptable ☐ Need improvement ☐ Problematic

Comment: _____

5. Usability & Understandability:

5.1. Was the operation/control of the robot understandable for you?

☐ Yes ☐ Partly ☐ No

Comment: _____

5.2. Would you be interested in learning to operate WLTR yourself?

☐ Yes ☐ No ☐ Maybe

Why (not)?: _____

5.3. Was it possible to “communicate” with WLTR effectively in different ways?

☐ Yes ☐ Partly ☐ No

Comment: _____

5.4. Was WLTR able to handle errors or incorrect commands correctly?

☐ Yes ☐ Partly ☐ No

Comment: _____

6. Suggestions for Improvement & Additional Feedback

6.1. What should be improved in WLTR deployment, in your opinion?

6.2. Do you see potential for using WLTR for other tasks?

☐ Yes ☐ No ☐ Maybe

Which ones?: _____

6.3. How should the education system be adjusted to prepare people for a future where WLTR play a significant role both physically and psychologically?

☐ Important ☐ Less Important ☐ Unimportant

Comment: _____

6.4. Do you have any other comments or experiences you would like to share?

I.2 Evaluation Protocol-German Version

Bewertungsprotokoll: Einsatz eines Roboters auf der Baustelle in Pelhřimov

1. Allgemeine Informationen

- Projektname:
- Datum des Robotereinsatzes:
- Ort der Baustelle:
- Name des Befragten:
- Position/Funktion auf der Baustelle:

2. Allgemeiner Eindruck:

- 2.1. Haben Sie bereits zuvor mit WLTR auf der Baustelle gearbeitet?

☐ Ja ☐ Nein

- 2.2. Wie bewerten Sie den Gesamteindruck vom Einsatz von WLTR?

☐ Sehr gut ☐ Gut ☐ Neutral ☐ Schlecht ☐ Sehr schlecht

Kommentar: _____

- 2.3. Wie nützlich war WLTR bei der Erledigung von komplexen oder mehreren Aufgaben?

☐ Sehr nützlich ☐ Nützlich ☐ Wenig nützlich ☐ Unnütz

Kommentar: _____

- 2.4. Könnten Sie sich den Einsatz von WLTR auch für andere Aufgaben vorstellen?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Vielleicht

Welche?: _____

- 2.5. Wie hat die Integration von WLTR die Freiheit, Beziehungen und allgemeine Lebensqualität am Arbeitsplatz beeinflusst?

☐ Positiv ☐ Neutral ☐ Negativ

Kommentar: _____

- 2.6. Wie hat sich WLTR auf Ihre Arbeitsbedingungen aus, z. B. in Bezug auf Arbeitsverträge, Löhne und Organisation gewirkt?

☐ Positiv ☐ Neutral ☐ Negativ

Kommentar: _____

3. Effizienz & Produktivität

- 3.1. Hat WLTR den Arbeitsablauf verbessert oder beschleunigt?

☐ Ja, deutlich ☐ Ja, etwas ☐ Nein, keine Veränderung ☐ Nein, hat gestört

Kommentar: _____

- 3.2. Wie zeitnah war die Unterstützung von WLTR? Hat es Ihre Leistung verbessert?

☐ Ja, deutlich ☐ Ja, etwas ☐ Nein, keine Verbesserung

Kommentar: _____

- 3.3. Konnten durch den Einsatz von WLTR andere Arbeiten schneller erledigt werden?

☐ Ja ☐ Teilweise ☐ Nein

Kommentar: _____

4. Sicherheit & Zusammenarbeit

- 4.1. Haben Sie sich während des Einsatzes sicher gefühlt?

☐ Ja ☐ Teilweise ☐ Nein

Kommentar: _____

- 4.2. Gab es aus Ihrer Sicht sicherheitsrelevante Situationen oder Unsicherheiten?

☐ Ja ☐ Nein

Wenn ja, bitte beschreiben: _____

- 4.3. Wie war die Zusammenarbeit bzw. Koexistenz zwischen Menschen und WLTR?

☐ Reibungslos ☐ Akzeptabel ☐ Verbesserungswürdig ☐ Problematisch

Kommentar: _____

5. Bedienbarkeit & Verständlichkeit

5.1. War die Bedienung/Steuerung von WLTR für Sie nachvollziehbar?

☐ Ja ☐ Teilweise ☐ Nein

Kommentar: _____

5.2. Hätten Sie Interesse, WLTR selbst bedienen zu lernen?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Vielleicht

Warum (nicht)?: _____

5.3. War es möglich, auf verschiedene Arten effektiv mit WLTR zu kommunizieren?

☐ Ja ☐ Teilweise ☐ Nein

Kommentar: _____

5.4. War WLTR in der Lage, Fehler oder falsche Befehle korrekt zu handhaben?

☐ Ja ☐ Teilweise ☐ Nein

Kommentar: _____

6. Verbesserungsvorschläge & Weiteres Feedback

6.1. Was sollte Ihrer Meinung nach am Einsatz von WLTR verbessert werden?

6.2. Sehen Sie Potenzial für den Einsatz von WLTR bei anderen Arbeiten?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Vielleicht

Welche?: _____

6.3. Wie sollte das Bildungssystem angepasst werden, um Menschen auf eine Zukunft vorzubereiten, in der WLTR sowohl physisch als auch psychologisch eine bedeutende Rolle spielen?

☐ Wichtig ☐ Weniger wichtig ☐ Unwichtig

Kommentar: _____

6.4. Haben Sie weitere Anmerkungen oder Erfahrungen, die Sie teilen möchten?

Bibliography

- [1] H. Dornmayr, M. Riepl, I. für Bildungsforschung der Wirtschaft (ibw), ibw Austria - Research & Development in VET, and T. Mayr. *Unternehmensbefragung zum Arbeits- und Fachkräftebedarf/-mangel Arbeitskräfteradar 2024*. ibw-Forschungsbericht Nr. 220. ibw – Institut für Bildungsforschung der Wirtschaft, 2024. URL: <https://www.wko.at/oe/fachkraeftesicherung/fachkraefteradar-summary.pdf>.
- [2] J. Worch, F. Bálint-Benczédi, and M. Beetz. “Perception for Everyday Human Robot Interaction”. In: *KI - Künstliche Intelligenz* 30.1 (2015), pp. 21–27. DOI: 10.1007/s13218-015-0400-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s13218-015-0400-1>.
- [3] C. Bartneck, T. Belpaeme, F. Eyssel, T. Kanda, M. Keijsers, and S. Šabanović. *Human-Robot Interaction: An Introduction*. Cambridge University Press, 2024. DOI: 10.1017/9781009424202. URL: <https://doi.org/10.1017/9781009424202>.
- [4] N. Jobst. “Prozessorientierte Ausarbeitung von Handlungs-empfehlungen für die Implementierung eines Robo-ters in den Baustellenbetrieb”. Diplomarbeit. Wien: TU Wien, 2025.
- [5] ING. *Robots are coming to construction sites*. June 12, 2019. URL: <https://www.ing.com/Newsroom/News/Robots-are-coming-to-construction-sites.htm>.
- [6] M. Glück. *Mensch-Roboter-Kooperation erfolgreich einführen: Grundlagen, Leitfaden, Applikationen*. 1st. Springer eBooks, 2022. ISBN: 978-3-903311-35-0. DOI: 10.1007/978-3-658-37612-3. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37612-3>.
- [7] A. Maier. “Hoffnungsmarkt - Austria innovativ”. In: *Austria Innovativ* (Dec. 2023). URL: <https://www.austriainnovativ.at/singleview/article/hoffnungsmarkt>.
- [8] A. G. Burden, G. A. Caldwell, and M. R. Guertler. “Towards human-robot collaboration in construction: current cobot trends and forecasts”. In: *Construction Robotics* 6.3–4 (2022). DOI: 10.1007/s41693-022-00085-0. URL: <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00085-0>.
- [9] *ISO 8373:2021 11: Robotics — Vocabulary (ISO 8373:2021)*. English. Geneva: ISO The International Organization for Standardization, Nov. 2021.
- [10] H. Jebelli, S. Shayesteh, S. Lee, M. Habibnezhad, and S. Asadi. *Automation and Robotics in the Architecture, Engineering, and Construction Industry*. 1st. Springer eBooks. Springer, 2022. ISBN: 978-3-030-77162-1. DOI: 10.1007/978-3-030-77163-8. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77163-8>.
- [11] A. Butz and A. Krüger. *Mensch-Maschine-Interaktion*. 1st. De Gruyter Oldenbourg. Walter de Gruyter, 2014. ISBN: 978-3-486-71621-4.
- [12] *DIN EN ISO 26800:2011 11: Ergonomie – Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte (ISO 26800:2011); Deutsche Fassung EN ISO 26800:2011*. Deutsch. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Nov. 2011.

- [13] A. Kugi and W. Wien. *Automatisierung und Robotik Technologie Report*. Tech. rep. Wirtschaftsagentur Wien, 2022. URL: https://wirtschaftsagentur.at/fileadmin/user_upload/wirtschaftsagentur-at/Downloads/Technologie-Reports/Deutsch/Automatisierung_und_Robotik_Technologiereport_DE.pdf.
- [14] *ISO/TS 15066:2016: Robots and robotic devices - Collaborative robots*. English. Norm. Geneva: ISO The International Organization for Standardization, Feb. 2016.
- [15] *VDI 2553:2019: Lean Construction*. Deutsch. VDI-Richtlinie. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Mar. 2019.
- [16] J. M. Beer, A. D. Fisk, and W. A. Rogers. "Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction". In: *Journal of Human-Robot Interaction* 3.2 (2014). DOI: 10.5898/jhri.3.2.beer. URL: <https://doi.org/10.5898/jhri.3.2.beer>.
- [17] *DIN EN ISO 12100:2011 11: Sicherheit von Maschinen — Allgemeine Gestaltungsleitsätze — Risikobeurteilung und Risikominderung (12100:2010); Deutsche Fassung*. Deutsch. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Mar. 2011.
- [18] *ISO/IEC TS 27100:2020 12: Information technology — Cybersecurity — Overview and concepts (ISO/IEC TS 27100:2020)*. English. Geneva: ISO The International Organization for Standardization, Dec. 2020.
- [19] M. A. Goodrich and A. C. Schultz. "Human-Robot Interaction: A Survey". In: *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction* 1.3 (2007), pp. 203–275. DOI: 10.1561/1100000005. URL: <https://doi.org/10.1561/1100000005>.
- [20] G. Anbarjafari and S. Escalera. *Human-Robot Interaction - Theory and Application*. IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.68231. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.68231>.
- [21] H. Yan, M. H. Ang, and A. N. Poo. "A Survey on Perception Methods for Human-Robot Interaction in Social Robots". In: *International Journal of Social Robotics* 6.1 (2013), pp. 85–119. DOI: 10.1007/s12369-013-0199-6. URL: <https://doi.org/10.1007/s12369-013-0199-6>.
- [22] M. Schmauder and B. Spanner-Ulmer. *Ergonomie: Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. 2nd. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2022. ISBN: 978-3-446-47358-4.
- [23] H. Buxbaum. "Mensch-Roboter-Kollaboration". In: *Industrie 4.0 kompakt: Grundlagen, Anwendung, Praxisbeispiele*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-28307-0.
- [24] *DIN EN ISO 9241-11:2011 11: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO 9241-11:2018); Deutsche Fassung EN ISO 9241-11:2018*. Deutsch. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Nov. 2018.
- [25] L. Schmidt, J. Grosche, and C. M. Schlick. *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme*. Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-78331-2. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78331-2>.
- [26] Statista. *Global Construction Robotics Market Size 2020-2030*. Sept. 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1292130/construction-robot-market-size-worldwide/>.
- [27] U.-P. D.-I. F. Lulei. *Betriebswirtschaft für Führungskräfte*. Vorlesungsskript. TU-Wien; Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft. 2023.

- [28] S. Haghsheno, G. Satzger, S. Lauble, M. Vössing, H. S. Haghsheno, K. Danulat, P. Schönfelder, H. Fröml, J. Freiny, A. Barreiro, A. Hilsmann, P. Eisert, M. König, A. Aziz, N. Gard, M. Koulakis, A. Albrecht, M. Wagner, A. Richter, and T. Hartmann. *Künstliche Intelligenz im Bauwesen: Grundlagen und Anwendungsfälle*. 1st. Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-3-658-42796-2. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-42796-2>.
- [29] KUKA AG. *KUKA Roboter zeigen Perspektiven für robotische Fertigung in der Architektur*. Feb. 2022. URL: <https://www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2019/07/icd-holzpavillon-buga>.
- [30] SPATIAL TIMBER ASSEMBLIES – DFAB HOUSE. *SPATIAL TIMBER ASSEMBLIES – DFAB HOUSE*. n.d. URL: https://dfabhouse.ch/spatial_timber_assemblies/.
- [31] TyBOT | The Rebar Tying Robot | by Advanced Construction Robotics. *TyBOT | The Rebar Tying Robot | by Advanced Construction Robotics*. n.d. URL: <https://www.constructionrobots.com/tybot>.
- [32] C. Balaguer and M. Abderrahim. “Trends in Robotics and Automation in Construction”. In: *InTech eBooks*. InTech, 2008. DOI: 10.5772/5865. URL: <https://doi.org/10.5772/5865>.
- [33] FBR. *Hadrian X® | Outdoor Construction & Bricklaying Robot from FBR*. n.d. URL: <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x>.
- [34] WLTR Masonry Robot – Precision Bricklaying and Construction Efficiency. *WLTR Masonry Robot – Precision Bricklaying and Construction Efficiency*. n.d. URL: <https://www.green.build/>.
- [35] H. Österreich. *Semi-autonomer Bohrroboter*. n.d. URL: <https://www.hilti.at/content/hilti/E3/AT/de/business/business/productivity/jaibot-semi-automated-drilling-robot.html>.
- [36] R. Dot. *Red Dot Design Award: Floor Tile Paving Robot R-19*. Feb. 2025. URL: <https://www.red-dot.org/project/floor-tile-paving-robot-r-19-58278>.
- [37] Canvas.Build. *Products | Canvas | Drywall Finishing Robots*. Oct. 2024. URL: <https://www.canvas.build/products/>.
- [38] Doka. *Doka Xpress 1/2022*. Nov. 2022. URL: https://www.doka.com/web/media/files/newsroom/D0A_22_Doka_Xpress_1_2022_CEU_221115ca_web.pdf.
- [39] Construction | Boston Dynamics. *Construction*. Mar. 2025. URL: <https://bostondynamics.com/industry/construction/>.
- [40] HP SitePrint - Robotic Layout Solution. *HP SitePrint - Robotic Layout Solution*. n.d. URL: <https://www.hp.com/us-en/printers/site-print/layout-robot.html>.
- [41] IN SITU FABRICATOR – DFAB HOUSE. *IN SITU FABRICATOR – DFAB HOUSE*. n.d. URL: https://dfabhouse.ch/in_situ_fabricator/.
- [42] Schindler’s robotic installation system for elevators. *Schindler’s robotic installation system for elevators*. n.d. URL: <https://www.schindler.at/de/innovationen/schindler-rise.html>.
- [43] Innovation Salzburg. *Digital findet Stadt - Innovation Salzburg*. Mar. 12, 2024. URL: <https://www.innovation-salzburg.at/en/projekt/digital-findet-stadt/>.
- [44] E. Betancourt, K. Breitwieser, L. M. Feigl, N. Pressmair, S. Haj Bakour, N. Jobst, J. Reinhold, and S. Robbi. *Construction Automation: Grundlagen eines Robotereinsatz im Bau und aktuelle Praxisbeispiele*. Feb. 2025. URL: <https://www.digitalfindetstadt.at/pioneer-projekte/construction-automation>.

- [45] *Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 60204-1:2016, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60204-1:2018.* Deutsch. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., June 2019.
- [46] Statista. *Tödliche Arbeitsunfälle in europäischen Ländern 2022.* Jan. 2025. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/543693/umfrage/arbeitsunfaelle-mit-todesfolge-in-ausgewaehlten-europaeischen-laendern/>.
- [47] I. Jansen. *Unfälle auf Baustellen: Wie gefährlich ist die Bauwirtschaft?* Dec. 2024. URL: <https://www.ibau.de/akademie/wissenswertes/zahl-der-toedlichen-unfaelle-am-bau-gestiegen/>.
- [48] Y. Sun, I. Jeelani, and M. Gheisari. "Safe human-robot collaboration in construction: A conceptual perspective". In: *Journal of Safety Research* 86 (2023), pp. 39–51. DOI: 10.1016/j.jsr.2023.06.006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.06.006>.
- [49] C. Schlick, R. Bruder, and H. Luczak. *Arbeitswissenschaft.* 4th ed. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-56037-2. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2>.
- [50] *DIN EN ISO 10218-1 - 2012-01 - DIN Media.* 2012. URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-10218-1/136373717>.
- [51] *DIN EN ISO 10218-2 - 2012-06 - DIN Media.* 2012. URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-10218-2/127655829>.
- [52] *DIN ISO/TS 15066 - 2017-04 - DIN Media.* 2017. URL: <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-iso-ts-15066/263754912>.
- [53] International Organization for Standardization (ISO). *ISO 12100:2010 - Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction.* n.d. URL: <https://www.iso.org/standard/51528.html>.
- [54] *ISO/FDIS 10218-1:2024 04: Robotics — Safety requirements Part 1:Industrial robots.* English. Geneva: ISO The International Organization for Standardization, Apr. 2024.
- [55] *ISO/FDIS 10218-1:2024 04: Robotics — Safety requirements Part 2:Industrial robot applications and robot cells.* English. Geneva: ISO The International Organization for Standardization, Apr. 2024.
- [56] D. G. U. (DGUV). *DGUV Vorschrift 38 – Bauarbeiten.* Nov. 2019. URL: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3794>.
- [57] D. G. U. (DGUV). *DGUV Regel 100-500 – Betreiben von Arbeitsmitteln.* Apr. 2008. URL: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/997>.
- [58] *Kommentierte Arbeitsmittelverordnung.* n.d. URL: https://www.arbeitsinspektion.gv.at/Maschinen-_Werkzeuge/Gemeinsame_Bestimmungen/Kommentierte_Arbeitsmittelverordnung.html#heading__18_Arbeitsmittel_zum_Heben_von_Lasten.
- [59] C. A. Ericson. *Hazard Analysis Techniques for System Safety.* Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005. ISBN: 0-471-72019-4.
- [60] K. Boothroyd and C. Thompson. *Fundamentals of Risk Management: Understanding, Evaluating and Implementing Effective Enterprise Risk Management.* London, UK: Kogan Page Publishers, 2024. ISBN: 978-1398614698.
- [61] H. R. Booher. *Handbook of Human Systems Integration.* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. ISBN: 978-0471020539.
- [62] Financial Crime Academy. *The 4Ts: Tolerate, treat, transfer and terminate.* Apr. 2025. URL: <https://financialcrimeacademy.org/the-4ts/>.

- [63] H. Bernstein. *Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. Springer Vieweg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-658-00549-8.
- [64] K. Dörfler, N. Hack, T. Sandy, M. Gifftthaler, M. Lussi, A. N. Walzer, J. Buchli, F. Gramazio, and M. Kohler. “Mobile robotic fabrication beyond factory conditions: case study Mesh Mould wall of the DFAB HOUSE”. In: *Construction Robotics* 3.1–4 (2019), pp. 53–67. DOI: 10.1007/s41693-019-00020-w.
- [65] C. K. Karl. “KI und Robotik; Steigerung von Effizienz und Sicherheit”. In: *BauVolution* (Dec. 2024). URL: <https://bauvolution.de/2024/03/20/ki-und-robotik-steigerung-von-effizienz-und-sicherheit>.
- [66] RobotShop Europe. *Endschalter-Kit*. n.d. URL: <https://eu.robotshop.com/de/products/endschalter-kit>.
- [67] ProHandling. *Mechanische Lastmomentbegrenzer für Kräne | ProHandling*. Apr. 2024. URL: <https://prohandling.de/kranloesungen/sicherheitssysteme/lastmomentbegrenzer/mechanischer-lastmomentbegrenzer/>.
- [68] R. USA. *Robot sensors*. n.d. URL: https://www.robotshop.com/collections/sensors?pf_t_shop_by_category=category%3ALIDAR+-+Laser+Scanners+%26+Rangefinders.
- [69] Roboter-Bausatz.de. *Ultraschallsensoren & Geräuschsensoren*. n.d. URL: <https://www.roboter-bausatz.de/c/diy-elektronik/erweiterungsmodule/sensoren/ultraschallsensoren-geraeuschsensoren/>.
- [70] Hydrauliktechnik24.de. *Druckbegrenzungsventil online kaufen | Im Onlineshop*. n.d. URL: <https://www.hydrauliktechnik24.de/Druckbegrenzungsventil>.
- [71] Bosch Mobility. *Partikelsensor*. n.d. URL: <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/abgasnachbehandlung/partikelsensor/>.
- [72] Jugard Künstner. *UR Bedienpanel 3PE Bedienpanel für Universal*. n.d. URL: <https://www.jugard-kuenstner.de/universal-robots/sicherheitstechnik/e-seriesteachpendant>.
- [73] TE Connectivity. *Neigungsmesser (Inklinometer)*. n.d. URL: <https://www.te.com/de/products/sensors/position-sensors/tilt-sensors-inclinometers.html>.
- [74] *Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherung des menschlichen Körpers (ISO/DIS 13855:2022); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 13855:2022*. Deutsch. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Apr. 2022.
- [75] *3D-Schutzraum: Anordnung der BWS: Bestimmung des Sicherheitsabstands in Anlehnung an DIN EN ISO 13855*. n.d. URL: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3808>.
- [76] *Produktspezifikation IRB 1090*. Dec. 2024. URL: <https://library.e.abb.com/public/e43d10d9e2124170b54ee890ab51ae00/3HAC088057%20PS%20IRB%201090-de.pdf?x-sign=HELuiH3Z2rSh3%2f0daqS89v%2fEPQ1%2b3PpLNUqsUyH8lw5wZfLJDpLS6bupgiV%2f1uh%2b>.
- [77] C. K. Karl, A. J. Spengler, T. Bruckmann, and C. W. Ibbs. “Influence of automated building construction systems on vocational education and training”. In: *Proceedings of the ISARC*. 2018. DOI: 10.22260/isarc2018/0034. URL: <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0034>.

- [78] *Occupational health and safety management — Psychological health and safety at work — Guidelines for managing psychosocial risks*. English. Geneva: ISO The International Organization for Standardization, June 2021.
- [79] B. Siciliano and O. Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer Science & Business Media, 2008. ISBN: 978-3-540-23957-4. DOI: 10.1007/978-3-540-30301-2.
- [80] Reuters Institute for the Study of Journalism. *Digital News Report 2024*. Reuters Institute, University of Oxford, 2024. URL: <https://reutersinstitute.politics.ox.ac.uk/digital-news-report/2024>.
- [81] B. D. Lowe, M. Hayden, J. Albers, and S. Naber. “Case studies of robots and automation as health/safety interventions in small manufacturing enterprises”. In: *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 33.1 (2022), pp. 69–103. DOI: 10.1002/hfm.20971.
- [82] B. Siciliano and O. Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. 2nd. Springer, 2016. ISBN: 978-3-319-32550-7. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1.
- [83] W. Günthner and A. Borrmann. *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen: Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*. Springer, 2011. ISBN: 978-3-642-16485-9. DOI: 10.1007/978-3-642-16486-6.
- [84] M. Rothland. “Theorie-Praxis-Verhältnis in der Lehrerinnen- und Lehrerbildung”. In: Verlag Julius Klinkhardt, 2020. DOI: 10.35468/hblb2020-015. URL: <https://doi.org/10.35468/hblb2020-015>.
- [85] Institute for Individualized Production in Architecture. *Construction Robotics M.Sc.* n.d. URL: <https://cr.rwth-aachen.de/>.
- [86] RWTH Aachen University. *Module Manual for Robotic Systems Engineering*. 2021. URL: <https://www.academy.rwth-aachen.de/files/downloads/masters-degree-programs/full-time-masters-degree-programs/module-manual/module-manual-ms-robosys-en-wise-2022-rwth-international-academy.pdf>.
- [87] S. You, J. Kim, S. Lee, V. Kamat, and L. P. Robert. “Enhancing perceived safety in human–robot collaborative construction using immersive virtual environments”. In: *Automation in Construction* 96 (2018), pp. 161–170. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.09.008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.09.008>.
- [88] J. Fottner, K. Nübel, and D. Matt, eds. *Construction Logistics, Equipment, and Robotics: Proceedings of the CLEAR Conference 2023*. Cham: Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-44021-2. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-44021-2>.
- [89] T. Bock and T. Linner. *Robot Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. ISBN: 9781107076394.
- [90] C. Hofstadler. *Produktivität im Baubetrieb: Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-642-41632-3. DOI: 10.1007/978-3-642-41633-0.
- [91] J. M. D. Delgado, L. Oyedele, A. Ajayi, L. Akanbi, O. Akinade, M. Bilal, and H. Owolabi. “Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption”. In: *Journal of Building Engineering* 26 (2019), p. 100868. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100868.
- [92] R. Müller, J. Franke, D. Henrich, B. Kuhlenkötter, A. Raatz, and A. Verl. *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. 2nd ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023.

- [93] C. Gómez-Salgado, J. C. Camacho-Vega, J. Gómez-Salgado, J. J. García-Iglesias, J. Fagundo-Rivera, R. Allande-Cussó, J. Martín-Pereira, and C. Ruiz-Frutos. “Stress, fear, and anxiety among construction workers: a systematic review”. In: *Frontiers in Public Health* 11 (2023). DOI: 10.3389/fpubh.2023.1226914. URL: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1226914>.
- [94] S. Johari and K. N. Jha. “Impact of work motivation on construction labor productivity”. In: *Journal of Management in Engineering* 36.5 (2020). DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000824. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000824](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000824).
- [95] L. Marshall. “Stop Managing, Start Coaching! How Performance Coaching Can Enhance Commitment and Improve Productivity”. In: *Quality Management Journal* 5.2 (1998), pp. 122–124. DOI: 10.1080/10686967.1998.11918865. URL: <https://doi.org/10.1080/10686967.1998.11918865>.
- [96] IFR International Federation of Robotics. *Next Generation Skills*. Accessed April 8, 2025. n.d. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/next-generation-skills>.
- [97] M. Bahr and L. Laszig. *Productivity development in the construction industry and human capital: a literature review*. Accessed April 8, 2025. 2021. arXiv: 2104.00129 [econ.GN]. URL: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2104.00129>.
- [98] *Efficiency*. Accessed April 8, 2025. 2025.
- [99] C. Brosque and M. Fischer. “Safety, quality, schedule, and cost impacts of ten construction robots”. In: *Construction Robotics* 6.2 (2022), pp. 163–186. DOI: 10.1007/s41693-022-00072-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00072-5>.
- [100] P. Almeida, M. Solas, A. Renz, M. Bühler, P. Gerbert, S. Castagnino, and C. Rothballer. *Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology*. May 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.21381.37605.
- [101] F. Berner, B. Kochendörfer, and R. Schach. *Grundlagen der Baubetriebslehre 1: Baubetriebswirtschaft*. 3rd ed. Springer Vieweg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-27856-4. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27856-4>.
- [102] Admin. BAuA – baua: Fakten – Arbeitsbedingungen am Bau – Immer noch schwere körperliche Arbeit trotz technischen Fortschritts – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fakten/BIBB-BAuA-11.html>. Zugriff am 8. April 2025. n.d.
- [103] Statistisches Bundesamt. *Ein Viertel der Erwerbstätigen leistet häufig körperlich schwere Arbeit*. Zugriff am 9. April 2025. n.d. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/09/PD24_N045_13.html?utm_source=chatgpt.com.
- [104] Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft and H.ZWEI.S Werbeagentur GmbH. *Ergonomie am Bau: Damit es leichter geht*. 2013th ed. Zugriff am 8. April 2025. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, 2013. URL: https://www.bgbau.de/fileadmin/Medien-Objekte/Medien/Broschuere_Flyer/bau625.pdf.
- [105] W. Jakoby. *Projektmanagement für Ingenieure: Ein praxisnahes Lehrbuch für den systematischen Projekterfolg*. 5th ed. Springer Vieweg, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-32791-0. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32791-0>.
- [106] H. Kerzner. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. 10th ed. Wiley, 2009. ISBN: 978-0-470-27870-3. URL: <https://learning.oreilly.com/library/view/project-management-a/9780470278703/>.

- [107] N. Jobst. “Prozessorientierte Ausarbeitung von Handlungs-empfehlungen für die Implementierung eines Robo-ters in den Baustellenbetrieb”. Diplomarbeit. Wien: TU Wien, 2025.
- [108] Kraj Vysočina. *Kraj postaví nový depozitář v Pelhřimově. Umístí sem také archeologické sbírky*. n.d. URL: <https://www.kr-vysocina.cz/kraj-postavi-novy-depozitar-v-pelhrimove-umisti-sem-take-archeologicke-sbirky/d-4122534>.
- [109] A. Weiss, R. Bernhaupt, M. Lankes, and M. Tscheligi. “The USUS evaluation framework for human-robot interaction”. In: *Proc. of AISB 09 4* (Jan. 2009), pp. 11–26.
- [110] *Bauprojekt- und Objektmanagement; Teil-1: Objekterrichtung*. Deutsch. Wien: Austrian Standards International, Mar. 2022.
- [111] R. Collinson. *Introduction to Avionics Systems*. 4th ed. Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-29215-6. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-29215-6>.
- [112] A. Thakur. “An overview of “Drive by wire” technology for Automobiles”. In: Jan. 2019.
- [113] H. Miyakawa, J. Ochiai, K. Oohata, and T. Shiokawa. “Application of Automated Building Construction System for High-Rise Office Building”. In: Sept. 2000. DOI: 10.22260/ISARC2000/0083.
- [114] Liebherr. *Liebherr-Planiertrauben mit LiReCon-System sorgen beim österreichischen Bundesheer für mehr Sicherheit*. 2025. URL: <https://www.liebherr.com/de-at/n/liebherr-planiertrauben-mit-lirecon-system-sorgen-beim-%C3%B6sterreichischen-bundesheer-f%C3%BCr-mehr-sicherheit-128640-4445452>.