Elisabeth Clausen, Aline Christina Herz, Aarti Mona Sörensen,
Erik Hulthén, Panagiota Papadopoulou, Angela Binder,
Juan Herrera Herbert, David Tanner, Michael Försth

Rethinking Mining Engineering Education – Implementation of Conceive – Design – Implement – Operate (CDIO™)

In the context of the fourth industrial revolution, mining is bound to undergo significant changes within the coming decades. Mining in the sense of Mining 4.0 will not only prioritise the efficient, sustainable and responsible use of available resources, but will also be characterised by digitalisation and automation. In order to adapt to those changes and challenges of the future working environments, the requirements and training profiles of future mining engineers will have to adapt accordingly. Founded in 2000, as an initiative between four universities from Sweden and the USA, the CDIO Initiative provides an innovative framework for the conceptual design of future engineering courses. Its superordinate goal is to define principles and standards, so that engineering principles can be combined with practical applications in the sense of CDIO – Conceiving, Designing, Implementing, Operating. As part of a project funded by the EIT Raw Materials, the CDIO approach is, for the first time on a global scale, transferred to raw materials education by an international consortium consisting of representatives from academia, research and industry.

Moderne kompetenzorientierte Ingenieurausbildung im Rohstoffbereich – Anwendung von CDIO™ (Conceive – Design – Implement – Operate)

Im Rahmen der vierten industriellen Revolution wird sich auch der Bergbau in den nächsten Jahrzehnten maßgeblich verändern. In Kombination mit einem effizienten, nachhaltigen und verantwortungsbewussten Umgang mit den vorhandenen Ressourcen wird dieser Bergbau im Sinne von Bergbau 4.0 von einer zunehmenden Digitalisierung und Automatisierung geprägt sein. Um die neuen Herausforderungen und zukünftigen Arbeitswelten bewältigen zu können, wird sich damit einhergehend ebenfalls das Anforderungs- und Ausbildungsprofil zukünftiger Bergbauingenieure ändern und anpassen müssen. Im Jahr 2000 als Initiative zwischen vier Universitäten in den USA und Schweden gegründet, bietet die CDIO-Initiative einen innovativen Rahmen für die Weiterentwicklung ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge. Übergeordnetes Ziel hierbei war es, Prinzipien und Standards zu definieren, sodass bereits während des Studiums ingenieurwissenschaftliche Grundlagen mit praxisnahen Anwendungen im Sinne von CDIO – konzipieren (Conceiving) – gestalten (Designing) – implementieren (Implementing) und betreiben (Operating) – verzahnt werden. Im Rahmen eines durch das EIT Raw Materials geförderten Projekts werden diese Ansätze weltweit nun erstmalig durch ein internationales Konsortium, bestehend aus Vertretern aus Lehre, Forschung und Industrie, auf die rohstoffbezogene Ausbildung übertragen.

1 Introduction

Technological developments will be the key to future sustainable development within the mining industry (1). In the context of Mining 4.0 (2) and a responsible use of existing resources, this development also affects increasing demands in the areas of environmental protection, occupational health and safety with simultaneously increasingly more difficult mining conditions. However, as digitalisation and automation enable people, machines and processes to interact in new ways, it also provides the opportunity to support the implementation of the objectives of Mining 4.0, such as selective extraction of raw materials and the development of autonomous mining systems with minimal effect on humans and the geosphere. In accordance with technological innovations, the aforementioned digitalisation and the

1 Einleitung

Technologische Entwicklungen bilden das Kernelement für eine zukünftige nachhaltige Entwicklung im Rohstoffsektor (1). Im Sinne von Bergbau 4.0 (2) und eines verantwortungsvollen Umgangs mit den vorhandenen Ressourcen ist diese Entwicklung einerseits verbunden mit steigenden Anforderungen in den Bereichen des Umweltschutzes sowie der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes bei gleichzeitig zunehmend schwieriger werdenden Lagerstätten- und Abbaubedingungen. Andererseits bieten sich durch die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung vielfältige Möglichkeiten, die Umsetzung der Ziele für den Bergbau 4.0, wie eine selektive Rohstoffgewinnung sowie die Entwicklung autonomer Gewinnungssysteme bei minimaler Auswirkung auf Mensch und Geosphäre, zu unterstützen. Die zu-

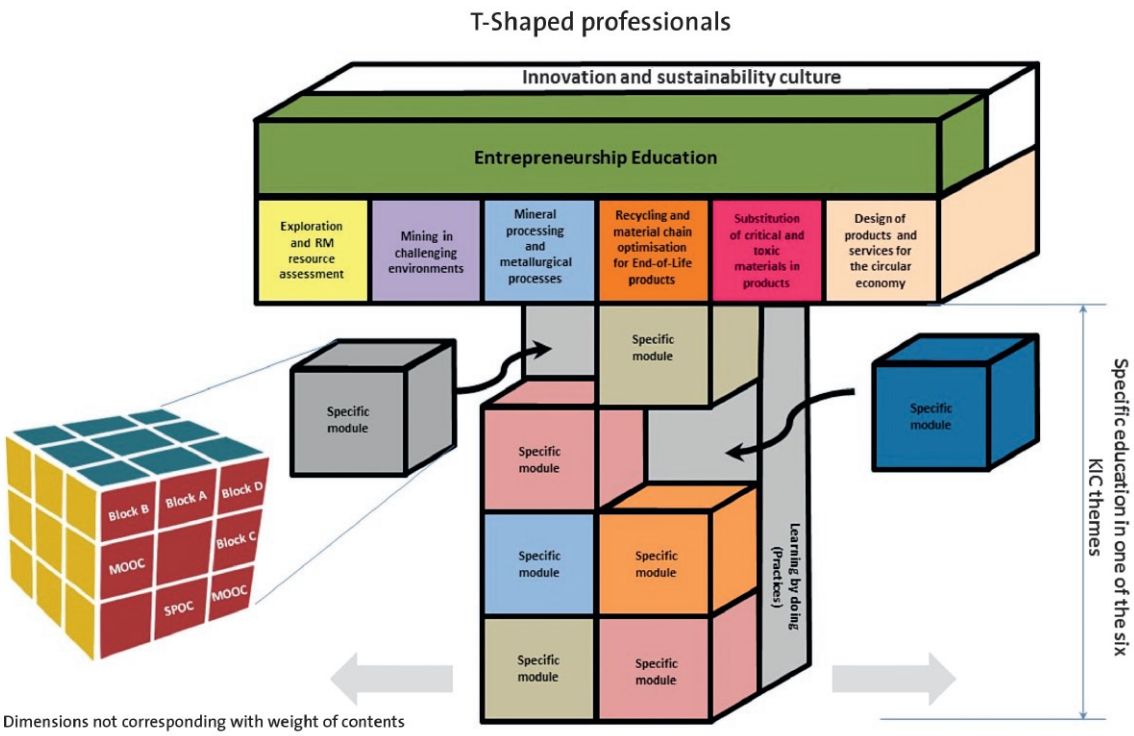

Fig. 1. Concept of a T-Shaped Professional (5). // Bild 1. Konzept eines T-Shaped Professionals (5).

development of mining towards Mining 4.0 also necessitate the evaluation and adaptation of the requirements and training profile of future mining engineers. Consequently, this challenges universities to rethink the conceptual framework of their education. At the same time, it is important to take into account the change in generations of students, such as the generation Z, members of which are currently commencing their studies, and subsequently, the new types of learning cultures and ways of thinking that they employ (3, 4).

On the one hand, mining engineers of the future have to have in-depth specialised knowledge and expertise at their disposal. On the other hand, they need to be competent concerning social skills, leadership, entrepreneurship, and interdisciplinary collaboration. So-called T-Shaped Professionals, as illustrated in figure 1 (5), require not only extensive in-depth knowledge of their discipline, but also require having an overview over and understanding of the entire value-chain of raw materials. Furthermore, they require a basic understanding of digitalisation and automation, and understanding of the relevance and meaning of social-license-to-operate for mining projects, innovative and entrepreneurial thinking, as well as social and linguistic competences (6).

Due to this plethora of changes in working conditions and requirements, there is a need to reevaluate and reshape the existing approaches of educating future mining engineers. In this context, the global CDIO Initiative provides an innovative didactic framework to prepare mining engineers for their future work environment in the best way possible (7). As a part of a project funded by the EIT Raw Materials, since 2016 the CDIO approach has been transferred to raw materials education by an international consortium consisting of partners from academia, research and industry.

nehmende Digitalisierung und Entwicklung des Bergbaus in Richtung Bergbau 4.0, was dazu führt, dass Menschen, Maschinen und Prozesse in einer neuen Art miteinander agieren, erfordert als Grundlage für technologische Innovationen daher auch ein angepasstes Anforderungs- und Ausbildungsprofil für zukünftige Bergbauingenieure. Dies stellt die Universitäten vor die Aufgabe, die Art und Weise der Ausbildung zu überdenken. Gleichzeitig gilt es, den Wandel der Generationen, wie die Entwicklung zur Generation Z, die aktuell das Studium an den Universitäten aufnimmt, und eine damit verbundene neue Art von Lernkulturen und Denkweisen zu berücksichtigen (3, 4).

Die Bergbauingenieure der Zukunft verfügen einerseits über ein tiefes Fachwissen und Fachverständnis. Andererseits weisen sie Stärken auf in persönlicher und sozialer Kompetenz, Führungsqualität, Innovationsfähigkeit, Unternehmertum und der Fähigkeit zur interdisziplinären Zusammenarbeit. Sogenannte T-Shaped Professionals, wie in Bild 1 (5) dargestellt, benötigen neben einem umfassenden tiefen fachlichen Wissen einen Überblick über den gesamten Rohstoffkreislauf, ein grundlegendes Verständnis für die Digitalisierung und Automatisierung, sowie für die Notwendigkeit gesellschaftlicher Akzeptanz von Bergbauvorhaben, aber auch globales und innovatives unternehmerisches Denken sowie soziale und sprachliche Kompetenzen (6).

Aufgrund dieser sich verändernden Rahmenbedingungen besteht die Notwendigkeit, existierende Ansätze für die Bergbauausbildung zu überdenken und umzugestalten. Die weltweite CDIO-Initiative bietet dabei einen innovativen didaktischen Rahmen, um zukünftige Ingenieurinnen und Ingenieure bestmöglich auf die Arbeitswelt vorzubereiten (7). Seit dem Jahr 2016 werden diese Ansätze im Rahmen eines durch das EIT Raw Materials geförderten Projekts weltweit erstmalig auf die rohstoffbezogene Ausbildung übertragen.

The European Institute of Innovation and Technology (EIT) is an independent EU institution with the aim of reinforcing Europe's innovation capacity and forms an integral part of the Horizon 2020 EU Research and Innovation Framework Program. By bringing together stakeholders from industry, academia and research, the EIT promotes innovative enterprises and creations thereof, and plays an essential role in supporting the EU's goals of sustainable economic growth and job creation (8). To ensure access to, supply with and sustainable use of raw materials, the EIT founded and promotes the EIT Raw Materials. Nowadays, EIT Raw Materials is the largest consortium of its kind in the world, with around 120 partners from 20 European countries. The promotion of innovations, new training-, education and teaching concepts as well as fostering entrepreneurial ideas intends to improve the competitiveness, growth and attractiveness of Europe's mining and extractive industry. Furthermore, such developments aim at turning raw materials into a major strength of Europe in the future (9).

2 The CDIO Initiative

In 2000, the Massachusetts Institute of Technology (MIT), Chalmers University of Technology, the Royal Institute of Technology in Stockholm (KTH), and Linköping University (LiU), established the CDIO Initiative. 18 years later, this project has developed into a global initiative with around 153 universities amongst its members, with the common goal of conceiving and developing new approaches and ideas for modern university education in engineering sciences (10).

The basic idea of CDIO is that graduates of engineering sciences are enabled to implement complex product-, process-, and system building activities according to the CDIO principle – conceiving, designing, implementing and operating – in interdisciplinary teams and apply these principles to develop systems and products (11). The close link between established principles of engineering sciences and practical or real case applications constitutes the most essential component of the training. In order to support the implementation of the CDIO approach at the individual universities, a set of principles and standards was defined. In addition, regional and international conferences provide an opportunity for exchanging ideas, concepts or teaching/learning materials (12).

The emergence of CDIO can be traced back to discussions in the 1970s to 1990s. In training programmes of those times, many universities focused on the training of engineers with highly specialised knowledge, often neglecting personal and interpersonal skills. Gradually, industry representatives voiced concerns, which eventually led to the development of a list of necessary competencies and requirements for engineers. In 1984, Bernard M. Gordon (Analogic Corporation) defined the skills that an engineer should possess: understanding of technical, communicative and (inter-)personal relations, as well as contributing to society by theorising, conceptualising, developing and producing reliable structures and machines of practical and economic value (13). Other companies added additional requirements in the following years. The consequent pressure on universities to rethink and redesign their curricula presented them with new challenges: how can they teach in-depth technical knowledge and understanding of an ever-expanding field whilst simultaneously passing on social skills, internationalisation, interdisciplinary knowledge and innovative entrepreneurial thinking?

Das European Institute of Innovation and Technology (EIT) ist eine unabhängige Einrichtung der EU zur Stärkung der Innovationsfähigkeit Europas und ein wesentlicher Bestandteil des EU-Rahmenprogramms für Forschung und Innovation Horizont 2020. Durch das Zusammenbringen von Akteuren aus Wirtschaft, Bildung und Forschung fördert das EIT innovative Unternehmen und Unternehmensgründungen und spielt eine zentrale Rolle bei der Unterstützung der Ziele der EU, ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum und Arbeitsplätze zu schaffen (8). Zur Sicherstellung des Zugangs zur Versorgung mit und der nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen gründete und fördert das EIT das EIT Raw Materials. Heute ist das EIT Raw Materials mit rd. 120 Partnern aus 20 Ländern Europas das größte Konsortium seiner Art weltweit. Durch die Förderung von Innovationen, neuen Aus-, Weiterbildungs- und Lehrkonzepten sowie durch die Begleitung von unternehmerischen Ideen sollen die Wettbewerbsfähigkeit, das Wachstum und die Attraktivität des Rohstoffbereichs in Europa nachhaltig gestärkt werden. Ziel ist es, diese Entwicklung zudem so zu gestalten, dass Rohstoffe zukünftig eine Stärke Europas darstellen (9).

2 Die CDIO-Initiative

Im Jahr 2000 wurde die CDIO-Initiative durch das Technische Institut Massachusetts (MIT), die Technische Hochschule Chalmers, die Königlich Technische Hochschule Stockholm (KTH) und die Universität Linköping (LiU) gegründet. 18 Jahre später ist hieraus eine weltweite Initiative mit rd. 153 Mitgliedsuniversitäten entstanden, mit dem Ziel, neue Ansätze und Ideen für eine moderne Hochschulausbildung in den Ingenieurwissenschaften zu entwickeln (10).

Die CIDO-Initiative ist dabei ein innovativer Rahmen für die Lehre im Ingenieurbereich mit dem Ziel, zukünftige Generationen von Ingenieuren optimal auf die spätere Arbeitswelt vorzubereiten. Die Grundidee von CDIO ist, dass Absolventen der Ingenieurwissenschaften dazu befähigt werden sollen, komplexe Wertschöpfungsketten technischer Systeme nach dem CDIO-Prinzip – konzipieren, designen, implementieren, betreiben (im englischen: conceive, design, implement, operate) – in interdisziplinären Teams umsetzen sowie Systeme und Produkte entwickeln zu können (11). Eine enge Verzahnung zwischen fundierten ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen mit praxisnahen bzw. realen Anwendungen steht dabei im Vordergrund der Ausbildung. Zur Unterstützung bei der Umsetzung des CDIO-Ansatzes an den jeweiligen Universitäten wurde ein Katalog von Prinzipien und Standards definiert. Darüber hinaus findet ein regelmäßiger Austausch von Lehrenden beispielsweise zu erarbeiteten Konzepten oder Lehr- /Lernmaterialien u.a. auf regionalen und internationalen Konferenzen statt (12).

Die Entstehung von CDIO geht bereits auf Diskussionen der 1970er bis 1990er Jahre zurück. In damaligen Ausbildungsprogrammen lag der Fokus vieler Universitäten zumeist auf der Ausbildung von Ingenieuren mit einem hochspezialisierten technischen Wissen. Nach und nach wurden Bedenken und Probleme von Vertretern der Industrie geäußert, was letztlich zur Erarbeitung einer Liste führte, in der notwendige Kompetenzen und Anforderungen an Ingenieure seitens der Industrie dargelegt wurden. Im Jahr 1984 definierte Bernard M. Gordon (Analogic Corporation) entsprechend folgende Fähigkeiten als notwendige

Representatives of universities, governments and industry soon began to discuss various possibilities for improvement, and thus, the CDIO Initiative was established. The initiative began to gather requirements and recommendations proposed by the industry and develop initial guidelines for a holistic education programme for engineers. It evolved into the first of ultimately twelve standards for contemporary engineering education, "the context". In principle, every engineer should be able to conceive, design, implement and operate (CDIO) technical products, processes and systems. This is preferably done in an international and interdisciplinary team that employs modern technologies. The twelve standards of modern education of engineers are shown in table 1. These standards are concerned with all relevant aspects of the further conceptualisation of engineering seminars, courses and programmes, and include aspects ranging from integrated curriculum development to the types of examinations, evaluations and teacher training (13). The vision the standards are based on contains the following superordinate principles (CDIO Initiative 2017a):

- A curriculum organised around mutually supporting courses, but with CDIO activities highly interwoven.
- Rich with student design-build-test projects.
- Integrating learning of professional skills such as teamwork and communication.
- Featuring active and experiential learning.
- Continuous improvement through quality assurance process with higher aims than accreditation.

These standards may serve as a guidance for the revision of existing study programmes or for the development of new programmes as well as for self-evaluation. Students should be actively involved in the design of the study programmes, e.g. through surveys (3, 13, 14).

3 CDIO in Mining Engineering Education

In order to transfer the CDIO principles and standards to raw materials related programmes for the first time, the EIT Raw Materials funded the project "CDIO: Implementation of Conceive Design Implement and Operate" from 2016 to 2017, from which the current project "CDIO II: Implementing CDIO in Raw Materials Sector" (2018 to 2019) followed. The focus of both projects were and are didactics in terms of advanced training for lecturers at the faculties of the individual partner universities, the design and provision of student teaching and learning environments and innovative laboratories as well as the (further) development of courses, and teaching and learning formats through the integration of active, experiential methods.

3.1 Project CDIO: Implementation of Conceive Design Implement and Operate (2016 – 2017)

The aim of the initial project "CDIO: Implementation of Conceive Design Implement and Operate" was the firstly integration of CDIO principles in already existing master programmes in the field of raw materials. The consortium comprised nine partners from five different countries covering all parts of the knowledge triangle with partners from industry, higher education, and research with complementary skills and experiences. The partners were as follows:

Grundausstattung eines Ingenieurs: Verständnis für technische, kommunikative und menschliche Beziehungen sowie die Fähigkeit, einen effektiven Beitrag zur Gesellschaft zu leisten, indem er zuverlässige Strukturen und Maschinen von praktischem und ökonomischem Wert theoretisiert, konzipiert, entwickelt und produziert (13). Weitere Ergänzungen anderer Unternehmen kamen in den darauffolgenden Jahren hinzu. Der so ausgeübte Druck auf die Universitäten, ihre Lehrinhalte zu überdenken und umzugestalten, stellte diese vor eine neue Herausforderung: Wie ist es möglich, ein tiefes technisches Wissen und Verständnis eines ständig wachsenden Bereichs zu lehren und zugleich soziale Kompetenzen, Internationalisierung, interdisziplinäres Wissen und innovatives unternehmerisches Denken zu vermitteln?

Vertreter von Universitäten, Regierungen und aus der Industrie begannen, vor diesem Hintergrund gemeinsam über mögliche Verbesserungen zu diskutieren. So entstand im Jahr 2000 die CDIO-Initiative. Diese begann, die Anforderungen und Empfehlungen der Industrie zusammenzutragen und erste Richtlinien für ein ganzheitliches Ausbildungsprogramm für die Ingenieurwissenschaften zu entwickeln. Es entstand der erste von letztlich zwölf Standards für eine zeitgemäße Ingenieurausbildung, „der Kontext". Grundsätzlich sollte jeder Ingenieur in der Lage sein, technische Produkte, Prozesse und Systeme komplexer Wertschöpfungsketten zu konzipieren, zu designen, zu implementieren und zu betreiben (conceiving, designing, implementing and operating – CDIO). Dies geschieht im Idealfall in einem internationalen und interdisziplinären Team unter Einbeziehung moderner Technologien. Die Grundsätze einer zeitgemäßen Ingenieurausbildung wurden nach und nach in insgesamt zwölf Standards festgehalten, welche in Tabelle 1 aufgeführt sind. Die Standards befassen sich dabei mit allen relevanten Aspekten einer (Weiter-) Entwicklung von ingenieurwissenschaftlichen Kursen, Studiengängen und Programmen und beinhalten Aspekte von der integrierten Curricula-Entwicklung bis hin zu Prüfungsformen, Evaluationen und der didaktischen Weiterbildung von Lehrenden (13). Die den Standards zugrunde liegende Vision beinhaltet folgende übergeordnete Prinzipien (CDIO-Initiative 2017a):

- Entwicklung eines Curriculums, das so organisiert ist, dass die einzelnen Kurse sich nicht nur komplementär gegenseitig ergänzen, sondern auch über CDIO-Aktivitäten stark miteinander integriert und vernetzt sind.
- Einbindung vielfältiger design-build-test-Projekte.
- Unterstützung bei der Entwicklung persönlicher Kompetenzen, wie die Fähigkeit in einem Team zu arbeiten oder effizient und zielgerichtet zu kommunizieren.
- Förderung aktiver Lehr- /Lernmethoden und erfahrungsorientierten Lernens.
- Kontinuierliche Weiterentwicklung der Studienprogramme durch Qualitätssicherungsprozesse, die höhere Ziele als bei allgemeinen Akkreditierungen anstreben.

Die entwickelten Standards können als Leitfaden bei der Überarbeitung von bereits bestehenden oder bei der Entwicklung von neuen Studienprogrammen sowie zur Selbstevaluierung dienen. Dabei sollten Studierende aktiv in den Prozess der Gestaltung der Studienprogramme, beispielsweise durch Umfragen, mit einbezogen werden (3, 13, 14).

#	Standard	Description // Beschreibung
1	The Context // Kontext	Adoption of the principle that product, process, and system lifecycle development and deployment – Conceiving, Designing, Implementing and Operating – are the context for engineering education. Die Auffassung, dass die Entwicklung und Anwendung des Produkt-, Prozess- und Systemkreislaufs – Konzeption, Design, Implementierung und Betrieb – den Kontext der ingenieurtechnischen Ausbildung darstellen.
2	Learning Outcomes // Lernziele	Specific, detailed learning outcomes for personal and interpersonal skills, and product, process, and system building skills, as well as disciplinary knowledge, consistent with program goals and validated by program stakeholders. Spezifische, detaillierte Lernziele für persönliche und zwischenmenschliche Kompetenzen sowie die Fähigkeit, Produkt-, Prozess- und Systemketten zu konzipieren und zu implementieren. Des Weiteren die Vermittlung disziplinären Wissens, welches mit den Programmzielen übereinstimmt und von unterschiedlichen Interessengruppen validiert wird.
3	Integrated Curriculum // Integriertes Curriculum	A curriculum designed with mutually supporting disciplinary courses, with an explicit plan to integrate personal and interpersonal skills, and product, process, and system building skills. Ein Curriculum mit Kursen, welche sich nicht nur gegenseitig ergänzen und explizit die Entwicklung persönlicher und zwischenmenschlicher Kompetenzen fördern, sondern auch die Fähigkeit ausbilden, Produkt-, Prozess- und Systemketten zu konzipieren und zu integrieren.
4	Introduction to Engineering // Einführung in das Ingenieurwesen	An introductory course that provides the framework for engineering practice in product, process, and system building, and introduces essential personal and interpersonal skills. Ein Einführungskurs, welcher den Ingenieuren einen Rahmen für die technische Praxis in der Produkt-, Prozess- und Systemkonzipierung und -implementierung bietet sowie wesentliche persönliche und zwischenmenschliche Fähigkeiten vermittelt.
5	Design-Implement Experiences // Design- und Implementierungs-erfahrung	A curriculum that includes two or more design-implement experiences, including one at a basic level and one at an advanced level. Ein Curriculum, welches zwei oder mehr praktische Design- und Implementierungserfahrungen mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden enthält
6	Engineering Workspaces // Arbeitsbereiche des Ingenieur-wesens	Engineering workspaces and laboratories that support and encourage hands-on learning of product, process, and system building, disciplinary knowledge, and social learning. Technische Arbeitsräume und Labore, die das praktische Erlernen der Konzeptionierung und Implementierung komplexer Wertschöpfungsketten, disziplinären Wissens und sozialen Lernens unterstützen und fördern.
7	Integrated Learning Experiences // Integrierte Lernerfahrungen	Integrated learning experiences that lead to the acquisition of disciplinary knowledge, as well as personal and interpersonal skills, and product, process, and system building skills. Integrierte Lernerfahrungen, welche den Erwerb disziplinbezogenen Wissens, persönlicher und zwischenmenschlicher Kompetenzen und Konzeptions- und Implementierungsfähigkeiten zum Ziel haben.
8	Active Learning // Aktives Lernen	Teaching and learning based on active experiential learning methods. Lehren und Lernen basierend auf praktischen, anwendungsorientierten sowie aktivierenden Lehr- /Lernmethoden.
9	Enhancement of Faculty Competence // Erweiterung von Fakultäts-kompetenzen	Actions that enhance faculty competence in personal and interpersonal skills, and product, process, and system building skills. Maßnahmen, welche die Kompetenz der Fakultät in Bezug auf persönliche und zwischenmenschliche Fähigkeiten sowie Produkt-, Prozess- und Systembildungsfähigkeiten verbessern.
10	Enhancement of Faculty Teaching Competence // Ausbau der Lehrkompetenz der Fakultät	Actions that enhance faculty competence in providing integrated learning experiences, in using active experiential learning methods, and in assessing student learning. Maßnahmen, welche die Kompetenz des Lehrkörpers für die Bereitstellung integrierter Lernerfahrungen, die Anwendung aktivierender Lehrmethoden sowie Evaluation des Lernfortschritts der Studierenden verbessern.
11	Learning Assessment // Lernbewertung	Assessment of student learning in personal and interpersonal skills, and product, process, and system building skills, as well as in disciplinary knowledge. Bewertung des Lernerfolgs der Studierenden in Bezug auf persönliche und zwischenmenschliche Fähigkeiten.
12	Program Evaluation // Evaluation	A system that evaluates programs against these twelve standards, and provides feedback to students, faculty, and other stakeholders for the purposes of continuous improvement. Ein System, welches Programme nach diesen zwölf Standards bewertet und Feedback an Studierende, Fakultäten und andere Interessengruppen liefert, um eine kontinuierliche Verbesserung zu gewährleisten.

Table 1. // Tabelle 1. CDIO Standards (13).

- Luleå University of Technology (LTU) (Coordinator);
- Clausthal University of Technology (CUT);
- Universidad Politécnica de Madrid (UPM);
- Delft University of Technology (TUD);
- Chalmers University of Technology (CHU);
- University of Limerick (UL);
- Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag (LKAB);
- RUSAL Aughinish Ltd.; and
- RISE Research Institutes of Sweden AB (9).

3 CDIO in der Rohstoffausbildung

Um die CDIO-Prinzipien und -Standards erstmals auch auf die rohstoffbezogene Ausbildung zu übertragen, förderte das EIT Raw Materials in den Jahren 2016 und 2017 das Projekt „CDIO: Implementation of Conceive Design Implement and Operate“, aus dem das aktuelle Projekt „CDIO II: Implementing CDIO in Raw Materials Sector” (2018–2019) hervorging. Im Schwerpunkt beider Projekte stand und steht dabei die didaktische Weiterbildung der Lehrenden an den Fakultäten der einzelnen Partneruniversitäten, die Ge-

CHU, UL and TUD concentrated primarily on the development of CDIO courses for further training of lecturers in the raw materials sector (19). LTU created a new curriculum, CUT and UPM transferred the CDIO approach to existing courses in their mining engineering master's degree programmes (15, 16, 17, 18, 19). An example of the development of a course is the conceptualization and implementation of two courses at the CUT, which explicitly integrated aspects of sustainability within mining education (17). Based on the comparison of learning objectives, teaching and learning activities and examinations, students developed subject-specific and target group-oriented communication skills. The teaching and learning activities aimed at a continuous activation of the learners and included various, sometimes divergent views of relevant stakeholders. In order to ensure an appropriate review of the complex skills, a multipart review with transparent evaluation criteria was developed and employed. Another example is the development and production of learning videos that support targeted, self-paced preparation and follow-up in the field of mine ventilation and air conditioning.

3.2 Project CDIO II: Implementing CDIO in Raw Materials Sector (2018 – 2019)

In the context of the project "CDIO II: Implementing CDIO in Raw Materials Sector" and building on the results of the previous project, further essential components for the implementation of the CDIO approach in raw materials education will be conceptualised. Thus, faculty development will be expanded, a joint project course will be conceived and conducted, and existing, innovative laboratories for students of the mining industry will be evaluated leading to guidelines covering best practice examples. Partners in the project are:

- Chalmers University of Technology (Coordinator);
- RWTH Aachen University;
- Luleå University of Technology;
- Universidad Politécnica de Madrid;
- University of Limerick;
- Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag; and
- RISE Research Institutes of Sweden AB.

As part of faculty development, lecturers learn in inspirational lectures and faculty development courses how to integrate innovative entrepreneurial skills into technical programs, how to define suitable learning objectives for their course, linked to teaching and learning contents and what type of assessment they could apply to their course, etc. (19).

The goal of the joint project course, which is developed and carried out in cooperation with the industrial partners LKAB and RISE, is that students from different universities investigate together actual issues and real problems from the industry. It also enables students to work on problems from their future work environment in an international, multicultural team and to apply the skills acquired in their course of studies while practicing their communication skills in foreign languages and across long distances. Thus, they become acquainted with interdisciplinary working methods and simultaneously learn to adapt the results of their joint work for the different needs and requirements of their respective universities and industrial partners.

The creation of guidelines based on existing best practice examples and the establishment of an international CDIO network

staltung von studentischen Lehr-/Lernumgebungen und innovativen Laboren sowie die (Weiter-)Entwicklung von Kursen und Lehr- / Lernformaten durch die Integration aktivierender Methoden.

3.1 Projekt CDIO: Implementation of Conceive Design Implement and Operate (2016 – 2017)

Ziel des Projekts "CDIO: Implementation of Conceive Design Implement and Operate" war die erstmalige Integration von CDIO-Prinzipien in bereits existierende Masterstudiengänge im Rohstoffbereich. Das Konsortium umfasste neun Partner aus fünf verschiedenen Ländern und deckte alle Bereiche des Wissensdreiecks – Industrie, Bildung, Forschung – mit komplementären Kompetenzen und Erfahrungen ab. Die Partner waren

- Luleå University of Technology (LTU) (Koordinator),
- Clausthal University of Technology (CUT),
- Universidad Politécnica de Madrid (UPM),
- Delft University of Technology (TUD),
- Chalmers University of Technology (CHU),
- University of Limerick (UL),
- Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag (LKAB),
- RUSAL Aughinish Ltd. und
- RISE Research Institutes of Sweden AB (9).

CHU, UL und TUD konzentrierten sich in erster Linie auf die Entwicklung von CDIO-Kursen für die Weiterbildung von Lehrenden im Rohstoffsektor (19). LTU entwickelte ein neues Curriculum, CUT und UPM übertrugen den CDIO-Ansatz auf bereits existierende Kurse im Masterstudiengang Mining Engineering (15, 16, 17, 18, 19). Gemeinsam mit den Partnern aus der Industrie wurden so neuartige Lehrkonzepte entwickelt. Ein Beispiel für eine Lehrveranstaltungsentwicklung ist der Aufbau von zwei Kursen an der TU Clausthal, die Nachhaltigkeitsaspekte explizit in die Bergbauausbildung integrieren (17). Auf Basis des Abgleichs von Lernzielen, Lehr-/Lern-Aktivitäten und Prüfungen entwickeln die Studierenden fach- und zielgruppenbezogene Kommunikationsfähigkeiten. Die Lehr-/Lern-Aktivitäten zielen auf eine dauerhafte Aktivierung der Lernenden ab und bringen unterschiedliche, teils divergierende Sichtweisen relevanter Stakeholder ein. Um eine angemessene Überprüfung der komplexen Fähigkeiten zu gewährleisten, wurde eine mehrteilige Prüfung mit transparenten Bewertungskriterien entwickelt und eingesetzt. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung und Produktion von Lernvideos, durch die eine gezielte selbstgesteuerte Vor- und Nachbereitung im Bereich der Wettertechnik und Klimatisierung unterstützt wird.

3.2 Projekt CDIO II: Implementing CDIO in Raw Materials Sector (2018 – 2019)

Im Rahmen des Projekts „CDIO II: Implementing CDIO in Raw Materials Sector" werden aufbauend auf den Ergebnissen des vorhergehenden Projekts weitere Grundsteine zur Implementierung des CDIO-Ansatzes in die rohstoffbezogene Ausbildung gelegt. Dazu werden die Fakultätsentwicklung weiter ausgebaut, ein gemeinsamer Projektkurs entwickelt und durchgeführt und bereits existierende innovative Labore für Studierende im Rohstoffbereich erfasst und Guidelines daraus abgeleitet. Partner im Projekt sind:

- Chalmers University of Technology (Koordinator),
- RWTH Aachen University,

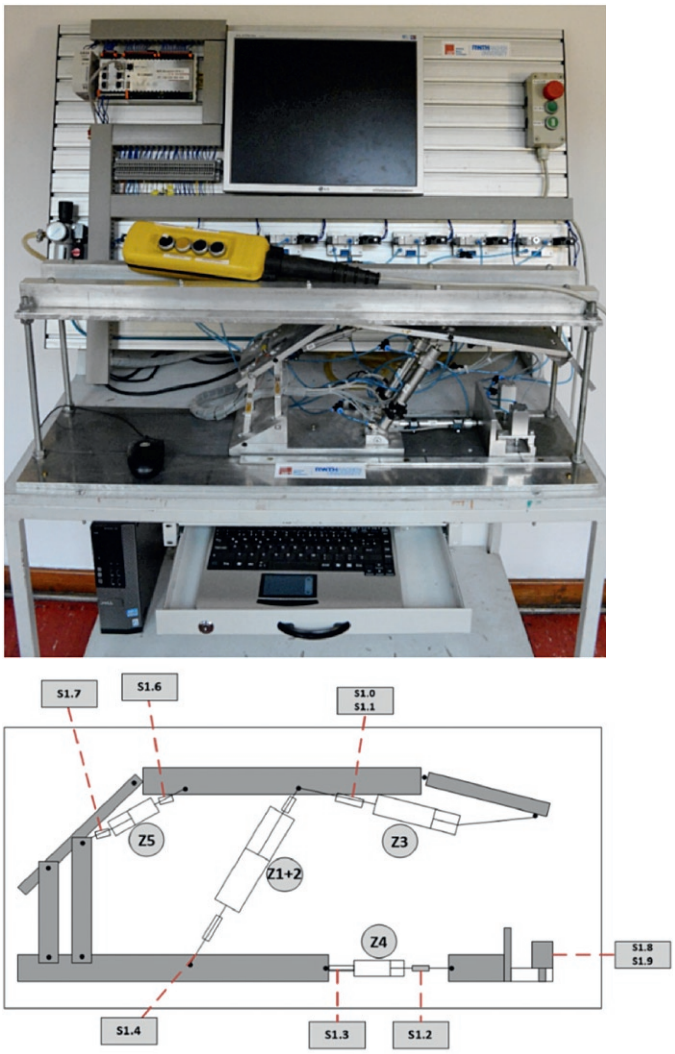

Fig. 2. Control technology test bench at AMT.
Bild 2. Steuerungstechnikprüfstand am AMT. Source/Quelle: RWTH

for innovative learning laboratories in the field of raw materials should help to improve and redevelop learning environments for students and promote the international exchange of teaching materials and experiences. The control technology test bench of the Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) at the RWTH Aachen University might be cited as an example of such a laboratory (Figure 2). The test bench introduces the students to the basics of control technology using a programmable logic controller (PLC). The accompanying lecture deals primarily with the basics of control engineering, whilst the practical attempt illustrates the programming of such a PLC. By using the shield extension model, the students are thus able to familiarise themselves with the basics of control engineering, implementation of various extension methods and steps and the solution of a given problem in a group.

4 Conclusion and Outlook

Increasing digitalisation and developments of the mining industry towards Mining 4.0 with its subsequent technological innovations require an adaption of respective requirements and education profiles for future mining engineers. As expectations of graduates are becoming increasingly complex, these engineers should not only have a high level of specialised knowledge, but also a high degree

- Luleå University of Technology,
- Universidad Politécnica de Madrid,
- University of Limerick,
- Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag und
- RISE Research Institutes of Sweden AB.

Im Rahmen der Fakultätsentwicklung lernen Lehrende beispielsweise, wie innovative unternehmerische Fähigkeiten in die technischen Programme integriert werden können, wie Lernziele definiert und mit Lehr-/Lerninhalten verknüpft werden oder welche Prüfungsformen und Methoden grundsätzlich angewendet werden können (19).

Ziel des Projektkurses, der in Zusammenarbeit mit den Industrie- und Forschungspartnern LKAB und RISE entwickelt und durchgeführt wird, ist es, dass Studierende von unterschiedlichen Universitäten gemeinsam an einer realen Fragestellung aus der Industrie arbeiten. Der Kurs soll es Studierenden ermöglichen, reale Probleme ihres zukünftigen Arbeitsumfelds in einem internationalen, multikulturellen Team zu bearbeiten, ihre im Studium erworbenen Fachkenntnisse anzuwenden und ihre Kommunikationsfähigkeiten auch in fremden Sprachen und über weite räumliche Distanzen auszubauen. Sie lernen fachübergreifende Arbeitsweisen kennen und die Ergebnisse der gemeinsamen Arbeit gleichzeitig für die unterschiedlichen Bedürfnisse und Anforderungen ihrer Universitäten und des Industriepartners aufzubereiten.

Die Erstellung von Guidelines auf Grundlage existierender Best-Practice-Beispiele und der Aufbau eines internationalen CDIO-Netzwerks für innovative Lernlabore im Rohstoffbereich sollen Universitäten bei der Verbesserung und Neuentwicklung von Lernumgebungen für Studierende unterstützen und den internationalen Austausch von Erfahrungen und Lehr-/Lernmaterialien fördern. Als ein Beispiel für ein solches Labor kann der Steuerungstechnikprüfstand des Institutes for Advanced Mining Technologies (AMT) an der RWTH Aachen angeführt werden (Bild 2). Der Prüfstand führt die Studierenden in die Grundlagen der Steuerungstechnik mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ein. Die zugehörige Vorlesung geht dabei hauptsächlich auf die Grundlagen der Steuerungstechnik ein, während der praktische Versuch auf die Programmierung solch einer SPS abzielt. Die Studierenden lernen so anhand des programmierbaren Schildausbaumodells die Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik praktisch kennen, erfahren gleichzeitig aber auch das Umsetzen verschiedener Ausbauverfahren und -schritte sowie die Problemlösung in einer Gruppe.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Digitalisierung und Entwicklung des Bergbaus in Richtung Bergbau 4.0 erfordert als Grundlage für technologische Innovationen damit einhergehend ein angepasstes Anforderungs- und Ausbildungsprofil für zukünftige Bergbauingenieure. Die Erwartungen an Hochschulabsolventen werden zunehmend komplexer, sodass sie heutzutage neben einem ausgeprägten Fachwissen ein hohes Maß an weiteren Kompetenzen, wie Selbst-, Sozial- und Methodenkompetenz, Innovationsfähigkeit oder die Fähigkeit zur Führung und Mitarbeit in interdisziplinären und ggf. internationalen Teams aufweisen sollten. Für die Lehre entsteht daraus der Anspruch, den Erwerb fachlicher

of other skills, such as personal and interpersonal skills, methodological competence, innovative capabilities as well as the ability to lead or collaborate in interdisciplinary and international teams. This requires linking the acquisition of technical skills with that of interdisciplinary competences during the respective course of studies. One approach is the CDIO Initiative, which is an innovative framework for a modern university engineering education. It is the aim of the projects CDIO and CDIO II, funded by EIT Raw Materials, to apply those approaches to raw materials education for the first time. Within the framework of CDIO II additional training for lecturers at the partner universities as well as a project course for students will be developed and implemented. By evaluating existing innovative students' laboratories for mining engineering education, an international CDIO network for best practice laboratories is to be created, which with the help of guidelines should prove support and inspiration for the expansion of the new development of laboratories for students.

und überfachlicher Kompetenzen bereits während des Studiums zu verzahnen. Ein Ansatz für einen innovativen Rahmen für eine moderne Hochschulausbildung im Bereich der Ingenieurwissenschaften stellt die CDIO-Initiative dar. Diese Ansätze erstmalig auf die rohstoffbezogene Ausbildung zu übertragen, ist Ziel der durch das EIT Raw Materials geförderten Projekte CDIO und CDIO II. Im Rahmen von CDIO II werden ergänzende Weiterbildungen für Lehrende an den Partneruniversitäten stattfinden sowie ein gemeinsamer Projektkurs für Studierende entwickelt und durchgeführt. Durch die Erfassung von bereits existierenden innovativen Laboren für Studierende im Rohstoffbereich soll ein internationales CDIO-Netzwerk für Best-Practice-Labore entstehen, welches mit Hilfe von Guidelines Unterstützung und Inspiration für den Ausbau oder die Neuentwicklung von Laboren für Studierende bieten soll.

Acknowledgments

The presented material is based upon work supported and funded by the EIT Raw Materials (Project ID 15013 (2016–2017) and 17165 (2018–2019)). We would like to thank our colleagues from industry, academia and research institutions who provided insight and expertise that greatly assisted the project.

References / Quellenverzeichnis

(1) Harris, P.: Miners must "innovate or die": Anglo's O'Neill [online], 2017 [Zugriff am: 23. Mai 2017]. Verfügbar unter: http://www.miningmagazine.com/future-of-mining/future-of-mining-innovation/miners-must-innovate-or-die-anglos-oneill/?adfesuccess=0#

(2) Bartnitzki, T.: Mining 4.0 – Importance of Industry 4.0 for the Raw Materials Sector. In: Mining Report Glückauf (153), Heft 1/2017, S. 25–31.

(3) Malmqvist, J.; Edström, K.; Hugo, R.: A Proposal for Introducing Optional CDIO Standards. In: Proceedings of the 13th Intl. CDIO Conference, 2017, S. 21–36.

(4) Clausen, E.; Edelbro, C.; Herrera Herbert, J.; Edström, K.; Jonsson, K.: Implementation of CDIO in Mining Engineering Education. In: M. CARDU, Hg. 28th SOMP Annual Meeting and Conference. Proceedings- Papers, 2017.

(5) Herrera Herbert, J.: T-Shaped Professionals in Raw Materials, 2017.

(6) Edelbro, C., Hulthén, E.; Clausen, E.; O'Donoghue, L.; Herrera Herbert, J.; Edström, K.; Bhadani, K.; Jonsson, K.; Beaulieu, S.; Kamp, A.; Försth, M.: European Initiative on CDIO in Raw Material Programmes. In: The 13th International CDIO Conference, 2017.

(7) CDIO INITIATIVE. CDIO Vision [online], 2017 [Zugriff am: 23. Mai 2017]. Verfügbar unter: www.cdio.org/cdio-vision

(8) EIT. Das European Institute of Innovation and Technologie (EIT) – Innovationen verwirklichen! [online] [Zugriff am: 12. August 2018]. Verfügbar unter: www.eit.europa.eu/de/in-your-language

(9) EIT RawMaterials. EIT RawMaterials: About us [online] [Zugriff am: 12. August 2018]. Verfügbar unter: www.eitrawmaterials.eu/about-us/

(10) CDIO INITIATIVE. Member Schools of the CDIO INITIATIVE [online] [Zugriff am: 12. August 2018]. Verfügbar unter: www.cdio.org/cdio-collaborators/school-profiles

(11) Crawley, E. F.; Malmqvist, J.; Östlund, S.; Brodeur, D. R.: Rethinking engineering education. The CDIO Approach, 2007, 302, 60–62.

(12) CDIO.ORG. About CDIO [online] [Zugriff am: 12. August 2018]. Verfügbar unter: www.cdio.org/about

(13) Crawley, E. F.; Malmqvist, J.; Östlund, S.; Brodeur, D. R.; Edström, K.: Rethinking Engineering Education. Cham: Springer International Publishing, 2014. ISBN 978-3-319-05560-2.

(14) Edström, K.; Törnevik, J.; Engström, M.; Wiklund, Å.: Student involvement in principled change: Understanding the student experience. In: Improving Student Learning Conference, Oxford, England, 2003.

(15) Edelbro, C.; Hulthén, E; Clausen, E.; O'Donoghue, L.; Herrera Herbert, J.; Edström, K.; Bhadani, K.; Jonsson, K.; Beaulieu, S.; Kamp, A.; Försth, M.: European Initiative on CDIO in Raw Material Programmes. In: The 13th International CDIO Conference, 2017.

(16) Edelbro, C.; Eitzenberger, A.; Edström, K.: Engaging with industry stakeholders to support program development. In: The 13th International CDIO Conference, 2017.

(17) Binder, A.; Clausen, E.; Hutwalker, A.: Integrating sustainability aspects in mining engineering education. In: R. Brennan, K. Edström, R. Hugo, J. Roslöf, R. Songer und D. Spooner, Hg. The 13th International CDIO Conference. Proceedings Full Papers, 2017, S. 548–558.

(18) Clausen, E.; Binder, A.: Innovative learning spaces for experiental learning: Underground mines. In: R. Brennan, K. Edström, R. Hugo, J. Roslöf, R. Songer und D. Spooner, Hg. The 13th International CDIO Conference. Proceedings Full Papers, 2017, S. 595–604.

(19) Bhadani, K.; Hulthén, E.; Malmqvist, J.; Edelbro, C.; Ryan, A.; Tanner, D.; O`Donoghue, L.; Edström, K.: CDIO Course development for faculty in raw materials programmes. In: The 13th International CDIO Conference, 2017.

Authors / Autoren

Prof. Dr. Elisabeth Clausen, Aline Christina Herz M. Sc., Aarti Mona Sörensen M. A., RWTH Aachen University, Aachen/Germany, Ass. Prof. Erik Hulthén, Panagiota Papadopoulou, Dipl. Eng., Chalmers University of Technology, Gothenburg/Sweden, Angela Binder M. Sc., Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld/Germany, Dr. Juan Herrera Herbert, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid/Spain, Dr. David Tanner, University of Limerick, Limerick/Ireland, Prof. Michael Försth, RISE Research Institutes of Sweden, Borås/Sweden and Luleå University of Technology, Luleå/Sweden