Elisabeth Clausen

Mine Ventilation in the 21st Century – Development Towards Adaptive Ventilation Systems

Mine ventilation and climatization became increasingly important over the last decade. Main challenges and drivers have been the development of mining activities towards greater depths, more complex deposits with a larger areal extent, the further introduction and implementation of diesel-powered vehicles as well as stricter occupational exposure limits and rising energy costs. To meet these requirements and to keep the operation viable, new holistic ventilation concepts, methods and tools need to be developed for providing and guaranteeing sufficient fresh air for safe and efficient operations in underground mines at all times and all locations. Current approaches focus mainly on the development and implementation of ventilation on demand concepts (VOD) and systems. However, the smart and intelligent, safe "Mine of the Future" demands the further development of advanced and adaptive ventilation systems. In this paper, a holistic concept for an advanced and adaptive ventilation system will be introduced and its key components and elements described. Furthermore, the implications on the higher education in the field of mine ventilation and climatization discussed and an exemplary teaching concept presented.

Wettertechnik im 21.Jahrhundert – Entwicklung adaptiver wettertechnischer Systeme

Der Bereich der Wettertechnik und Klimatisierung hat im letzten Jahrzehnt zunehmend an Bedeutung gewonnen. Hauptgründe hierfür sind die Entwicklung der Gewinnungsaktivitäten in immer größere Teufen mit einer zunehmenden flächenhaften Ausdehnung, der verstärkte Einsatz von dieselbetriebenen Maschinen sowie verschärfte Auflagen und Grenzwerte im Bereich der Arbeitssicherheit, des Gesundheits- sowie Umweltschutzes. Um diesen Anforderungen gerecht werden und die Rentabilität von rohstoffgewinnenden Betrieben auch weiterhin gewährleisten zu können, ist die Entwicklung neuer ganzheitlicher Ansätze, Methoden und Modelle für eine bedarfsgerechte Versorgung der einzelnen Betriebspunkte mit Frischwettern zu jedem Zeitpunkt notwendig. Aktuelle Ansätze konzentrieren sich auf die Entwicklung und Implementierung von Lösungen für eine bedarfsgerechte Bewetterung, auch bezeichnet als "Ventilation on Demand" (VOD). Darauf aufbauend ergeben sich für das smarte Bergwerk der Zukunft neue Potentiale, die eine Weiterentwicklung wettertechnischer Systeme in Richtung adaptiver Systeme ermöglichen. Im vorliegenden Artikel werden ein ganzheitlicher Ansatz für ein solches adaptives wettertechnisches System vorgestellt und Kernelemente beschrieben. Es werden die Auswirkungen auf die Ausbildung von zukünftigen Bergbauingenieuren im Bereich der Wettertechnik und Klimatisierung diskutiert und ein innovativer ganzheitlicher Lehr- und Lernansatz vorgestellt.

1 Introduction

Mine ventilation can be described as the "lifeblood of a mine, the intake airways being arteries that carry oxygen to the working areas and the return veins that conduct pollutants away to be expelled to the outside atmosphere" (1). Therefore, an effective and efficient ventilation system with the tasks to provide fresh air in sufficient quality and quantity in all operating areas, to dilute and remove occurring contaminants as well as to create a pleasant mine climate is necessary for guaranteeing safe working conditions in underground mining operations. This becomes even more important as ventilation makes up a major fraction of a mine`s total energy consumption – 40 to 50 % in most cases (2, 3). In addition, high energy consumption, which results in the emission of greenhouse gases, as well as the use of certain refrigerants, has direct impacts on the environment (4).

1 Einleitung

Die Wettertechnik kann als die Lebensader eines Bergwerks bezeichnet werden: die einziehenden Wetterwege sind vergleichbar mit den Arterien, die Sauerstoff zu den Arbeitsbereichen führen und die ausziehenden Wetterwege mit den Venen, welche die auftretenden Schadstoffe in die Umgebung ableiten (1). Eine effektive und effiziente Wettertechnik mit dem Ziel einer bedarfsgerechten Versorgung der Betriebspunkte mit den notwendigen Frischwettern, einer Verdünnung und Abführung von Schadstoffen sowie der Herstellung eines angenehmen Grubenklimas ist daher notwendig, um sichere Arbeitsbedingungen unter Tage gewährleisten zu können. Dies wird umso bedeutsamer vor dem Hintergrund, dass die Wettertechnik einen Großteil am Energiebedarf eines Bergwerks ausmacht – in den meisten Fällen zwischen 40 % und 50 % (2, 3). Darüber hinaus führen hohe Energie-

As mining companies are major energy users, they are required to reduce their energy intensity and carbon emissions (3). Beside these factors, mine ventilation and climatization systems have been affected over the last years by several additional developments. The main challenges and drivers are (5, 6):

- mining in harsh conditions, i.e. extreme heat or cold;
- increase in depth of mining operations;
- increase in complexity of deposit structures with a more extensive network of excavations, increased size of developments, multiple headings and working areas;
- increase in grade of mechanization with the usage of trackless machines and its mobility in addition with larger and more powerful diesel equipment and increase in number and size of light vehicles; and
- reduction in maximum allowable personal exposure levels (7).

To meet these requirements and to keep the operation viable, new holistic ventilation concepts, methods and tools need to be developed to prevent reductions in mine development rates, hold-up of proposed mining projects or even mine closures. In addition, current trends and technological developments, which are based on the successful integration and implementation of sensor systems, modern information and communication systems (ICT) as well as artificial intelligence (AI) offer new opportunities and chances.

One possibility hereby is the improvement of ventilation and air conditioning systems in terms of efficiency and sustainability. Current approaches focus e.g. on the improvement of the main fan performance by using new materials and designs, management and control of leakages, short-circuits and blockages or the development and implementation of ventilation on demand (VOD) systems (3, 8, 9). By utilizing recent advances in sensing and understanding of the environment and to further enhance the integration of and interaction between production, transport and logistics, maintenance and ventilation systems a holistic adaptive ventilation concept will be proposed. In general, the system proposed is not only reactive based on sensor input as most of the VOD approaches are, but additionally utilizes and integrates predictive modeling, simulation and optimization. The general concept for an adaptive ventilation system will be presented and current developments be highlighted in the following section. The implications of these developments on mining engineering education in the field of mine ventilation and climatization will be discussed and an exemplary teaching concept be demonstrated.

2 Adaptive mine ventilation systems

The main tasks of underground mine ventilation systems are to provide airflow in sufficient quantity and quality, to dilute and remove harmful contaminants to safe concentrations and to provide comfortable working conditions. The basic requirements and definition of safe mining conditions varies from country to country depending on their mining history, the pollutants of greatest concern, the perceived dangers associated with those hazards and the political and social structure of the country (1). However, the basis for an efficient and effective ventilation system is to identify

verbräuche durch die Freisetzung von Treibhausgasen sowie die Verwendung von gewissen Kältemitteln zu negativen Umwelteinwirkungen (4). Bergbauunternehmen als Hauptenergieverbraucher sehen sich daher zunehmend gezwungen, sowohl die Energieintensität als auch Treibhausgasemissionen zu vermeiden bzw. zu minimieren (3, 4). Darüber hinaus gab es in den letzten Jahren einige Entwicklungen, die sich maßgeblich auf die Wettertechnik bzw. wettertechnischen Systeme ausgewirkt haben. Zu den wichtigsten Herausforderungen und Treibern zählen (5, 6):

- Gewinnung unter zunehmend schwierigeren Abbaubedingungen, beispielsweise in extremer Hitze oder Kälte,
- zunehmende Teufe der Gewinnungsaktivitäten,
- zunehmende Komplexität der Lagerstätten, einhergehend mit einer Erweiterung der Streckennetze und -systeme sowie einer zunehmenden Anzahl von (parallelen) Vorrichtungs- und Gewinnungsbetrieben,
- zunehmende Mechanisierung durch den Einsatz von Gleislosfahrzeugen, den verstärkten Einsatz von leistungsfähigen dieselbetriebenen sowie sonstigen Maschinen und
- Reduzierung der Arbeitsplatzgrenzwerte in Hinblick auf einzelne Schadstoffe (7).

Um diesen Anforderungen gerecht werden und die Rentabilität von rohstoffgewinnenden Betrieben auch weiterhin gewährleisten zu können, ist die Entwicklung ganzheitlicher Ansätze, Methoden und Modelle notwendig. Aktuelle Trends und technologische Entwicklungen, die auf der erfolgreichen Integration und Implementierung von Sensorik, modernen Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie Verfahren der künstlichen Intelligenz basieren, bieten neue Chancen und Möglichkeiten.

Aktuelle Ansätze und Entwicklungen für eine Steigerung der Effizienz von wettertechnischen Systemen konzentrieren sich beispielsweise auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit von (Haupt-)Grubenlüftern durch neuartige Materialien und Designs, auf eine effektivere Kontrolle und Steuerung von Schleichwetterströmen und Kreisläufen sowie auf die Entwicklung und Implementierung von Systemen für eine bedarfsgerechte Wetterführung (Ventilation on Demand – VOD) (3, 8, 9). Um darüber hinaus die Produktion, Fördertechnik und Logistik sowie Wartung und Instandhaltung mit der Wettertechnik zu verknüpfen und diese in die anderen Bereiche zu integrieren, wird unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen im Bereich der Sensorik und Umfelderkennung und -analyse im folgenden Abschnitt ein ganzheitliches Konzept für ein adaptives wettertechnisches System vorgestellt. Darüber hinaus werden die Konsequenzen, die sich aus der technologischen Entwicklung in Richtung Bergbau 4.0 ergeben, für die Ausbildung von zukünftigen Bergbauingenieuren diskutiert sowie ein innovatives Lehr-/Lernkonzept vorgestellt.

2 Adaptive wettertechnische Systeme

Die Hauptaufgaben der Wettertechnik und Klimatisierung bestehen für die Gewährleistung eines sicheren Betriebs in der bedarfsgerechten Versorgung aller Betriebspunkte mit Frischwettern in ausreichender Menge und Qualität, der gezielten Verdünnung und Abführung von Schadstoffen sowie der Herstellung eines angenehmen Grubenklimas. Die Definition und damit einhergehenden Anforderungen an einen sicheren Betrieb variieren von Land zu

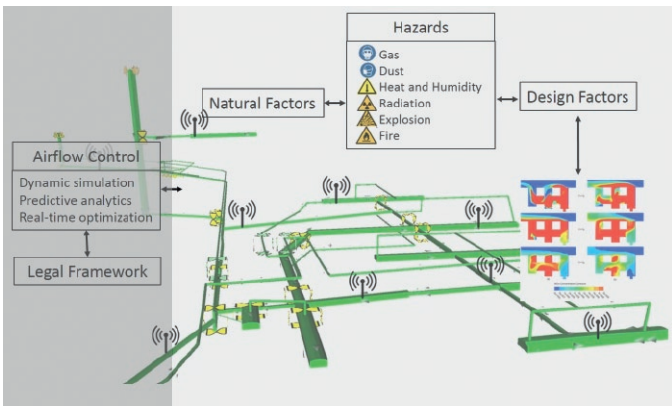

Fig. 1. Adaptive mine ventilation system.
Bild 1. Adaptives wettertechnisches System. Source/Quelle: TUC

and quantify the hazards associated with underground mining operations, like gas, dust, heat and humidity, radiation, explosion and fire, and to develop suitable and (energy-)efficient control strategies (Figure 1). Factors that contribute to the occurrence of hazards are natural factors, like depth below surface, geology, gas content of strata as well as physical and geochemical properties of the rock and design factors, like mining method, mining layout and type, size and location of equipment. Beside ancillary control methods like dust suppression or the installation of refrigeration systems, the airflow will be mainly controlled by using main fans, booster fans and auxiliary ventilation, airlocks or additional regulators (1). In connection with the further implementation of information and communication as well as sensor technologies in underground mining operations, current approaches for the efficient control of ventilation systems mainly focus on the development of ventilation on demand (VOD) control systems, like ABB SmartVentilation (10) or Howden Simsmart (11). An overview and more detailed information on VOD and examples for its successful implementation will be given in the papers of Dicks/Clausen, pp. 334 to 341, and Engler/Kegenhoff/Papesch, pp. 342 to 355 in this journal.

However, to further enhance the interaction between mining processes and the ventilation system, new holistic concepts in terms of adaptive mine ventilation systems need to be developed. Today's systems for ventilation on demand utilize input data from sensors to react to the occurred and measured situation. However, more advanced systems can be coupled with dynamic simulations and machine learning to provide predictive models for real-time optimization. A mining or ventilation system itself can be understood as a cyber-physical system (CPS), which is seen as "the next generation of embedded ICT systems that are interconnected and collaborating [...], providing citizens and businesses with a wide range of innovative applications and services" (12). The physical component comprises all objects, sensors and actuators in the system. The system itself includes a holistic systems engineering approach considering the context management and relationships between the different objects and entities in the system. All information is available within the cyber system, allowing for process modeling, (real-time) simulation, optimization based on self-learning models and the communication within the network (13). For being able to adapt to changing environments and conditions and to cope with uncertain and emerging situations, the system does not only con-

Land in Abhängigkeit der jeweiligen Bergbauvergangenheit, der zu erwartenden (Haupt-)Schadstoffe, der mit den Risiken verbundenen zu erwartenden Gefahren sowie den politischen und sozialen Strukturen der einzelnen Länder (1). Nichtsdestotrotz besteht die Grundlage für einen sicheren, effektiven und effizienten Betrieb in der Identifikation und Quantifizierung von Risiken, wie beispielsweise Gase, Staub, Hitze und Feuchtigkeit, Radioaktivität, Explosionen und Feuer sowie der Entwicklung von daran angepassten Kontroll- und Steuerungsstrategien (Bild 1). Bei den Faktoren, die das Auftreten von diesen Gefahren beeinflussen, handelt es sich einerseits um natürliche Gegebenheiten, wie Teufe der Gewinnungsaktivitäten, Geologie, Gasinhalt des Gebirges sowie physikalische und geochemische Eigenschaften der Gesteine sowie andererseits um Planungs- und Auslegungsfaktoren, wie Abbauverfahren, Zuschnitt sowie Art, Größe und Einsatzort der Maschinen. Neben ergänzenden Maßnahmen, wie Staubbekämpfung mittels Bedüsung oder der Einsatz von Kälteanlagen, wird die Wetterführung in erster Linie durch den Einsatz von (Hauptgruben-)Lüftern sowie durch verschiedene Formen der Sonderbewetterung gesteuert (1). In Verbindung mit der zunehmenden Einführung von modernen Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Sensorik in den untertägigen Bergbau, konzentrieren sich aktuelle Ansätze für eine effiziente Steuerung von wettertechnischen Systemen in erster Linie auf die Entwicklung von Steuerungssystemen für eine bedarfsgerechte Bewetterung im Sinne von VOD, wie ABB SmartVentilation (10) oder Howden Simsmart (11). Das Konzept VOD sowie erfolgreich angewandte Beispiele werden in den Beiträgen von Dicks/Clausen, S. 334 bis 341, und Engler/Kegenhoff/Papesch, S. 342 bis 355, in diesem Heft vorgestellt und beschrieben.

Zur weiteren Optimierung wettertechnischer Systeme und deren Interaktion mit den (Abbau-)Prozessen ist es sinnvoll, darüber hinausgehende ganzheitliche Ansätze zur adaptiven Bewetterung zu entwickeln. Bei heutigen Systemen zur bedarfsgerechten Bewetterung handelt es sich in erster Linie um solche, die auf aktuelle Messwerte der Sensorik reagieren. Fortschrittlichere wettertechnische Systeme sollten mit dynamischen Simulationen gekoppelt werden und „machine learning" verwenden, um somit prädiktive Modelle zur Echtzeitoptimierung zu nutzen. Ein solches wettertechnisches System kann als cyber-physikalisches System verstanden werden. Dabei handelt es sich um die nächste Generation vernetzter eingebetteter Systeme, die eine Vielzahl und breite Palette an innovativen Anwendungen und Dienstleistungen ermöglicht (12). Die physische Komponente umfasst alle Objekte, Sensoren und Aktuatoren im System. Das eigentliche System beinhaltet einen ganzheitlichen systemischen Ansatz unter Berücksichtigung des Kontexts und der Beziehungen zwischen den verschiedenen Objekten und Entitäten im System. Alle Informationen sind im Cyber-System verfügbar, was die Prozessmodellierung, (Echtzeit-) Simulation und Optimierung auf Basis selbstlernender Modelle und Kommunikation innerhalb des Netzwerks ermöglicht (13). Um sich an verändernde Umgebungen und Bedingungen anpassen und mit neuen (vorher) undefinierten Situationen umgehen zu können, wird nicht nur der eigentliche Betrieb gesteuert, sondern er ist auch im Sinne einer kontext- und zielbewussten Situationserkennung adaptiv (14).

Die Basis für die Entwicklung von adaptiven Bewetterungssystemen ist neben dem Einsatz geeigneter Informations- und Kommunikationstechnologien und -strukturen ein detailliertes

trol the operation, but also need to be adaptive in the sense of being self-aware, context-aware, and goal-aware (14).

The basis for the development of adaptive ventilation systems is beside suitable ICT structures a detailed understanding of the system itself, the status and location of relevant objects and the knowledge about its behavior as well as relationships and more importantly the understanding of the (overall) effects of changes in the system. To meet current requirements a detailed understanding of the overall ventilation system through thorough ventilation network analysis and calculation, supported by appropriate mine ventilation software, as well as of the (secondary) face ventilation by studying fluid behaviors using computational fluid dynamics and its integration in the sense of integrated hierarchical approaches are required.

2.1 Mine ventilation software

Nowadays mine ventilation software is widely used for ventilation network analysis and calculation. Common and commercial software packages, like VNETPC and MINE FIRE by Mine Ventilation Associates (MVA) (15), ICAMPS MineVent by Ohio Automation (16), VUMA by Bluhm Burton Engineering (17) and VENTSIM Visual by Chasm Consulting (18) as well as the MULTIFLUX Software (non-commercial) by the University of Reno (19), are designed to model and simulate compressible ventilation models, airflows, pressures, thermodynamic properties and some of them additionally contaminants, automated natural ventilation pressure, transient flow processes, financials and fire. The calculations are based on the iterative Hardy-Cross-Method, which allows the calculation of airflows in a model by progressively adjusting the airflow values until the estimation error is within acceptable limits. The software solutions are mainly used for planning purposes (20). New developments also allow the integration of live sensor data (see Stewart/Aminossadati/Kizil, pp. 356 to 363 in this journal), which offers new opportunities in the field of dynamic simulation and predictive analytics.

2.2 Computational fluid dynamics (CFD)

For analyzing fluid dynamics related to the face ventilation by considering the properties (i.a. pressure, temperature, velocity, density) of the gases involved, the mathematical models re-

Verständnis vom System selbst, die Kenntnis über den Status und die Position relevanter Objekte, das Wissen über deren Verhalten und ihrer Beziehungen untereinander sowie das Verständnis über die Auswirkungen von Veränderungen auf das Systemverhalten. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist es notwendig, einerseits das gesamte wettertechnische System durch eine detaillierte Wetternetzanalyse und -berechnung sowie andererseits durch eine Analyse der Strömungsverhältnisse vor Ort unter Einbeziehung zusätzlicher Eigenschaften der Fluide im Sinne eines hierarchischen Ansatzes zu berücksichtigen.

2.1 Softwarelösungen für die Wetternetzberechnung

Die Analyse von Wetternetzen und deren Berechnung wird heutzutage in der Regel durch den Einsatz von speziellen Softwarelösungen unterstützt. Weit verbreitet und zumeist kommerziell verfügbare Softwarelösungen sind beispielsweise VNETPC und MINE FIRE von Mine Ventilation Associates (MVA) (15), ICAMPS MineVent von Ohio Automation (16), VUMA von Bluhm Burton Engineering (17), VENTSIM Visual von Chasm Consulting (18) sowie MULTIFLUX (nicht kommerziell verfügbar) von der University of Reno (19). Die Softwarepakete sind dazu geeignet, kompressible Strömungen, Drücke, thermodynamische Eigenschaften und teilweise natürliche Bewetterung, instationäre Strömungen, das Verhalten des wettertechnischen Systems im Brandfall sowie wirtschaftliche Faktoren zu berücksichtigen und nachzubilden. Die Grundlage für diese Berechnungen bilden numerische Lösungsverfahren nach Hardy-Cross, welche die zugrunde liegenden Gleichungssysteme iterativ solange lösen, bis ein akzeptabler Restfehlerwert erreicht wird. Diese Softwarelösungen werden hauptsächlich für Planungszwecke eingesetzt (20). Neuere Entwicklungen beinhalten ebenfalls die Echtzeitintegration von Messwerten von Sensoren und ermöglichen somit dynamische Simulationen und prädiktive Analysen (s. Stewart/Aminossadati/Kizil, S. 356 bis 363).

2.2 Numerische Strömungssimulationen

Mathematische Modelle zur Betrachtung strömungsdynamischer Prozesse an Abbauorten, welche die Eigenschaften der Gase – u.a. Druck, Temperatur, Wettergeschwindigkeit, Dichte – berücksichtigen, können nicht mehr analytisch gelöst werden. Daher werden numerische Strömungssimulationen (Compu-

quired cannot be solved analytically. Therefore, computational fluid dynamics (CFD) is used for analysis. In CFD the Navier-Stokes-equations, which describe the relationship between velocity, pressure, temperature and density of a fluid, are solved numerically. Additional simplifications are made and constraints put on by boundary conditions. The flow domain itself is divided into a pattern of regular or irregular smaller volume elements (discretization), namely a mesh or grid. The fluid flow equations are then solved iteratively for each of these volumes elements. CFD simulations can incorporate multiple phase flow and dispersion as well as particle transport. For multiple continuous fluids simultaneously existing in a medium the Euler-Euler model is used, which utilizes the concept of phase fractions per volume (21, 22). CFD simulations can be performed for a steady state, e.g. a constant velocity field, or time dependent (transient). A good example for transient simulations is the dispersion and transport of gases.

Advantages of CFD simulations are, that the properties can be measured at each point in the flow domain, a larger variation of parameters for optimization is possible as well as being efficient related to time and costs compared to full-scale models. However, such a model does strongly rely on the quality of the input data as well as a thorough validation of the initial model.

Typical applications for mine ventilation processes are modeling of the behavior of gases in difficult geological conditions (23), modeling of the behavior of blast fumes connected with after blast re-entry times (24), investigations of the effect of recirculation or modeling of the behavior of dynamic gas sources like LHDs (22, 25).

2.3 Integrated hierarchical approach

To combine the advantages of both individual modeling and simulation techniques and tools – mine ventilation software and computational fluid dynamics – a hierarchical approach is proposed, which is integrating the results and outcomes in an iterative manner. Individual results from the (optimum) secondary face ventilation obtaining by the usage of CFD will then be integrated in the overall ventilation network for validation and to review the feasibility of the approach and results (21, 22, 23). The main features of the mine ventilation software within the hierarchical approach are the representation of the ventilation system in terms of compressible ventilation network analysis and calculation, the demonstration, modification and analysis of varying ventilation situations, the analysis on plausibility and feasibility of the results from CFD analysis while considering the effect and processes within the entire ventilation network. The main functionalities and features of the CFD analysis within the hierarchical approach are the (multiphase) flow modeling and simulation for specific (spatially limited) areas while considering relevant fluid properties, like pressure, temperature, heat and acceleration for the development and analysis of (optimum) secondary face ventilation strategies.

3 Implications on higher education in Mine ventilation and climatization

"Technological innovation is the key to future sustainability for the mining sector" (26). This transition of mining operations to-

tational Fluid Dynamics – CFD) zur Betrachtung dieser Prozesse genutzt. Für die mathematische Modellierung werden Modellvereinfachungen vorgenommen, welche die Zusammenhänge zwischen Wettergeschwindigkeit, Druck, Temperatur und Dichte eines Fluids beschreiben und die mittels numerischer Verfahren gelöst werden. Durch die Definition von Randbedingungen werden weitere Vereinfachungen durchgeführt. Der zugrundeliegende und betrachtete Bereich wird in kleinere Volumenelemente eingeteilt (Diskretisierung), die wiederum als Vernetzung, Gitter oder Mesh bezeichnet werden. Die Gleichungen, die für die Beschreibung der Strömung genutzt werden, sind iterativ für diese Volumenelemente zu lösen. Numerische Strömungssimulationen können sowohl Mehrphasenströmungen als auch beispielsweise den Transport von Partikeln abbilden. Mehrphasensimulationen verwenden häufig das Euler-Euler Modell, bei dem die einzelnen Phasen als Kontinua betrachtet und letztlich Anteile der einzelnen Phasen pro Volumenelement berechnet werden (21, 22). Die Simulationen können für sowohl stationäre – z.B. konstantes Strömungsfeld – als auch instationäre (zeitabhängige) Zustände durchgeführt werden. Instationäre Simulationen werden häufig für den Transport und die Ausbreitung von Gasen verwendet.

Die Vorteile beim Einsatz numerischer Strömungssimulationen bestehen darin, dass die Ergebnisse für jeden Punkt im betrachteten Raum erfasst sowie im Gegensatz zu großmaßstäblichen Versuchen Variationen der einzelnen Parameter des Modells zur Optimierung des Gesamtsystems mittels numerischer Strömungssimulationen kostengünstig und zeiteffizient durchgeführt werden können. Zu beachten ist, dass die Qualität einer Simulation stark von der Modellgüte und einer sorgfältigen Validierung des initialen Modells abhängt. Typische Anwendungsfelder in der Wettertechnik umfassen beispielsweise die Analyse des Verhaltens von Gasen in schwierigen Geologien (23), das Ausbreitungsverhalten von Sprengschwaden (24), die Bildung und Auswirkungen von wettertechnischen Kreisläufen oder das Verhalten dynamischer Gasquellen, wie beispielsweise Fahrlader (22, 25).

2.3 Integrierter hierarchischer Ansatz

Um die Vorteile von beiden Methoden für die Modellierung und Analyse von wettertechnischen Prozessen und Strömungen – Software für die Wetternetzberechnung und numerische Strömungssimulation – zu vereinen, bietet sich ein hierarchischer Ansatz an. Dieser hierarchische Ansatz integriert iterativ die Ergebnisse aus den einzelnen Modellen in Abhängigkeit ihrer individuellen Eignung, d.h. die Ergebnisse, die sich aus der Analyse und Optimierung der Strömungsverhältnisse vor Ort mittels CFD ergeben, werden in das übergeordnete Wetternetz integriert und in Hinblick auf ihre Machbarkeit analysiert und ggf. angepasst (21, 22, 23). Die Hauptaufgaben der Wetternetz-Software innerhalb des hierarchischen Ansatzes bestehen in der Darstellung und Modellierung des gesamten Wetternetzes, der Wetternetzberechnung unter Berücksichtigung der Kompressibilität und thermodynamischer Effekte, der Analyse von Effekten und Reaktionen auf Veränderungen im System sowie in der Prüfung der Ergebnisse aus der numerischen Strömungssimulation in Hinblick auf Plausibilität und Machbarkeit. Die Hauptaufgaben der numerischen Strömungssimulation bestehen in der (Mehrphasen-)Modellierung und Simulation von strömungsdynamischen Prozessen für einen

Fig. 2. Ventilation lab at Clausthal University of Technology. // Bild 2. Wetterlabor an der TU Clausthal. Source/Quelle: TUC

wards Mining 4.0 (27) also incorporates a new or adapted skillset of future graduating mining engineers. „The mining engineer (of the future) needs to become (...) an integrator of diverse skill sets and best practices, and a coordinator of an increasingly interdisciplinary team" (28). Future mining engineers need to have a deep disciplinary knowledge while at the same time being strong in personal and interpersonal skills, leadership, innovation, entrepreneurship and collaboration. These resulting demands for higher education in mining engineering nowadays cannot entirely and sufficiently be addressed by traditional teaching and learning approaches, so that there is a requirement for rethinking and reshaping today`s mining engineering education. During the last five years the education in the field of mine ventilation and climatization has been restructured at Clausthal University of Technology. The innovative and holistic approach InVent – Innovations in Mine Ventilation Education follows the overall objective to educate confident graduates with excellent professionalism, leadership, critical thinking, communication and additional skills important for a successful transition to the world of work. Beside a strong focus on intended learning outcomes, emphasis is put on:

- the development and integration of innovative, (inter)active and cooperative teaching and learning concepts and methods;
- fostering self-regulated and self-driven students learning; and
- consistent and consequent alignment to learning outcomes and acquisition of competences according to the theory of constructive alignment.

A deliberate alignment was made between the development of innovative learning activities suitable for achieving the specific learning objectives and well-designed assessment and (formative and summative) feedback concepts. The concept comprises beside (inter)active and cooperative teaching and learning activities in class additional elements, suitable for the connection and application of theoretical knowledge to (real-case) practical scenarios. This elements facilitates learning through hands-on learning in a ventilation laboratory (Figure 2), learning at authentic learning venues, like the teaching and research mine Rammelsberg as well as through the integration of project-based learning with real-case scenarios e.g. at Sasso San Gottardo, Switzerland (29, 30, 31).

Bereich mit begrenzter räumlicher Ausdehnung (Abbaubereich) unter Berücksichtigung von relevanten Eigenschaften der Strömung, wie Druck, Temperatur, Wärme und Beschleunigung mit dem Ziel, die Strömungsverhältnisse vor Ort zu analysieren und Strategien für eine bestmögliche Bewetterung abzuleiten.

3 Konsequenzen für die Ausbildung von zukünftigen Bergbauingenieuren im Bereich der Wettertechnik und Klimatisierung

Technologische Innovationen bilden das Kernelement für eine zukünftige nachhaltige Entwicklung im Rohstoffsektor (26). Die zunehmende Digitalisierung und Entwicklung des Bergbaus in Richtung Bergbau 4.0 (27) erfordert als Grundlage für technologische Innovationen damit einhergehend auch ein angepasstes Anforderungs- und Ausbildungsprofil für zukünftige Bergbauingenieure. Die Bergbauingenieure der Zukunft werden unterschiedliche Kompetenzen integrieren und zunehmend interdisziplinäre Teams koordinieren (28). Die Erwartungen an Hochschulabsolventen werden zunehmend komplexer, sodass sie heutzutage neben einem ausgeprägten Fachwissen ein hohes Maß an weiteren Schlüsselqualifikationen, wie Selbst-, Sozial- und Methodenkompetenz, Innovationsfähigkeit oder die Fähigkeit zur Führung von und Mitarbeit in interdisziplinären und ggf. internationalen Teams aufweisen sollten. Für die Lehre entsteht daraus der Anspruch, den Erwerb fachlicher und überfachlicher Kompetenzen, wie u.a. selbstständiges Arbeiten (persönliche Kompetenzen), Analyse- und Entscheidungsfähigkeit (Methodenkompetenzen) oder Kommunikations-, Team-, Kritikfähigkeit (soziale Kompetenzen), während des Studiums zu verzahnen. Traditionelle Lehr- und Lernansätze erfüllen die aus diesem Anspruch resultierenden Anforderungen an die universitäre Ausbildung zumeist nicht umfassend genug, sodass es notwendig ist, die Ausbildungsformen und -konzepte von zukünftigen Bergbauingenieuren zu überdenken.

In den vergangenen fünf Jahren wurde die Ausbildung im Bereich der Wettertechnik und Klimatisierung an der Technischen Universität (TU) Clausthal grundlegend umgestaltet. Das übergeordnete Ziel bestand darin, innovative, (inter-)aktive und kooperative Lehr- und Lernformen in die Lehre zu integrieren, bei denen konsequent die Ziele der Förderung des selbstorganisierten und selbstgesteuerten Lernens, der Entwicklung von Lernstrategien neben dem eigentlichen Wissenserwerb sowie der konsequenten Ausrichtung des Lernens auf intendierte Lernziele, daran an-

Future developments in education will focus on the implementation of interdisciplinary project-based learning and of virtual and augmented reality elements (32).

4 Summary

An effective and efficient mine ventilation system is one of the key issues for guaranteeing safe working conditions in underground mining operations. Over the last decades this become even more important as mines are generally getting deeper and more complex with larger areal extents and increase in mechanization and regulatory constraints. To meet these requirements VOD concepts aiming at the target-oriented face ventilation by controlling primary as well as secondary ventilation systems has gained growing attention over the last years.

However, to further enhance the integration between mining processes and the ventilation system and in combination with the increased use of ICT and sensor technologies, a new holistic concept in terms of an adaptive mine ventilation system was presented. The main differentiation is, that adaptive ventilation systems being able to adapt to changing environments and conditions by not only being reactive based on sensor input, as most of the VOD approaches are, but also by utilizing and integrating dynamic simulation, predictive analytics and (real-time) optimization. The ventilation system itself can then be understood as a cyber-physical system (CPS), which refers by term to the "tight conjoining of and coordination between computational and physical resources" (33). The basis for the development of adaptive ventilation systems is beside suitable ICT structures a detailed understanding of the system itself, the status and location of relevant objects and the knowledge about its behavior and relationships. In addition a detailed understanding of the (overall) effects of changes in the system, which can be i.a. realized using mine ventilation software, computational fluid dynamics and its integration using a hierarchical approach is necessary.

Furthermore, implications of these new development on mining engineering education were highlighted and an innovative learning and teaching approach "InVent" be demonstrated.

gepasste Prüfungsformate sowie Lehr-/Lernaktivitäten im Sinne des Constructive Alignements verfolgt wurden. Das entwickelte Lehr/Lernkonzept InVent (Innovations in Mine Ventilation Education) umfasst neben einer Integration von aktiven und kooperativen Lehr/Lernformen in die Vorlesung weitere Elemente für eine Förderung der praxisorientierten Lehr- und Lernkultur, wie das Lernen im Labor (Bild 2), das Lernen an authentischen Lernorten, wie beispielsweise am Rammelsberg, sowie projektbasiertes Lernen anhand von realen Problem- und Fragestellungen, wie beispielsweise am Sasso San Gottardo, Schweiz (29, 30, 31). Die Studierenden werden so in die Lage versetzt, sich durch projektorientiertes Arbeiten sowie problembasiertes oder forschendes (engl.: (to) invent) Lernen das Wissen selbstständig anzueignen.

Zukünftige Erweiterungen werden sich auf die Entwicklung von interdisziplinären projektbasierten Lehr/Lernansätzen sowie auf die Einbindung von Elementen aus den Bereichen Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) konzentrieren (32).

4 Zusammenfassung

Eine effektive und effiziente Wettertechnik ist essentiell notwendig, um sichere Arbeitsbedingungen unter Tage gewährleisten zu können. Insbesondere im letzten Jahrzehnt hat der Bereich der Wettertechnik und Klimatisierung aufgrund einer zunehmenden Teufe der Abbauaktivitäten mit größeren flächenhaften Ausdehnungen, einem höheren Mechanisierungsgrad sowie gestiegenen (rechtlichen) Anforderungen im Bereich der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes, zunehmend an Bedeutung gewonnen. Um diesen steigenden Anforderungen gerecht werden zu können, konzentrieren sich aktuelle Entwicklungen zunehmend auf VOD-Lösungen im Sinne einer gezielten Steuerung sowohl der primären Wetterführung als auch der im Vor-Ort-Bereich.

Bei heutigen VOD-Systemen handelt es sich in erster Linie um solche, die auf aktuelle Messwerte der Sensorik reagieren. Das im Rahmen des Artikels vorgeschlagene Konzept für ein adaptives wettertechnisches System beinhaltet eine weitergehende Integration und Interaktion zwischen dem wettertechnischen System und relevanten (Abbau-)Prozessen durch eine Kopplung mit dynamischen Simulationen und Verfahren des „machine learnings", um somit prädiktive Modelle zur Echtzeitoptimierung nutzen zu können. Das wettertechnische System als solches kann als cyber-physikalisches System aufgefasst werden mit einer „engen Verzahnung und Abstimmung zwischen rechnergestützten und physikalischen Elementen" (33). Die Basis für die Entwicklung dieser Systeme ist neben dem Einsatz geeigneter IKT-Strukturen ein detailliertes Verständnis vom System selbst, die Kenntnis über den Status und die Position relevanter Objekte und Prozesse, das Wissen über deren Verhalten und ihrer Beziehungen untereinander sowie das Verständnis über die Auswirkungen von Veränderungen auf das Systemverhalten. Teilweise kann dies durch den Einsatz von rechnergestützten Verfahren zur Wetternetzberechnung und numerischer Strömungssimulation sowie deren Integration im Sinne eines hierarchischen Ansatzes realisiert werden.

Darüber hinaus wurden die Konsequenzen der Entwicklung des Bergbausektors in Richtung Bergbau 4.0 auf das Ausbildungs- und Anforderungsprofil zukünftiger Bergbauingenieure aufgezeigt und ein innovatives Lehr/Lernkonzept (InVent) für den Bereich der Wettertechnik und Klimatisierung vorgestellt.

References / Quellenverzeichnis

(1) McPherson, M. J.: Subsurface ventilation and environmental engineering. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9401115508.

(2) Allen, C. L.; Tran, T.T.: Ventilation-On-Demand control system's impact on energy savings and air quality. In: Metsco Proceeding CIM, 2011.

(3) Belle, B. K.: Energy savings on mine ventilation fans using Quick-Win' Hermit Crab Technology. In: K.G. Wallace, Hrsg. Proceedings of the 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Reno, NV: University of Nevada, Reno, 2008, S. 427–433. ISBN 978-0-615-20009-5.

(4) Calm, J.: Refrigerants For Deep Mine Refrigeration. Prague, Czech Republik, 2011. Proceedings of the 23. International Congress of Refrigeration.

(5) Brake, D. J.: Ventilation Challenges Facing the Metalliferous Sector. In: The Australian mine ventilation conference. Carlton, Victoria: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2013, S. 3–12. ISBN 978-1-921-522-90-1.

(6) Karsten, M.; Mackay, L.: Underground environmental challenges in deep platinum mining and some suggested solutions. In: Platinum 2012, 5th International Platinum Conference-'A Catalystfor Change, 2012, S. 177–192.

(7) Rickfelder, L.: Emissions- und Arbeitsplatzgrenzwerte – Perspektiven und Konsequenzen. Kali und Steinsalz, (2), 2010, S. 36–40.

(8) Pritchard, C.: Methods to Improve Efficiency of Mine Ventilation Systems. Trans Soc Min Metal Explor, January, 2010, 326, S. 34–38.

(9) Acuña, E. I.; Alvarez, R. A.; Hurtado, J. P.: Updated Ventilation On Demand Review: Implementation and Savings Achieved. 1st International Conference of Underground Mining, 2016.

(10) ABB Group: ABB SmartVentilation [online]. Ventilation on Demand, 2009.

(11) Howden Simsmart: Ventilation on Demand brings substantial energy and cost savings [online] [Zugriff am: 2016]. Verfügbar unter: www.howden.com

(12) European Commission: Smart Cyber Physical Systems [online] [Zugriff am: 3. Juli 2017]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/smart-cyber-physical-systems

(13) Clausen, E.; Wenkel, S.: Cyber-Physical Mining Systems. Lulea, Schweden, August 2017. International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection.

(14) Muccini, H.; Sharaf, M.; Weyns, D.: Self-adaptation for cyber-physical systems: a systematic literature review. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2016, S. 75–81.

(15) SRK Consulting: Software [online]. 2017 [Zugriff am: 3. Juli 2017]. Verfügbar unter: https://www.mvsengineering.com/index.php/products/software

(16) Ohio Automation: Mining Ventilation Software | Ohio Automation Inc. [online]. 10 Juni 2017 [Zugriff am: 3. Juli 2017]. Verfügbar unter: http://oa-mining.com/minevent.htm

(17) VUMA Software Adco: VUMA3D Software: Underground mine ventilation simulation software [online]. 2017 [Zugriff am: 3. Juli 2017]. Verfügbar unter: http://www.vuma.co.za/

(18) CHASM Consulting: Ventsim Visual™ – 3D Mine Ventilation Simulation Software [online]. 2016 [Zugriff am: 3. Juli 2017]. Verfügbar unter: http://www.ventsim.com/products/ventsim-visual/

(19) Danko, G.: NIOSH Ventilation Research [online]. Safety, Health and Ventilation Cost Benefit Optimization with Simulation and Control [Zugriff am: 3. Juli 2017]. Verfügbar unter: https://www.unr.edu/mining/research/niosh-ventilation

(20) Koschnitzki, S.; Clausen, E.; Schreiter, C.: Bedarfsgerechte wettertechnische Planung für das Versatzbergwerk Bleicherode-Sollstedt mithilfe der Software Ventsim Visual TM. In: H. Mischo, T. Müller und J. Herhold, Hrsg. Beiträge zum 2. Internationalen Freiberger Fachkolloquium Grubenbewetterung und Gase, 2016, S. 31–41.

(21) Clausen, E.; Agasty, A.: Using a Hierarchical Approach for the Dilution of Gases / Anwendung eines Hierarchischen Ansatzes für die gezielte Verdünnung von unter Tage auftretenden Gasen. Mining Report Glückauf (152) Heft 2/2016, S. 150–158.

(22) Agasty, A.: Development of a Hierarchical Approach to Ventilation Planning for Conventional Mining Operations. Ph.D. Thesis, 2016.

(23) Clausen, E.; Agasty, A.; Langefeld, O.: Utilizing NetzCAD as a tool for predicting gas emissions and outbursts. In: F. Calizaya und M. G. Nelson, Hrsg. Proceedings of the 14th US/North American Mine Ventilation Symposium, 2012, S. 309–314.

(24) Agasty, A.; Clausen, E.; Kellner, M.; Langefeld, O.: After Blast Re-Entry Time for a Room and Pillar Operation. In: The Australian mine ventilation conference. Carlton, Victoria: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2013, S. 179–186. ISBN 978-1-921-522-90-1.

(25) Clausen, E.; Agasty., A.: FD Modeling of Dynamic Diesel Fumes Dilution. Denver, USA, Februar 2015. SME Annual Conference & Expo.

(26) 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#

(27) Scoble, M.; Laurence, D.: Future Mining Engineers: Educational development strategy. In: Proceedings of the International Conference on Future Mining, 2008, S. 19–21.

(28) Clausen, E.: InVent – Innovations in Mine Ventilation Education. Presentation during awards ceremony for the „Tim Shaw Award for Innovation in Teaching". Annual General Meeting & Conference of the Society of Mining Professors (SOMP). Society of Mining Professors, 2016.

(29) Clausen, E.; Henriquez, J.; Zing, D.: Innovations in Mine Ventilation Education. Competence-oriented Project-based Learning @ Sasso San Gottardo. Internationales Freiberger Fachkolloquium: Grubenbewetterung und Gase, 2016.

(30) Clausen, E.; Binder, A.: Innovative Learning Spaces for Experiential Learning in Mining Engineering Education. In: The 13th International CDIO Conference, 2017.

(31) Edelbro, C.; Hulthén, E.; Clausen, E.; O'Donoghue, J.; Herrera, K.; Edström, K.; Bhadani, K.; Jonsson, S.; Beaulieu, A.; Kamp, A.; Försth, M.: European Initiative on CDIO in Raw Material Programmes.

Author / Autor

Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Institut für Bergbau,
Technische Universität (TU) Clausthal, Clausthal-Zellerfeld