
Ciplus
Band 6/2015

MCIOP - Mehrkriterielle CI-basierte Optimierungsverfahren für den industriellen Einsatz

Thomas Bartz-Beielstein

Technology
Arts Sciences
TH Köln

MCIOP
Mehrkriterielle CI-basierte Optimierungsverfahren für den
industriellen Einsatz
(Förderkennzeichen 17N0311)

Schlussbericht

Förderlinie „IngenieurNachwuchs 2011“
Im Rahmen des Programms „Forschung an Fachhochschulen“

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein

Institut für Informatik

Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften

Fachhochschule Köln

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	2
2	Vorhaben	3
2.1	Aufgabenstellung	3
2.2	Voraussetzungen	4
2.3	Planung und Ablauf	6
2.4	Wissenschaftlich-technischer Stand	8
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
3	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	15
3.1	Modul DASY „Datenerfassung und Systematisierung“	16
3.1.1	DASY-1 Datenerfassung und Anpassung für Daten aus der Energiewirtschaft	16
3.1.2	DASY-2 Validierung von Parametereinstellungen mit Hilfe von CFD-Modellen	17
3.1.3	DASY-3 Planung weiterer Experimente	17
3.2	Modul MB „Modellbildung“	18
3.2.1	MB-1 Entwicklung und Anbindung von Surrogat-Modellen	18
3.2.2	MB-2 Validierung von Surrogat-Modellen	18
3.3	Modul EMB „Erweiterte Modellbildung“	18
3.3.1	EMB-1 Informationsaustausch zur multikriteriellen Prozessoptimierung für die Industrie	19
3.3.2	EMB-2 Entwicklung mehrkriterieller Selektionsoperatoren	19
3.3.3	EMB-3 Erweiterung für allgemeine Klassifikations- und Regressionsprobleme	20
3.3.4	EMB-4 Erweiterung für multivariate symbolische Regression	20
3.3.5	EMB-5 Interaktive Visualisierungs- und Auswahlmethoden für Ergebnisse von MGP-Läufen	20
3.4	Modul AO „Anlagenoptimierung“	20

1 Allgemeines

3.4.1	AO-1 Hierarchische Simulation und mehrkriterielle Optimierung	20
3.4.2	AO-2 Anbindung der mehrkriteriellen Optimierung an SPO	22
3.4.3	AO-3 Experimente und Studien mit den neu entwickelten Verfahren	23
3.4.4	AO-4 Auswertung und Validierung beim Anwender	23
3.5	Modul GEN „Generalisierbarkeit“	24
3.5.1	GEN-1 Weitere Anwendungen und Partner	24
3.5.2	GEN-2 Integration in Tools von Evolved Analytics	25
3.5.3	GEN-3 Validierungsaspekte	28
3.6	Spezielle Arbeitspakete	28
3.7	Wissenschaftliche Publikationen	31
4	Voraussichtlicher Nutzen	31
5	Ergebnisse Dritter	32
6	Veröffentlichungen der Projektteilnehmer	33
7	Veröffentlichungen Dritter	36
	Abkürzungsverzeichnis	43

1 | Allgemeines

Dieser Schlussbericht beschreibt die im Projekt „Mehrkriterielle CI-basierte Optimierungsverfahren für den industriellen Einsatz“ (MCIOP) im Zeitraum von August 2011 bis einschließlich Juni 2015 erzielten Ergebnisse.

Zuwendungsempfänger	Institut für Informatik, Fakultät Informatik und Ingenieurwissenschaften, Fachhochschule Köln
Projektleiter	Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein
Förderkennzeichen	17N0311
Vorhabensbezeichnung	Mehrkriterielle CI-basierte Optimierungsverfahren für den industriellen Einsatz (MCIOP)
Laufzeit des Vorhabens	01.08.2011 – 30.06.2015
Berichtszeitraum	01.08.2011 – 30.06.2015
Projektpartner	<i>Steinmüller Engineering GmbH, Evolved Analytics LLC, TU Dortmund, Universiteit Leiden, Universiteit Gent, Universiteit van Tilburg</i>

Der Bericht ist wie folgt gegliedert: Abschnitt 2 gibt einen Überblick über Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Verlauf, wissenschaftlich-technischen Stand und über die Zusammenarbeit mit Dritten im Projekt MCIOP. Abschnitt 3 beschreibt die erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse. Abschnitt 4 vergleicht die erreichten Projektziele mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung. Abschnitt 5 beschreibt Informationsrecherchen nach projektrelevanten Ergebnissen Dritter. Abschnitt 6 führt alle im Projekt erfolgten Veröffentlichungen auf.

2 | Vorhaben

2.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projekts MCIOP war die Entwicklung von Verfahren zur Reduktion von Schadstoffemissionen bei Betrieb und Planung von großtechnischen Anlagen der Energietechnik, wie z.B. Kohlekraftwerken. Dazu wurden Verfahren aus der *Computational Intelligence* (CI) für hierarchische mehrkriterielle Optimierung genutzt. Diese Verfahren ermöglichen die Berücksichtigung verschiedener konfliktärer Zielkriterien wie z.B. die Minimierung von Betriebskosten bei gleichzeitiger Minimierung von Schadstoffemissionen. Für die Optimierung sind genaue und dennoch effizient ausführbare Surrogatmodelle nötig, die in MCIOP entwickelt wurden. Der wissenschaftliche Fokus lag also auf der Entwicklung von Methoden, die in der Lage sind, interpretierbare Modelle für Schadstoffemissionen automatisch zu generieren.

Die Optimierung von Prozessen und Systemen in Kohlekraftwerken ist ein gutes Beispiel für die Komplexität industrieller Optimierungsprobleme. Es stehen häufig viele Parameter in Zusammenhang mit mehreren Zielgrößen. Solche Ziele können zum Beispiel die Reduzierung von Umweltschadstoffen, die Verbesserung der Energieeffizienz oder die Verringerung von Betriebs- und Wartungskosten sein. Parametereinstellungen sind häufig sehr zeit- und kostenaufwändig, weil hierfür entweder teure Experimente oder aufwändige Simulationen notwendig sind.

Diese Komplexität erfordert nicht nur moderne Optimierungsmethoden aus dem Bereich der CI (Evolutionäre Algorithmen). Vielmehr sind auch geeignete Modellierungsmethoden von großer Bedeutung. Diese können als Ersatz für die tatsächlichen Zielgrößen genutzt werden, so dass der Aufwand der Optimierung verringert wird. Hierbei kommen sog. Surrogat-Modelle zum Einsatz. Im Projekt MCIOP wurden die folgenden Methoden eingesetzt:

- *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ermöglichen sehr genaue und umfassende Simulationen und Modellierungen – sind allerdings sehr aufwändig in ihrer Entwicklung, bzw. erfordern immensen Rechenaufwand.
- Analytische Modelle von Prozessen und Systemen sind auch häufig verfügbar. Deren deutlich geringerer Aufwand wird allerdings mit bedeutend geringerer Leistung und Gültigkeit erkauft.
- Ein klassischer Ansatz sind deshalb datengetriebene Modelle, die aus bereits erfolgten Simulationen und Experimenten die Zusammenhänge zwischen Parametern und Zielgrößen ableiten. Als starke Alternative zu statistischen Modellen (z.B. Kriging oder Support Vector Machines) fokussiert sich das Projekt MCIOP auf Genetisches Programmieren (GP), einem modernen Modellierungsansatz aus dem Bereich Computational Intelligence. Dieses ermöglicht es im Rahmen der sog. Symbolischen Regression Formeln beliebiger Komplexität zu erlernen, um Zusammenhänge nicht (wie bei statistischen Modellen) als Black-Box, sondern vielmehr in lesbarer und verständlicher Form darzustellen. Damit profitiert nicht nur der Optimierungsprozess, sondern auch der Anwender durch besseren Einblick in die modellierte Problematik.

Das Projekt MCIOP beschäftigte sich im Kern mit einer Anwendung aus der Kraftwerkstechnik und der Entwicklung geeigneter Modellierungsmethoden für die Optimierung eines Staubabscheiders.

Fokus der Methodenentwicklung war hierbei vor allem das oben genannte GP Verfahren, das die vorhandenen Daten aus Experimenten, CFD Simulationen und analytischen Modellen verwenden sollte, um die Optimierung eines Staubabscheiders zu ermöglichen.

Die Bedeutung der entwickelten Methoden geht dabei weit über die Kernanwendung des Projekts hinaus. Derartige Methoden sind in vielen Bereichen der industriellen Anwendung von großer Bedeutung, können aber auch in verschiedenen anderen Anwendungsbereichen (z.B. wissenschaftliche Problemstellungen) von Bedeutung sein.

Für die Optimierung und Simulation des Fliehkraftabscheiders war die Zusammenarbeit mit dem Projektpartner *Steinmüller Engineering GmbH* von großer Bedeutung, da dieser ein großes Interesse an der Entwicklung effizienter Staubabscheider besitzt. Über die Thematik der mehrkriteriellen Optimierung ergab sich zudem ein sehr reger Austausch mit den universitären Projektpartnern (*TU Dortmund, Universität Leiden*). Auch mit dem Partner *Evolved Analytics LLC*, der über hervorragende Kenntnisse im Bereich der Symbolischen Regression verfügt, wurden intensive Gespräche zur Entwicklung und Anwendungsfähigkeit der Verfahren geführt.

2.2 Voraussetzungen

Das Projekt MCIOP hatte eine Gesamtlaufzeit von drei Jahren und elf Monaten (01.08.2011 bis zum 30.06.2015) und wurde mit einer bewilligten Gesamtsumme von 259.704,00€ (exklusive 10% Projektpauschale) gefördert. Davon entfielen

- 242.758,89€ auf Personalausgaben,
- 12.087,48€ auf sächliche Verwaltungsausgaben und
- 1.433,11€ auf Gegenstände über 410 Euro (Investitionen).

Inklusive der Projektpauschale von 10% betrug die bewilligte Fördersumme also 285.674,40€. Die nachgewiesenen Kosten umfassten 256.279,48€.

Das Projekt wurde am Institut für Informatik an der Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften am Campus Gummersbach der Fachhochschule Köln durchgeführt. An dieser Fakultät hat der Projektleiter Prof. Dr. Bartz-Beielstein seit Oktober 2006 eine Professur für Angewandte Mathematik inne. Zu Projektbeginn hatte er mehr als 100 Publikationen im Bereich CI veröffentlicht. Er arbeitete von 2000 bis 2006 im Sonderforschungsbereich „Design und Management komplexer technischer Prozesse und Systeme mit Methoden der Computational Intelligence“ an der *TU Dortmund* in einem Projekt zur Umsetzung der Grundlagenresultate in praxisorientierte Algorithmen und Werkzeuge. Prof. Dr. Bartz-Beielstein leitet die Arbeitsgruppe SPOTSeven (www.spotseven.de), die aus einem sehr interdisziplinär geprägten Team von Forschern besteht. Die vom Projektleiter entwickelte Sequentielle Parameteroptimierung (SPO) wurde als wichtiges Werkzeug zur Entwicklung von Optimierungsalgorithmen erfolgreich eingesetzt. SPO ist in Form des Open Source Pakets Sequential Parameter Optimization Toolbox (SPOT) frei verfügbar, siehe auch www.cran.r-project.org/package=SPOT. Eine Zusammenstellung zugehöriger Veröffentlichungen findet sich im Schriftenverzeichnis des Projektleiters und in [45]. SPO stützt sich auf Methoden der Versuchsplanung, Statistik, Datenanalyse und Optimierung. Weitere Forschungsthemen, die in der Arbeitsgruppe SPOTSeven behandelt werden, stammen aus den Bereichen statistische Versuchsplanung, Simulation und Optimierung.

Prof. Bartz-Beielstein leitete zudem das Projekt FIWA „Methoden der Computational Intelligence für Vorhersagemodelle in der Finanz- und Wasserwirtschaft“, das Ende erfolgreich 2012 abgeschlossen wurde. FIWA befasste sich unter anderem mit GP und SPO, allerdings im Zusammenhang der Verbesserung von Vorhersagemodellen in den Finanz- und Wasserwirtschaft und weniger mit der Modellierung und mehrkriteriellen Optimierung in technischen Aufgabenstellungen. Er initiierte den extern evaluierten Forschungsschwerpunkt CIplus der FH-Köln (www.ciplus-research.de). Als Sprecher dieses Forschungsschwerpunktes arbeitet er gemeinsam mit den Professoren Dr. Boris Naujoks, Dr. Wolfgang Konen und Dr. Horst Stenzel an Aufgaben aus dem Bereich CI. Ziel dieser Zusammenarbeit ist die Vernetzung und bessere Sichtbarkeit der Fachdisziplinen Modellierung, Simulation, Optimierung, Data Mining, Statistik und Mathematik unter besonderer Berücksichtigung naturanaloger Verfahren, wie z.B. evolutionärer Algorithmen.

Der Projektleiter ist Mitglied in den Programmkomitees der führenden Konferenzen und Zeitschriften auf dem Gebiet der CI. Bereits zu Projektbeginn existierte eine intensive Zusammenarbeit des Projektleiters mit Forschern auf internationaler Ebene, unter anderem mit den Universitäten Antwerpen, Tilburg, Eindhoven und Leiden.

Herr Dipl.-Inform. Oliver Flasch stand dem Projekt über die gesamte Laufzeit als hauptverantwortlicher Sachbearbeiter und Promovend zur Verfügung. Herr Flasch konnte seine Promotion am 6. Mai 2015 erfolgreich abschließen. Des Weiteren standen Dr. Katya Vladislavleva, Dr. Olaf Mersmann und die Promovierenden Beate Breiderhoff und Christian Jung dem Projekt zeitweise in Teilzeit zur Verfügung. Die durchgeführten Promotionen wurden kooperativ durch den Projektleiter und Prof. Günter Rudolph (Lehrstuhl für Algorithm Engineering, Fakultät für Informatik, *TU Dortmund*) betreut. Bereits zu Beginn des Projektes bestand eine aktive Zusammenarbeit mit Prof. Günter Rudolph. Er stand dem Projekt beratend und als Betreuer der Promotionen zur Verfügung und forscht an CI-Verfahren zur Mehrzieloptimierung und industriellen Optimierung.

Um den fachlichen Austausch im Bereich CI zu unterstützen, findet innerhalb der Arbeitsgruppe SPOTSeven wöchentlich ein Doktorandenseminar statt. An dem Seminar nehmen momentan (2015) acht Doktorandinnen und Doktoranden, Post-Docs, sowie weitere Bachelor- und Masterstudenteninnen und -studenten aus der Arbeitsgruppe von Prof. Bartz-Beielstein teil. Prof. Bartz-Beielstein ist zudem assoziiertes Mitglied der Kompetenzplattform *Sustainable Technologies and Computational Services for Environmental and Production Processes* (STEPS), die ein Kolleg für alle Promovierenden der Hochschule organisiert.

Die am Projekt beteiligte *Steinmüller Engineering GmbH* verfügt über ein breit gefächertes Prozess-Know-how im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus in der Energie- und Umwelttechnik. Die Mitarbeiter der *Steinmüller Engineering GmbH* waren an Entwicklung, Bau und Betrieb einer Vielzahl von Anlagen der Energie- und Umwelttechnik bei der vormaligen L&C Steinmüller GmbH in Gummersbach beteiligt. Dieser Erfahrungsschatz bildet das Kernstück des Unternehmens und steht den Kunden von Steinmüller Engineering sowohl in Form von Ingenieur-Beratungsleistungen als auch im Rahmen von Lieferungen von Teil- und Gesamtanlagen zur Verfügung. Im Bereich der Verringerung von Schadstoffemissionen bei Kohlekraftwerken besteht seit September 2009 ein regelmäßiger fachlicher Austausch der Steinmüller Engineering GmbH mit der Arbeitsgruppe SPOTSeven des Projektleiters. Die *Steinmüller Engineering GmbH* stellte dem Projekt umfassende fachliche Kenntnisse

und Beratung zur Verfügung. Ausserdem lieferte sie Daten und Prozesswissen für die bearbeiteten Problemstellungen. Auch stand sie für die Betreuung von Abschlussarbeiten zur Verfügung. Es fanden regelmäßige Arbeitstreffen statt, in denen der aktuelle Stand der Zusammenarbeit besprochen wurde und Abschlussarbeiten und gemeinsame Seminare abgestimmt wurden.

Mit der Arbeitsgruppe von Herrn Professor Günter Rudolph der *TU Dortmund* bestand ebenfalls eine enge Zusammenarbeit. Dieser bereits langjährig und erfolgreich bestehende Austausch spiegelt sich auch in der Betreuung der im Projekt durchgeführten Promotionsvorhaben und der erfolgreichen Promotion von Herrn Flasch wider.

Als weitere Partner standen dem Projekt die *Evolved Analytics LLC*, *Universität Gent*, *Universität Leiden* und *Universität van Tilburg* zur Seite. Hier fand ein reger Austausch zu wissenschaftlich-technischen Themen statt. Tabelle 1 stellt eine Übersicht der Beiträge der einzelnen Projektpartner im Projekt MCIOP dar.

2.3 Planung und Ablauf

Das Projekt MCIOP wurde in Module mit insgesamt 17 Kern-Arbeitspaketen aufgeteilt, die im Gantt-Chart in Abbildung 1 dargestellt sind. Am Ende jedes Semesters wurde intern kontrolliert, ob die definierten Ziele erreicht wurden. Neben diesen projektbegleitenden Kontrollen wurden sechs Meilensteine (MS-1 bis MS-6) definiert. Für die Arbeitspakete wurden die folgenden Bezeichnungen verwendet: **DASY**: Datenerfassung und Systematisierung, **MB**: Modellbildung, **EMB**: Erweiterte Modellbildung, **AO**: Anlagenoptimierung, **GEN**: Generalisierbarkeit, **MT**: Master-Theses und **CS**: Case-Studies.

MS-1: Datenerhebung Mit diesem Meilenstein wurde die Vollständigkeit der bislang erfolgten Datenerhebung überprüft. Zu diesem Zeitpunkt gab es noch deutliche Verzögerungen in den zugeordneten Arbeitspaketen, vor allem DASY-1. Dieses Paket schloss dementsprechend erst später ab. Grund für die Verzögerungen waren vor allem die Schwierigkeiten bei der ursprünglich vorgesehenen Simulation eines Feuerraumes auf einem gemeinsam von *Steinmüller Engineering GmbH* und *FH Köln* geplanten Rechencluster. Um trotzdem den zeitigen Fortgang des Projektes zu gewährleisten, wurde auf die verfügbaren Daten eines Zyklon (Fliehkraftabscheider) zurückgegriffen und dessen Optimierung und Modellierung mit Computational Fluid Dynamics und Genetic Programming im weiteren Verlauf in den Mittelpunkt gerückt.

MS-2: Daten systematisiert Mit dem planmäßigen Erreichen dieses Meilensteins wurde sichergestellt, dass die notwendigen Schnittstellen (zwischen Optimierung/Modellierung und dem Anwendungsbereich aus der Energiewirtschaft) hinreichend gut spezifiziert sind. Dies war für die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Projektpartner *Steinmüller Engineering GmbH*, sowie für die weitere Verwendbarkeit entwickelter Methoden von großer Bedeutung.

MS-3: Abnahme Surrogatmodelle Als Ergänzung zu den erweiterten Modellen sollten auch statistische Surrogatmodelle getestet und validiert werden. Die entsprechenden Arbeiten konnten wie

Tabelle 1: Übersicht der Partnerbeiträge für das Projekt MCIOP.

Projektpartner	Beiträge
<i>FH Köln</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur automatischen Erzeugung interpretierbarer Modelle für industrielle Prozesse und deren mehrkriterielle Optimierung • Koordination des Projektes MCIOP • Betreuung studentischer Case-Studies, Bachelor- und Masterarbeiten • Durchführung von Promotionsvorhaben
<i>Steinmüller Engineering GmbH</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Prozessdaten aus der Kraftwerkstechnik • Beratende Mitarbeit bei der Erschließung von Expertenwissen aus dem Bereich der Kraftwerkoptimierung • Durchführung weiterer CFD-Simulationen zur Validierung der im Projekt erzeugten Surrogatmodelle • Analyse und Beurteilung der Qualität der erzeugten Surrogatmodelle • Prototypischer Einsatz der im Projekt erstellten Softwaresysteme • Betreuung von Case-Studies sowie anteilige Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten
<i>TU Dortmund</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeit an gemeinsamen Publikationen in den Bereichen GP, Experimentplanung und mehrkriterielle Optimierung • Betreuung und Durchführung der geplanten Promotionen von Projektmitarbeitern • Betreuung studentischer Bachelor- und Masterarbeiten • Zusammenarbeit in Forschung (z.B. gemeinsame Publikationen) und Lehre
<i>Evolved Analytics LLC</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Lieferung von Know-How für den Einsatz von GP in großindustriellen Anwendungen • Bereitstellung der Software DATAMODELER für Vergleiche • Beratung bei der Datenanalyse und dem Einsatz der Software DATAMODELER
<i>Universiteit Leiden</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenarbeit in Forschung (z.B. gemeinsame Publikationen) und Lehre • Analyse der im Projekt entwickelten Verfahren im Rahmen gemeinsamer Publikationen • Betreuung und Durchführung weiterer projektrelevanter Promotionen
<i>Universiteit Gent</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenarbeit bei der Entwicklung von Komponenten für interpretierbare Modelle • Austausch im Rahmen von Workshops
<i>Universiteit van Tilburg</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Lieferung von Know-How für das Design und die Analyse experimenteller Simulationen

geplant durchgeführt werden, die notwendigen Entwicklungsschritte konnten auch durch die Fortschritte im Partnerprojekt CIMO unterstützt werden. Die Validierung wurde mit Hilfe analytischer Modelle eines Staubabscheiders durchgeführt.

MS-4: Abnahme Simulator und GP-System Dieser Meilenstein diente zur Abnahme des in den Arbeitspaketen EMB-1 bis EMB-6 entwickelten mehrkriteriellen GP-Systems RGP. Die Entwicklung neuer mehrkriterieller Selektionsoperatoren für RGP, die Erweiterung des RGP Systems für multivariate Problemstellungen, die Verbesserung von Visualisierungs- und Auswahlmethoden sowie die Anbindung von RGP an die Sequentielle Parameter Optimierung (SPO) konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Ergebnisse legten interessante weitere Forschungsrichtungen offen, die dazu führten, dass die entsprechenden Themen der Arbeitspakete auch über ihren ursprünglichen Rahmen hinaus weiter bearbeitet wurden.

MS-5: Abnahme hierarch. mehrkr. Optimierung Dieser Meilenstein diente der Bewertung, ob die in den Arbeitspaketen AO-1 und AO-2 entwickelten Verfahren korrekt implementiert wurden. Hier ergab sich (auch durch Verzögerung früherer Arbeitspakete) die Notwendigkeit für eine spätere Bearbeitung, was auch durch die kostenneutrale Verlängerung des Projektes MCIOP ermöglicht wurde. Mit entsprechender Verspätung konnte dieser Meilenstein erreicht werden.

MS-6: Abnahme Steinmüller Durch die Verzögerung des Projektes (Ausscheiden eines Mitarbeiters beim Projektpartner *Steinmüller Engineering GmbH*) wurde dieser Meilenstein erst verspätet erreicht. In mehreren Treffen mit *Steinmüller Engineering GmbH* wurden Stand und Ergebnisse des Projektes diskutiert. Daraus ergaben sich erste Ansätze für Folgeprojekte und studentische Projektarbeiten, die Themen aus dem Projekt MCIOP aufgreifen und fortführen werden.

2.4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Im Projekt MCIOP sind Methoden aus den Bereichen Data Mining (Regression) sowie Optimierung (Evolutionäre Algorithmen, mehrkriteriell) erforderlich. Der Schwerpunkt des Projektes MCIOP lag im Schnittpunkt dieser Methoden, also der mehrkriteriellen Optimierung mit datengetriebenen Surrogatmodellen auch unter Berücksichtigung von Problemhierarchieebenen für den Einsatz in der Industrie.

Datenerfassung und Systematisierung Für die im Projekt MCIOP geplante Vorgehensweise können Empfehlungen aus dem Bereich der statistischen Versuchsplanung herangezogen werden. Montgomery [110] stellt hierfür eine gute Referenz dar. Des Weiteren sind hier auch die Arbeiten von Jack P.C. Kleijnen zu nennen, wie z.B. [87].

Kordon [96] greift wichtige Aspekte der Datenerfassung aus praktischer Sicht auf („The Nasty World of Real-World Applications“) und beschreibt exemplarisch die Vorgehensweise bei der Datenerfassung, Datenvorverarbeitung, Sensitivitätsanalyse, Variablenselektion bis hin zur Modellierung und anschließender Optimierung. Als Beispiel dient u.a. die Schadstoffreduktion in Kraftwerken. Bei der von ihm beschriebenen Datenerfassung lagen anfangs 50 unterschiedliche Eingabegrößen vor. Es

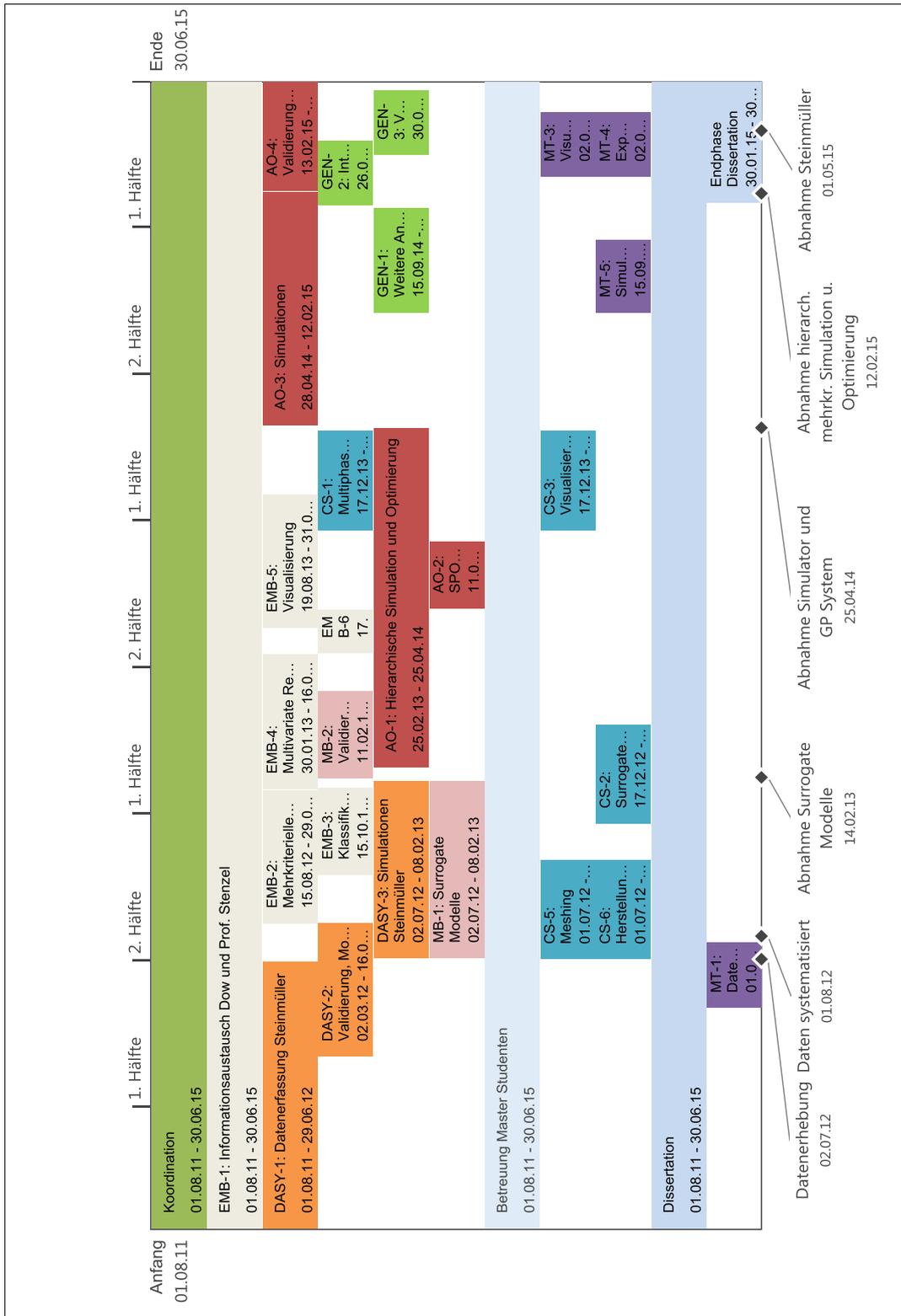


Abbildung 1: MCIOP Projektverlauf als Gantt-Chart.

konnte gezeigt werden, dass schlussendlich der Prozess durch vier Eingabegrößen ausreichend genau beschrieben wird.

Eine gute Referenz zum Einstieg in die Kraftwerkstechnik stellt Strauss [115] dar. Vertiefend behandelt wird der heute etablierte Stand der Technik bei allen verfügbaren Energiequellen (fossil, regenerativ, nuklear). Die wichtigsten Design- und Betriebsparameter heutiger Kraftwerkstypen werden ausführlich erläutert. Gleichzeitig werden auch Fragestellungen der Ökologie und Ökonomie angemessen berücksichtigt. Als Referenz für die Technik von im Projekt behandelten Staubabscheidern bietet sich Loeffler [105] an.

Bei den im Projekt betrachteten Optimierungsproblemen fallen Daten unterschiedlicher Eigenschaften an. Sie lassen sich auf verschiedene Arten systematisieren, beispielsweise nach Einflussgrößen wie der Brennstoffzusammensetzung, Abgastemperatur, Brennergeometrie und Eigenschaften der Abgase oder transportierten Staubtypen. Die Emissionen werden kontinuierlich gemessen. Allerdings sind nicht alle Einflussgrößen kontinuierlich. Daher sind weitere Kategorisierungen erforderlich. So sind Daten, die zum Beispiel die Geometrie des Staubabscheiders beschreiben, für eine Anlage konstant, während sich die Brennstoffzusammensetzung im Laufe der Zeit ändern kann. Daten wie die Verbrennungstemperatur, die Luftmenge und -stufung lassen sich wie die Emissionen kontinuierlich messen. Emissionen werden in verschiedene Schadstoffklassen unterteilt, die auf unterschiedliche Art Berücksichtigung finden müssen. Die Einflussgrößen können wiederum in Steuerparameter, Designparameter und Betriebsparameter unterteilt werden.

Mit dem Aufkommen großer, meist kommerzieller CFD-Programmpakete sind die Entwickler von Simulationsmodellen dazu über gegangen, diese Modelle mit offenen Schnittstellen zu versehen, so dass MCIOP-Modelle im Rahmen dieser Programmpakete verwendet werden können [70]. Beispiele für derartige Programmpakete sind die Produkte der Firmen ANSYS (*CFX*, *Fluent*), Esteco (*modeFrontier*), oder Phoenix Integration (*ModelCenter*). Es existiert somit eine Schnittstelle, über die eine große Anzahl unterschiedlicher Daten exportiert werden kann. Auch freie Open Source Softwarepakete wie OpenFOAM bieten diese Möglichkeit.

Die Erfassung und Auswertung von Daten aus praktischen Anwendungen spielt auch in den aktuellen Forschungsprojekten des Projektleiters eine wichtige Rolle. So fallen z.B. bei der Optimierung von Biogasanlagen und Kläranlagen oder beim Spritzgießen große Datenmengen an, die in unterschiedlichen Formaten vorliegen [56, 72, 71, 89, 91, 90, 39, 120, 73, 94, 48, 57, 92, 47].

Modellbildung Prof. Dr. Tom Dhaene von der *Universität Gent* erforscht und entwickelt zusammen mit weiteren Mitgliedern der Arbeitsgruppe des *SURrogate MOdeling Lab*¹ (SUMO) Surrogatmodelle. Gorissen et al. [76] geben eine Einführung in die am SUMO entwickelte Software. Die Dissertation von Dr. Dirk Gorissen stellt aktuelle Forschungsergebnisse zusammen [77]. Forrester et al. [74] geben einen sehr verständlich geschriebenen Einstieg in die Anwendung der Surrogatmodellierung. Dr. Andrew Forrester arbeitet als Lecturer an der *Southampton University*.

Law und Kelton [103] geben einen allgemein gehaltenen Einblick in die Modellierung und Simulation komplexer Systeme. In diesem Standardwerk werden klassische Techniken zur statistischen Versuchsplanung, zur Sensitivitätsanalyse und zur Validierung behandelt. Saltelli et al. [112, 113]

¹<http://www.sumo.intec.ugent.be>

beschreiben Standardtechniken zur Sensitivitätsanalyse. Kleijnen [87] stellt eine umfangreiche Übersicht und Bewertung aktueller Verfahren aus den Bereichen klassischer und moderner Simulation zusammen. Die Optimierung für technischen Anwendungen mit Surrogatmodellen wird zudem durch Forrester et al. [74] detailliert beschrieben. Eine grundlegende Veröffentlichung für die Optimierung mit Gaußschen Prozessmodellen (Kriging), der sogenannten Efficient Global Optimization, stammt von Jones et al. [82].

Der Projektleiter selbst besitzt umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Modellbildung. Dazu gehören klassische statistische Verfahren wie Methoden der Regressionsanalyse bis hin zu modernen statistischen Verfahren wie stochastischen Prozessmodellen (Kriging). Der Projektleiter hat mit der *Sequentiellen Parameter Optimierung* (SPO) ein Werkzeug entwickelt, das Modellierungstechniken für die Prozessoptimierung auf dem aktuellen Stand der Forschung zur Verfügung stellt. SPO wird von einer Vielzahl von Forschern in unterschiedlichen Projekten erfolgreich eingesetzt. Eine Veröffentlichung des Projektleiters [45] gibt hierzu eine Übersicht mit mehr als einhundert Literaturstellen.

Ein Schriftenverzeichnis des Projektleiters ist diesem Bericht als Anlage beigefügt, so dass an dieser Stelle nur drei Veröffentlichungen stellvertretend genannt seien.

1. In [38] werden klassische und moderne Modellierungstechniken analysiert und angewandt. Die darin entwickelte Methodik kombiniert dabei Elemente der klassischen statistischen Versuchsplanung mit modernen statistischen Verfahren. Diese Verfahrensweise eignet sich zur Modellierung, Simulation und Analyse beliebiger Systeme, der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Analyse von Algorithmen.
2. In [108] werden Temperierbohrungen mehrkriteriell optimiert. Mittels SPO konnte die Kühlungsstrategie signifikant verbessert werden.
3. In [94] wird die Modellierung von Füllständen in Regenüberlaufbecken optimiert. Es wurden unterschiedliche Modellierungsverfahren einer vergleichenden Analyse unterzogen.

Erweiterte Modellbildung *Genetic Programming* ist eine Klasse von evolutionären Algorithmen für die automatische Erzeugung symbolischer Lösungen für abstrakt definierte Problemstellungen [111, 37]. Symbolische Lösungen sind beispielsweise mathematische Modellformeln. Basierend auf einer abstrakten Problemdefinition erzeugt GP eine Population von zufälligen symbolischen Lösungen (z.B. Modellformeln) und verfeinert diese schrittweise in einem evolutionären Prozess durch Mutation, Rekombination und Selektion, bis eine zufriedenstellende Lösung gefunden ist.

Ein wichtiger Vorteil von GP ist, dass kein Vorwissen zur Struktur möglicher Lösungen benötigt wird. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist die symbolische Lösungsrepräsentation, welche die Interpretation durch den Benutzer möglich macht. Beispielsweise werden GP-erzeugte Modellformeln für physikalische Prozesse in der gleichen Form dargestellt wie vom Menschen erstellte mathematische Modellformeln. Ein weiterer Vorteil dieser symbolischen Darstellung ist, dass die gefundenen Lösungen sehr einfach in bestehenden industriellen Mess- und Steuerungssystem eingesetzt werden können. Im Gegensatz zu Verfahren wie *Neuronal Networks* (NN) oder *Support Vector Machines* (SVM) wird im Allgemeinen keine spezielle Softwareumgebung für die Ausführung von GP-erzeugten Modellen benötigt.

Der bislang bedeutendste Nachteil von GP gegenüber anderen CI-Methoden war ein relativ hoher Rechenaufwand. GP ist jedoch sehr einfach parallelisierbar und kann daher sehr gut von der Verfügbarkeit günstiger Multi-Core-Workstations profitieren, wodurch das Verfahren inzwischen in sehr vielen Problemfeldern auch ohne den Einsatz von Hochleistungsrechnern real anwendbar ist.

Poli et al.[111] präsentieren einen Überblick und geben eine umfassende Darstellung der GP-Forschung. Aktuell werden weitere GP-Operatoren bzw. Variationen bestehender Operatoren entwickelt. Lineares GP, Graph-GP und GP zur mehrkriteriellen Optimierung finden zunehmend Anwendung. Zu den wichtigsten (und erfolgreichsten) Anwendungsgebieten für GP zählen Modellierung, symbolische Regression, Bild- und Signalverarbeitung, Finanzzeitreihenanalyse und ökonomische Modelle, industrielle Prozesssteuerung, Medizin, Biologie und Bioinformatik. [95] gibt eine Übersicht über den Einsatz von GP in der *Dow Chemical Company*.

Neuerdings wird die sog. *Multi-Objective Symbolic Regression* (MOSR oder auch Pareto-GP) erfolgreich als Modellierungstechnik angewendet. Basierend auf GP sollen dabei zwei widersprüchliche Zielsetzungen, einerseits Modellqualität (Prognosegüte) und andererseits Modellkomplexität, optimiert werden [114]. Pareto-GP kann zur automatischen Variablenauswahl, Berechnung sehr großer Datenmengen und Entwicklung zuverlässiger Modelle eingesetzt werden. Es werden Verfahren zur Vermeidung von Overfitting und zur Identifikation von Ausreißern entwickelt. Der Einsatz von Pareto-GP bettet sich sehr gut in die Vorgehensweise der experimentellen Versuchsplanung (*Design of Experiments*, DoE) ein. Der Projektleiter steht im intensiven Austausch mit Forschern der Universitäten Tilburg, Eindhoven und Antwerpen sowie mit der Arbeitsgruppe um Dr. Guido Smits (*Dow Benelux B.V.*), die diese Verfahren erfolgreich in der industriellen Praxis einsetzen.

Genetic Programming macht eine rasante Entwicklung durch. Einzelne Studien belegen die Überlegenheit von GP gegenüber klassischen Ansätzen. GP wird in Forschungseinrichtungen großer Konzerne (wie z.B. *Dow Benelux B.V.*) gleichberechtigt neben anderen Verfahren eingesetzt. Dennoch ist GP vielen Anwendern unbekannt, da es bislang nur wenige vergleichende Studien gibt. Durch das MCIOP-Vorhaben steht eine Referenzstudie zur Verfügung, die GP-Anwendungen im Bereich der Energiewirtschaft darstellt.

Einen umfassenden Vergleich gängiger Methoden zur empirischen Modellierung (lineare Regression, rationale Intervallinterpolation, NN, SVM, Kriging, MLS, MARS und GP) gibt Vladislavleva [116].

Anlagenmodellierung Mit Hilfe der *Hierarchischen Mehrkriteriellen Optimierung* (HMO) wird die Anlagenmodellierung und -optimierung durchgeführt. Bei der Beschreibung des Stands der Forschung auf dem Gebiet der HMO sind die beiden Bereiche der *hierarchischen Optimierung* und der *mehrkriteriellen Optimierung* gesondert zu betrachten. Die hierarchische Optimierung, also die Optimierung bezüglich hierarchisch angeordneter Modelle verschiedener Qualitäts- und Komplexitätsstufen, stellt ein hochaktuelles Forschungsgebiet dar. So beschreiben [62] ein sogenanntes „Dynamic Multilevel Hybrid Optimization Scheme with Multifidelity Model Interactions“. Dieses Verfahren verwendet einen *multifidelity optimization algorithm* (MFO): Zuerst wird eine vereinfachte Optimierung im Bereich des aufwändig zu berechnenden *high fidelity models* durchgeführt. Anschließend erfolgt eine aufwändige Optimierung auf dem vereinfachten *low fidelity model*. Das so gefundene Optimum im *low fidelity* Raum wird anschließend in den *high fidelity* Raum transformiert.

Auch Arbeitsgruppen in den USA (z.B. Dr. Genetha Gray, Sandia National Laboratories) sowie in Großbritannien (Dr. A. Forrester, Southampton) liefern wichtige Forschungsbeiträge zur hierarchischen Optimierung [75].

Karakasis et al.[85] schlagen einen hierarchischen, verteilten und Meta-Modell unterstützten evolutionären Algorithmus (HDMAEA) vor. Dieser arbeitet mit einem evolutionären Algorithmus, CFD-Modellen verschiedener Komplexität und lokalen Meta-Modellen basierend auf *radial basis function networks*. Kampolis et al.[84] präsentieren auf Basis des HDMAEA verschiedene Optimierungsstrategien, die auf lokaler Ebene verwendet werden. Als Anwendungsfälle werden in beiden Veröffentlichungen Problemstellungen aus dem Tragflächendesign behandelt. In diesen Arbeiten wird allerdings lediglich ein Qualitätskriterium (mono- oder einkriterielle Optimierung) betrachtet.

Zhou et al.[119] verbinden verschiedene Optimierungsverfahren auf lokalen und globalen Surrogatmodellen mit einem evolutionären Algorithmus. Ihr Ansatz ist aber nicht so ganzheitlich angelegt wie das HDMAEA Framework. Allerdings werden auch hier Problemstellungen aus dem Tragflächendesign behandelt. Lim et al.[104] verallgemeinern den Ansatz und arbeiten Vor- und Nachteile heraus. Im Vergleich zum Projekt MCIOP ist neben der einkriteriellen Herangehensweise fest zu stellen, dass [85] und [84] nur CFD-Modelle einsetzen, während [119] und [104] lediglich Surrogatmodelle betrachten. Die Verbindung verschiedener Modellierungsansätze, wie in MCIOP, ist bisher nicht ausführlich betrachtet worden.

Die mehrkriterielle Optimierung ist hingegen schon länger bekannt. Zuerst wurde sie im Bereich des *Operations Research* für diskrete Optimierungsaufgaben eingesetzt. Einen guten Überblick über die dort verwendeten Verfahren des *multi-criteria decision making* geben [109] und [65]. Seit Mitte/Ende der 1990er Jahre sind auch erste Ansätze mit Hilfe von evolutionären Algorithmen zur mehrkriteriellen Optimierung bekannt. Hier bieten [64] und [63] einen guten Überblick. Arbeiten, in denen die Konzepte der hierarchischen und der mehrkriteriellen Optimierung zusammen geführt werden, sind dem Projektleiter nicht bekannt. Als Überblick zu Surrogatmodellen in der mehrkriteriellen Optimierung eignet sich die Veröffentlichung von Knowles und Nakayama [88].

Der Projektleiter besitzt umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Optimierung komplexer Systeme und Anlagen. Die Optimierung komplexer Anlagen war Gegenstand seiner Tätigkeit im Sonderforschungsbereich 531 an der *TU Dortmund* [61, 117].

In Zusammenarbeit mit Dr. Sandor Markon (Fujitec Ltd, Japan) entstanden eine Vielzahl Publikationen zum Thema Fahrstuhloptimierung [106, 59, 60, 58, 50, 49, 55]. Ergebnisse dieser Arbeiten sind in dem Buch „Modern Supervisory and Optimal Control with Applications in the Control of Passenger Traffic Systems in Buildings“ [107] zusammengefasst.

Die vom Projektleiter entwickelte Toolbox SPO beinhaltet Funktionen, die eine hierarchische Parameteroptimierung ermöglichen. So kommen während der Optimierung verschiedene Modelle zum Einsatz, die geeignete Lösungskandidaten auf der Modellebene vorhersagen. Diese Modelle können statisch festgelegt oder während der Optimierung dynamisch wechseln [46].

Als Leiter des Forschungsprojektes FIWA führte der Projektleiter Optimierungen von Biogasanlagen und Kläranlagen durch [120, 71, 90, 91, 94, 48, 47, 93].

Generalisierbarkeit Durch die Generalisierung beziehen sich die Ergebnisse nicht nur auf eine einzelne Problemstellung. Der Einsatz von statistischer Versuchsplanung ist ein wichtiges Element, um verschiedene Modellierungen effizient zu vergleichen und ihr Potenzial zu beurteilen [86, 87, 43]. Durch die steigende Rechnerleistung können Simulationen und auch die zugehörigen Modellverifikationen und Validierungen heutzutage bereits mit relativ geringem Hardwareaufwand durchgeführt werden, sodass die Ergebnisse einzelner Experimente (Simulationen, Prognosen) relativ schnell berechnet und überprüft werden können.

In diesem Bereich wurde von Bartz-Beielstein durch die Entwicklung der SPO Pionierarbeit geleistet, indem zum ersten Mal eine umfassende Methodik aus der statistischen Versuchsplanung zur Analyse von CI-Verfahren entwickelt und angewandt wurde [38]. Die SPO-Methodik beinhaltet neben Verfahren zur Analyse einzelner Modelle auch Verfahren zur Generalisierbarkeit von Ergebnissen [40, 42]. Mit SPO steht ein universelles Softwaretool zur Analyse beliebiger Modelle zur Verfügung. SPO kann zur statistischen Analyse von Modellen genutzt werden. Der Einsatz von SPO wird in der Praxis und Theorie (Grundlagenforschung) stark nachgefragt. Eine nach Anwendungsfeldern gegliederte Auflistung liest sich wie folgt:

- Maschinenbau: Temperierbohrungen;
- Automatisierungstechnik: Biogasanlagen;
- Luft- und Raumfahrt: Tragflächenoptimierung;
- Simulation und Optimierung: Fahrstuhlsteuerung;
- Algorithm Engineering: Graphenalgorithmien;
- CI: Algorithmische Chemie;
- Verfahrenstechnik: Entwurf von Destillationsanlagen;
- Wirtschaftswissenschaft: Modellierung eines Bodenmarktes;
- Statistik: Selektionsverfahren für Partikelschwarm Verfahren;
- Informatik: Threshold Selektion und Schrittweitensteuerung für Evolutionsstrategien, Analyse und Anwendung von Partikelschwarm Verfahren;
- Numerische Mathematik: Vergleich/Analyse klassischer und moderner Optimierungsalgorithmen;
- Logistik: Touroptimierungs- und Torzuordnungsprobleme;
- Bioinformatik: Optimierung von Hidden-Markov-Modellen.

Durch die engen Kontakte zum Lehrstuhl „Algorithm Engineering“ der *TU Dortmund* (Arbeitsgruppe Prof. Rudolph) entstanden mehrere Veröffentlichungen zum Thema Generalisierbarkeit experimenteller Ergebnisse [51, 52]. Diese Ergebnisse wurden auch im Rahmen von eingeladenen Seminare und Tutorien präsentiert [54, 53, 41]. Weiterhin bestehen Kontakte im Bereich der Grundlagenforschung [44].

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für MCIOP relevante Partner und Kooperationen sind in Tabelle 1 angegeben.

- Mit *Steinmüller Engineering GmbH* besteht ein reger Austausch für die weitere Verwendung und Entwicklung der in MCIOP entwickelten Methoden. Eine Zusammenarbeit in Folgeprojekten befindet sich derzeit in Planung. Es laufen zudem auch studentische Projekte und Abschlussarbeiten, die sich unter anderem mit der Erstellung von Staubabscheider Modellen mit 3D-Druckern befassen.
- In Zusammenarbeit mit der TU Dortmund (Prof. Gabriele Kern-Isberner und Prof. Günter Rudolph) wurde zudem ein Projekt geplant, das einen wichtigen Themenbereich des Projektes MCIOP aufgreift. Dieses untersucht die automatisierte Datenanalyse mit sequentieller Parameter Optimierung und Genetic Programming.
- Es bestand ein beidseitiger Austausch zwischen den Projektbeteiligten aus MCIOP und CIMO der *FH Köln*. Während sich das Projekt CIMO vor allem mit ein- und mehrkriteriellen Optimierungsmethoden sowie datengetriebenen Surrogatmodellen beschäftigt, untersucht das Projekt MCIOP vor allem physikalisch motivierte (d.h. Computational Fluid Dynamics CFD) sowie für Anwender verständliche, lernbare (d.h. Genetic Programming) Modelle. Die Ergebnisse und Erfahrungen beider Projekte werden von den Beteiligten erforscht und ausgetauscht.
- Der Projektleiter hat zudem gute Kontakte zu Unternehmen aus der Wasserindustrie. Hier befindet sich derzeit ein weiteres Projekt in Vorbereitung. Das Projekt behandelt die Gewinnung und Nutzung mehrdimensionaler Prozessdaten zur Erzeugung kunden- und betriebsgerechter Informationen für die Prozesssteuerung und -optimierung bei der Trinkwasseraufbereitung.
- Als Folge der Arbeiten im Projekt MCIOP ergab sich auch eine neue Kooperation mit Dr. Ofer M. Shir (MIGAL – Galilee Research Institute). Es wurde ein kooperativer Projektantrag gestellt. Das beantragte Projekt soll sich mit experimentieller kombinatorischer Optimierung befassen, bzw. die anwendungsorientierte Analyse und Entwicklung von Methoden für solche Probleme. Geplante reale Anwendungsbeispiele stammen dabei aus der Biotechnologie und der Energietechnik. Die in MCIOP entwickelten Methoden bilden eine wichtige Grundlagen für Modellierung und Optimierung in diesem Zusammenhang.

Die Projektpartner des Projektes MCIOP befinden sich auch weiterhin in engem Kontakt.

3 | Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Wichtigstes Ziel des Projektes MCIOP war die Entwicklung von Verfahren für die hierarchische Modellierung und Optimierung in industriellen Anwendungen, unter anderem zur Schadstoffreduktion in Kohlekraftwerken. Die Darstellung der wissenschaftlichen-technischen Ergebnisse gliedert sich nach der Modul- und Arbeitspaketplanung entsprechend der Vorhabensbeschreibung bzw. deren Anpassung in den Zwischenberichten.

Für die zentralen Arbeitspakete des Projektes MCIOP wurden folgende Kürzel verwendet: **DASY**: Datenerfassung und Systematisierung, **MB**: Modellbildung, **EMB**: Erweiterte Modellbildung, **AO**: Anlagenoptimierung, und **GEN**: Generalisierbarkeit.

3.1 Modul DASY „Datenerfassung und Systematisierung“

Arbeitspakete, die sich mit der systematischen Aufnahme und Verarbeitung der relevanten Daten befassen, werden im Modul DASY bearbeitet. Das Modul DASY ist Voraussetzung für alle weiteren Projektschritte.

3.1.1 DASY-1 Datenerfassung und Anpassung für Daten aus der Energiewirtschaft

Ab dem Projektstart im August 2011 fanden regelmäßige Projekttreffen mit dem Projektpartner Steinmüller Engineering GmbH statt. Es wurden verschiedene Methoden zur Datenerfassung diskutiert. Steinmüller Engineering GmbH stellte vorhandene Datenerfassungsverfahren im Detail vor. Darüber hinaus wurden der FH erste Datensätze für eine Analyse zur Verfügung gestellt. Für diese erste Analyse der Daten konnten zwei Mitarbeiter im Bereich Datenerfassung, Datenanalyse und Data Mining sowie ein Mitarbeiter für die Modellierung in der industriellen Anwendung, jeweils in Teilzeit, für das Projekt gewonnen werden. Erste Analysen zeigten, dass die seitens Steinmüller Engineering GmbH gesammelten Daten nicht direkt zur Modellierung genutzt werden konnten.

Eine komplexere Art der Datenvorverarbeitung erwies sich als notwendig. Wie bereits in der Vorhabensbeschreibung antizipiert, wurde ein Student vor Ort bei Steinmüller Engineering GmbH eingesetzt. Dieser Student untersuchte den Prozess der Datenaufnahme und beriet Steinmüller Engineering bei der Datenvorverarbeitung.

Diese Untersuchungen ergaben, dass für die geplante Modellierung des Verbrennungsprozesses weitere Daten aufgenommen werden müssen. Diese Daten werden auch durch umfangreiche Simulationsrechnungen geliefert, die durch die Steinmüller Engineering GmbH durchgeführt werden. Dazu beschaffte die Steinmüller Engineering GmbH in 2012 nach einer umfangreichen Planungsphase einen Rechencluster und nahm diesen erfolgreich in Betrieb. Dieser Cluster kann für die Simulation/Modellierung und Optimierung von großtechnischen Anlagen der Kraftwerkstechnik eingesetzt werden.

Durch das Ausscheiden des Experten für Simulationsrechnungen bei der Steinmüller Engineering GmbH kam es bei der Modellierung von Verbrennungsprozessen in Kohlekraftwerken zu einer Verzögerung. Um die Bearbeitung der nachfolgenden Arbeitspakete dennoch weitgehend termingerecht durchführen zu können, wurde neben der Modellierung der Verbrennungsprozesse mit der Modellierung eines Fliehkraftabscheiders, auch Zyklon genannt, begonnen. Dabei handelt es sich um einen Filter zur Abscheidung von Staub aus dem Abgas eines Kohlekraftwerks. Abbildung 2 zeigt eine Zeichnung eines Zyklon-Staubabscheiders mit den zu optimierenden Geometrieparametern. Für diese Modellierungsaufgabe wurden Daten aufgenommen, um die durch die FH Köln entwickelten Simulationsmodelle zu validieren und um geeignete Surrogat-Modelle anzupassen. Im Rahmen der neu in das Projekt aufgenommenen Case Studies CS-5 und CS-6 wurden durch Studierende der FH Köln Bausteine für die Modellierung von Zyklonen entwickelt und dokumentiert. Das Arbeitspaket

wurde nach erfolgter Zielanpassung erfolgreich abgeschlossen.

3.1.2 DASY-2 Validierung von Parametereinstellungen mit Hilfe von CFD-Modellen

In diesem Arbeitspaket wurden CFD-Modelle zur Validierung der im Projekt entwickelten hierarchischen Modelle erprobt. Durch die Anwerbung eines Experten für Simulationsrechnungen und durch Installation eines Rechenclusters konnte die Steinmüller Engineering GmbH erste Simulationen von Verbrennungsprozessen erfolgreich selbst durchführen, statt auf einen externen Dienstleister zurückgreifen zu müssen. Durch Ausscheiden dieses Experten fiel diese Möglichkeit zunächst weg, wodurch es zu Verzögerungen bei der Projektdurchführung kam. Im späteren Verlauf konnte ein Ersatz gefunden werden. Gleichzeitig wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und Studierenden ein CFD-Modell eines Zyklon-Staubabscheiders entwickelt, welches zur Validierung von Parametereinstellungen genutzt werden kann. Abbildung 3 zeigt beispielhaft eine Visualisierung der Druckverteilung in einem Zyklon-Staubabscheider, wie sie durch das im Projekt entwickelten CFD-Modell berechnet wurde. Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

3.1.3 DASY-3 Planung weiterer Experimente

Die Planung weiterer Experimente im Bereich der Optimierung von Zyklon-Staubabscheidern wurde abgeschlossen. Methoden der statistischen Versuchsplanung wurden für eine erste Optimierung der Geometrieparameter eines Zyklons eingesetzt. Dabei wurden erste Erkenntnisse über den Einfluss einzelner Parameter auf den Abscheidegrad des Zyklons, d.h. auf dessen Leistungsfähigkeit, gewonnen.

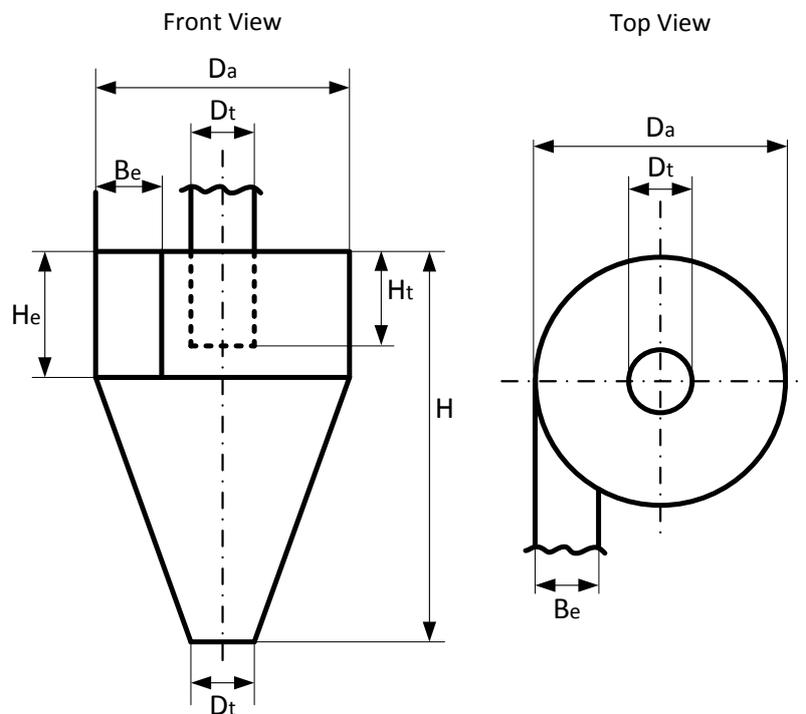


Abbildung 2: Zeichnung eines Zyklon-Staubabscheiders mit zu optimierenden Geometrieparametern.

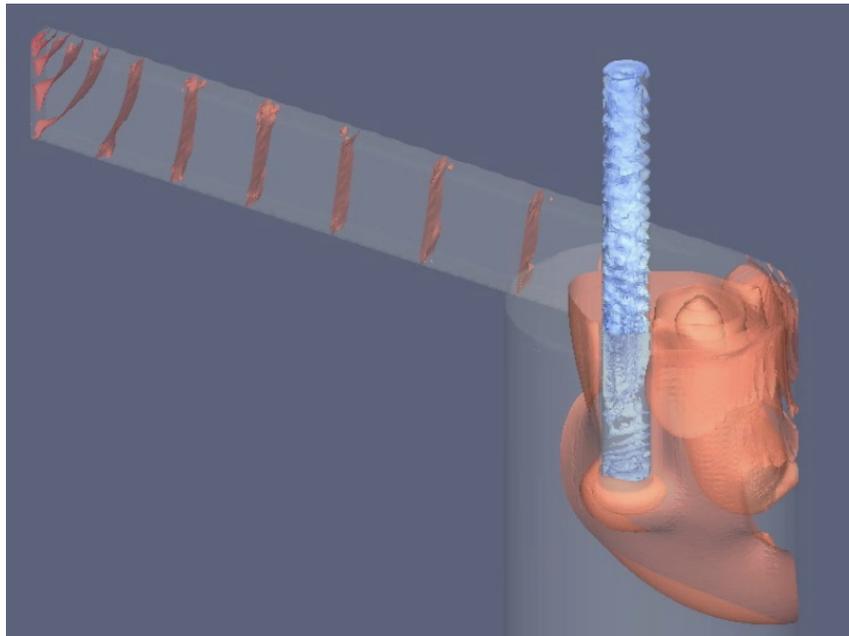


Abbildung 3: Beispielhafte Visualisierung der Druckverteilung in einem Zyklon-Staubabscheider auf Basis des im Projekts erstellten CFD-Modells.

3.2 Modul MB „Modellbildung“

Das Modul MB umfasst zwei Arbeitspakete, die sich mit Surrogat-Modellierung von Prozessen in großtechnischen Anlagen der Kraftwerkstechnik beschäftigen.

3.2.1 MB-1 Entwicklung und Anbindung von Surrogat-Modellen

Auf Basis der im Arbeitspaket DASY-1 gewonnenen Daten wurde ein Surrogat-Modell für die Simulation von Zyklon-Staubabscheidern erstellt. Dabei kamen klassische statistische Methoden und sequentielle Parameteroptimierung (SPO) zum Einsatz. Die entsprechenden in der SPO Toolbox (SPOT) implementierten Ansätze sind frei verfügbar (siehe: <http://cran.r-project.org/package=SPOT>). Eine einfache Einführung sowie eine Demonstration zur Verwendung der mehrkriteriellen Optimierung sind inzwischen auch als Veröffentlichungen verfügbar [35, 32]. Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

3.2.2 MB-2 Validierung von Surrogat-Modellen

Die im Arbeitspaket MB-1 entwickelten Surrogat-Modelle wurden hinsichtlich ihrer Gültigkeit für die praktische Anwendung validiert. Diese Validierung erfolgte auf Basis existierender Modelle für Zyklon-Staubabscheider [105]. Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

3.3 Modul EMB „Erweiterte Modellbildung“

Das unter dem Kürzel EMB geplante Modul umfasst die Arbeitspakete die sich schwerpunktmäßig mit dem datengetriebenen Modellierungsansatz *Genetische Programmierung* (GP) befassen.

Im Rahmen des Projekts wurde RGP, ein modernes GP-Framework, stark weiterentwickelt. Das System wurde um mehrkriterielle Selektionsoperatoren erweitert und für die Lösung von Klassifikations- und Regressionsproblemen verallgemeinert. Außerdem wurde das System mit einer benutzerfreundlichen graphischen Oberfläche ausgestattet und ist damit auch für nicht-Experten bedienbar. RGP wurde in der Dissertation des Projektmitarbeiters Oliver Flasch ausführlich dokumentiert. Das System ist in Leistung und Funktionsumfang wettbewerbsfähig zu kommerziellen Lösungen und steht als Open Source Software zur Verfügung (siehe <http://cran.r-project.org/package=rgp>).

RGP wurde zur automatischen Entwicklung genauer und dennoch menschenlesbarer Modelle für Prozesse in der Energiewirtschaft verwendet. Im Rahmen des Moduls „Generalisierbarkeit“ wurde das System erfolgreich für ein Modellierungsproblem in der Stahlindustrie eingesetzt.

Im Partnerprojekt CIMO wurde RGP als Policy-Generator im Rahmen eines Ensemble-Ansatzes verwendet. Ausserdem wurde RGP selbst genutzt, um ein Regressionsmodell (Symbolische Regression) zu bilden. Beide Fälle können Informationen für die Modellierung und Simulation liefern. Entsprechend wurde eine Anbindung an RGP auch in das an der FH Köln entwickelte Open Source Paket SPOT (Sequential Parameter Optimization Toolbox) integriert (siehe <http://cran.r-project.org/package=SPOT>).

Es zeigte sich, dass GP als Surrogatmodell für automatisierte Optimierung noch nicht ideal geeignet ist, da der Rechenaufwand für die Modellbildung für diese Anwendung noch zu hoch ist. Der nötige Zeitaufwand kann sich in der selben Größenordnung wie der Zeitaufwand einer CFD-Simulation bewegen, daher bietet die Verwendung als Surrogatmodell in der Optimierung wenige Vorteile, vor allem da die Verständlichkeit der erzeugten Modelle eine untergeordnete Rolle spielte. Daher wurden primär Kriging-Modelle verwendet.

Die Vorteile der automatischen Entwicklung verständlicher Modellformeln wurden in MCIOP weiter untersucht. Außerdem wurden Konzepte der Modellierung mit GP und CFD erarbeitet.

3.3.1 EMB-1 Informationsaustausch zur multikriteriellen Prozessoptimierung für die Industrie

Das Arbeitspaket EMB-1 umfasste den aktiven Austausch mit Projektpartnern und anderen Forschungsgruppen. Dabei wurden Ideen und Vorschläge ausgetauscht und auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Die in diesem offenen Austausch entstandenen Anregungen und Ideen waren für den Erfolg der weiteren Arbeitspakete von großer Bedeutung.

3.3.2 EMB-2 Entwicklung mehrkriterieller Selektionsoperatoren

Das in der Arbeitsgruppe des Projektleiters entwickelte GP-System RGP wurde erfolgreich um die Möglichkeit zur allgemeinen mehrkriteriellen Selektion erweitert. Die Selektionsoperatoren wurden für beliebige weitere Kriterien verallgemeinert, um die Lösung allgemeiner mehrkriterieller Klassifikations- und Regressionsprobleme zu ermöglichen. Dazu kommt mit SMS-EMOA ein moderner mehrkriterieller evolutionärer Optimierungsalgorithmus zum Einsatz. Dieses Arbeitspaket konnte vorzeitig erfolgreich abgeschlossen werden. Detaillierte Ergebnisse wurden in Kapitel 2.6.4 der Dissertation des Projektmitarbeiters Oliver Flasch veröffentlicht [15].

3.3.3 EMB-3 Erweiterung für allgemeine Klassifikations- und Regressionsprobleme

In dem Arbeitspaket EMB-3 wurde RGP für die Lösung allgemeiner mehrkriterieller Klassifikations- und Regressionsprobleme erweitert. Auf Basis des bestehenden modularen Systemkerns wurden hierzu jeweils neue Softwareschnittstellen und Benutzeroberflächen erstellt, welche die effiziente Spezifikation und Bearbeitung von allgemeinen Klassifikations- sowie von allgemeinen Regressionsproblemen unterstützen. Wie in der Vorhabenbeschreibung antizipiert waren diese Erweiterungen mit moderatem Aufwand umsetzbar und bieten die Basis für die Erweiterung von GP für multivariate symbolische Regression im Arbeitspaket EMB-4. Zudem wurde ein Vorgehensmodell für die Anwendung von RGP in allgemeinen mehrkriteriellen Klassifikations- und Regressionsproblemen entwickelt (siehe Abbildung 4). Dieses Arbeitspaket konnte vorzeitig erfolgreich abgeschlossen werden. Detaillierte Ergebnisse wurden in Kapitel 3.3 der Dissertation des Projektmitarbeiters Oliver Flasch veröffentlicht [15].

3.3.4 EMB-4 Erweiterung für multivariate symbolische Regression

Basierend auf den Ergebnissen der Arbeitspakete EMB-2 und EMB-3 sollte in diesem Arbeitspaket GP für die Lösung multivariater Regressionsprobleme erweitert werden. Mittels multivariater symbolischer Regression können Modellformeln, die mehrere Zielgrößen gleichzeitig modellieren, automatisch erzeugt werden. Basisfunktionalität für multivariate symbolische Regression steht nun zur Verfügung.

3.3.5 EMB-5 Interaktive Visualisierungs- und Auswahlmethoden für Ergebnisse von MGP-Läufen

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von interaktiven Methoden und Werkzeugen zur Auswahl einer Lösung aus einer Menge von Pareto-optimalen Ergebnissen eines mehrkriteriellen GP (MGP) Experimentlaufs. Die Verwendung von Pareto-basierten Ansätzen zur mehrkriteriellen Optimierung in MGP ermöglicht die Bereitstellung mehrerer Pareto-optimaler Lösungen, die verschiedene Kompromisse eventuell widersprüchlicher Optimierungskriterien repräsentieren. Neue Visualisierungen für Pareto-optimale Lösungsmengen wurden entwickelt und in RGP integriert (siehe Abbildungen 5 - 7). Eine detaillierte Beschreibung dieser Methoden wurde in Kapitel 3.6 der Dissertation des Projektmitarbeiters Oliver Flasch veröffentlicht [15].

3.4 Modul AO „Anlagenoptimierung“

Die Arbeitspakete des Moduls AO befassen sich mit der Anwendung der in den Vorgängermodulen MB und EMB entwickelten Verfahren auf die Modellierung und Optimierung großtechnischer Anlagen der Kraftwerkstechnik.

3.4.1 AO-1 Hierarchische Simulation und mehrkriterielle Optimierung

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von Vorgehensweisen für die hierarchische Optimierung. Die Umsetzung von entwickelten Vorgehensweisen war generisch zu vollziehen. Dies wurde durch die Einbeziehung des praktischen Anwendungsfalls „Zyklon-Staubabscheider“ sichergestellt. Existierende mehrkriterielle Optimierungsverfahren wurden für den hierarchischen Ansatz generisch übertragen.

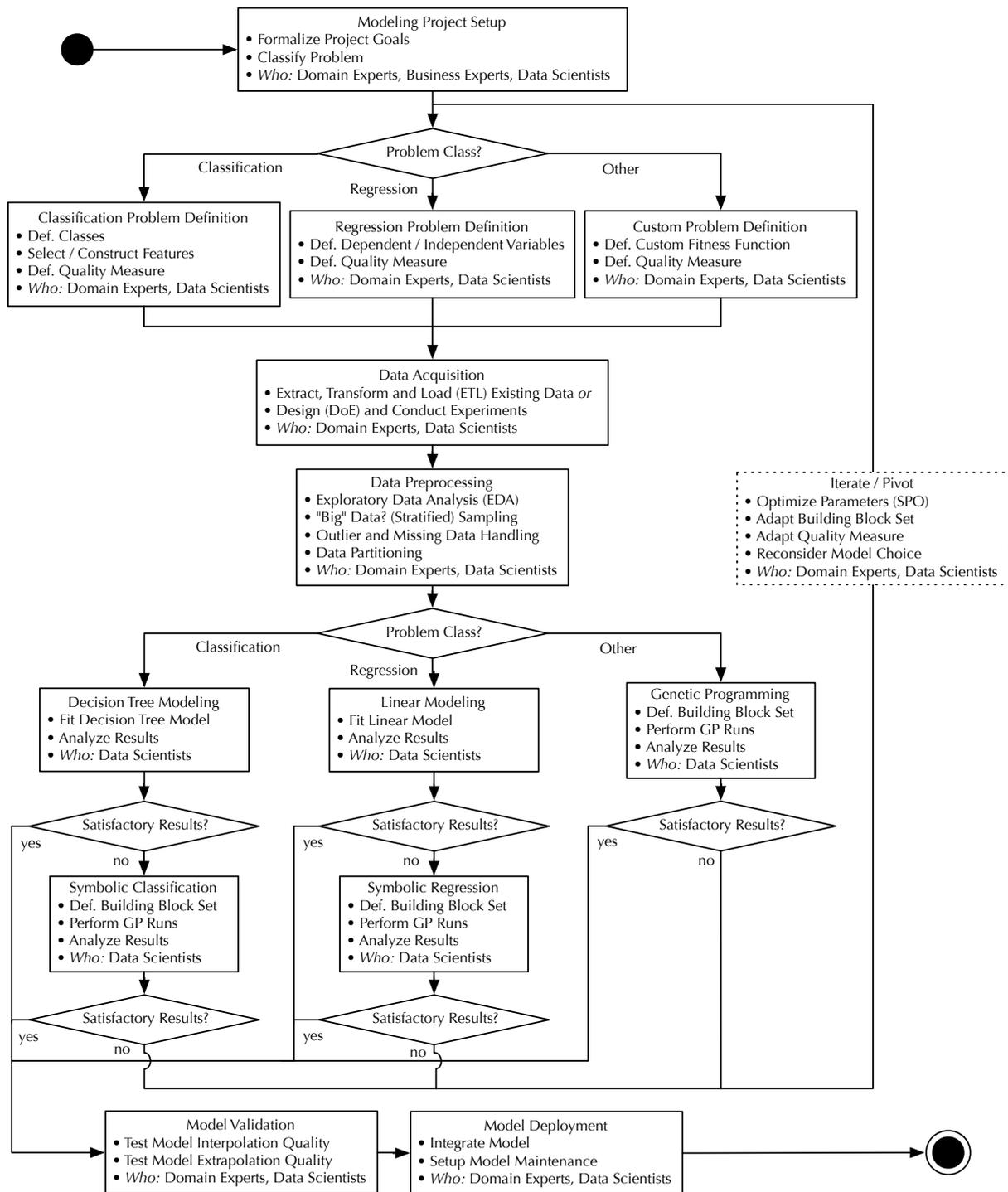


Abbildung 4: Vorgehensmodell für die Anwendung von RGP in Klassifikations- und Regressionsproblemen.

CSV File Upload

CSV File
 Datei auswählen
 Upload complete

Header
 Separator
 Comma
 Semicolon
 Tab
 Quote
 None
 Double Quote
 Single Quote

Data Partitioning

Training Data Share
 0.1 0.5 1
 Training Data Position
 Random
 Random Seed

Data Panel
 Use the 'Data' panel to import and pre-process your data set. To get started, upload a data file in CSV format by using the controls to the left. You can control the partitioning into training and validation sets with the 'Data Partitioning' controls.

Table Plot

25 records per page Search:

x	y	Role
0.0000000	0.000000e+00	Training
0.1010101	-9.251604e-05	Training
0.2020202	-1.271996e-03	Validation
0.3030303	-5.356043e-03	Validation
0.4040404	-1.365584e-02	Validation
0.5050505	-2.617516e-02	Training
0.6060606	-4.169077e-02	Training
0.7070707	-5.846701e-02	Validation
0.8080808	-7.505313e-02	Validation
0.9090909	-9.061798e-02	Training
1.0101010	-1.045629e-01	Validation
1.1111111	-1.155687e-01	Validation
1.2121212	-1.205756e-01	Training
1.3131313	-1.143132e-01	Validation
1.4141414	-8.983065e-02	Validation

Abbildung 5: Datenerfassung und Aufbereitung im mehrkriteriellen GP System RGP.

Die durch das Ausscheiden des Experten für Verbrennungssimulationen beim Projektpartner Steinmüller Engineering GmbH bedingten Verzögerungen machten, wie im Zwischenbericht 2013 erwähnt, eine Verlängerung der Bearbeitungszeit für dieses Arbeitspaket nötig.

Ein Framework für die hierarchische mehrkriterielle Optimierung auf Basis moderner statistischer Modellierungsverfahren wurde konzipiert, implementiert und auf synthetischen Testdaten erprobt. Analytische Modelle für Zyklon-Staubabscheider stehen zur Verfügung [14, 27] (CS-2) und Multiphasen-CFD Modelle sind entwickelt worden (CS-1). Das hierarchische Optimierungs-Framework wurde mit den entwickelten Simulationsmodellen für den Zyklon-Staubabscheider integriert. Das Arbeitspaket konnte nach Verlängerung erfolgreich abgeschlossen werden.

3.4.2 AO-2 Anbindung der mehrkriteriellen Optimierung an SPO

Mehrkriterielle Optimierungsmethoden stehen in SPO zur Verfügung. Eine entsprechend erweiterte Version der SPO-Implementierung SPOT (siehe <http://cran.r-project.org/package=SPOT>) ist veröffentlicht (M-SPOT). Das Arbeitspaket ist damit abgeschlossen [29, 26].

Data Objective Run Results

Run Control

▶ Start Run

⏸ Pause Run

↶ Reset Run

Run Parameters

Mu (Population Size): 100

Lambda (Number of Children / Generation): 50

Nu (Number of New Individuals / Generation): 50

Crossover Probability: 0.5

Subtree Mutation Probability Weight: 1

Function Mutation Probability Weight: 0

Constant Mutation Probability Weight: 0

Enable Age Criterion

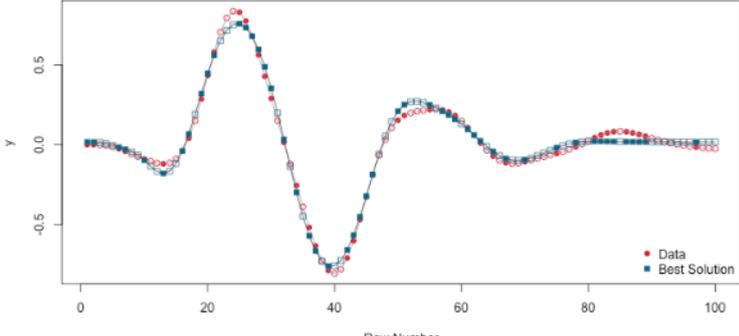
Parent Selection Probability: 1

Run Panel

Start the model search run by pressing the 'Start Run' button to the left. You can monitor the run's progress visually with the tools below. Once solutions of satisfactory quality start to appear, press 'Pause Run' and change to the 'Results' panel to analyse the results in more detail. You can continue a paused run by pressing 'Start Run' again or start over by pressing 'Reset Run'.

Progress Pareto Front **Best Solution** Statistics

Best Solution Plot



Attribute	Value
Formula	function (x) sin(sqrt(x)) * (sqrt(x) * (sin(sqrt(x)) * (sin(sqrt(x)) * sin(x + x)))) * sin(sin(sqrt(x) - sin(sqrt(x)) * (sqrt(x) * sin(x + x))))
Error	0.00135127496820988
Generation	36662
Fitness Evaluation Number	3666100

Abbildung 6: Automatisierte erweiterte Modellbildung im mehrkriteriellen GP System RGP.

3.4.3 AO-3 Experimente und Studien mit den neu entwickelten Verfahren

Ziel dieses Arbeitspakets war die Analyse und Optimierung der neu entwickelten Verfahren im Hinblick auf Robustheit und Ergebnisqualität. Dazu wurden die Methodik der SPO weiterentwickelt und auf MGP angewendet [16]. Weiterhin wurde ein Verfahren entwickelt, dass die Robustheit von MGP nicht nur für einzelne Anwendungsbeispiele, sondern für vollständige Anwendungsklassen garantiert.

Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen. Die erzeugten Modelle lieferten dabei reproduzierbar genauere Vorhersagen als alternative Verfahren. Nur Kriging Modelle konnten genauere Vorhersagen liefern (siehe Abbildungen 9 und 10). Im Gegensatz zu Kriging sind MGP Modelle jedoch menschenles- und -interpretierbar. Weitere Ergebnisse wurden in der Dissertation des Projektmitarbeiters Oliver Flasch veröffentlicht.

3.4.4 AO-4 Auswertung und Validierung beim Anwender

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die entwickelten Verfahren der hierarchischen mehrkriteriellen Optimierung für das Modell im Projekt getestet. Dazu wurden die Lösungen unter Gesichtspunkten der mehrkriteriellen Optimierung betrachtet. Die erzielten Ergebnisse wurden für eine Validierung

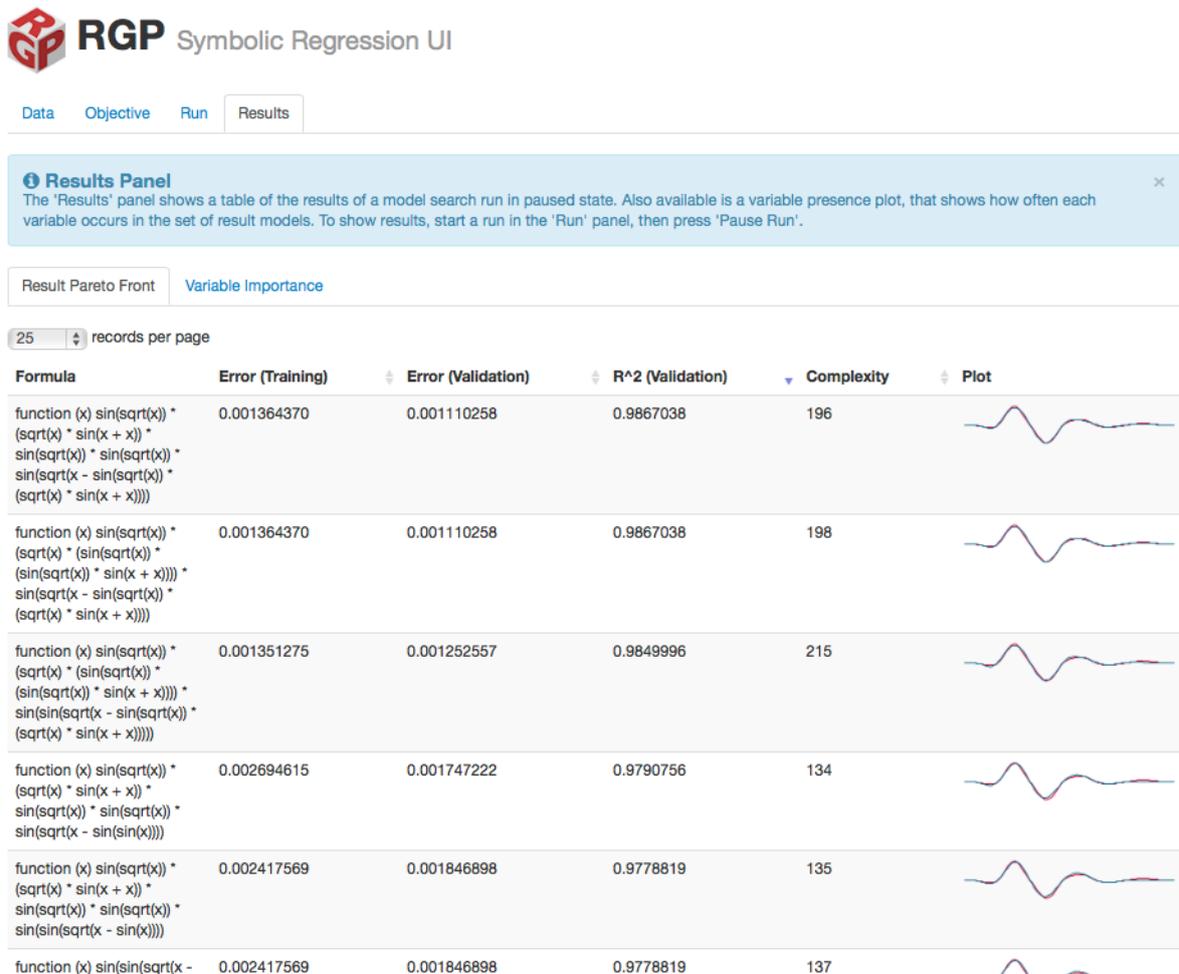


Abbildung 7: Visualisierung der Pareto-optimalen Lösungsmenge im mehrkriteriellen GP System RGP.

des im Projekt implementierten Systems herangezogen. Auf Basis dieser Ergebnisse konnten Vorgehensweise für die Implementierung der Verfahren in anderen Industriezweigen vorgeschlagen und Empfehlungen ausgesprochen werden, siehe dazu auch die Ergebnisse des Moduls GEN.

3.5 Modul GEN „Generalisierbarkeit“

Die Arbeitspakete des Moduls GEN befassten sich mit der Untersuchung der Generalisierbarkeit der im Projekt MCIOP entwickelten Verfahren.

3.5.1 GEN-1 Weitere Anwendungen und Partner

In diesem Arbeitspaket wurden Anwendungsfelder für die im Projekt MCIOP entwickelten Verfahren gesucht und erprobt.

Zusätzlich fand gemeinsam mit Professoren aus dem *Institut für Allgemeinen Maschinenbau (IAM)* der FH Köln (Dr. Simone Lake, Dr.-Ing. Jürgen Schmitz, Dr. Hans Rühmann) eine Zusammenarbeit im Bereich der Optimierung von Prozessvariablen beim Spritzgießen statt. Diese Arbeiten wurde im Rahmen von studentischen Praxisprojekten und Abschlussarbeiten durchgeführt.

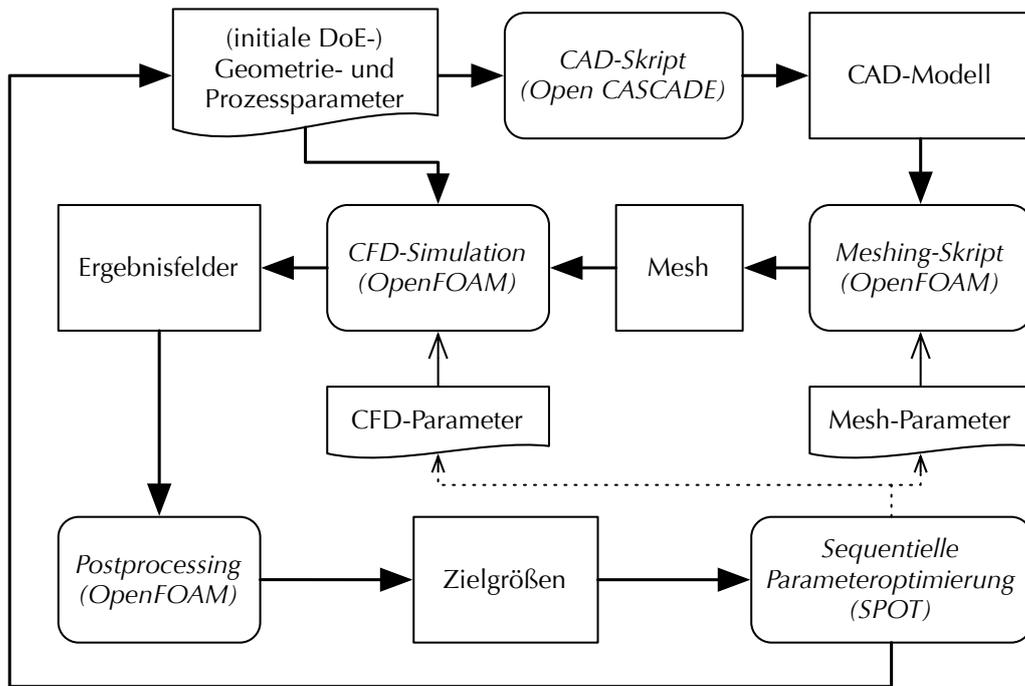


Abbildung 8: Ablauf der mehrkriteriellen Optimierung in MCIOP mit Anbindung an SPO.

Ein weiteres Anwendungsgebiet war das Themengebiet Stahl. Hier fand unter anderem eine Zusammenarbeit mit dem Gemeinschaftsprojekt PER-OPTI *Optimierung der Prozessführung in modernen Walzwerken* der Professoren Jelali, Haber und Smajic und Bartz-Beielstein statt. Auch hier konnten Tests zur hierarchischen Optimierung erste Erfolge zeigen.

Abbildung 11 zeigt eine Station eines Warmwalzprozesses. Aufgabe war die möglichst exakte Prognose der Weitung einer Stahlbramme (in der Abbildung mit Metal Product bezeichnet) in einem zweischrittigen Walzdurchlauf.

Durch das im Projekt MCIOP entwickelte mehrkriterielle GP System RGP wurden vollständig automatisch Pareto-optimale Modelle erzeugt, die optimale Kompromisse zwischen Vorhersagegenauigkeit und Verständlichkeit darstellt (siehe Abbildung 12). Da es sich bei den erzeugten Modellen um White-Box-Modelle handeln, können diese direkt in Maschinensteuerungen integriert werden, ohne die Notwendigkeit spezieller Software. Ausserdem ermöglichen die Modelle weitergehende Einsichten in die dem Walzprozess zugrunde liegende Physik. Abbildung 13 zeigt die tatsächliche Bedeutung der vermuteten Einflussfaktoren. Von den 25 vermuteten Einflussfaktoren sind vier ausreichend für Modelle mit praxistauglicher Genauigkeit, die gleichzeitig verständlich sind.

3.5.2 GEN-2 Integration in Tools von Evolved Analytics

In diesem Arbeitspaket sollte die Integration der entwickelten Methoden in das Tool Data Modeler von *Evolved Analytics LLC* vorgenommen werden. Aufgrund der rasanten Entwicklung der Open Source Software R Interessen des Projektpartners *Steinmüller Engineering GmbH*, sowie der freien Einsatzfähigkeit in Wissenschaft und Forschung verschob sich der Fokus im Projekt allerdings zunehmend auf Open Source Software.

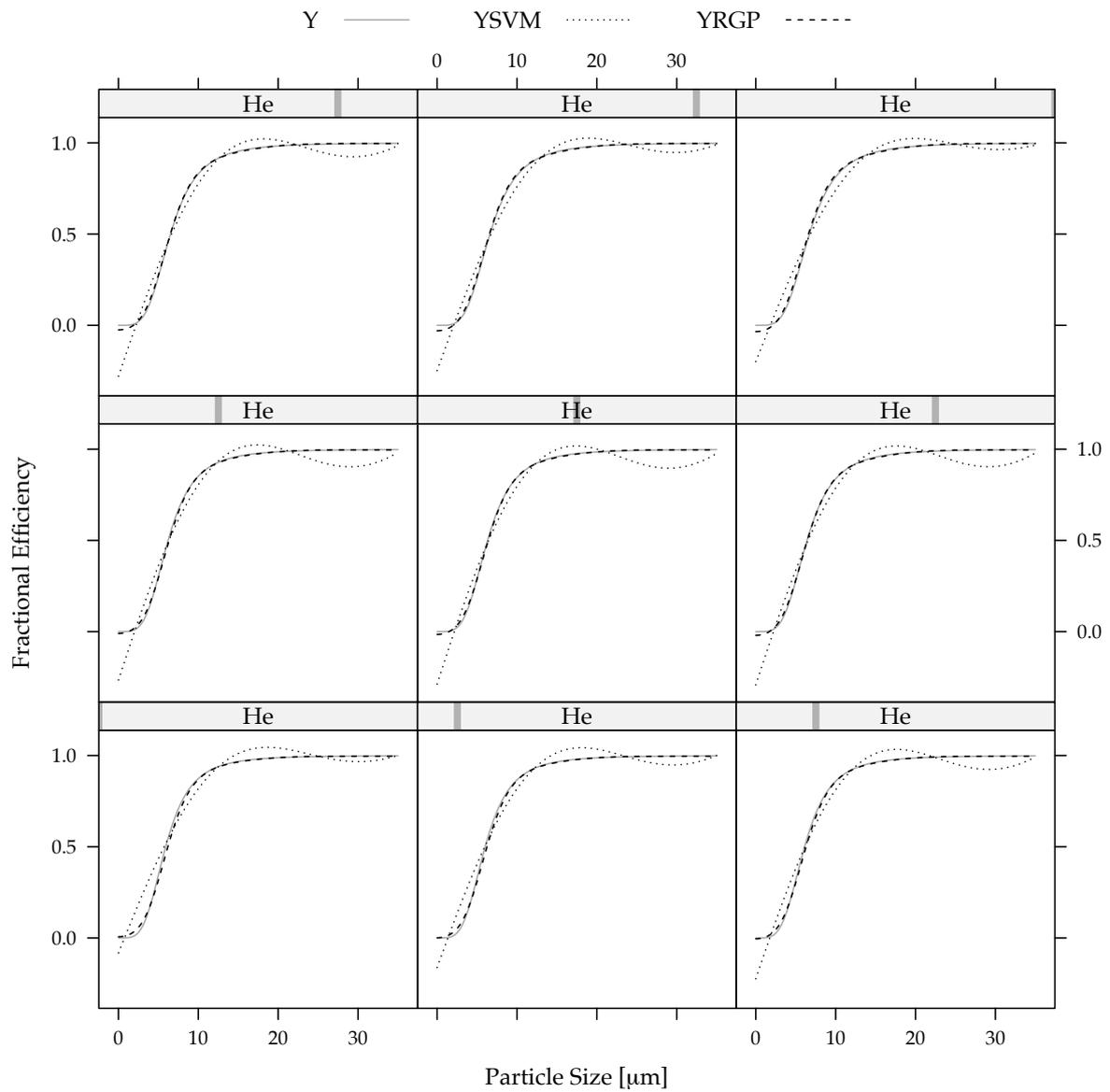


Abbildung 9: Plots des Abscheidegrads in Abhängigkeit der Partikelgröße des Geometrieparameters H_e , wie durch die im Projekt entwickelten GP-Simulationsmodelle vorhergesagt (YRGP). Zum Vergleich sind die Realdaten (Y) sowie die Vorhersage eines SVM-Modells (YSVM) dargestellt.

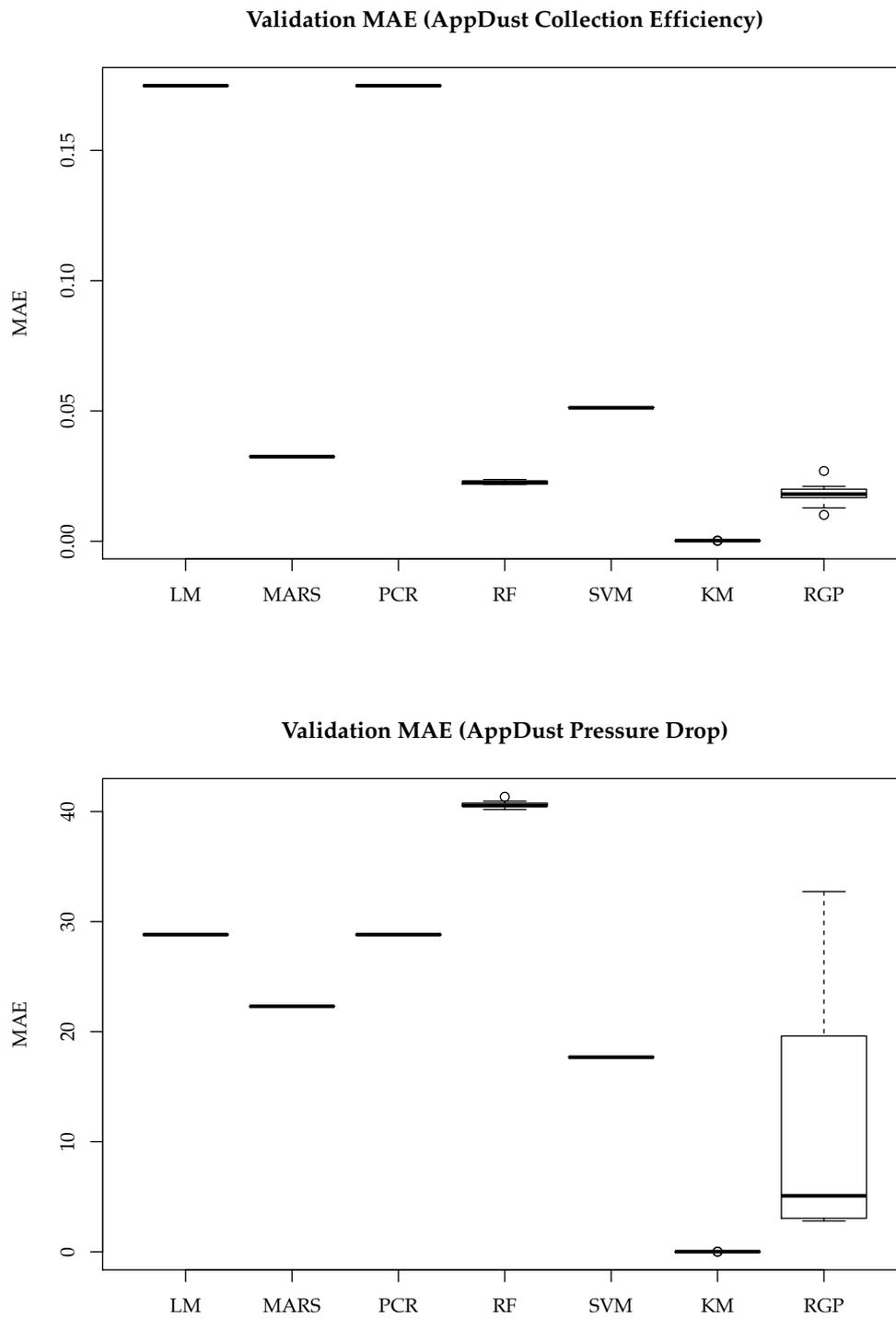


Abbildung 10: Vorhersagegüte der im Projekt entwickelten Modelle zu Abscheidegrad und Druckverlust im Vergleich zu existierenden Verfahren.

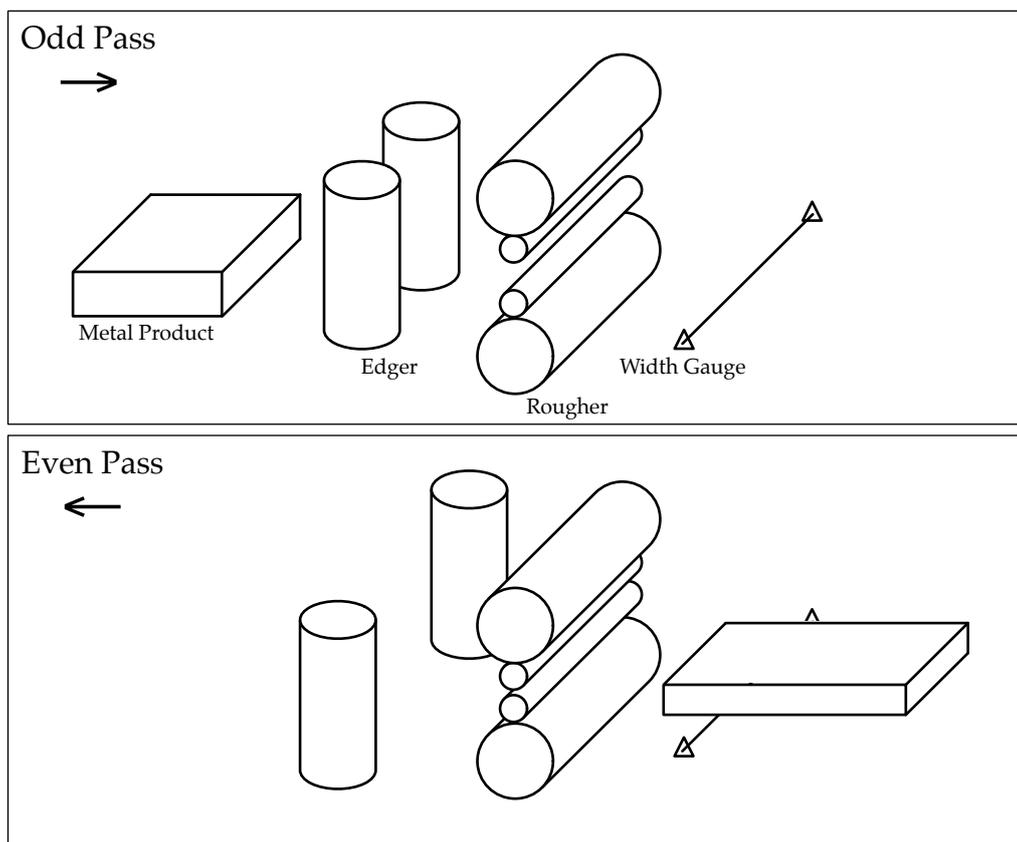


Abbildung 11: Zweistufiger Walzprozess, in dem die Breite des Werkstücks möglichst exakt vorhergesagt werden sollte.

3.5.3 GEN-3 Validierungsaspekte

Auch für die Kernanwendung des Projektes MCIOP wurden Untersuchungen zu Robustheit und Generalisierbarkeit unternommen. So wurden Anlagentypen und Modelltypen variiert. Beispielhaft zeigt sich in der Veröffentlichung [14], dass Ergebnisse der Optimierung für bestimmte Modelltypen sehr gut auf andere Modelltypen übertragen lassen. Auch gegenüber stochastischen Einflüssen sind die Methoden robust. Diese Ergebnisse wurden in [28] beschrieben.

3.6 Spezielle Arbeitspakete

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse und Stand der speziellen Arbeitspakete D (Dissertation) und K (Koordination) zusammengefasst.

CS, MT: Studien- und Abschlussarbeiten Die Projektteilnehmer haben verschiedene studentische Arbeiten im Rahmen des Projektes betreut.

Im Rahmen einer Case-Study (Studienarbeit) bearbeitete eine Gruppe des internationalen Master-Studiengangs *Automation & IT* (AIT) ein Thema zur Optimierung eines Fliehkraftstaubabscheiders unter Verwendung von Surrogatmodellen und mit Methoden der mehrkriteriellen Optimierung. Grundlage dieser Case-Study waren analytische Modelle, die den Studierenden für eine ausführliche

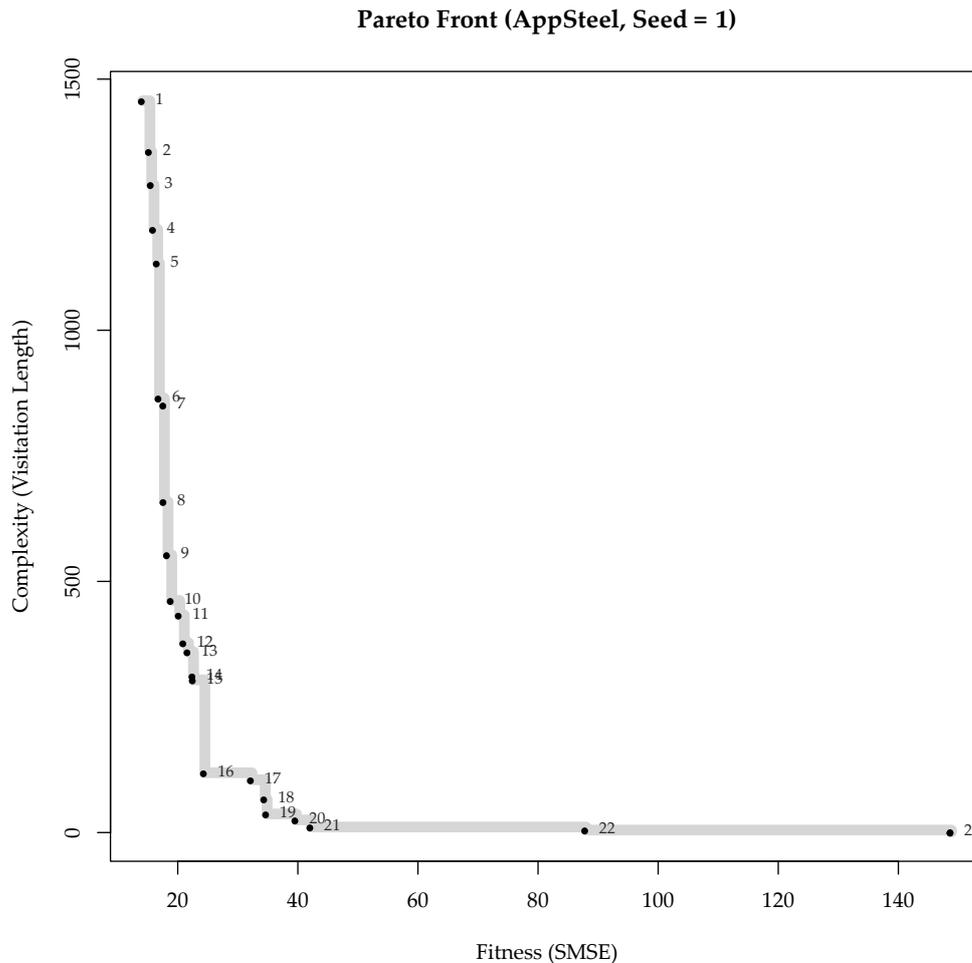


Abbildung 12: Verhältnis zwischen Modellkomplexität und -genauigkeit durch RGP erzeugten Pareto-optimalen Modelle eines Warmwalzprozesses.

Erprobung der verwendeten Modellierungs- und Optimierungsansätze dienen. Dabei wurden typische Geometrie- und Prozessparameter recherchiert. Auch wurden die mehrkriteriellen Ansätze mit einkriteriellen bzw. deterministische mit nicht-deterministischen Methoden verglichen. Hier zeigte sich, dass mehrkriterielle, modellbasierte Ansätze deutliche Verbesserungen gegenüber klassischen Ansätzen ergeben.

Eine zweite Gruppe aus dem Masterstudiengang AIT befasste sich mit ähnlichen Methoden zur Lösung der geometrischen Optimierung einer einfachen Düse als Fallbeispiel. Hier bestand die Herausforderung darin, die auf einer CFD-Simulation basierende Modellierung effizient einzusetzen, sowie die Nebenbedingungen zu berücksichtigen, die sich aus der Simulation ergeben. Wichtige Ergebnisse waren unter anderem die erfolgreiche Anbindung von SPOT an eine CFD Simulation in OpenFOAM sowie die Notwendigkeit für die Berücksichtigung von Simulationsausfällen in der modellgestützten Optimierung, da numerische Simulationen hier in bestimmten Fällen nicht konvergieren konnten. Es zeigte sich aber auch, dass SPOT mit Kriging-basierten Modellen erfolgreich zur Optimierung einer CFD Simulation eingesetzt werden kann.

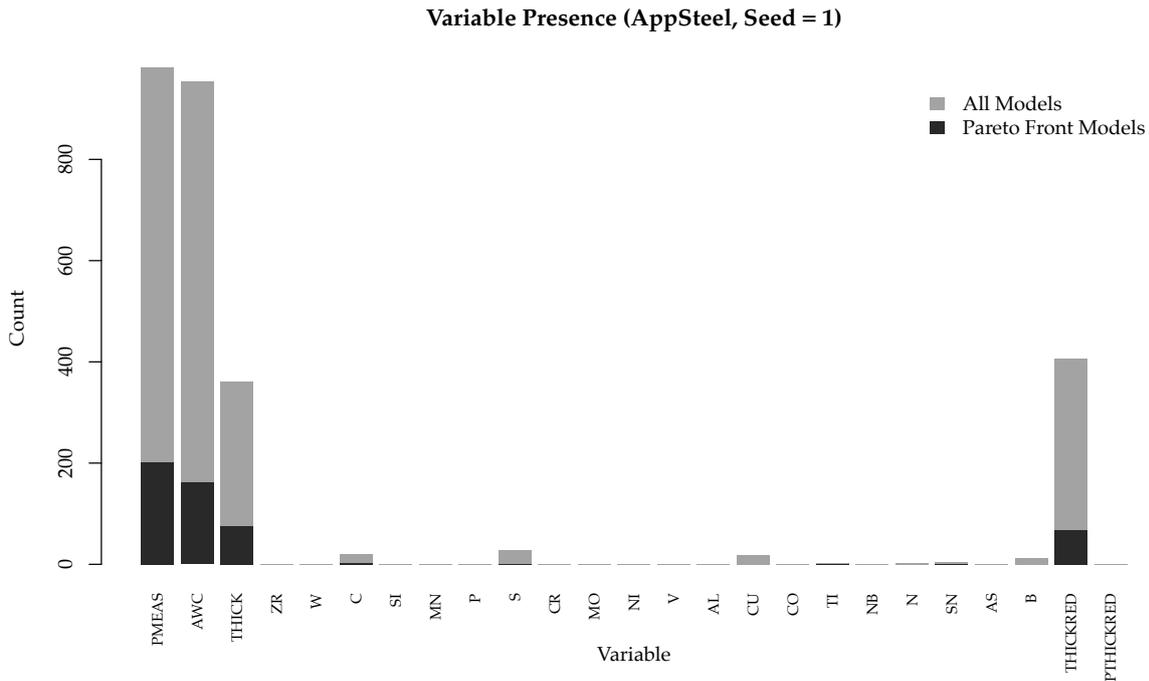


Abbildung 13: Relative Wichtigkeit der Einflussgrößen auf die Brammenweite in einem Warmwalzprozess.

Zuletzt befasste sich auch eine Gruppe mit Visualisierungstechniken. Diese sind für das Verständnis und die Analyse von Lösungen eines Optimierungsproblems von großer Bedeutung. Hierbei entstand ein weit gefasster Überblick über verschiedene Visualisierungstechniken, vor allem für hochdimensionale Such- und Zielräume. Die betrachteten Ansätze umfassten zum Beispiel Heatmaps, Parallel Coordinate Plots, Dimensional Stacking, und Scatter-Plots.

Alle weiteren geplanten Arbeiten im Rahmen von Fallstudien, Master-, oder Bachelorarbeiten wurden durch den Projektleiter und die Projektmitarbeiter übernommen.

D: Dissertation Im Rahmen der Vorhabensbeschreibung war eine Dissertation als Modul des Projektes eingeplant, die durch den für das Projekt verantwortlichen Sachbearbeiter Oliver Flasch erstellt wurde.[15] Im Verlauf des Projektes beteiligten sich zusätzlich zwei weitere Promovierende an der Bearbeitung von Themen aus dem Projekt (Beate Breiderhoff und Christian Jung). Ergebnisse und Fortschritte der Dissertationen wurden bereits erfolgreich zur Veröffentlichung bei Fachzeitschriften und Konferenzen eingereicht (siehe Abschnitt 3.7). Die Dissertation von Herrn Flasch wurde im Mai 2015 innerhalb der Projektlaufzeit erfolgreich abgeschlossen. Die Betreuung wurde durch den Projektleiter sowie von Prof. Günter Rudolph von der *TU Dortmund* durchgeführt.

K: Koordination Koordinationsaufgaben im Projekt wurden in Rahmen dieses Arbeitspakets bearbeitet. Es wurden wöchentliche Statusseminare des Projektteams abgehalten sowie regelmäßige Arbeitstreffen mit den Projektpartnern durchgeführt. Dieses Arbeitspaket ist im Gantt-Chart des Projektverlaufs separat ausgewiesen (siehe Abbildung 1).

3.7 Wissenschaftliche Publikationen

Durch die Mitarbeiter des Projektes MCIOP wurden zahlreiche Publikationen veröffentlicht. Dabei zählt Prof. Dr. Bartz-Beielstein zu den Forschern der FH Köln mit den meisten begutachteten Publikationen. Im Projektzeitraum wurden Buchbeiträge [6, 17] (im Druck: [11]), Zeitschriftenaufsätze [23, 1], Konferenzbeiträge [34, 33, 26, 30, 29, 10, 14, 28, 24, 25, 22], Technische Berichte [8, 2, 3, 32, 35, 31, 21, 20, 19, 18] und eine Dissertation [15] veröffentlicht. Mehrere eingeladene Vorträge und Tutorien [12, 4, 13, 9] und sonstige Vorträge [5] wurden im Projekt MCIOP gehalten.

Des Weiteren war der Projektleiter als Program Chair bei der Organisation der 13. Konferenz zu Parallel Problem Solving from Nature (PPSN 2014) tätig [7].

Schließlich wurden auch regelmäßige Seminare und Kolloquien durchgeführt, bei denen Doktoranden ihre Themen und Arbeitsfortschritte vorstellen konnten.² Dies unterstreicht den hohen Stellenwert der Nachwuchsförderung im Projekt und war durch den fruchtbaren gegenseitigen Austausch für die Entwicklung des Projektes von großer Bedeutung.

4 | Voraussichtlicher Nutzen

Im Projekt MCIOP konnten wichtige Meilensteine plangemäß erreicht werden und interessante wissenschaftliche Ergebnisse sowohl für die akademische Verwertung als auch für Anwendungen in der Industrie erzeugt werden. Ein detaillierter Vergleich des Projektstandes mit der ursprünglich veranschlagten Zeitplanung wurde bereits in Abschnitt 3 durchgeführt.

Fokus der Entwicklung im Projekt waren Optimierungs- und vor allem Modellierungsmethoden. Diese fanden Eingang in zwei von Projektbeteiligten entwickelten Softwaremodulen für die freie Statistik-Programmiersprache R: dem R Software Paket SPOT (Sequential Parameter Optimization Toolbox)³ und dem R Software Paket rgp (R Genetic Programming framework)⁴.

Beide Pakete sind in aktuellen Versionen frei über die Distributionsplattform CRAN verfügbar, und stehen damit direkt für andere Forscher oder Studierende zur Verfügung und können auch für andere Problemstellungen flexibel eingesetzt werden.

RGP ist ein Hauptthema der im Projekt erfolgreich abgeschlossenen Promotion „A Modular Genetic Programming System“ von Oliver Flasch[15]. Die Dissertation ist frei zum Download verfügbar und wird in der ersten Jahreshälfte 2016 zusätzlich in Buchform bei Springer erscheinen. Dadurch werden wichtige Ergebnisse des Projekts MCIOP einem breiten Publikum bekannt gemacht.

Weiterer Nutzen lässt sich bereits in verschiedenen Bereichen beobachten. Hier sind zuerst der wissenschaftliche und der wirtschaftliche Bereich zu nennen. Die im Projekt MCIOP entwickelten Methoden werden aktiv durch die Projektpartner eingesetzt.

Das in der Vorhabensbeschreibung beschriebene MCIOP-Nachwuchsteam ist in der Projektlaufzeit deutlich gewachsen. Die Arbeitsgruppe des Projektleiters (SPOTSeven) umfasst unter anderem inzwischen acht Promovierende, deren Arbeiten in einem wöchentlich durchgeführten Seminar besprochen und ausgetauscht werden. Einen aktuellen Überblick über Themen und Aktivitäten

²Siehe <http://www.spotseven.de/spot-symposia/> für eine Liste der aktuellen Vorträge.

³ Siehe: cran.r-project.org/package=SPOT

⁴ Siehe: cran.r-project.org/package=rgp

liefert deren Web-Seite www.spotseven.de. Themen aus dem Projekt MCIOP finden bereits bei drei Promotionsprojekten eine Anwendung.

Die Inhalte und Ergebnisse des Projektes wurden in mehreren Vorlesungen des Projektleiters eingesetzt. So werden Kriging und Co-Kriging Grundlagen mittlerweile in den Vorlesungen *Data Driven Modeling and Optimization* und *Advanced Process Control and Optimization* im Master-Studiengang *Automation & IT* eingeführt und durch Beispiele aus dem Projekt ergänzt.

Schließlich ergaben die Ergebnisse des Projektes auch neue Forschungs- und Entwicklungsansätze. Wie im Abschnitt 2.5 beschrieben befinden sich verschiedene Anträge in Vorbereitung, bei denen Modellierung und modellgetriebene Optimierung eine wichtige Rolle spielen. Dabei soll einerseits aus wissenschaftlicher Perspektive die Methodik weiterentwickelt werden (automatisierten Datenanalyse mit sequentieller Parameter Optimierung und Genetic Programming). Andererseits sollen (z.B. mit Anwendungsbeispielen aus der Wasserwirtschaft, Biotechnologie und Energietechnik) die Ergebnisse auf weitere praktische Anwendungsfelder ausgedehnt werden.

5 | Ergebnisse Dritter

Auch durch andere Forschergruppen wurden die Entwicklung und Anwendung von modellgestützter, mehrkriterieller Methoden vorangetrieben. Mit diesen Gruppen bestand ein enger Austausch im Rahmen von Kooperationen.

Surrogatmodelle in der mehrkriteriellen Optimierung Zum Kriterium des *Expected Improvement in Hypervolume* wurden verschiedene wichtige Ergebnisse erzielt, wie zum Beispiel theoretische Ergebnisse zu Eigenschaften oder zur exakten und effizienten Berechnung [69, 81, 80].

Modellierung und Simulation mit mehreren Hierarchieebenen Im Bereich Modellierung und Simulation mit mehreren Hierarchieebenen wurden verschiedene Arbeiten zu Co-Kriging veröffentlicht. Gratiet [78] schlägt eine rekursive Variante des Co-Kriging Ansatzes vor, die bei gleicher prädiktiver Qualität weniger komplex ist. Co-Kriging fand auch in verschiedenen Gebieten aus Forschung und Entwicklung Anwendung, wie zum Beispiel der Optimierung von Antennen [101], Mikrowellenfilter [102] und in der Aerodynamik [79].

Genetic Programming und Symbolische Regression Der Bereich Symbolische Regression und Genetic Programming wurde im Projektzeitraum durch wichtige Forschungsergebnisse weiterentwickelt. Korn [99, 100, 98] entwickelte neue Ansätze für die Erzeugung extrem genauer Modelle durch Symbolische Regression. Winkler [118] beschreibt einen innovativen Ansatz zur Erkennung von Änderungen in dynamischen Systemen durch Symbolische Regression.

Kordon [97] stellt ein hybrides Verfahren zur Zeitreihenprognose vor, welches ARIMAX und Symbolische Regression kombiniert, um kompakte und verständliche Modelle zu erzeugen, die nichtlineare Zusammenhänge erfassen können.

Affenzeller [36] gibt einen Überblick zu Methoden der Wissensgewinnung aus durch Symbolische Regression erstellte Modelle. Diese Verfahren illustrieren die Vorteile des in MCIOP verfolgten Ansatzes

der White-Box-Modellierung und zeigen weitere Nutzungsmöglichkeit der im Projekt erzeugten Ergebnisse auf.

Optimierung von Staubabscheidern Ein wichtiger Anwendungsfall im Projekt MCIOP war die Geometrie-Optimierung eines Zyklon / Fliehkraftabscheiders. In diesem Bereich befassten sich vor allem Elsayed et al. mit der einkriteriellen Optimierung unter Verwendung Neuronaler Netzwerke und Genetischer Algorithmen [68], Co-Kriging [67], sowie des sog. Adjoint Verfahrens [66]. Ein weiterer Ansatz, der auch für die Behandlung von Nebenbedingungen interessant ist, wird von Sgrott und anderen untersucht. Dabei wird eine Variante des Simplex Algorithmus, COMPLEX (CONstrained SIMPLEX) verwendet [83].

6 | Veröffentlichungen der Projektteilnehmer

- [1] BARTZ-BEIELSTEIN, T. ; BRANKE, J. ; MEHNEN, J. ; MERSMANN, O.: Evolutionary Algorithms. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 4 (2014), Nr. 3, S. 178–195
- [2] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Beyond Particular Problem Instances: How to Create Meaningful and Generalizable Results / Bibliothek der Fachhochschule Köln Bibliothek. Version: 2012. <http://opus.bsz-bw.de/fhk/volltexte/2012/27>. Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln, 2012. – Forschungsbericht. – ISBN 2194–2870
- [3] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Beyond Particular Problem Instances: How to Create Meaningful and Generalizable Results / Cologne University of Applied Sciences. 2012 (TR 03/2012). – Technical Report
- [4] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *BRAGFOST'12 Presentation: Design of Experiments and Sequential Parameter Optimization*. November 2012
- [5] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *Presentation Slides: Beyond Particular Problem Instances—How to Create Meaningful and Generalizable Results*. Talk: First Workshop on Applied Meta-Modeling, November 2012
- [6] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: How to Create Generalizable Results. In: KACPRZYK, Janusz (Hrsg.) ; PEDRYCZ, Witold (Hrsg.): *Springer Handbook of Computational Intelligence*. Springer, 2015 (in print), Kapitel 56
- [7] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas (Hrsg.) ; BRANKE, Jürgen (Hrsg.) ; FILIPIC, Bogdan (Hrsg.) ; SMITH, Jim (Hrsg.): *Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 8672: *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN XIII - 13th International Conference, Ljubljana, Slovenia, September 13-17, 2014. Proceedings*. Springer, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10762-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10762-2>
- [8] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; BRANKE, Jürgen ; MEHNEN, Jörn ; MERSMANN, Olaf: Overview: Evolutionary Algorithms / Cologne University of Applied Sciences. Cologne University of Applied Science, Faculty of Computer Science and Engineering Science, 2015 (2). – Cologne Open Science, Schriftenreihe CI-plus. – ISSN 2194–2870
- [9] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; FLASCH, Oliver ; ZAEFFERER, Martin: Sequential Parameter Optimization for Symbolic Regression. In: GUSTAFSON, Steven (Hrsg.) ; VLADISLAVLEVA, Ekaterina (Hrsg.): *GECCO 2012 Symbolic regression and modeling workshop*. Philadelphia, Pennsylvania, USA : ACM, July 2012. – ISBN 978–1–4503–1178–6, S. 495–496

- [10] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; FRIESE, Martina ; NAUJOKS, Boris ; ZAEFFERER, Martin: SPOT Applied to Non-Stochastic Optimization Problems—An Experimental Study. In: RODRIGUEZ, Katya (Hrsg.) ; BLUM, Christian (Hrsg.): *GECCO 2012 Late breaking abstracts workshop*. Philadelphia, Pennsylvania, USA : ACM, July 2012. – ISBN 978-1-4503-1178-6, S. 645–646
- [11] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; JUNG, Christian ; ZAEFFERER, Martin: Uncertainty Management Using Sequential Parameter Optimization. In: MELONI, Carlo (Hrsg.) ; DELLINO, Gabriella (Hrsg.): *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*. Springer, 2015 (in print) (Springer Series on Operations Research/Computer Science Interfaces)
- [12] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; PREUSS, Mike ; ZAEFFERER, Martin: Statistical Analysis of Optimization Algorithms with R. In: OCHOA, Gabriela (Hrsg.): *GECCO 2012 Specialized techniques and applications tutorials*. Philadelphia, Pennsylvania, USA : ACM, July 2012. – ISBN 978-1-4503-1178-6, S. 1259–1286
- [13] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; ZAEFFERER, Martin ; NAUJOKS, Boris: How to create meaningful and generalizable results. In: *Proceeding of the fifteenth annual conference companion on Genetic and evolutionary computation conference companion*. New York, NY, USA : ACM, 2013 (GECCO '13 Companion). – ISBN 978-1-4503-1964-5, 979–1004
- [14] BREIDERHOFF, Beate ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; NAUJOKS, Boris ; ZAEFFERER, Martin ; FISCHBACH, Andreas ; FLASCH, Oliver ; FRIESE, Martina ; MERSMANN, Olaf ; STORK, Jörg: Simulation and Optimization of Cyclone Dust Separators. In: HOFFMANN, Frank (Hrsg.) ; HÜLLERMEIER, Eyke (Hrsg.) ; Institut für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (Veranst.): *Proceedings 23. Workshop Computational Intelligence* Institut für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, 2013, S. 177–195
- [15] FLASCH, O.: *A Modular Genetic Programming System*, TU Dortmund, Diss., 2015. <http://hdl.handle.net/2003/34162>
- [16] FLASCH, O. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: A Framework for the Empirical Analysis of Genetic Programming System Performance. In: RIOLO, R. (Hrsg.) u. a.: *Genetic Programming Theory and Practice X*. New York : Springer, 2012 (Genetic and Evolutionary Computation Series), Kapitel 11, S. 155–169
- [17] FLASCH, O. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: A Framework for the Empirical Analysis of Genetic Programming System Performance. In: RIOLO, R. (Hrsg.) u. a.: *Genetic Programming Theory and Practice X*. New York : Springer, 5 2012 (Genetic and Evolutionary Computation Series)
- [18] FLASCH, Oliver ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Towards a Framework for the Empirical Analysis of Genetic Programming System Performance / Research Center CIOP (Computational Intelligence, Optimization and Data Mining). Version: May 2012. <http://maanvs03.gm.fh-koeln.de/webpub/CIOPReports.d/Flas12a.d/ciop0512.pdf>. Faculty of Computer Science and Engineering Science, Cologne University of Applied Sciences, Germany, May 2012 (05/12). – CIOP Technical Report. – ISSN 2191-365X
- [19] FLASCH, Oliver ; FRIESE, Martina ; VLADISLAVLEVA, Katya ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; MERSMANN, Olaf ; NAUJOKS, Boris ; STORK, Jörg ; ZAEFFERER, Martin: Comparing Ensemble-Based Forecasting Methods for Smart-Metering Data. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37192-9_18. In: ESPARCIA-ALCÁZAR, AnnaL. (Hrsg.): *Applications of Evolutionary Computation* Bd. 7835. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – DOI 10.1007/978-3-642-37192-9_18. – ISBN 978-3-642-37191-2, 172-181
- [20] FLASCH, Oliver ; FRIESE, Martina ; ZAEFFERER, Martin ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; BRANKE, Jürgen: Learning Model-Ensemble Policies with Genetic Programming / Bibliothek der Fachhochschule Köln

- Bibliothek. Version: 2015. <http://opus.bsz-bw.de/fhk/volltexte/2015/78>. Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln, 2015. – Forschungsbericht
- [21] FRIESE, M. ; STORK, J. ; GUERRA, R. R. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T. ; THAKER, S. ; FLASCH, O. ; ZAEFFERER, M.: UniFleD: Univariate Frequency-based Imputation for Time Series Data / Bibliothek der Fachhochschule Köln. Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln, Germany, 2013 (TR 05/2013). – Cologne Open Science, Schriftenreihe CI-plus
- [22] JUDT, L. ; MERSMANN, O. ; NAUJOKS, B.: Do Hypervolume Regressions hinder EMOA Performance? Surprise and Relief. In: *Evolutionary Multi-Criterion Optimization 7th International Conference, EMO*, Springer, 2013 (Lecture Notes in Computer Science 7811), S. 96–110
- [23] KOCH, P. ; BISCHL, B. ; FLASCH, O. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T. ; WEIHS, C. ; KONEN, W.: Tuning and evolution of support vector kernels. In: *Evolutionary Intelligence* 5 (2012), Nr. 3, S. 153–170. <http://dx.doi.org/10.1007/s12065-012-0073-8>. – DOI 10.1007/s12065-012-0073-8
- [24] MORITZ, Steffen ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; MERSMANN, Olaf ; ZAEFFERER, Martin ; STORK, Jörg: Does imputation work for improvement of domestic hot water usage prediction? In: *Proceedings. 24. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 27.-28. November 2014* Bd. 50, KIT Scientific Publishing, 2014, S. 205–222
- [25] STORK, Jörg ; FISCHBACH, Andreas ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; ZAEFFERER, Martin: Boosting Parameter-Tuning Efficiency with Adaptive Experimental Designs. In: HOFFMANN, Frank (Hrsg.) ; HÜLLERMEIER, Eyke (Hrsg.): *Proceedings 24. Workshop Computational Intelligence*, KIT Scientific Publishing, 2014, S. 223–235
- [26] ZAEFFERER, M. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T. ; NAUJOKS, B. ; WAGNER, T. ; EMMERICH, M.: A Case Study on Multi-Criteria Optimization of an Event Detection Software under Limited Budgets. In: PURSHOUSE, R. C. (Hrsg.) u. a.: *Evolutionary Multi-Criterion Optimization 7th International Conference, EMO*. Heidelberg : Springer, 2013 (Lecture Notes in Computer Science 7811), S. 756–770
- [27] ZAEFFERER, M. ; BREIDERHOFF, B. ; NAUJOKS, B. ; FRIESE, M. ; STORK, J. ; FISCHBACH, A. ; FLASCH, O. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: Tuning multi-objective optimization algorithms for cyclone dust separators. In: ARNOLD, D. V. (Hrsg.): *Proceedings of the 2014 conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO 2014)*. New York : ACM Press, 2014. – ISBN 978-1-4503-2662-9, S. 1223–1230
- [28] ZAEFFERER, M. ; BREIDERHOFF, B. ; NAUJOKS, B. ; FRIESE, M. ; STORK, J. ; FISCHBACH, A. ; FLASCH, O. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: Tuning Multi-Objective Optimization Algorithms for Cyclone Dust Separators. In: *Proceedings of the 2014 conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO 2014)*. New York : ACM Press, 2014
- [29] ZAEFFERER, M. ; NAUJOKS, B. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T. ; FRIESE, M. ; MERSMANN, O. ; FLASCH, Oliver: Mehrkriterielle sequentielle Parameteroptimierung für Anwendungsprobleme mit stark limitiertem Budget. In: HOFFMANN, Frank (Hrsg.) ; HÜLLERMEIER, Eyke (Hrsg.) ; Institut für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (Veranst.): *Proceedings 22. Workshop Computational Intelligence* Institut für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, 2012, S. 385–400
- [30] ZAEFFERER, Martin ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; FRIESE, Martina ; NAUJOKS, Boris ; FLASCH, Oliver: Multi-Criteria Optimization for Hard Problems under Limited Budgets. In: SOULE, Terry (Hrsg.) u. a.:

- GECCO Companion '12: Proceedings of the fourteenth international conference on Genetic and evolutionary computation conference companion*. Philadelphia, Pennsylvania, USA : ACM, July 2012. – ISBN 978–1–4503–1178–6, S. 1451–1452
- [31] ZAEFFERER, Martin ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; NAUJOKS, Boris ; WAGNER, Tobias ; EMMERIC, Michael: Model-assisted Multi-criteria Tuning of an Event Detection Software under Limited Budgets / Cologne University of Applied Sciences. 2012 (2/2012). – Schriftenreihe CIplus
- [32] ZAEFFERER, Martin ; NAUJOKS, Boris ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: A Gentle Introduction to Multi-Criteria Optimization with SPOT / Cologne University of Applied Sciences. 2013 (1/2013). – Cologne Open Science, Schriftenreihe CI-plus
- [33] ZAEFFERER, Martin ; STORK, Jörg ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Distance Measures for Permutations in Combinatorial Efficient Global Optimization. In: BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas (Hrsg.) ; BRANKE, Jürgen (Hrsg.) ; FILIPIĆ, Bogdan (Hrsg.) ; SMITH, Jim (Hrsg.): *Parallel Problem Solving from Nature–PPSN XIII* Bd. 8672, Springer, 2014, S. 373–383
- [34] ZAEFFERER, Martin ; STORK, Jörg ; FRIESE, Martina ; FISCHBACH, Andreas ; NAUJOKS, Boris ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Efficient Global Optimization for Combinatorial Problems. In: ARNOLD, Dirk V (Hrsg.): *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'14), Proceedings*, ACM, 2014, S. 871–878
- [35] ZAEFFERER, T. M. and Bartz-Beielstein ; FRIESE, M. ; NAUJOKS, B. ; FLASCH, O.: MSPOT: Multi-Criteria Sequential Parameter Optimization / CIplus. 2012 (TR 2/2012). – Forschungsbericht

7 | Veröffentlichungen Dritter

- [36] AFFENZELLER, Michael ; WINKLER, Stephan M. ; KRONBERGER, Gabriel ; KOMMENDA, Michael ; BURLACU, Bogdan ; WAGNER, Stefan: Gaining Deeper Insights in Symbolic Regression. In: RIOLO, Rick (Hrsg.) ; MOORE, Jason H. (Hrsg.) ; KOTANCHEK, Mark (Hrsg.): *Genetic Programming Theory and Practice XI*. Ann Arbor, USA : Springer, 9-11 Mai 2013 (Genetic and Evolutionary Computation), Kapitel 10, S. 175–190
- [37] BANZHAF, Wolfgang ; FRANCONI, Frank D. ; KELLER, Robert E. ; NORDIN, Peter: *Genetic programming: an introduction: on the automatic evolution of computer programs and its applications*. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998. – ISBN 1–55860–510–X
- [38] BARTZ-BEIELSTEIN, T.: *Experimental Research in Evolutionary Computation—The New Experimentalism*. Berlin : Springer, 2006 (Natural Computing Series)
- [39] BARTZ-BEIELSTEIN, T: Optimierung von Prozessvariablen beim Spritzgießen / Cologne University of Applied Sciences. 2010. – Forschungsbericht
- [40] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; CHALMERS, Alan (Hrsg.) ; COX, David. R. (Hrsg.) ; GLYMOUR, Clark (Hrsg.) ; MAYO, Deborah (Hrsg.) ; SPANOS, Aris (Hrsg.): *Neyman-Pearson Theory of Testing and Mayo's Extensions in Evolutionary Computing*. <http://www.error06.econ.vt.edu/bartzerror2006.pdf>. Version: 2006
- [41] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *Experimental Analysis of Optimization Algorithms – Problems and Perspectives (Seminar)*. Tilburg University NL, September 2007

- [42] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: How Experimental Algorithmics Can Benefit from Mayo's Extensions to Neyman-Pearson Theory of Testing. In: *Synthese* 163 (2008), Nr. 3, S. 385–396. <http://dx.doi.org/10.1007/s11229-007-9297-z>. – DOI 10.1007/s11229-007-9297-z
- [43] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Review: Design and Analysis of Simulation Experiments by Jack P.C. Kleijnen. In: *INFORMS Computing Society News* 2 (2008), Fall 2008, S. 11–14
- [44] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *Theory of Evolutionary Algorithms (eingeladene Teilnahme)*. Dagstuhl Seminar 08051, Januar 2008
- [45] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Sequential Parameter Optimization—An Annotated Bibliography / Research Center CIOP (Computational Intelligence, Optimization and Data Mining). Cologne University of Applied Science, Faculty of Computer Science and Engineering Science, April 2010 (04/10). – CIOP Technical Report. – ISSN 2191–365X
- [46] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: SPOT: An R Package For Automatic and Interactive Tuning of Optimization Algorithms by Sequential Parameter Optimization / Research Center CIOP (Computational Intelligence, Optimization and Data Mining). Version: June 2010. <http://arxiv.org/abs/1006.4645>. Cologne University of Applied Science, Faculty of Computer Science and Engineering Science, June 2010 (05/10). – CIOP Technical Report. – ISSN 2191–365X. – Comments: Related software can be downloaded from <http://cran.r-project.org/web/packages/SPOT/index.html>
- [47] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; BONGARDS, Michael ; CLAES, Christoph ; KONEN, Wolfgang ; WESTENBERGER, Hartmut: Datenanalyse und Prozessoptimierung für Kanalnetze und Kläranlagen mit CI-Methoden. In: MIKUT, R. (Hrsg.) ; REISCHL, M. (Hrsg.): *Proc. 17th Workshop Computational Intelligence*, Universitätsverlag, Karlsruhe, 2007, S. 132–138
- [48] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; KONEN, Wolfgang: Datenanalyse und Prozessoptimierung am Beispiel Kläranlagen / Cologne University of Applied Sciences. 2008. – Forschungsbericht
- [49] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; MARKON, Sandor: Tuning Search Algorithms for Real-World Applications: A Regression Tree Based Approach. In: GREENWOOD, G. W. (Hrsg.): *Proceedings 2004 Congress on Evolutionary Computation (CEC'04)*, Portland OR Bd. 1. Piscataway NJ : IEEE, 2004, S. 1111–1118
- [50] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; MARKON, Sandor ; PREUSS, Mike: Algorithm Based Validation of a Simplified Elevator Group Controller Model. In: IBARAKI, T. (Hrsg.): *Proceedings 5th Metaheuristics International Conference (MIC'03)*. Kyoto, Japan, 2003, S. 06/1–06/13 (CD-ROM)
- [51] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; PREUSS, Mike: Considerations of Budget Allocation for Sequential Parameter Optimization (SPO). In: PAQUETE, L. (Hrsg.) u. a.: *Workshop on Empirical Methods for the Analysis of Algorithms, Proceedings*. Reykjavik, Iceland, 2006, 35–40
- [52] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; PREUSS, Mike: Moderne Methoden zur experimentellen Analyse evolutionärer Verfahren. In: MIKUT, R. (Hrsg.) ; REISCHL, M. (Hrsg.): *Proc. 16th Workshop Computational Intelligence*, Universitätsverlag, Karlsruhe, 2006, S. 25–32
- [53] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; PREUSS, Mike: Experimental research in evolutionary computation. In: *Proceedings of the 2007 GECCO conference companion on Genetic and evolutionary computation*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (GECCO '07). – ISBN 978–1–59593–698–1, 3001–3020

- [54] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; PREUSS, Mike: *Experimental research in evolutionary computation – The Future of Experimental Research (Tutorium)*. Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO 2008), Atlanta, Georgia, USA, Juli 2008
- [55] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; PREUSS, Mike ; MARKON, Sandor: Validation and optimization of an elevator simulation model with modern search heuristics. Version: 2005. http://dx.doi.org/10.1007/0-387-25383-1_5. In: IBARAKI, T. (Hrsg.) ; NONOBE, K. (Hrsg.) ; YAGIURA, M. (Hrsg.): *Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2005 (Operations Research/Computer Science Interfaces). – DOI 10.1007/0-387-25383-1_5, S. 109–128
- [56] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; PREUSS, Mike ; SCHWEFEL, Hans-Paul: Model Optimization with Evolutionary Algorithms. In: LUCAS, K. (Hrsg.) ; ROOSEN, P. (Hrsg.): *Emergence, Analysis, and Evolution of Structures—Concepts and Strategies Across Disciplines*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2010, S. 47–62
- [57] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; ZIMMER, Tobias ; KONEN, Wolfgang: Parameterselektion für komplexe Modellierungsaufgaben der Wasserwirtschaft – Moderne CI-Verfahren zur Zeitreihenanalyse. In: MIKUT, R. (Hrsg.) ; REISCHL, M. (Hrsg.): *Proc. 18th Workshop Computational Intelligence*, Universitätsverlag, Karlsruhe, 2008, S. 136–150
- [58] BEIELSTEIN, Thomas ; EWALD, Claus-Peter ; MARKON, Sandor: Optimal Elevator Group Control by Evolution Strategies. In: CANTÚ-PAZ, E. (Hrsg.) u. a.: *Proceedings Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO 2003), Chicago IL, Part II* Bd. 2724. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2003 (Lecture Notes in Computer Science), 1963–1974
- [59] BEIELSTEIN, Thomas ; MARKON, Sandor: Threshold Selection, Hypothesis Tests, and DOE Methods. In: FOGEL, D. B. (Hrsg.) u. a.: *Proceedings 2002 Congress on Evolutionary Computation (CEC'02) Within Third IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'02), Honolulu HI*. Piscataway NJ : IEEE, 2002, S. 777–782
- [60] BEIELSTEIN, Thomas ; MARKON, Sandor ; PREUSS, Mike: A Parallel Approach to Elevator Optimization Based on Soft Computing. In: IBARAKI, T. (Hrsg.): *Proceedings 5th Metaheuristics International Conference (MIC'03)*. Kyoto, Japan, 2003, S. 07/1–07/11 (CD-ROM)
- [61] BEIELSTEIN, Thomas ; MEHNEN, Jörn ; SCHÖNEMANN, Lutz ; SCHWEFEL, Hans-Paul ; SURMANN, Tobias ; WEINERT, Klaus ; WIESMANN, Dirk: Design of evolutionary algorithms and applications in surface reconstruction. Version: 2003. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-05609-7_6. In: SCHWEFEL, H.-P. (Hrsg.) ; WEGENER, I. (Hrsg.) ; WEINERT, K. (Hrsg.): *Advances in Computational Intelligence—Theory and Practice*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2003. – DOI 10.1007/978-3-662-05609-7_6, S. 145–193
- [62] CASTRO, Joseph P ; GRAY, Genetha A. ; GIUNTA, Anthony A. ; HOUGH, Patricia D.: Developing a Computationally Efficient Dynamic Multilevel Hybrid Optimization Scheme using Multifidelity Model Interactions / Sandia National Laboratories. Version: 2005. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/877137-G4FP0Q/877137.pdf>. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, 2005 (SAND2005-7498). – Forschungsbericht
- [63] COELLO COELLO, C. A. ; VAN VELDHIJZEN, D. A. ; LAMONT, G. B.: *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2nd. Springer, New York, 2007

- [64] DEB, K.: *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. 1. New York NY : Wiley, 2001 (Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization)
- [65] EHRGOTT, M.: *Multicriteria Optimization*. Springer, Berlin, 2005
- [66] ELSAYED, Khairy: Design of a novel gas cyclone vortex finder using the adjoint method. In: *Separation and Purification Technology* 142 (2015), Nr. 0, 274 - 286. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.010>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.010>. – ISSN 1383–5866
- [67] ELSAYED, Khairy: Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging. In: *Powder Technology* 269 (2015), Nr. 0, 409 - 424. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.038>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.038>. – ISSN 0032–5910
- [68] ELSAYED, Khairy ; LACOR, Chris: Modeling and Pareto optimization of gas cyclone separator performance using {RBF} type artificial neural networks and genetic algorithms. In: *Powder Technology* 217 (2012), Nr. 0, 84 - 99. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.015>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.015>. – ISSN 0032–5910
- [69] EMMERICH, Michael T. M. ; DEUTZ, Andre H. ; KLINKENBERG, Jan W.: Hypervolume-based expected improvement: Monotonicity properties and exact computation. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC'11), Proceedings*. New York, NY, USA : IEEE, 2011. – ISBN 978–1–4244–7834–7, 2147–2154
- [70] EPPLE, B. (Hrsg.) ; LEITHNER, R. (Hrsg.) ; LINZER, W. (Hrsg.) ; WALTER, H. (Hrsg.): *Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen*. Springer, Wien, 2007
- [71] FLASCH, O. ; BARTZ-BEIELSTEIN, Th. ; DAVTYAN, A. ; KOCH, P ; KONEN, W. ; OYETOYAN, T.D. ; TAMUTAN, M.: Comparing SPO-tuned GP and NARX prediction models for stormwater tank fill level prediction. In: FOGEL, Gary et a. (Hrsg.): *Proc. IEEE Congress Evolutionary Computation (CEC)*, 2010, S. 1579–1586
- [72] FLASCH, Oliver ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; DAVTYAN, Artur ; KOCH, Patrick ; KONEN, Wolfgang ; OYETOYAN, Tosin D. ; TAMUTAN, Michael: Comparing CI Methods for Prediction Models in Environmental Engineering. In: FOGEL, G et a. (Hrsg.): *Proc. 2010 Congress on Evolutionary Computation ({CEC}'10) within {IEEE} World Congress on Computational Intelligence ({WCCI}'10), Barcelona, Spain*. Piscataway NJ : IEEE Press, 2010
- [73] FLASCH, Oliver ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; KOCH, Patrick ; KONEN, Wolfgang: Genetic Programming Applied to Predictive Control in Environmental Engineering. In: HOFFMANN, Frank (Hrsg.) ; HÜLLERMEIER, Eyke (Hrsg.): *Proceedings 19. Workshop Computational Intelligence*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2009, S. 101–113
- [74] FORRESTER, A. ; SOBESTER, A. ; KEANE, A.: *Engineering Design via Surrogate Modelling*. 1st. Chichester, U.K. : Wiley, 2008
- [75] FORRESTER, Alexander ; SÓBESTER, András ; KEANE, Andy: Multi-fidelity optimization via surrogate modelling. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* 463 (2007), Nr. 2088, S. 3251–3269. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2007.1900>. – DOI 10.1098/rspa.2007.1900

- [76] GORISSEN, D. ; CROMBECQ, K. ; COUCKUYT, I. ; DHAENE, T. ; DEMEESTER, P.: A Surrogate Modeling and Adaptive Sampling Toolbox for Computer Based Design. In: *Journal of Machine Learning Research* 11 (2011), 2051-2055. <http://www.jmlr.org/papers/volume11/gorissen10a/gorissen10a.pdf>
- [77] GORISSEN, Dirk: *Grid-Enabled Adaptive Surrogate Modeling for Computer Aided Engineering*, Engineering Sciences, speciality Computer Science, Ghent University, Belgium, Diss., 2010
- [78] GRATIET, Loic L.: Recursive co-kriging model for Design of Computer experiments with multiple levels of fidelity with an application to hydrodynamic. In: *arXiv preprint arXiv:1210.0686* (2012)
- [79] HUANG, Likeng ; GAO, Zhenghong ; ZHANG, Dehu: Research on multi-fidelity aerodynamic optimization methods. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 26 (2013), Nr. 2, 279 - 286. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2013.02.004>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2013.02.004>. – ISSN 1000–9361
- [80] HUPKENS, Iris ; DEUTZ, Andre ; YANG, Kaifeng ; EMMERICH, Michael: Faster Exact Algorithms for Computing Expected Hypervolume Improvement. In: GASPARGUNHA, Antonio (Hrsg.) ; HENGGELE ANTUNES, Carlos (Hrsg.) ; COELLO, Carlos C. (Hrsg.): *Evolutionary Multi-Criterion Optimization* Bd. 9019. Springer International Publishing, 2015. – ISBN 978–3–319–15891–4, S. 65–79
- [81] HUPKENS, Iris ; EMMERICH, Michael T. M. ; DEUTZ, André H.: Faster Computation of Expected Hypervolume Improvement. In: *CoRR* abs/1408.7114 (2014). <http://arxiv.org/abs/1408.7114>
- [82] JONES, D.R. ; SCHONLAU, M. ; WELCH, W.J.: Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions. In: *Journal of Global Optimization* 13 (1998), S. 455–492
- [83] JR., Oscar L. S. ; NORILER, Dirceu ; WIGGERS, Vinicyus R. ; MEIER, Henry F: Cyclone optimization by {COMPLEX} method and {CFD} simulation. In: *Powder Technology* 277 (2015), Nr. 0, 11 - 21. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.039>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.039>. – ISSN 0032–5910
- [84] KAMPOLIS, I. C. ; ZYMARIS, A. S. ; ASOUTI, V. G. ; GIANNAKOGLU, K. C.: Multilevel Optimization Strategies Based on Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithms, for Computationally Expensive Problems. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007)*, IEEE Press, Piscataway, NJ, 2007, S. 4116 – 4123
- [85] KARAKASIS, M. K. ; GIANNAKOGLU, K. C. ; KOUBOGIANNIS, D. G.: Aerodynamic Design of Compressor Airfoils using Hierarchical, Distributed, Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithms. In: *Numerical Methods in Fluids* 53 (2007), Nr. 3, S. 455–469
- [86] KLEIJNEN, J. P. C.: *Statistical Tools for Simulation Practitioners*. New York NY : Marcel Dekker, 1987
- [87] KLEIJNEN, J. P. C.: *Design and analysis of simulation experiments*. New York NY : Springer, 2008
- [88] KNOWLES, Joshua D. ; NAKAYAMA, Hirotaka: Meta-Modeling in Multiobjective Optimization. In: *Multiobjective Optimization*, Springer, 2008, 245-284
- [89] KOCH, P ; KONEN, W. ; HEIN, K.: Gesture Recognition on Few Training Data using Slow Feature Analysis and Parametric Bootstrap. In: *2010 International Joint Conference on Neural Networks*, 2010

- [90] KOCH, Patrick ; KONEN, Wolfgang ; FLASCH, Oliver ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Optimization of Support Vector Regression Models for Stormwater Prediction. In: HOFFMANN, F. (Hrsg.) ; HÜLLERMEIER, E. (Hrsg.): *Proceedings 20. Workshop Computational Intelligence*, Universitätsverlag Karlsruhe, 2010, S. 146–160
- [91] KOCH, Patrick ; KONEN, Wolfgang ; FLASCH, Oliver ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Optimizing Support Vector Machines for Stormwater Prediction. In: BARTZ-BEIELSTEIN, T. (Hrsg.) ; CHIARANDINI, M. (Hrsg.) ; PAQUETE, L. (Hrsg.) ; PREUSS, M. (Hrsg.): *Proceedings of Workshop on Experimental Methods for the Assessment of Computational Systems joint to PPSN2010*. TU Dortmund, 2010 (TR10-2-007), 47–59
- [92] KONEN, W. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: Internationaler DATA-MINING-CUP (DMC) mit studentischer Beteiligung des Campus Gummersbach / FH Köln. 2008. – Forschungsbericht
- [93] KONEN, W. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T. ; WESTENBERGER, H.: Computational Intelligence und Data Mining – Datenanalyse und Prozessoptimierung am Beispiel Kläranlagen / FH Köln. 2007. – Forschungsbericht
- [94] KONEN, W. ; ZIMMER, T. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: Optimized Modelling of Fill Levels in Stormwater Tanks Using CI-based Parameter Selection Schemes (in german). In: *at-Automatisierungstechnik* 57 (2009), Nr. 3, S. 155–166. <http://dx.doi.org/10.1524/auto.2009.0756>. – DOI 10.1524/auto.2009.0756
- [95] KORDON, Arthur: Evolutionary computation at Dow Chemical. In: *SIGEVolution* 1 (2006), Nr. 3, S. 4–9. <http://dx.doi.org/http://doi.acm.org/10.1145/1181964.1181965>. – DOI <http://doi.acm.org/10.1145/1181964.1181965>
- [96] KORDON, Arthur K.: *Applying Computational Intelligence—How to Create Value*. Springer, 2010 <http://www.springer.com/engineering/book/978-3-540-69910-1>
- [97] KORDON, Arthur K.: Applying Genetic Programming in Business Forecasting. In: RIOLO, Rick (Hrsg.) ; MOORE, Jason H. (Hrsg.) ; KOTANCHEK, Mark (Hrsg.): *Genetic Programming Theory and Practice XI*. Ann Arbor, USA : Springer, 9-11 Mai 2013 (Genetic and Evolutionary Computation), Kapitel 6, S. 101–117
- [98] KORNS, Michael: Highly Accurate Symbolic Regression with Noisy Training Data. In: RIOLO, Rick (Hrsg.) ; WORZEL, William P. (Hrsg.) ; GROSCURTH, Kala (Hrsg.): *Genetic Programming Theory and Practice XIII*. Ann Arbor, USA : Springer, Mai 2015 (Genetic and Evolutionary Computation). – Forthcomming
- [99] KORNS, Michael F.: Extreme Accuracy in Symbolic Regression. In: RIOLO, Rick (Hrsg.) ; MOORE, Jason H. (Hrsg.) ; KOTANCHEK, Mark (Hrsg.): *Genetic Programming Theory and Practice XI*. Ann Arbor, USA : Springer, 9-11 Mai 2013 (Genetic and Evolutionary Computation), Kapitel 1, S. 1–30
- [100] KORNS, Michael F.: Extremely Accurate Symbolic Regression for Large Feature Problems. In: RIOLO, Rick (Hrsg.) ; WORZEL, William P. (Hrsg.) ; KOTANCHEK, Mark (Hrsg.): *Genetic Programming Theory and Practice XII*. Ann Arbor, USA : Springer, 8-10 Mai 2014 (Genetic and Evolutionary Computation), S. 109–131
- [101] KOZIEL, S. ; OGURTSOV, S. ; COUCKUYT, I. ; DHAENE, T.: Efficient simulation-driven design optimization of antennas using co-kriging. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2012 IEEE*, 2012. – ISSN 1522–3965, S. 1–2
- [102] KOZIEL, Slawomir ; LEIFSSON, Leifur ; COUCKUYT, Ivo ; DHAENE, Tom: Robust variable-fidelity optimization of microwave filters using co-Kriging and trust regions. In: *Microwave and Optical Technology Letters* 55 (2013), Nr. 4, 765–769. <http://dx.doi.org/10.1002/mop.27447>. – DOI 10.1002/mop.27447. – ISSN 1098–2760

- [103] LAW, A. M.: *Simulation Modeling and Analysis*. 4. McGraw-Hill, 2007
- [104] LIM, D. ; JIN, Y. ; ONG, Y.-S. ; SENDHOFF, B.: Generalizing Surrogate-assisted Evolutionary Computation. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 14 (2010), Nr. 3, S. 329–355
- [105] LÖFFLER, F.: *Staubabscheiden*. Thieme, 1998
- [106] MARKON, Sandor ; ARNOLD, Dirk V. ; BÄCK, Thomas ; BEIELSTEIN, Thomas ; BEYER, Hans-Georg: Thresholding—A selection operator for noisy ES. In: KIM, J.-H. (Hrsg.) ; ZHANG, B.-T. (Hrsg.) ; FOGEL, G. (Hrsg.) ; KUSCU, I. (Hrsg.): *Proceedings 2001 Congress on Evolutionary Computation (CEC'01)*, Seoul. Piscataway NJ : IEEE, 2001, S. 465–472
- [107] MARKON, Sandor (Hrsg.) ; KITA, Hajime (Hrsg.) ; KISE, Hiroshi (Hrsg.) ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas (Hrsg.): *Modern Supervisory and Optimal Control with Applications in the Control of Passenger Traffic Systems in Buildings*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006
- [108] MEHNEN, Jörn ; MICHELITSCH, Thomas ; LASARCZYK, Christian ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Multi-objective evolutionary design of mold temperature control using DACE for parameter optimization. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 25 (2007), Nr. 1–4, 661–667. <http://iospress.metapress.com/content/751K5GG10P79Q501>
- [109] MIETTINEN, K.: *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999
- [110] MONTGOMERY, D. C.: *Design and Analysis of Experiments*. 5th. New York NY : Wiley, 2001
- [111] POLI, R. ; LANGDON, W. B. ; MCPHEE, N. F.: *A Field Guide to Genetic Programming*. <http://lulu.com> (retrieved 20.02.2015), 2008. – ISBN 978–1–4092–0073–4. – (With contributions by J. R. Koza)
- [112] SALTELLI, A. (Hrsg.): *Sensitivity Analysis*. Chichester, U.K. : Wiley, 2000
- [113] SALTELLI, A. ; RATTO, M. ; ANDRES, T. ; CAMPOLONGO, F. ; CARIBONI, J. ; GATELLI, D. ; SAISANA, M. ; TARANTOLA, S.: *Global Sensitivity Analysis*. Wiley, 2008
- [114] SMITS, G. ; VLADISLAVLEVA, E.: Ordinal Pareto Genetic Programming. In: YEN, Gary G. (Hrsg.) u. a.: *Proceedings of the 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2006)*. Piscataway, NJ : IEEE Press, 7 2006, S. 3114–3120
- [115] STRAUSS, Karl: *Kraftwerkstechnik*. Springer-Verlag Berlin, 2009
- [116] VLADISLAVLEVA, Ekaterina: *Model-based Problem Solving through Symbolic Regression via Pareto Genetic Programming*, Tilburg University, Diss., 2008
- [117] WEINERT, Klaus ; MEHNEN, Jörn ; MICHELITSCH, Thomas ; SCHMITT, Karlheinz ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: A Multiobjective Approach to Optimize Temperature Control Systems of Molding Tools. In: *Production Engineering Research and Development, Annals of the German Academic Society for Production Engineering XI* (2004), Nr. 1, S. 77–80
- [118] WINKLER, Stephan M. ; AFFENZELLER, Michael ; KRONBERGER, Gabriel ; KOMMENDA, Michael ; BURLACU, Bogdan ; WAGNER, Stefan: Sliding Window Symbolic Regression for Detecting Changes of System Dynamics. In: RIOLO, Rick (Hrsg.) ; WORZEL, William P. (Hrsg.) ; KOTANCHEK, Mark (Hrsg.): *Genetic Programming Theory and Practice XII*. Ann Arbor, USA : Springer, 8-10 Mai 2014 (Genetic and Evolutionary Computation), S. 91–107

- [119] ZHOU, Z. Z. ; ONG, Y. S. ; NAIR, P. B. ; KEANE, A. J. ; LUM, K. Y.: Combining Global and Local Surrogate Models to Accelerate Evolutionary Optimization. In: *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics - Part C 37* (2007), Nr. 1, S. 66–76
- [120] ZIEGENHIRT, Jörg ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; FLASCH, Oliver ; KONEN, Wolfgang ; ZAEFFERER, Martin: Optimization of Biogas Production with Computational Intelligence—A Comparative Study. In: FOGEL, Gary et a. (Hrsg.): *Proc. 2010 Congress on Evolutionary Computation (CEC'10) within IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'10), Barcelona, Spain*. Piscataway NJ : IEEE Press, 2010, S. 3606–3613

Abkürzungsverzeichnis

CI	Computational Intelligence
DoE	Design of Experiments
GP	Genetic Programming
HDMAEA	Hierarchical, distributed metamodel-assisted evolutionary algorithm
HMO	Hierarchische Mehrkriterielle Optimierung
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
MGP	Multi-objective Genetic Programming
NN	Neuronal Networks
RGP	R-based Genetic Programming Framework
SPO	Sequentielle Parameteroptimierung
SPOT	Sequential Parameter Optimization Toolbox
STEPS	Sustainable Technologies and Computational Services for Environmental and Production Processes
SUMO	SURrogateMODELing Lab
SVM	Support Vector Machines

Ciplus
Band 6/2015

MCIOP - Mehrkriterielle CI-basierte Optimierungsverfahren für den industriellen Einsatz

Schlussbericht
Förderkennzeichen 17N0311
Förderlinie IngenieurNachwuchs 2011
im Rahmen des Programms „Forschung an Fachhochschulen“

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein
Institut für Informatik
Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften
Technische Hochschule Köln

Dezember 2015

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt beim Autor.

Technology
Arts Sciences
TH Köln