

CIMO

CI-basierte mehrkriterielle Optimierungsverfahren für Anwendungen in der Industrie

(Förderkennzeichen 17002X11)

Schlussbericht

Förderlinie „FHprofUnt“ 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	13
3	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	14
3.1	Modul DASY „Datenerfassung und Systematisierung“	14
3.1.1	DASY-1 Datenerfassung und Anpassung für Daten aus der Energiewirtschaft	14
3.1.2	DASY-2 Validierung von Parametereinstellungen mit CFD	16
3.1.3	DASY-3 Planung weiterer Experimente	17
3.2	Modul 2 „Anlagenoptimierung“	17
3.2.1	AO-1 Hierarchische Mehrkriterielle Optimierung	17
3.2.2	AO-2 Anbindung der Multikriteriellen Optimierung an SPO	17
3.2.3	AO-3 Experimente und Studien mit den neu entwickelten Verfahren	19
3.2.4	AO-4 Auswertung und Validierung beim Anwender	19
3.3	Modul 3 „Erweiterte Modellbildung mit Kriging“	19
3.3.1	EMB-1 Informationsaustausch zur multikriteriellen Prozessoptimierung für die Industrie	20
3.3.2	EMBK-1 Implementierung von Kriging-Modellen	20
3.3.3	EMBK-2 Kriging für Hierarchische Optimierungsansätze	22
3.3.4	EMBK-3 Anwendung	23
3.3.5	EMBK-4 Surrogat-Modellierung strukturierter Daten	25
3.4	Modul 4 „Restriktionsbehandlung“	25

1 Allgemeines

3.4.1	RESTR-1 Restriktionsbehandlung	25
3.4.2	RESTR-2 Restriktionen und Surrogatmodellierung	26
3.4.3	RESTR-3 Validierung der Restriktionsbehandlungsmethoden für die Surrogatmodellierung	27
3.5	Modul 5 „Generalisierbarkeit“	27
3.5.1	GEN-1 Weitere Anwendungen und Partner	27
3.5.2	GEN-2 Integration DataModeler	28
3.5.3	GEN-3 Validierungsaspekte	28
3.6	Spezielle Arbeitspakete	29
3.7	Wissenschaftliche Publikationen	30
4	Voraussichtlicher Nutzen	31
5	Ergebnisse Dritter	32
6	Veröffentlichungen der Projektteilnehmer	33
7	Veröffentlichungen Dritter	36
	Abkürzungsverzeichnis	46

1 | Allgemeines

Dieser Schlussbericht beschreibt die im Projekt „CI-basierte mehrkriterielle Optimierungsverfahren für Anwendungen in der Industrie“ (CIMO) im Zeitraum von November 2011 bis einschließlich Oktober 2014 erzielten Ergebnisse.

Zuwendungsempfänger	Institut für Informatik, Fakultät Informatik und Ingenieurwissenschaften, Fachhochschule Köln
Projektleiter	Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein
Förderkennzeichen	17002X11
Vorhabensbezeichnung	CI-basierte mehrkriterielle Optimierungsverfahren für Anwendungen in der Industrie (CIMO)
Laufzeit des Vorhabens	11/2011 – 10/2014
Berichtszeitraum	11/2011 – 10/2014
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 CIMO. Abschnitt 3 beschreibt die erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse. Abschnitt 4 vergleicht den aktuellen Stand des Vorhabens 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

Das Projekt CIMO befasste sich mit der Entwicklung von Verfahren aus der *computational intelligence* (CI) für den industriellen Einsatz. Hierbei lag der Schwerpunkt auf hierarchischen, mehrkriteriellen Optimierungsverfahren unter der Verwendung datengetriebener Surrogatmodelle. Die Berücksichtigung verschiedener Zielkriterien ermöglicht die gleichzeitige Optimierung konfliktärer Zielsetzungen wie z.B. die Minimierung der Betriebskosten bei gleichzeitiger Minimierung der Schadstoffemissionen.

Am Beispiel von Kohlekraftwerken lässt sich schnell zeigen, dass bei der Optimierung selten nur ein Ziel im Vordergrund steht. Vielmehr sind häufig verschiedene Ziele wichtig, wie zum Beispiel die Reduzierung von Umweltschadstoffen, die Verbesserung der Energieeffizienz oder die Verringerung von Betriebs- und Wartungskosten. Um derartig verschiedene Ziele zu integrieren, sind mehrkriterielle Verfahren, vor allem aus dem Bereich der mehrkriteriellen evolutionären Algorithmen, von Nutzen. Diese Verfahren können auch bei sehr komplexen Zusammenhängen und Aufgabenstellungen Verbesserungen finden. Typisch für diese Verfahren ist, dass sie häufig eine sehr große Anzahl von Auswertungen (d.h., Simulationen, Experimente) benötigen.

Im industriellen Einsatz kann es allerdings häufig sehr teuer oder zeitaufwändig sein, entweder aufwendige Experimente oder komplexe Simulationen für die Optimierung einzusetzen. Zur Zeit- und Kostenreduktion soll die Optimierung daher mit Hilfe von Surrogat-Modellen erfolgen, die abgestuft mit weniger aufwändigen, ungenauen Simulationen und aufwändigeren aber genaueren Simulationen zum Einsatz kommen.

Bei der Anlagenplanung und während des Betriebs können durch eine mehrkriterielle Optimierung unterschiedliche Zielgrößen gleichzeitig berücksichtigt werden. Moderne datengetriebene Modelle können zudem Daten verschieden genauer und aufwändiger Simulationen integrieren und für die Verbesserung der Modellierung nutzen. Das resultierende, neue Verfahren wird als *hierarchische mehrkriterielle Optimierung* bezeichnet.

Die Entwicklung und Verknüpfung der folgenden Methoden stand im Fokus des Projekts CIMO:

- Datengetriebene Modellierungsansätze, die bereits mit wenigen Datenpunkten aus einer genauen aber aufwändigen Simulation hinreichend repräsentative Modelle erstellen können. Hierbei kommen *computational fluid dynamics* (CFD) Simulationen zum Einsatz.
- Einbindung von Daten verschiedener Hierarchieebenen (CFD, analytische Modelle, datengetriebene Modelle) in den Modellierungs- und Optimierungsprozess.
- Mehrkriterielle Optimierungsverfahren für die Verknüpfung verschiedener Optimierungsziele.

Derartige Methoden sind in vielen Bereichen der industriellen Anwendung von großer Bedeutung. Sie kommen überall zum Einsatz, wo Prozess- oder Produktqualität mit verschiedenen Kriterien messbar oder simulativ beschrieben werden können und die Ermittlung der Qualität teuer oder zeitaufwändig ist. In der Anwendung konzentrierte sich das Projekt auf die Optimierung eines Zyklons (Fliehkraftabscheiders), der zum Beispiel in Kohlekraftwerken die Staubanteile aus Gasgemischen filtert. Grundlage für die Optimierung waren vor allem analytische Modelle, die durch ihre geringe

rechnerische Komplexität ausführliche Experimente erlaubten. Aufwändigere, teurere Experimente wurden beispielhaft in anderen praktischen Anwendungsgebieten durchgeführt.

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* wurden intensive Gespräche zur Entwicklung und Anwendungsfähigkeit der Verfahren geführt.

2.2 Voraussetzungen

Das Projekt CIMO hatte eine Gesamtlaufzeit von 3 Jahren (01.11.2011 bis zum 31.10.2014) und wurde mit einer bewilligten Gesamtsumme von 255.867,00€ (exklusive 10% Projektpauschale) gefördert. Davon entfielen

226.156,00€ auf Personalausgaben,

18.545,00€ auf sächliche Verwaltungsausgaben und

11.166,00€ auf Gegenstände über 410 Euro (Investitionen).

Inklusive der Projektpauschale von 10% betrug die bewilligte Fördersumme also 281.453,70€. Die nachgewiesenen Kosten umfassten 219.533,73€.

Durchgeführt wurde das Projekt am Institut für Informatik an der Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften am Campus Gumpertsbach der Fachhochschule Köln. An dieser Fakultät hat der Projektleiter Prof. 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 2000–2006 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. 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 eingesetzt¹ (Siehe [47] für eine Zusammenstellung zugehöriger Veröffentlichungen). SPO stützt sich auf Methoden des experimentellen Designs, Statistik, Datenanalyse und Optimierung. Prof. Bartz-Beielstein leitete zudem das Projekt FIWA "Methoden der Computational Intelligence für Vorhersagemodelle in der Finanz- und Wasserwirtschaft", das Ende 2012 abgeschlossen wurde. FIWA befasste sich unter anderem auch mit GP und SPO, allerdings im Zusammenhang der Verbesserung von Vorhersagemodellen und weniger mit der Optimierung technischer Zusammenhänge. 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 Prof. Dr. Horst Stenzel an Aufgaben aus dem Bereich CI. Ziel dieser Zusammenarbeit ist die Vernetzung und bessere Sichtbarkeit

¹SPO ist in Form des open-source Pakets Sequential Parameter Optimization Toolbox (SPOT) frei verfügbar. Siehe auch www.cran.r-project.org/package=SPOT

der Fachdisziplinen Optimierung, Simulation, Modellierung, 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. Weitere Forschungsthemen, die in dieser Arbeitsgruppe behandelt werden, stammen aus den Bereichen DoE, Simulation und Optimierung.

Ab Projektbeginn stand Herr M. Eng. Martin Zaefferer dem Projekt als erst als wissenschaftliche Hilfskraft und dann als hauptverantwortlicher Sachbearbeiter und Promovierender zur Verfügung. Des Weiteren standen Dr. Katya Vladislavleva und die Promovierenden Beate Breiderhoff und Christian Jung dem Projekt zeitweise in Teilzeit zu Verfügung. Die durchgeführten Promotionen werden 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 zu Verfügung und forscht an CI-Verfahren zur Optimierung.

Um den fachlichen Austausch im Bereich CI zu unterstützen, findet innerhalb der Arbeitsgruppe SPOTSeven wöchentlich ein Doktorandenseminar statt. An dem Seminar nehmen momentan acht Doktorandinnen und Doktoranden 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 Promovenden 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 Herzstück 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. Die Kernkomponente im Bereich Kraftwerkstechnik ist der Dampferzeuger mit seinen Hauptsystemen. 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 somit umfassende fachliche Kenntnisse und Beratung zu Verfügung, sowie Daten und Prozesswissen für die bearbeiteten Problemstellungen. Auch stand sie für die Betreuung von Abschlussarbeiten zu Verfügung. Die gesamte Betreuungs- und Beratungsleistungen umfassten 20 vierstündige Sitzungen mit zwei Beratern pro Jahr, entsprechend einem Gegenwert von mehr als 60 T€.

Eine sehr enge Zusammenarbeit bestand auch mit der Arbeitsgruppe von Herrn Professor Günter Rudolph der *TU Dortmund*. Dieser bereits langjährig und erfolgreich bestehende Austausch spiegelt sich vor allem in der Betreuung der im Projekt verwurzelten Dissertationen wider.

Als weitere Partner standen Projekt die *Evolved Analytics LLC*, *Universiteit Gent*, *Universiteit Leiden* und *Universiteit 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 CIMO dar.

2.3 Planung und Ablauf

Das Projekt wurde in Module mit insgesamt 18 Kern-Arbeitspaketen aufgeteilt, die im Gantt-Chart in Abbildung 1 dargestellt sind. Am Ende jeden Semesters wurde intern kontrolliert, ob die definierten Ziele erreicht wurden. Neben diesen projektbegleitenden Kontrollen wurden fünf Meilensteine (MS-1 bis MS-5) definiert. Für die Arbeitspakete wurden die folgenden Bezeichnungen verwendet: **DASY**: Datenerfassung und Systematisierung, **EMB**: Erweiterte Modellbildung, **AO**: Anlagenoptimierung, **EMBK**: Erweiterte Modellbildung mit Kriging, **RESTR**: Restriktionsbehandlung, **GEN**: Generalisierbarkeit, **MT**: Master-Theses, **CS**: Case-Study.

Ein ursprünglich geplanter Meilenstein zur Abnahme eines GP Systems wurde aus dem Arbeitsplan entfernt, da die Surrogatmodellierung sich im Verlaufe des Projektes hier vor allem mit Modellierungsverfahren wie Kriging beschäftigte. Die entsprechenden Arbeitspakete EMB-2 bis EMB-4 wurden durch EMBK-1 bis EMBK-3 ersetzt.

MS-1: Datenerhebung Mit diesem Meilenstein wurde die Vollständigkeit der bislang erfolgten Datenerhebung überprüft. Zu diesem Zeitpunkt gab es noch deutliche Verzögerung in den zugeordneten Arbeitspaketen, vor allem DASY-1. Dieses Paket schloss dementsprechend erst später ab. Grund für die Verzögerung 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 mehrkriterielle Optimierung im weiteren Verlauf in den Mittelpunkt gerückt.

MS-2: Daten systematisiert Mit diesem planmäßig erreichten Meilenstein wurde überprüft, ob die Schnittstellen für die Daten aus der Energiewirtschaft korrekt spezifiziert wurden, so dass Modellierungsverfahren und Tests im Projektrahmen problemlos ausgeführt werden konnten.

MS-3: Abnahme Restriktionsbehandlung für Surrogat-Modelle Ursprünglich sollte dieser Meilenstein sicher stellen, dass die in Arbeitspaket MB-1 entwickelten Surrogat-Modelle korrekt implementiert wurden, sodass eine Freigabe dieser Funktionalität für die Validierung im Arbeitspaket MB-2 erfolgen kann. Dies konnte frühzeitig erfolgen. Allerdings wurde in Beratungsgesprächen mit dem Projektpartner *Steinmüller Engineering GmbH* deutlich, dass die Behandlung von Restriktionen im Zusammenhang mit Surrogatmodellen von größerer Bedeutung ist. Deshalb wurden die zusätzlichen Arbeitspakete RESTR-1, RESTR-2 und RESTR-3 eingeführt.

MS-4: Abnahme hierarchische mehrkriterielle Optimierung Für die modellgestützte hierarchische Optimierung wurden in den EMBK Arbeitspaketen die notwendigen Modelle (vor allem auf Kriging

Tabelle 1: Übersicht der Partnerbeiträge für das Projekt CIMO.

Projektpartner	Beiträge
<i>FH Köln</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur hierarchischen mehrkriteriellen Optimierung • Koordination des Projekts CIMO • Betreuung studentischer Case-Studies, Bachelor- und Masterarbeiten • Durchführung des Promotionsvorhabens
<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 Surrogat-Modelle • Durchführung von Experimenten an realen Anlagen zur Validierung der im Projekt erzeugten Surrogat-Modelle • Analyse und Beurteilung der Qualität der erzeugten Surrogat-Modelle • 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 Promotion eines Projektmitarbeiters • 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 die prototypische Implementierung von Elementen der hierarchischen mehrkriteriellen Optimierung • 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 • Experimentelle Analyse der im Projekt entwickelten Algorithmen 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 die Surrogat-Modelle • Bereitstellung und Support der Software SUMO für die Analyse von Surrogat-Modellen
<i>Universiteit van Tilburg</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Lieferung von Know-How für das Design und die Analyse experimenteller Simulationen

beruhende Verfahren) eingeführt. Die notwendigen Optimierungsmethoden wurden erfolgreich in den entsprechenden Paketen (AO) entwickelt und in verschiedenen Anwendungen getestet.

MS-5: Abnahme Steinmueller In mehreren Treffen mit *Steinmüller Engineering GmbH* wurden Stand und Ergebnisse des Projektes diskutiert. Ein wichtiges Ergebnis sind hierbei Planungen, welche die in CIMO bearbeiteten Themen für Folgeprojekte zusammen mit *Steinmüller Engineering GmbH* vorbereiten.

2.4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Die im Projekt CIMO behandelten Aufgabenstellungen erfordern Methoden aus den Bereichen Dataming (Regression) sowie Optimierung (Evolutionäre Algorithmen, mehrkriteriell). Der Schwerpunkt des Projektes CIMO 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 Kordon [114] beschreibt umfassend Erfahrungen im Umgang mit komplexen Daten. Er 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 konnte gezeigt werden, dass schlussendlich der Prozess durch vier Eingabegrößen ausreichend genau beschrieben wird.

Für die im Projekt CIMO geplante Vorgehensweise können Empfehlungen aus dem Bereich der experimentellen Versuchsplanung herangezogen werden. [134] stellt hierfür eine gute Referenz dar. Des Weiteren sind hier auch die Arbeiten von Jack. P.C. Kleijnen zu nennen, wie z.B. [105].

Eine gute Referenz zum Einstieg in die Kraftwerkstechnik stellt [146] dar. Vertiefend behandelt wird der heute 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 [122] 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. Während die Emissionen kontinuierlich gemessen werden können und sollten, kann man bei den Einflussgrößen diesbezüglich weitere Kategorisierungen vornehmen. So sind Daten, die zum Beispiel die Geometrie beschreiben, für eine Anlage konstant, während sich die Brennstoffzusammensetzung in Zeitschritten 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

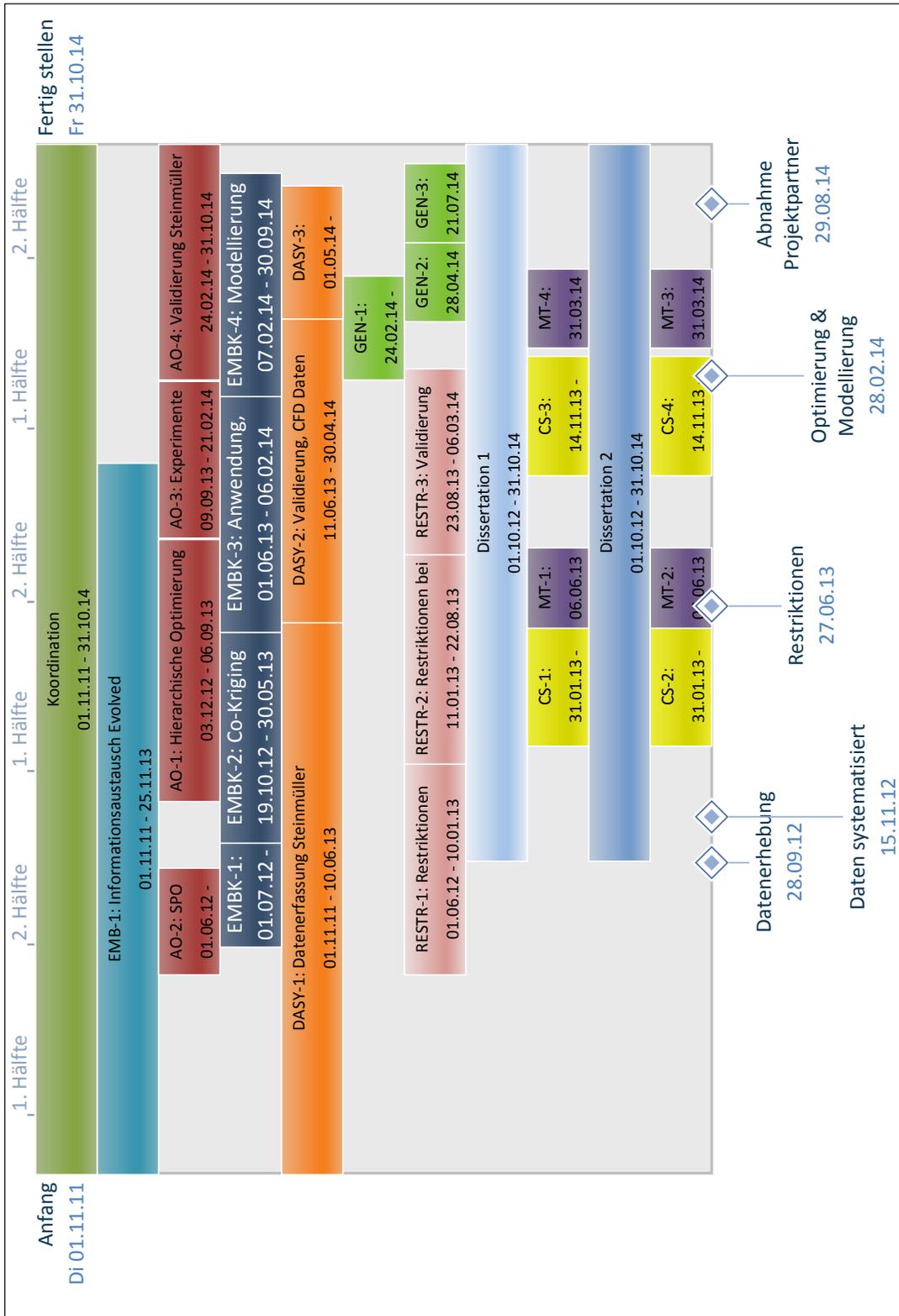


Abbildung 1: Projektverlauf als Gantt-Chart.

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 CIMO-Modelle im Rahmen dieser Programmpakete verwendet werden können [79]. 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.

Der Projektleiter war von 2000 bis 2006 im Sonderforschungsbereich „Design und Management komplexer technischer Prozesse und Systeme mit Methoden der Computational Intelligence“ (SFB 531) in einem Projekt zur Umsetzung der Grundlagenresultate in praxisorientierte Algorithmen und Werkzeuge tätig. Der SFB 531 stellte während seiner Förderung in den Jahren 1997-2008 eine fakultätsübergreifende Einrichtung der Technischen Universität Dortmund dar und wurde wesentlich von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell unterstützt. Der Projektleiter arbeitete im SFB 531 im Projekt „Evolutionäre Algorithmen für den industriellen Einsatz“ (Projektleitung Prof. Dr. Günter Rudolph) an Fragestellungen u.a. aus den Bereichen Maschinenbau, Informatik, Bio- und Chemieingenieurwesen und Elektrotechnik. Dabei spielte die Datenvorverarbeitung und Systematisierung vorhandener Ergebnisse eine entscheidende Rolle in diesen Projekten. Basierend auf gemeinsamen Arbeiten im SFB 531 besteht eine langjährige Zusammenarbeit mit Dr. Günter Rudolph und Dr. Jörn Mehnen (Fakultät Maschinenbau, *TU Dortmund*), die zu zahlreichen gemeinsamen Publikationen führte [54, 66, 61, 128, 129, 148, 131, 37, 38, 39, 130, 50, 127].

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 [60, 82, 81, 107, 110, 109, 40, 150, 83, 113, 51, 62, 111, 49].

Modellbildung Law und Kelton [118] geben einen allgemein gehaltenen Einblick in die Modellierung und Simulation komplexer Systeme. In diesem Standardwerk werden klassische Techniken zum experimentellen Design, zur Sensitivitätsanalyse und zur Validierung behandelt. Saltelli et al. [143, 144] beschreiben Standardtechniken zur Sensitivitätsanalyse. Kleijnen [105] stellt eine umfangreiche Übersicht und Bewertung aktueller Verfahren aus dem Bereichen klassischer und moderner Simulation zusammen. Die Optimierung für technischen Anwendungen mit Surrogat-Modellen wird zudem durch Forrester et al. [85] detailliert beschrieben. Eine grundlegende Veröffentlichung für die Optimierung mit Gaußschen Prozessmodellen (Kriging), der sogenannten Efficient Global Optimization, stammt von Jones et al. [96].

Prof. Dr. Tom Dhaene von der *Universiteit Gent* erforscht und entwickelt zusammen mit weiteren Mitgliedern der Arbeitsgruppe des *SURrogate MOdeling Lab*² (SUMO) Surrogat-Modelle. Gorissen et al. [88] geben eine Einführung in die am SUMO entwickelte Software. Die Dissertation von Dr. Dirk Gorissen, der von der *Universiteit Gent* zur *Computational Engineering and Design Group* an der

²<http://www.sumo.intec.ugent.be>

Southampton University wechselt, stellt aktuelle Forschungsergebnisse zusammen [89]. [85] geben einen sehr verständlich geschriebenen Einstieg in die Anwendung der Surrogat-Modellierung. Dr. Andrew Forrester arbeitet als Lecturer an der *Southampton University*.

Der Projektleiter 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). Ein Schriftenverzeichnis des Projektleiters mit mehr als 50 Veröffentlichungen zu diesem Thema ist als Anlage beigefügt, sodass an dieser Stelle nur drei Veröffentlichungen stellvertretend genannt seien. In [41] werden klassische und moderne Modellierungstechniken analysiert und angewandt. Die darin entwickelte Methodik kombiniert dabei Elemente der klassischen experimentellen Versuchsplanung (DoE) 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. In [130] werden Temperierbohrungen mehrkriteriell optimiert. Mittels SPO konnte die Kühlungsstrategie signifikant verbessert werden. In [113] wird die Modellierung von Füllständen in Regenüberlaufbecken optimiert. Es wurden unterschiedliche Modellierungsverfahren einer vergleichenden Analyse unterzogen. Der Projektleiter hat mit der *sequentiellen Parameter Optimierung* (SPO) ein Werkzeug entwickelt, das state-of-the-art Modellierungstechniken für die Prozessoptimierung zur Verfügung steht. SPO wird von einer Vielzahl von Forschern in unterschiedlichen Projekten erfolgreich eingesetzt. [47] gibt hierzu eine Übersicht mit mehr als einhundert Literaturstellen.

Für das Projekt CIMO sind für weiterführende Bereiche auch komplexere Modellbildungsverfahren von Interesse. Einer dieser Bereiche ist die Verwendung von Zielfunktionen die das gleiche Optimierungsproblem beschreiben aber unterschiedliche Kosten für die Auswertung bzw. verschiedene Genauigkeiten aufweisen. [36] geben in dem Aufsatz „Space mapping: the state of the art“ einen guten Einstieg in die Thematik der Verwendung von Modellen mit unterschiedlicher Genauigkeit zur Optimierung. [84] zeigt wie auf Kriging basierte Surrogatmodelle die Korrelation zwischen verschiedenen Modellebenen verbinden können. Für den mehrkriteriellen Fall sind die Veröffentlichungen von Knowles und Nakayama [106] sowie Ponweiser u.a. [140] von Interesse.

Der Einsatz von Surrogatmodellen findet vor allem für reellwertige Optimierungsprobleme Anwendung, bei kombinatorischen Problem ist er weniger häufig und stellt dort eine aktuelle Herausforderung dar [95]. Interessant sind hier die Arbeiten von Voutchkov u.a. [147], Li u.a. [119] sowie Moraglio und Kattan [135].

Anlagenoptimierung Die Anlagenoptimierung wird im Projekt CIMO mit Hilfe der *Hierarchischen Mehrkriteriellen Optimierung* (HMO) 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 [68] 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* 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 [84].

[99] 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*. [98] präsentiert 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.

[149] verbinden verschiedene Optimierungsverfahren auf lokalen und globalen Surrogat-Modellen 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. [121] verallgemeinern den Ansatz und arbeiten Vor- und Nachteile heraus. Im Vergleich zum Projekt CIMO ist neben der einkriteriellen Herangehensweise fest zu stellen, dass [99] und [98] nur CFD-Modelle einsetzen, während [149] und [121] lediglich Surrogat-Modelle betrachten. Die Verbindung verschiedener Modellierungsansätze, wie in CIMO, 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 [133] und [73]. Seit Mitte/Ende der 1990er Jahre sind auch erste Ansätze mit Hilfe von evolutionären Algorithmen zur mehrkriteriellen Optimierung bekannt. Hier bieten von [71] und [69] 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 [106].

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* [66, 148].

In den Jahren 2001 bis 2006 entstanden in Zusammenarbeit mit Dr. Sandor Markon (Fujitec Ltd, Japan) eine Vielzahl Publikationen zum Thema Fahrstuhloptimierung [125, 64, 65, 63, 53, 52, 59]. Ergebnisse dieser Arbeiten sind in dem Buch „Modern Supervisory and Optimal Control with Applications in the Control of Passenger Traffic Systems in Buildings“ [126] 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 (siehe Abbildung ??) vorhersagen. Diese Modelle können statisch festgelegt oder während der Optimierung dynamisch wechseln [48].

Als Leiter des Forschungsprojekts FIWA führte der Projektleiter Optimierungen von Biogasanlagen und Kläranlagen durch [150, 81, 109, 110, 113, 51, 49, 112].

Restriktionsbehandlung Für praktische Optimierungsprobleme sind häufig auch Restriktionen oder Nebenbedingungen von großer Bedeutung.

Da CIMO sich mit der Entwicklung CI-basierter mehrkriterieller Algorithmen bietet das Buch von Coello [69] einen sehr guten Überblick. Erwähnung finden sowohl klassische Ansätze (Penalty-Funktionen), komplexere Reperaturmechanismen, besondere Selektionsoperatoren. Als besonders vielversprechend beschrieben wird die Umwandlung von Nebenbedingungen in ein oder mehrere zusätzliche Zielfunktion. Eine aktuelle Übersicht bietet auch [132].

Generalisierbarkeit Generalisierbarkeit bezieht sich nicht nur auf eine einzelne Problemstellung, sondern versucht, Gemeinsamkeiten bei mehreren Problemen zu betrachten und so zur Theoriebildung beizutragen. Der Einsatz von experimenteller Versuchsplanung (DoE) ist ein wichtiges Element, um verschiedene Modellierungen effizient zu vergleichen und ihr Potenzial zu beurteilen [104, 105],[45]. 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 in Bartz-Beielstein [41] durch die Entwicklung der SPO Pionierarbeit geleistet, indem zum ersten Mal eine umfassende DoE-Methodik zur Analyse von CI-Verfahren entwickelt und angewandt wurde. Die SPO-Methodik beinhaltet neben Verfahren zur Analyse einzelner Modelle auch Verfahren zur Generalisierbarkeit von Ergebnissen [42, 44]. 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.³

Durch die engen Kontakte zum Lehrstuhl „Algorithm Engineering“ der *TU Dortmund* (Arbeitsgruppe Prof. Rudolph) entstanden mehrere Veröffentlichungen zum Thema Generalisierbarkeit experimenteller Ergebnisse [55, 56]. Diese Ergebnisse wurden auch im Rahmen von eingeladenen Seminare und Tutorien präsentiert [58, 57, 43]. Weiterhin bestehen Kontakte im Bereich der Grundlagenforschung [46].

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektpartner des Projekts CIMO befinden sich auch weiterhin in engem Kontakt.

Mit *Steinmüller Engineering GmbH* besteht ein reger Austausch für die weitere Verwendung und Entwicklung der in CIMO entwickelten Methoden, unter anderem im Rahmen des Partnerprojektes

³Eine 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. Eine Übersicht mit Literaturstellen und eine kurze Einführung in SPO werden in Bartz-Beielstein [47] gegeben.

MCIOP, sowie in studentischen Abschlussarbeiten. Eine Zusammenarbeit in Folgeprojekten befindet sich derzeit in Planung.

Zudem besteht ein beidseitiger Austausch zwischen den Projekten CIMO und MCIOP 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 mit physikalisch motivierten (d.h. Computational Fluid Dynamics CFD) sowie für Anwender verständliche, lernbare (d.h. Genetic Programming) Modelle.

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.

Weitere für CIMO relevante Partner und Kooperationen sind auch in Tabelle 1 zu finden.

3 | Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Ziel des Projekts CIMO war die Entwicklung mehrkriterieller, modellgestützter, hierarchischer Optimierungsverfahren für die industrielle Anwendung, unter anderem zur Schadstoffreduktion in Kohlekraftwerken. Die eingehende Darstellung der wissenschaftlichen-technischen Ergebnisse gliedert sich nach der Modul- und Arbeitspaketplanung entsprechend der Vorhabensbeschreibung bzw. deren Anpassung in den laufenden Projektberichten. Für die zentralen Arbeitspakete des Projektes CIMO wurden die folgenden Kürzel verwendet: **DASY**: Datenerfassung und Systematisierung, **AO**: Anlagenoptimierung, **EMBK**: Erweiterte Modellbildung mit Kriging, **RESTR**: Restriktionsbehandlung, **GEN**: Generalisierbarkeit.

3.1 Modul DASY „Datenerfassung und Systematisierung“

Das Modul DASY fasst Arbeitspakete zusammen, die sich mit der systematischen Aufnahme und Verarbeitung der relevanten Daten befassen. Dazu gehört auch die Modellierung der betrachteten technischen Systeme.

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

Das Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Datenerfassung und Anpassung für Daten aus der Energiewirtschaft

In Diskussionen mit dem Projektpartner *Steinmüller Engineering GmbH* stellte sich heraus, dass die Berücksichtigung von Restriktionen bei den betrachteten Optimierungsproblemen einen größeren Stellenwert eingeräumt werden muss. Die Berücksichtigung von Restriktionen ermöglicht eine effiziente Optimierung, da eine signifikante Reduktion des Suchraums zu erwarten ist. Erfahrungsgemäß führt dies zu einer Beschleunigung bei klassischen Optimierungsverfahren und auch bei Verfahren aus dem Bereich CI. Relevant sind hier verschiedene Restriktionen, die technische Vorgaben des Gesamtsystems betreffen, aber auch physikalische oder geometrische Restriktionen.

Im Rahmen weiterer Datensichtung ergab sich, dass die geplante Feuerraumsimulation sehr aufwändige weitere Datenaufnahmen und Modellierungen erfordert. Um die dafür notwendigen Simulationen durchzuführen, wurde ein Rechencluster bei *Steinmüller Engineering GmbH* installiert, der die notwendige Rechenlast verarbeiten kann. Dabei nahm die Konzeption und Installation mehrere Monate in Anspruch. Um trotzdem erste Daten für die Optimierung zu generieren, wurde deshalb der Fokus auf einen weniger komplexen Teil eines Kohlekraftwerks gelegt, nämlich einen Zyklon (Fliehkraftabscheider). Bei einem Zyklon handelt es sich um einen Filter, der Staubanteile aus Gasgemischen, die bei der Verbrennung entstehen, abscheiden soll. Die Berücksichtigung von Staubabscheidegrad, Druckverlust und Herstellungskosten zeigt hier sehr anschaulich warum eine mehrkriterielle Optimierung notwendig ist. Aus der Literatur sind zudem physikalisch motivierte, einfach zu berechnende, analytische Modelle bekannt (siehe z.B. in [122]). Diese bilden zusammen mit den deutlich komplexeren CFD Modellen ein sehr gutes Beispiel für die datengetriebene Modellierung und Optimierung mit verschiedenen Hierarchieebenen. Abbildung 2 zeigt eine Zeichnung eines typischen Zyklons, Abbildung 3 zeigt die Visualisierung eines 3D Meshs, das für eine CFD Simulation erstellt wurde.

Für die Arbeit mit den verschiedenen Modellebenen waren die relevanten Betriebsgrößen, Nebenbedingungen und Geometrien zu klären. Nach der systematischen Aufnahme dieser Daten standen erste CFD-basierte und analytische Modelle zum Test der entwickelten Optimierungsmethoden bereit.

Bei abschließenden Diskussionen zur Datenaufnahme mit *Steinmüller Engineering GmbH* wurde festgestellt, dass die parametrische Herangehensweise nicht zwangsläufig die sonst üblichen, manuellen Arbeitsabläufe bei der Entwicklung im Unternehmen abbildet. Zwar ist die Optimierung

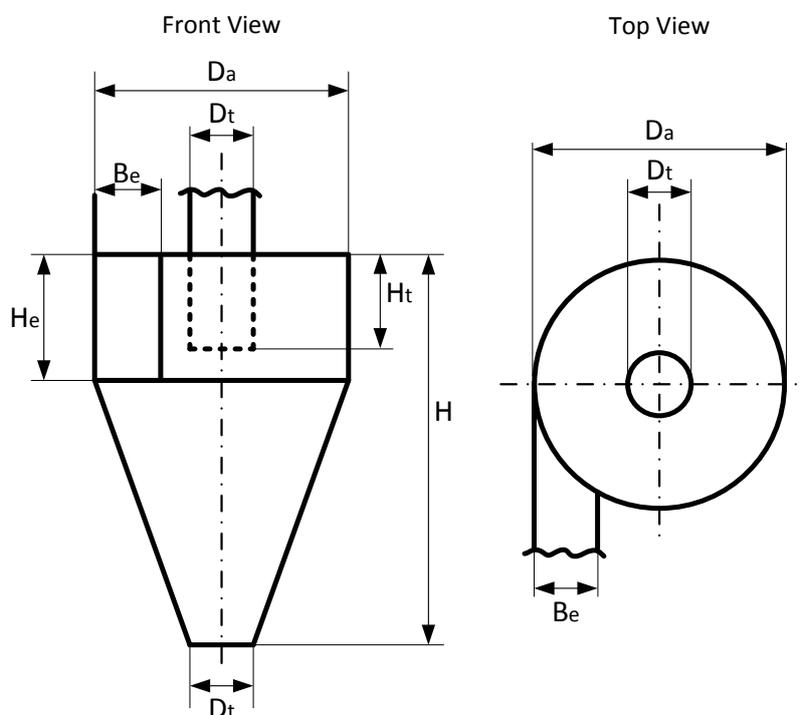


Abbildung 2: Zeichnung eines Zyklon Staubabscheiders mit zu optimierenden Geometrieparametern.

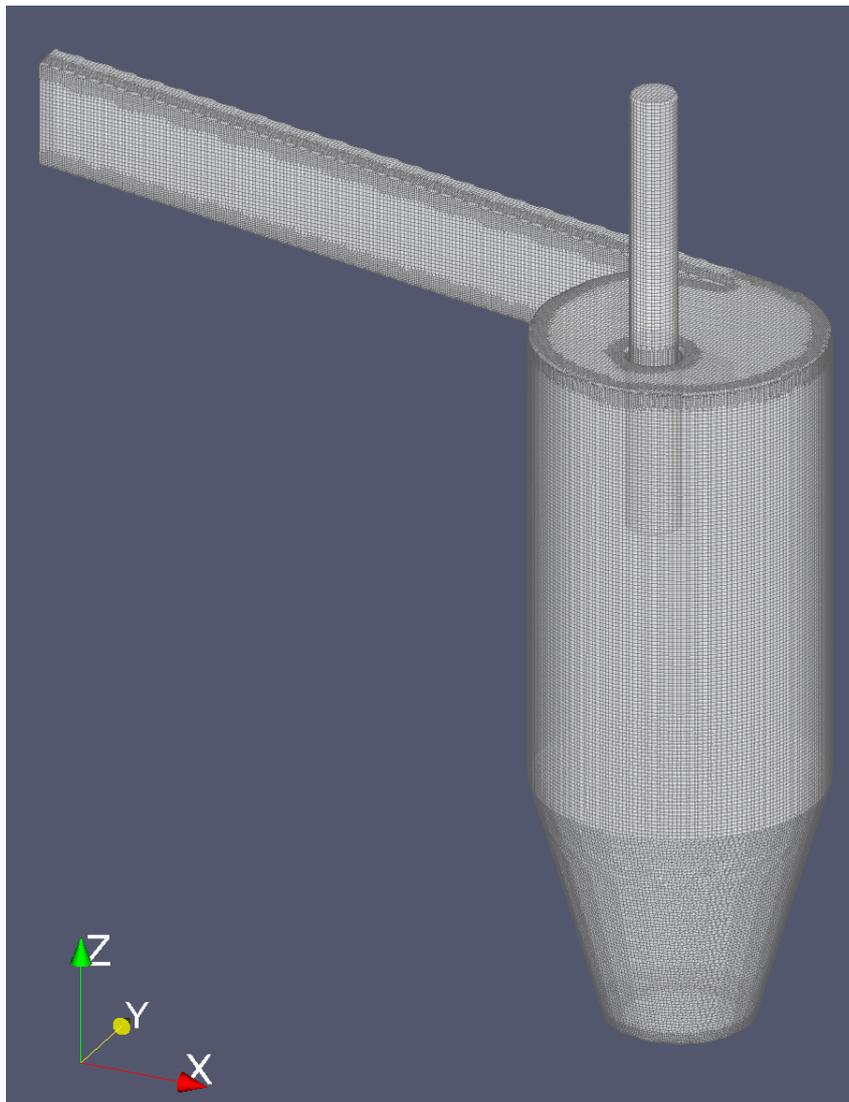


Abbildung 3: 3D Mesh eines Zyklon Staubabscheiders.

zuvor festgelegter Geometrieparameter von großer Bedeutung, zusätzlich werden im manuellen Prozess aber häufig diskrete, strukturelle Änderungen vorgenommen. Ein Beispiel wäre zum Beispiel der Integration eines Leitbleches zur Veränderung einer Strömungsrichtung. Derartige strukturelle Änderungen können nicht über Parameter abgebildet werden. Eine Optimierung müsste somit auch diskrete, strukturelle Änderungen berücksichtigen können. Hierzu wären kombinatorische Optimierverfahren notwendig. Diese wiederum benötigen datengetriebene Surrogatmodelle die strukturelle Daten abbilden können.

3.1.2 DASY-2 Validierung von Parametereinstellungen mit CFD

Die CFD Modellierung eines Zyklons (Fliehkraftabscheiders) mit OpenFOAM fand in dem von Prof. Bartz-Beielstein geleiteten Forschungsprojekt MCIOP statt. Für CIMO lag dadurch als Ergebnis dieser Arbeiten ein erstes Modell für den Druckverlust vor. Für die Validierung von Optimierungsmethoden und gelieferten Parametereinstellungen fehlte allerdings eine passende Modellierung des

Abscheidegrades (Simulation der Partikel in der Strömung). Daher wurde auf die analytischen Modelle zurückgegriffen, bzw. die analytische Berechnung des Druckverlustes mit der CFD Simulation verifiziert. Wie auch im Modul zur Generalisierbarkeit (GEN) geplant und beschrieben, wurden weitere Validierungen mit Aufgabenstellungen aus der Stahlindustrie und Biogaserzeugung durchgeführt.

3.1.3 DASY-3 Planung weiterer Experimente

Das Arbeitspaket DASY-3 widmete sich der Planung von weiteren Experimenten. Detaillierte Beschreibungen dieser Experimente sind in den folgenden Abschnitten zu den Modulen EMBK, AO und GEN zu finden.

3.2 Modul 2 „Anlagenoptimierung“

Das Modul AO umfasst Arbeitspakete, die sich mit Optimierungsmethoden, ihren experimentellen Tests und mit der Anwendung auf die im Projekt behandelte Problemstellung befassen.

3.2.1 AO-1 Hierarchische Mehrkriterielle Optimierung

Das im Projekt entwickelte Verfahren für die hierarchische mehrkriterielle Optimierung stützt sich vor allem auf das Modellierungsverfahren Co-Kriging. Dabei werden anfangs zwei (d.h. für jede Hierarchieebene genau ein) experimentelle Designs erstellt. Das Design für die höhere (genauere, teurere) Ebene ist kleiner und stellt eine Untermenge des Designs für die niedrigere (ungenauere, billigere) Ebene dar. Beide Designs werden jeweils auf der entsprechenden Problemebene ausgewertet. Entsprechend können die entstehenden Daten verwendet werden, um mit Hilfe von Co-Kriging eine genaue, günstige Modellierung der höheren Ebene zu generieren. Für den mehrkriteriellen Fall ist hier vor allem zu berücksichtigen, dass separate Modelle für jedes Ziel erstellt werden müssen. Die entstehenden Modelle können dann mit geeigneten mehrkriteriellen Verfahren optimiert werden und somit Lösungskandidaten für das Optimierungsproblem generieren.

Dieses Konzept ist für Probleme gedacht bei denen die niedrigere Ebene des Optimierungsproblems keine signifikanten Kosten verursacht und somit die Gesamtkosten (oder Gesamtdauer) der Optimierung nur durch die höhere Ebene bestimmt werden. Sollten die Kosten der niedrigeren Problemebene relevant werden, ist es möglich, auch diese Ebene getrennt mit einem eigenen Surrogatmodell zu repräsentieren, dass dann die niedrigere Ebene im Rahmen der hierarchischen Modellierung schrittweise ersetzt.

3.2.2 AO-2 Anbindung der Multikriteriellen Optimierung an SPO

Das Arbeitspaket AO-2 verband die bisherigen Arbeiten des Projektleiters mit den Zielsetzungen des Projektes. Mit der *Sequentiellen Parameter Optimierung* (SPO) stand bereits ein Framework für die Optimierung auf Basis datengetriebener Surrogatmodelle zu Verfügung. Im Rahmen des Projektes wurde dieses Framework in vor allem in drei Punkten erweitert.

1. Zuerst wurde mit der Implementierung von Co-Kriging und entsprechend notwendiger Methoden für die Erstellung hierarchischer experimenteller Designs die Möglichkeit geschaffen,

Probleme mit mehreren Hierarchieebenen effektiv in SPO zu verarbeiten.

2. Zudem wurde SPO um die Möglichkeit erweitert, Surrogatmodelle nicht nur für einzelne Zielgrößen, sondern auch für mehrere zu generieren. Diese wurden mit ebenfalls neu implementierten Methoden zur mehrkriteriellen Optimierung verbunden, um somit auch Probleme mit konfliktären Zielstellungen zu lösen.
3. Schließlich wurde SPO selbst auch so konfiguriert, dass die eingesetzten mehrkriteriellen Algorithmen in Hinsicht auf ihre Parameterwahl optimiert werden konnten.

AO-2 befasst sich vor allem mit den beiden letzteren Aspekten. Die entsprechenden in der SPO Toolbox (SPOT) implementierten Ansätze sind frei verfügbar⁴. Eine einfache Einführung sowie eine Demonstration zur Verwendung der mehrkriteriellen Optimierung sind inzwischen auch als Veröffentlichungen verfügbar [35, 32].

Generell folgt SPO dem folgenden Schema:

SPO-1 Zuerst wird mit Methoden aus dem Bereich Design of Experiments (DoE) ein initiales Design erzeugt.

SPO-2 Dieses wird mit der Zielfunktion (Simulation, Experiment) ausgewertet.

SPO-3 Die bestehenden Daten werden genutzt um ein datengetriebenes Modell zu erstellen (Surrogatmodell).

SPO-4 Das Surrogatmodell wird optimiert um einen neuen, vielversprechenden Lösungskandidaten zu ermitteln,

SPO-5 Der nun wieder mit der Zielfunktion ausgewertet wird.

Schritte SPO-3 bis SPO-5 werden wiederholt bis ein Abbruchkriterium erreicht ist (z.B. die maximale Anzahl erlaubter Zielfunktionsauswertungen).

Für die Erweiterung von SPO für mehrkriterielle Probleme ist die Erzeugung des Designs (Schritt SPO-1) erstmal von geringerer Bedeutung, die hier vorhandenen Methoden können unverändert verwendet werden.

Bei Schritt SPO-2 ist lediglich zu berücksichtigen, dass Zielfunktionswerte nun nicht mehr Skalare, sondern Vektoren sind. Entsprechend musste hier die Datenhaltung geändert werden. Komplexere Änderungen sind notwendig, wenn die verschiedenen Zielkriterien nicht aus dem selben Experiment oder der selben Simulation stammen und dadurch unterschiedliche Kosten verursachen

In Schritt SPO-3 gibt es nun zwei Möglichkeiten, um den verschiedenen Zielkriterien gerecht zu werden: Es könnten multivariate Modelle verwendet werden oder aber es könnte jeweils ein univariates Modell für jedes Zielkriterium gelernt werden. Beides ist prinzipiell in SPO möglich, letzteres stellt aber der Normalfall für die Kriging Modelle, die im Fokus des Projektes standen, dar.

Die Optimierung in Schritt SPO-4 ist nun mit entsprechenden Algorithmen durchzuführen. Auch hier gibt es wieder zwei Möglichkeiten: Erstens können die Surrogatmodelle mit mehrkriteriellen

⁴Siehe: <http://cran.r-project.org/package=SPOT>

Algorithmen direkt optimiert werden und das entstehende Pareto-Set als Basis für Schritt SPO-5 vorgeschlagen werden. Hierfür sind in SPOT derzeit Schnittstellen zu zwei Algorithmen der mehrkriteriellen, evolutionären Optimierung eingebunden, NSGA-II und SMS-EMOA [72, 67]. Wichtig ist hier, dass die entstehenden Paretofronten möglicherweise aus vielen Punkten bestehen, für die nächste Iteration von SPOT aber häufig nur ein Punkt oder zumindest nur wenige Punkte vorgeschlagen werden sollten. Um diesen Punkt zu bestimmen, werden die Resultate nach Non-Dominated Sorting Rank [72] und Hypervolumenbeitrag [67] sortiert. Dies geschieht jeweils unter Berücksichtigung der bereits ausgewerteten Lösungen früherer Iterationen (bzw. aus dem initialen Design). Zusätzlich können Lösungen deterministisch oder stochastisch (mit sog. "Tournament Selection") gewählt werden. Alternativ können aber auch einkriterielle Optimierverfahren zum Einsatz kommen, wenn die Vorhersage der Modelle für die verschiedenen Zielkriterien zu einem einzelnen Kriterium verbunden werden. Dabei kann SPO zum Beispiel eine aktuelle Entwicklung von Emmerich u.a. (*Universiteit Leiden*) aus dem Bereich der modellgestützten Optimierung verwenden, nämlich der Berechnung der erwarteten Verbesserung des Hypervolumens [77]. SPOT bietet eine flexible Schnittstelle, die entsprechende beliebige Einfügekriterien annehmen kann. Die Adaptionen sind unter anderen in den folgenden Veröffentlichungen beschrieben [26, 25, 24, 32])

SPO kann auch eingesetzt werden, um mehrkriterielle Optimierungsalgorithmen zu tunen, siehe dazu auch die Veröffentlichung [30]. Weitere Studien zur mehrkriteriellen Optimierung werden in AO-3 durchgeführt.

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

Es wurden verschiedene Studien und Experimente mit den entwickelten Verfahren durchgeführt. Dazu gehört die Überprüfung mit bekannten Testfunktionen [27], ein Test auf Anwendbarkeit für die Optimierung der CIMO Anwendung [14, 30], sowie die Anwendung für ein weiteres Problem aus der Wasserwirtschaft [29]. In Verknüpfung mit Modul EMBK-2 konnte hier unter anderem auch erfolgreich hierarchische, einkriterielle Optimierung auf ein praktisches Verfahren (Simulation und Optimierung einer Biogasanlage) angewendet werden. Dabei zeigt sich dass die hierarchischen Surrogatmodelle erfolgreich eingesetzt werden können, der Vorteil dieser Methoden aber stark von Parametrisierung und Problemdimension abhängen [31] kann. Im Rahmen von Case Studies wurden durch Studenten auch erfolgreiche Studien zur Optimierung einer Düse basierend auf einem CFD Modell durchgeführt.

3.2.4 AO-4 Auswertung und Validierung beim Anwender

Die mehrkriteriellen Verfahren konnten im Rahmen des Projekts nicht im vollen Umfang für die geplante Anwendung in der Energiewirtschaft getestet werden, da zwar die hierarchischen Modellebenen für ein Ziel (Druckverlust) zu Verfügung standen, allerdings nicht für das zweite Ziel (Abscheidegrad). Hier sind weitere Studien in Kooperation mit dem Projektpartner *Steinmüller Engineering GmbH* in der Vorbereitung, auch nach Ende des Projektes.

3.3 Modul 3 „Erweiterte Modellbildung mit Kriging“

Das unter dem Kürzel EMB/ EMBK geplante Modul umfasst die Arbeitspakete die sich schwerpunktmäßig mit komplexen, datengetriebenen Modellierungsansätzen beschäftigen. Ursprünglich stand dabei die Verwendung von *Genetischer Programmierung* (GP) im Vordergrund.

Hier ergab sich eine wichtige Änderung im Vergleich zur Planung. Im Rahmen des Partnerprojektes MCIOP wurden erste Tests mit GP als Surrogat-Modell durchgeführt. Dabei wurde einerseits GP als Policy-Generator im Rahmen eines Ensemble-Ansatzes verwendet. Andererseits wurde GP selbst genutzt, um ein Regressionsmodell (Symbolische Regression) zu bilden. Beide Fälle können Informationen für die Modellierung und Simulation liefern. Entsprechend wurde eine Anbindung an ein GP-Framework (rgp, siehe <http://cran.r-project.org/package=rgp>) auch in das an der FH Köln entwickelte Open-Source Paket SPOT (Sequential Parameter Optimization Toolbox, siehe <http://cran.r-project.org/package=SPOT>) integriert. Für eine Optimierung, vor allem wenn diese automatisiert laufen soll, ist in beiden Fällen GP als Surrogatmodell aber noch nicht geeignet. Dabei ist der große Zeitaufwand für die Exploration des riesigen Suchraumes im Wesentlichen verantwortlich. Da sich hiermit der Zeitaufwand sehr schnell in der selben Größenordnung wie der Zeitaufwand einer CFD-Simulation bewegen kann, bietet die Verwendung als Surrogat-Modell in der Optimierung wenige Vorteile. Als sinnvolle Alternative ist damit die Verwendung von Kriging-Modellen deutlich attraktiver. Um diesem Modellierungsansatz die entsprechende Aufmerksamkeit zu widmen, wurde der Projektplan wie folgt angepasst: Das neue Modul *Erweiterte Modellbildung mit Kriging* (EMBK) wurde eingeführt. Dabei blieb das auf Kommunikation und Informationsaustausch fokussierte Paket EMB-1 unverändert, während alle weiteren EMB Pakete durch EMBK-1, EMBK-2 und EMBK-3 ersetzt wurden. Die geplanten Arbeiten zu GP fanden, unter anderen Gesichtspunkten, im Partnerprojekt MCIOP Berücksichtigung. Auch trotz Laufzeitproblemen kann GP deutliche Vorteile haben, zum Beispiel wenn einfach verständliche Formeln entwickelt werden sollen, die Zusammenhänge der optimierten Parameter in lesbarer Form beschreiben.

Weitere Untersuchungen zu Surrogatmodellierung (ursprünglich Modul MB) wurde in die Arbeiten mit Kriging (EMBK) integriert. Die Konzeptionierung der Modellierung mit GP und CFD wird hingegen schwerpunktmäßig in MCIOP bearbeitet.

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 hinsichtlich ihre Anwendbarkeit überdacht. Die in diesem offenen Austausch entstehenden Anregungen und Ideen waren für den Erfolg der weiteren Arbeitspakete von großer Bedeutung.

3.3.2 EMBK-1 Implementierung von Kriging-Modellen

In EMBK-1 sollten Kriging-Modelle in die verwendete Open-Source Software integriert werden.

In der verwendeten Programmierumgebung (R) stehen bereits Modelle zu Verfügung, die sich allerdings durch verschiedene Probleme (z.B. Stabilität, Zugänglichkeit des Source-Codes) nicht hinreichend für die praktische Anwendung eignen. Beispiele dafür sind die R-Pakete `mlegp` [70],

DiceKriging [142] oder `tgp` [90]. In ersten Tests erwies sich DiceKriging als sehr instabil, vor allem bei relativ dicht gelagerten Datenpunkten, was zum Ende von surrogatmodell-basierten Optimierungsläufen ein häufig auftretender Fall ist. Ähnliche Probleme tauchen beim Paket `mlegp` auf, das zwar stabiler funktioniert, in solchen Fällen aber häufig extrem langsam wird. Die Laufzeit ist auch beim Paket `tgp` ein Problem, wobei dieses keine einfache Kriging Implementierung beinhaltet sondern auch eine Baum-basierte Partitionierung des Suchraumes. Sowohl `tgp` als auch DiceKriging bieten eigene oder ausgelagerte (DiceOptim) Optimierungsalgorithmen.

Im Projekt CIMO wird hingegen das flexiblere SPOT Framework verwendet, das auch Schnittstellen zu den oben beschriebenen Modellansätzen besitzt. Um klar strukturierte, schnelle und stabile Verfahren zu garantieren, wurden Kriging-Varianten, wie von Lophaven u. a. [124, 123] und Forrester u. a. [85] beschrieben, in R implementiert und dem Software Paket SPOT hinzugefügt. Abbildung 4 zeigt für ein einfaches eindimensionales Beispiel eine Modellierung mit SPOT, DiceKriging und `mlegp`. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der Laufzeit für das gleiche Beispiel. Grundlage in SPOT ist in beiden Fällen die Funktion `forrBuilder`.

Die beiden in SPOT implementierten Kriging Varianten bieten unterschiedliche Vorteile. Die auf Forrester u.a. basierende Methode ermöglicht eine schnellere Erstellung des Modells, sowie die von Forrester entwickelte reinterpolierende Modellierung die bei verrauschten Daten geeignet ist [85]. Die auf DACE (Lophaven u. a. [124, 123]) basierende Implementierung hingegen bietet eine flexiblere Wahl von Korrelations- und Regressionsfunktionen des Kriging Modells. Beide verwenden rein auf R

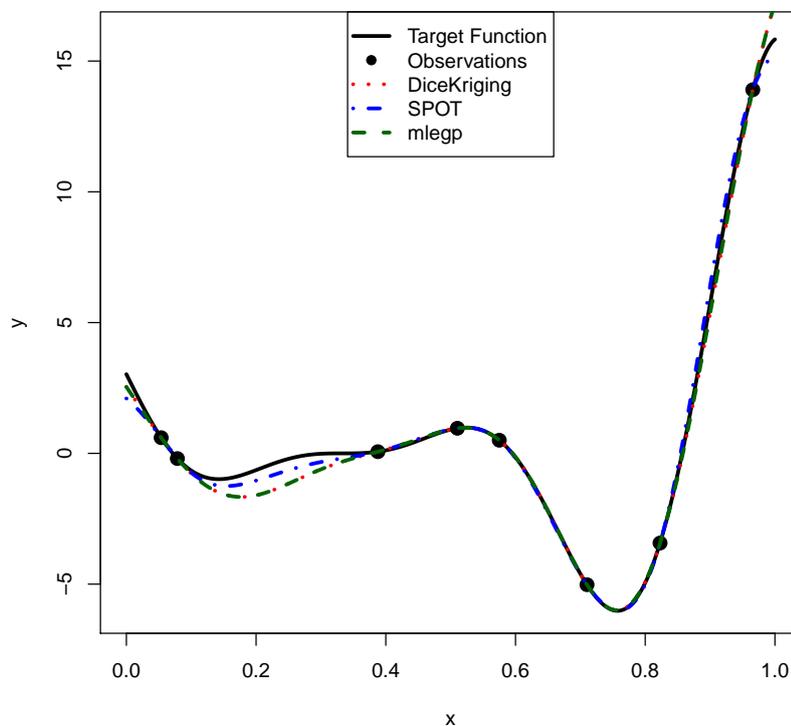


Abbildung 4: Beispiel für Kriging Modelle aus unterschiedlichen R-Paketen mit default Einstellungen.

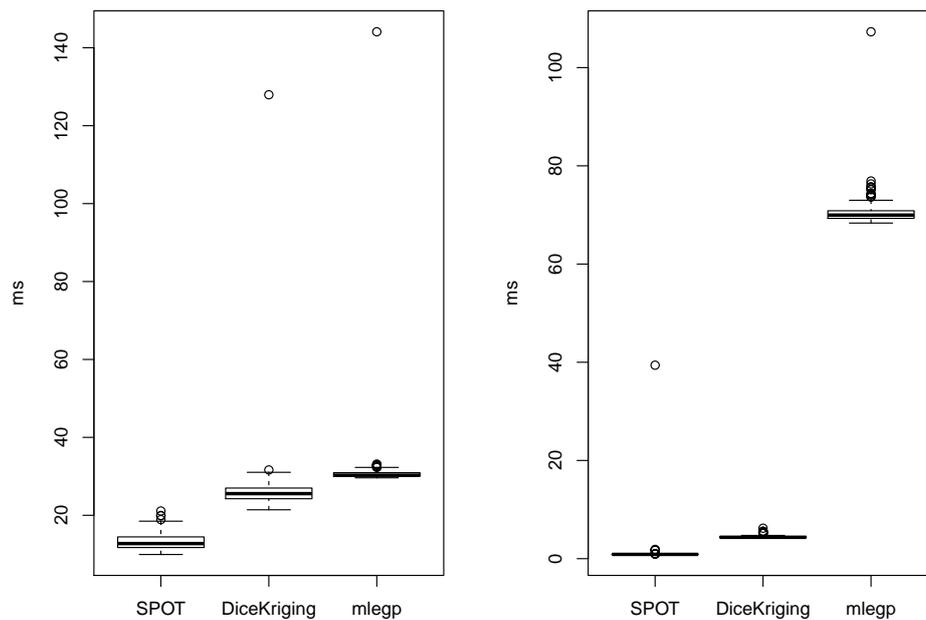


Abbildung 5: Laufzeitanalyse für das Beispiel in Abb 4. Gemessene Laufzeit für Lernen des Modells (links) und Vorhersage von 1000 Werten (rechts), basierend auf 100 Wiederholungen.

Befehlen basierten Code und sind somit für mit R vertraute Nutzer einfach zu verstehen und auch zu erweitern. Dies steht im deutlichen Gegensatz zu den teilweise auf C oder C++ zurückgreifenden anderen Paketen.

3.3.3 EMBK-2 Kriging für Hierarchische Optimierungsansätze

EMBK-2 befasste sich mit Kriging-basierten Modellierungsmethoden für hierarchische Problemstellungen. Das heißt, Problemstellungen bei denen der datengetriebenen Modellierung Informationen von verschiedenen Hierarchieebenen (Ebenen verschiedener Genauigkeit bzw. mit verschiedenen Kosten/Rechenaufwand) zu Verfügung stehen. Generell sind beliebig viele Hierarchieebenen möglich. Der Einfachheit halber ist die folgende Beschreibung auf zwei Hierarchieebenen bezogen. Dies ist auch der übliche Fall in der Praxis. Im Folgenden wird die erste Hierarchieebene (das echte Problem, genaue Auswertung, teuer oder zeitaufwändig) mit Fine-function bezeichnet. Die niedrigere Ebene (Annäherung/Schätzung, ungenau, billig auszuwerten) wird mit Coarse-function bezeichnet

Hier ist vor allem Co-Kriging von Bedeutung [84]. Im einfachsten Fall nutzt Co-Kriging die Korrelation zwischen Coarse und Fine-function aus, um ein datengetriebenes Surrogatmodell der Fine-function zu verbessern. Das heißt, mit nur wenigen Auswertungen einer teuren, genauen Zielfunktion und vielen zusätzlichen Auswertungen einer ungenaueren, günstigeren Zielfunktion wird ein Surrogatmodell erstellt, das möglichst genau ist, dabei aber selbst nicht zu rechenaufwändig werden darf. Bei komplexeren Problemen können auch beliebig viele Hierarchieebenen berücksichtigt werden. Im Rahmen des Projektes wurde eine Co-Kriging Implementation in SPOT hinzugefügt. Diese basiert

grundsätzlich auf den Arbeiten von Forrester u. a. [87, 86].

Um eine Vergleichsgrundlage zu Co-Kriging zu erhalten wurden auch generell anwendbare, heuristische Verfahren getestet. Diese werden im folgenden kurz beschrieben und sind im Gegensatz zu Kriging auch bei anderen Regressionsverfahren einsetzbar. Im Gegensatz zu Co-Kriging muss für die Modellierung nicht ein anderes Design für Coarse- und Fine-function genutzt werden. Jeder Designpunkt muss auf beiden Ebenen ausgewertet werden.

Input-Modell Die Ergebnisse der niedrigeren Hierarchieebene werden als Eingabe des datengetriebenen Surrogatmodells verwendet. Dadurch lässt sich ein möglicher Zusammenhang zwischen den Hierarchieebenen implizit lernen.

Differenz-Modell Hier wird die Annahme gemacht, dass die Coarse-function das tatsächliche Problem bereits gut abbildet. Um das Surrogatmodell davon profitieren zu lassen, wird nur noch die Differenz oder das Verhältnis zwischen den beiden Hierarchieebenen modelliert. Das heißt, man versucht nur noch den verbleibenden Fehler der Coarse-function zu korrigieren.

Verhältnis-Modell Dieser Ansatz ähnelt dem Differenz-modell, nimmt aber an das nur die Relation zwischen Coarse- und Fine-function zu korrigieren ist, nicht die Differenz.

Die verschiedenen Verfahren wurden mit einfachen Testfunktionen validiert, sowie auch in einer praktischen Anwendung im Bereich der Biogaserzeugung [31].

Ein sehr einfaches aber eindrucksvolles Beispiel für die Vorteile von Co-Kriging zeigt Abbildung 6. Dabei wird eine eindimensionale Funktion mit nur vier Beobachtungen (fine) sowie elf Beobachtungen (coarse) sehr exakt durch ein Co-Kriging Modell wiedergegeben. Die Differenz (Diff.) und Verhältnis (Rel.) Modelle sind hier weniger gut geeignet, zeigen aber bereits eine deutliche Verbesserung gegenüber einem unkorrigierten Modell und sind zudem auch mit gänzlich anderen Modellierungsmethoden als Kriging anwendbar. Die verwendete Testfunktion stammt aus einer Veröffentlichung von Forrester u. a. [85].

3.3.4 EMBK-3 Anwendung

Im Arbeitspaket EMBK-3 sollten die in den Arbeitspaketen EMBK-1 und EMBK-2 bearbeiteten Methoden auf die Problemstellungen des Projektes angewendet werden. Für die Anwendung standen zwei verschiedene analytische Modelle zum Trenngrad eines Staubabscheiders, ein analytisches Modell zum Druckverlust eines Staubabscheiders, sowie ein CFD Modell des Druckverlustes zu Verfügung.

In Anwendungsstudien wurden die analytischen Modelle, auch unter Einbeziehung von Rauschen (stochastisches Modell), optimiert. Dabei wurden einkriterielle und mehrkriterielle Optimierung, sowohl mit als auch ohne Kriging-basierte Surrogatmodelle, getestet. Der Einsatz von Surrogatmodellen zeigte hier deutliche Vorteile. Die Anzahl der für ein Ziel notwendigen Funktionsauswertungen konnte deutlich reduziert werden, oder bei gleicher Zahl von Funktionsauswertungen bessere Ergebnisse erzielt werden. Eine weitere Studie befasste sich mit der Parametrisierung der Optimierungsverfahren. Dabei konnten die Ergebnisse der mehrkriteriellen Optimierungsalgorithmen deutlich verbessert werden. Trotz dieser deutlichen Verbesserung konnten die modellfreien Ansätze die modellgestützten,

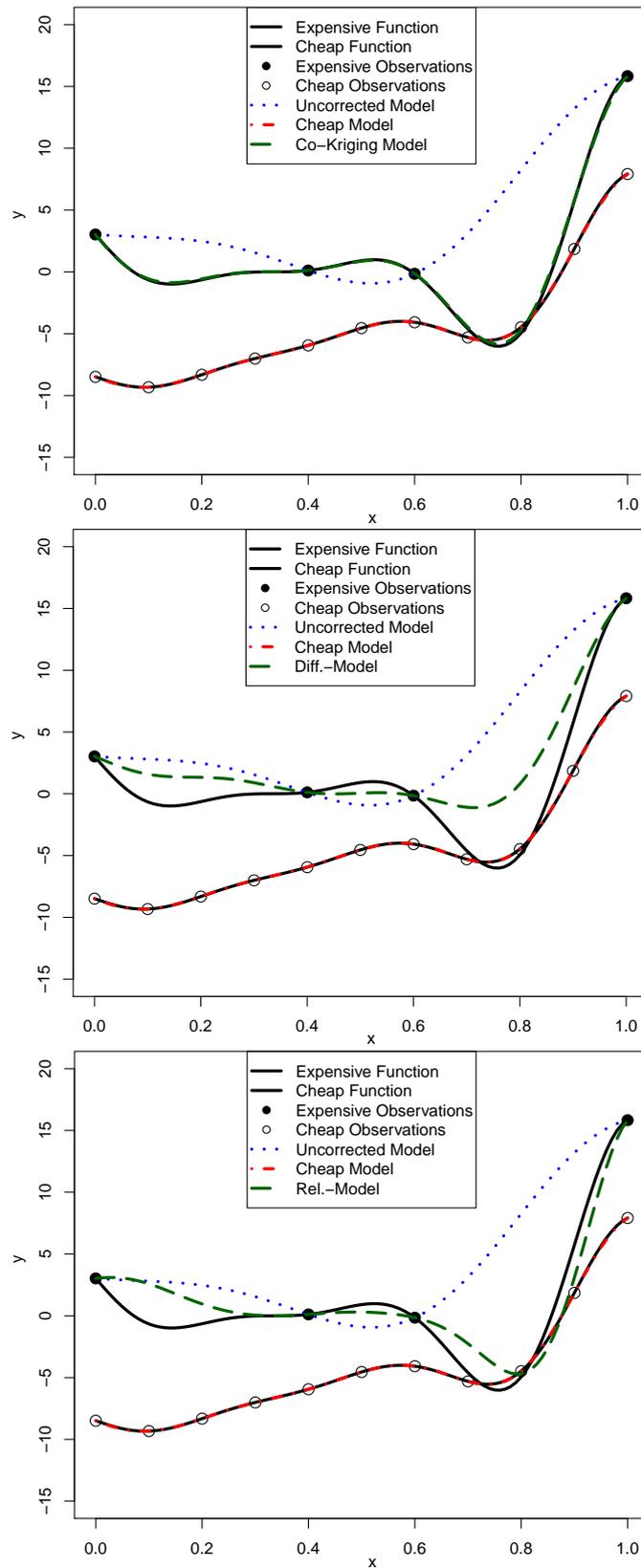


Abbildung 6: Beispiel für die Anwendung von Methoden für die Modellierung mit mehreren Hierarchieebenen in einer Dimension. Von oben nach Unten: Co-Kriging, Differenzmodell, Verhältnismodell.

SPO-basierten Verfahren, nicht schlagen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind zum Beispiel in den Veröffentlichungen [14, 15, 30] beschrieben.

3.3.5 EMBK-4 Surrogat-Modellierung strukturierter Daten

Aus Diskussionen mit dem Partner *Steinmüller Engineering GmbH* ergab sich, dass auch Änderungen an einem zu optimierenden Objekt (d.h., dem Zyklon) von Interesse sind, die nicht einfach durch Vektoren von kontinuierlichen Variable zu beschreiben sind. So wären strukturelle Änderungen zum Beispiel durch geometrische Operationen ebenso von Interesse.

Daraus ergab sich zum Ende des Projektes eine interessante Erweiterung für die modellgestützten Verfahren. Wenn das zu optimierende Objekt sich nicht mehr vektoriell darstellen lässt, sondern durch stark strukturierte Daten beschrieben wird (z.B. Sequenzen, Permutationen, Bäume oder Mischungen) sind klassische kontinuierliche Modellierungs- und Optimierungsverfahren weniger gut geeignet. Das Optimierungsproblem wird sehr schnell ein kombinatorisches, oder gemischt-kombinatorisches.

In einer Recherche ergaben sich hier interessante Ansätze die für derartige Fälle die Erweiterung von distanz-basierten Modellen auf beliebige (auch kombinatorische) Suchräume erweitern [135, 120]. In diesem Gebiet der Surrogatmodellierung für kombinatorische Suchräume wurden bislang nur sehr wenige Untersuchungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5).

Im Projekt CIMO konnten Kriging-basierte Verfahren erfolgreich erweitert und auf kombinatorische Probleme angewendet werden [34, 33]. Wichtig ist dabei die Verwendung geeigneter Distanzmaße. Solche Distanzmaße beschreiben wie ähnlich sich zwei Lösungskandidaten sind. Bei klassischen, vektoriellen Problemen werden hier häufig Euklidische oder ähnliche Maße verwendet. Für kombinatorische Probleme können beliebig komplexere Maße genutzt werden, wie zum Beispiel die Anzahl von Operationen die notwendig sind um ein Objekt in ein anderes zu transformieren. Diese Distanzmaße werden durch das Kriging Modell eingesetzt, um mit Hilfe die Distanz zwischen neuen und bekannten Lösungen eine Schätzung der Qualität zu ermöglichen. Mit dieser Generalisierung stehen die in CIMO entwickelten Verfahren auch für kombinatorische oder gemischte Problemstellungen zu Verfügung. Diese lassen sich auch problemlos auf kombinatorische Probleme mit verschiedenen Hierarchieebenen übertragen.

Da für beliebig komplexe kombinatorische oder gemischte Suchräume andere Datenstrukturen und Suchstrategien notwendig sind, wurde die entwickelten R Funktionen nicht im R-Paket SPOT sondern in einem neuen Paket für "Combinatorial Efficient Global Optimization"(CEGO)⁵ veröffentlicht.

3.4 Modul 4 „Restriktionsbehandlung“

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben war ein Ergebnis der Datenaufnahme die Bedeutung der Behandlung von Nebenbedingungen für die behandelte Problemstellung. Daher wurde drei zusätzliche Arbeitspakete zu diesem Themenblock anvisiert.

⁵ Siehe: cran.r-project.org/package=CEGO

3.4.1 RESTR-1 Restriktionsbehandlung

In diesem Arbeitspaket sollten die Grundlagen der Restriktionsbehandlung recherchiert werden. Einerseits betrifft dies die theoretischen, andererseits die technischen Grundlagen für die in CIMO behandelten Probleme. Während des Optimierungsprozesses gibt es Restriktionen zu beachten. So bestimmen bei einem Zyklonstaubabscheider vor allem die geometrischen Abmessungen die Nebenbedingungen, aber auch eine Reihe von Betriebsparametern. Auch darf ein gewisser Druckverlust nicht überschritten werden.

Um diesen Restriktionen Rechnung zu tragen müssen Techniken zur Behandlung von Nebenbedingungen unter Evolutionstrategien [69, 132, 117] eingesetzt werden. Auch klassische Optimierungsansätze mit Nebenbedingungen (wie sie zum Beispiel in [138] beschrieben werden) sind möglich.

3.4.2 RESTR-2 Restriktionen und Surrogatmodellierung

Um Restriktionen in der Surrogatmodell-basierten Optimierung zu berücksichtigen, sind mindestens drei verschiedene Bereiche von Bedeutung: Die Versuchsplanung, die Surrogatmodellierung selbst sowie der Optimierungsprozess, der auf Basis des Surrogatmodells neue Lösungen vorschlägt.

Im Rahmen des Arbeitspaketes RESTR-2 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Für die Versuchsplanung wurde eine Funktionalität in SPOT integriert, bei der ein *Latin Hypercube Design* (LHD) generiert wird, bei dem die erstellten Punkte so gewählt werden, dass die Restriktionen nicht verletzt werden. Dabei werden ungültige (mit Restriktionsverletzung) durch neue Punkte ersetzt, die zufällig generiert werden. Voraussetzung ist, dass der gültige Bereich des Suchraumes hinreichend groß ist und die Restriktion selbst nicht teuer in der Auswertung ist.
- Eine schnell auszuwertende Restriktionsfunktion kann auch in der Optimierung des Surrogatmodells verwendet werden. Dabei wurde eine Schnittstelle zu klassischen Optimierungsverfahren mit Nebenbedingungenbehandlung aus dem Paket `nloptr` geschaffen.
- Sollte die Restriktionsfunktion selbst teuer auszuwerten sein oder (wie im Falle von CFD Simulationen) Ungültigkeit möglicherweise erst durch die Simulation selbst bestimmt wird, bietet SPOT jetzt die Möglichkeit ungültige Lösungen als "Not Available"(NA) zu markieren. Derartig fehlende Werte können auf zwei Arten repariert werden. Wenn Kriging oder Co-Kriging verwendet wird, gibt es die Möglichkeit einen Funktionswert zu schätzen (Imputation). Dabei wird der NA Wert mangels echter Daten durch eine Schätzung ersetzt, die möglichst dazu führt, dass keine weiteren Lösungen im Bereich der ungültigen Bereiche gewählt werden. Der einzusetzende Wert wird über die Vorhersage des Krigingmodells ermittelt und durch Addition der durch das Modell geschätzten Varianz bestraft. Des weiteren kann die Restriktionsfunktion auch durch ein Surrogatmodell gelernt werden (derzeit nur ein baumbasiertes Verfahren, das eine Bestrafung von vermutlich ungültigen Lösungen bewirkt).
- Natürlich gibt es auch die technisch einfachste Möglichkeit, ungültige (NA) Werte statisch mit einem schlechten Wert zu bestrafen, und diese Werte ohne weitere Anpassung in der Modellierung

(z.B. mit Kriging) zu verwenden. Dies führt allerdings häufig zu schlechten Surrogatmodellen, da die zu modellierende Landschaft dann nicht-differenzierbare Bereiche enthält. Vor allem Kriging liefert in diesem Fall schlechte Ergebnisse. Es sollte daher soweit möglich auf die obigen Lösungen zurückgegriffen werden, oder Modelle gewählt werden, die diese Problematik nicht aufweisen, wie zum Beispiel baumbasierte Ansätze. Um die Auswirkungen derartiger Probleme gering zu halten, lohnt es sich zudem, NA Werte durch solche Werte zu ersetzen, die zwar schlecht aber physikalisch realisierbar sind. So sollte z.B. ein ungültiger Staubabscheider keinen negativen Abscheidegrad zugewiesen bekommen, sondern eher einen Wert von genau Null.

3.4.3 RESTR-3 Validierung der Restriktionsbehandlungsmethoden für die Surrogatmodellierung

Es zeigte sich, dass die Wahl der Methodik sehr problemabhängig ist. So kann eine schätzende Imputation im schlimmsten Fall dazu führen, dass nach der Initialisierung des Optimierers keine Lösungen mehr gefunden werden die realisierbar sind, also keine Nebenbedingungen verletzen. Für eine Anwendung aus der Stahlindustrie, bei der der gültige Bereich des Suchraumes einen größeren Anteil ausmacht, konnte die Imputation gute Ergebnisse erzielen. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um sinnvolle Entscheidungskriterien für die Wahl der Methodik zu finden.

3.5 Modul 5 „Generalisierbarkeit“

3.5.1 GEN-1 Weitere Anwendungen und Partner

In diesem Arbeitspaket sollten weitere Anwendungsfelder, neben denen zusammen mit *Steinmüller Engineering GmbH* bearbeiteten, untersucht werden.

Zusammen mit Professoren aus dem *Institut für Allgemeinen Maschinenbau (IAM)* der FH Köln (Dr.-Ing. Jürgen Schmitz, Dr. Hans Rühmann) fand eine Zusammenarbeit im Bereich der Optimierung von Prozessvariablen beim Spritzgießen statt. Diese Arbeiten wurde im Rahmen von studentischen Praxisprojekten und Abschlussarbeiten durchgeführt. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Wasserwirtschaft. In diesem Feld wurde durch den Projektleiter bereits das Projekt FIWA erfolgreich abgeschlossen. Die entwickelten Methoden des Projektes CIMO sind auch hier von großer Bedeutung. So konnte die Modellgestützte, mehrkriterielle Optimierung bereits erfolgreich für ein Anwendungsproblem der Wasserwirtschaft eingesetzt werden. Ziel war dabei, die Parameteroptimierung eines Verfahrens zur Erkennung einer Kontamination von Trinkwasser. Durch den hohen Rechenaufwand des Verfahrens sind die modellgestützten Ansätze hier sehr hilfreich, um schnell gute Parameter zu finden [24].

Zudem konnten die entwickelten Ansätze in zwei weiteren Anwendungsfeldern getestet werden. Einerseits ist hier die Anwendung zur Steuerung und Optimierung von Biogasanlagen zu nennen. Die Zusammenarbeit im Bereich Biogas erfolgt hier mit der Arbeitsgruppe GECO-C von Prof. Dr. Michael Bongards der *FH Köln*. Hier bestehen bereits seit längeren enge und ergiebige Kooperationen. Eine Biogasanlage kann durch sehr genaue, aber aufwändige Modelle simuliert werden. Gleichzeitig können einfach zu berechnende Schätzungen, basierend auf linearen Zusammenhängen von Biogasproduktion und Substratzufuhr, aufgestellt werden. Diese Modellierungsebenen können durch datengetriebene Modelle verbunden werden und in der hierarchischen Optimierung mit Co-Kriging eingesetzt werden.

Dabei zeigte sich, dass Daten aus groben, linearen Schätzungen die Qualität eines Surrogatmodells deutlich verbessern können. Es zeigte sich aber auch, dass der Erfolg stark davon abhängt, wie teuer oder aufwändig die eigentliche Zielfunktion wirklich ist [31]. Beispielhaft zeigt Abbildung 7 wie die verschiedenen Modellierungsebenen in die Optimierung einer Biogasanlage integriert werden können.

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. Auch hier konnten Tests zur hierarchischen Optimierung erste Erfolge zeigen.

3.5.2 GEN-2 Integration DataModeler

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

3.5.3 GEN-3 Validierungsaspekte

Auch für die Kernanwendung des Projektes CIMO selbst 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

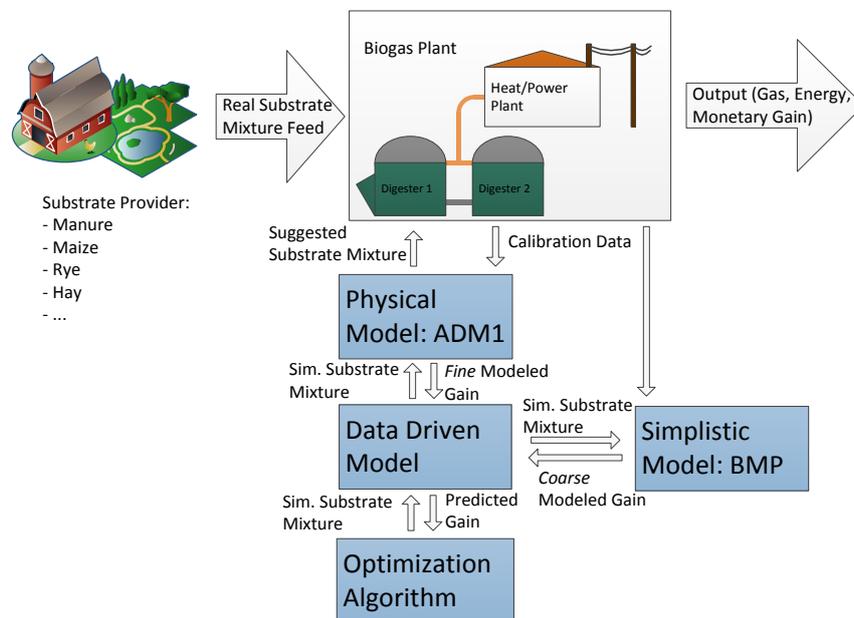


Abbildung 7: Beispielhafte Integration von verschiedenen Simulationsebenen, datengetriebenen Modellen und Optimierungsmethoden zur Optimierung der Substratzufuhr einer Biogasanlage.

sehr gut auf andere Modelltypen übertragen lassen. Auch gegenüber stochastischen Einflüssen sind die Methoden robust. Diese Ergebnisse wurden in [30] 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 Studenten für eine ausführliche Erprobung der verwendeten Modellierungs- und Optimierungsansätze dienten. 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. Als Beispiel zeigt Abbildung 8 das Ergebnis einer (unter den gegebenen Nebenbedingungen) optimalen Düsenform, das mit einer SPO-basierten Optimierung gefunden wurde.

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 (siehe Abbildung 9), Dimensional Stacking, und Scatter-Plots.

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

(TODO: sind noch irgendwelche Master/Bachelor arbeiten relevant?)

D: Dissertation Im Rahmen der Vorhabensbeschreibung war eine Dissertation als Modul des Projektes eingeplant, die durch den im Projekt beschäftigten wissenschaftlichen Mitarbeiter (Martin

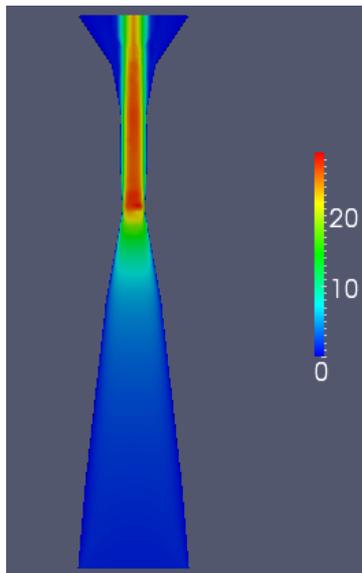


Abbildung 8: Beispiel der Form einer optimierten Düse mit Geschwindigkeitsprofil aus einer CFD-Berechnung.

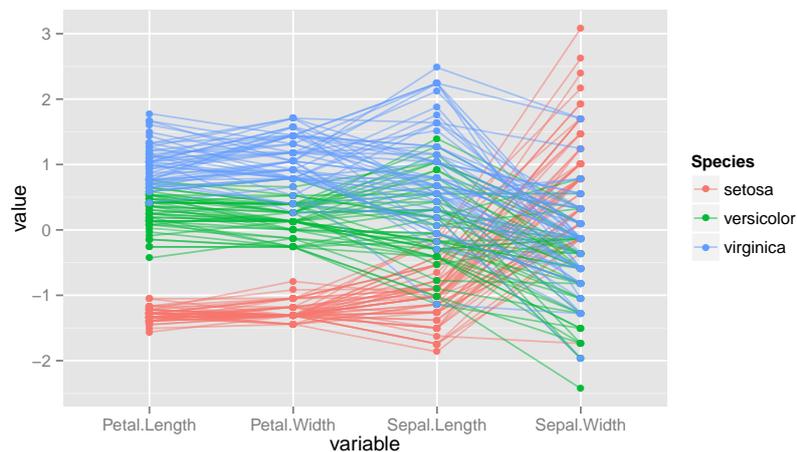


Abbildung 9: Beispiel Parallel Coordinate Plot des iris Datensatzes mit dem GGally Paket in R.

Zaefferer) bearbeitet wird. Im Verlaufe des Projektes beteiligten sich zusätzlich zwei weitere Promovenden 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 Dissertationen sind bereits gut fortgeschritten, wurden aber nicht im Rahmen der Projektzeitlauf abgeschlossen. Die Betreuung war und wird weiterhin durch den Projektleiter sowie von Prof. Günter Rudolph von der *TU Dortmund* durchgeführt.

K: Koordination Während des Projektes fielen wichtige Koordinationsaufgaben an. Unter anderem wurden wöchentliche Statussemnare des Projektteams abgehalten. Dieses Arbeitspaket ist im Gantt-Chart des Projektverlaufs separat ausgewiesen (siehe Abbildung 1).

3.7 Wissenschaftliche Publikationen

Durch die Mitarbeiter des Projektes CIMO 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 [1] (unter Begutachtung: [31]), Konferenzbeiträge [34, 33, 24, 26, 25, 10, 14, 30, 22, 23, 21], und Technische Berichte [8, 2, 3, 32, 35, 28, 20, 19, 18, 16] veröffentlicht. Mehrere eingeladene Vorträge und Tutorien [12, 4, 13, 9] und sonstige Vorträge [5] wurden im Projekt CIMO gehalten.

Des Weiteren war der Projektleiter als Program Chair bei der Organisation der 13. Konferenz zu Parallel Problem Solving from Nature (PPSN'13) tätig [7]. (TODO: PPSN14)

Schließlich wurden auch regelmäßige Seminare und Kolloquien durchgeführt, bei denen Doktoranden ihre Themen und Arbeitsfortschritte vorstellen konnten⁶. 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 CIMO (CI-basierte mehrkriterielle Optimierungsverfahren für Anwendungen in der Industrie) 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 Projektstands mit der ursprünglich veranschlagten Zeitplanung wurde bereits in Abschnitt 3 durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes wurden zahlreiche Ansätze zur Modellierung und Optimierung entwickelt, getestet und in der offenen Statistik-Programmiersprache R implementiert. Die entsprechenden Ergebnisse wurden als Teil des R Software Paketes SPOT (Sequential Parameter Optimization Toolbox) auf der R Plattform CRAN veröffentlicht⁷. Eine Aktualisierung des veröffentlichten Paketes mit den letzten Entwicklungsschritten aus dem Projekt CIMO ist momentan in Bearbeitung und wird Mitte 2015 auf CRAN verfügbar sein. Ein weiterer Teil der Entwicklung, der sich mit diskreten Optimierungs- und Modellierungsproblemen befasst, ist zudem im R Paket CEGO veröffentlicht⁸. Damit stehen die Ergebnisse des Projektes direkt für andere Forscher oder Studenten zu Verfügung und können auch für andere Problemstellungen flexibel eingesetzt werden.

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

Das in der Vorhabensbeschreibung beschriebene CIMO-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 liefert deren Web-Seite www.spotseven.de. Themen aus dem Projekt CIMO finden bereits bei drei

⁶Siehe <http://www.spotseven.de/spot-symposia/> für eine Liste der aktuellen Vorträge.

⁷ Siehe: cran.r-project.org/package=SPOT

⁸ Siehe: cran.r-project.org/package=CEGO

Promotionsprojekten eine Anwendung.

Die Inhalte und Ergebnisse des Projekts haben Einzug in verschiedene Vorlesungen des Projektleiters genommen. So werden Kriging und Co-Kriging Grundlagen mittlerweile in den Vorlesungen DDMO (*Data Driven Modeling and Optimization*) und APCO (*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. Hier ist zum Beispiel die Modellgestützte Optimierung von diskreten, kombinatorischen oder gemischten Optimierungsproblemen zu nennen.

5 | Ergebnisse Dritter

Während der Durchführung des Vorhabens wurde auch bei anderen Stellen die Anwendung und Entwicklung von modellgestützten, mehrkriteriellen Methoden vorangetrieben. Mit einigen dieser Stellen bestand während des Projektes bzw. besteht auch weiterhin ein engmaschiger Austausch mit vielen Kooperationen.

Surrogatmodelle in der mehrkriteriellen Optimierung Zum auch in CIMO verwendeten Kriterium des *Expected Improvement in Hypervolume* wurden verschiedene wichtige Ergebnisse erzielt, wie zum Beispiel theoretische Ergebnisse zu Eigenschaften oder zur exakten und effizienten Berechnung [78, 94, 93].

Optimierung mit mehreren Hierarchieebenen In Bezug auf die Optimierung mit mehreren Hierarchieebenen wurden unter anderem verschiedene Arbeiten zur Optimierung mit Co-Kriging veröffentlicht. Gratiet [91] 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 Design Optimierung von Antennen [115], Mikrowellenfilter [116] und in der Aerodynamik [92].

Behandlung von Nebenbedingungen Während die Restriktionsbehandlung im Projekt CIMO vor allem implizite Restriktionen, oder aber schnell auswertbare Restriktionen (z.B., geometrisch) behandelt, wurde in der Arbeitsgruppe von Prof. Wolfgang Konen von der *FH Köln* Experimente unter der Annahme von linearen und nichtlineare, teuren Nebenbedingungen durchgeführt [108]. Dabei werden Radial Basis Function (RBF) Modelle verwendet, entsprechend dem Ansatz der *Constrained Optimization by Radial Basis Function Approximation (COBRA)* der durch Regis entwickelt wurde [141]. Ein weiterer Vorschlag zur Nebenbedingungenbehandlung ist die Verwendung von mehrkriteriellen Methoden um die Kriterien wie *Expected Improvement* und *Probability of Feasibility* [145] zu verbinden [139].

Kombinatorische Modellgestützte Optimierung Ein zentrales Ergebnis des Projektes war die Erweiterung der Ansätze auf kombinatorische (oder gemischte, strukturierte) Suchräume. In diesem Zusammenhang sind die Ergebnisse von Moraglio und Kattan [135, 137, 136, 80, 101, 100, 102, 103]

sowie Voutchkov [147] und Li [120] von Bedeutung. Dabei werden vor allem Radial Basis Function Networks (RBFN) verwendet, beziehungsweise im Falle der Arbeit von Voutchkov und anderen [147] ein eher spezifisches Modell das für sequentielle Prozesse (hier: Schweisspfadminimierung) verwendet werden kann.

Optimierung von Staubabscheidern Ein wichtiges Anwendungsgebiet des Projektes CIMO war die Geometrie-Optimierung eines Zyklon / Fliehkraftabscheiders. In diesem Bereich befassten sich vor allem Elsayed et al. [76] mit der einkriteriellen Optimierung unter Verwendung Neuronaler Netzwerke und Genetischer Algorithmen, Co-Kriging [75], sowie des sog. Adjoint Verfahrens [74]. 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 [97].

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, 178-195. <http://dx.doi.org/10.1002/widm.1124>. – DOI 10.1002/widm.1124. – ISSN 1942–4795
- [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] 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 / Bibliothek der Fachhochschule Köln Bibliothek. Version: 2013. <http://opus.bsz-bw.de/fhk/volltexte/2013/47>. Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln, 2013. – Forschungsbericht
- [16] 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
- [17] FLASCH, Oliver ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: A Framework for the Empirical Analysis of Genetic Programming System Performance. In: RIOLO, Rick (Hrsg.) ; VLADISLAVLEVA, Ekaterina (Hrsg.) ; MOORE, Jason H. (Hrsg.): *Genetic Programming Theory and Practice X*. Ann Arbor, USA : Springer, 2013 (Genetic and Evolutionary Computation), S. 155–170
- [18] 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, AnnaI. (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
- [19] 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
- [20] FRIESE, Martina ; STORK, Jörg ; GUERRA, Ricardo R. ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; THAKER, Soham ; FLASCH, Oliver ; ZAEFFERER, Martin: UniFIeD Univariate Frequency-based Imputation for Time Series Data / Bibliothek der Fachhochschule Köln Bibliothek. Version: 2013. <http://opus.bsz-bw.de/fhk/volltexte/2013/49>. Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln, 2013. – Forschungsbericht. – ISBN 2194-2870
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] 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
- [27] ZAEFFERER, Martin ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; FRIESE, Martina ; NAUJOKS, Boris ; FLASCH, Oliver: Multi-criteria Optimization for Hard Problems Under Limited Budgets. In: *Proceedings of the 14th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (GECCO '12). – ISBN 978-1-4503-1178-6, 1451–1452

- [28] 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
- [29] ZAEFFERER, Martin ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; NAUJOKS, Boris ; WAGNER, Tobias ; EMMERICH, Michael: A Case Study on Multi-Criteria Optimization of an Event Detection Software under Limited Budgets. In: PURSHOUSE, Robin C. (Hrsg.) ; FLEMING, Peter J. (Hrsg.) ; FONSECA, Carlos M. (Hrsg.) ; GRECO, Salvatore (Hrsg.) ; SHAW, Jane (Hrsg.): *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Berlin, Heidelberg, Germany : Springer, 2013 (Lecture Notes in Computer Science). – ISBN 978-3-642-37139-4, 756-770
- [30] ZAEFFERER, Martin ; BREIDERHOFF, Beate ; NAUJOKS, Boris ; FRIESE, Martina ; STORK, Jörg ; FISCHBACH, Andreas ; FLASCH, Oliver ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Tuning Multi-Objective Optimization Algorithms for Cyclone Dust Separators. In: *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'14), Proceedings*, 2014, S. 1223-1230
- [31] ZAEFFERER, Martin ; GAIDA, Daniel ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Multi-fidelity Modelling and Optimization of Biogas Plants. In: *Applied Soft Computing* (2014). – Preprint (Under Review)
- [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.) ; FILIPIČ, 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] BANDLER, J.W. ; CHENG, Q.S. ; DAKROURY, S.A. ; MOHAMED, A.S. ; BAKR, M.H. ; MADSEN, K. ; SØNDERGAARD, J.: Space mapping: the state of the art. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 52 (2004), Nr. 1, S. 337-361
- [37] BARANSKI, Bastian ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; EHLERS, Rüdiger ; KAJENDRAN, Thusithan ; KOSSLERS, Björn ; MEHNEN, Jörn ; POLAZEK, Tomasz ; REIMHOLZ, Ralf ; SCHMIDT, Jens ; SCHMITT, Karlheinz ; SEIS, Danny ; SLODZINSKI, Rafael ; STEEG, Simon ; WIEMANN, Nils ; ZIMMERMANN, Marc: Advanced strategy representations for the iterated prisoner's dilemma. In: *Proceedings EURO XXI Conference 2006. 21st European Conference on Operational Research*, 2006. – (CD-ROM)
- [38] BARANSKI, Bastian ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; EHLERS, Rüdiger ; KAJENDRAN, Thusithan ; KOSSLERS, Björn ; MEHNEN, Jörn ; POLAZEK, Tomasz ; REIMHOLZ, Ralf ; SCHMIDT, Jens ; SCHMITT, Karlheinz

- ; SEIS, Danny ; SLODZINSKI, Rafael ; STEEG, Simon ; WIEMANN, Nils ; ZIMMERMANN, Marc: High-order punishment and the evolution of cooperation. In: AL., H.-G.Beyer et (Hrsg.): *Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO 2006)*, Seattle WA. New York : ACM Press, 2006, S. 379–380
- [39] BARANSKI, Bastian ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; EHLERS, Rüdiger ; KAJENDRAN, Thusithan ; KOSSLERS, Björn ; MEHNEN, Jörn ; POLAZEK, Tomasz ; REIMHOLZ, Ralf ; SCHMIDT, Jens ; SCHMITT, Karlheinz ; SEIS, Danny ; SLODZINSKI, Rafael ; STEEG, Simon ; WIEMANN, Nils ; ZIMMERMANN, Marc: The impact of group reputation in multiagent environments. In: FOGEL, D. B. et a. (Hrsg.): *Proc. 2006 Congress on Evolutionary Computation (CEC'06) within Fourth IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'06)*, Vancouver BC. Piscataway NJ : IEEE Press, 2006, S. 1224–1231
- [40] BARTZ-BEIELSTEIN, T: Optimierung von Prozessvariablen beim Spritzgießen / Cologne University of Applied Sciences. 2010. – Forschungsbericht
- [41] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *Experimental Research in Evolutionary Computation—The New Experimentalism*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006 (Natural Computing Series)
- [42] 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
- [43] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *Experimental Analysis of Optimization Algorithms – Problems and Perspectives (Seminar)*. Tilburg University NL, September 2007
- [44] 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
- [45] 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
- [46] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *Theory of Evolutionary Algorithms (eingeladene Teilnahme)*. Dagstuhl Seminar 08051, Januar 2008
- [47] 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
- [48] 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>
- [49] 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

- [50] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; DAVIS, David ; MEHNEN, Jörn: *Evolutionary Computation in Practice track at Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*. <http://www.isgtec.org/gecco-2009/ecp.html>. Version: 2009
- [51] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; KONEN, Wolfgang: Datenanalyse und Prozessoptimierung am Beispiel Kläranlagen / Cologne University of Applied Sciences. 2008. – Forschungsbericht
- [52] 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
- [53] 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)
- [54] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; MEHNEN, Jörn ; SCHMITT, Karlheinz ; PARSOPOULOS, Konstantinos E. ; VRAHATIS, Michael N.: Particle Swarm Optimizers for Pareto Optimization with Enhanced Archiving Techniques. In: SARKER, R. (Hrsg.) u. a.: *Proceedings 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC'03)*, Canberra Bd. 3. Piscataway NJ : IEEE, 2003, S. 1780–1787
- [55] 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
- [56] 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
- [57] 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
- [58] 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
- [59] 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
- [60] 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
- [61] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; SCHMITT, Karlheinz ; MEHNEN, Jörn ; NAUJOKS, Boris ; ZIBOLD, Dmytro: KEA—A Software Package for Development, Analysis, and Application of Multiple Objective Evolutionary Algorithms / Universität Dortmund, Germany. 2004 (CI–185/04). – Interner Bericht des Sonderforschungsbereichs 531 Computational Intelligence

- [62] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; ZIMMER, Tobias ; KONEN, Wolfgang: Parameterselktion 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
- [63] 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
- [64] 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
- [65] 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)
- [66] BEIELSTEIN, Thomas ; MEHNEN, Jörn ; SCHÖNEMANN, Lutz ; SCHWEFEL, Hans-Paul ; SURMANN, Tobias ; WEINERT, Klaus ; WIEMANN, 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
- [67] BEUME, N. ; NAUJOKS, B. ; EMMERICH, M.: SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume. In: *European Journal of Operational Research* 181 (2007), Nr. 3, S. 1653–1669
- [68] 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-G4FPOQ/877137.pdf>. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, 2005 (SAND2005-7498). – Forschungsbericht
- [69] COELLO COELLO, C. A. ; VAN VELDHIJZEN, D. A. ; LAMONT, G. B.: *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2nd. Springer, New York, 2007
- [70] DANCİK, Garrett M. ; DORMAN, Karin S.: mlegp: Statistical analysis for computer models of biological systems using R. In: *Bioinformatics* 24 (2008), Nr. 17, S. 1966–1967. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1093/bioinformatics/btn329>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1093/bioinformatics/btn329>. – ISSN 1367–4803
- [71] DEB, K.: *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. 1. New York NY : Wiley, 2001 (Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization)
- [72] DEB, K. ; AGRAWAL, S. ; PRATAB, A. ; MEYARIVAN, T.: A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. In: SCHOENAUER, M. (Hrsg.) ; DEB, K. (Hrsg.) ; RUDOLPH, G. (Hrsg.) ; YAO, X. (Hrsg.) ; LUTTON, E. (Hrsg.) ; MERELO, J. J. (Hrsg.) ; SCHWEFEL, H.-P. (Hrsg.): *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2000, S. 849–858

- [73] EHRGOTT, M.: *Multicriteria Optimization*. Springer, Berlin, 2005
- [74] 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
- [75] 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
- [76] 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
- [77] EMMERICH, M. ; DEUTZ, A. H. ; KLINKENBERG, J. W.: The computation of the expected improvement in dominated hypervolume of Pareto front approximations / Leiden University. Version: September 2008. <http://www.liacs.nl/~emmerich/TR-ExI.pdf>. 2008. – Forschungsbericht
- [78] 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
- [79] EPPLE, B. (Hrsg.) ; LEITHNER, R. (Hrsg.) ; LINZER, W. (Hrsg.) ; WALTER, H. (Hrsg.): *Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen*. Springer, Wien, 2007
- [80] FATIMA, Shaheen ; KATTAN, Ahmed: Evolving Optimal Agendas for Package Deal Negotiation. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (GECCO '11). – ISBN 978–1–4503–0557–0, 505–512
- [81] 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
- [82] 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
- [83] 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
- [84] 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

- [85] FORRESTER, Alexander ; SOBESTER, Andras ; KEANE, Andy: *Engineering Design via Surrogate Modelling*. Wiley, 2008
- [86] FORRESTER, Alexander ; SOBESTER, Andras ; KEANE, Andy: *Engineering Design via Surrogate Modelling*. Wiley, 2008
- [87] FORRESTER, Alexander I. ; SÓBESTER, András ; KEANE, Andy J.: Multi-fidelity optimization via surrogate modelling. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 463 (2007), Dec, Nr. 2088, 3251-3269. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2007.1900>. – DOI 10.1098/rspa.2007.1900
- [88] 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>
- [89] GORISSEN, Dirk: *Grid-Enabled Adaptive Surrogate Modeling for Computer Aided Engineering*, Engineering Sciences, speciality Computer Science, Ghent University, Belgium, Diss., 2010
- [90] GRAMACY, Robert B.: tgp: An R Package for Bayesian Nonstationary, Semiparametric Nonlinear Regression and Design by Treed Gaussian Process Models. In: *Journal of Statistical Software* 19 (2007), 6, Nr. 9, 1–46. <http://www.jstatsoft.org/v19/i09>. – ISSN 1548–7660
- [91] 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)
- [92] 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
- [93] HUPKENS, Iris ; DEUTZ, Andre ; YANG, Kaifeng ; EMMERICH, Michael: Faster Exact Algorithms for Computing Expected Hypervolume Improvement. In: GASPAR-CUNHA, Antonio (Hrsg.) ; HENGGELER 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
- [94] 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>
- [95] JIN, Yaochu: Surrogate-assisted evolutionary computation: Recent advances and future challenges. In: *Swarm and Evolutionary Computation* 1 (2011), Nr. 2, 61 - 70. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2011.05.001>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2011.05.001>. – ISSN 2210–6502
- [96] 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
- [97] 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

- [98] 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
- [99] 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
- [100] KATTAN, A. ; FATIMA, S.: PSO as a meta-search for hyper-GA system to evolve optimal agendas for sequential multi-issue negotiation. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC'12), Proceedings*. New York, NY, USA : IEEE, 2012, S. 1–8
- [101] KATTAN, A. ; GALVAN, E.: Evolving radial basis function networks via GP for estimating fitness values using surrogate models. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC'12), Proceedings*. New York, NY, USA : IEEE, 2012, S. 1–7
- [102] KATTAN, Ahmed ; ONG, Yew-Soon ; LÓPEZ, Edgar G.: Multi-agent multi-issue negotiations with incomplete information: A Genetic Algorithm based on discrete surrogate approach. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC'13), Proceedings*. New York, NY, USA : IEEE, 2013, S. 2556–2563
- [103] KIM, Yong-Hyuk ; MORAGLIO, Alberto ; KATTAN, Ahmed ; YOON, Yourim: Geometric Generalisation of Surrogate Model-Based Optimisation to Combinatorial and Program Spaces. In: *Mathematical Problems in Engineering* 2014 (2014), 1–10. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/184540>. – DOI 10.1155/2014/184540. – ISSN 1563–5147
- [104] KLEIJNEN, J. P. C.: *Statistical Tools for Simulation Practitioners*. New York NY : Marcel Dekker, 1987
- [105] KLEIJNEN, J. P. C.: *Design and analysis of simulation experiments*. New York NY : Springer, 2008
- [106] KNOWLES, Joshua D. ; NAKAYAMA, Hirotaka: Meta-Modeling in Multiobjective Optimization. In: *Multiobjective Optimization*, Springer, 2008, 245-284
- [107] 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
- [108] KOCH, Patrick ; BAGHERI, Samineh ; FOUSSETTE, Christophe ; KRAUSE, Peter ; BÄCK, Thomas ; KONEN, Wolfgang: Constrained Optimization with a Limited Number of Function Evaluations. In: *Proceedings. 24. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 27.-28. November 2014* Bd. 50 KIT Scientific Publishing, 2014, S. 237
- [109] 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
- [110] 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
- [111] KONEN, W. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: Internationaler DATA-MINING-CUP (DMC) mit studentischer Beteiligung des Campus Gummersbach / FH Köln. 2008. – Forschungsbericht

- [112] KONEN, W. ; BARTZ-BEIELSTEIN, T. ; WESTENBERGER, H.: Computational Intelligence und Data Mining – Datenanalyse und Prozessoptimierung am Beispiel Kläranlagen / FH Köln. 2007. – Forschungsbericht
- [113] 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
- [114] KORDON, Arthur K.: *Applying Computational Intelligence—How to Create Value*. Springer, 2010 <http://www.springer.com/engineering/book/978-3-540-69910-1>
- [115] 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
- [116] 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
- [117] KRAMER, Oliver: A Review of Constraint-handling Techniques for Evolution Strategies. In: *Appl. Comp. Intell. Soft Comput.* 2010 (2010), Januar, 3:1–3:19. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/185063>. – DOI 10.1155/2010/185063. – ISSN 1687–9724
- [118] LAW, A. M.: *Simulation Modeling and Analysis*. 4. McGraw-Hill, 2007
- [119] LI, Rui ; EMMERICH, M. T M. ; EGGERMONT, J. ; BOVENKAMP, E. G P ; BÄCK, T. ; DIJKSTRA, J. ; REIBER, J.: Metamodel-assisted mixed integer evolution strategies and their application to intravascular ultrasound image analysis. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC'08), Proceedings*. New York, NY, USA : IEEE, 2008, S. 2764–2771
- [120] LI, Rui ; EMMERICH, M. T M. ; EGGERMONT, J. ; BOVENKAMP, E. G P ; BÄCK, T. ; DIJKSTRA, J. ; REIBER, J.: Metamodel-assisted mixed integer evolution strategies and their application to intravascular ultrasound image analysis. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC'08), Proceedings*. New York, NY, USA : IEEE, 2008, S. 2764–2771
- [121] 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
- [122] LÖFFLER, F.: *Staubabscheiden*. Thieme, 1998
- [123] LOPHAVEN, S.N. ; NIELSEN, H.B. ; SØNDERGAARD, J.: Aspects of the Matlab Toolbox DACE / Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark. 2002 (IMM-REP-2002-13). – Forschungsbericht
- [124] LOPHAVEN, S.N. ; NIELSEN, H.B. ; SØNDERGAARD, J.: DACE—A Matlab Kriging Toolbox / Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark. 2002 (IMM-REP-2002-12). – Forschungsbericht
- [125] 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

- [126] 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
- [127] MEHNEN, Jörn ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: *Evolutionary Computation in Practice track at Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*. <http://www.sigevo.org/gecco-2010/ecp.html>. Version: 2010
- [128] MEHNEN, Jörn ; MICHELITSCH, Thomas ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; HENKENJOHANN, Nadine: Systematic analyses of multi-objective evolutionary algorithms applied to real-world problems using statistical design of experiments. In: TETI, R. (Hrsg.): *Proceedings Fourth International Seminar Intelligent Computation in Manufacturing Engineering* Bd. 4. Naples, Italy : CIRP ICME'04, 2004, S. 171–178
- [129] MEHNEN, Jörn ; MICHELITSCH, Thomas ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; SCHMITT, Karlheinz: Evolutionary Optimization of Mould Temperature Control Strategies: Encoding and Solving the Multiobjective Problem with Standard Evolution Strategy and Kit for Evolutionary Algorithms. In: *Journal of Engineering Manufacture (JEM)* 218 (2004), Nr. B6, S. 657–665. <http://dx.doi.org/10.1243/0954405041167130>. – DOI 10.1243/0954405041167130
- [130] 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>
- [131] MEHNEN, Jörn ; MICHELITSCH, Thomas ; LASARCZYK, Christian W. G. ; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas: Multiobjective Evolutionary Design of Mold Temperature Control using DACE for Parameter Optimization. In: PFÜTZNER, H. (Hrsg.) ; LEISS, E. (Hrsg.): *Proceedings Twelfth International Symposium Interdisciplinary Electromagnetics, Mechanics, and Biomedical Problems (ISEM 2005)* Bd. L11-1. Vienna, Austria : Vienna Magnetics Group Reports, 2005, S. 464–465
- [132] MEZURA-MONTES, Efrén ; COELLO, Carlos A. C.: Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: Past, present and future. In: *Swarm and Evolutionary Computation* 1 (2011), Nr. 4, 173 - 194. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2011.10.001>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2011.10.001>. – ISSN 2210–6502
- [133] MIETTINEN, K.: *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999
- [134] MONTGOMERY, D. C.: *Design and Analysis of Experiments*. 5th. New York NY : Wiley, 2001
- [135] MORAGLIO, Alberto ; KATTAN, Ahmed: Geometric Generalisation of Surrogate Model Based Optimisation to Combinatorial Spaces. In: *Proceedings of the 11th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Berlin, Heidelberg, Germany : Springer, 2011 (EvoCOP'11). – ISBN 978–3–642–20363–3, S. 142–154
- [136] MORAGLIO, Alberto ; KATTAN, Ahmed: Geometric Surrogate Model Based Optimisation for Genetic Programming: Initial Experiments / University of Birmingham. 2011. – Forschungsbericht
- [137] MORAGLIO, Alberto ; KIM, Yong-Hyuk ; YOON, Yourim: Geometric Surrogate-based Optimisation for Permutation-based Problems. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (GECCO '11). – ISBN 978–1–4503–0690–4, 133–134

- [138] PAPAGEORGIOU, M. ; LEIBOLD, M. ; BUSS, M.: *Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. Springer Berlin Heidelberg, 2012 <http://books.google.de/books?id=TdFRAAAACAAJ>. – ISBN 9783540340126
- [139] PARR, JM ; KEANE, AJ ; FORRESTER, Alexander I. ; HOLDEN, CME: Infill sampling criteria for surrogate-based optimization with constraint handling. In: *Engineering Optimization* 44 (2012), Nr. 10, S. 1147–1166
- [140] PONWEISER, Wolfgang ; WAGNER, Tobias ; BIERMANN, Dirk ; VINCZE, Markus: Multiobjective Optimization on a Limited Budget of Evaluations Using Model-Assisted -Metric Selection. In: *PPSN*, 2008, S. 784–794
- [141] REGIS, Rommel G.: Constrained optimization by radial basis function interpolation for high-dimensional expensive black-box problems with infeasible initial points. In: *Engineering Optimization* 46 (2014), Nr. 2, S. 218–243
- [142] ROUSTANT, Olivier ; GINSBOURGER, David ; DEVILLE, Yves: DiceKriging, DiceOptim: Two R packages for the analysis of computer experiments by kriging-based metamodeling and optimization. In: *Journal of Statistical Software* (2010). <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/49/94/75/PDF/DiceJSS.pdf>
- [143] SALTELLI, A. (Hrsg.): *Sensitivity Analysis*. Chichester, U.K. : Wiley, 2000
- [144] SALTELLI, A. ; RATTO, M. ; ANDRES, T. ; CAMPOLONGO, F. ; CARIBONI, J. ; GATELLI, D. ; SAISANA, M. ; TARANTOLA, S.: *Global Sensitivity Analysis*. Wiley, 2008
- [145] SASENA, Michael ; PAPALAMBROS, Panos ; GOOVAERTS, Pierre ; PAPALAMBROS, Michael Sasena P.: Global Optimization of Problems with Disconnected Feasible Regions via Surrogate Modeling. In: *In: 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and*, 2002, S. 2002–5573
- [146] STRAUSS, Karl: *Kraftwerkstechnik*. Springer-Verlag Berlin, 2009
- [147] VOUTCHKOV, I. ; KEANE, A.J. ; BHASKAR, A. ; OLSEN, Tor M.: Weld sequence optimization: The use of surrogate models for solving sequential combinatorial problems. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 194 (2005), Aug, Nr. 30-33, 3535-3551. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2005.02.003>. – DOI 10.1016/j.cma.2005.02.003
- [148] 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
- [149] 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
- [150] 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
HDMAEA	Hierarchical, distributed metamodel-assisted evolutionary algorithm
HMO	Hierarchischen Mehrkriteriellen Optimierung
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
SPO	Sequentielle Parameteroptimierung
SPOT	Sequential Parameter Optimization Toolbox
STEPS	Sustainable Technologies and Computational Services for Environmental and Production Processes
SUMO	SURrogateMOdeling Lab

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt beim Autor.