Dirk Roos | Prof. Dr.-Ing.

Institutsleiter • Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen
Hochschule Niederrhein
☎ +49 (0) 2151 822 5075 • ✉ dirk.roos@hs-niederrhein.de

curriculum vitæ

Berufliche Tätigkeit

Institutsleiter — **Krefeld**
IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen — *seit 12/2016*
Hochschule Niederrhein

Professor für Computersimulation und Design Optimization — **Krefeld**
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik — *seit 03/2011*
Hochschule Niederrhein

Head of Robust Design Optimization — **Weimar**
DYNARDO Dynamic Software and Engineering GmbH — *07/2002 – 02/2011*

Technical Solutions Specialist — **Grafing b. München**
CADFEM GmbH — *07/2000 – 12/2008*
Gesellschaft für computerunterstützte Konstruktion und Berechnung mbH

Wissenschaftlicher Mitarbeiter — **Weimar**
Bauhaus-Universität — *06/1996 – 06/2000*
Institut für Strukturmechanik (Prof. Christian Bucher)
Fakultät Bauingenieurwesen

Lehrbeauftragter — **Weimar**
Hochschule für Architektur und Bauwesen (Universität) — *10/1995 – 05/1996*
Lehrstuhl für Baustatik (Prof. Gerhard Burkhardt)
Fakultät Bauingenieurwesen

Tragwerksplaner (Statiker) — **Weimar**
Ingenieurbüro Bauen GmbH — *05/1995 – 05/1996*
Prof. Dr.-Ing. Schmidt und Partner GmbH

Schul- und Hochschulbildung

Bauhaus-Universität — **Weimar**
Promotion, Thema der Dissertation: — *06/1996 – 01/2002*
Approximation von Grenzzustandsfunktionen
zur Sicherheitsbewertung nichtlinearer Strukturen

Hochschule für Architektur und Bauwesen (Universität) — **Weimar**
Dipl.-Ing., Bauingenieurwesen — *10/1989 – 09/1994*
Studienrichtung „Konstruktiver Ingenieurbau - Strukturmechanik“

Ehrungen und Mitgliedschaften

Mitglied des Scientific Committee
International Probabilistic Workshop *seit 2017*

Mitgliedschaft im Graduierteninstitut **Bochum**
für angewandte Forschung der Fachhochschule in NRW *seit 2017*
Fachgruppe Digitalisierung in Wirtschaft und Gesellschaft

Wissenschaftliches Mitglied des Forschungsnetzwerks **BMWi**
Energiesystemanalyse *seit 2017*
Energiewende-Plattform, Forschung und Innovation

Wissenschaftliches Mitglied des Forschungsnetzwerks **BMWi**
Flexible Energieumwandlung *seit 2017*
Energiewende-Plattform, Forschung und Innovation

Gutachter **Köln**
AiF Forschung - Technik - Kommunikation GmbH *seit 2017*

Co-Session-Chair
ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition *seit 2017*
Design Optimization and Probabilistic Modelling

Mitglied des Forschungsverbundes **BMWi**
AG Turbo *seit 2015*
COORETEC-Strategie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

Mitglied im Gremium
ATOL - Arbeitsgemeinschaft Toleranzmanagement *seit 2013*

optiSLang Award 2012 **Weimar**
Weimar Optimization and Stochastic Days *2012*
DYNARDO Dynamic Software and Engineering GmbH

Berater für Robust-Design-Optimierung **Robert Bosch GmbH**
Rahmenforschungsvertrag für alle deutschen Standorte *seit 2011*

Erstbetreute Promotionen seit 2014

Probabilistische Analyse von Turbomaschinen **RWTH Aachen**
unter Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen *seit 07/2016*
Kooperative Promotion zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Stefan Reh, DLR, Institut für Werkstoff-Forschung

Methoden der effizienten zuverlässigkeitsbasierten **Ruhr-Universität Bochum**
Mehrzieloptimierung in der Elektromotorenentwicklung *seit 12/2014*
Kooperative Promotion zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Tamara Nestorović, Institut für Computational Engineering

Varianz- und zuverlässigkeitsbasierte Mehrzieloptimierung **RWTH Aachen**
Forschungsschwerpunkt „Probabilistic Design" der Siemens AG, Energy Sector *seit 01/2014*
Kooperative Promotion zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Stefan Reh, DLR, Institut für Werkstoff-Forschung

Zweitbetreute Promotionen seit 2013

Stochastischen Analyse und Modellvalidierung im Tunnelbau **Ruhr-Universität Bochum**
SFB 837 – Interaktionsmodelle maschineller Tunnelbau *seit 10/2013*
Kooperative Promotion zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Tamara Nestorović, Institut für Computational Engineering

Öffentlich geförderte Drittmittelprojekte an der Hochschule Niederrhein (seit 03/2011)

Verbundforschungsprojekt **EU**
im Rahmen des INTEREG-Programms Deuschland-Nederland *01/2017 – 09/2020*
Deutsch-Niederländisches Zentrum für High-Throughput-Formulation

Technology zur intelligenten Formulierungsentwicklung für die Klebstoff, Lack- und Beschichtungsindustrie

- *Eingeworbene, anteilige Drittmittel*: **138.000 €**
- *Projektpartner*
  - Industriepartner: Westdeutsche Farben GmbH, DSM Resins BV, Global Paint Products BV u.a.
  - Hochschulpartnern: Maastricht University, Universiteit Wageningen u.a.
- *Multivariate Statistik und Metamodelle:* Stochastische Versuchsplanung und multivariate Statistik in Kombination mit adaptiven Metamodellen. Optimierung der Hyperparameter zur Erstellung von Metamodellen.
- *Robust-Prozess-Mehrzieloptimierung:* Methodenentwicklung für die varianzbasierten, toleranzrobusten Mehrzieloptimierung mit Metamodellen

Forschungsprojekt **BMWi**
im Rahmen der AGTurbo-Verbundforschung *09/2015 – 08/2018*
Kraftwerksforschungsinitiative COORETEC

Probabilistische Auslegung von Dampfturbinenkomponenten - Robust-Design-Optimierung
- *Eingeworbene Drittmittel*: **213.000 €**
- *Projektpartner*
  - Industriepartner: Siemens AG
  - Hochschulpartnern: RWTH Aachen und der DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft
- *Kooperative Promotion:* mit der RWTH Aachen als universitärer Kooperationspartner
- *Machine Learning:* Deep Gaussian Processes, rekurrente Neuronale Netzwerke, Metamodellselektion bzgl. maximaler Prognosequalität und minimalen Konfidenzbereichen, Adaption der Hypermodellparameter
- *Big Data Analysis:* Kombination rekurrente und Convolutional-Netze mit Deep Gaussian Processes, globaler varianzbasierter Sensitivitätsanalyse, Autoencoder und Karhunen-Loève-Transformation zur Datenkompression und Dimensionsreduktion
- *Robust Design Optimization:* Methodenentwicklung für die zuverlässigkeitsbasierte, toleranzrobuste Mehrzieloptimierung mit Metamodellen

Forschungsprojekt **BMBF**
im Rahmen des BMBF-Förderprogramms *12/2014 – 09/2018*
Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt)

Methoden der effizienten zuverlässigkeitsbasierten Mehrzieloptimierung in der Elektromotorenentwicklung
- *Eingeworbene Drittmittel*: **387.000 €**
- *Projektpartner*
  - Industriepartner: Robert-Bosch-GmbH
  - Hochschulpartner: Ruhr-Universität Bochum
- *Kooperative Promotion:* mit der Ruhr-Universität Bochum als universitärer Kooperationspartner
- *Stochastische Optimierung:* Adaptive Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse. Methodenentwicklung für die zuverlässigkeitsorientierte Mehrzieloptimierung.
- *Pareto-Mehrzieloptimierung:* Methoden der effizienten Mehrzieloptimierung mittels lokaler und globaler Sensitivitätsanalyse

Verbundforschungsprojekt **BMWi, BMU, BMBF**
im Rahmen der Förderinitiative Energiespeicher - *09/2012 – 08/2015*
Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet von Energiespeichertechnologien

Wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien zur Stromspeicherung aus regenerativer Energien
- *Eingeworbene, anteilige Drittmittel*: **220.000 €**
- *Projektpartner*
  - Industriepartnern: Bayer MaterialScience AG, Grillo Werke AG, ThyssenKrupp Uhde GmbH, Zentrum für Brennstoffzellen-Technik GmbH
  - Hochschulpartnern: Technische Universität Clausthal, Universität Duisburg-Essen, Universität des Saarlandes
- *Elektrochemische Simulation:* Modellierung elektrochemischer Vorgänge mittels partieller Differentialgleichungssysteme, Implementation effizienter numerischer Lösungsstrategien
- *Software-Entwicklung:* Softwareentwicklung in der C++-Bibliothek Diffpack
- *Stochastische Modellvalidierung:* System- und Modellidentifikation zur Simulation von Zink-Luft-

Energiespeichern
- *Stochastische Optimierung:* Robust-Prozess-Optimierung der Be- und Endladevorgänge von Zink-Luft-Energiespeichern

Industrielle Forschungstätigkeit (07/2000 – 02/2011)

Industrielle Forschungstätigkeit (DYNARDO GmbH, 07/2002 – 02/2011)

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben **Land Thüringen**
der einzelbetrieblichen Technologieförderung *05/2007 – 04/2010*

Identifikation von Zufallsfeldern mit wenigen stochastischen Parametern für die Robustheitsbewertung und die Zuverlässigkeitsanalyse in der virtuellen Produktentwicklung
- *Finite Elemente:* Geometrisch und physikalisch nichtlineare finite Volumen- und Schalenelemente für die Umformsimulation
- *Stochastische Felder:* Modellierung räumlich korrelierter Unsicherheiten in der Umformsimulation und in der Crash-Berechnung.
- *Software-Entwicklung:* Software-Entwicklung des Programms „RandomFieldSLang“

Industrielles Forschungsprojekt **AIF**
im Rahmen von PRO INNO II *05/2006 – 12/2009*
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen

Robust Design Optimization
- *CAE-gestützte Parameteroptimierung und Zuverlässigkeitsanalyse:* Entwicklung effizienter adaptiver Antwortflächenverfahren.
- *Robuste Design-Optimierung:* Methodenentwicklung zur robustheitsrelevanten und zuverlässigkeitsbasierten Optimierung
- *Software-Entwicklung:* Softwareentwicklung der C++-Bibliothek „RobustDesignSLang“

Industrielles Forschungsprojekt **ZF Friedrichshafen AG**
im Rahmen einer Forschungskooperation *09/2003 – 05/2005*

Zuverlässigkeit und stochastische Betriebsfestigkeit von Bauteilen und Bauteilgruppen
- *Betriebsfestigkeit:* Schädigungsrelevante Analyse und Lebensdauerberechnungen von Maschinenbauteilen
- *Optimierung:* Topologieoptimierung und multidisziplinäre Parameteroptimierung von Maschinenmodellen
- *Stochastische Strukturmechanik:* Zuverlässigkeitsanalyse der Bauteile und Bauteilgruppen

Industrielles Forschungsprojekt **BMBF**
Verbundforschungsprojekt mit mehreren Industrieunternehmen sowie den *10/2003 – 12/2005*
Universitäten Stuttgart und Karlsruhe

SimCAT - Integration von CA-Techniken zur ganzheitlichen Simulation und Optimierung von Fertigungseinrichtungen vom CAD bis hin zur Hardware-in-the-Loop-Simulation
- *Integrierte Simulationsumgebung:* Abbildung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen durch rechnerbasierte virtuelle Modelle
- *Optimierung:* Topologieoptimierung und multidisziplinäre Parameteroptimierung von Maschinenmodellen (FEM/MKS/MKS+FEM)

Forschungs- und Entwicklungsprojekt **Thüringer Wirtschaftsministerium**
Verbundforschungsprojekt mit dem *07/2002 – 06/2006*
Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar

Entwicklung eines hybriden MKS/FE Solvers für nichtlineare dynamische Aufgabenstellungen
- *Finite Elemente:* Geometrisch und physikalisch nichtlineare finite Volumen- und Schalenelemente für große Verzerrungen und Rotationen, Kopplung von MKS+FEM
- *Numerische Methoden:* Zuverlässigkeit und numerische Stabilisierung von Zeitschrittintegrationsverfahren für die Analyse nichtlinearer kinetischer Finite-Elemente-Strukturen
- *Software-Entwicklung:* Software-Entwicklung des Programms „SPEEDYNE“

Industrielle Forschungstätigkeit (CADFEM GmbH, 07/2000 – 12/2008)

Industrielles Forschungsprojekt **AIF**
Verbundforschungsprojekt mit dem *07/2000 – 04/2003*
Mathematischen Institut der Universität Bayreuth

Entwicklung eines benutzerfreundlichen FE-Tools für die Optimierung der Konstruktion von Massivbauteilen
- *Strukturoptimierung:* Topologie- und Formoptimierung von Finite-Elemente-Strukturen.
- *Software:* Software-Entwicklung des Programms „TopoSLang"

Lehrtätigkeit

Lehrveranstaltungen im eigenen Lehrgebiet **Hochschule Niederrhein**
Computersimulation und Design Optimization *seit 03/2011*
Bachelor- und Masterstudium Maschinenbau und Verfahrenstechnik
- Mathematik I (WS, Bachelor)
- Mathematik II (SS, Bachelor)
- Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung (SS, Bachelor)
- Stochastische Analyse und Versuchsplanung (WS, Master)
- Nichtlineare globale Optimierung (WS, Master)
- Maschinelles Lernen (SS, Master)

Wissenschaftliche Konzeption **Hochschule Niederrhein**
Masterstudiengang Industrie 4.0, BMBF-Projekt: Aufstieg durch Bildung *seit 01/2017*
Wissenschaftliche Weiterbildung und Wissenstransfer für die Region

Wissenschaftliche Weiterbildung **Hochschule Niederrhein**
Robust-Design-Optimierung *seit 04/2016*
in der virtuellen Produkt- und Prozessoptimierung

Wissenschaftliche Weiterbildung **Hochschule Niederrhein**
Machine Learning and Big Data Analysis *ab 10/2018*

Gastvorlesungen **ETH Zürich, TU-Braunschweig, TU-Dresden, TU-Darmstadt**
im Bereich Optimierung und Stochastik *seit 01/2008*

Deutsch- und englischsprachige Seminare und Schulungen
an verschiedenen Industrie- und akademischen Forschungseinrichtungen *seit 07/2002*
- Multidisziplinäre Optimierung und Sensitivitätsanalyse
- Robustheitsanalyse, Zuverlässigkeitsanalyse, Robust-Design-Optimierung und Design for Six Sigma

Veröffentlichungen

Cremanns, K., Roos, D., Hecker, S., Penkner, A., and Musch, C. Robust design optimization of a steam turbine labyrinth seal based on surrogate models. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018*, Oslo, Norway, June 11-158 2018.

Cremanns, K., Penkner, A., Hecker, S., Musch, C., and Roos, D. Steam turbine exhaust optimization based on gaussian covariance networks using transient CFD simulations. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018*, Oslo, Norway, June 11-158 2018.

Cremanns, K. and Roos, D. Deep Gaussian Covariance Network. *ArXiv e-prints*, October 2017.

Bogoclu, C. and Roos, D. Reliability analysis of non-linear and multimodal limit state functions using adaptive Kriging. In *12th International Conference on Structural Safety & Reliability*, ICOSSAR 2017, TU Wien, Vienna, Austria, 6-10 August, 2017.

Roos, D. Latin hypercube sampling based on adaptive orthogonal decomposition. In Papadrakakis, M., Papadopoulos, V., Stefanou, G., and Plevris, V., Editors, *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, ECCOMAS Congress 2016, Crete Island, Greece, 5-10 June, 2016.

Cremanns, K., Roos, D., Hecker, S., Dumstorff, P., and Almstedt, H. Efficient Multi-Objective

Optimization Of Labyrinth Seal Leakage In Steam Turbines Based On Hybrid Surrogate Models. In *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2016: Turbine Technical Conference and Exposition GT2016*, South Korea, Seoul, June 13-17, 2016.

Cremanns, K. and Roos, D. A new optimized moving least square meta model with maximized prognosis. In Papadrakakis, M., Papadopoulos, V., Stefanou, G., and Plevris, V., Editors, *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, ECCOMAS Congress 2016, Crete Island, Greece, 5-10 June, 2016.

Bogoclu, C. and Roos, D. A benchmark of contemporary metamodeling algorithms. In Papadrakakis, M., Papadopoulos, V., Stefanou, G., and Plevris, V., Editors, *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, ECCOMAS Congress 2016, Crete Island, Greece, 5-10 June, 2016.

Vossen, G., Struck, A., and Roos, D. Optimal control for lithium-ion batteries. In *GAMM 86th Annual Scientific Conference of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics*, Lecce, Italy, March 23-27 2015.

Cremanns, K., Lehmkuhl, H., Roos, D., Wanzek, T., Karschnia, D., Seifert, F., Jasper, J., and Rothgang, S. Multi-objective design optimization of an electrical air compressor impeller with subsequent robustness evaluation. In *Proceedings of the ANSYS Conference & 33th CAD-FEM Users' Meeting 2015, International Congress on FEM Technology*, Bremen, Germany, June 24-26, 2015.

Cremanns, K., Lehmkuhl, H., Roos, D., Wanzek, T., Karschnia, D., Seifert, F., Jasper, J., and Rothgangb, S. Multicriteria optimization and robustness evaluation of a radial compressor. In *3rd ECCOMAS Young Investigators Conference of the 6th GACM Colloquium*, RWTH Aachen, Aachen, Germany, July 20-23, 2015.

Vossen, G., Roos, D., and Struck, A. Optimal control for battery management systems. In *EngOpt2014 - 4th International Conference on Engineering Optimization*, Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal, September 8-11 2014.

Cremanns, K., Roos, D., and Graßmann, A. Sequential vs. Multidisciplinary coupled Optimization and efficient Surrogate Modelling of a last Stage and the successive Axial Radial Diffuser in a low Pressure Steam Turbine. In *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014*, Düsseldorf, Germany, June 16-20, 2014.

Cremanns, K., Roos, D., and Graßmann, A. Increased efficiency by optimizing the last stage of a steam turbine. *RDO-Journal*, 2014.

Roos, D., Cremanns, K., and Jasper, T. Probability and variance-based stochastic design optimization of a radial compressor concerning fluid-structure interaction. In Idelsohn, S., Papadrakakis, M., and Schrefler, B., Editors, *V International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (Coupled Problems 2013)*, pages 1475–1501, Santa Eulalia, Ibiza, Spain, June 17-19, 2013.

Harries, S., Palluch, J., and Roos, D. Optimization and Robustness Analysis in Ship Design. *RDO-Journal*, 2013.

Cremanns., K., Roos, D., and Graßmann, A. Conventional partwise optimization vs. multidisciplinary optimization of the last stage of a low pressure steam turbine with an axial radial diffuser. In *Proceedings of the eleventh Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, November 21-22, 2013.

Roos, D. Optimierung und stochastische Analyse in der Fluid-Struktur-Simulation. *DIGITAL Engineering Magazin*, 6:32–35, 2011.

Roos, D. Multi-domain Adaptive Surrogate Models for Reliability Analysis. In Budelmann, H., Holst, A., and Proske, D., Editors, *Proceedings of the 9th International Probabilistic Workshop*, pages 191 – 207. Technical University Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, Germany, November 17-18 2011.

Roos, D., Einzinger, J., and Bayer, V. Robust Design Optimization applied to Structural, Thermal and Fluid Analysis including Manufacturing Tolerances. In *Proceedings of the sixth Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, Oktober 15-16, 2009.

Roos, D. and Hoffmann, R. Successive robust design optimization of an electronic connector. In *Proceedings of the fourth Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, November 20-21, 2008.

Roos, D. and Bayer, V. An efficient robust design optimization approach using advanced surrogate models. In Graubner, Schmidt, P., Editor, *Proceedings of the 6th International Probabilistic Workshop*, Darmstadt, Germany, November 26-27, 2008. Technical University Darmstadt.

Roos, D. Advanced methods of stochastic and optimization in industrial applications. In *Proceedings of the 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Numisheet*, Interlaken,Switzerland, September 1-5 2008.

Bayer, V. and Roos, D. Efficient Modelling and Simulation of Random Fields. In Graubner, Schmidt, P., Editor, *Proceedings of the 6th International Probabilistic Workshop*, Darmstadt, Germany, November 26-27, 2008. Technical University Darmstadt.

Roos, D., Most, T., Unger, J., and Will, J. Advanced surrogate models within the robustness evaluation. In *Proceedings of the fourth Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, November 28-29, 2007.

Egerland, M., Roos, D., and Will, J. Optimization of a fan shroud by ANSYS/DesignModeler and optiSLang. In *Proceedings of the ANSYS Conference & 25th CAD-FEM Users' Meeting 2007, International Congress on FEM Technology*, Dresden, Germany, November 21-23, 2007.

Bayer, V., Roos, D., and Adam, U. Structural Reliability Analysis by Random Field Modeling with Robustness Methods and Adaptive Response Surfaces. In *Proceedings of the CIVIL-COMP2007: The Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Civil Comp Ltd., St. Julians, Malta, September 18-21 2007.

Roos, D., Bucher, C., and Will, J. Speedyne – Fast Approximation Solution for FEM-based Drop Test Applications using hybrid MBS/FE Technology. In *Proceedings of the ANSYS Conference & 24th CAD-FEM Users' Meeting 2006, International Congress on FEM Technology*, Stuttgart, Schwabenlandhalle, Germany, October 25-27, 2006.

Roos, D., Adams, U., and Bucher, C. Robust Design Optimization. In *Proceedings of the third Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, November 23-24, 2006.

Roos, D. and Adams, U. Adaptive Moving Least Square Approximation for the Design Reliability Analysis. In *Proceedings of the third Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, November 23-24, 2006.

Roos, D., Adam, U., and Bucher, C. Robust Design Optimization. In *Proceedings of the ANSYS Conference & 24th CAD-FEM Users' Meeting 2006, International Congress on FEM Technology*, Stuttgart, Schwabenlandhalle, Germany, October 25-27, 2006.

Roos, D., Adam, U., and Bayer, V. Design Reliability Analysis. In *Proceedings of the ANSYS Conference & 24th CAD-FEM Users' Meeting 2006, International Congress on FEM Technology*, Stuttgart, Schwabenlandhalle, Germany, October 25-27, 2006.

Bayer, V. and Roos, D. Non-parametric Structural Reliability Analysis using Random Fields and Robustness Evaluation. In *Proceedings of the third Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, November 23-24, 2006.

Will, J., Roos, D., Riedel, J., and C., B. Combination of optimization and robustness evalutation from practical point of view. In *Proceedings of the NAFEMS Seminar on Optimization in Structural Mechanics*, Wiesbaden, Germany, April 27 - 28 2005.

Roos, D. and Bucher, C. Robust Design and Reliability-based Design Optimization. In *Proceedings of the NAFEMS Seminar on Optimization in Structural Mechanics*, Wiesbaden, Germany, April 27 - 28 2005.

Unger, J. and Roos, D. Investigation and benchmark of algorithms for reliability analysis. In *Proceedings of the first Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, December 2-3, 2004.

Roos, D., Groth, C., Junk, A., and Brinkmann, D. Optimierung und Sensitivitätsanalyse zur Parameteridentifikation in der numerischen Simulation der Gefügekinetik im Schweißprozess. In *Proceedings of the ANSYS Conference & 22th CAD-FEM Users' Meeting 2006, International Congress on FEM Technology*, Dresden, International Congress Center Dresden, Germany, November 12-14, 2004.

Roos, D. and Bucher, C. Methoden der stochastischen Optimierung. In *Proceedings of the first Weimar Optimization and Stochastic Days*. Weimar, Germany, December 2-3, 2004.

Will, J., Roos, D., Riedel, J., and Bucher, C. Robustheitsbewertung in der stochastischen Strukturmechanik. In *Proceedings of the NAFEMS Seminar on Use of Stochastics in FEM Analyses*, Wiesbaden, Germany, May 7 - 8 2003.

Roos, D., Nelz, J., Grosche, A., and Stoll, P. Workflow-Konzepte zum benutzerfreundlichen, robusten und sicheren Einsatz automatischer Optimierungsmethoden. In *Proceedings of 21th CAD-FEM Users' Meeting 2003, International Congress on FEM Technology*, Potsdam, Germany, November 12-14, 2003.

Roos, D. and Bucher, C. Adaptive Response Surfaces for Structural Reliability of Nonlinear Finite Element Structures. In *Proceedings of the NAFEMS Seminar: Use of Stochastics in FEM Analyses*, Wiesbaden, Germany, May 7 – 8 2003.

Roos, D., Will, J., and Vogel, F. TopoSLang 1.0 - A Software Package for Structural Optimization of Solid Components, Biological Growth Strategies and Mesh Smoothing. In *Proceedings of 20th CAD-FEM Users' Meeting 2002, International Congress on FEM Technology*, Friedrichshafen, Lake Constance, Germany, October 9-11, 2002.

Roos, D. Approximation und Interpolation von Grenzzustandsfunktionen zur Sicherheitsbewertung nichtlinearer Finite-Elemente-Strukturen. Dissertation. In *Mitteilungen des Instituts für Strukturmechanik, Nr. 02-1*. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Germany, 2002.

Roos, D., Will, J., and Vogel, F. Structural Optimization of Solid Components with Topology Optimizing Structural Language. In *Proceedings of 19th CAD-FEM Users' Meeting 2001, International Congress on FEM Technology*, Potsdam, Germany, October 17-19, 2001.

Roos, D. and Bucher, C. An Adaptive Response Surface Method using Weighted Radii. In *8th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Newport Beach, California, USA, June 17-21, 2001.

Roos, D. Adaptive Approximation von Grenzzustandsflächen zur Sicherheitsbewertung nichtlinearer Strukturen. In *Mitteilungen des Instituts für Strukturmechanik, Nr. 00-1*. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Germany, 2000.

Macke, M., Roos, D., and Riedel, J. An Adaptive Response Surface Method Utilizing Error Estimates. In Kareem, A., Haldar, A., B.F. Spencer, J., and Johnson, E., Editors, *8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*, Notre Dame, Indiana, USA, July 24-26, 2000.

Bucher, C., Hintze, D., and Roos, D. Advanced Analysis of Structural Reliability Using Commercial FE-Codes. In *ECCOMAS 2000: European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Spain, September, 2000.

Roos, D., Bucher, C., Beucke, K., and Grosche, A. Probabilistic numerical analysis based on a component software model. In Melchers, R. and Stewart, M., Editors, *European Conference on Computational Mechanics*, München, Germany, August 31 – September 3, 1999.

Roos, D., Bucher, C., and Bayer, V. Polyhedral response surfaces for structural reliability assessment. In Melchers, R. and Stewart, M., Editors, *Proc. International Conference on Applications of Statistics and Probability, 12-15 December 1999*, pages 109 – 115. Balkema/Rotterdam/Brookfield, Sydney, Australia, 1999.

Bucher, C., Hintze, D., and Roos, D. Stochastics and Finite Elements - Challenges and Chances. In *Proceedings of 17th CAD-FEM Users' Meeting 1999, International Congress on FEM Technology*, Sonthofen (Allgäu), Germany, October 6-8, 1999.

Roos, D. Lineare Stabilitätsanalyse der Kreiszylinderschale unter Axialdruck. In *Mitteilungen des Instituts für Strukturmechanik, Nr. 98-2*. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Germany, 1998.

Roos, D. Transformation lokaler Rotations-Freiheitsgrade eines gekrümmten isoparametrischen Schalenelementes. In *Mitteilungen des Instituts für Strukturmechanik, Nr. 97-1*. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Germany, 1997.

Köppler, H., Roos, D., and Burkhardt, G. Zur Berechnung vielschichtiger Schalen mit orthotropen Schichten. In *Internationales Kolloquium über die Anwendung der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen*, Weimar, Germany, February 26 - March 1, 1997. Bauhaus-Universität Weimar.

Forschungthemen

Einleitung

Eine ureigenste Aufgabe einer u.a. natur- und wirtschaftswissenschaftlich ausgerichteten akademischen Forschungseinrichtung ist sowohl die angewandte wissenschaftliche Entwicklung von neuen innovativen Techniken, Verfahren, Produkten und Prozessen mit unmittelbarem Nutzungs-, Verwertungs- und Marktbezug als auch die grundlagenorientierte Forschung für eine ressourcen- und umweltschonende Entwicklung einer wettbewerbsfähigen Wirtschaft.
In meinen laufenden Forschungsaktivitäten werden u.a. einerseits mathematische Methoden erforscht und weiterentwickelt und anderseits an unterschiedlichen Anwendungsbereichen der Luft- und Raumfahrt, des Schiffbaus, des Turbomaschinenbaus, der Speichertechnologien, der Elektromotorenentwicklung und der chemischen Verfahrenstechnik erprobt. Die erfolgreiche Erforschung und Weiterentwicklung komplexer Algorithmen und Lösungsstrategien mit breitem transdisziplinären Anwendungspotential gelingt mir in einer intensiven, interdisziplinären Forschungskooperation mit herausragenden universitären, wissenschaftlichen und industriellen Partnern.
Zentrale Themen meiner aktuellen Forschungsarbeit sind die Entwicklung mathematischer Methoden der stochastischen Struktur- und Strömungssimulation, der Modellierung und der Finite-Elemente-Analyse von Zufallsfeldern und partieller stochastischer Differentialgleichungen, der Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalyse innerhalb der Sicherheitstheorie, des maschinellen Lernens, der multidisziplinären Optimierung sowie die Numerik und Softwareentwicklung für die Entwicklung und Risikobewertung komplexer Systeme unter Berücksichtigung großer Datenmengen in den folgenden Technologien

- Industrie 4.0
- Cyber-physische Syteme
- Digital Twins
- Machine Learning
- Datenbasierte Optimierung
- Big Data Analysis

und den folgenden industriellen Anwendungsbereichen:

- Flexibilisierung der Kraftwerke, Energieeffizienz
- Erneuerbare Energien

- Speichertechnologien
- Turbomaschinen
- Automobilität
- Luft- und Raumfahrt
- Schifffahrt
- Medizintechnik

in Kooperation mit zahlreichen Partnern aus Universitäten sowie zahlreichen Industrie- und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, wie z.B.:

- Hochschulen: RWTH Aachen, Ruhr-Universität Bochum, Technische Universität Braunschweig, Technische Universität Dresden, Leibniz Universität Hannover, TU-Darmstadt
- Forschungseinrichtungen: DLR Köln
- Unternehmen: Robert Bosch GmbH, Siemens AG, Rheinmetall Automotiv, Rolls-Royce Deutschland, DNV GL, M.TEC GmbH, DYNARDO GmbH, Friendship Systems

Cyber-Physische-Systeme und digitale Zwillinge

Ein strategisches Ziel der Hightech-Strategie 2020, welches gleichsam ein Leitthema der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie darstellt, ist die Erforschung von Schlüsseltechnologien für die digitale Wirtschaft und Gesellschaft. Voraussetzung für das Erreichen dieses Zieles ist die praxisnahe Kombination mathematischer Grundlagenforschung mit der Produkt- und Prozessentwicklung z.B. durch die Nutzung effizienter Algorithmen für die Analyse großer Datenmengen zur ressourcenschonenden und energieeffizienten Produkt- und Prozessoptimierung. Mit den Begriffen Digitalisierung und Industrie 4.0 werden Grundlagenforschung und Produktentwicklung sowie Produktion eng mit den modernen Informations- und Kommunikationstechnologien verknüpft. Technische Grundlage für das Zusammenwachsen von realer und virtueller Welt sind intelligente, vernetzte Systeme, mit denen digitale Entwicklungsprozesse sowie Analyse und Optimierung großer Datenmengen in Echtzeit möglich sind.
Auf der Basis so genannter Cyber-Physischer-Systeme (CPS) entwickelt das IMH dynamische, echtzeitfähige und selbstorganisierende Wertschöpfungsketten, die sich nach verschiedenen Zielgrößen, wie beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit, Energie- und Ressourcenverbrauch, Flexibilität, Durchlaufzeit etc. optimieren lassen. CPS können über Softwarewerkzeuge Informationen und Wissen aus realen Zustands- und Prozessdaten nutzen und über anwendungsspezifische Engineering-Applikationen ein digitales, virtuelles Abbild der physikalischen Systeme simulieren. Jede Änderung einer Komponente kann dabei in das virtuelle Abbild zurückgespielt werden. Somit bekommen physische Produkte ein zugeordnetes, numerisches Modell, das im Aktionsfeld Industrie 4.0 auch als digitaler Zwilling (engl. Digital Twins) bezeichnet wird. CPS können in Komponenten, Maschinen und Anlagen integriert werden, die sich durch Selbstoptimierung und Rekonfiguration an sich ändernde Betriebsbedingungen anpassen können.

Big Data Analysis

Das reale, physikalische System erzeugt im tatsächlichen Betrieb über Sensoren Werte für die Datenanalyse im digitalen Modell, die wiederum über die datenbasierte Optimierung den Betriebsprozess beeinflusst. Zudem lassen sich über Echtzeitdaten von Sensoren standortunabhängig Informationen über den Zustand des physikalischen Systems abrufen, so dass auch die Vorhersage von Fehlfunktionen möglich wird. In den Anwendungsszenarien der Industrie 4.0 fallen große Datenmengen (Big Data) an. Komponenten und Maschinen werden mit zusätzlicher Sensorik und leistungsfähigeren Steuerungen ausgestattet. In den Forschungsprojekten des IMH werden Algorithmen entwickelt, damit Daten nicht nur gesammelt, sondern intelligent miteinander verknüpft und analysiert werden können, um relevante Zusammenhänge herzustellen, Schlüsse zu ziehen - und das in vielen Anwendungsfällen in Echtzeit.

Machine-Learning-Algorithmen und stochastische Optimierungsverfahren

Als Schlüsseltechnologie für die Entwicklung von CPS gilt das maschinelle Lernen (engl.: Machine Learning). Das IMH befasst sich innerhalb des Machine Learnings u.a. mit der automatisierten Entwicklung von Metamodellen basierend auf empirischen Daten bzw. Trainings-Daten. Statt teurer Prototypen und langwieriger Versuchsketten lassen sich so mit Digital Twins anhand von Machine-Learning-Algorithmen datenbasierten Optimierungen innerhalb kürzester Zeit durch-

spielen, Lösungsstrategien entwickeln und verwerfen, Verbesserungsmöglichkeiten ausloten und umsetzen.
Mit Machine-Learning-Algorithmen und stochastischen Optimierungsverfahren, die in den Forschungsprojekten des IMH entwickelt werden, können intelligente Wertschöpfungsketten realisiert werden, die zudem alle Phasen des Lebenszyklus des Produktes mit einschließen - von der Idee eines Produkts über die Entwicklung, Fertigung, Nutzung und Wartung bis hin zum Recycling. Ferner kann eine schnelle Umsetzung von Kundenanforderungen über Cloud-Systeme und eine bedarfssynchrone Entwicklung bei individualisierter Produktion in immer kürzeren Produktzyklen zu niedrigeren Kosten ressourcenschonend und nachhaltig realisiert werden.
Für eine effiziente, multidisziplinäre, datenbasierte Optimierung werden heute im Wesentlichen Metamodellierungsverfahren des Machine Learnings (ML) entwickelt. Die Systemantworten werden dabei auf einem Satz von Versuchsdaten oder Analysen des CPS mittels Metamodelle approximiert bzw. interpoliert.
In eigenen Forschungsergebnissen konnte mittels eines anisotropen, inhomogenen ML-Verfahrens in Kombination mit adaptiven Designplänen gezeigt werden, dass ML-Meta-Modelle sehr effizient auch für die stochastische Analyse der Sicherheit und Zuverlässigkeit und damit für die stochastische Optimierung komplexer technischer Systeme verwendet werden können.
Durch maschinelles Lernen können große Datenmengen aber nur für wenige Mess- bzw. Ergebnisgrößen in Beziehung gesetzt und wichtige lineare Einflussparameter identifiziert werden, da die Algorithmen der Metamodellierung und Sensitivitätsanalyse sehr rechenzeitintensiv sind. Somit sind die herkömmlichen Algorithmen des Machine Learnings und der Big Data Analysis nicht für eine nichtlineare, multivariate Parameteridentifikation und für zeit- bzw. ortsabhängige Mess- bzw. Ergebnisgrößen geeignet, da die Analyse für jeden zeit- bzw. ortsdiskretisierten Wert, z.B. für bis zu mehrere Millionen Mess- bzw. Ergebnispunkte, durchgeführt werden müsste. In bereits beantragten Forschungsprojekten sollen effiziente ML-Algorithmen entwickelt werden, um sowohl zeit- als auch ortsabhängige Big-Data-Analysen zu ermöglichen.

Künstliche Neuronale Netzwerke

Eines der oft genutzten Verfahren im Bereich des ML sind neuronale Netze (NN). Durch die verhältnismäßig einfachen, mathematischen Operationen sind diese Verfahren auch für Big-Data-Anwendungen geeignet. NN lassen sich gut auf CPU- bzw. GPU-basierten Hardwareplattformen parallelisieren und durch sogenanntes Batch oder Online Learning für beliebig große Datenmengen anwenden. Beim Batch Learning werden die Daten in Pakete aufgeteilt und die Hyperparameter des NN nach der Auswertung jedes einzelnen Paketes angepasst. Beim Online Learning erfolgt die Anpassung nach jedem einzelnen Datenpunkt, so dass fortlaufend das Model an neuen Trainingsdaten angepasst werden kann. Dabei ist die Abarbeitung der Datenpakete und somit das verteilte Lernen parallel möglich, z.B. durch die Aufteilung auf verschiedenen Rechenknoten eines Clusters. NN können komplexe Zusammenhänge darstellen und lassen sich auf die verschiedensten Anwendungsgebiete anpassen. So sind beispielsweise rekurrente und long short-term memory (LSTM) Netze für sequentiell abhängige Daten (Zeitreihen, Sprache, Text) besonders gut geeignet. Convolutional neural networks sind Netzwerke die sich für Audio- und Bild-Daten eignen und z.B. bei der Bilderkennung und im autonomen Fahren verwendet werden. Eine der Schwächen von neuronalen Netzen liegt in der Gefahr des Overfitting bei sehr kleinen Datensätzen, sowie einer häufig schlechteren Prognosequalität im Vergleich zu anderen Methoden. Darüber hinaus ist die Auswahl der Netztopologie und der Aktivierungsfunktionen, die für die nicht-lineare Datentransformation sorgen, sowie die Initialisierung der Hyperparameter entscheidend für die Performance des Meta-Models und müssen in den meisten Fällen aus notwendigem Expertenwissen generiert werden.

Gaußprozesse

Gaußprozesse (GP) stellen ein weiteres Verfahren aus dem Bereich des ML dar. Sie eignen sich insbesondere im Bereich der Regression auch für minimale Datensätze. Sie übertreffen in den meisten Fällen die Prognosegenauigkeit vieler anderer Verfahren. Zudem ermöglichen GP die Abschätzung der Varianz der Vorhersage, welche dazu genutzt werden kann, Konfidenzintervalle und -bereiche zu berechnen. Dies erhöht die Zuverlässigkeit der Algorithmen hinsichtlich der An-

gabe einer Fehlerwahrscheinlichkeit und der Prognosequalität der gefundenen Lösung. Aufgrund der komplexen mathematischen Operationen ist die Anwendung der GP auf große Datenmengen im Vergleich zu NN wesentlich rechenzeitintensiver.
In eigenen Forschungsarbeiten wurde mithilfe von Dimensionsreduzierungsmethoden gezeigt, dass auch mit minimalen Datensätzen erfolgreich Vorhersagemodelle gebildet werden können. Neben der Untersuchung anderer Verfahren des ML wurden neue Entwicklungen von anisotropen GP an verschiedenen Beispielen aus dem Turbomaschinenbau und der Elektromobilität erfolgreich eingesetzt. Dabei konnte gezeigt werden, dass diese auch dann eine hohe Prognosegüte liefern, wenn nur eine geringe Anzahl an Trainingspunkten verwendet werden kann. In einer weiteren Forschungsarbeit wurde erprobt, wie sich verschiedene ML-Modelle miteinander lokal kombinieren lassen. Basierend auf dem Cross-Validierungsfehler und abgeleiteter Konfidenzbereiche wurde die Prognose der einzelnen Modelle gewichtet, abhängig von der Lage des zu approximierenden Datenpunktes im Designraum. Diese Vorgehensweise würde sich ebenfalls für die Kopplung von Approximations- und physikalischen Modellen eignen.

Kovarianznetzwerke

In zukünftigen Forschungsschwerpunkten des IMH soll u.a. herausgefunden werden, wie sich die positiven Eigenschaften von NN mit denen der GP kombinieren lassen, z.B. durch die Nutzung der GP als Aktivierungsfunktion innerhalb des NN. Erste Arbeiten in diese Richtung wurden kürzlich veröffentlicht. Bei sogenannten Deep Gaussian Processes werden mehrere GP hintereinandergeschaltet. Dabei wird, wie bei NN, eine Netztopologie aufgebaut.
Weiterhin sollen diese sogenannten Kovarianznetzwerke mit rekurrenten und Convolutional-Netzen kombiniert werden. Durch die Kombination von GP und NN sollen die Vorteile der Algorithmen, z.B. die gleichzeitige Verwendbarkeit von kontinuierlichen und diskreten Parametern, bestehen bleiben und deren Nachteile, z.B. bzgl. der beschränkten Anwendbarkeit auf minimale Datensätze, eliminiert werden. Darüber hinaus soll diese Kombination auch für zeitabhängige Ausgangsgrößen effizient anwendbar gemacht werden. Ein weiterer Aspekt betrifft die Aufbereitung der Daten bzw. auch die intelligente Reduzierung der Dimensionen, sowie der Datenpunkte. Beispielsweise kann in vielen Anwendungsfällen mit Hilfe einer Hauptkomponenten-Analyse die Anzahl der notwendigen Dimensionen reduziert werden. Alternativ sollen auch Autoencoder verwendet werden, um eine nicht-lineare Kompression der Dimensionen durchzuführen. Dies würde u.U. zu einer Verbesserung der Qualität der Eingabedaten führen und die Flexibilität gegenüber sich verändernden Datendimensionen steigern.

Lehre

Industrie 4.0 und die damit einhergehende Digitalisierung sind zwei wesentliche Erfolgsfaktoren und treibende Kräfte für die Zukunftsfähigkeit von Unternehmen. Es besteht ein hoher Bedarf an grundlagenorientiert und gleichzeitig praxisnah ausgebildeten akademischen Fachkräften in diesen Bereichen. Der moderne virtuelle Entwicklungsprozess ist ohne den Einsatz numerischer Verfahren der Stochastik in Verbindung mit der Optimierung nicht mehr denkbar. Diese Verfahren setzen das Verständnis von abstrakten mathematischen Modellen voraus. In den Vorlesungen und begleitenden Übungen wird die Allgemeingültigkeit dieser Modelle und damit die möglichen Einsatzgebiete in allen Naturwissenschaften deutlich gemacht. Am Ende des Bachelor- bzw. Master-Studiums sollen die vermittelten numerischen Verfahren in praktischen Analysen für den virtuellen Entwicklungsprozess angewendet und vertieft werden.
Das Hauptziel der Lehre innerhalb des Bachelor- und Masterstudiums in dem Fachgebiet „Computersimulation und Design Optimization“ ist die Vermittlung der mathematischen Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung, der Statistik sowie eine Einleitung in die Datenanalyse großer Datenmengen, des maschinellen Lernens und der numerischen Optimierung vor. Zentrale Themen bilden die stochastische Modellierung von Einwirkungen und Unsicherheiten sowie die Analyse der Sicherheit, der Zuverlässigkeit und des Risikos von mechanischen Strukturen, Prozessen und technischen Systemen.
Der Master-Studiengang sieht ein vertiefendes Studium auf dem Gebiet der Robustheits-, Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse, der Modellvalidierung und weiterhin der stochastischen Optimierung vor. Im Master-Studium werden die aktuellen Forschungsergebnisse möglichst zeitgleich an die

Studierenden weitergegeben, damit die Möglichkeit zu aktiver Mitarbeit an der Forschung geboten wird. Darauf aufbauende Themen sind die Modellierung und Analyse von Zufallsfeldern und stochastischen Prozessen, die stochastische Finite-Elemente-Methode sowie die Numerik und Software-Entwicklung für die Behandlung solcher komplexer Aufgabenstellungen der Ingenieur- und Naturwissenschaften.
Die Mathematik bildet als Querschnittswissenschaft eine Brücke zwischen allen Naturwissenschaften und der Informatik. Im Vordergrund stehen dabei Algorithmen, die für ein breites ingenieur- und naturwissenschaftliches Anwendungsspektrum eingesetzt werden können. Schwerpunkte in den Bachelor- und Master-Studiengängen sind Projekt- bzw. Abschlussarbeiten, in denen konkrete Aufgaben aus den Naturwissenschaften und vorzugsweise in Verbindung mit verschiedenen Industriebereichen, bis hin zu einer fertigen Software-Lösung bearbeitet werden.
Die Studierenden werden befähigt, komplexe Aufgaben mathematisch zu modellieren und mit numerischen Methoden zu lösen und das Wesen von Lösungen zu untersuchen. Die Studierenden erwerben Methodenkompetenz für einen sicheren Umgang mit numerischen Methoden für den virtuellen Entwicklungsprozess und können diese Methoden auf dem Rechner mit der Programmiersprache Python und MATLAB umsetzen und die Ergebnisse bewerten sowie kritisch hinterfragen.

1 Wahrscheinlichkeitstheorie

- Stochastische Modellierung
  - Wahrscheinlichkeitsräume
  - Wahrscheinlichkeitsmaße
  - Zufällige Ereignisse
  - Zufallsexperiment
- Ereignisalgebra
  - Ergebnismenge
  - Gesamtheit der Ergebnismenge
  - Teilmengen
  - Elementarereignisse
  - Ergebnismenge
- Zufallszahlen
- *Laplace*-Experimente
- Absolute Häufigkeit
- Relative Häufigkeit
- Definition der Wahrscheinlichkeit
  - Definition nach *Laplace*
  - Axiome nach *Kolmogoroff*
- Bedingte Wahrscheinlichkeit und Unabhängigkeit
  - Die bedingte Wahrscheinlichkeit
  - Multiplikationssatz
  - Unabhängigkeit von Ereignissen
- Mehrstufige Zufallsexperimente
  - Baumdiagramme
  - Ereignisbäume
  - Formel der totalen Wahrscheinlichkeit
  - *Bayes'sche* Formel
- Gesetz der großen Zahlen
- Zentraler Grenzwertsatz
- Zufallsvariable
- Verteilungsfunktion einer Zufallsvariable
- Wahrscheinlichkeitsverteilung für diskrete Zufallsvariablen
- Wahrscheinlichkeitsverteilung für stetige Zufallsvariablen
- Funktionalparameter
  - Lageparameter
    - Mittel- bzw. Erwartungswert
    - Median- oder Zentralwert
    - Modalwert
    - Quantilwerte
  - Streuungsparameter
    - Varianz
    - Standardabweichung
    - (Inter-)Quartilabstand
  - Formparameter
    - Schiefe
    - Wölbung bzw. Exzess
- Diskrete Verteilungen
  - Gleichverteilung
  - Binomialverteilung
  - Hypergeometrische Verteilung
  - Poisson-Verteilung
  - Geometrisch Verteilung
  - Negative Binomialverteilung
- Stetige Verteilungen
  - Gleichverteilung
  - Allgemeine Normalverteilung
  - Standardnormalverteilung
  - Logarithmische Normalverteilung
  - Exponentialverteilung
  - *Weibull*-Verteilung
  - Gammaverteilung
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen von mehreren Zufallsvariablen
  - Mittelwertsvektor
  - Kovarianzmatrix
  - Korrelationsmatrix
  - Funktionen von mehreren Zufallsvariablen
    - Summen und Produkte von Zufallsvariablen

- Additionssatz für Mittelwerte
- Multiplikationssatz für Mittelwerte
- Additionssatz für Varianzen
- Stochastisch unabhängige Zufallsvariablen
- Zentraler Grenzwertsatz
- Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Summe von Zufallsvariablen
- Grenzwertsatz von *Moivre-Laplace*

- Diskrete Zufallsvektoren
- Stetige Zufallsvektoren
- Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
- Multivariate Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Copulae)
  - Multivariate *Gaußsche* Normalverteilung
  - Bivariate *Gaußsche* Normalverteilung
  - *Gaußsche* Copula-Methode

2 Statistik

- Deskriptive Statistik
  - Zufallsstichproben aus einer Grundgesamtheit
  - Grundgesamtheit und Stichprobe
  - Stichprobenverfahren
    - Pseudo-Zufallszahlen
    - Erzeugung von Zufallszahlen
    - Monte-Carlo-Simulation
    - Latin-Hypercube-Simulation
  - Häufigkeitsverteilung einer Stichprobe
    - Häufigkeitsfunktion einer Stichprobe
    - Verteilungsfunktion einer Stichprobe
    - Gruppierung der Stichprobenwerte bei umfangreichen Stichproben
    - Histogramm, Punktdiagramm, Box-Plot
  - Kennwerte und Maßzahlen einer Stichprobe
    - Eindimensionale Merkmale
      - Mittelwert
      - Varianz
      - Standardabweichung
      - Variationskoeffizient
    - Mehrdimensionale Merkmale
      - Mittelwertsvektor
      - Vektor der Standardabweichungen
      - Kovarianzmatrix
      - Korrelationsmatrix
- Induktive Statistik
  - Statistische Schätzverfahren
    - Aufgaben der Parameterschätzung
    - Schätzfunktionen und Schätzwerte für die unbekannten Parameter einer Wahrscheinlichkeitsverteilung
      - Schätz- und Stichprobenfunktionen
      - Schätzungen für den Mittelwert
      - Schätzungen für die Varianz
      - Maximum-Likelihood-Methode
      - Güte einer Schätzung
      - Vertrauens- oder Konfidenzintervalle
        - Statistische Sicherheit
        - Vertrauensintervalle für den Mittelwert
        - Vertrauensintervalle für die Varianz
  - Statistiscbe Prüfverfahren
    - Statistische Hypothesen und Parametertests
    - Tests für den unbekannten Mittelwert
    - Tests für die Gleichheit zweier unbekannter Mittelwerte
    - Anpassungs- oder Verteilungstests
      - Aufgaben eines Anpassungs- oder Verteilungstests
      - Chi-Quadrat-Test
- Explorative Statistik
  - Korrelationsanalyse
    - Korrelationskoeffizient einer zweidimensionalen Stichprobe
    - Korrelationskoeffizient einer zweidimensionalen Grundgesamtheit
  - Regressionsanalyse
    - Gaußschen Methode der kleinsten Quadrat
      - Lineare Regression
      - Schrittweise lineare Regression
      - Mehrfache lineare Regression
      - Rangtransformiert lineare Regression
      - Nichtlineare Regression
    - Bestimmtheitsmaße
    - Wichtigkeitsmaße
    - Verallgemeinertes Bestimmtheitsmaß
    - Prognosemaße
    - Konfidenzbereiche

3 Maschinelles Lernen und Datenanalyse

- Designs of Experiment
  - Factorial design
  - Simplex design
  - Full factorial design
  - Central composite design
  - *Box-Behnken* design
  - *Koshal* design
  - Optimal design
    - D-optimality
    - A-optimality
    - E-optimality
  - Monte-Carlo-Simulation
  - Latin Hypercube Sampling
    - Space filling Latin Hypercube Sampling
    - Latin Hypercube Sampling with minimized spurious correlations
  - *Sobol*-Sequenzen
- 2D-, 3D-Anthill-Plot

- Clusteranalyse
- Sensitivitätsanalyse
  - Hauptkomponentenanalyse
  - Korrelationsanalyse
  - Kovarianzanalyse
  - Diskriminanzanalyse
  - Faktoranalyse
  - Globale varianzbasierte Sensitivitätsanalyse
    - Decomposition of variance
    - First-order indices
    - Total-effect index
    - Sobol indices
    - Sampling sequences
- Klassifikation und Regression
  - Polynomiale Regressionanalyse
  - Schrittweise Regression
  - Moving Least Square Approximation
  - Support Vector Machines
  - Neuronale Netzwerke
  - *Kriging*-Approximation
  - Gaußprozesse
  - Support Vector Regression
  - Modellselektion
    - *Bayes'sche* Modellselektion
    - Maximum Likelihood
    - Bootstrap-Methode
    - Cross Validation
  - Adaption der Hypermodellparameter

4 Sicherheitstheorie und Risikobewertung

- Statistische Modellierung von Einwirkungen und Beanspruchbarkeiten
  - Einwirkungen und Beanspruchungen
    - Modellierung von Eigenlasten
    - Statistische Verteilung von Einwirkungen
    - Räumliche Verteilung von Einwirkungen
    - Zeitliche Änderung von Einwirkungen
    - Statistische Modellierung von Einwirkungen
    - Einführung in die Modellierung von Windlasten
    - Modellierung von Temperatureinwirkungen
  - Materialparameter und Beanspruchbarkeiten
    - Verteilungen von Werkstoffparametern
    - Verteilungen von Festigkeitskennwerten
    - Zeitliche Änderung von Festigkeitskennwerten
- Globale Varianz-basierte Robustheitsanalyse
- Zuverlässigkeitsanalyse
  - Grenzzustände linearer und nichtlinearer Strukturen
  - Six sigma design
  - Formulierung der Versagenswahrscheinlichkeit für zeitinvariantes Strukturverhalten
    - Einfluss der Verteilungsfunktionen
    - Einfluss statistischer Unsicherheiten
  - Einführung in die Bewertung der Systemzuverlässigkeit
  - Zuverlässikeitstheoretische Verifikation klassischer Sicherheitskonzepte
    - Charakteristische Werte
    - Versagenswahrscheinlichkeit und Teilsicherheitsfaktoren
    - Teilsicherheitsfaktoren in Euronormen
  - Methode der zweiten Momente erster Ordnung
  - Zuverlässigkeitsverfahren erster und zweiter Ordnung
  - Simulationssverfahren
    - Monte-Carlo-Simulation
    - Latin hypercube sampling
    - Importanzstichprobenwahl
    - Importance Sampling Using Design Point
    - Adaptive importance sampling
    - Richtungsstichprobenverfahren
  - Approximationsverfahren
- Risikoanalyse
  - Systemanalyse
    - Ereignisbäume
    - Ausfalleffektanalyse
    - Fehlerbaumanalyse
    - Störfallablaufanalyse
  - Schadenskosten und Risikoberechnung
    - Sachschäden
    - Personenschäden
  - Risikobewertung
    - Sensitivitätsanalyse
    - Risikoreduktion

5 Optimierung

- Unrestringierte Optimierungsaufgaben
  - Schrittweitenverfahren
    - Schrittweitenstrategien: Wolfe- und Armijo-Schrittweite
    - Konvergenz des Modellalgorithmus
    - Newton-, Quasi-Newton- und BFGS-Verfahren
    - Verfahren der konjugierten Gradienten
  - Trust-Region-Verfahren
    - Ein Modellalgorithmus
    - Das Trust-Region-Hilfsproblem
    - Globale Konvergenz
    - Nichtlineare Ausgleichsprobleme
- Theoretische Grundlagen restringierter Optimierungsaufgaben
  - Trennung konvexer Mengen
    - Definitionen, Projektionssatz, starker

Trennungssatz
      - Farkas-Lemma, Trennungssatz
    - Notwendige und hinreichende Optimalitätsbedingungen
      - Notwendige Optimalitätsbedingungen
      - Hinreichende Optimalitätsbedingungen
    - Dualität bei konvexen Optimierungsaufgaben
      - Definition des dualen Programms, schwacher Dualitätssatz
      - Starker Dualitätssatz
      - Dualität in der linearen Optimierung
      - Quadratisch restringierte quadratische Programme
  - Innere-Punkt-Verfahren bei linearen Optimierungsaufgaben
    - Grundlagen
      - Kompaktheit von Lösungsmengen
      - Logarithmische Barrieren, zentraler Pfad
    - Das primal-duale Innere-Punkt-Verfahren
  - Quadratische Optimierungsaufgaben
    - Das primale Verfahren von Fletcher
      - Gleichungen als Restriktionen
      - Das Verfahren von Fletcher
    - Das duale Verfahren von Goldfarb-Idnani
  - Linear restringierte Optimierungsaufgaben
    - Die Methode der aktiven Mengen
      - Lineare Gleichungsrestriktionen
      - Der allgemeine Fall
    - Verfahren der zulässigen Richtungen
      - Schrittweitenstrategien
      - Richtungsstrategien
      - Konvergenzaussagen
  - Nichtlinear restringierte Optimierungsaufgaben
    - Penalty- und Barriere-Verfahren
      - Differenzierbare Straffunktionen
      - Barriere-Funktionen
      - Nichtdifferenzierbare, exakte Straffunktionen
      - Erweitertes Lagrange-Verfahren
    - SQP-Verfahren
      - Ungedämpftes SQP-Verfahren
      - Gedämpftes SQP-Verfahren
  - Evolutionary Algorithms
    - Introduction
      - The Basic Principles from Nature
      - The Basic Cycle of Evolutionary Algorithms
      - Classification of Evolutionary Algorithms
      - Configuration Parameters of evolutionary algorithms
    - Fitness Assignment
      - Weighted Sum Fitness Assignment
      - Pareto Ranking
      - Variety Preserving Ranking
      - Tournament Fitness Assignment
    - Selection
      - Truncation Selection
      - Fitness Proportionate Selection
      - Tournament Selection
      - Ordered Selection
      - Ranking Selection
  - Genetic Algorithms
    - Genomes in Genetic Algorithms
    - Fixed-Length String Chromosomes
      - Creation: Nullary Reproduction
      - Mutation: Unary Reproduction.
      - Permutation: Unary Reproduction
      - Crossover: Binary Reproduction
    - Variable-Length String Chromosomes
      - Creation: Nullary Reproduction
      - Mutation: Unary Reproduction.
      - Crossover: Binary Reproduction
    - Schema Theorem
      - Wildcards
      - Holland's Schema Theorem
      - The Building Block Hypothesis
    - The Messy Genetic Algorithm.
      - Reproduction Operations
      - Splice: Binary Reproduction
      - Overspecification and Underspecification
    - Genotype-Phenotype Mappings and Artificial Embryogeny
  - Genetic Programming
    - (Standard) Tree Genomes
      - Creation: Nullary Reproduction
      - Mutation: Unary Reproduction.
      - Recombination: Binary Reproduction
      - Permutation: Unary Reproduction
      - Editing: Unary Reproduction
      - Encapsulation: Unary Reproduction
      - Wrapping: Unary Reproduction
      - Lifting: Unary Reproduction
    - Genotype-Phenotype Mappings
      - Cramer's Genetic Programming
      - Binary Genetic Programming
      - Gene Expression Programming
      - Edge Encoding
    - Grammars in Genetic Programming
      - Strongly Typed Genetic Programming
      - Grammatical Evolution
      - Christiansen Grammar Evolution
      - Tree-Adjoining Grammar-guided Genetic Programming
    - Linear Genetic Programming
      - The Compiling Genetic Programming System
      - Automatic Induction of Machine Code by Genetic Programming

        - Bytecode Evolution
        - Homologous Crossover: Binary Reproduction.
        - Page-based LGP
    - Evolution Strategy
        - Populations in Evolution Strategy
            - $(1+1)$-ES
            - $(\mu+1)$-ES.
            - $(\mu+\lambda)$-ES
            - (μ,λ)-ES
            - $(\mu/\rho,\lambda)$-ES
            - $(\mu/\rho+\lambda)$-ES
        - Differential Evolution
    - Evolutionary Programming
    - Ant Colony Optimization
    - Particle Swarm Optimization
    - Hill Climbing
        - Multi-Objective Hill Climbing
        - Hill Climbing with Random Restarts
    - Random Optimization
    - Simulated Annealing.
    - Multi-Objective Simulated Annealing
    - Memetic Algorithms
    - Downhill Simplex (Nelder and Mead)

6 Stochastische Optimierung.....

    - Design for six sigma
    - Robust-Design-Optimierung
    - Varianzbasierte Robust-Design-Optimierung
    - Zuverlässigkeitsbasierte Robust-Design-Optimierung
    - Zuverlässigkeits- und kostenorientierte Optimierung
    - Zeitvariante zuverlässigkeitsorientierte Kosten-Nutzen-Optimierung

7 Modellvalidierung.....

    - Parameteridentifikation, Data fitting
    - Modellverifikation
    - Modellkalibrierung
    - Modellqualifikation
    - Modellvorhersage

8 Stochastische Finite-Elemente-Methode..

    - Zufallsfelder
        - Mittelwertsfunktion
        - Korrelationsfunktion
        - Kovarianzfunktion
        - Eigenschaften von Zufallsfeldern
        - Diskretisierung von Zufallsfeldern
        - Knotenbezogene Zufallsfelder
        - Elementbezogene Zufallsfelder
        - Simulation von Zufallsfeldern
        - Karhunen-Loève-Transformation
    - Stochastische Finite-Elemente-Methode
        - Geometrisch und physikalisch nichtlineare Berechnungen imperfekter Strukturen
        - Zuverlässigkeitsbasierte Lebensdaueranalyse

9 Stochastische Prozesse.....

    - Simulation stochastischer Prozesse
        - Vektorprozess
        - Mittelwertsfunktion
        - Autokorrelationsfunktion
        - Eigenschaften von Prozessen
        - Leistungsspektralmethode
        - Näherung durch weißes Rauschen
        - Spektrale Schätzung
        - Simulation von Prozessen
    - Zeitvariante Versagenswahrscheinlichkeiten von Systemen
        - Überschreitenswahrscheinlichkeit
        - Dynamische Systeme mit einem Freiheitsgrad
        - Dynamische Systeme mit vielen Freiheitsgraden
        - Leistungsspektralmethode