

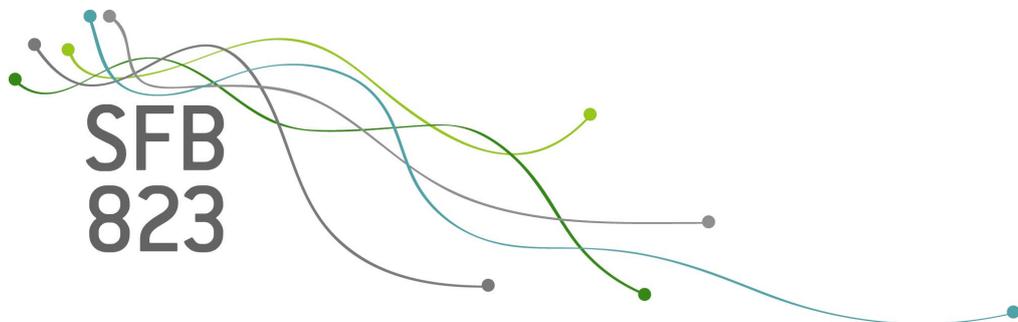
Sonderforschungsbereich 823

Statistik nichtlinearer dynamischer Prozesse

Technische Universität Dortmund

Abschlussbericht

01.07.2009-31.12.2021



Inhaltsverzeichnis

	Seite
A	Wissenschaftlicher Teil 1
1	Wissenschaftliche Entwicklung des gesamten Sonderforschungsbereichs 1
1.1	Zusammenfassung / Summary 1
1.2	Die 40 wichtigsten Publikationen sowie Patente 2
1.3	Wissenschaftliche Entwicklung 4
1.4	Wissenschaftliche Veranstaltungen 7
1.5	Nationale und internationale Kooperationen und Vernetzung 12
2	Berichte über die Teilprojekte der letzten Förderperiode 15
	Projektbereich A: Ökonometrie 15
A1	Zeitvariable Abhängigkeitsstrukturen in den Renditen risikobehafteter Kapitalanlagen (Krämer / Dette / Golosnoy) 15
A3	Dynamische Modellierung von Produktionstechnologien (Fronde / Schmidt / Wagner) 22
A4	Faktorallokation und Preisbildung bei aggregierten Risiken auf Finanzmärkten (Hanck / Linnemann / Wagner) 28
A5	Tarifvertragliche Bindung, Effiziente Verhandlungen und Beschäftigungsdynamik (Jung / Kraft) 34
A7	Statistische Modellierung von Abhängigkeiten in der Finanzökonomie mittels Copulas (Bücher / Posch) 40
	Projektbereich B: Technometrie 47
B1	Modellierung und Kontrolle thermokinetischer Beschichtungsprozesse (Tillmann / Kuhnt) 47
B3	Statistische Modellierung zeitlich und spektral hoch aufgelöster Audioprozesse in Hörhilfen (Martin / Belomestny) 53

B4	Statistische Prozessmodellierung bei der Bearbeitung inhomogener mineralischer Untergründe (Müller / Biermann / Tillmann)	60
B5	Statistische Methoden für Schädigungsprozesse unter zyklischer Beanspruchung (Müller / Ickstadt / Maurer)	67
Projektbereich C: Theorie / Methodik		74
C1	Modellwahl und dynamische Abhängigkeitsstrukturen (Dette / Dehling)	74
C2	Optimale Versuchsplanung für dynamische statistische Modelle (Dette / Kunert)	81
C3	Analyse von Strukturbrüchen in Prozessdaten (Dehling / Fried)	87
C5	Statistik komplexer stochastischer Modelle in der Finanzmathematik (Woerner / Belomestny)	93
Projektbereich T:		99
T1	Modellwahl in Dosiswirkungsstudien unter Nichtidentifizierbarkeit (Dette)	99
B	Programmspezifischer Teil	106
1	Übersicht zu Teilprojekten und finanzielle Ausstattung	106
2	Strukturwirkung des Sonderforschungsbereichs am Standort	110
2.1	Schwerpunktbildung und internationale Sichtbarkeit	110
2.2	Personelle Entwicklung	111
2.3	Wissenschaftlicher Nachwuchs	112
2.4	Gleichstellung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und Vereinbarkeit von wissenschaftlicher Karriere und Familie	116
2.5	Forschungsinfrastruktur und Forschungsdaten	117
2.6	Erkenntnistransfer und Öffentlichkeitsarbeit	118
2.7	Interne Kooperation und Organisation	119
2.8	Hinweise an die Deutsche Forschungsgemeinschaft	120

A Wissenschaftlicher Teil

1 Wissenschaftliche Entwicklung des gesamten Sonderforschungsbereichs

1.1 Zusammenfassung / Summary

Der SFB 823 hat nichtlineare dynamische Prozesse in Wirtschaft und Technik mit neuen statistischen Modellen und Methoden untersucht und optimiert. Die Zeitauflösung reichte dabei von Millisekundenskalen in der inkrementellen Blechumformung bis zu mehrjährigen Anpassungen in der dynamischen Modellierung von makroökonomischen Marktstrukturen. Die methodische und mehrwerterzeugende Klammer aller Projekte waren neue und zum Teil im SFB 823 entwickelte, in der Regel durch SFB-Anwendungsprojekte motivierte mathematisch-statistische Methoden und Modelle der Versuchsplanung und Zeitreihenanalyse. Unsere Wirtschaftsprojekte haben zeitvariable Abhängigkeits- und Risikostrukturen in realitätsnahe Modelle von Finanzdaten eingebaut und so ertragreichere Investitionen auf volatilen Kapitalmärkten ermöglicht, die statistische Modellierung der industriellen Energieerzeugung und die dynamische Spezifikation des komplementären Produktionsfaktors Arbeit über bestehende Erkenntnisgrenzen hinweg vorangetrieben, oder neue Einsichten zur optimalen Ausgestaltung von Vertragsstrukturen im Personalwesen einer Volkswirtschaft erzeugt. In den Ingenieurwissenschaften haben wir die thermische Beschichtung und die dabei auftretenden komplexen Wechselwirkungen zwischen Temperatur, Geschwindigkeit und Partikeldichte oder das Bohren in Beton optimiert, oder die Verarbeitung von Musiksignalen in Hörgeräten verbessert. Gemeinsamer und zentraler Input dabei waren statistisch-theoretische Fortschritte etwa bei der optimalen Versuchsplanung (vor allem relevant für die Ingenieurprojekte), neue Einsichten zu inversen Problemen oder neue dynamische Faktor- und Independent Component-Modelle sowie neue Ergebnisse zu Copulas und Regressions-Quantilen mit zeitvariablen Faktoren bzw. Komponenten, wie sie außer in den Ingenieurprojekten auch in den im SFB untersuchten Kapitalmarktmodellen Verwendung finden.

Die Vielfalt unserer Untersuchungsgegenstände wurde geeint durch das gemeinsame methodische Dach dynamischer statistischer Modelle. Hier fand eine intensive gegenseitige Befruchtung statt. Durch hochrangig besuchte, vom SFB 823 organisierte oder mitorganisierte internationale Konferenzen war auch ein lebhafter grenzüberschreitender Ideenaustausch garantiert. Verschiedene hier eingeleitete Kooperationen wie auch ausgewählte interne Forschungslinien zur statistischen Modelldynamik werden den SFB überdauern und können als dessen wissenschaftliches Erbe angesehen werden.

The DFG collaborative research project 823 was devoted to non-linear dynamic processes in economics and engineering, with the aim of enlarging and improving the range of statistical models and methods in these fields. Time-scales ranged from milli-seconds in incremental sheet metal forming up to several years when modelling dynamic adjustment processes in economic macro contexts. Methodologically, projects were held together by newly developed models and methods in experimental design and time-series analysis. Important issues for projects in economics included time-varying dependence and risk structures in finance, new industrial production functions with a special view on energy inputs, or new specifications of the role of labour as an input in production-processes.

Projects in engineering were concerned with optimizing thermal spraying by taking account of complex interactions among e.g. temperature, speed and intensity of particles, the drilling in concrete or the processing of music signals in hearing aids. This research built heavily on methodological advances in experimental design and inverse problems, and on newly developed independent component models. Further methodological progress initiated by SFB 823 includes new copula-models plus a variety of useful tests and quantile regression with time-variable inputs and components; such models have become important tools both in engineering and economics recently.

The multitude of topics investigated was united under the common roof of dynamic models, resulting in fruitful cross-fertilization und important mutual inspirations. In addition, a series of high level conferences has secured a strong foundation in the international research community. Various fruitful collaborations which were initiated here will survive SFB 823 and may be viewed as part of its scientific legacy.

1.2 Die 40 wichtigsten Publikationen sowie Patente

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Alhorn, K., Schorning, K., Dette, H. (2019): Optimal designs for frequentist model averaging, *Biometrika* 106(3), 665-682.
- Andor, M.A., Parmeter, C., Sommer, S. (2019): Combining uncertainty with uncertainty to get certainty? Efficiency analysis for regulation purposes, *European Journal of Operational Research* 274(1), 240-252.
DOI: 10.1016/j.ejor.2018.10.007
- Belomestny, D., Schoenmakers, J. (2016): Statistical inference for time-changed Lévy processes via Mellin transform approach, *Stochastic Processes and their Applications* 126(7), 2092-2122.
- Bissantz, N., Holzmann, H., Proksch, K. (2014): Confidence regions for images observed under the Radon transform, *Journal of Multivariate Analysis* 128, 86-107.
- Börner, M., Ruhe, T., Rhode, W. et al. (2015): Development of a general analysis and unfolding scheme and its application to measure the energy spectrum of atmospheric neutrinos with IceCube, *The European Physical Journal C* 75(116).
- Bücher, A., Dette, H., Heinrichs, F. (2021): Are deviations in a gradually varying mean relevant? A testing approach based on sup-norm estimators, *Annals of Statistics* 49(6), 3583-3617.
- Bücher, A., Segers, J., Volgushev, S. (2014): When uniform weak convergence fails: Empirical processes for dependence functions and residuals via epi- and hypographs, *Annals of Statistics* 42(4), 1598-1634.
- Dehling, H., Franke, B., Woerner, J.H.C. (2017): Estimating drift parameters in a fractional Ornstein-Uhlenbeck process with periodic mean, *Statistical Inference for Stochastic Processes* 20, 1-14.
- Dehling, H., Fried, R., Wendler, M. (2020): A robust method for shift detection in time series, *Biometrika* 107(3), 647-660.
- Demetrescu, M., Hanck, C., Kruse-Becher, R. (2021): Robust inference under time-varying volatility: a real-time evaluation of professional forecasters, erscheint in: *Journal of Applied Econometrics*.
- Dette, H., Kokot, K. (2021): Bio-equivalence tests in functional data by maximum deviation, *Biometrika* 108(4), 895-913.
- Dette, H., Kokot, K., Aue, A. (2020): Functional data analysis in the Banach space of continuous functions, *Annals of Statistics* 48(2), 1168-1192.
- Dette, H., Kokot, K., Volgushev, S. (2020): Testing relevant hypotheses in functional time series via self-normalization, *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B* 82(3), 629-660.

- Dette, H., Pepelyshev, A., Zhigljavsky, A. (2019): The BLUE in continuous-time regression models with correlated errors, *Annals of Statistics* 47(4), 1928-1959.
- Dette, H., Wu, W. (2019): Detecting relevant changes in the mean of nonstationary processes - A mass excess approach, *Annals of Statistics* 47(6), 3578-3608.
- Frondel, M., Schmidt, C.M. (2014): A measure of a nation's physical energy supply risk, *Quarterly Review of Economics and Finance* 54(2), 208-215.
- Gauer, J., Krymova, E., Belomestny, D., Martin, R. (2019): Spectral complexity reduction of music signals for cochlear implant users based on subspace tracking, *2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 1-5.
DOI: 10.23919/EUSIPCO.2019.8902740
- Gauer, J., Nagathil, A., Martin, R., Thomas, J.P., Völter, C. (2019): Interactive evaluation of a music preprocessing scheme for cochlear implants based on spectral complexity, *Frontiers in Neuroscience* 13(1206).
DOI: 10.3389/fnins.2019.01206
- Golosnoy, V., Gribisch, B., Seifert, M.I. (2019): Exponential smoothing of realized portfolio weights, *Journal of Empirical Finance* 53, 222-237.
- Heinrich, J., Maurer, R., Leckey, K., Müller, C.H., Ickstadt, K. (2021): Detektieren ermüdungsbedingter Spannstahlbrüche mittels Rissmonitoring im Versuch und am Bauwerk, *Bauingenieur* 96(3), 92-101.
- Herbrandt, S., Ligges, U., Ferreira, M., Kansteiner, M., Biermann, D., Tillmann, W., Weihs, C. (2018): Model based optimization of a statistical simulation model for single diamond grinding, *Computational Statistics* 33(3), 1127-1143.
DOI: 10.1007/s00180-016-0669-z
- Hermann, S., Ickstadt, K., Müller, C.H. (2018): Bayesian prediction for a jump diffusion process - With application to crack growth in fatigue experiments, *Reliability Engineering and System Safety* 179, 83-96.
DOI: 10.1016/j.ress.2016.08.012
- Jung, P., Kuhn, M. (2019): Earning losses and labor mobility over the life cycle, *Journal of the European Economic Association* 17(3), 678-724.
- Kraft, K. (2018): Productivity and distribution effects of codetermination in a bargaining model, *International Journal of Industrial Organization* 59, 458-485.
- Krämer, W. (2014): Thünen-Vorlesung 2014: Zur Ökonomie von Panik, Angst und Risiko, *Perspektiven der Wirtschaftspolitik* 15(4), 367-377.
- Krämer, W. (2021): Asymmetry in the distribution of daily stock returns, *Empirical Economics* 60, 1115-1125.
- Krämer, W., Weihs, C. (Hrsg.) (2019): Faszination Statistik - Einblicke in aktuelle Forschungsfragen und Erkenntnisse, Springer, Berlin.
- Leckey, K., Müller, C.H., Szugat, S., Maurer, R. (2020): Prediction intervals for load-sharing systems in accelerated life testing, *Quality and Reliability Engineering International* 36(6), 1895-1915.
DOI: 10.1002/qre.2664
- Lilienthal, J., Fried, R., Schumann, A. (2018): Homogeneity testing for skewed and cross-correlated data in regional flood frequency analysis, *Journal of Hydrology* 556, 557-571.
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.056
- Linnemann, L., Schabert, A. (2010): Debt nonneutrality, policy interactions, and macroeconomic stability, *International Economic Review* 51(2), 461-474.
- Malevich, N., Müller, C.H., Dreier, J., Kansteiner, M., Biermann, D., Ferreira, M., Tillmann, W. (2021): Experimental and statistical analysis of the wear of diamond impregnated tools, *Wear* 468-469.
DOI: 10.1016/j.wear.2020.203574
- Möllenhoff, K., Dette, H., Kotzagiorgis, E., Volgushev, S., Collignon, O. (2018): Regulatory assessment of drug dissolution profiles comparability via maximum deviation, *Statistics in Medicine* 37(20), 2968-2981.

- Nagathil, A., Weihs, C., Martin, R. (2016): Spectral complexity reduction of music signals for mitigating effects of cochlear hearing loss, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 24(3), 445-458.
DOI: 10.1109/TASLP.2015.2511623
- Neumann, C., Kunert, J. (2018): On MSE-optimal crossover designs, *Annals of Statistics* 46(6A), 2939-2959.
- Schmidt, S.K., Wornowizki, M., Fried, R., Dehling, H. (2021): An asymptotic test for constancy of the variance under short-range dependence, *Annals of Statistics* 49(6), 3460-3481.
DOI: 10.1214/21-AOS2092
- Tillmann, W., Baumann, I., Brinkhoff, A., Kuhnt, S., Becker-Emden, E.-C., Kalka, A. (2021): Effect of the spray parameters on the particle behavior and the coating properties during ID warm spraying of fine WC-12Co powders ($-10 + 2 \mu\text{m}$), *Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference*, 283-289.
- Tillmann, W., Hussong, B., Kuhnt, S., Rehage, A., Rudak, N. (2012): Einführung eines Tageseffekt-Schätzers zur Verbesserung der Vorhersage von Partikeleigenschaften in einem HVOF-Spritzstrahl, *Thermal Spray Bulletin* 5(2), 132-139.
- Wagner, M., Grabarczyk, P., Hong, S.H. (2020): Fully modified OLS estimation and inference for seemingly unrelated cointegrating polynomial regressions and the environmental Kuznets curve for carbon dioxide emissions, *Journal of Econometrics* 214(1), 216-255.
- Wied, D., Krämer, W., Dehling, H. (2012): Testing for a change in correlation at an unknown point in time using an extended functional delta method, *Econometric Theory* 28(3), 570-589.
- Zou, N., Volgushev, S., Bücher, A. (2021): Multiple block sizes and overlapping blocks for multivariate time series extremes, *Annals of Statistics* 49(1), 295-320.

b) Andere Veröffentlichungen

entfällt

c) Patente, erteilt

Sebastiani, G., Schmelzer, P., Marré, M., Brosius, A., Tekkaya, E. (2011): Verfahren zur Herstellung von Verbundwerkstücken mit Verstärkungsstrukturen sowie entsprechend hergestellte Verbundwerkstücke, Patent PCT/DE2010/000619, Datum der Veröffentlichung: 01.12.2011.

1.3 Wissenschaftliche Entwicklung

Der SFB 823 ist angetreten, um neue statistische Methoden und Modelle für ausgewählte Sachprobleme aus Wirtschaft und Technik zu entwickeln und diese damit effizienter und schneller lösbar zu gestalten. Dieses Ziel wurde weitgehend erreicht. Die Corona Pandemie hat die in den Ingenieurprojekten vorgesehenen Experimente verzögert und einige ganz verhindert; zum Glück geschah das gegen Ende des SFBs und hat die Projektentfaltung hier wie in den anderen Bereichen weniger stark behindert, als das bei einem neuen SFB der Fall gewesen wäre. Auch das durch Corona bewirkte weitgehende Einfrieren des internationalen Konferenzgeschehens wie auch das Wegfallen von Seminarvorträgen von SFB Mitgliedern anderenorts und Besuche auswärtiger Forscher und Forscherinnen bei uns hat den SFB-Forschungsbetrieb zwar behindert, aber nicht unterdrückt.

Die Aufteilung in die drei Teilbereiche Ökonometrie, Technometrie und Theorie/Methodik hat sich als nützlich und zielführend herausgestellt. Jeder Teilbereich hatte damit sozusagen seine eigene Identität und konnte aus dieser Position heraus einen maximalen Beitrag zum Erfolg des Ganzen leisten. Auch das Prinzip, immer möglichst mehr als einen Projektleiter, und davon mindestens einen aus der Theorie und einen aus der Praxis vorzusehen, hat sich bewährt und

sehr zu einer gelungenen Verschränkung sowohl von Methoden und Anwendungen als auch der einzelnen Projekte untereinander beigetragen.

Das methodische Oberthema des SFBs, das die auf den ersten Blick recht heterogenen Anwendungen zusammenhält, waren dynamische statistische Modelle für Situationen, in denen die Randbedingungen sich sehr schnell ändern. Die wesentlichen durch den SFB erzeugten wissenschaftlichen Fortschritte bestanden darin, hier neue Vorgangsweisen vorzuschlagen, zu testen und in der Praxis anzuwenden, zum Teil mit Hilfe maßgeschneiderter Versuchspläne, die auch unter solchen Umständen weiter funktionieren. So hatte man etwa in den Wirtschaftswissenschaften zu Beginn des SFBs das Problem, dass herkömmliche Verfahren zur Modellierung von Kapitalmarktabhängigkeiten in Krisenzeiten oft versagen. Zum Beispiel war die Fehleinschätzung einer asymmetrischen Abhängigkeitsstruktur bei Kapitalmarktrenditen eine der Hauptursachen für das Börsendebakel des Jahres 2008. Hier haben wir durch neue Tests auf Strukturbrüche in Abhängigkeitsmustern, durch neue Validierungsverfahren für Risikomaße, durch die Flexibilisierung von Abhängigkeitsstrukturen mittels speziell dafür entwickelter Copulas oder durch die Entwicklung von Frühindikatoren für Spannungen auf Kapitalmärkten ein deutliches Wissensdefizit zu beseitigen beigetragen. Insbesondere bei der Entwicklung dazu passender Zeitreihenmodelle und -methoden hat sich der SFB 823 eine internationale Spitzenstellung erkämpft, wie in den einschlägigen von uns organisierten Konferenzen inklusive deren Teilnehmer und den daraus entstandenen Publikationen dokumentiert. Vor allem die Projekte A1, C1 und C3 waren hier aktiv.

Weitere Teilziele der Wirtschaftsprojekte waren bessere Risikomaße für Kreditausfälle oder Extremverluste auf Aktienmärkten wie auch die realitätsnähere Modellierung von Aktienrenditen überhaupt, neue Tests und Modelle für Abhängigkeiten und Volatilitäten, neue Produktionsfunktionen für Energie, die Identifizierung von Einsparpotentialen beim Verbrauch, nutzerfreundliche Anreizsysteme für Netzbetreiber, die Identifikation von exogenen wirtschaftspolitisch induzierten Makroschocks bei Zeitvariabilität in den Wirkungskanälen, effiziente Verhandlung in Tarifkonflikten oder die optimale Vergütung von Vorständen einer Aktiengesellschaft. In gewisser Weise finden sich damit die drei Produktionsfaktoren Arbeit, Energie und Kapital hier unter einem Dach. Die Relevanz der projektübergreifenden Methodenkammer "dynamische statistische Modelle" ist dabei naturgemäß nicht für alle Themen gleichermaßen hoch, aber selbst bei dem auf den ersten Blick so wenig quantitativen Thema "effiziente Verhandlungen" kommen durchaus auch statistische Argumente ins Spiel, wie in den einschlägigen Publikationen nachzulesen.

Die Ingenieurprojekte hatten die statistische-methodisch untermauerte Optimierung von Spritz- und Bohrprozessen, verbesserte Hörgeräte, den Hochwasserschutz und die Prognose von Ermüdungsprozessen der Spannstähle in Spannbetonbauteilen zum Ziel. Trotz dieses auch hier recht heterogenen Zielfeldes sind die mathematisch-statistischen Probleme eng verwandt. Beim thermischen Spritzen haben wir in unseren Versuchen zur Optimierung des Komponentenmixes Ideen der optimalen Versuchsplanung aufgegriffen, die auch in dem Projekt zum optimalen Zerspanen von Beton zum Einsatz gekommen sind. Die in diesem Projekt betriebene Untersuchung der Prozesskräfte beim Werkzeugverschleiß wiederum nutzte ähnliche statistische Methoden für Lebenszeitmodelle wie die Prognosen für kritische Zustände von Spannbetonbauteilen infolge von Materialermüdung in Projekt B5, und die in B5 zur Analyse des

Körperschalls beim Risswachstum genutzten Verfahren gehören der gleichen Klasse an wie die zur Modellierung von Musiksignalen verwendeten in Projekt B3.

Zu dem in unserem SFB entwickelten neuen statistisch-methodischen Überbau gehörten bei allen Ingenieurprojekten wie schon bei den Wirtschaftsprojekten verbesserte (robustere, mächtigere) neue Tests auf Strukturbrüche in den jeweiligen statistischen Modellen. Bei den Ingenieurprojekten kam dann auch noch unser Querschnittsthema Versuchsplanung dazu. Besonders unsere (auch) experimentell arbeitenden Ingenieurprojekte B1, B3, B4 und B5 haben hier von der in unserem Methodenprojekt C2 aufgebauten Expertise profitiert.

Auch das Querschnittsthema "Extremwerte" hat für Synergieeffekte zwischen den Projekten gesorgt: Von kanonischer Bedeutung war es in unserem Projekt zur Hochwasserregulierung und -prognose (nach Phase 2 beendet), aber auch in den mit Risikomodellierung auf Kapitalmärkten befassten Wirtschaftsprojekten sind Extremwerte eine zentrale Größe. In Erweiterung der bisherigen Literatur haben wir dabei vor allem gewisse multivariate Extrema erstmals realitätsnah modelliert und statistisch handhabbar gemacht. Hier waren die Projekte C3 und A7 für alle eine große Hilfe.

Diese im Methodenteil C des SFBs zusammengefassten Projekte waren aber von Anfang an nicht nur als Ratgeber, sondern auch als Empfänger von motivierenden neuen Fragestellungen angelegt. Wegen der Allgegenwart von Zeitreihendaten mit potentiell im Zeitverlauf variierender Modellstruktur war hier vor allem das Projekt C1 gefordert, etwa bei der Entwicklung von Tests auf "relevante" Abweichungen, wie sie etwa in vielen ökonomischen Anwendungen wichtig sind (ab wann sind Abweichungen von der Hypothese eines effizienten Marktes auch bei Transaktionskosten noch profitabel auszunutzen?).

Zu diesen vor allem durch das Zusammenwirken verschiedener Disziplinen generierten Forschungsfragen und im Nachgang dann auch erzielten Erfolgen zählen wir auch unser Transferprojekt mit dem Pharmakonzern Novartis zur Bestimmung der optimalen Dosis bei neuen Medikamenten. Die bisherige Praxis sah dazu eine Aufteilung der Probanden in mehrere gleich große Gruppen vor, jede erhielt eine Dosis aus einem vorher definierten Bereich. Hier haben wir gezeigt, dass durch eine alternative Aufteilung von Probanden und Dosen eine erhebliche effizientere Identifikation der optimalen Dosis möglich ist.

Die praktische Verwendbarkeit unserer Projektergebnisse war von Anfang an ein wichtiges Ziel des SFBs. In den Ingenieurprojekten war das quasi ja schon Teil der Konstruktion - unsere Erkenntnisse zum thermischen Spritzen oder zum Bohren in Beton etwa wurden mehrfach auf Praktikerkonferenzen präsentiert. Von großer Praxisrelevanz sind auch unsere Erfolge bei der Optimierung von Hörgeräten. Hier haben wir neue Algorithmen zur Verbesserung der Musikwahrnehmung sowie Wege zu deren recheneffizienter Implementierung aufgezeigt und auch auf mehreren audiologischen Fachtagungen vorgestellt. Bei den Wirtschaftsprojekten gab es fruchtbare Kooperationen mit der Kienbaum Consultants International GmbH (zum Thema Management-Vergütung) oder mit den Elektrokonzernen EnBW und Uniper zur Modellierung von zeitlichen Abhängigkeitsstrukturen bei Energiepreisen sowie zur Lastverteilung in Stromnetzen. Die im SFB 823 entwickelten Methoden werden dort inzwischen zu Steuerungszwecken eingesetzt.

Als weiterer Kollateralnutzen für die Praxis sind auch verschiedene im SFB entstandene Softwareprodukte zu verbuchen; diese wurden vor allem in die open-source Programmbibliothek "R package" eingestellt. Typische Beispiele sind etwa "quantspec: Quantile-based Spectral

Analysis Functions" aus C1 oder "robcp: Robust Change-point Tests" aus C3. Auch ein robuster Vorzeichentest aus B5, ein Versuchsplan-Optimierungsprogramm aus B1 oder ein neuer Kointegrationstest aus A4 sind hier zu nennen. Auch die im Rahmen des SFBs erzeugten Forschungsdaten stehen auf unserer Netzseite für künftige wissenschaftliche Projekte weltweit zur Verfügung. Das betrifft besonders die Ingenieurprojekte mit ihren experimentell erzeugten Versuchsergebnissen. Diese Netzseite wird auch nach Abschluss des SFBs weiter abrufbar bleiben. Bei Wirtschaftsdaten haben wir eng mit dem Forschungsdatenzentrum Ruhr am RWI-Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung in Essen kooperiert, wo insbesondere die Daten des Projekts A3 zu finden sind.

Zu Beginn des SFBs noch nicht abzusehen (wenn auch ex post nicht überraschend) war die rasante Weiterentwicklung der Rechnertechnik und der Speicherkapazitäten. Davon haben vor allem unsere Methodenprojekte profitiert, etwa durch die zunehmende Nutzung von Resampling-Methoden wie auch bei vielen rechnerintensiven nichtparametrischen Verfahren. An neuen Herausforderungen hat sich im Verlauf des SFBs immer mehr die Kombination von Raum- und Zeitaspekten herausgestellt. Eine zentrale hier noch offene Frage betrifft die Entwicklung von statistischen Methoden für die Analyse von hochdimensionalen vektor-autoregressiven Modellen mit exogenen Kovariablen (VARX-Modelle). Weitere sind die Validierung von typischen Modellannahmen für die Analyse von Zeitraumdaten, die nötig sind, um die Rechenbarkeit statistischer Verfahren zu gewährleisten, und die Entwicklung geeigneter Methoden zum Online-Monitoring, die neben den zeitlichen auch die räumlichen Informationen effizient benutzen.

1.4 Wissenschaftliche Veranstaltungen

Getreu dem Diktum von Werner Heisenberg "Wissenschaft entsteht im Gespräch" haben wir seit Beginn des SFBs einen intensiven "Face-to-face"-Austausch mit Forschern und Forscherinnen im In- und Ausland gesucht. Das geschah vor allem über gegenseitige Besuche und wissenschaftliche Konferenzen. Die unten chronologisch gelisteten Treffen stellen eine Auswahl dar; sie fanden statt zu Themen des SFBs und unter dessen alleiniger oder Mitregie (Name des Zuständigen in Klammern). Die "Workshops on Quality Improvement Methods" setzen dabei eine bestehende Serie fort, die im Jahr 2001 mit Unterstützung des Vorgänger-SFBs 475 entstanden ist; sie werden mit dem Ausscheiden von Projektleiter Joachim Kunert mit dem Ende des aktuellen SFBs auslaufen. Die Konferenzreihe "New Developments in Econometrics and Time Series" wurde vom stellvertretenden SFB-Sprecher Holger Dette begründet und wird wegen des großen Zuspruchs und der Qualität der dabei präsentierten bzw. inaugurierten Ergebnisse auch nach Ende des SFBs 823 weiterlaufen. Die Konferenzreihe "Methods and Challenges in Financial Risk Management" war dagegen ein bilaterales Projekt unseres SFBs mit dem verwandten SFB 649 "Ökonomisches Risiko" in Berlin und läuft mit dem Ende der beiden Sonderforschungsbereiche ebenfalls aus.

Konferenz (Organisation für den SFB)	Wann und wo	Wer
Nonparametrics Statistics and Time Series – Conference in Honor of Marc Hallin (Dette)	27.- 28.11.2009, Brüssel	70 Teilnehmer aus 12 Ländern, darunter Paul Deheuvels, Christian Genest, Denis Bosq, Noel Veraverbeke, Jean-Marie Dufour, Marco Lippi, Bas Werker, Jana Jureckova, Hannu Oja, Christophe Croux, Hira Koul, Ivan Mizera
9 th Workshop on Quality Improvement Methods (Kunert)	14.-15.05.2010, Witten-Bommerholz	28 Teilnehmer aus 7 Ländern, darunter Kalliopi Mylona, Tim Holland-Letz, Min Yang, Luis Martí, Philippe Castagliola, Sven Knoth, Issam Ben Khediri, Peter Goos
Symposium über Hochfrequenzdaten in der Finanzökonometrie (Krämer)	01.-02.07.2010, Witten-Bommerholz	24 Teilnehmer aus 4 Ländern, darunter Nikolaus Hautsch, Rainer Dahlhaus, Almut Veraart, Werner Ploberger, Guglielmo Maria Caporale, Wolfgang Härdle, Mark Podolskij
Time Series, Financial Statistics and Quantile Regression (Dette)	20.-21.09.2010, Dortmund	50 Teilnehmer aus 10 Ländern, darunter Xuming He, Davy Paindaveine, Masanobu Taniguchi, Keming Yu, Jerome Saracco, Steve Portnoy, Song Song, Rainer Dahlhaus, Kenichiro Tamaki, Hiroyuki Taniai, Junichi Hirukawa
Dependence in Probability and Statistics (Dehling)	04.-08.04.2011, Marseille-Luminy	52 Teilnehmer aus 9 Ländern, darunter Istvan Berkes, Richard Bradley, Jürgen Franke, Siegfried Hörmann, Jerome Dedecker, Olivier Durieu, Clémentine Prieur, Thomas Mikosch, Brice Franke, Johan Segers, Holger Drees, Claudia Kirch, Markus Reiss, Anne Leucht, Liudas Giraitis, Dag Tjostheim, Richard Davis
10 th Workshop on Quality Improvement Methods (Kunert)	03.-04.06.2011, Schwerte	20 Teilnehmer aus 3 Ländern, darunter Hanna Lukashevich, Amor Messaoud Christos Koukouvinos, Waltraud Kahle, Panagiotis Angelopoulos
2 nd Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	12.-13.09.2011, Brüssel	60 Teilnehmer aus 12 Ländern, darunter Fabio Trojani, Jonathan B. Hill, Catherine Dehon, Davy Paindaveine, Lajos Horváth, Richard Davis, David Veredas, Masanobu Taniguchi, Christine de Mol, Johan Segers, Marco Lippi
Time Series: Models, Breaks and Applications (Dehling, Fried)	01.-03.03.2012, Karlsruhe	40 Teilnehmer aus 7 Ländern, darunter Jan Beran, Jürgen Franke, Josef Steinebach, Jens-Peter Kreiß, Joseph Tadjuidje-Kamgaing, Achim Zeileis, Edith Gombay, Lajos Horvath, Alexander Aue, Konstantinos Fokianos

Konferenz (Organisation für den SFB)	Wann und wo	Wer
Methods and Challenges in Financial Risk Management I (Krämer)	29.-30.04.2012, Kloster Drübeck	26 Teilnehmer aus 5 Ländern, darunter Yakov Ritov, Melanie Schienle, Dominik Wied, Ostap Okhrin, Julia Schaumburg, Weining Wang, Ming Yuan, Maria Grith, Wolfgang Härdle
11 th Workshop on Quality Improvement Methods (Kunert)	08.-09.06.2012, Dortmund	18 Teilnehmer aus 11 Ländern, darunter Philippe Castagliola, Ursula Garczarek, Steven Gilmour, Ulrike Grömping, Elvira Romano, Dimo Brockhoff
2 nd Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	10.-11.09.2012, Rom	45 Teilnehmer aus 9 Ländern, darunter Manfred Deistler, Soren Johansen, Paolo Zaffaroni, Masanobu Taniguchi, Dag Tjostheim, Markus Reiss, Roger Koenker, Ta-Hsin Li, Michael Wolf, Matteo Barigozzi, Helmut Lütkepohl, Stanislav Volgushev, Bas Werker, Wei Biao Wu
12 th Workshop on Quality Improvement Methods (Kunert)	31.05.-01.06.2013, Dortmund	23 Teilnehmer aus 6 Ländern, darunter Marco Burkschat, Ying Chen, Maryna Prus, Kristina Lurz, Pauline Mouawad, Mohcine Chraibi, Philippe Castagliola, Dhoua Mejri, Murat Kulahci, Sébastien Le, Per Brockhoff
German-Polish Joint Conference on Probability Theory and Mathematical Statistics (Dehling)	06.-09.06.2013, Torun	273 Teilnehmer aus 8 Ländern, darunter Sara van de Geer, Rama Cont, Dominique Picard, Frank den Hollander, Aleksander Nagajew, Eva B. Vedel-Jensen, Pierre Calka, Roberto Fernández, Günter Last, Matthew Penrose, Marie-Colette Van Lieshout, Hans-Otto Georgii
3 rd Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	12.-13.09.2013, Brüssel	45 Teilnehmer aus 10 Ländern, darunter Manfred Deistler, Rainer Dahlhaus, Dominik Liebl, Ngai Han Chan, Marco Lippi, Marta Banbura, Masanobu Taniguchi, Benedikt Pötscher, Rafaella Giacomini, Alexei Onatski, Matteo Barigozzi, Alexander Aue, Stathis Paparoditis
Statistical Inference for continuous time stochastic processes (Woerner)	24.-26.02.2014, Dortmund	37 Teilnehmer aus 5 Ländern, darunter Markus Bibinger, Susanne Ditlevsen, Ernst Eberlein, Valentine Genon-Catalot, Reinhard Höpfner, Eva Löcherbach, Maria Elvira Mancino, Gernot Müller, Ludger Rüschendorf, Mathias Vetter
Methods and Challenges in Financial Risk Management II (Krämer)	18.-20.05.2014, Kloster Drübeck	22 Teilnehmer aus 4 Ländern, darunter Lukas Borke, Shih-Kang Chao, Wolfgang Härdle, Clemens Heine, Helmut Herwartz, Piotr Mayer, Andrija Mihoci, Ostap Okhrin, Dedy Dvi Prastyo, Weining Wang

Konferenz (Organisation für den SFB)	Wann und wo	Wer
13 th Workshop on Quality Improvement Methods (Kunert)	20.-21.06.2014, Dortmund	30 Teilnehmer aus 9 Ländern, darunter Kathrin Plankensteiner, Mart P. Janssen, Nihan Acar, Phillipe Castagliola, Kristina Lurz, Ulrike Grömping, Wei Zheng, Katarzyna Filipiak, Pierre Druilhet
4 th Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	11.-12.09.2014, Rom	50 Teilnehmer aus 11 Ländern, darunter Masanobu Taniguchi, Piotr Fryzlewicz, Katja Smetanina, Jianqing Fan, Michael Vogt, Stanislav Volgushev, Andreas Hagemann, Davy Paindaveine, Robert Serfling, Barbara Rossi, Marc Hallin
Short and long memory in probability and statistics – Workshop on the occasion of Herold Dehling's 60 th birthday (Fried, Wendler)	16.-17.01.2015, Bochum	51 Teilnehmer aus 10 Ländern, darunter Svetlana Borovka, Sergey Utev, Istvan Berkes, Richard Bradley, Jerome Dedecker, Olivier Durieu, Adam Jakubowski, Murad S. Taqqu, Brice Franke, Siegfried Hörmann, Thomas Mikosch, Manfred Denker, Rafal Kulik, Florence Merlevede
14 th Workshop on Quality Improvement Methods (Müller, Kunert, Weihs)	05.-06.06.2015, Dortmund	22 Teilnehmer aus 5 Ländern, darunter Athanasios C. Rakitzis, Winfried Theis, Manuel Cabral Morais, Ursula Garczarek, Johanna Kappus, Rosemary Bailey
5 th Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	11.-12.06.2015, Bochum	35 Teilnehmer aus 8 Ländern, darunter Carsten Jentsch, Haeran Cho, Tatyana Krivobokova, Raphael Huser, Andrea Krajina, Kirstin Strokorb, Yuwei Zhao, Anja Janßen, Chen Zhou, Jean-David Fermanian, Brendan K. Beare, Siegfried Hörmann, Abdelaati Daouia
Recent Developments in Finance, Risk Theory and Stochastic Analysis in honor of Ludger Rüschendorf (Woerner)	12.-13.02.2016, Freiburg	34 Teilnehmer aus 5 Ländern, darunter Thomas Bruss, Paul Embrechts, Karl-Theodor Sturm, Steven Vanduffel
mODa11 – Model-Oriented Data Analysis and Optimum Design (Müller, Kunert)	12.-17.06.2016, Haminkeln	64 Teilnehmer aus 12 Ländern, darunter Anthony C. Atkinson, Rosemary Bailey, Wolfgang Bischoff, Katarina Burclova, Aylin Cakiroglu, Victor Casero-Alonso, Laura Deldossi, Andrea Ghiglietti, David Ginsbourger, Peter Goos, Hugo Maruri Aguilar, Ehsan Masoudi
6 th Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	06.-07.10.2016, Madrid	60 Teilnehmer aus 11 Ländern, darunter Andrés Alonso, Guillaume Carlier, Probal Chaudhuri, Victor Chernozhukov, Juan Antonio Cuesta Albertos, Qiwei Yao, Juan José Dolado, Pedro Galeano, Marc Henry, Clifford Lam, Esther Ruiz, Davy Paindaveine, Masanobu Taniguchi, Ruey S. Tsay, Kamil Feridun Turkman, Carlos Velasco

Konferenz (Organisation für den SFB)	Wann und wo	Wer
15 th Workshop on Quality Improvement Methods (Kunert, Müller, Weihs)	16.-17.06.2017, Dortmund	24 Teilnehmer aus 7 Ländern, darunter Samineh Bagheri, Martin Zaefferer, Maria Konstantinou, Katarzyna Filipiak, Chen Nan, Stefanie Biedermann, Wei Zheng, Uwe Jensen, Fabrizio Ruggeri, Philippe Castagliola
Methods and Challenges in Financial Risk Management III (Krämer)	08.-10.10.2017, Kloster Drübeck	21 Teilnehmer aus 4 Ländern, darunter Awdesch Melzer, Bernd Fitzenberger, Timo Teräsvirta, Wolfgang Härdle, Ya Qian, Hien Pham Thu, Niels Wesselhöfft, Xiu Xu, Christoph Breunig, Alona Zharova
7 th Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	16.-17.11.2017, Rom	45 Teilnehmer aus 10 Ländern, darunter Manfred Deistler, Esther Ruiz, Bo Zhou, Majid M. Al-Sadoon, Edgar Dobriban, Dacheng Xiu, Piotr S. Kokoszka, Anne van Delft, Moritz Jirak, Michael Wolf, David Preinerstorfer, Germain Van Bever, Thomas V. Mikosch, Matteo Barigozzi
16 th Workshop on Quality Improvement Methods (Müller, Kunert, Kuhnt)	01.-02.06.2018, Dortmund	24 Teilnehmer aus 7 Ländern, darunter Philippe Castagliola, Roberto Fontana, Sven Knoth, Sophie Mercier, Henry Wynn, Christian Paroissin, Waltraud Kahle, Edsel Pena, Udo Kamps, Eva Riccomagno
8 th Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	20.-21.09.2018, Kopenhagen	60 Teilnehmer aus 11 Ländern, darunter Soren Johansen, Mark Podolskij, Claudia Kirch, Serge Darolles, Chun Yip Yau, Johannes Heiny, Anders Rahbek, Masanobu Taniguchi, Rainer von Sachs, Victor Panaretos, Siegfried Hörmann, Daniel Pena, Shahin Tavakoli, Richard A. Davis
Workshop on Optimality in Algebraic Statistics (Kuhnt)	14.-15.02.2019, Dortmund	14 Teilnehmer aus 4 Ländern, darunter Thomas Kahle, Alexandros Grosdos, Frank Röttger, Rainer Schwabe, Piotr Zwiernik, Carlos Amendola, Fabio Rapallo, Eliana Duarte
9-10 th Conference on New Developments in Econometrics and Time Series (Dette)	06.-07.06.2019, Graz	45 Teilnehmer aus 9 Ländern, darunter Alexander Aue, Hannes Leeb, Tobias Kley, Efstathia Bura, Manfred Deistler, Hans Manner, Benedikt M. Pötscher, Tailen Hsing, Efstathios Paparoditis, Greg Rice, Antonio Cuevas, Dominik Liebl
17 th Workshop on Quality Improvement Methods (Kuhnt, Müller, Kunert)	14.-15.06.2019, Dortmund	22 Teilnehmer aus 6 Ländern, darunter William Q. Meeker, Hanno Gottschalk, Olivier Roustant, Philippe Castagliola, Alicja Jokiel-Rokita, Marco S. Reis, Philipp Otto, Ulrike Grömping, Rosemary A. Bailey, John Stufken
18 th Workshop on Quality Improvement Methods (Müller, Kuhnt)	16.-17.07.2021, Dortmund	20 Teilnehmer aus 5 Ländern, darunter Katarzyna Filipiak, Rakhi Singh, John Stufken, Christoph Neumann, Ulrike Grömping, Per B. Brockhoff

1.5 Nationale und internationale Kooperationen und Vernetzung

Schon über die oben gelisteten, vom SFB (mit)organisierten Konferenzen fand ein reger und fruchtbarer (zu messen etwa an gemeinsamen Publikationen) nationaler und internationaler Gedankenaustausch statt. Darüber hinaus sind viele Teilnehmer der in der Regel in Dortmund organisierten Konferenzreihe "Quality improvement methods" für längere Forschungsaufenthalte am Ort geblieben. Weitere Standbeine für unsere nationale und internationale Kooperation und Vernetzung waren auswärtige Vorträge von SFB-Mitgliedern auf Konferenzen oder Fakultätsseminaren, oder Besuche auswärtiger Wissenschaftler bei uns: Insgesamt 310 Gastvorträge von insgesamt 227 auswärtigen Wissenschaftlern gab es vor Ort im SFB, insgesamt 359-mal haben Vertreter des SFBs in auswärtigen Fakultätsseminaren und insgesamt 835-mal auf wissenschaftlichen Fachkonferenzen vorgetragen. Das alles hat zwar gegen Ende des SFBs wegen Corona kaum noch funktioniert, aber die in der Corona freien Zeit geknüpften Kontakte und die vielfältigen Begegnungen auf Konferenzen und Seminaren haben unsere Arbeit ganz wesentlich vorangebracht.

Bei den folgenden Gästen gingen die Besuche über bi-personale Kontakte hinaus:

Wer	Wann	Wozu
Akashi, Fumiya Waseda University, Tokyo	12.09.-29.10.2015 18.02.-25.02.2017 16.11.-27.11.2018	gemeinsame Forschung
Asscher, Jaqueline Kinneret Academic College, See Genezareth	14.-19.07.2013	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Aue, Alexander University of California, Davis	18.09.-19.09.2013 29.02.-11.03.2016	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Bailey, Rosemary A. University of St Andrews	03.06.-13.06.2015	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Baltagi, Badi H. Syracuse University, NY	07.07.-08.07.2009 19.04.-21.04.2010	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Becker, Claudia Martin Luther Universität Halle	29.03.-03.04.2011	gemeinsame Forschung
Beran, Jan Universität Konstanz	23.11.-24.11.2010 06.11.-08.11.2017	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Bernstein, David University of Miami	15.10.-15.12.2019	gemeinsame Forschung
Biedermann, Stefanie University of Southampton	29.03.-16.04.2010 16.08.-03.09.2010 30.06.-04.07.2011 30.07.-10.08.2012	gemeinsame Forschung
Biswas, Atanu Indian Statistical Institute, Kalkutta	26.03.-01.04.2012	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Bodnar, Taras Stockholm University	04.06.-08.06.2018	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Chao, Shih Kang HU Berlin	04.08.-15.08.2013	gemeinsame Forschung

Wer	Wann	Wozu
Cheng, Guang Purdue University, West Lafayette	13.10.-15.10.2013 30.11.-03.11.2014	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Clarke, Brenton R. Murdoch University Perth	14.10.-28.10.2014	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Dhar, Subhra Sankar , Indian Institute of Technology, Kanpur	01.06.-30.06.2017 01.06.-17.06.2018	gemeinsame Forschung
Deistler, Manfred TU Wien	26.01.-28.01.2016 16.01.-20.01.2017	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Dudoit, Sandrine University of California, Berkeley	01.03.-05.03.2016	gemeinsame Forschung
Figuerola Lopez, José E. Washington University, St. Louis	28.02.-04.03.2016	gemeinsame Forschung
Fokianos, Konstantinos University of Cyprus, Nikosia	22.06.-26.06.2013 29.04.-07.05.2014 19.04.2016	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Franke, Brice Université de Bretagne Occidentale, Brest	03.07.-31.07.2012 12.08.-31.08.2013 04.08.-23.08.2014	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Gelfand, Alan E. Duke University, Durham	13.03.-14.03.2014 14.05.-17.05.2018 08.09.-12.09.2019	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Grigoriev, Yuri St. Petersburg State University	16.02.-01.03.2014	gemeinsame Forschung
Guchenko, Roman St. Petersburg State University	03.05.-31.05.2016 03.05.-31.05.2017	gemeinsame Forschung
Hallin, Marc Université Libre de Bruxelles	02.02.-04.02.2015 15.02.-17.02.2017	Gastvorträge, Humboldt-Professur
Heuchenne, Cédric Université de Liège	17.08.-24.08.2009 09.07.-20.07.2011	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Hoderlein, Stefan Brown University, Providence	27.07.2009 12.04.-13.04.2011	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Horváth, Lajos University of Utah, Salt Lake City	21.02.-26.02.2014	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Johnstone, Ian Stanford University	29.02.-04.03.2016	gemeinsame Forschung
de Jong, Robert Ohio State University, Columbus	01.07.-04.07.2013 17.05.-21.05.2016	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Kley, Tobias London School of Economics	01.08.-05.08.2016 25.06.-27.06.2017	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Kokoszka, Piotr Colorado State University, Fort Collins	29.02.-04.03.2016	gemeinsame Forschung
Kuosmanen, Timo Aalto University, Helsinki	23.03.-27.03.2015 15.10.-23.10.2016	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Ley, Christophe Université Libre de Bruxelles	06.10.-12.10.2013	gemeinsame Forschung

Wer	Wann	Wozu
Liu, Yan Waseda University, Tokyo	12.09.-29.10.2015 09.02.-14.02.2017	gemeinsame Forschung
Melas, Viatcheslav, B. St. Petersburg State University	Insgesamt sieben jeweils mehr- wöchige Besuche	gemeinsame Forschung
Parry, Katharina Massey University, Palmerston	28.08.-01.09.2017 12.08.-23.08.2019	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Pepelyshev, Andrey Cardiff University	18.-22.03.2013 17.-19.06.2016	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Price, Michael University of Alabama, Tuscaloosa	10.09.-15.09.2018	gemeinsame Forschung
Riccomagno, Eva Universita di Genova	15.07.-23.07.2011 15.06.-31.07.2012 06.02.-09.02.2017	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Ruggeri, Fabrizio Istituto di Matematica Applicata, Mailand	18.05.-22.05.2015 10.01.-22.01.2016	Gastvortrag, gemeinsame Forschung
Sharipov, Olimjon Uzbek Academy of Sciences, Taschkent	Insgesamt fünf jeweils mehr- wöchige Besuche	gemeinsame Forschung
Sharipov, Sadillo National University of Uzbekistan, Tashkent	14.10.-12.12.2019	gemeinsame Forschung
Shpilev, Petr St. Petersburg State University	04.05.-30.05.2012	gemeinsame Forschung
Taqqu, Murad S. Boston University	01.03.-05.03.2012 13.01.2015	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Vogt, Michael University of Cambridge	12.11.-14.11.2012 01.04.-05.04.2013 21.05.-22.05.2019	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Wu, Weichi University College London	16.11.-19.11.2015 09.11.-11.11.2016 14.07.-22.07.2019 13.01.-16.01.2020	Gastvorträge, gemeinsame Forschung
Yu, Yaming University of California, Davis	23.06.-30.06.2010	gemeinsame Forschung
Zhou, Zhou University of Toronto	17.06.-22.06.2014 22.05.-10.06.2016	gemeinsame Forschung

2 Berichte über die Teilprojekte der letzten Förderperiode

2.1.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A1

2.1.1.1 Titel

Zeitvariable Abhängigkeitsstrukturen in den Renditen risikobehafteter Kapitalanlagen

2.1.1.2 Projektleitung

Krämer, Walter, Prof. Dr., *21. November 1948, deutsch

TU Dortmund, Fakultät Statistik, Institut für Wirtschafts- und Sozialstatistik

D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-3125

E-Mail: walter.kraemer@tu-dortmund.de

Dette, Holger, Prof. Dr., *4. Mai 1961, deutsch

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Mathematik, Lehrstuhl für Stochastik

D-44780 Bochum

Telefon: 0234-32-28284

E-Mail: holger.dette@rub.de

Golosnoy, Vasyl, Prof. Dr., *10. November 1977, ukrainisch

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften,

Lehrstuhl für Quantitative Analyse (Statistik/Ökonometrie)

D-44780 Bochum

Telefon: 0234-32-22917

E-Mail: vasyg.golosnoy@rub.de

2.1.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.1.2.1 Bericht

Gegenstand des Projekts waren Kursbewegungen und Volatilitäten auf Kredit- und Aktienmärkten sowie Prognosen von Kreditausfällen. Gemeinsam war allen Fragen die potentielle Zeitvariabilität der Modelle und Parameter sowie die dadurch induzierte Notwendigkeit von Tests auf deren zeitliche Konstanz, verbunden mit einer Abkehr von der oft recht einengenden Annahme der Stationarität.

In Modul 1 ("Modellieren von Abhängigkeitsstrukturen") standen (Flanken-)Abhängigkeiten bei bivariaten und multivariaten Daten im Mittelpunkt. Bis dato waren in diesem Kontext vor allem elliptische Verteilungen das Modell der Wahl. Hier haben wir explizite Aussagen für verallgemeinerte exponentielle Mischverteilungen hergeleitet und Aussagen über populäre Risiko- maße (Value-at-Risk, Expected Shortfall) für Netzwerke aus Akteuren mit Risikoobjekten gewonnen, die Verteilungen mit leichten Flanken besitzen, sowie die Effekte von Portfolio- diversifikation im Hinblick auf den Risikoeinfluss der einzelnen Investoren auf das Systemrisiko quantifiziert (Klüppelberg und Seifert 2019, 2020). Damit erweitern wir frühere Ergebnisse für Risikoobjekte mit schweren Flanken auf Risikoobjekte mit leichten Flanken und identifizieren substantielle Unterschiede zwischen diesen Fällen. Das ist sowohl für Investoren als auch für Finanzregulatoren von Interesse, da so genauere Risikoabschätzungen in beiden Fällen möglich werden und sich bei Objekten mit leichten Flanken in Krisensituationen eine Portfolio- diversifikation als potentiell weiterhin sinnvoll erweist. Für diese Resultate hat unsere Projekt- mitarbeiterin Miriam Seifert den Wolfgang-Wetzels-Preis 2020 der Deutschen Statistischen Gesellschaft erhalten.

In Dette und Wu (2019) und einer Reihe verwandter Arbeiten wenden wir uns der Abhängigkeit von Finanzdaten im Zeitreihenkontext zu und schwächen die bis dato verbreitete Annahme stationärer Abhängigkeitsstrukturen ab, sowohl im Kontext von Prognosen als auch von Tests. Dazu gehört auch ein neuer Ansatz der Strukturbruchanalyse, der nicht mehr davon ausgeht,

dass ein abrupter Strukturbruch vorliegt, sondern unter der Alternative zulässt, dass sich ein relevanter Unterschied kontinuierlich aufbaut.

In Modul 2 ("Messen, Schätzen und Testen von Volatilitäten") stellen wir neue stochastische Volatilitätsmodelle vor, die anders als bisher verwendete konventionelle Modelle auch graduelle Änderungen im Sprungverhalten zulassen und entwickeln neue Tests, die unter der Alternative sowohl abrupte als auch graduelle Änderungen im Sprungverhalten zulassen (u.a. Hoffmann, Vetter und Dette 2018, Dette und Hoffmann 2019). Als konkrete Anwendung haben wir dabei die Kurse der Apple-Aktie untersucht und konnten hier Strukturbrüche erkennen, die gewöhnlichen Verfahren verborgen bleiben.

Ein weiterer Gegenstand unseres Interesses in diesem Modul waren verschiedene Typen von realisierten Volatilitäten. Hier haben wir das bekannte Manko korrigiert (siehe Dette, Golosnoy und Kellermann 2016), dass die Intra-Tages-Periodizität in kleinen Stichproben auch ohne Sprünge substantielle Verzerrungen induzieren kann (Dette, Golosnoy und Kellermann 2021+). Konkret ist es uns gelungen, für unterschiedliche Schätzer jeweils passende Korrekturen abzuleiten. Darauf aufbauend konstruieren Golosnoy, Gribisch und Seifert (2019) sparsame, auf exponentieller Glättung basierende Prognosemodelle für realisierte Minimum-Varianz-Portfolio-Gewichte.

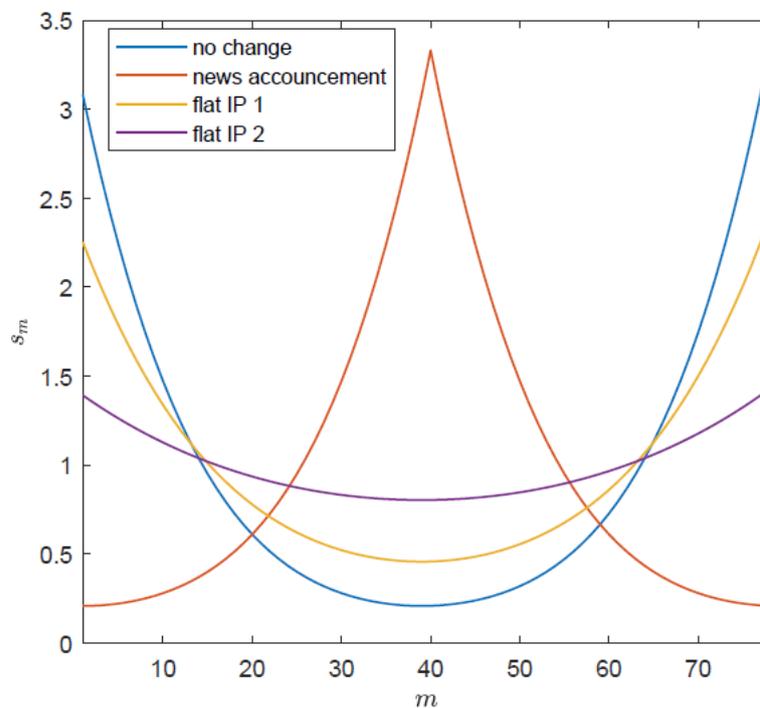


Abb. 1: Unterschiedliche Formen für Intra-Tages-Periodizität, m sind die 5-minütigen Zeitintervalle (aus Dette/Golosnoy/Kellermann 2021+)

Im Kontext zeitdiskreter Modelle haben wir in diesem Modul auch neue Erkenntnisse betreffend die in der Literatur etwas stiefmütterlich behandelte Schiefe von Kapitalmarktrenditen generiert. Dass deren (wenn auch nur geringfügiger) Mangel an Symmetrie vor allem durch unterschiedliche Häufigkeiten extrem hoher und extrem niedriger Werte zustande kommt, war allgemein bekannt: Extreme Ausschläge nach unten sind häufiger als extreme Ausschläge nach oben. Neu ist unser Befund, dass es sich bei absolut kleinen Renditen in der Regel umgekehrt verhält (Krämer 2021): Trägt man etwa die Summe aller Renditen mit Absolutwert unter einer bestimmten Grenze gegen diese Grenze ab, ergibt sich eine löffelförmige Kurve, so wie in Abb.2 beispielhaft für 11.095 tägliche Renditen der Bayer AG. Krämer (2021) präsentiert verschiedene potentielle Erklärungen für dieses Phänomen, ohne abschließendes Resümee. Mögliche Kandidaten sind eine Vorliebe der Medien für eher schlechte Unternehmensnachrichten oder Restriktion bezüglich Leerverkäufen. Hier hinterlässt der SFB 823 eine offene Frage, die von der Arbeitsgruppe Krämer auch nach Auslaufen des SFBs weiterbearbeitet werden wird.

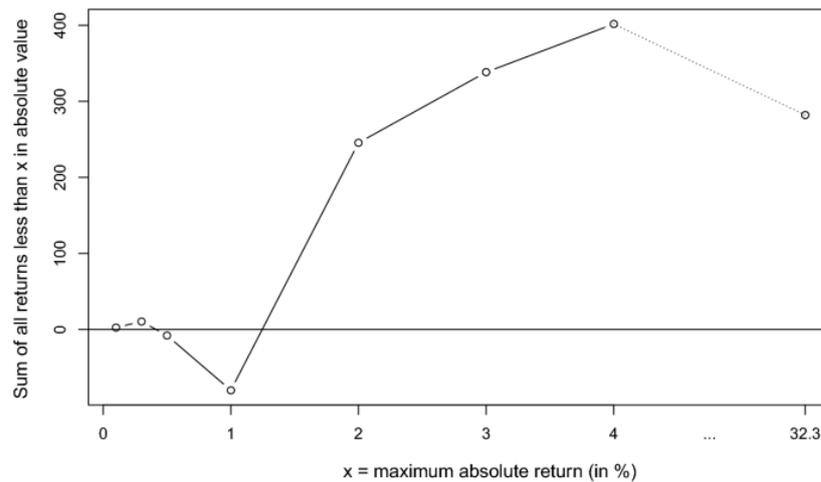


Abb. 2: Kumulierte Summe von Renditen versus maximaler Absolutbetrag (aus Krämer 2021)

In einem Bayes-Kontext schließlich betrachten Dette, Ley und Rubio (2018) schief-symmetrische Verteilungen und entwickeln eine neue Klasse von nicht-informativen a-priori Verteilungen, die direkt für die Konstruktion von Bayes-Schätzern verwendet werden können.

Modul 3 ("Testen auf Strukturkonstanz") hatte eine mögliche Zeitvariabilität von Abhängigkeitsstrukturen sowie Tests von ausgewählten Risikomaßen zum Gegenstand. Hier hatten wir im zweiten Förderzeitraum neue Methoden zum multivariaten Value at Risk-Backtesting eingeführt (Krämer und Wied 2015). Diese wurden von zwei Doktoranden wegen des Wechsels auf eine W3-Professur nach Köln ausgeschiedenen Projektleiters D. Wied in Richtung Expected Shortfall verallgemeinert. Für zeitvariierende realisierte Kovarianzmatrizen entwickeln Golosnoy, Schmid, Seifert und Lazariv (2020) neue sequentielle Überwachungsverfahren zur Strukturbruchentdeckung in den realisierten Minimum-Varianz-Portfolio-Gewichten, und im Kontext linearer Zustandsraummodelle schlagen Golosnoy, Köhler, Schmid und Seifert (2021+) einen neuen statistischen Omnibus-Typ Stichprobentest für die Parameterstabilität vor.

Auch Strukturbrüche in hochdimensionalen und funktionalen Daten waren in diesem Modul ein Gegenstand unseres Interesses. Mit bis dato verfügbaren Methoden konnten nur klassische Strukturbrüche, bei denen überhaupt eine Änderung des Parameters auftritt, aufgedeckt werden (vgl. z.B. Jirak 2015). Wir argumentieren, dass kleine Änderungen in der Praxis nicht relevant sind (zum Beispiel ist bei kleinen Veränderungen in der Volatilität eine Umstrukturierung eines Portfolios wegen anfallender Transaktionskosten nicht ratsam), definieren "relevante" Strukturbrüche und entwickeln erstmals Methoden, um diese im hochdimensionalen und funktionalen Fall statistisch nachzuweisen. Die dabei zugrundeliegenden hochdimensionalen Zeitreihen lassen sich auch durch spezielle Faktormodelle beschreiben. Hier haben wir einen neuen, auf sequentiellen Verfahren basierenden Strukturbruchtest für hochdimensionale Zeitreihen abgeleitet und lassen in Dette, Pan und Yang (2021) auch Strukturbrüche in hochdimensionalen Kovarianzmatrizen zu. Dafür wurde ein zweistufiges, auch im ultra-hochdimensionalen Fall anwendbares Verfahren entwickelt, Dergleichen ultra-hochdimensionale Daten waren in der Literatur bis dato im Allgemeinen ausgeschlossen.

Für funktionale Daten basierte der größte Teil der konventionellen Methoden auf einer Hauptkomponentenanalyse und klassischen Strukturbruchtests auf die Scores der Hauptkomponenten. Hier haben wir in Dette, Kokot und Aue (2020) und anderen Arbeiten erstmalig einen alternativen Ansatz entwickelt, der nicht auf Hauptkomponenten basiert, sondern die Parameter der funktionalen Zeitreihe (wie Mittelwertfunktion oder Kovarianzoperator) bzgl. ihres Maximalabstands vergleicht.

Weitere Schwerpunkte in diesem Modul waren statistische Testverfahren für die "white-noise"-Hypothese und für die Hypothese der Stationarität in funktionalen Zeitreihen (siehe Bücher, Dette und Heinrichs 2020). Außerdem haben wir hochdimensionale funktionale Zeitreihen

untersucht, auch im Kontext hochdimensionaler graphischer Modelle, neue statistische Methoden für Parallelitätstests bei Panel-Daten vorgestellt und einen neuen Test für die Hypothese des "parallelen Trends" für den Differenz-von-Differenzen-Ansatz entwickelt (vgl. Abadie 2005).

Der Gegenstand von Modul 4 waren hochdimensionale Aktienportfolios, räumliche Korrelation sowie Kreditportfolios und Ratingmigrationen. Hier weisen etwa Krämer und Neumärker (2019) in Erweiterung von Krämer und Neumärker (2016) neue Wege auf, die Qualität konkurrierender Ausfallprognosen zu vergleichen. Das Problem ist hier wie bei allen Wahrscheinlichkeitsprognosen, dass sich konkurrierende univariate Qualitätskriterien wie der bekannte Brier-Score oder der Logarithmische Score zuweilen widersprechen. Alternativ werden daher seit längerem Halbordnungen von Wahrscheinlichkeitsprognosen untersucht, die mit möglichst vielen univariaten Gütemaßen kompatibel sind. Hier ist es uns gelungen, ein Kriterium für Gütemaße zu finden, das eine Kompatibilität mit der Refinement-Ordnung garantiert. Im Kontext von hochdimensionalen Aktienportfolios können Bodnar, Dette, Parolya und Thorsén (2021+) schließlich erstmals die exakte Verteilung der geschätzten optimalen Portfolio-Gewichte und auch im hochdimensionalen Fall konsistente Schätzer der optimalen Gewichte angeben.

Ein gewisses Problem bei der Umsetzung an Anfang der Förderperiode angekündigten Arbeitsprogramms war die große Fluktuation der Mitarbeiter. Das ist einerseits erfreulich, denn diese haben vor allem wegen hervorragender Arbeitsmarktchancen früher als geplant den SFB verlassen, hat andererseits aber zu ungeplanten Schwerpunktverschiebungen geführt. So wurde etwa durch den Einstieg von Christopher Walsh ein noch stärkerer Fokus auf die Volatilitätsmodellierung gesetzt (Walsh und Vogt 2021).

Sehr fruchtbar war die enge Kooperation mit anderen Teilprojekten des SFBs. So sind unsere neuen Schätz- und Testverfahren im nichtstationären Kontext (u.a. Dette und Wu 2019 oder Bücher, Dette und Heinrichs 2021) in enger Kooperation mit den Teilprojekten C1, C3 und A7 entstanden. Auch die Arbeiten zu funktionalen Daten haben sehr von der Expertise von Teilprojekt C3 (Herold Dehling) über stochastische Prozesse in Banachräumen profitiert. Dette und Kokot (2021) verwenden dann diese Ergebnisse in Teilprojekt T1 und schlagen effiziente Tests für das Bio-Äquivalenzproblem bei funktionalen Daten vor. Zum Thema "Stationarität in funktionalen Zeitreihen" wurde ebenfalls intensiv mit den Teilprojekten C1 und A7 kooperiert und speziell mit C1 ist auch ein neuer Test für die Hypothese des "parallelen Trends" für den Differenz-von-Differenzen-Ansatz (vgl. Abadie 2005) entstanden. Betreffend Kreditausfälle war schließlich ein wichtiger Ansprechpartner der bereits aus früheren gemeinsamen Arbeiten eingeführte Projektleiter Peter Posch aus A7 (Krämer und Posch 2019).

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.1.2.2):

- Abadie, A. (2005): Semiparametric difference-in-differences estimators, *The Review of Economic Studies* 72, 1-19.
- Bodnar, T., Dette, H., Parolya, N., Thorsén, E. (2021+): Sampling distributions of optimal portfolio weights and characteristics in low and large dimensions, erscheint in: *Random Matrices: Theory and Applications*.
<https://arxiv.org/abs/1908.04243>
- Bücher, A., Dette, H., Heinrichs, F. (2020): Detecting Deviations from Second-order stationarity in locally stationary functional time series, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 72, 1055-1094.
- Dette, H., Golosnoy, V., Kellermann, J. (2016): The effect of intraday periodicity on realized volatility Measures, *SFB 823 Discussion Paper 55/2016*.
- Dette, H., Ley, C., Rubio, F.J. (2018): Natural (non-)informative priors for skew-symmetric distributions, *Scandinavian Journal of Statistics* 45, 405-420.
- Dette, H., Kokot, K. (2021): Bio-equivalence tests in functional data by maximum deviation, *Biometrika* 108(4), 895-913.
- Dette, H., Wu, W. (2021+): Prediction in locally stationary time series, erscheint in: *Journal of Business & Economic Statistics*.
<https://arxiv.org/abs/2001.00419>

- Golosnoy, V., Köhler, S., Schmid, W., Seifert, M.I. (2021+): Testing for parameter changes in linear state space models, erscheint in: *Applied Stochastic Models in Business and Industry*.
<https://doi.org/10.1002/asmb.2636>
- Hoffmann, M., Dette, H. (2019): On detecting changes in the jumps of arbitrary size of a time-continuous stochastic process, *Electronic Journal of Statistics* 13, 3654-3709.
- Hoffmann, M., Vetter, M., Dette, H. (2018): Nonparametric inference of gradual changes in the jump behaviour of time-continuous processes, *Stochastic Processes and their Applications* 128(11), 3679-3723.
- Jirak, M. (2015): Uniform change point tests in high dimension, *Annals of Statistics* 43(6), 2451-2483.
- Kley, O., Klüppelberg, C., Reinert, G. (2016): Risk in a large claims insurance market with bipartite graph structure, *Operations Research* 64(5), 1159-1176.
- Kley, O., Klüppelberg, C., Reinert, G. (2018): Conditional risk measures in a bipartite market structure, *Scandinavian Actuarial Journal* 2018(4), 328-355.
- Klüppelberg, C., Seifert, M.I. (2019): Explicit results on conditional distributions of generalized exponential mixtures, *Journal of Applied Probability* 57(3), 760-774.
- Krämer, W., Posch, N. P. (2019): Partial orderings of default predictions, in: N. Bauer, K. Ickstadt, K. Lübke, G. Szepannek, H. Trautmann, M. Vichi (Hrsg.): *Applications in Statistical Computing. Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization*. Springer, 187-199.
- Krämer, W., Wied, D. (2015): A simple and focused backtest of value at risk, *Economics Letters* 137, 29-31.
- Krämer, W., Neumärker, S. (2016): Comparing the accuracy of default predictions in the rating industry for different sets of obligors, *Economics Letters* 145, 48-51.
- Walsh, C., Vogt, M (2021+): Locally stationary volatility modelling, erscheint in: *Journal of Business & Economic Statistics*.
<https://doi.org/10.1111/sjos.12342>

2.1.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Bücher, A., Dette, H., Heinrichs, F. (2021+): Are deviations in a gradually varying mean relevant? A testing approach based on sup-norm estimators, erscheint in: *Annals of Statistics*.
<https://arxiv.org/abs/2002.06143>
- Dette, H., Golosnoy, V., Kellermann, J. (2021+): Correcting intraday periodicity bias in realized volatility measures, *SFB 823 Discussion Paper 21/20*; erscheint in: *Econometrics and Statistics*.
- Dette, H., Kokot, K., Aue, A. (2020): Functional data analysis in the Banach space of continuous functions, *Annals of Statistics* 48(2), 1168-1192.
- Dette, H., Pan, G., Yang, Q. (2021): Estimating a change point in a sequence of very high-dimensional covariance matrices, *Journal of the American Statistical Association*.
<https://doi.org/10.1080/01621459.2020.1785477>
- Dette, H., Wu, W. (2019): Detecting relevant changes in the mean of nonstationary processes - a mass excess approach, *Annals of Statistics* 47(6), 3578-3608.
- Golosnoy, V., Schmid, W., Seifert, M.I., Lazariv, T. (2020): Statistical inferences for realized portfolio weights, *Econometrics and Statistics* 14, 49-62.
- Golosnoy, V., Gribisch, B., Seifert, M.I. (2019): Exponential smoothing of realized portfolio weights, *Journal of Empirical Finance* 53, 222-237.
- Klüppelberg, C., Seifert, M.I. (2020): Financial risk measures for a network of individual agents holding portfolios of light-tailed objects, *Finance and Stochastics* 23(4), 795-826.
- Krämer, W. (2021): Asymmetry in the distribution of daily stock returns, *Empirical Economics* 60, 1115-1125.
- Krämer, W., Neumärker, S. (2019): Skill scores and modified Lorenz domination in default forecasts, *Economics Letters* 181, 61-64.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.1.3 Ausstattung des Teilprojekts A1

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungsquelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	1. W. Krämer, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)	10		Grundausstattung
	2. H. Dette, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	5		Grundausstattung
	3. V. Golosnoy, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	Fak. WiWi (Bo)	10		Grundausstattung
	4. J. Gösmann, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grundausstattung
	5. M. Pape, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. WiWi (Bo)	5		Grundausstattung
	6. R. Löser, M.Sc., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)	20		Grundausstattung
Nichtwissenschaftliches Personal	7. M. Stein, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Bo)	3		Grundausstattung
	8. E. Brune, Verw. Ang.		Fak. Statistik (Do)	3		Grundausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	9. S. Neumärker, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)		Doktorand/PostDoc	
	10. Ch. Walsh, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)		PostDoc	
	11. M. Hoffmann, Dipl. Math., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		Doktorand	
	12. W. Wu, Ph.D., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	13. M. I. Seifert, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. WiWi (Bo)		PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Walter Krämer:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 2, 3 und 4.

2. *Prof. Dr. Holger Dette:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.

3. *Prof. Dr. Vasyl Golosnoy:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.

4. *Josua Gösmann, M.Sc.:*

Arbeitete in Modul 3 zum Thema Strukturbruchtests für hochdimensionale Daten.

5. *Dr. Markus Pape:*

Arbeitete mit H. Dette und V. Golosnoy in Modul 3 zum Thema Faktormodelle. Soll sich für eine Hochschullaufbahn qualifizieren.

6. *Robert Löser, M.Sc.:*

Arbeitete in Modul 3 mit W. Krämer in multivariaten Value at Risk-Backtesting.

7. *Martina Stein:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Bochum.

8. *Eva Brune:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Dortmund.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

9. *Dr. Simon Neumärker:*

Arbeitete mit W. Krämer in Modul 4 an der Bewertung von Kreditausfallprognosen.

10. *Dr. Christopher Walsh:*

Arbeitete mit W. Krämer in Modul 4 an der Volatilitätsmodellierung.

11. *Michael Hoffmann, Dipl. Math.:*

Arbeitete mit H. Dette in den Modulen 1 und 2 zu Distanzkorrelationen, Extremwerttheorie für nichtstationäre Zeitreihen und Änderungen im Sprungverhalten von Lévy-Prozessen.

12. *Weichi Wu, Ph.D.:*

Arbeitete mit H. Dette in Modul 3 über Tests auf Strukturbrüche und funktionale Daten.

13. *Dr. Miriam Isabel Seifert:*

Arbeitete in Modul 1 zum Thema Extremwerttheorie und in Modul 2 zum Thema Modellierung von Hochfrequenzdaten.

2.2.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A3

2.2.1.1 Titel

Dynamische Modellierung von Produktionstechnologien

2.2.1.2 Projektleitung

Frondel, Manuel, Prof. Dr., *22. Oktober 1964, deutsch

RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung

D-45128 Essen

Telefon: 0201-8149-204

E-Mail: frondel@rwi-essen.de

Schmidt, Christoph M., Prof. Dr., *25. August 1962, australisch

RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung

D-45128 Essen

Telefon: 0201-8149-228

E-Mail: schmidt@rwi-essen.de

Wagner, Martin, Prof. Dr., *2. September 1972, österreichisch

TU Dortmund, Fakultät Statistik, Lehrstuhl Ökonometrie und Statistik

D-44221 Dortmund

ausgeschieden am 30.9.2019, aktuell erreichbar unter:

E-Mail: Martin.Wagner@aau.at

2.2.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.2.2.1 Bericht

Gegenstand des Projekts waren Produktionstechnologien mit im Zeitablauf variierenden Produktionskapazitäten, Outputs und technologischen Möglichkeiten und deren statistische Modellierung. In Modul 1 (Dynamische Modellierung von Produktionsprozessen) stand die Auswahl von Modellen auf Basis des Focused Information Criterion (FIC) im Mittelpunkt. Herkömmliche FIC-Kriterien verwenden eine inkonsistente Schätzung des Bias, da sie auf lokaler Asymptotik der Schätzer unter Modellfehlspezifikation basieren. Als Alternative wurde ein FIC-Kriterium unter festen Alternativen entwickelt und damit eine konsistente Schätzung des Bias ermöglicht (Behl et al. 2012, 2013). Im Gegensatz zu herkömmlichen Modellauswahlkriterien erlaubt das FIC die zweckspezifische Auswahl von Modellen, in dem Sinn, dass eine Art von Modell für Rückschlüsse auf einen bestimmten Fokusparameter sehr gut geeignet ist, für einen anderen jedoch nicht. Unter Verwendung des FIC-Konzepts von Behl, Claeskens und Dette (2014) wenden Behl et al. (2019) das FIC bei der Auswahl von Quantilsregressionsmodellen zur Schätzung des Rebound-Effekts im individuellen Mobilitätsverhalten an und zeigen, dass die Modellauswahl sowohl vom Fokusparameter als auch von den Perzentilen der untersuchten abhängigen Variablen abhängen kann.

Andor, Frondel und Horvath (2021b) untersuchen den Effekt der Erhebungsformate Single-binary-choice und Open-end-Format in einer groß angelegten Umfrage zur Zahlungsbereitschaft (WTP) für Ökostrom unter rund 6.000 deutschen Haushalten. Unter Berücksichtigung der Selbstselektion der Befragten entlang der Wahrnehmung der Konsequenzen ihrer Antworten für die Politik verwenden wir ein Switching-Regressionsmodell, das diese potenzielle Endogenität berücksichtigt und finden, im Gegensatz zur Literatur, dass die WTP-Gebote im Open-end-Format die im Single-binary-choice-Format tendenziell übersteigen.

Alberini und Horvath (2021) betrachten die Produktion von umweltfreundlichen PKWs. Die Wirtschaftstheorie legt nahe, dass die durch das Autofahren verursachten Umweltexternalitäten durch Steuern korrigiert werden können. Alberini und Horvath (2021) konzentrieren sich auf eine

konkrete derartige Steuer, eine proportional zur CO₂-Emissionsrate eines Fahrzeugs ausgestaltete jährliche Zulassungsgebühr, und konstatieren einen Rückgang der Neuwagenverkäufe aufgrund der Steuer um 2-5 %.

Im Fokus von Modul 2 (Parametrische und nichtparametrische Effizienzschätzung) stand die Schätzung von individuellen Effizienzwerten mit Hilfe von neu entwickelten Methoden mit dem Ziel der Anwendung auf die Anreizregulierung der Betreiber für Strom- und Gasnetze. Andor und Parmeter (2017) erweitern die herkömmliche Stochastic Frontier Analysis (SFA), die klassischerweise mit Maximum-Likelihood-Schätzungen operiert, um ein Pseudolikelihood-Schätzverfahren, das die Schätzung des Fehlerterms von der Schätzung der Produktionsfunktion entkoppelt. Sie schlagen vor, dieses Schätzverfahren auch bei der parametrischen Effizienzschätzung mittels SFA anzuwenden und zeigen, dass das Pseudolikelihood-Schätzverfahren über eine große Spannweite von Szenarien und Leistungskriterien sehr ähnliche Ergebnisse erzielt. Bei fehlspezifizierter Verteilung des Ineffizienzterms ist die neue Methode sogar besser.

In Erweiterung von Andor und Hesse (2014) und Andor und Parmeter (2017) vergleichen Andor et al. (2019) verschiedene Konzepte zur Effizienzmessung für regulatorische Zwecke mittels Data Envelopment Analysis (DEA) oder Stochastic Frontier Analysis (SFA) sowie einer Kombination aus beiden. Verglichen wurde die Nutzung des maximalen Werts – wie in der deutschen Anreizregulierung – sowie die Nutzung des arithmetischen Mittels von unternehmensspezifischen DEA- und SFA-Effizienzschätzungen – wie dies in anderen europäischen Anreizregulierungen getan wird. Andor et al. (2019) zeigen, dass Kombinationen den Einzelmethoden und das Maximum dem Durchschnitt vorzuziehen sind.

Andor et al. (2021a) analysierten Energieeinsparpotentiale in privaten Haushalten. Neben Umfragedaten zum Stromverbrauch nutzen sie auch detaillierte Informationen über den Gerätebestand und dessen Nutzung sowie sozioökonomische Merkmale und kommen auf ein Einsparpotential von etwa 20 %. Die wichtigsten Determinanten dieser individuellen Ineffizienz sind die Haushaltsgröße und das Einkommen: Vor allem kleinere, einkommensschwächere Haushalte, Mieterinnen und Mieter sowie Haushalte in Mehrfamilienhäusern tendieren zu einem ineffizienteren Energieverbrauch.

In Modul 3 wurden die langfristigen Zusammenhänge zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und Emissionen sowie Energie- und Rohstoffeinsatz, sogenannte Umwelt-Kuznets-Kurve (UKK)- und Intensity of Use-Kurven (IoU-Kurven), und die daraus resultierenden methodischen Probleme untersucht, in Erweiterung von Wagner (2008, 2012, 2015), Vogelsang und Wagner (2014) oder Wagner und Hong (2016). Dabei wurde die Validität der IoU-Hypothese in einer Reduzierte-Form-Beziehung aus theoretischer wie auch ökonometrischer Sicht kritisch diskutiert. Sodann wurden Kointegrationstest- und Monitoringprozeduren zur Untersuchung der strukturellen Stabilität der modellierten nichtlinearen kointegrierenden Beziehungen entwickelt. Diese Prozeduren komplementierten die Forschung zu zeitvariierenden kointegrierenden Beziehungen bzw. kointegrierenden Beziehungen in Umgebungen mit zeitvariabler Momentstruktur aus Teilprojekt A4.

Wagner et al. (2018) untersuchen die Material-Kuznets-Kurve (MKC), die eine umgekehrt U-förmige Beziehung zwischen dem wirtschaftlichen Entwicklungsstand eines Landes und der Intensität der Nutzung von Rohstoffen beschreibt, mit Hilfe einer nichtlinearen Kointegrationsanalyse. Mit Verbrauchsdaten für Aluminium, Blei und Zink für acht OECD-Länder wurden mit einem von Wagner und Hong (2016) entwickelten Test- und Schätzverfahren für nichtlineare Kointegration Belege für einen kointegrierenden quadratischen MKC für etwa die Hälfte der Länder-Metall-Paare gefunden. Stypka und Wagner (2019) zeigen, dass die Einheitswurzeltests von Phillips störungsparameterfreie Grenzverteilungen haben, wenn sie auf von linearen Prozessfehlern getriebenen Polynome integrierter Prozesse angewendet werden. Dies verallgemeinert ein ähnliches Ergebnis von Wagner (2012), das nur für seriell unkorrelierte Fehler gilt. Wagner et al. (2020) entwickeln zwei modifizierte OLS-Schätzer (FM-OLS) für Systeme

scheinbar unverbundener kointegrierender polynomialer Regressionen, d. h. für Regressionsysteme, die deterministische Variablen, integrierte Prozesse und ganzzahlige Potenzen integrierter Prozesse als erklärende Variablen enthalten. Es wurde erlaubt, dass die stationären Fehler seriell korreliert und die Regressoren endogen sind. Außerdem durften die Fehler und Regressoren dynamisch querschnittlich korrelieren. Die entwickelten Schätzer haben Gaußsche Grenzverteilungen mit Nullmittelwert, die asymptotische Chi-Quadrat-Teststatistiken ermöglichen. Die Ergebnisse des Wald-Hypothesentests bilden die Grundlage für die Betrachtung detaillierter Tests für allgemeine Formen der gruppenweisen Poolbarkeit. Wagner et al. (2020) lieferten die entsprechenden gruppenweise gepoolten Varianten der Schätzer für den Fall, dass die Pooling-Restriktionen nicht zurückgewiesen werden. Die Stabilität von Umwelt-Kuznets-Kurven für CO₂- und SO₂-Emissionen wird mit Hilfe neu entwickelter Monitoring Prozeduren in Knorre, Wagner und Grupe (2021) analysiert, in Erweiterung von Wagner und Wied (2017).

Damit wurden fast alle Projektziele innerhalb der offiziellen Laufzeit erreicht. Insbesondere stand Projektleiter Wagner auch nach seinem Wechsel nach Klagenfurt weiter für Projektarbeiten zur Verfügung. Lediglich der Vergleich der empirischen Performance verschiedener Schätzer mittels der neuen "Generalized Stochastic Frontier Panel Data" Modelle ist noch nicht abgeschlossen, ein Diskussionspapier von Andor, Bernstein, Parmeter und Sommer steht kurz vor der Finalisierung. Eine Reihe weiterer nicht im Antrag formulierter Forschungsideen zur Schätz- und Inferenztheorie der Gruppe Wagner ist erst im Lauf der Projektarbeiten entstanden und befindet sich derzeit im Bearbeitungs- oder Publikationsprozess. Hier hat sich der SFB 823 auch als Ideengeber für künftige Projekte bewährt.

Für das Erreichen der Projektziele waren sowohl die sich ergänzenden Kompetenzen der drei Projektleiter als auch die Kooperation mit anderen Teilprojekten wesentlich. Ganz besonders hat das Teilprojekt A3 sehr von der langjährigen erfolgreichen Zusammenarbeit mit Peter Behl und Holger Dette aus dem Teilprojekt C1 profitiert (Modellwahl und dynamische Abhängigkeitsstrukturen). Daraus resultieren insgesamt drei Publikationen zur Anwendung des FIC bei der Modellwahl: Behl et al. (2012, 2014) aus Phase 1 und Behl et al. (2019) aus Phase 3. Außerdem haben wir mit Ludger Linnemann aus A4 zu nichtkausalen bzw. nichtinvertiblen strukturellen vektorautoregressiven moving average Modellen geforscht. Mark Andor hat in mehreren Beiträgen mit Christopher Parmeter und David Bernstein von der University of Miami zusammengearbeitet (Andor und Parmeter 2017, Andor, Parmeter und Sommer 2019, Andor, Bernstein und Sommer 2021), etwa zu Pseudolikelihood-Schätzverfahren in der Stochastic Frontier Analysis (SFA). Weitere SFB-übergreifende Kontakte gab es mit Robert de Jong von der Ohio State University zur Erweiterung unserer FM-OLS Schätzer auf Paneldaten und mit Neslihan Sakarya von der University of Essex zu Monitoringprozeduren mit im Vergleich zu Knorre et al. (2021) oder Wagner und Wied (2017) umgekehrtem Hypothesenpaar.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.2.2.2):

- Andor, M.A., Hesse, F. (2014): The StoNED age: The departure into a new era of efficiency analysis? – A Monte Carlo comparison of StoNED and the 'Oldies' (SFA and DEA), *Journal of Productivity Analysis* 41(1), 85-109.
- Behl, P., Claeskens, G., Dette, H. (2014): Focused model selection in quantile regression, *Statistica Sinica* 24, 601-624.
- Behl, P., Dette, H., Frondel, M., Tauchmann, H. (2012): Choice is suffering: A focused information criterion for model selection, *Economic Modelling* 29(3), 817-822.
- Behl, P., Dette, H., Frondel, M., Tauchmann, H. (2013): Energy substitution: When model selection depends on the focus, *Energy Economics* 39, 233-238.
- Vogelsang, T.J., Wagner M. (2014): Integrated modified OLS estimation and fixed-b inference for cointegrating regressions, *Journal of Econometrics* 178(2), 741-760.
- Wagner, M. (2008): The carbon Kuznets curve: A cloudy picture emitted by bad econometrics?, *Resource and Energy Economics* 30, 388-408.
- Wagner, M. (2012): The Phillips unit root tests for polynomials of integrated processes, *Economics Letters* 114, 299-303.

Wagner, M. (2015): The environmental Kuznets curve, cointegration and nonlinearity, *Journal of Applied Econometrics* 30(6), 948-967.

Wagner, M., Hong, S.H. (2016): Cointegrating polynomial regressions: Fully modified OLS estimation and inference, *Econometric Theory* 32(5), 1289-1315.

Wagner, M., Wied, D. (2017): Consistent monitoring of cointegrating relationships: The US housing market and the subprime crisis, *Journal of Time Series Analysis* 38, 960-980.

2.2.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

Alberini, A., Horvath, M. (2021): All car taxes are not created equal: Evidence from Germany. *Energy Economics* 100, 105329.

Andor, M.A., Bernstein, D.H., Sommer, S. (2021a): Determining the efficiency of residential electricity consumption, *Empirical Economics* 60(6), 2897-2923.

Andor, M.A., Frondel, M., Horvath, M. (2021b): Consequentiality, elicitation formats, and the willingness-to-pay for green electricity: Evidence from Germany, *Land Economics* 97(3), 626-640.

Andor, M.A., Parmeter, C. (2017): Pseudolikelihood estimation of the stochastic frontier model, *Applied Economics* 49(55), 5651-5661.

Andor, M.A., Parmeter, C., Sommer, S. (2019): Combining uncertainty with uncertainty to get certainty? Efficiency analysis for regulation purposes, *European Journal of Operational Research* 274(1), 240-252.

Behl, P., Dette, H., Frondel, M., Vance, C. (2019): A focused information criterion for quantile regression: Evidence for the rebound effect, *Quarterly Review of Economics and Finance* 71, 223-227.

Grabarczyk, P., Wagner, M., Frondel, M., Sommer, S. (2018): A cointegrating polynomial regression analysis of the material Kuznets curve hypothesis, *Resources Policy* 57(823), 236-245.

Knorre, F., Wagner, M., Grupe, M. (2021): Monitoring cointegrating polynomial regressions: Theory and application to the environmental Kuznets curves for carbon and sulfur dioxide emissions, *Econometrics* 9, 12.

Stypka, O., Wagner, M. (2019): The Phillips unit root tests for polynomials of integrated processes revisited, *Economics Letters* 176, 109-113.

Wagner, M., Grabarczyk, P., Hong, S.H. (2020): Fully modified OLS estimation and inference for seemingly unrelated cointegrating polynomial regressions and the environmental Kuznets curve for carbon dioxide emissions, *Journal of Econometrics* 214(1), 216-255.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.2.3 Ausstattung des Teilprojekts A3

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungsquelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	1. M. Frondel, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	KB Umwelt und Ressourcen (RWI Essen)	10		Grundausstattung
	2. Ch.M. Schmidt, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	Präsidium (RWI Essen)	5		Grundausstattung
	3. M. Wagner, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)	10		Grundausstattung
	4. C. Vance, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	KB Umwelt und Ressourcen (RWI Essen)	10		Grundausstattung
	5. S. Sommer, Prof. Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	KB Umwelt und Ressourcen (RWI Essen) und Hochschule Bochum	5		Grundausstattung
Nichtwissenschaftliches Personal	6. C. Brüggemann, Verw. Ang.		RWI Essen	3		Grundausstattung
	7. U. Becker, Verw. Ang.		Fak. Statistik (Do)	3		Grundausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	8. M. Andor, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	KB Umwelt und Ressourcen (RWI Essen)		PostDoc	
	9. M. Horvath, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	KB Umwelt und Ressourcen (RWI Essen)		Doktorand/PostDoc	
	10. P. Grabarczyk, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)		Doktorand/PostDoc	
	11. O. Stypka, Dr. wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)		Doktorand	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Manuel Frondel:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 und 3.

2. *Prof. Dr. Christoph M. Schmidt:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.

3. *Prof. Dr. Martin Wagner:*

Leitete das Projekt und bearbeitete das Modul 3.

4. *Prof. Dr. Colin Vance:*

Arbeitete in Modul 1 zum Thema Modellwahl.

5. *Prof. Dr. Stephan Sommer:*

Arbeitete in Modul 2 zum Thema parametrische und nichtparametrische Effizienzschätzung und in Modul 3 zu langfristigen Zusammenhängen zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und Emissionen sowie Energie- und Rohstoffeinsatz.

6. *Christiane Brüggemann:*

Unterstützte das Projektteam am Standort Essen durch Koordination und Textverarbeitung.

7. *Uta Becker:*

Zuständig für sekretariatsmäßige Unterstützung der Arbeitsgruppe Wagner.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

8. *Dr. Mark Andor:*

Arbeitete in Modul 1 sowie in Modul 2 zum Thema parametrische und nichtparametrische Effizienzschätzung.

9. *Dr. Marco Horvath:*

Arbeitete in Modul 1 zum Thema dynamische Produktionsprozesse.

10. *Dr. Peter Grabarczyk:*

Arbeitete in Modul 3 zu langfristigen Zusammenhängen zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und Emissionen sowie Energie- und Rohstoffeinsatz.

11. *Dr. Oliver Stypka:*

Arbeitete in Modul 3 zu langfristigen Zusammenhängen zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und Emissionen sowie Energie- und Rohstoffeinsatz.

2.3.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A4

2.3.1.1 Titel

Faktorallokation und Preisbildung bei aggregierten Risiken auf Finanzmärkten

2.3.1.2 Projektleitung

Hanck, Christoph, Prof. Dr., *3. August 1979, deutsch
Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften,
Lehrstuhl für Ökonometrie, D-45117 Essen
Telefon: 0201-183-2263
E-Mail: christoph.hanck@vwl.uni-due.de

Linnemann, Ludger, Prof. Dr., *16. Mai 1968, deutsch
TU Dortmund, Fakultät Wirtschaftswissenschaften,
Fachgebiet Applied Economics, D-44221 Dortmund
Telefon: 0231-755-3102
E-Mail: ludger.linnemann@tu-dortmund.de

Wagner, Martin, Prof. Dr., *2. September 1972, österreichisch
TU Dortmund, Fakultät Statistik, Lehrstuhl Ökonometrie und Statistik
D-44221 Dortmund
bis 30.9.2019, aktuell erreichbar unter:
E-Mail: Martin.Wagner@aau.at

2.3.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.3.2.1 Bericht

Gegenstand des Projekts war die Analyse makroökonomischer Dynamik mittels struktureller Vektorautoregressionen (SVAR) und Kointegrationsanalyse. Kernthemen waren dabei die Identifikation von exogenen wirtschaftspolitisch induzierten Schocks unter möglichst schwachen Annahmen, Zeitvariabilität in den Wirkungskanälen, Nichtlinearitäten durch die untere Nullschranke nominaler Zinsen, und das durch die mögliche Antizipation politischer Maßnahmen bedingte Auseinanderfallen der Information der wirtschaftlichen Akteure und des ihr Verhalten analysierenden Ökonometrikers.

Modul 1 ("Fiskalische Transmission und Antizipationseffekte in strukturellen vektorautoregressiven Modellen") behandelte die Identifikation exogener Schocks in SVARs und die Wirkung der Antizipation zukünftiger Ereignisse durch wirtschaftliche Akteure. Die Identifikation von kontemporären Wechselwirkungen in SVARs war traditionell nur unter restriktiven Annahmen bezüglich der Interaktion der Variablen möglich. Neuere Ansätze ermöglichen die Identifikation der kontemporären Beziehungen und zeigen, dass keine Restriktionen bezüglich der Interaktion benötigt werden (z.B. Lanne, Meitz und Saikkonen 2017). In unserem Projekt leitet Keweloh (2021a) basierend auf unabhängigen nicht-normalverteilten Schocks Momentenbedingungen höherer Ordnung her, welche Identifikation durch GMM-Schätzer ermöglichen. Dies liefert ein flexibles Verfahren, das ohne strenge Verteilungsannahmen und ohne schwer rechtfertigbare Restriktionen Identifikation ermöglicht. Darauf aufbauend leitet Keweloh (2021b) alternative Schätzer für die optimale Gewichtungsmatrix und die asymptotische Varianz des GMM-Schätzers in relativ großen SVAR-Modellen her. Keweloh, Hetzenecker und Seepe (2021) erhöhen die Präzision dieser Schätzer in kleinen Stichproben.

Klein und Linnemann (2021a) identifizieren Antizipationseffekte im Rahmen von proxy-SVARs, erweitern die Methode für den Panelkontext, analysieren die unterschiedliche internationale Transmissionswirkung überraschender und antizipierter Produktivitätsschocks und klären widersprüchliche Ergebnisse aus der einschlägigen Literatur zu den Auswirkungen des Produktivitätsfortschritts auf reale Wechselkurse. Klein und Linnemann (2019c) adressieren die internationale Transmission von Steuer- und Staatsausgabenschocks mit proxy-SVARs, und

Klein und Linnemann (2021b) zeigen, dass die Berücksichtigung von endogener Produktivität die terms of trade-Effekte von Staatsausgabenschöcks erklären kann. Hanck und Prüser (2020) sowie Prüser und Hanck (2021) weisen anhand eines Bayesianischen Modells deutscher Hauspreise einen dominanten Einfluss der Zinsen auf die jüngere Preisentwicklung nach.

In Modul 2 ("Eulergleichungen und Schätzung von nichtlinear approximierten DSGE-Modellen") verallgemeinern Klein und Linnemann (2019a) den univariaten Ansatz von Giraitis et al. (2014) zur nichtparametrischen Schätzung der Zeitvariation auf den multivariaten Fall und wenden ihn auf die Schätzung von zeitvariablen fiskalischen Outputmultiplikatoren in rekursiven SVAR-Modellen an. Die zeitvariable Wirkung der Fiskalpolitik wurde in der Literatur durch zustandsabhängige Parameter erklärt, die in konjunkturellen Hoch- bzw. Tiefphasen unterschiedliche Werte annehmen (Auerbach und Gorodnichenko 2012), alternativ auf die Nichtlinearität makroökonomischer Beziehungen in der Nähe der Nullzinsgrenze. Klein und Linnemann (2019a) dagegen finden weder Evidenz für Zustandsabhängigkeit noch für eine besondere Rolle der Nullzinsgrenze. Vielmehr konnte die US-Fiskalpolitik nach der Finanzkrise die Rezessionsfolgen ungewöhnlich wirkungsvoll durch gestärktes Konsumentenvertrauen und eine Reduktion der Zinsspreads auf risikoreiche Unternehmensanleihen entscheidend abmildern. Klein und Linnemann (2019b) zeigen zudem, dass in der Literatur berichtete ungewöhnliche Effekte der Fiskalpolitik auf die Inflation in der Vergangenheit zwar vorlagen, in der jüngeren Zeit aber verschwunden sind.

Modul 3 ("Regressionsbasierte Kointegrationsanalyse in zeitvariablen und nichtlinearen Modellen") entwickelt neue Tests in zeitvariablen und nichtlinearen kointegrierenden Modellen. Hanck und Massing (2021) schlagen basierend auf Shin (1994) und Choi und Saikkonen (2010) einen Test der Nullhypothese der Kointegration vor, der aufbauend auf Demetrescu und Hanck (2018) allgemeine Nichtlinearität sowie zeitvariable Varianz zulässt. Eine empirische Anwendung auf die Umweltkuznetskurve zeigt erkennbare Unterschiede zu nichtrobusten Verfahren. Laufende Arbeiten zeigen, dass bei plausibler Wahl der a-priori-Verteilungen bayesianische Tests mit höherer Güte möglich sind. Demetrescu et al. (2021) entwickeln Tests auf gleiche Prognosegüte, die u.a. zeitvariable Varianzen der Prognosefehler erlauben. Arnold und Hanck (2019) kombinieren basierend auf Bayer und Hanck (2013) Einheitswurzeltests in heteroskedastischen Panels, die für eine breite Klasse von generierenden Prozessen hohe Güte haben. Knorre, Wagner und Grupe (2021) leiten die asymptotischen Verteilungen von Monitoring-prozeduren her und analysieren damit Umweltkuznetskurven auf Strukturbrüche. Weitere laufende Arbeiten vergleichen neuere Spezifikationstests für nichtlineare kointegrierende Beziehungen unter Endogenität und erweitern Systeme scheinbar unverbundener kointegrierender polynomialer Beziehungen um gemeinsame Regressoren (ausgehend von Wagner, Grabarczyk und Hong 2020). Sehr bedeutsam für die vorgeschlagenen Verfahren ist die Existenz von Momenten, womit dem Extremalverhalten eine zentrale Rolle zukommt. Hoga (2017) verallgemeinert hierzu Strukturbruchtests für das Flankenverhalten auf eine breite Klasse von Zeitreihen. Hoga (2018) konstruiert als Erweiterung von Bücher, Jäschke und Wied (2015) einen Test auf konstante gemeinsame Flankenabhängigkeit im multivariaten Fall. Hoga (2020) identifiziert Flankenregionen basierend auf Verlustfunktionen.

Die meisten der avisierten Projektziele wurden somit erreicht. Modul 2 hatte allerdings mit erheblicher Personalfluktuation zu kämpfen. Die Arbeit war auf unseren ehemaligen Postdoktoranden Willi Mutschler zugeschnitten, der aber zu Beginn der Förderphase an die Universität Münster wechselte. Da seine Expertise zu nichtlinearen DSGE-Modellen nicht ersetzbar war, verlagerte sich die Arbeit auf Themen an den Schnittstellen zu den Modulen 1 und 3. Zusätzlich hat die Tätigkeit von Projektleiter Martin Wagner als Executive Director an der Bank of Slovenia (2017-19) und die folgende Annahme eines Rufes an die Universität Klagenfurt die projektinterne Kooperation erschwert. Offen für weitere Forschung bleiben damit die intendierten Projekte etwa zur simultanen Berücksichtigung von Schätzung von heteroskedastischen (nichtlinearen) kointegrierenden Modellen mit endogenitätsrobusten Schätzern wie IM-OLS.

Zum Ausgleich ist es gelungen, verschiedene zu Beginn der Förderphase noch nicht absehbare Forschungslinien zu generieren, die auch nach Ende des SFBs noch Früchte tragen werden. Hierzu gehört die Analyse von nichtstationären Lévy-Prozessen als Grundbaustein in stochastischen Differentialgleichungen zur Modellierung stochastischer Volatilitäten. Massing (2021) etwa zeigt, inwieweit sich unendlich viele Sprünge zusammen mit zeitvariablen Koeffizienten auf stochastische Rückwärts-Differentialgleichungen auswirken. Massing (2019) zeigt, dass Zeitkonsistenz der Modellierung von Aktienkursen nur in Ausnahmefällen vorliegt. Daraus ergeben sich neue Ideen zur Mischung von Lévy-Verteilungen, so wie von Massing et al. (2021) bereits für die Modellierung von Kursrenditen und das Wachstum von Städten und Unternehmen ökonometrisch untersucht. Laufende und über den SFB hinausweisende Arbeiten von Keweloh verbinden proxy-SVARs mit der Identifikation durch höhere Momente. Ebenfalls als fruchtbar für nichtlineare und nichtparametrische Modellierung erwies sich neue laufende Betrachtungen durch die Linse der Informationsgeometrie über eine Erweiterung von statistischen Mannigfaltigkeiten vom endlichen Parameterraum auf den nichtparametrischen Fall. Im Rahmen unserer Projektarbeit sind verschiedene Kooperationen entstanden oder intensiviert worden. Projektintern, aber über Lehrstühle hinweg kooperieren etwa Hetzenecker und Keweloh intensiv zu innovativen Verfahren zur Identifikation und Schätzung von SVAR-Modellen. Erfolgreiche projektübergreifende Kooperationen mit gemeinsamen Arbeiten bestehen mit Maximilian Grupe (A3) zu Monitoring-Prozeduren für kointegrierende Beziehungen und deren Erweiterung vom linearen auf den polynomialen Fall, mit Dominik Wied (ehemals A1) zum Monitoring für das Flankenverhalten von Zeitreihen, und mit Jan Prüser (A1) zur Kombination der frequentistischen und subjektivistischen Sichtweise zur Anwendung und Analyse von bayesianischen SVAR-Modellen. Modellwahl unter Abhängigkeit wie in A1 und C1 analysieren wir aus Bayesianischer Perspektive in Hanck und Arnold (2021).

SFB-übergreifend haben wir Impulse empfangen von und gegeben an Carsten Jentsch (Fak. Statistik, TU Dortmund; Bootstrapverfahren für abhängige Daten), Lorenz Schwachhöfer (Fak. Mathematik, TU Dortmund, Informationsgeometrie), Matei Demetrescu (Universität Kiel, zu Kointegration, prädiktiven Regression auf Vorhersagbarkeit von Aktienrenditen, Paneldaten), Robin Kruse-Becher (FernUniversität Hagen, Prognosevergleiche unter zeitvariabler Volatilität). Auf internationaler Ebene konnten Kooperationen etabliert und gefestigt werden etwa mit Robert Taylor (University of Essex, prädiktive Regressionen, Mathias Klein (Sveriges Riksbank, SVARs, Schocktransmission), Miguel Puente-Ajovin (Universidad de Zaragoza, Bevölkerungsentwicklung, Unternehmenswachstum) und Arturo Ramos (Universidad de Zaragoza, Aktienmärkte, Mischungsverteilungen.). Viele der hier genannten Themen sind erst im Lauf der Projektdauer entstanden und werden derzeit aktiv weiterbearbeitet. Hier hat sich der SFB 823 als wertvoller Impulsgeber für zukünftige Projekte erwiesen.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.3.2.2):

- Arnold, M.C., Hanck, C. (2019): On combining evidence from heteroskedasticity robust panel unit root tests in pooled regressions, *Journal of Risk and Financial Management* 12(3), 117.
- Auerbach, A.J., Gorodnichenko, Y. (2012): Measuring the output responses to fiscal policy, *American Economic Journal: Economic Policy* 4, 1-27.
- Bayer, C., Hanck, C. (2013): Combining non-cointegration tests, *Journal of Time Series Analysis* 34, 83-95.
- Bücher, A., Jäschek, S., Wied, D. (2015): Nonparametric tests for constant tail dependence with an application to energy and finance, *Journal of Econometrics* 187, 154-168.
- Choi, I., Saikkonen, P. (2010): Tests for nonlinear cointegration, *Econometric Theory* 26(3), 682-709.
- Demetrescu, M., Hanck, C. (2018): Multiple testing for no cointegration under nonstationary volatility, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics* 80(3), 485-513.
- Giraitis, L., Kapetanios, G., Yates, T. (2014): Inference on stochastic time-varying coefficient models, *Journal of Econometrics* 179, 46-65.
- Hanck, C., Arnold, M. (2021): Hierarchical Bayes modelling of penalty conversion rates of Bundesliga players. *Advances in Statistical Analysis*.
<https://doi.org/10.1007/s10182-021-00420-w>

- Hanck, C., Massing, T. (2021): Testing for nonlinear cointegration under heteroscedasticity, *SFB 823 Discussion paper 26/20*.
- Hanck, C., Prüser, J. (2020): House prices and interest rates - Bayesian evidence from Germany, *Applied Economics* 52(28), 3073-3089.
- Hoga, Y., Wied, D. (2017): Sequential monitoring of the tail behavior of dependent data, *Journal of Statistical Planning and Inference* 182, 29-49.
- Hoga, Y. (2020): Where does the tail begin? An approach based on scoring rules, *Econometric Reviews* 39, 579-601.
- Keweloh, S.A. (2021b): A feasible approach to incorporate information in higher moments in structural vector autoregressions, *SFB 823 Discussion Paper 22/21*.
- Keweloh, S.A., Hetzenecker, S. (2021): Efficiency gains in structural vector autoregressions by selecting informative higher-order moment conditions, *SFB 823 Discussion Paper 26/21*.
- Keweloh, S.A., Hetzenecker, S., Seepe, A. (2021): Block-recursive non-Gaussian structural vector autoregressions, *SFB 823 Discussion Paper 23/21*.
- Klein, M., Linnemann, L. (2021b): Fiscal policy, international spillovers, and endogenous productivity, *SFB 823 Discussion Paper 27/21*.
- Lanne, M., Meitz, M., Saikkonen, P. (2017): Identification and estimation of non-Gaussian structural vector autoregressions, *Journal of Econometrics* 196(2), 288-304.
- Massing, T. (2019b): What is the best Lévy model for stock indices? A comparative study with a view to time consistency, *Financial Markets and Portfolio Management* 33(3), 277-344.
- Massing, T. (2021): Approximation and error analysis of forward-backward SDEs driven by general Lévy processes using shot noise series, *SFB 823 Discussion Paper 25/21*.
- Massing, T., Puente-Ajovín, M., Ramos, A. (2021): On the parametric description of log-growth rates of cities' sizes of four European countries and the USA, *Physica A* 551, 124587.
- Shin, Y. (1994): A residual-based test of the null of cointegration against the alternative of no cointegration, *Econometric Theory* 10(1), 91-115.
- Wagner, M., Grabarczyk, P., Hong, S.H. (2020): Fully modified OLS estimation and inference for cointegrating polynomial regressions and the environmental Kuznets curve for carbon dioxide emissions, *Journal of Econometrics* 214, 216-255.

2.3.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Demetrescu, M., Hanck, C., Kruse-Becher, R. (2021): Robust inference under time-varying volatility: a real-time evaluation of professional forecasters, *SFB 823 Discussion Paper 04/21*, erscheint in: *Journal of Applied Econometrics*.
- Hoga, Y. (2018): A structural break test for extremal dependence in β -mixing random vectors, *Biometrika* 105, 627-643.
- Keweloh, S. (2021a): A generalized method of moments estimator for structural vector autoregressions based on higher moments, *Journal of Business & Economic Statistics* 39, 772-782.
- Klein, M., Linnemann, L. (2021a): Real exchange rate and international spillover effects of US technology shocks, *Journal of International Economics* 129, 103414.
- Klein, M., Linnemann, L. (2019a): Macroeconomic effects of shocks to government spending: the Great Recession was (really) different, *Journal of Money, Credit and Banking* 51, 1237-1264.
- Klein, M., Linnemann, L. (2019b): The time-varying effect of fiscal policy on inflation: evidence from historical US data, *Economics Letters* 186.
- Klein, M., Linnemann, L. (2019c): Tax and spending shocks in the open economy: are the deficits twins? *European Economic Review* 120, 103300.
- Knorre, F., Wagner, M., Grupe, M. (2021): Monitoring cointegrating polynomial regressions: theory and application to the environmental Kuznets curves for carbon and sulfur dioxide emissions, *Econometrics* 9, 12.
- Massing, T. (2019a): Local asymptotic normality for Student-Lévy processes under high-frequency sampling, *Statistics* 53(4), 721-752.
- Prüser, J., Hanck, C. (2021): A comparison of approaches to select the informativeness of priors in BVARs. *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 241(4), 501-525.

b) Andere Veröffentlichungen, c) Patente

Entfallen

2.3.3 Ausstattung des Teilprojekts A4

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. C. Hanck, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	Fak. Wiwi (DuE)	10		Grund- ausstattung
	2. L. Linnemann, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Volkswirt- schaftslehre	Fak. WiWi (Do)	10		Grund- ausstattung
	3. M. Wagner, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Ökonometrie	Fak. Statistik (Do)	10		Grund- ausstattung
	4. Y. Hoga, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Wiwi (DuE)	5		Grund- ausstattung
	5. S. Hetzenecker, M.Sc., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Wiwi (DuE)	4		Grund- ausstattung
Nichtwissen- schaftliches Personal	6. I. Braun, Verw. Ang.		Fak. Wiwi (DuE)	3		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	7. S. Keweloh, M.Sc., wiss. Ang.	Volkswirt- schaftslehre	Fak. WiWi (Do)		Doktorand	
	8. T. Massing, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Wiwi (DuE)		PostDoc	
	9. P. Navas Alban, Dr., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Wiwi (DuE)		PostDoc	
	10. F. Knorre, M.Sc., wiss. Ang.	Ökonometrie	Fak. Statistik/ Fak. WiWi (Do)		Doktorand	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Christoph Hanck:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 und 3.

2. *Prof. Dr. Ludger Linnemann:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 und 2.

3. *Prof. Dr. Martin Wagner:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.

4. *Dr. Yannick Hoga:*

Arbeitete mit C. Hanck zum Thema Strukturbruchtests.

5. *Stephan Hetzenecker, M.Sc.:*

Arbeitete mit S. Keweloh in Modul 1 zum Thema Identifikation von SVARs.

6. *Ilona Braun:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Duisburg-Essen.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

7. *Sascha Keweloh, M.Sc.:*

Arbeitete mit L. Linnemann in Modul 1 zum Thema Identifikation von SVARs.

8. *Dr. Till Massing:*

Arbeitete mit C. Hanck in Modul 3 zu Kointegrationstests.

9. *Dr. Paul Navas Alban:*

Arbeitete mit C. Hanck in Modul 3 zu Kointegrationstests sowie zu Themen aus der Informationsgeometrie.

10. *Fabian Knorre, M.Sc.:*

Arbeitete mit M. Wagner in Modul 3 zum Thema Kointegration.

2.4.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A5

2.4.1.1 Titel

Tarifvertragliche Bindung, Effiziente Verhandlungen und Beschäftigungsdynamik

2.4.1.2 Projektleitung

Jung, Philip, Prof. Dr., *2. Juli 1976, deutsch
TU Dortmund, Fakultät Wirtschaftswissenschaften,
Lehrstuhl Makroökonomie, D-44221 Dortmund
Telefon: 0231-755-3288
E-Mail: philip.jung@tu-dortmund.de

Kraft, Kornelius, Prof. Dr., *15. Januar 1955, deutsch
TU Dortmund, Fakultät Wirtschaftswissenschaften,
Lehrstuhl Wirtschaftspolitik, D-44221 Dortmund
Telefon: 0231-755-3152
E-Mail: kornelius.kraft@tu-dortmund.de

2.4.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.4.2.1 Bericht

In diesem Projekt werden die Determinanten der Beschäftigung und der Vergütung von Arbeitnehmern und Vorständen ermittelt. Es analysiert zudem die Effizienz und Auswirkungen von Verhandlungen zwischen Arbeit und Kapital in einer dynamischen Perspektive auf Betriebs-, Unternehmens- und aggregierter Ebene.

Modul 1 ("Verhandlungsmodelle in dynamischer Perspektive") analysiert die gemeinsamen Determinanten von Beschäftigung und Lohn. In einem ersten Teilbereich geht es um den Einfluss von Mitbestimmung auf Variablen des Unternehmenserfolgs wie Produktivität und Beschäftigungswachstum. Aber auch Verteilungsaspekte wie die Lohnquote bzw. das Verhältnis zwischen Lohn und Umsatz werden untersucht.

Dieses Modul erweitert die Debatte über die Bestimmungsfaktoren der Lohnquote wie technischer Fortschritt (Acemoglu und Restrepo 2018) und Wettbewerbsintensität (De Loecker et al. 2020) um den Einfluss von Verhandlungsmacht im Allgemeinen (Kraft 2018) sowie Drohpunkten in Verhandlungsmodellen (Kraft und Lammers 2021b) im Speziellen. In Kraft (2018) werden simultane Verhandlungen über Löhne und Beschäftigung (effiziente Verhandlungen) zwischen Arbeitnehmern und Arbeitgebern theoretisch modelliert und das Verhandlungsergebnis als Anteil des Arbeitseinkommens am Umsatz (Lohnquote) aus der Effizienz des Faktors Arbeit im Produktionsprozess sowie der relativen Verhandlungsmacht der beiden Parteien erklärt. Dabei wird die Verhandlungsmacht durch den Vergleich der Lohnquote mit der Arbeitselastizität der Produktion gemessen, empirisch bestimmt durch dynamische GMM-Schätzungen der Produktionsfunktion. Von zentraler Bedeutung für die Verhandlungsmacht der Arbeitnehmer ist dabei die gesetzliche Mitbestimmung, die 1976 wesentlich um die paritätische Besetzung der Aufsichtsräte in Großunternehmen erweitert wurde. Wir zeigen, dass eine Zunahme von Verhandlungsmacht der Arbeitnehmer keine Auswirkungen auf die Produktivität von Unternehmen hat, allerdings zu einer Ausweitung der Verhandlungsmacht der Arbeitnehmer um 2,7-2,9 % und damit verbunden zur Umverteilung von Renten führt.

Kraft und Lammers (2021b) betrachten in diesem Zusammenhang die Hartz-IV-Arbeitsmarktreform als exogenen Schock in den Drohpunkten der Arbeitnehmer und konstatieren einen im Durchschnitt zweiprozentigen persistenten Rückgang der Lohnquote. Die Relevanz von Mitbestimmungsinstitutionen auf Betriebsebene wird einerseits durch die vom Gesetzgeber eingeführten Betriebsräte und andererseits über die freiwillig von der Unternehmensleitung initiierten Mitsprachegremien (Kraft und Lammers 2019, Kraft und Lammers 2021c) berücksichtigt.

Im Rahmen eines dynamischen Lebenszyklusmodells weisen Jung und Kuhn (2019) nach, wie die empirisch robust geschätzten hohen und vor allem permanenten Lohnverluste bei Wiedereinstellung nach Entlassungen entstehen können. Bisherige Modelle konnten bestenfalls transitorische Verluste generieren, da Arbeitnehmer nach Entlassungen erneut nach guten Jobs suchen, sowohl "on the job" als auch in Arbeitslosigkeit. Durch Suchaktivität werden Lohnverluste im Standardmodell nur transitorisch. Auch verlieren Arbeitnehmer der "Kontrollgruppe", die nicht entlassen worden sind, bei durchschnittlicher Entlassungswahrscheinlichkeit über die Zeit irgendwann dann auch ihren Job, was ebenfalls Lohnverluste transitorisch machen sollte. In Jung und Kuhn (2019) wird nun die Annahme durchschnittlicher Entlassungswahrscheinlichkeiten als das zentrale theoretische Problem der einschlägigen Literatur identifiziert und gezeigt, dass Jobs, die eine gewisse Zeit überlebt haben, hochgradig stabil sind. Dieser Match-Dauer Effekt in Kombination mit hohen Entlassungswahrscheinlichkeiten bei kurzer Beschäftigungsdauer führt dazu, dass entlassene Arbeitnehmer trotz aktiver Suche nicht in der Lage sind, das matchspezifische Humankapital zurückzugewinnen.

Kraft und Lammers (2021a) nutzen die exogene Politikintervention der Hartz III Reform, um die Vermittlungseffizienz der Bundesagentur für Arbeit in Bezug auf das Beschäftigungswachstum zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen die Relevanz von effizienten Vermittlungsinstitutionen in Bezug auf das betriebliche Beschäftigungswachstum.

Hartung, Jung und Kuhn (2018) untersuchen ebenfalls die Auswirkungen der Hartz IV Reformen auf Beschäftigung und Arbeitslosigkeit und zeigen, dass nach der Reform die Wahrscheinlichkeit einer Entlassung für Arbeitnehmer um 30% gesunken ist. Dies wird kausal auf die Reduktion der Arbeitslosengeldzahlung für ältere Arbeitnehmer und die Reform der Arbeitslosenhilfe zurückgeführt.

Modul 2 ("Vorstandsvergütung und durchschnittliche Entlohnung der Mitarbeiter im internationalen Vergleich") untersucht Ungleichheiten auf Unternehmens- und aggregierter Ebene. Die beobachteten geringeren Lohnstückkosten sowie Lohnzurückhaltung in Deutschland und die damit verbundenen Verteilungseffekte werden unter anderem auf reduzierte gewerkschaftliche Verhandlungsmacht zurückgeführt (Card et al. 2020, Farber et al. 2021, Dustmann et al. 2014, Bengtsson 2014). Dieses Modul liefert, basierend auf detaillierten Unternehmensdaten, die eine Entflechtung von fixen und variablen Vergütungskomponenten erlauben, neue empirische Belege zu den Auswirkungen von Mitbestimmung und Gewerkschaftsmacht auf die Vorstandsvergütung. Hierbei gehen bisherige Studien (z.B. Gorton und Schmid 2004) davon aus, dass Arbeitnehmervertreter eine geringere anreizbasierte Vergütung bevorzugen. In Dyballa und Kraft (2020) wird im Gegensatz zu dieser Literatur die Hypothese aufgestellt, dass das Interesse der Arbeitnehmer - ebenso wie das der Aktionäre - auf die Sicherung des langfristigen Überlebens des Unternehmens gerichtet ist. Umfangreiche Paneldaten über die Vergütung von Führungskräften im Zeitraum 2006-2011 für 405 börsennotierte Unternehmen zeigen, dass Mitbestimmung einen signifikant positiven Effekt auf die leistungsabhängigen Vergütungsbestandteile hat. Konkret zeigen die Ergebnisse, dass der variable Anteil der Managervergütung in mitbestimmten Unternehmen im Durchschnitt 22 Prozentpunkte höher ist als in nicht mitbestimmten Unternehmen.

Jung, Korfmann und Preugschat (2021) betrachten die Ungleichheit in räumlichen Strukturen in Deutschland und gehen der Frage nach, ob die großen regionalen Unterschiede in Löhnen und Beschäftigung auf fallende Marktmacht, Arbeitsmarktfriktionen oder niedrigere Produktivität zurückzuführen sind. Sie finden, dass Marktmacht eine wichtige Rolle spielt, und zeigen formal, dass ein optimales Steuersystem mit regional differenzierten Einstellungssubventionen und Entlassungssteuern auf diese dokumentierte regionale Ungleichheit reagieren würde.

Modul 3 ("Simultane Bestimmung von Management-Vergütung und Unternehmenserfolg") untersucht Determinanten der Managementvergütung sowie des Unternehmenserfolgs. Die bisherige Literatur geht der Frage nach, inwiefern verschiedene Erlösmaße (Tobin's Q sowie die Eigen- oder Gesamtkapitalrendite) die Managementvergütung beeinflussen (z.B. Kraft und Niederprüm 1999, Conyon 2014, Fabbri und Marin 2016), während die variable Vergütung genau

den umgekehrten Effekt, konkret die Beeinflussung der Erlöse durch variable Vergütung beabsichtigt. In diesem Modul entzerren wir daher diesen endogenen Zusammenhang zwischen Vorstandsvergütung und Unternehmenserfolg. Für die Identifikation von externen Einflussfaktoren auf den Unternehmenserfolg eignet sich insbesondere die Finanzkrise aus dem Jahr 2008/2009. Konkret fokussierten wir uns hierbei in Giebel und Kraft (2019a, 2019b, 2020) auf die heterogene Betroffenheit der Banken durch die Finanzkrise und deren Auswirkungen auf die Unternehmen. So war der Interbankenmarkt nach der Lehman-Pleite zusammengebrochen, und die Institute, die sich über diesen Markt refinanzierten, wurden in ihren Refinanzierungsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Als Folge reduzierten diese Banken die Kreditvergabe und damit die Gewinne ihrer Kunden. Damit lässt sich die Refinanzierungsintensität der Banken über den Interbankenmarkt als exogene Instrumentalvariable verwenden. Aufbauend auf diesem Ansatz werden in Giebel und Kraft (2020) Veränderungen des Innovationsverhaltens von Unternehmen als Reaktion auf den Kreditangebotschock bei Banken in der Finanzkrise untersucht. Dabei zeigt sich, dass sowohl laufende Innovationsaktivitäten als auch die Initiierung zusätzlicher Innovationen durch den Schock der Bankenfinanzierung beeinflusst werden. Zudem ist der Effekt bei Produktinnovationen stärker ausgeprägt als bei Prozessinnovationen. Ähnliche Ergebnisse werden durch Giebel und Kraft (2019a) belegt. Die Differenz-in-Differenzen Ergebnisse deuten darauf hin, dass Unternehmen, die eine Geschäftsbeziehung zu einer Bank mit hoher Interbankenmarktabhängigkeit unterhalten, ihre Innovationsaktivitäten während der Finanzkrise in höherem Maße reduzieren als andere Unternehmen. In Giebel und Kraft (2019b) wird zudem gezeigt, dass innovative Unternehmen, die externe Quellen zur Investitionsfinanzierung nutzen, ihre Investitionsausgaben während der Finanzkrise in größerem Umfang reduzieren als (i) nicht-innovative Unternehmen, die externe Finanzmittel nutzen, und (ii) innovative Unternehmen, die keine externen Finanzmittel nutzen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die wesentlichen Projektziele trotz des Ausscheidens zweier Mitarbeiter (Jan Mellert und Katharina Wauters, geb. Dyballa) erreicht wurden. Das ungeplante Ausscheiden von Katharina Wauters zu Beginn dieser letzten Förderphase hatte eine gewisse Modifikation der Schwerpunkte in Modul 3 (Identifikation von exogenen Einflüssen auf den Unternehmenserfolg) zur Folge.

Modul 1 hat sehr von dem von C3 organisierten Workshop zum Thema Strukturbrüche im Oktober 2019 profitiert. Strukturbrüche finden konkrete empirische Anwendung in Kraft und Lammers (2021b). Weiterhin gab es intensiven Austausch mit A7 zu mehrdimensionalen Copulamodellen. Dabei wurden kausale Effekte unter Verwendung alternativer Verteilungen, wie z.B. Frank oder Clayton Copulas, identifiziert und Tests zur Bestimmung der unterliegenden Verteilung durchgeführt (Murphy 2007). Sehr fruchtbar innerhalb des Teilprojekts war auch die gemeinsame Forschung der Projektleiter zu den Auswirkungen der verschiedenen Hartz Reformen sowie deren ökonometrische Identifikation.

Extern wurde die bereits länger bestehende Zusammenarbeit mit Marek Giebel im Modul 3 auch nach seinem Wechsel zur Copenhagen Business School fortgeführt. Diese durch den SFB generierte Kooperation geht auch nach dessen Abschluss weiter. In Modul 2 haben wir ein ebenfalls über den SFB hinausreichendes Forschungsprojekt "The Effects of Unions on Pay Inequality on the Firm Level" mit der Kienbaum Consultants International GmbH initiiert (Datenaustausch, Diskussion der Vorgehensweise und Ergebnisse, Vorbereitung gemeinsamer Publikationen für Praktiker). Insbesondere werden hier unsere bisherigen Analysen (z.B. Dyballa und Kraft 2020) um den bisher kaum betrachteten Einfluss der Gewerkschaftsmacht ergänzt.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.4.2.2):

- Acemoglu, D., Restrepo, P. (2018): The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment, *American Economic Review* 108(6), 1488-1542.
- Bengtsson, E. (2014): Do unions redistribute income from capital to labour? Union density and wage shares since 1960, *Industrial Relations Journal* 45(5), 389-408.
- Card, D., Lemieux, T., Riddell, W.C. (2020): Unions and wage inequality: The roles of gender, skill and public sector employment, *Canadian Journal of Economics* 53(1), 140-173.
- Conyon, M.J. (2014): Executive compensation and board structure in US firms, *Economic Journal* 124, F60-F89.
- De Loecker, J., Eeckhout, J., Unger, G. (2020): The rise of market power and the macroeconomic implications, *The Quarterly Journal of Economics* 135(2), 561-644.
- Dustmann, C., Fitzenberger, B., Schönberg, U. Spitz-Oener, A. (2014): From sick man of Europe to economic superstar: Germany's resurgent economy, *Journal of Economic Perspectives* 28, 167-188.
- Fabrizi, F., Marin, D. (2016): What explains the rise of executive pay in Germany? *Scandinavian Journal of Economics* 118, 235-263.
- Farber, H.S., Herbst, D., Kuziemko, I., Naidu, S. (2021): Unions and inequality over the twentieth century: New evidence from survey data, *The Quarterly Journal of Economics* 136(3), 1325-1385.
- Gorton, G., Schmid, F. A. (2004): Capital, labor, and the firm: A study of German codetermination, *Journal of the European Economic Association* 2(5), 863-905.
- Hartung, B., Jung, P., Kuhn, M. (2018): What hides behind the German labor market miracle? Unemployment insurance reforms and labor market dynamics, *IZA Discussion Paper* 12001.
- Jung, P., Korfmann, P., Preugschat, E. (2021): Optimal regional labor market policies, *IZA Discussion Paper* 14204.
- Kraft, K., Lammers, A. (2019): Employee representation and innovation – disentangling the effect of legal and voluntary representation institutions in Germany, *SFB 823 Discussion Paper* 4/2019.
- Kraft, K., Lammers, A. (2021a): The effects of reforming a federal employment agency on labor demand, *IZA Discussion Paper* 14629.
- Kraft, K., Lammers, A. (2021b): Bargaining power and the labor share - a structural break approach, *SFB 823 Discussion Paper* 12/2021.
- Kraft, K., Niederprüm, A. (1999): Determinants of management compensation with risk-averse agents and dispersed ownership of the firm, *Journal of Economic Behavior and Organization* 40, 17-27.
- Murphy, A. (2007): Score tests of normality in bivariate probit models, *Economics Letters* 95(3), 374-379.

2.4.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Dyballa, K., Kraft, K. (2020): How do labor representatives affect incentive orientation of executive compensation? *CESifo Economic Studies* 66(1), 60-90.
- Giebel, M., Kraft, K. (2019a): External financing constraints and firm innovation, *The Journal of Industrial Economics* 67(1), 91-126.
- Giebel, M., Kraft, K. (2019b): The impact of the financial crisis on capital investments in innovative firms, *Industrial and Corporate Change* 28(5), 1079-1099.
- Giebel, M., Kraft, K. (2020): Bank credit supply and firm innovation behavior in the financial crisis, *Journal of Banking and Finance* 121, 105961.
- Jung, P., Kuhn, M. (2019): Earnings losses and labor mobility over the life cycle, *Journal of the European Economic Association* 17(3), 678-724.
- Kraft, K. (2018): Productivity and distribution effects of codetermination in an efficient bargaining model, *International Journal of Industrial Organization* 59, 458-485.

b) Andere Veröffentlichungen

- Kraft, K., Lammers, A. (2021c): Social Exchange and voluntary employee representation, *Academy of Management Proceedings* 2021(1), 14650.
<https://doi.org/10.5465/AMBPP.2021.102>

c) Patente

Entfällt

2.4.3 Ausstattung des Teilprojekts A5

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungsquelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	1. K. Kraft, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Wirtschaftspolitik	Fak. WiWi (Do)	10		Grundausstattung
	2. P. Jung, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Makroökonomie	Fak. WiWi (Do)	10		Grundausstattung
	3. M. Giebel, M.Sc., wiss. Ang.	Wirtschaftspolitik	Fak. WiWi (Do)	25		Grundausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	4. K. Wauters (geb. Dyballa), Dipl.-Vw., wiss. Ang.	Wirtschaftspolitik	Fak. WiWi (Do)		Doktorand	
	5. K. Glück, M.Sc., wiss. Ang.	Makroökonomie	Fak. WiWi (Do)		Doktorand	
	6. T. Hemker, M.Sc., wiss. Ang.	Wirtschaftspolitik	Fak. WiWi (Do)		Doktorand	
	7. A. Lammers, M.Sc., wiss. Ang.	Wirtschaftspolitik	Fak. WiWi (Do)		Doktorand	
	8. J. Mellert, Dr., wiss. Ang.	Makroökonomie	Fak. WiWi (Do)		PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Kornelius Kraft:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.

2. *Prof. Dr. Philip Jung:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 und 2.

3. *Marek Giebel, M.Sc.:*

Arbeitete bei der empirischen Umsetzung des Projektes mit dem Schwerpunkt "Simultane Bestimmung von Management-Vergütung und Unternehmenserfolg" mit.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

4. *Dipl.-Vw. Katharina Wauters (geb. Dyballa):*

Arbeitete bei der empirischen Umsetzung des Projektes mit dem Schwerpunkt "Vorstandsvergütung und durchschnittliche Entlohnung der Mitarbeiter im internationalen Vergleich" mit.

5. *Kevin Glück, M.Sc.:*

Arbeitete bei der empirischen Umsetzung des Projektes "Regionale Ungleichheit in räumlichen Strukturen" (Modul 2) mit.

6. *Tobias Hemker, M.Sc.:*

Arbeitete bei der empirischen Umsetzung des Projekts mit dem Schwerpunkt "Vorstandsvergütung und durchschnittliche Entlohnung der Mitarbeiter im internationalen Vergleich" (Modul 2 und 3) mit.

7. *Alexander Lammers, M.Sc.:*

Arbeitete bei der empirischen Umsetzung des Projekts mit dem Schwerpunkt "Dynamische Verhandlungsmodelle" mit.

8. *Dr. Jan Mellert:*

Arbeitete bei der empirischen Umsetzung des Projekts mit dem Schwerpunkt "Regionale Ungleichheit in räumlichen Strukturen" (Modul 2) sowie in Modul 1 mit.

2.5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A7

2.5.1.1 Titel

Statistische Modellierung von Abhängigkeiten in der Finanzökonomie mittels Copulas

2.5.1.2 Projektleitung

Bücher, Axel, Prof. Dr., *24. September 1982, deutsch

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Mathematisches Institut, Lehrstuhl für Mathematische Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie, D-40225 Düsseldorf

Telefon: 0211-81-11357

E-Mail: axel.buecher@hhu.de

Posch, Peter N., Prof. Dr., *6. Dezember 1978, deutsch

TU Dortmund, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl für Finance
D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-3273

E-Mail: peter.posch@udo.edu

2.5.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.5.2.1 Bericht

Ziel des Projektes war die Weiterentwicklung von Copula-Modellen und verwandter Methoden zur Beschreibung räumlicher und zeitlicher Abhängigkeiten in der Finanzökonomie. Im Fokus standen dabei sowohl neue finanzökonomische Anwendungen als auch die dadurch motivierten methodischen Herausforderungen in der mathematischen Statistik.

Modul 1 ("Copulas in der ökonomischen Anwendung") war einer besseren Beschreibung räumlicher und zeitlicher Abhängigkeiten von Finanzdaten gewidmet, insbesondere im Kontext des Risikomanagements. Bücher, Posch und Schmidtke (2020) stellen dazu mittels einer Reihe neuer VaR Unabhängigkeits-Backtests einen Zusammenhang zwischen der Unabhängigkeits-eigenschaft der VaR-Vorhersage und dem Extremal-Index her, Müller und Posch (2018) modellieren das ökonomisch relevante Wrong-Way Risk in den Tails der Verteilungen und zeigen, dass der Expected Shortfall, ein Maß welches der Regulator zur Bankensteuerung nutzt, bis zu 440% unterschätzt wird, wenn er nicht auf das wrong-way risk bedingt. Kunstler, Müller und Posch (2018) zeigen ein um 10-34% erhöhtes Sprungrisiko von Aktien in Abhängigkeit der Liquidität. Köchling, Posch und Hahnenstein (2020) schlagen einen neuen Ansatz zur Bestimmung der Abhängigkeit von Ausfallkosten von der Absicherungsaktivität von Unternehmen vor und zeigen empirisch den Zusammenhang der Hedge-Ratio und impliziten financial distress costs. Rafeld, Fritz-Morgenthal und Posch (2019) zeigen die Auswirkungen von "Rogue Trading" und verbessern so die Innensteuerung des operativen Risikos in Handelseinheiten von Finanzhäusern. Auf der Methodenseite testen Bücher, Jaser und Min (2021) die Hypothese, dass der datengenerierende Prozess einer multivariaten stationären Zeitreihe einer (räumlichen und/oder zeitlichen) elliptischen (Auto-)Copula folgt, und Kutzker, Stark und Wied (2021) erweitern bekannte Tests auf "relevante" Strukturbrüche in Copulas und finden solche in den Renditen des DAX.

Einer der größten Strukturbrüche war eine Folge der Corona-Pandemie. Engelhardt, Krause, Neukirchen und Posch (2020) zeigen anhand von 47 Ländern, dass Vertrauen in die Regierung als auch in Mitbürger zu einer signifikant niedrigeren Aktienvolatilität führt, Neukirchen, Engelhardt, Krause und Posch (2021) untersuchen in einem umfangreichen Datensatz die Auswirkung von Unternehmenseffizienz und finden einen um 9.44 Prozentpunkte höhere kumulierte Rendite hoch-effizienter Unternehmen in Krisenzeiten und Neukirchen, Engelhardt, Krause und Posch (2022) betrachten die Abhängigkeit von Investor Relations und Finanzmarktinvestitionen.

Köchling, Müller, Posch (2019a) untersuchen eine makroökonomische Strukturänderung in dem jungen Markt der Kryptowährungen - die Einführung von Future Kontrakten und zeigen, dass

dies die Markteffizienz erhöht. Köchling, Schmidtke und Posch (2020) können unter Ausnutzung der Abhängigkeitsstruktur bei dieser neuen Vermögensklasse die Volatilität der Kryptowährung Bitcoin besser prognostizieren, und Köchling, Müller und Posch (2019b) zeigen, dass Preisverzögerungen und Marktfriktionen bei Kryptowährungen auf Marktkapitalisierung und Liquidität zurückzuführen sind und im Laufe der Zeit abgenommen haben.

In dieser dritten Förderphase kamen auch Zweifel an der universellen Einsetzbarkeit von Copulas in ökonomischen Kontexten auf. Deshalb haben wir auch versucht, alternative Modelle für Abhängigkeitsstrukturen zu nutzen. Hier ist insbesondere eine Anwendung von Deep-Learning Modellen in der Simulation von Finanzmarktdaten (Adversarial Networks GAN, Variational Autoencoders und Markov random fields) zu nennen. Piatkowski, Posch und Krause (2021) entwickeln neue Maße, basierend auf der Hausdorff Discrepancy, zur Bestimmung der Simulationsqualität, vgl. Abbildung 1.

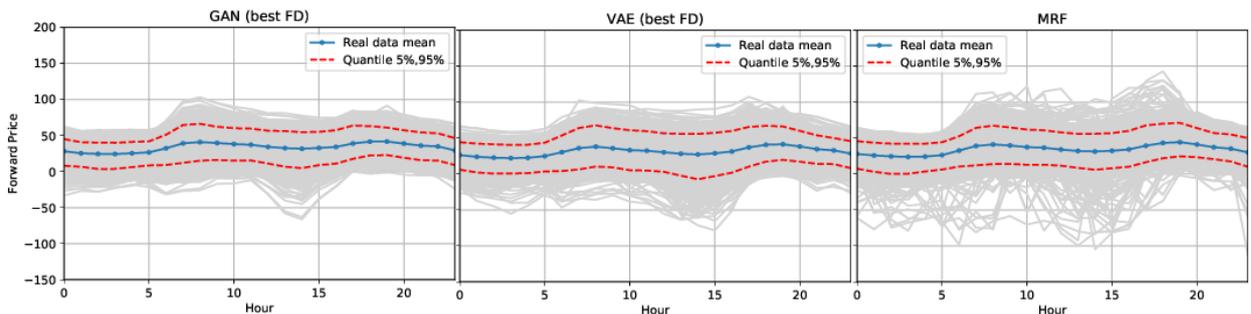


Abb. 1: Simulationspfade von Strompreisprofilen mittels zweier impliziten (GAN, VAE) und eines expliziten Modells.

Genutzt wird das Verfahren in der Praxis zur Simulation der Lastprofile im Strommarkt und der Bestimmung des daraus resultierenden Risikos.

Modul 2 ("Schätzen und Testen von Copulas unter Nebenbedingungen") diente dem besseren Verständnis bekannter und der Entwicklung neuer statistischer Methoden unter Nebenbedingungen. Ein Schwerpunkt bestand in der Untersuchung von Extremwertcopulas: Zou, Volgushev und Bücher (2021) verbessern dabei die nichtparametrische Schätzung von Extremwertcopulas mittels der Block-Maxima-Methode, zum einen dadurch, dass die zugrundeliegenden Block-Maxima überlappend definiert werden, und zum anderen durch die Kombination verschiedener Blockgrößen. Während der erstgenannte Ansatz zu einer Verbesserung der Schätzvarianz führt, kann letztgenannter zur Bias-Reduktion eingesetzt werden; siehe Abbildung 2:

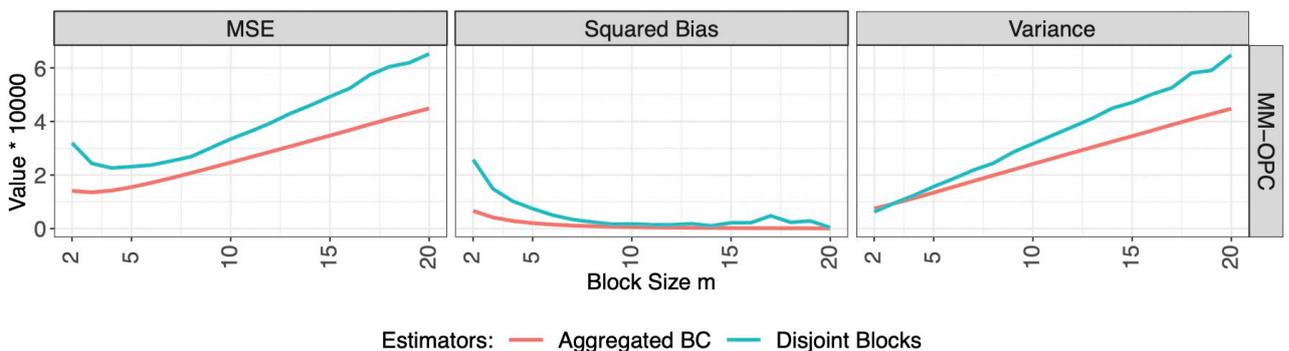


Abb. 2: MSE, Bias und Varianz des neuen Schätzers (Aggregated BC) im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren (Disjoint Blocks).

Die Anwendung derartiger Bias-Reduktions-Methoden im Kontext der Block-Maxima Methode ist neu; sie haben auch bei anderen extremwertstatistischen Problemen ein vielversprechendes Erfolgspotential. Für einen theoretischen Vergleich zur konkurrierenden Peak-over-Threshold-Methode (POT) siehe Bücher, Volgushev und Zou (2019). In dieser Arbeit zeigen wir, dass die Block-Maxima-Methode der vermeintlich effizienteren POT-Methode überlegen sein kann, und

in dem Review-Artikel Bücher und Zhou (2021) betten wir die Resultate in einen größeren extremwertstatistischen Kontext ein.

Weitere an die obigen Resultate anknüpfende Arbeiten adressieren die zeitliche Abhängigkeit von Extremwerten. In Bücher und Jennessen (2020a) wurde eine neue Schätzerfamilie eingeführt, welche die in der zweiten Förderphase entwickelten ML-Schätzer (Berghaus und Bücher 2018) als Spezialfall enthält, aber auch effizientere Schätzer beinhaltet. Diese können auch auf multivariate Zeitreihen verallgemeinert werden. In Bücher und Jennessen (2020b) geht es um die Schätzung der sogenannten Cluster-Verteilung, welche das zeitliche Clustern von Extremwerten detaillierter beschreibt als der Extremal Index. Die entwickelten Schätzer stellen sich als effizienter heraus als herkömmliche Verfahren (Robert 2009).

Ein weiteres Thema des Moduls bestand in der Analyse von Copula-Methoden bei Bindungen in den Beobachtungen. Kojadinovic (2017) schlägt für zahlreiche Testverfahren geeignete Methoden zum Umgang damit vor, und Li et al. (2020) adaptieren herkömmliche Methoden dadurch, dass gebundene Daten als intervallzensiert aufgefasst werden. Andere Projektarbeiten in Modul 2 betreffen die gewichtete Konvergenz des empirischen Beta-Copula-Prozesses (Berghaus und Segers 2018) und die gegenüber Nicht-Stationaritäten sensitive Strukturbrucherkennung in univariaten Zeitreihen (Bücher, Fermanian und Kojadinovic 2019).

Trotz verschiedener Probleme wurden alle Projektziele im Wesentlichen erreicht. Insbesondere wurde durch die unterschiedlichen wissenschaftlichen Schwerpunkte der beiden Projektleiter eine enge Verbindung von Theorie und Praxis hergestellt. Allerdings hat unsere Arbeit in Phase 3 darunter gelitten, dass die für weite Teile des Projekts eingeplante und hervorragend einschlägig ausgewiesene Mitarbeiterin Dr. Betina Berghaus ihre Anstellung an der Ruhr-Universität Bochum zum Projektstart zu Gunsten einer Stelle in der Wirtschaft aufgekündigt hat. Dann ist Projektleiter Axel Bücher im Oktober 2018 auf eine W3-Professur für Mathematische Statistik an der HHU Düsseldorf gewechselt - einerseits erfreulich, ist dieser Ruf doch in weiten Teilen auf Erfolge in der SFB-Arbeit der zweiten Förderperiode zurückzuführen, andererseits aber lästig, da mitten in der dritten Förderperiode der Aufbau einer neuen Arbeitsgruppe anstand. Dieser ging nicht ohne Probleme vonstatten: So hat etwa Projektmitarbeiter Dr. Florian Stark seine Anstellung nach wenigen Monaten gekündigt und konnte in dieser Zeit nur eine projektrelevante eigene Vorarbeit zu einem erfolgreichen Abschluss führen (Kutzker, Stark und Wied 2021). Sein Nachfolger Dr. Cambyse Pakzad hat seine Stelle als PostDoc Anfang 2020 mit Beginn der Pandemie angetreten, so dass seine Einarbeitung vollständig digital erfolgen musste. Aber erste Erfolge sind bereits zu melden: die geplante Entwicklung hochdimensionaler copulabasierter Unabhängigkeitstests (in Konkurrenz zu zahlreichen einschlägigen Vorschlägen der letzten Jahre, siehe Han et al. 2017, Leung und Drton 2018, Yao et al. 2018), sind mathematisch-theoretisch weitgehend abgeschlossen; diese Arbeiten werden auch nach Ende des SFBs weitergeführt.

Sehr profitiert - ausweislich mehrerer gemeinsamen Publikationen, siehe Bücher, Dette und Heinrichs (2020, 2021), Van Delft, Characiejus und Dette (2021), Krämer und Posch (2019) - hat unsere Arbeit von den Teilprojekten A1 und C1, besonders betreffend die Themen Strukturbruchttests und funktionale Daten. Weitere Kooperationen gab es mit A5, hier hat der SFB ein Folgeprojekt zum Thema „Finanzmarktentwicklung und Innovationsgeschehen“ motiviert. SFB-extern kooperiert die Gruppe Posch mit zwei führenden Energieunternehmen (Uniper, EnBW) in der Modellierung von zeitlichen Abhängigkeitsstrukturen bei Energiepreisen, die in Piatkowski, Krause und Posch (2021) entwickelten Modelle zur Simulation der Lastprofile im Strommarkt und der Bestimmung des daraus resultierenden Risikos sind dort mittlerweile im Einsatz. Mit Uniper fanden ferner mehrere kooperative Workshops zu dem Thema statt. Eine weitere Kooperation mit Proinnovera, einem Dienstleister für medizinische Studien, wurde während der Corona Pandemie gestartet. Hier liegen erste Ergebnisse in der Vorhersage von Patientenrekrutierung bei medizinischen Studien vor; genutzt werden wiederum Erkenntnisse aus der zeitabhängigen Modellierung von Abhängigkeitsstrukturen.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.5.2.2):

- Berghaus, B., Bücher, A. (2018): Weak convergence of a pseudo maximum likelihood estimator for the extremal index, *Annals of Statistics* 46(5), 2307-2335.
- Berghaus, B., Segers, J. (2018): Weak convergence of the weighted empirical beta copula process, *Journal of Multivariate Analysis* 166, 266-281.
- Bücher, A., Dette, H., Heinrichs, F. (2020): Detecting deviations from second-order stationarity in locally stationary functional time series, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 72, 1055-1094.
- Bücher, A., Fermanian, J.-D., Kojadinovic, I. (2019): Combining cumulative sum change-point detection tests for assessing the stationarity of univariate time series, *Journal of Time Series Analysis* 40, 124-150.
- Bücher, A., Jaser, M., Min, A. (2021): Detecting departures from meta-ellipticity for multivariate stationary time series, *Dependence Modeling* 9(1), 121-140.
- Bücher, A., Jennessen, T. (2020b): Statistical analysis for stationary time series at extreme levels: new estimators for the limiting cluster size distribution.
<https://arxiv.org/abs/2011.04733>
- Bücher, A., Kojadinovic, I. (2019): A note on conditional versus joint unconditional weak convergence in bootstrap consistency results, *Journal of Theoretical Probability* 32(3), 1145-1165.
- Engelhardt, N., Neukirchen, D., Krause, M., Posch, P.N. (2020): What drives stocks during the Corona-crash? News attention vs. rational expectation, *Sustainability* 12(12), 5014.
- Engelhardt, N., Krause, M., Neukirchen, D., Posch, P.N. (2020): Trust and stock market volatility during the COVID-19 crisis, *Finance Research Letters*, 101873.
- Han, F., Chen, S., Liu, H. (2017): Distribution-free tests of independence in high dimensions, *Biometrika* 104(4), 813-828.
- Krämer, W., Posch, P.N. (2019): Partial orderings of default predictions, *Applications in Statistical Computing*, 187-199.
- Köchling, G., Posch, P.N., Hahnenstein, L. (2020): Do firms hedge in order to avoid financial distress costs? New empirical evidence using bank data, *Journal of Business Finance & Accounting* 48(3-4), 718-741.
- Kojadinovic, I. (2017): Some copula inference procedures adapted to the presence of ties, *Computational Statistics & Data Analysis* 112, 24-41.
- Kunsteller, S., Müller, J., Posch, P.N. (2018): Do illiquid stocks jump more frequently?, *Applied Economics* 51(25), 2764-2769.
- Kutzker, T., Stark, F., Wied, D. (2021): Testing for relevant dependence change in financial data: A CUSUM copula approach, *Empirical Economics* 60, 1875-1894.
- Leung, D., Drton, M. (2018): Testing independence in high dimensions with sums of rank correlations, *Annals of Statistics* 46(1), 280-307.
- Li, Y., Li, Y., Qin, Y., Yan, J. (2020): Copula modeling for data with ties, *Statistics and Its Interface* 13, 103-117.
- Müller, J., Posch, P.N. (2018): Wrong-way-risk in tails, *Journal of Asset Management* 19, 205-215.
- Neukirchen, D., Engelhardt, N., Krause, M., Posch, P.N. (2022): The value of (private) investor relations during the COVID-19 crisis, *Journal of Banking & Finance*, 106450.
<https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2022.106450>
- Piatkowski, N., Posch, P.N., Krause, M. (2021): How to trust generative probabilistic models for time-series data?, *Lion* 15.
- Rafeld, H., Fritz-Morgenthal, S.G., Posch, P.N. (2019): Whale watching on the trading floor: Unravelling collusive rogue trading in banks, *Journal of Business Ethics* 165(4), 633-657.
- Robert, C.Y. (2009): Inference for the limiting cluster size distribution of extreme values, *Annals of Statistics* 37, 271-310.
- Van Delft, A., Characiejus, V., Dette, H. (2021): A nonparametric test for stationarity in functional time series, *Statistica Sinica* 31, 1375-1395.
- Yao, S., Zhang, X., Shao, X. (2018): Testing mutual independence in high dimension via distance covariance, *Journal of the Royal Statistical Society Series B* 80(3), 455-480.

2.5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

Bücher, A., Dette, H., Heinrichs, F. (2021): Are deviations in a gradually varying mean relevant? A testing approach based on sup-norm estimators, *Annals of Statistics* 49(6), 3583-3617.

Bücher, A., Jennessen, T. (2020a): Method of moments estimators for the extremal index of a stationary time series, *Electronic Journal Of Statistics* 14(2), 3103-3156.

Bücher, A., Posch, P.N., Schmidtke, P. (2020): Using the extremal index for value-at-risk backtesting, *Journal of Financial Econometrics* 18(3), 556-584.

Bücher, A., Volgushev, S., Zou, N. (2019): On second order conditions in the multivariate block maxima and peak over threshold method, *Journal of Multivariate Analysis* 173, 604-619.

Bücher, A., Zhou, C. (2021): A horse race between the block maxima method and the peak-over-threshold approach, *Statistical Science* 36(3), 360-378.

Köchling, G., **Schmidtke, P., Posch, P.N.** (2020): Volatility forecasting accuracy for Bitcoin, *Economics Letters* 191, 108836.

Köchling, G., Müller, J., **Posch, P.N.** (2019a): Does the introduction of futures improve the efficiency of Bitcoin? *Finance Research Letters* 30, 367-370.

Köchling, G., Müller, J., **Posch, P.N.** (2019b): Price delay and market frictions in cryptocurrency markets, *Economic Letters* 174, 39-41.

Neukirchen, D., Engelhardt, N., Krause, M., **Posch, P.N.** (2021): Firm efficiency and stock returns during the COVID-19 crisis, *Finance Research Letters*.
<https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.102037>

Zou, N., Volgushev, S., **Bücher, A.** (2021): Multiple block sizes and overlapping blocks for multivariate time series extremes, *Annals of Statistics* 49(1), 295-320.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.5.3 Ausstattung des Teilprojekts A7

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2013 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. A. Bücher, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)/ Fak. Mathematik (Dü)	10		Grund- ausstattung
	2. P.N. Posch, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Finance	Fak. WiWi (Do)	10		Grund- ausstattung
	3. T. Jennessen, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Dü)	10		Grund- ausstattung
	4. F. Heinrichs, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grund- ausstattung
	5. G. Köchling, Dr., wiss. Ang.	Finance	Fak. WiWi (Do)	5		Grund- ausstattung
	6. A. Aslan, M.Sc., wiss. Ang.	Finance	Fak. WiWi (Do)	5		Grund- ausstattung
Nichtwissen- schaftliches Personal	7. M. Stein, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Bo)	3		Grund- ausstattung
	8. S. Wolter, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Dü)	3		Grund- ausstattung
	9. N. Scheuner, Verw. Ang.		Fak. WiWi (Do)	3		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	10. C. Pakzad, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Dü)		PostDoc	
	11. A. van Delft, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	12. D. Ullmann, Dr., wiss. Ang.	Finance	Fak. WiWi (Do)		PostDoc	
	13. P. Schmidtke, Dr., wiss. Ang.	Finance	Fak. WiWi (Do)		PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Axel Bücher:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 und 2.

2. *Prof. Dr. Peter N. Posch:*

Leitete das Projekt und bearbeitete das Modul 1.

3. *Tobias Jennessen, M.Sc.:*

Arbeitete mit A. Bücher in Modul 2 zum Thema zeitliche Abhängigkeiten von Extremwerten.

4. *Dr. Florian Heinrichs:*

Arbeitete in Zusammenarbeit mit Teilprojekt A1 an Strukturbruchtests für univariate und funktionale Zeitreihen; setzt dabei methodische Expertise aus Modul 2 ein.

5. *Dr. Gerrit Köchling:*

Arbeitete mit P. Posch in Modul 1.

6. *Aydin Aslan, M.Sc.:*

Arbeitete mit P. Posch in Modul 1 an Kreditrisiko-Dynamiken und Nachhaltigkeitsratings.

7. *Martina Stein:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Bochum.

8. *Sarah Wolter:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Düsseldorf.

9. *Nicole Scheuner:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Dortmund.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

10. *Dr. Cambyse Pakzad:*

Arbeitete mit A. Bücher in Modul 2 an hochdimensionalen Unabhängigkeitstests.

11. *Dr. Anne van Delft:*

Arbeitete in Kooperation mit Teilprojekt C1 an Strukturbruchtests für funktionale Zeitreihen.

12. *Dr. Daniel Ullmann:*

Arbeitete mit P. Posch in Modul 1 an Shrinkage-Schätzern, Korrelationsmatrizen und Einkommensungleichheiten.

13. *Dr. Philipp Schmidtke:*

Arbeitete mit P. Posch und A. Bücher in Modul 1 an zeitlichen Abhängigkeiten von Extremwerten in der Finanzökonomie sowie an Volatilitäts-Forecastings für Kryptowährungen.

2.6.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B1

2.6.1.1 Titel

Modellierung und Kontrolle thermokinetischer Beschichtungsprozesse

2.6.1.2 Projektleitung

Tillmann, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing., *10. November 1961, deutsch
TU Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Leonhard-Euler-Str. 2, D-44227 Dortmund
Telefon: 0231-755-2581
E-Mail: wolfgang.tillmann@udo.edu

Kuhnt, Sonja, Prof. Dr. habil., *26. September 1968, deutsch
Privatdozentin, TU Dortmund, Fakultät Statistik
Fachhochschule Dortmund, Fachbereich Informatik
Emil-Figge-Str. 42, D-44227 Dortmund
Telefon: 0231-9112-8935
E-Mail: sonja.kuhnt@fh-dortmund.de

2.6.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.6.2.1 Bericht

Gegenstand des Teilprojekts B1 waren Methoden zur Modellierung, zur tagesgenauen Optimierung sowie zur Kontrolle und Steuerung von thermischen Spritzprozessen. Hierbei lag der Fokus in der dritten Förderperiode weiterhin auf einer zweistufigen Modellierung des Beschichtungsprozesses: In Abhängigkeit von Prozessparametereinstellungen (z.B. Abstand, Pulverförderrate, Kerosin- und Sauerstoffmenge) werden prozesscharakteristische Partikeleigenschaften im Flug (Partikeltemperatur und -geschwindigkeit) gemessen und modelliert. Die Modellierung und Vorhersage der resultierenden Schichteigenschaften geschieht dann basierend auf den Partikeleigenschaften im Flug. Hierbei wurde in der dritten Förderperiode, neben den Spritzpulvern WC-Co 88/12 mit unterschiedlichen Karbidgrößen und einem Cr₃C₂-NiCr 75/25 Spritzpulver, zunächst vermehrt ein Augenmerk auf einen Pulverwerkstoff mit einer Matrix aus einer Eisenbasislegierung (WC-FeCrAl 85/15) gelegt. Dieser Werkstoff steht aufgrund der gesundheitsschädlichen Eigenschaften der kobaltbasierten Spritzwerkstoffe zunehmend im Fokus der Forschung. Unter Nutzung eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans, konnten wir die Beziehungen zwischen Prozessparametereinstellungen, Partikeleigenschaften im Flug und Schichteigenschaften durch generalisierte lineare Modelle mit gammaverteilten Zielgrößen darstellen. Hier haben wir somit ein zweistufiges Vorhersagemodell für die Überwachung und Steuerung der Beschichtungseigenschaften (vgl. Modul 4) von WC-FeCrAl Pulvern während des Beschichtungsprozesses entwickelt.

Wir haben uns verstärkt mit der Frage beschäftigt, welche multivariaten hierarchischen polynomialen Modelle in Abhängigkeit von den Partikeleigenschaften schätzbar sind und in wieweit diese Modelle stabil unter kleinen Störungen sind (Modul 1). Entscheidend ist dabei, dass die Partikeleigenschaften keinem vorgegebenen Versuchsplan folgen, sondern als Messungen aus dem für die Prozesseinstellungen gewählten Versuchsplan resultieren. Dazu haben wir in Förderphase 2 vorab das Konzept des numerischen algebraischen Fans eingeführt (Rudak, Kuhnt und Riccomagno 2016) und in der dritten Förderphase weiterentwickelt. Der numerische algebraische Fan enthält nur eine Teilmenge aller stabilen hierarchischen Modelle, die im numerischen statistischen Fan (Kalka und Kuhnt 2021) enthalten sind. Das Verhältnis vom sogenannten algebraischen zum statistischen Fan korrespondiert zum Verhältnis der Konzepte einer Gröbnerbasis zu einer Randbasis des Designideals. Die effektive Berechnung des numerischen statistischen Fans basiert dabei auf einer Generalisierung der rekursiven Algorithmen zur Berechnung aller Randbasen (Hashemi, Kreuzer und Pourkhajouei 2019) sowie auf einem Test für numerische Abhängigkeit von Modelltermen respektive Designvektoren von Fassino (2010).

Weiterhin wurde in der dritten Förderperiode der Einfluss der Pulvereigenschaften, insbesondere der Fließfähigkeit der Pulver und der Einfluss der Pulvervorbehandlung auf die Fließfähigkeit untersucht. Wir haben den Einfluss von unterschiedlichen Pulvermorphologien und Zusammensetzungen auf die Partikeleigenschaften im Flug sowie auf die resultierenden Schichteigenschaften bestimmt. Üblicherweise werden die Schicht- und Partikeleigenschaften der Spritzzusatzwerkstoffe individuell für jedes Pulver betrachtet, sodass ein Vergleich der Pulver und deren Verhalten im Flug nur bedingt möglich ist. Wir haben erstmals alle im Rahmen des Teilprojektes behandelten Pulver in einem Versuchsplan mit den gleichen Maschineneinstellungen verarbeitet. Dabei wurde ein teilfraktioneller Versuchsplan mit 2 Zentrums- punkten unter Verwendung generalisierter linearer Modelle mit Gammaverteilungsannahme und Identitätslink verwendet. Das Projekt B1 hat ferner den Einfluss einer Pulvervorbehandlung auf die Fließfähigkeit der Spritzzusatzwerkstoffe untersucht. Dazu wurde der im Rahmen des Projektantrags beantragte und bewilligte "Revolution Powder Analyzer" benutzt (Tillmann und Brinkhoff 2019). Die Fließfähigkeit von Pulvern ist bei allen thermischen Spritzverfahren von großer Bedeutung, insbesondere was die Transportierbarkeit des Pulvers mit Hilfe des Pulverförderers betrifft. Eine schlechte Fließfähigkeit führt zu Schwankungen der Pulverfördermenge und in der Folge zu inhomogenen Schichtstrukturen (Carson und Pittenger 1990; Teunou, Vasseur und Krawczyk 1995). Des Weiteren können Pulveragglomerationen bei der Eindüsung in den Spritzbrenner zu Verstopfungen (sog. "Nozzle clogging") führen. Zu den Eigenschaften, die die Fließfähigkeit von Pulvern beeinflussen, gehören die Kohäsionskraft, die Reibung der Partikel untereinander und an der Wand, sowie die Dichte des Schüttguts. Wird z.B. in einem Pulverförderer Druck auf das Pulver ausgeübt, kann eine Kohäsionskraft entstehen, die im schlimmsten Fall einen "Kohäsionsbogen" im Pulverförderer erzeugt. Ein Kohäsionsbogen (auch Rattenloch genannt) ist ein stabiles Hindernis, das sich über die engste Stelle des Pulverförderers (in der Regel die Auslassöffnung) erstreckt und so verhindert, dass der Behälter des Pulverförderers weiter Pulver abgibt. Wird dieser Kohäsionsbogen größer, kann er die Pulverzufuhr zum Brenner stoppen, obwohl sich das Ausgangspulver noch im Pulverförderer befindet. Diesem Phänomen wird in der Regel konstruktiv entgegengewirkt, z.B. durch Vibrationseinheiten im Pulverförderer. Durch die Verbesserung der Fließfähigkeit des Pulvers kann die Bildung von Kohäsionsbögen möglicherweise jedoch vollständig verhindert werden. Auf Basis von Versuchen gemäß eines 2^2 -faktoriellen Plans mit 3 zentralen Punkten konnten wir zeigen, dass die dynamische Fließfähigkeit der Spritzpulver durch einen Vorbehandlungsprozess beeinflusst werden kann. Insbesondere wurde festgestellt, dass eine Vorwärmtemperatur von 200 °C mit einer Haltezeit von 2 h eine deutliche Verbesserung der Fließfähigkeit insbesondere des WC-Co-Pulvers bewirkt und dass auch die dynamische Dichte einen Einfluss auf das Fließverhalten der Pulver hat. So nimmt der Lawinen-Winkel, d.h. der Winkel, ab dem das Pulver zu fließen beginnt, mit zunehmender dynamischer Dichte ab. Jedoch haben die Untersuchungen auch gezeigt, dass das Fließverhalten zudem vom Trocknungsgrad der Pulver beeinflusst wird.

Der statistischen Modellierung (Modul 1 und 2) haben wir eine Sensitivitätsanalyse vorgeschaltet, um zu bestimmen, wie sich die Variabilität in den Vorhersagemodellen für die einzelnen Zielgrößen auf die Einflussgrößen aufteilt. Im Rahmen der dritten Förderphase wurden neue Sensitivitätsindizes eingeführt (Fruth, Roustant und Kuhnt 2019), die zur Bestimmung von Teilen des Versuchsraumes dienen, in denen die Variabilität der Vorhersagefunktion groß ist. Zudem wurde der Nutzen von Methoden der globalen Sensitivitätsanalyse für den Einsatz in Verfahren des interpretierbaren maschinellen Lernens aufgezeigt (Kuhnt und Kalka 2021). Betrachtet werden auf Sobol' Indizes basierende Sensitivitätsmaße sowie Shapleywerte. Diese haben wir anhand von Anwendungsszenarien unter Nutzung von Gaußprozessmodellen und Neuronalen Netzen verglichen. In Modul 3 (Beurteilung der Schichtqualität) wurden Splatanalysen durchgeführt, um ein besseres Verständnis über den Schichtaufbau zu gewinnen und dafür wurden Methoden zur automatischen Bildauswertung entwickelt, u.a. zur Erkennung kreisförmiger überlappender Objekte. Wir stellen einen neuen Algorithmus zur Erkennung verzerrter und überlappender kreisförmiger Objekte in verrauschten Graustufenbildern vor

(Kirchhoff, Kuhnt, Bloch et al. 2020). Eine besondere Rolle spielt dabei die Kantendetektion unter Verwendung von rotierenden Kerndifferenzschätzern. Der Algorithmus konnte erfolgreich auf rasterelektronenmikroskopische Bilder von Splats aus unseren HVOF-Versuchen angewendet werden.

Das Ziel von Modul 5 war die Verifikation der Ergebnisse und die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf den industriellen Maßstab inklusive komplexerer Beschichtungsaufgaben. Die im bisherigen Verlauf des Forschungsvorhabens untersuchten Beschichtungen mit dem HVOF-Verfahren werden hauptsächlich auf größere, äußere Oberflächen aufgebracht. Viele Bauteile besitzen jedoch Innenflächen mit kleinen Radien, die ebenfalls einer hohen tribomechanischen Belastung ausgesetzt sind. Aus diesem Grund hat das industrielle Interesse, die hervorragenden Verschleißschutzeigenschaften von Außenschichten auf solche innenliegenden Funktionsflächen zu übertragen, deutlich zugenommen (Barbezat und Herber 2001; Bobzin, Öte, Königstein et al. 2018; Krauß 2015; Gutleber, Molz, He et al. 2017). Allerdings ist die Beschichtung von Innenflächen mittels HVOF-Verfahren im Vergleich zur konventionellen Beschichtung von Außenflächen ein deutlich anspruchsvollerer Prozess, da durch die Verringerung der Bauteilabmessungen (kleiner Innendurchmesser, große Bauteiltiefen) der verfahrenstechnische Aufwand erheblich steigt. Die Gründe für den höheren verfahrenstechnischen Aufwand und der daraus resultierenden höheren Komplexität des Innenbeschichtungsprozesses liegen vor allem in der kompakten Bauweise der Brenner für die Beschichtung kleiner Innendurchmesser, wodurch eine geringere Verbrennungsleistung resultiert. Aufgrund der kurzen Spritzabstände, die für die Innenbeschichtung von Teilen mit kleinem Innendurchmesser in der Regel erforderlich sind, reduziert sich auch der Wärme- und Impulsübergang von der Flamme auf die Pulverpartikel. Dadurch erreichen Innenbeschichtungen in der Regel nicht die gleichen Eigenschaften wie herkömmliche Außenbeschichtungen in Bezug auf Härte, Rauheit, Porosität und Zähigkeit (Verstak, Gries und Breitsameter 2017; Baumann, Tillmann, Schaak et al. 2021). Um den Innenbeschichtungsprozess besser zu verstehen und systematische Einflüsse der Parametervariation zu detektieren, haben wir über den eigentlichen Projektantrag hinausgehende Versuche durchgeführt und analysiert. Die Untersuchungen wurden mittels eines speziellen HVOF-Innenbeschichtungsbrenners, jedoch an konventionellen Außengeometrien durchgeführt. Um den Einfluss des realen Innenbeschichtungsprozesses zu identifizieren, wurden gleichzeitig Beschichtungsexperimente an konventionellen Außengeometrien und Innenbeschichtungsproben durchgeführt. Hierzu wurden die Proben in einem Beschichtungsvorgang mit derselben Prozessparametereinstellung jeweils in einem Grundkörper in Form eines Rohres und auf einer Außengeometrie beschichtet. Die Beschichtungen wurden hinsichtlich der Partikeleigenschaften im Flug (Partikeltemperatur und Partikelgeschwindigkeit) sowie der Schichteigenschaften (Härte, Abscheidegrad, Porosität und Dicke) für verschiedene Kombinationen von Prozessparametern untersucht. Wir konnten zeigen, dass die aus der konventionellen Außenbeschichtung generierten, statistischen Modelle auch für den komplexeren Innenbeschichtungsprozess eine gute Beschreibung und Vorhersage der Partikeleigenschaften im Flug sowie der Schichteigenschaften in Abhängigkeit von den Prozessparametern liefern (Tillmann, Baumann, Brinkhoff et al. 2021).

Aufgrund der hohen industriellen Relevanz des Verschleißschutzes innenliegender Funktionsflächen und der Überwachung und Kontrolle des Innenbeschichtungsprozesses wird mit Abschluss der laufenden Förderperiode ein Transferprojekt angestrebt. Der Innenbeschichtungsprozess eignet sich besonders, um die im Rahmen des SFB gewonnenen Erkenntnisse auf einen komplexeren Einsatzfall zu übertragen und in die industrielle Praxis zu transferieren. Als besondere Herausforderung werden dabei der hohe verfahrenstechnische Aufwand und die höhere Komplexität des Innenbeschichtungsprozesses angesehen; unsere Methoden der Modellierung und tagesgenauen Optimierung werden zu einem tiefergehenden und grundlegenden Verständnis des Innenbeschichtungsprozesses beitragen.

Von großer Bedeutung für die Arbeiten war das SFB-Querschnittsthema Versuchsplanung, hier hat das Projekt insbesondere von der Expertise in C2 profitiert. Ein Austausch zur Versuchsplanung und statistischen Prozessmodellierung hat mit B4 stattgefunden. Die Arbeiten mit B5 an einem Algorithmus für die Erkennung von kreisförmigen Objekten in der Bildverarbeitung unter Nutzung robuster statistische Kernschätzer wurden erfolgreich fortgesetzt (Kirchhoff, Kuhnt, Bloch et al. 2020).

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.6.2.2):

- Barbezat, G., Herber, R. (2001): Durchbruch für Motorenbeschichtung, *Sulzer Technical Review* 2, 8-11.
- Baumann, I., Tillmann, W., Schaak, C., Schmidt, K., Hagen, L., Zajackowski, J., Schmidtmann, G., Matthäus, G., Luo, W. (2021): Internal diameter coating by warm spraying of fine WC-12Co Powders ($-10 + 2 \mu\text{m}$) with very short spray distances up to 10 mm, *Journal of Thermal Spray Technology* 30, 1344-1364.
- Bobzin, K., Öte, M., Königstein, T., Dröder, K., Hoffmeister, H.-W., Mahlfeld, G., Schläfer, T., (2018): Development of novel Fe-based coating systems for internal combustion engines, *Journal of Thermal Spray Technology* 27, 736-745.
- Carson, J.W., Pittenger, B.H. (1990): Bulk properties of powders, *Powder Metal Technologies and Applications* 7, 287-301.
- Fassino, C. (2010): Almost vanishing polynomials for sets of limited precision points, *Journal of Symbolic Computation* 45, 19-37.
- Gutleber, J., Molz, R., He, J., Weber, C., Colmenares, J. (2017): New developments in HVOF spraying for internal diameter coatings, *Proceedings International Thermal Spray Conference*, Düsseldorf, 501-504.
- Hashemi, A., Kreuzer, M., Pourkhajouei, S. (2019): Computing all border bases for ideals of points, *Journal of Algebra and Its Applications*, 1950102.
- Krauß, B. (2015): Trend: Beschichtete Zylinderlaufbahnen, *VDI-Z Integrierte Produktion*.
- Rudak, N., Kuhnt, S., Riccomagno, E. (2016): Numerical algebraic fan of a design for statistical model building, *Statistica Sinica* 26, 1021-1035.
- Teunou, E., Vasseur, J., Krawczyk, M. (1995): Measurement and interpretation of bulk solids angle of repose for industrial process design, *Powder Handling and Processing* 7(3), 1-9.
- Verstak, A., Gries, B., Breitsameter, M. (2017): Development of HVOF ID coating technology and materials, *Proceedings International Thermal Spraying Conference*, Düsseldorf, 346-353.

2.6.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Fruth, J., Roustant, O., **Kuhnt, S.** (2019): Support indices: Measuring the effect of input variables over their supports, *Reliability Engineering & System Safety* 187, 17-27.
- Kirchhoff, D., **Kuhnt, S.**, Bloch, L., Müller, C.H. (2020): Detection of circlelike overlapping objects in thermal spray images, *Quality and Reliability Engineering International* 36, 2639-2659.
- Kuhnt, S., Kalka, A.** (2021+): Global sensitivity analysis for the interpretation of machine learning algorithms, erscheint in: Steland, A., Tsui, K.L. (Eds.): *Artificial Intelligence, Big Data, Data Science and Machine Learning in Statistics*, Springer.
- Kuhnt, S., Tillmann, W., Brinkhoff, A., Becker-Emden, E.-C.** (2019): Langlebige Maschinenteile: Wie statistische Versuchsplanung Verschleißschutz optimiert, in: Krämer, W., Weihs, C. (Eds.). *Faszination Statistik*, Springer, Berlin Heidelberg, 164-171.
- Tillmann, W., Baumann, I., Brinkhoff, A., Kuhnt, S., Becker-Emden, E.-C., Kalka, A.** (2021): Effect of the spray parameters on the particle behavior and the coating properties during ID warm spraying of fine WC-12Co powders ($-10 + 2 \mu\text{m}$), *Proceedings of the ITSC2021. Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference Virtual*. ASM, 283-289.
- Tillmann, W., Brinkhoff, A.** (2019): Influence of feedstock pre-treatment on dynamic flowability of HVOF powders, in: Azarmi, F., Koivuluoto, H., Lau, Y., Balani, K., Veilleux, J., Li, H., Widener, C., Shinoda, K., Toma, F. (Eds.): *International Thermal Spray Conference and Exposition (ITSC 2019)*, 136-142.

b) Andere Veröffentlichungen

- Kalka, A., Kuhnt, S.** (2021+): The numerical statistical fan for noisy experimental designs, *Algebraic Statistics* (in Revision).
<https://arxiv.org/abs/2005.04051>

c) Patente

Entfällt

2.6.3 Ausstattung des Teilprojekts B1

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungsquelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	1. W. Tillmann, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Maschinenbau	Fak. Maschinenbau (Do)	5		Grundausstattung
	2. S. Kuhnt, Prof. Dr., Prof.	Statistik	FB Informatik (FH Do)	5		Grundausstattung
	3. L. Reisch-Lang, Dipl.-Ing. (FH), wiss. Ang.	Maschinenbau	Fak. Maschinenbau (Do)	10		Grundausstattung
	4. Ch. Becker-Emden, M.Sc., wiss. Ang.	Statistik	FB Informatik (FH Do)	10		Grundausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	5. A. Brinkhoff, M.Sc., wiss. Ang.	Maschinenbau	Fak. Maschinenbau (Do)		Doktorand	
	6. A. Kalka, Dr., wiss. Ang.	Statistik	FB Informatik (FH Do)		PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Wolfgang Tillmann:*

Leitete das Projekt und brachte seine Expertise zu thermischen Spritzprozessen in die Module 1 und 3 bis 5 ein.

2. *Prof. Dr. Sonja Kuhnt:*

Leitete das Projekt und brachte ihre Expertise zur statistischen Modellbildung und Methoden der industriellen Statistik in die Module 1 bis 4 ein.

3. *Dipl.-Ing. (FH) Lydia Reisch-Lang:*

Brachte ihre Expertise in der Werkstoffprüfung und -analytik in die Module 1, 3 und 5 ein.

4. *Christina Becker-Emden, M.Sc.:*

Forschte mit S. Kuhnt zu multivariaten Erwartungswert- und Kovarianzmodellen und soll darüber promovieren. Brachte Erfahrungen in der statistischen Modellierung thermischer Spritzprozesse in die Module 1 bis 4 ein.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

5. *Alexander Brinkhoff, M.Sc.:*

Forschte mit W. Tillmann zur Diagnostik von Spritzprozessen und soll darüber promovieren. Brachte seine Erfahrung im Bereich der thermischen Spritztechnik in den Modulen 1 und 3 bis 5 ein.

6. *Dr. Arkadius Kalka:*

Forschte mit S. Kuhnt zur Modellierung (Modul 1 und 2) – insbesondere in Methoden der algebraischen Statistik - und unterstützte in Modul 3.

2.7.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B3

2.7.1.1 Titel

Statistische Modellierung zeitlich und spektral hoch aufgelöster Audiodaten in Hörhilfen

2.7.1.2 Projektleitung

Martin, Rainer, Prof. Dr., *5. November 1962, deutsch
Ruhr-Universität Bochum, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik,
Institut für Kommunikationsakustik, D-44780 Bochum
Telefon: 0234-32-22496
E-Mail: rainer.martin@rub.de

Belomestny, Denis, Prof. Dr., *14. April 1976, russisch
Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Mathematik,
Thea-Leymann-Str. 9, D-45127 Essen
Telefon: 0201-183-7425
E-Mail: denis.belomestny@uni-due.de

2.7.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.7.2.1 Bericht

Das Projekt widmet sich der Aufbereitung von Musiksignalen, um Nutzern von Cochlea Implantaten (CI) den Zugang zu polyphoner Musik zu erleichtern. Es geht hierbei um eine Vereinfachung von Musiksignalen durch Reduzierung auf die musikalisch wichtigsten Elemente, so dass diese mit geringerer Höranstrengung wahrgenommen werden können. Wir betrachten überwiegend Verfahren zur Reduktion der spektralen Komplexität der Musiksignale (spektrale Ausdünnung) und zur Zerlegung der Signale in harmonische und perkussive Anteile. Hierfür nutzen wir Methoden der Signalverarbeitung und des maschinellen Lernens.

Modul 1 ("Identifikation musikalisch wichtiger Merkmale") hat zunächst Tonhöhen- und Rhythmusinformation als wesentliche Merkmale identifiziert. Wir haben daher untersucht, wie sich die Signalanteile eines Musikstücks geeignet zerlegen lassen, so dass die vom CI auf den Hörnerv übertragbare Rhythmusinformation erhalten bleibt und Tonhöhen- und Klangfarbenmerkmale gezielt verbessert werden können. Hierbei kam eine harmonisch/perkussive Signaltrennung (harmonic/percussive sound separation, HPSS) zum Einsatz, die wir im Unterschied zu bisherigen Arbeiten (Buyens et al. 2015, 2018) separat auf die in einem Musikstück enthaltenen Instrumente und Stimmen und nicht nur auf das gesamte Musikstück angewandt haben. Die getrennten Signalanteile wurden anschließend in verschiedenen Varianten mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen resynthetisiert und in Hörversuchen mit einer CI-Simulation evaluiert. Wir konnten die aus der Literatur bekannten Erkenntnisse bestätigen, dass eine Hervorhebung der Gesangsstimme und perkussiver Elemente (Schlagzeug und Noteneinsätze) zu einer signifikant verbesserten Musikwahrnehmung führt. Außerdem konnten wir zeigen, dass eine Unterdrückung nicht transienter Anteile des Schlagzeugs (z. B. Becken) auditorische Verzerrungen weiter reduziert. Diese Ergebnisse liegen derzeit dem Journal of the Acoustical Society of America zur Begutachtung vor.

In Modul 2 ("Integration von A-priori-Wissen in Algorithmen der Dimensionsreduktion") haben wir zunächst ein Verfahren für die unüberwachte adaptive Segmentierung von Musiksignalen entwickelt und konnten damit Verbesserungen nachweisen (Krymova et al. 2017). Weiterhin haben wir das in Modul 1 vorgeschlagene und auf die Verfügbarkeit von Mehrspuraufnahmen eingeschränkte Quellenmischmodell mit für die Quellentrennung ausgelegten tiefen neuronalen Netzen (Hennequin et al. 2020; Drossos et al. 2018) approximiert. Das so trainierte neuronale Netz kann auf vorliegende, bereits abgemischte Musikstücke angewendet werden und einen vom CI-Nutzer präferierten Remix erzeugen. Ein wesentlicher Schritt zur Erweiterung der Verfahren auf neue Genres (Modul 6) ist die getrennte Verarbeitung von rhythmischen und harmonisch/melodischen Signalanteilen mit Hilfe von HPSS (siehe Modul 1). Die zuvor

entwickelte Dimensionsreduktion wird dann nur auf die harmonischen Anteile angewandt (Lentz et al. 2020).

In Modul 3 ("Sinus-Modellierung von Musiksignalen und adaptive Parameterschätzung") haben wir das Musiksignal im Zeitbereich durch die lineare Transformation einer Feature-Matrix modelliert. Diese besteht aus G Gruppen von Sinus- und Cosinusfunktionen der Frequenzen f für die ersten Oberschwingungen der G Grundfrequenzen. Dabei haben wir die *sparse group lasso* Methode (Simon et al. 2013) verwendet, die *sparsity* unter den Gruppen bewirkt. Die Koeffizienten der linearen Transformation wurden durch *trace lasso* (Grave et al. 2011) mit dem Penalisierungskoeffizienten λ bestimmt. Ein Ergebnis ist in Abb. 1 dargestellt.

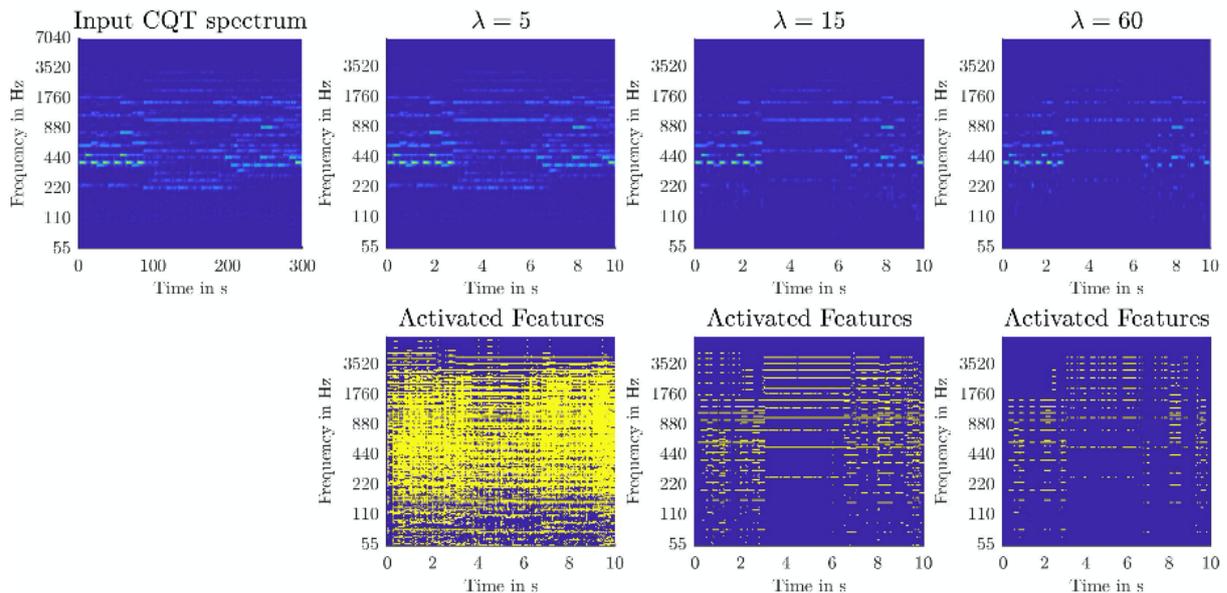


Abb. 1: Die aktivierten Merkmale (Sinus und Cosinusfunktionen) wurden durch *sparse group lasso* Methode mit drei verschiedenen Penalisierungskoeffizienten λ identifiziert. Damit lässt sich auch schon im Zeitbereich eine Reduktion auf wenige harmonische Komponenten erzielen.

In Modul 4 ("Integration von A-priori-Wissen über die Signalanalyse im CI") untersuchen wir die Erkennbarkeit von Musikgenres durch eine DNN-basierte Merkmalsberechnung und Klassifizierung unter Berücksichtigung der Signalverarbeitung und -codierung im CI und in Kombination mit den entwickelten Verfahren für die Musikvereinfachung. Als Signalrepräsentationen werden Spektrogramme von vorcodierten Signalen und die für die Anregung des Hörnervs maßgeblichen Elektrodogramme eingesetzt. Ergebnisse zeigen, dass die Erkennbarkeit der Musikgenres deutlich durch den Einsatz einer Geräuschreduktion und einer automatischen Verstärkungsregelung (AGC) beeinflusst wird.

Gegenstand von Modul 5 ("Optimierung und effiziente Implementation der Dimensionsreduktion") war die Entwicklung und Evaluierung eines online-Verfahrens mit geringem Rechen- und Speicheraufwand. Bisher erfolgte die Identifikation der dominanten spektralen Komponenten durch eine blockbasierte Hauptkomponentenanalyse (PCA). Belomestny und Krymova (2018) überarbeiteten den bekannten Algorithmus für die eingeschränkte (orthogonale) Projektionsapproximation zur Unterraumverfolgung (Yang 1995; Valizadeh und Karimi 2007) und leiten erstmals nicht-asymptotische Fehlergrenzen ab. Dabei ist auch eine neue Methode (SCPAST) entstanden, die die etablierten Projektionsapproximations-Unterraumverfolgungsmethoden um eine zusätzliche Sparsity-Beschränkung erweitert. Die SCPAST-Methode wurde in die spektrale Dimensionsreduktion von Musiksignalen integriert und evaluiert (Gauer et al. 2019b). Abb. 2 zeigt ein Blockdiagramm und das Ergebnis eines Hörversuchs.

Das in den Phasen 1 und 2 entwickelte Musikvereinfachungsverfahren (Nagathil et al. 2016) wurde nun auch erfolgreich mit CI-Nutzern (Nagathil et al. 2017; Gauer et al. 2019a) evaluiert

und im Hinblick auf eine binaurale Verarbeitung erweitert (Gauer et al. 2018). Es eignet sich vorwiegend für klassische Musik ohne Gesangsstimmen und perkussive Instrumente.

In Modul 6 ("Erweiterung auf neue Genres und reale Musikaufnahmen") wurde die bisher verwendete Musikdatenbank mit klassischer Kammermusik auf weitere Genres erweitert. Im Vordergrund stand hierbei die Einbeziehung von Gesang und Schlagzeug, unter Nutzung neuer Musikdatenbanken mit Mehrspuraufnahmen, z.B. DSD100 (Liutkus et al. 2016) und MUSDB18 (Rafii et al. 2017).

In Modul 7 ("Echtzeit-Implementierung") wurden die PCA- und SPCAST-basierten Verfahren in MATLAB/SIMULINK mit der SPEEDGOAT-Echtzeitsignalverarbeitungsmaschine implementiert und stehen für Demonstrationen weiterhin bereit. Das PCA-Verfahren wurde in eine interaktive Applikation integriert, so dass Probanden eines Hörversuchs die Zahl der Eigenkomponenten in Echtzeit mit einem Drehknopf verändern können. So konnte eine größere Vielfalt an Komponenteneinstellungen getestet werden. In Gauer et al. (2018) und Gauer et al. (2019a) wird gezeigt, dass auch in dieser experimentellen Anordnung die Probanden eine Rekonstruktion mit wenigen (3-5) Eigenvektoren bevorzugen.

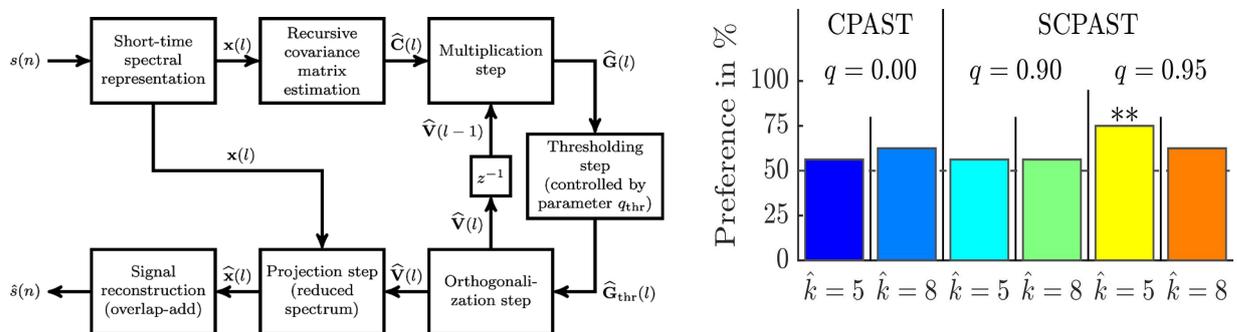


Abb. 2: Blockdiagramm (links) des SCPAST Algorithmus zur effizienten Unterraumverfolgung und Ergebnis eines Hörversuchs (rechts). k bezeichnet die Anzahl der Eigenkomponenten und q den Sparsity-Parameter. Im Hörversuch wurde die am stärksten ausgedünnte Methode bevorzugt.

Alle angekündigten Projektziele wurden im Wesentlichen erreicht. Allerdings hat die an der Uni Duisburg-Essen beschäftigte Postdoktorandin E. Krymova das Projekt B3 zum 30.10.2019 unerwartet verlassen, und eine Wiederbesetzung hat sich wegen der Coronakrise sehr schwierig gestaltet. Wegen dieser Unterbesetzung konnte etwa Modul 3 nicht wie geplant bis zum Ende der dritten Periode komplett abgeschlossen werden. Weiterhin war der an der Ruhr-Universität Bochum beschäftigte Doktorand J. Gauer vom 2.8.2020 bis zum 1.10.2020 und vom 2.9.2021 bis zum 1.12.2021 in Elternzeit. Auch konnte in Modul 6 ("Erweiterung auf neue Genres und reale Musikaufnahmen") die Aufnahme neuer realer Musikaufnahmen pandemiebedingt nicht wie geplant durchgeführt werden, stattdessen sind wir auf die oben genannten Datenbanken ausgewichen.

Innerhalb des SFBs hat das Projekt B3 sehr von Kooperationen mit den Projekten C3 und C5 profitiert. Dabei haben wir die Verbindung von Methoden der Strukturbruchanalyse im Spektralbereich mit iterativen PCA Techniken aus der Signalverarbeitung erfolgreich umgesetzt. In einer externen Kooperation mit der HNO-Uni-Klinik in Bochum (K. Neumann, Ch. Völter, S. Dazert) haben wir in zahlreichen Hörversuchen die im Projekt entwickelten Musikverarbeitungsverfahren mit CI-Nutzern evaluiert und weiter optimiert. Daraus sind u.a. drei begutachtete Zeitschriftenartikel (Nagathil et al. 2017; Nagathil et al. 2018; Gauer et al. 2019a) entstanden. Diese Ergebnisse wurden zudem auf mehreren audiologischen Tagungen in der Form von Abstracts und Postern erfolgreich vorgestellt. Mit W. Nogueira (Medizinische Hochschule Hannover) haben wir außerdem einen gemeinsamen Übersichtsartikel zum Thema Musikvereinfachung für CI im angesehenen IEEE Signal Processing Magazine (Nogueira et al. 2019)

veröffentlicht. Weiterhin haben wir eine externe Kooperation mit I.C. Bruce (McMaster University, Kanada) begonnen, aus der bereits ein begutachteter Konferenzbeitrag (Nagathil et al. 2021) hervorgegangen ist. Wir konnten somit die Erkenntnisse zur Vorverarbeitung von Musiksignalen für CI-Hörer deutlich verstärken und haben nun Verfahren zur Verfügung, die sich hinsichtlich des Rechen- und Speicheraufwands für die Anwendung im CI eignen.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.7.2.2):

- Buyens, W., van Dijk, B., Wouters, J., Moonen, M. (2015): A stereo music preprocessing scheme for cochlear implant users, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 62(10), 2434-2442.
doi:10.1109/tbme.2015.2428999
- Buyens, W., van Dijk, B., Moonen, M., Wouters, J. (2018): Evaluation of a stereo music preprocessing scheme for cochlear implant users, *Journal of the American Academy of Audiology* 29, 35-43.
doi:10.3766/jaaa.16103
- Drossos, K., Magron, P., Mimilakis, S.I., Virtanen, T. (2018): Harmonic-percussive source separation with deep neural networks and phase recovery, In *16th International Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC)*, 421-425.
doi:10.1109/iwaenc.2018.8521371
- Grave, E., Obozinski, G., Bach, F. (2011): Trace lasso: a trace norm regularization for correlated designs, *Advances in Neural Information Processing Systems* 24, 2187-2195.
- Hennequin, R., Khlif, A., Voituret, F., Moussallam, M. (2020): Spleeter: A fast and efficient music source separation tool with pre-trained models, *The Journal of Open Source Software* 5(50), 2154.
doi:10.21105/joss.02154
- Liutkus, A., Stöter, F.-R., Rafii, Z., Kitamura, D., Rivet, B., Ito, N., Ono, N., Fontecave, J. (2016): The 2016 signal separation evaluation campaign, *International Conference on Latent Variable Analysis and Signal Separation*, 323-332.
doi:10.1007/978-3-319-53547-0_31
- Nagathil, A., Weihs, C., Martin, R. (2016): Spectral complexity reduction of music signals for mitigating effects of cochlear hearing loss, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 24(3), 445-458.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7364204>
- Rafii, Z., Liutkus, A., Stöter, F.-R., Mimilakis, S.I., Bittner, R. (2017): The MUSDB18 corpus for music separation.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1117372>
- Simon, N., Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R. (2013): A sparse-group lasso, *Journal of computational and graphical statistics* 22(2), 231-245.
- Valizadeh, A., Karimi, M (2007): Subspace tracking based on the constrained projection approximation approach, 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007).
- Yang, B. (1995): Projection approximation subspace tracking, *IEEE Transactions on Signal Processing* 43(1), 95-107.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/365290>

2.7.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Krymova, E., Nagathil, A., Belomestny, D., Martin, R. (2017): Segmentation of music signals based on explained variance ratio for applications in spectral complexity reduction, in: *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, New Orleans, USA, March 2017.
- Nagathil, A., Weihs, C., Neumann, K., Martin, R. (2017): Spectral complexity reduction of music signals based on frequency-domain reduced-rank approximations: an evaluation with cochlear implant listeners, *Journal of the Acoustical Society of America* 142(3), 1219-1228.
- Gauer, J., Nagathil, A., Martin, R. (2018): Binaural spectral complexity reduction of music signals for cochlear implant listeners", in: *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Calgary, Kanada, April 2018.
- Nagathil, A., Schlattmann, J.-W., Neumann, K., Martin, R. (2018): Music complexity prediction for cochlear implant listeners based on a feature-based linear regression model, *Journal of the Acoustical Society of America* 144(1), 1-10.

Nogueira, W., Nagathil, A., Martin, R. (2019): Making Music More Accessible for Cochlear Implant Listeners: Recent Developments, *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(1), 115-127.

Gauer, J., Nagathil, A., Martin, R., Thomas, J.P., Völter C. (2019a): Interactive evaluation of a music preprocessing scheme for cochlear implants based on spectral complexity reduction, *Frontiers in Neuroscience* 13, 2019.

<https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01206>

Gauer, J., Krymova, E., Belomestny, D., Martin, R. (2019b): Spectral complexity reduction of music signals for cochlear implant users based on subspace tracking, in: *Proceedings 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*.

Lentz, B., Nagathil, A., Gauer, J., Martin, R. (2020): Harmonic/percussive sound separation and spectral complexity reduction of music signals for cochlear implant listeners, in: *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Barcelona, Spanien, 8713-8717.

Nagathil, A., Göbel, F., Nelus, A., Bruce, I.C. (2021): Computationally efficient DNN-based approximation of an auditory model for applications in speech processing, in: *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Toronto, Kanada, 301-305.

b) Andere Veröffentlichungen

Belomestny, D., Krymova, E. (2018): Sparse constrained projection approximation subspace tracking.

<https://arxiv.org/abs/1810.09298>

c) Patente

Entfällt

2.7.3 Ausstattung des Teilprojekts B3

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. R. Martin, Prof. Dr.-Ing., Univ.-Prof.	Informations- technik	Fak. ET&IT (Bo)	5		Grund- ausstattung
	2. D. Belomestny, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Du-E)	5		Grund- ausstattung
	3. A. Nagathil, Dr.-Ing., wiss. Ang.	Informations- technik	Fak. ET&IT (Bo)	12		Grund- ausstattung
	4. B. Lentz, M.Sc., wiss. Ang.	Informations- technik	Fak. ET&IT (Bo)	2		Grund- ausstattung
Nichtwissen- schaftliches Personal	5. J. Ringeis, Dipl.-Geogr. nichtwiss. Ang.		Fak. ET&IT (Bo)	1		Grund- ausstattung
	6. N. Obszanski, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Du-E)	1		Grund- ausstattung
	7. M. Markgraf, B.Eng., Techn. Ang.		Fak. ET&IT (Bo)	2		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	8. E. Krymova, Dr., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Mathematik (Du-E)		PostDoc	
	9. J. Gauer, Dipl.-Ing., wiss. Ang.	Elektro- und Informations- technik	Fak. ET&IT (Bo)		Doktorand	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr.-Ing. Rainer Martin:*

Leitete das Teilprojekt und trug Forschungsergebnisse zur Musiksiganalyse, Dimensionsreduktion und Quellentrennung unter Berücksichtigung der musikalischen Strukturen (z. B. Harmonizität und Rhythmus) bei.

2. *Prof. Dr. Denis Belomestny:*

Leitete das Teilprojekt und trug Forschungsergebnisse zur Dimensionsreduktion und Strukturbruchtestanalyse von Musikdaten bei. Entwickelte effiziente numerische Algorithmen für die Lösung der neuen Optimierungsaufgaben und untersuchte mathematisch die Eigenschaften dieser Algorithmen.

3. *Dr.-Ing. Anil Nagathil:*

Lieferte Forschungsbeiträge zu verbesserten Modellen und Algorithmen für die Dimensionsreduktion, sowie bei der Durchführung und Auswertung von Hörversuchen.

4. *Benjamin Lentz, M.Sc.:*

Implementierte und evaluierte Verfahren für die Quellentrennung.

5. *Julia Ringeis:*

Zuständig für Mittelanforderungen und -überwachung und Terminkoordination.

6. *Nicole Obszanski:*

Zuständig für Terminkoordination, Buchhaltung und Textverarbeitung.

7. *Marius Markgraf:*

Unterstützte bei Beschaffungen, experimentellen Aufbauten und Versuchsdurchführung.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

8. *Dr. Ekaterina Krymova:*

Bearbeitete mit D. Belomestny die Module 2, 3 und 5 und unterstützte die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den anderen Modulen und brachte Ihre Expertise zu statistischen Verfahren im Frequenzbereich, insbesondere zur adaptiven Schätzung der Signale in den Modulen 2 und 5 ein.

9. *Dipl.-Ing. Johannes Gauer:*

Bearbeitete mit R. Martin und A. Nagathil die Module 1, 4, 6 und 7 mit Schwerpunkt in der Identifikation musikalisch wichtiger Elemente in Musiksignalen und der Entwicklung und Implementation geeigneter Verfahren für die Signalvereinfachung. Promotion für Frühjahr 2022 geplant.

2.8.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B4

2.8.1.2 Titel

Statistische Prozessmodellierung bei der Bearbeitung inhomogener mineralischer Untergründe

2.8.1.2 Projektleitung

Müller, Christine H., Prof. Dr., *10. September 1959, deutsch

TU Dortmund, Fakultät Statistik, Lehrstuhl für Statistik mit Anwendungen im Bereich der Ingenieurwissenschaften, D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-4238

E-Mail: cmueller@statistik.tu-dortmund.de

Biermann, Dirk, Prof. Dr., *9. Juli 1963, deutsch

TU Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Institut für Spanende Fertigung
D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-2782

E-Mail: dirk.biermann@tu-dortmund.de

Tillmann, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing., *10. November 1961, deutsch

TU Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-2581

E-Mail: wolfgang.tillmann@udo.edu

2.8.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.8.2.1 Bericht

Das Projekt untersucht die abbauphysikalischen Wechselwirkungen bei der Bearbeitung des inhomogenen mehrphasigen mineralischen Materials Beton. Die Bearbeitung erfolgt durch diamantimprägnierte metallisch gebundene Werkzeuge. Die zufälligen Verteilungen der harten Gesteinskörnungen im Beton einerseits und der Diamantkörner in den Bohrkronensegmenten andererseits sorgen dabei für äußerst heterogene Eingriffsbedingungen. In der dritten Förderphase haben wir unsere Modelle von Einkornritz- und Segmentexperimenten auf vollständige Bohrkronen mit sowohl zufälligen wie mustergesteuerten Anordnungen der Diamanten erweitert.

Modul 1 ("Mehrkornritzversuche mit deterministisch angeordneten Diamanten") analysiert den Effekt von deterministisch angeordneten Diamanten auf den Verschleiß des Werkzeuges und auf den Kraftaufwand. Die Schneidleistung und Performance von Diamantwerkzeugen wird durch die Anzahl der einzelnen Diamantkörner bestimmt, die entweder direkt auf eine Schleifscheibe gelötet oder mit Metallpulvern gemischt und gesintert werden. Die Lebensdauer der Werkzeuge hängt demnach von der Menge des Matrixmaterials ab, in das die einzelnen Diamanten eingebettet sind. Tillmann, Biermann, Müller, Alkas Yonan, Pinho Ferreira, Wojarski, Kansteiner, Nellesen (2018) stellen dazu fest, dass das Fortschreiten des Verschleißes vor allem an der Stelle einer ursprünglichen Beschädigung sichtbar war und dann zu einer großflächigeren Rissbildung am Diamanten führt. Zusätzlich zeigen Kansteiner und Biermann (2019), dass der Materialabtrag von der Ausrichtung des Diamanten abhängt, siehe auch Kansteiner (2019). In Tillmann, Biermann, Müller, Alkas Yonan, Pinho Ferreira, Wojarski, Kansteiner, Becke (2019) haben wir dann Werkzeuge mit zwei Diamantkörnern mit unterschiedlichen Abständen zueinander hergestellt, um verschiedene Abstandsverhältnisse zu simulieren. Dazu wurden die Werkzeuge unter stetiger Erhöhung der Normalkraft linear über inhomogene Betonsubstrate bewegt und die Prozesskräfte und der Verschleiß der Diamanten in Relation gesetzt mit dem Ergebnis, dass bei erheblichem Diamantverschleiß (großflächige Absplitterung) eine signifikante Kraftreduktion in der Zeitreihendarstellung zu erkennen ist.

Um das Verschleißverhalten von mehr als zwei (konkret: vier) deterministisch gesetzten Diamantsegmenten zu beurteilen, wurde anstelle eines Linear-Versuchsstandes eine Drehkinematik mit kraftgeregeltem Versuchsstand eingesetzt. Verwendung fanden Modellsegmente mit in Form eines Parallelogramms angeordneten Diamanten auf der Segmentoberfläche (siehe Abb. 1). Tillmann, Biermann, Müller, Ferreira, Kansteiner und Dreier (2020) analysieren mittels Computertomographie die Mikrorisse in den Diamanten während des Bearbeitungsprozesses und dokumentieren sowohl das Potenzial als auch die Grenzen dieser Technologie.

In weiteren Versuchsreihen haben wir schließlich den Einfluss der Abstände A und B (siehe Abb. 1) auf den Materialabtrag und die Zeit (Wegstrecke) untersucht, bis wann die vier Diamanten ausfielen. Da in vielen Fällen die Versuchsreihe vor dem Ausfall aller vier Diamanten beendet werden musste, lagen zensierte Beobachtungen vor, so dass die statistische Analyse der Ausfallzeiten in Dreier, Ferreira, Malcherczyk, Biermann, Müller, Tillmann (2021+) über ein Cox-Modell mit den Einflussfaktoren A und B sowie der von den Diamanten aufgespannten Fläche $A \cdot B$ erfolgte. Dabei zeigte nur der senkrechte Abstand B einen signifikanten Einfluss auf den dritten Diamantausfall.

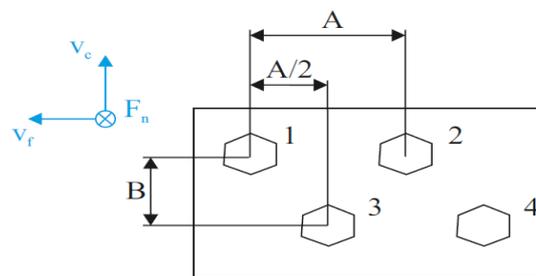


Abb. 1: Anordnung der vier gesetzten Diamanten (aus Dreier/ Ferreira/ Malcherczyk/ Biermann/ Müller/ Tillmann 2021+)

In Modul 2 ("Weggeregelte Segmentversuche") haben wir verschiedene Versuchsreihen in Form von Einzelsegmentversuchen beim Bohren in einen Betonkörper unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Diese ergaben sich durch zwei Betonarten des Werkstückes und zwei verschiedene Größen der verwendeten Diamanten am Bohrwerkzeug. Die Diamanten waren hier zufällig in der Metallmatrix angeordnet. Aufgrund des Abtragens der Bindung des Diamantsegmentes wurden die Diamanten sukzessive freigelegt und am Bohrprozess beteiligt. Im Laufe des Bohrprozesses brachen Diamanten heraus und neue Diamanten kamen zum Vorschein. Nach jeder Minute unterbrachen wir den Bohrprozess und nahmen ein Foto von der Segmentoberfläche auf. Anhand der Fotos ermittelten wir, welche Diamanten herausgebrochen waren und welche Diamanten neu aufgetaucht waren. Alle fünf Minuten erfassten wir außerdem mit einem Abdruck, welche Diamanten aus der Matrix überstehen und damit aktiv sind. Zusätzlich wurden die Prozesskräfte in allen drei Raumrichtungen während des Bohrens aufgezeichnet, siehe Abb. 2 und Kansteiner, Biermann, Dagge, Müller, Ferreira, Tillmann (2018).

Da viele Diamantausbrüche vor allem bei den kleineren Diamanten auftraten, fand eine zusätzliche Wiederholung der Versuche mit kleiner Diamantkorngröße, aber mit einer doppelten Konzentration der Diamanten und einer verdoppelten Bohrgeschwindigkeit statt, siehe Malevich, Müller, Dreier, Kansteiner, Biermann, Ferreira, Tillmann (2021+).

Die in Modul 3 ("Kraftgeregelte Segmentversuche") geplanten Experimente fielen aus, da die Versuchsplanung im Modul 6 ergeben hatte, dass im Modul 2 mehr Versuche als ursprünglich geplant notwendig waren. Darüber hinaus haben wir in Modul 1 bereits kraftgeregelte Segmentversuche mit deterministischer Diamantkornanordnung durchgeführt.

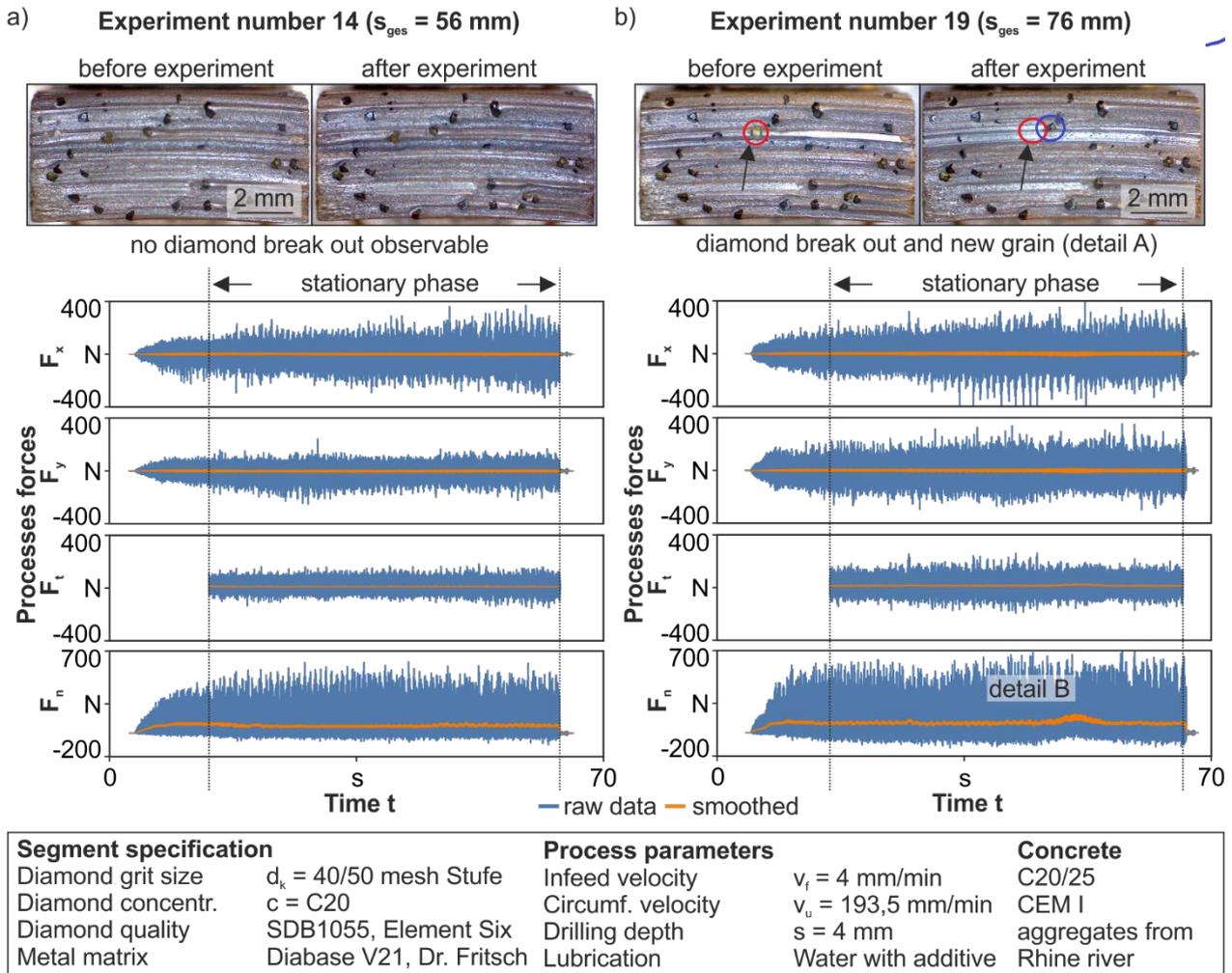


Abb. 2: a) Kraftmitschriebe einer Minute ohne Diamantausbruch mit Fotos vor und nach der Minute, b) Kraftmitschriebe einer Minute mit Diamantausbruch mit Fotos vor und nach der Minute, anhand dessen ein Diamantausbruch (roter Kreis) und ein neu aufgetauchter Diamant (blauer Kreis) identifiziert wurde (aus Kansteiner/Biermann/Dagge/Müller/Ferreira/Tillmann 2018)

Modul 4 ("Verbesserte Strukturbruchanalyse") diente dazu, anhand der Kraftmitschriebe die Diamantausbrüche zu identifizieren und so die manuelle und stark individuelle Identifikation anhand der Fotos in Modul 2 zu ersetzen. Auch sollten damit die Diamantausbrüche innerhalb der Minuten genauer lokalisiert werden. Erste vielversprechende Ergebnisse in Kansteiner, Biermann, Dagge, Müller, Ferreira, Tillmann (2018) ließen sich allerdings mit anderen Werkstücken und größeren Diamanten nicht reproduzieren. Daher erzeugten wir in Müller, Dohme, Malcherczyk, Biermann und Tillmann (2021+) 147 Variablen aus den Kraftzeitreihen und führten eine Variablen-Selektion mit anschließender Klassifikation von 73 bzw. 75 Minuten mit dem Ergebnis durch, dass diese Werkstücke einen starken Effekt auf zahlreiche Variablen hatten, so dass damit alles überlagert wurde. Dieser Effekt lässt sich vermutlich nur mit einer deutlich größeren Anzahl an Versuchen eliminieren.

Modul 5 ("Statistische Verschleißanalyse mittels intervallzensierten Beobachtungen in Punktprozessen") hat die in Modul 2 manuell erfassten Zeiten der Diamantausbrüche statistisch analysiert. Kansteiner, Biermann, Malevich, Horn, Müller, Ferreira, Tillmann (2018) liefern eine erste Analyse basierend auf den intervallzensierten Beobachtungen der von Beginn sichtbaren Diamanten, und Malevich, Müller, Kansteiner, Biermann, Ferreira und Tillmann (2019) entwickeln neue statistische Methoden für die doppelt intervallzensierten Lebenszeiten von allen im Laufe des Prozesses sichtbaren Diamanten. Malevich, Müller, Dreier, Kansteiner, Biermann, Ferreira und Tillmann (2021+) erweitern diesen Ansatz noch dahin, dass der Prozess des Auftauchens von Diamanten mit modelliert

wird. Bei allen drei Ansätzen ergaben sich sehr ähnliche Unterschiede zwischen den Werkstücken und den Diamantgrößen. Die letzte Arbeit zeigt außerdem, dass eine dreidimensionale Erfassung von aktiven Diamanten im Abstand von fünf Minuten im Wesentlichen die gleichen Ergebnisse liefert wie die jede Minute stattfindende Erfassung der sichtbaren Diamanten über Fotos.

Das Ziel von Modul 6 ("Versuchsplanung für zensierte Beobachtungen") waren optimale Versuchspläne für die intervallzensierten Beobachtungen in Modul 2. Malevich und Müller (2019) zeigen, dass die Effizienz solcher Versuchspläne weniger von der Intervalllänge zwischen Messungen als von der Gesamtzeit des Experimentes abhängt. Allerdings hängt die optimale Intervalllänge vom unbekanntem Parameter ab, so dass nur lokal optimale Versuchspläne oder maximin optimale Versuchspläne mit gegebenem Parameterintervall möglich sind. Mittels der Parameterschätzungen, die wir aus den ersten 25 Minuten erhalten hatten, war damit klar, dass deutlich länger beobachtet werden muss. Deshalb ließen wir schließlich in Modul 2 die Versuchsreihen bis zu 75 Minuten laufen.

Für die in Modul 7 ("Übertragung der entwickelten Methoden auf Bohrkronenversuche") geplanten Bohrkronenversuche haben wir 12 Bohrkronen mit vier Geometrien hergestellt und einen Versuchsplan erstellt, der die vier Geometrien mittels zufällig erzeugter Lateinischer Quadrate auf die jeweils 4x4 Positionen von 11 Betonproben anordnet. Coronabedingt hat sich aber die Durchführung der Experimente verzögert, so dass die Auswertung und die Publikation der Ergebnisse noch ausstehen.

Mit den wenigen oben angeführten Ausnahmen wurden im Wesentlichen aber alle Projektziele erreicht. Neben Corona hat auch die Fluktuation der Mitarbeiter zuweilen eine vollständige Zielerreichung verhindert. So wurde das Wechselspiel zwischen den ausgebrochenen Diamanten und den neu aufgetauchten Diamanten noch nicht wie angekündigt statistisch analysiert. Das möchte Nadja Malevich nach der Rückkehr aus ihrer Elternzeit auf einer Haushaltsstelle in Angriff nehmen. SFB-intern hat das Projekt stark vom Projekt B5 profitiert (Lebenszeitanalyse der Diamanten). Umgekehrt unterstützte es das Projekt B5 durch die Körperschallanalyse an Betonträgern (Dreier, Hafer, Heinrich, Leckey, Malcherczyk, Maurer, Müller 2021). Außerdem stammen wesentliche Resultate in B5 über die Vorzeichen-Tiefe von dem B4-Projektmitarbeiter Dennis Malcherczyk, siehe z. B. Malcherczyk (2022). Wichtig für die Benutzung der Change-Point-Verfahren bei der Analyse der Kraftzeitreihen war außerdem die Kooperation mit C3, bezüglich Strukturbruchverfahren, und mit C2 zu optimalen Versuchsplänen.

Praktische Anwendung gefunden haben unsere Ergebnisse in dem Bereich der Schleifsegmente mit deterministisch angeordneten Diamanten (gesetzte Diamanten). Es handelt sich hierbei um ein in der Diamantwerkzeugindustrie sehr aktuelles Thema, zu dem noch sehr wenig wissenschaftliche Themen bzw. größtenteils empirische Ergebnisse hinsichtlich der Werkzeuglebensdauer existieren. Die ermittelten wesentlichen Einflussfaktoren bezüglich der Diamantabstände auf die Ausbruchzeitpunkte der einzelnen Diamantkörner besitzen hier dabei einen hohen praxisbezogenen Stellenwert.

Die gemeinsame Erforschung zur statistischen Prozessmodellierung bei der Bearbeitung inhomogener mineralischer Untergründe im Rahmen des SFB 823 im Teilprojekt B4 hat die Methodenkompetenz aller teilnehmenden Lehrstühle bzw. Institute gesteigert. Das Institut für Spanende Fertigung konnte durch das Teilprojekt B4 zudem seine Expertise im Bereich der Gesteins- bzw. Betonbearbeitung ausbauen. Die gewonnenen fachlichen Kompetenzen konnten für das von der DFG geförderte Forschungsvorhaben "Grundlagenuntersuchungen zum Zerspanungsverhalten eines Verbundmaterials aus Beton und CFK mit Diamantschleifwerkzeugen" eingesetzt und weiter genutzt werden.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.8.2.2):

- Dreier, J., Ferreira, M., Malcherczyk, D., Biermann, D., Müller, C.H., Tillmann, W. (2021+): The influence of different diamond spacing in diamond impregnated tools on the wear behavior and material removal, *Arbeitspapier*.
- Dreier, J., Hafer, M., Heinrich, J., Leckey, K., Malcherczyk, D., Maurer, R., Müller, C.H. (2021): Körperschallanalyse der Ermüdung von Spannbetonbauteilen, *SFB 823 Discussion Paper 29/21*.
- Kansteiner, M. (2019): Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantimprägnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton, Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan-Verlag, Essen, ISBN 978-3-8027-8918-2.
- Malcherczyk, D. (2022): K-Sign Depth: Asymptotic Distribution, Efficient Computation and Applications. Dissertation, Technische Universität Dortmund.
<http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-22644>

2.8.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Kansteiner, M., Biermann, D. (2019): Influence of the diamond grain shape and orientation on the process forces and the mechanical work in scratch tests on basalt stone, *Diamond and Related Materials* 94, 65-72.
- Kansteiner, M., Biermann, D., Dagge, M., Müller, C.H., Ferreira, M., Tillmann, W. (2018): Statistical evaluation of the wear behaviour of diamond impregnated tools used for the core drilling of concrete, *DIAMANTE Applicazioni & Tecnologia* 92, 24-32.
- Kansteiner, M., Biermann, D., Malevich, N., Horn, M., Müller, C.H., Ferreira, M., Tillmann, W. (2018): Analysis of the wear behaviour of diamond impregnated tools used for the core drilling of concrete with statistical lifetime prediction, *DIAMANTE Applicazioni & Tecnologia* 96, 17-25.
- Malevich, N., Müller, C.H., Kansteiner, M., Biermann, D., Ferreira, M., Tillmann, W. (2019): Statistical analysis of the lifetime of diamond impregnated tools for core drilling of concrete, in: Applications in Statistical Computing - From Music Data Analysis to Industrial Quality Improvement. Eds. K. Ickstadt, H. Trautmann, G. Szepannek, N. Bauer, K. Lübke, M. Vichi, Springer, 233-249.
- Malevich, N., Müller, C.H. (2019): Optimal design of inspection times for interval censoring, *Statistical Papers* 60, 99-114.
- Malevich, N., Müller, C.H., Dreier, J., Kansteiner, M., Biermann, D., Ferreira, M., Tillmann, W. (2021+). Experimental and statistical analysis of the wear of diamond impregnated tools, erscheint in: *Wear*.
DOI: 10.1016/j.wear.2020.203574
- Müller, C.H., Dohme, H., Malcherczyk, D., Biermann, D., Tillmann, W. (2021+): Detecting diamond breakouts of diamond impregnated tools for core drilling of concrete by force measurements, erscheint in: Data Science, Big Data and Artificial Intelligence in Statistics for Environmental Science, Natural Sciences and Technology. Eds. A. Steland, K.-L. Tsui, Springer.
- Tillmann, W., Biermann, D., Müller, C.H., Alkas Yonan, S., Pinho Ferreira, M., Wojarski, W., Kansteiner, M., Becke, M. (2019): Influence of the distance between single diamonds on the scratching behavior on concrete, *DIAMANTE Applicazioni & Tecnologia* 96, 26-34.
- Tillmann, W., Biermann, D., Müller, C.H., Alkas Yonan, S., Pinho Ferreira, M., Wojarski, W., Kansteiner, M., Nellesen, J. (2018): Analysis of the wear and micro-crack behaviour of single diamonds during machining of concrete, *DIAMANTE Applicazioni & Tecnologia* 92, 17-22.
- Tillmann, W., Biermann, D., Müller, C.H., Ferreira, M., Kansteiner, M., Dreier, J. (2020): Investigations of microcracks on arranged diamonds with x-ray microscopy, *DIAMANTE Applicazioni & Tecnologia* 102, 32-39.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.8.3 Ausstattung des Teilprojekts B4

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungsquelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	1. Ch.H. Müller, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	5		Grundausstattung
	2. D. Biermann, Prof. Dr.-Ing., Univ.-Prof.	Produktionstechnik	Fak. Maschinenbau (Do)	5		Grundausstattung
	3. W. Tillmann, Prof. Dr.-Ing., Univ.-Prof.	Werkstofftechnik	Fak. Maschinenbau (Do)	5		Grundausstattung
	4. M. Horn, geb. Dagge, M.Sc. wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	4		Grundausstattung
	5. H. Dohme, M.Sc., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	4		Grundausstattung
	6. I. Baumann, Dr.-Ing wiss. Ang.	Werkstofftechnik	Fak. Maschinenbau (Do)	4		Grundausstattung
Nichtwissenschaftliches Personal	7. M. Kater, techn. Ang.		Fak. Maschinenbau (Do)	5		Grundausstattung
	8. H. Große-Oetringhaus, Verw. Ang.		Fak. Statistik (Do)	2		Grundausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	9. N. Malevich, Dr., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)		PostDoc	
	10. D. Malcherczyk, M.Sc., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)		Doktorand	
	11. M. Kansteiner, Dipl.-Ing., wiss. Ang.	Produktionstechnik	Fak. Maschinenbau (Do)		Doktorand	
	12. J. Dreier, M.Sc, wiss. Ang.	Produktionstechnik	Fak. Maschinenbau (Do)		Doktorandin	
	13. M. Ferreira, Dipl.-Ing., wiss. Ang.	Werkstofftechnik	Fak. Maschinenbau (Do)		Doktorand	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Christine H. Müller:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 und 4 bis 7.

2. *Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 bis 3 und 7.

3. *Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Tillmann:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 bis 3 und 7.

4. *Melanie Horn, geb. Dagge, M.Sc.:*

Arbeitete gemeinsam mit C. Müller an der Identifikation von Diamantausbrüchen im Modul 4.

5. *Hendrik Dohme, M.Sc.:*

Arbeitete gemeinsam mit C. Müller an der Identifikation von Diamantausbrüchen im Modul 4.

6. *Dr.-Ing. Ingor Baumann:*

Unterstützte aufgrund seiner Methodenkenntnisse die Module 1 bis 3 und 7.

7. *Michael Kater:*

War zuständig für Aufbau und Inbetriebnahme der Messtechnik, für die Datenerhebung und die Filterung der Messdaten in den Modulen 1 bis 3 und 7.

8. *Heike Große-Oetringhaus:*

War für logistische und administrative Unterstützung der Arbeitsgruppe Ch.H. Müller zuständig.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

9. *Dr. Nadja Malevich:*

Arbeitete mit Ch.H. Müller an Methoden und Versuchsplanung von intervallzensierten Beobachtungen in den Modulen 5 und 6.

10. *Dennis Malcherczyk, M.Sc.:*

Arbeitete mit Ch.H. Müller an der statistischen Auswertung in den Modulen 1 und 7.

11. *Dipl.-Ing. Michael Kansteiner:*

War verantwortlich für die Planung, Koordination und Durchführung der Zerspanungsversuche in den Modulen 1 bis 3 und promovierte auf diesem Gebiet.

12. *Julia Dreier, M.Sc.:*

Führte die Arbeiten von Michael Kansteiner fort.

13. *Dipl.-Ing. Manuel Ferreira:*

War zuständig für die Auswahl und Zusammenstellung von Werkzeugmaterialien in den Modulen 1 bis 3 und 7 und wird dazu promovieren.

2.9.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B5

2.9.1.1 Titel

Statistische Methoden für Schädigungsprozesse unter zyklischer Beanspruchung

2.9.1.2 Projektleitung

Müller, Christine H., Prof. Dr., *10. September 1959, deutsch

TU Dortmund, Fakultät Statistik, Lehrstuhl für Statistik mit Anwendungen im Bereich der Ingenieurwissenschaften, D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-4238

E-Mail: cmueller@statistik.tu-dortmund.de

Ickstadt, Katja, Prof. Dr., *18. Januar 1965, deutsch

TU Dortmund, Fakultät Statistik, Lehrstuhl für Mathematische Statistik und biometrische Anwendungen, D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-3111

E-Mail: ickstadt@statistik.tu-dortmund.de

Maurer, Reinhard, Prof. Dr.-Ing., *17. März 1956, deutsch

TU Dortmund, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen, Lehrstuhl Betonbau, D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-2094

E-Mail: reinhard.maurer@tu-dortmund.de

2.9.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.9.2.1 Bericht

Das Ziel des Projektes waren Prognosen für kritische Zustände von Spannbetonbauteilen infolge von Materialermüdung unter zyklischer Beanspruchung. Dazu waren neue statistische Methoden für Schädigungsprozesse zu entwickeln, die ermüdungsbedingtes Versagen selbst bei niedrigen zyklischen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma$ mit extrem hohen Lastwechselzahlen bis 10^8 vorherzusagen erlauben.

Modul 1 ("Realitätsnähere Ermüdungsversuche am Spannbeton") führte dabei die in Heinrich (2017) und Heeke, Heinrich und Maurer (2019) dokumentieren Versuche (Versuchsreihe TR und SB) durch die Inklusion weiterer Einflüsse fort, die sich auf die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils auswirken können (Heinrich und Maurer 2021+). Aus den Ergebnissen der Versuchsreihen GS (Großes Spannglied), GR (Großer Radius) und GL (Große Litze) konnte ein negativer Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden, so dass das Bauteilversagen früher als erwartet erfolgte. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden die Größen wie Umlenkraft und Kabelfaktor in die Modellierung in Leckey, Heinrich, Müller und Maurer (2021) aufgenommen.

In einer weiteren Versuchsreihe (GB) wurde der Einfluss der gemeinsamen Anordnung einer schlaffen Betonstahlbewehrung und einer Spannstahlbewehrung untersucht. Da beide Bewehrungselemente unterschiedliche Verbundeigenschaften haben, stellten sich Spannungsumlagerungen im Bauteil ein. Hier zeigte sich, dass das Bewehrungsverhältnis von Betonstahl zu Spannstahlbewehrung die Verteilung der Spannungen stark beeinflussen kann. Bei kleinen Bewehrungsgraden können die Spannungen im Betonstahl infolge einzelner Spanndrahtbrüche stärker ansteigen als bei großen Verhältnissen, wodurch selbst Betonstahlbrüche möglich werden. Bei größeren Bewehrungsverhältnissen werden dagegen Spanndrahtbrüche durch kleinere Spannungszunahmen im Betonstahl kompensiert. Da die Betonstahlbewehrung gegenüber dem Spannstahl nachweislich über eine echte Dauerschwingfestigkeit verfügt, wirkt sich ein hoher Anteil an Betonstahlbewehrung günstig auf die Ermüdungsfestigkeit des Gesamtbauteils aus (Heinrich und Maurer 2021+).

Modul 2 ("Bauteilmonitoring an einer Brücke") hat das Ermüdungsverhalten einer realen Straßenbrücke in Bochum untersucht. Diese wies ein rechnerisches Defizit des Ermüdungswiderstands auf und wurde daher von Juni 2016 bis zum Abriss Ende 2018 durch ein Rissbreitenmonitoring überwacht (Heinrich und Maurer 2018, 2019). Das Monitoringkonzept basierte dabei auf Ermüdungsversuchen aus der zweiten Förderphase, die gezeigt haben, dass sich ein Versagen infolge Ermüdung nicht schlagartig, sondern erst nach sukzessivem Ausfall einzelner Spanndrähte einstellt. Diese Drahtbrüche ließen sich u. A. durch eine Zunahme der Rissbreite detektieren.

Bei der Rissbreitenüberwachung am realen Bauwerk traten jedoch zusätzliche Einflüsse auf, die unter Laborbedingungen wegfallen. So haben die tages- und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen einen großen Einfluss auf die Rissbreiten, siehe Abb. 1 links. Daneben verursacht der Verkehr auf der Brücke kurzzeitige Rissbreitenänderungen, wobei insbesondere schwere Fahrzeuge zu den in Abb. 1 sichtbaren Ausschlägen führen. Wenn der schwere Verkehr die Brücke überquert hat, nehmen die Rissbreiten wieder ihre Ausgangswerte an. Im Gegensatz zur Temperatur gab es aber keine zusätzlichen Messungen für den aufgetretenen Verkehr, so dass wir dessen kurzzeitigen Auswirkungen nur durch ausreißerrobuste Analysemethoden eliminieren konnten.

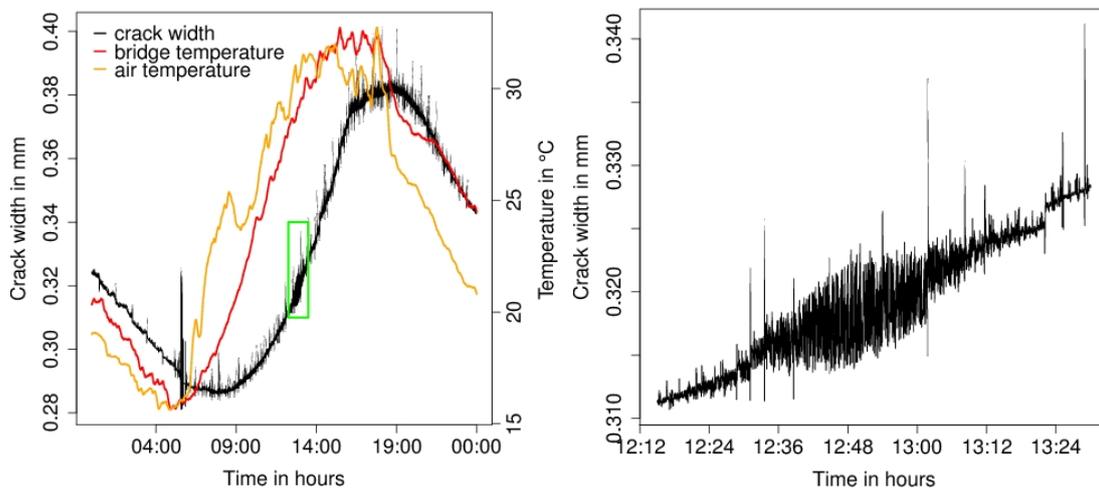


Abb. 1: Links: Rissbreite vom Wegaufnehmer WVN2 und Temperatur am 10.6.2016.

Rechts: Zoom des grünen Rechteckes von links mit messtechnischer Störung (aus Abbas et al. 2019)

Zusätzlich kam es zu messtechnischen Störungen in Form von Schwebungen, die die Auswertung erschwerten, siehe Abb. 1 rechts. Diese konnten aber mit Methoden aus Modul 5 und 7 bereinigt werden. Die anschließende Analyse der bereinigten Messwerte bis zum Abriss der Brücke ergab aber keine signifikanten Spanndrahtbrüche infolge von Ermüdung (Heinrich, Maurer, Leckey, Müller und Ickstadt 2021). So blieb das Bauwerk bis zum Abbruch nutzbar.

Modul 3 ("Weiterentwicklung der statistischen Methoden für homogene Materialien und Materialien mit gleichartigen Komponenten") führte die Arbeiten der vorhergehenden Förderphasen fort. Müller und Meinke (2018) liefern ausreißerrobuste Schätzungen für das Risswachstum in Stahlproben und Hermann, Ickstadt und Müller (2018), mittels eines Bayes-Ansatzes, Schätzer für das Risswachstum in Betonträgern. Da das Risswachstum bei den Spannbetonträgern sprunghaft ansteigt, wenn die Spanndrähte reißen, sind wir in den weiteren Arbeiten davon ausgegangen, dass das Reißen der Spanndrähte die wesentliche Quelle des abfallenden Ermüdungswiderstandes ist. Leckey (2019) sowie Leckey, Müller, Szugat und Maurer (2020) entwickeln daher klassische und ausreißerrobuste Vorhersageintervalle für Drahtbrüche in Betonträgern. Der Beitrag Leckey (2019) erhielt einen der drei Best Paper Awards der internationalen Tagung MMR2019.

Unsere ausreißerrobusten Vorhersageintervalle basieren auf der ebenfalls von uns entwickelten Vorzeichen-Tiefe. Diese ging aus der Analyse der Simplex-Tiefe in der vorherigen Förderphase (Kustos, Müller, Wendler 2016) hervor und liefert nichtparametrische Tests mit hoher Güte (Leckey, Malcherczyk, Müller 2020). Für diese Tests wird die asymptotische Verteilung der Vorzeichen-Tiefe benötigt. Während ein Beweis von Kustos, Leucht und Müller (2016) nur die asymptotische Verteilung der 3-Vorzeichen-Tiefe betrifft, stellen Malcherczyk, Leckey und Müller (2021) einen Beweis für beliebige K -Vorzeichen-Tiefen mit $K > 3$ vor. Der Beweis ermöglicht auch eine Implementierung der K -Vorzeichen-Tiefe in linearer Laufzeit im Stichprobenumfang N statt in einer Laufzeit von N^K bei einer naiven Implementation. Malcherczyk (2022) erreicht aber auch eine lineare Komplexität mittels einer Blockimplementierung. Die Vorzeichen-Tiefe setzt eine gegebene Ordnung der Daten voraus, was bei Zeitreihen natürlicherweise der Fall ist. Aber Horn und Müller (2020) zeigen anhand der multiplen Regression, dass die Vorzeichen-Tiefe auch benutzt werden kann, wenn die Daten keine natürliche Ordnung aufweisen.

Leckey, Müller, Szugat und Maurer (2020) benutzen für Ihre Prognosen nur ein Modell mit Lastumverteilung (Load-sharing model). Müller und Meyer (2021+) integrieren hier noch eine Schadensakkumulation mittels der Intensitätsfunktion von Zählprozessen und zeigen, dass dies bessere Vorhersageintervalle liefert. Intensitätsbasierte Lastumverteilungsmodelle zur Beschreibung der Schadensakkumulation aus Bayesianischer Sicht werden derzeit von Ganme und Ickstadt hinsichtlich des Prognoseverhaltens verglichen. Diese Modelle erweitern dabei den Ansatz in Hermann (2016). Weitere Einflussgrößen wie die Umlenkkraft und der Kabelfaktor werden in einer hierarchischen Modellierung berücksichtigt. Eine Publikation über diese Bayesianischen Modelle und deren Schätzung ist in Vorbereitung.

Modul 4 ("Neue statistische Methoden für Materialien mit verschiedenartigen Komponenten") war um die verschiedenen neuen Versuche aus Modul 1 zentriert, in denen zusätzlich zur Initialbelastung die Größe der Spannglieder variiert wurde und außerdem Betonstahl hinzugenommen wurde. Für die Modellierung dieser Versuche entwickeln Leckey, Heinrich, Müller und Maurer (2021+) ein erweitertes Lastumverteilungsmodell und frequentistische Modellvalidierungsverfahren basierend sowohl auf der K -Vorzeichen-Tiefe als auch auf simultanen Prognosebändern. Insbesondere die Erweiterung des Modells um einen Kabelfaktor erwies sich dabei als sinnvoll. Dagegen war ein Effekt der Umlenkkraft nicht nachweisbar.

Modul 5 ("Neue statistische Methoden für das Brückenmonitoring") hat in einem ersten Schritt die in Abb. 1 rechts dargestellten messtechnischen Störungen entfernt. Dazu entwickeln und vergleichen Abbas et al. (2019) in einer Kooperation mit Projekt C3 verschiedene Strukturbruchverfahren. Leider ist der Zusammenhang zwischen Temperatur und Rissbreite nicht immer so einfach wie in Abb. 1 links dargestellt. Insbesondere in den Wintermonaten treten deutlich verringerte temperaturbedingte Schwankungen der Rissweite auf. Erste Modellierungsansätze mit über 200 aus den Daten erzeugten Variablen wie mittlere Temperatur der letzten sieben Tage lieferten immer abhängige Residuen, wenn klassische Modellwahlverfahren genutzt wurden. Erst Horn (2021) findet mit Hilfe der Vorzeichen-Tiefe ein recht einfaches Modell und weist damit die Eignung der Vorzeichen-Tiefe insbesondere für die Modellwahl nach. Dohme, Malcherczyk, Leckey und Müller (2021) greifen das auf und entwickeln insbesondere einen Test basierend auf der Vorzeichen-Tiefe, der simultan Modellannahmen und die Unabhängigkeit von resultierenden Residuen in Zeitreihen testen kann.

Modul 6 ("Überprüfung der Prognosen") hat für die Versuche aus Modul 1 die Güte der Vorhersageintervalle in Leckey, Müller, Szugat und Maurer (2020) im einfachen Lastumverteilungsmodell und in Müller und Meyer (2021+) im Lastumverteilungsmodell mit Schadensakkumulation sowie der simultanen Prognose-Bänder in Leckey, Heinrich, Müller und Maurer (2021) für die erweiterten Lastumverteilungsmodelle ermittelt. Dabei lagen fast immer die vorhergesagten Zeitpunkte der Drahtbrüche im Prognoseintervall bzw. im Prognoseband.

Modul 7 ("Anwendung auf das Monitoring der Brücke") hatte die Prognose der Restlebensdauer sowie die Detektion von Spannstahlbrüchen der in Modul 2 aufgeführten Brücke zum Ziel. Da im

Beobachtungszeitraum keine Drahtbrüche beobachtet wurden (Heinrich, Maurer, Leckey, Müller, Ickstadt 2021), war eine Anwendung der in Modul 3 und 4 entwickelten Prognosemethoden nicht möglich. Somit kam die Prognose der Restlebensdauer der Brücke nicht zustande. Daher sprach auch nichts gegen die Weiternutzung der Brücke bis zum Abriss.

Ansonsten wurden alle Projektziele im Wesentlichen erreicht. Problematisch erscheint uns die geringe Zahl von unabhängigen Versuchsreihen im Vergleich zu den vielen Einflussfaktoren. Hier hat sich die Corona-Krise und die damit verbundene Schließung der Versuchshalle als limitierender Faktor ausgewirkt. Ein Beispiel ist die Körperschallanalyse bei je einem Träger aus den Versuchsreihen GL und GB, wo wegen der großen Datenmenge nur alle zwei Stunden zweimal in einer Stunde für zwei Sekunden Messungen aufgenommen werden konnten. Das ergab schon 24416 Beobachtungen pro Messzeitpunkt (Zwei-Sekunden-Intervall), aus denen 512 Frequenzen berechnet wurden. Insgesamt gab es 557 Messzeitpunkte, aber nur ein Bruchteil lag dicht vor einem Drahtbruch. Deshalb gelang uns keine eine gute Klassifikation der Beobachtungen in solche kurz vor dem Drahtbruch und solche, die länger vor einem Drahtbruch erfasst wurden. Auch ein Effekt der Umlenkraft war wohl wegen Datenmangel nicht nachweisbar.

Wichtig für den Projekterfolg war die Kooperation mit Projekt C3 bei der Entwicklung von Strukturbruchverfahren in Abbas et al. (2019), die wir für die Datenbereinigung im Brückenmonitoring verwendet haben. Die Körperschallanalyse war nur in Kooperation mit Projekt B4 möglich, das die Erfassung der Körperschallmessungen übernahm. Auch wenn die erhoffte Verbesserung der Prognose von Drahtbrüchen damit nicht erreicht wurde, ergab sich dadurch ein unvermuteter Zusammenhang spezieller Frequenzen mit einem Steifigkeitsindex (Dreier et al. 2021). Hilfreich war auch eine Kooperation mit B1 bezüglich Bildanalyse. Dabei gewinnen Kirchhoff, Kuhnt, Bloch und Müller (2020) relevante Informationen aus Fotos über sogenannte Splats analog zu Müller und Meinke (2018) über Risse.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.9.2.2):

- Dohme, H., Malcherzyk, D., Leckey, K., Müller, C.H. (2021): K-depth tests for testing simultaneously independence and other model assumptions in time series, *SFB 823 Discussion Paper 24/21*.
- Dreier, J., Hafer, M., Heinrich, J., Leckey, K., Malcherzyk, D., Maurer, R., Müller, C.H. (2021): Körperschallanalyse der Ermüdung von Spannbetonbauteilen, *SFB 823 Discussion Paper 29/21*.
- Heinrich, J. (2017): Ermüdungsverhalten von Spannbetonbauteilen - Untersuchungen unter sehr hohen Lastwechselzahlen, *Beiträge zur 5. DAFStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium*, 45-55.
- Heinrich, J., Maurer, R. (2019): Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken, *10. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen, Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden - Heft 48*, 83-96.
- Heinrich, J., Maurer, R. (2021+): Versuchsbericht zu den Ermüdungsversuchen, DFG-SFB 823 – Statistik nichtlinearer dynamischer Prozesse, Teilprojekt B5 – Statistical methods for damage processes under cyclic load.
- Hermann, S. (2016): Bayesian prediction for stochastic process models in reliability, Dissertation, Fakultät Statistik, TU Dortmund.
<http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-17784>
- Horn, M. (2021): Sign Depth for Parameter Tests in Multiple Regression, Dissertation, Fakultät Statistik, TU Dortmund.
<http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-22355>
- Horn, M., Müller, C.H. (2020): Tests based on sign depth for multiple regression, *SFB 823 Discussion Paper 07/20*.
- Kirchhoff, D., Kuhnt, S., Bloch, L., Müller, C.H. (2020): Detection of circlelike overlapping objects in thermal spray images, *Quality and Reliability Engineering International* 36, 2639-2659.
- Kustos, C.P., Leucht, A., Müller, C.H. (2016): Tests based on simplicial depth for AR(1) models with explosion, *Journal of Time Series Analysis* 37, 763-784.
- Kustos, C.P., Müller, C.H., Wendler, M. (2016): Simplified simplicial depth for regression and autoregressive growth processes, *Journal of Statistical Planning and Inference* 173, 125-146.
- Leckey, K., Heinrich, J., Müller, C.H., Maurer, R. (2021): Model checks and simultaneous prediction bands for failure models in prestressed concrete beams, *SFB 823 Discussion Paper 32/21*.

Leckey, K., Malcherczyk, D., Müller, C.H. (2020): Powerful generalized sign tests based on sign depth, *SFB 823 Discussion Paper 12/20*.

Malcherczyk, D. (2022): K-Sign Depth: Asymptotic Distribution, Efficient Computation and Applications. Dissertation, Technische Universität Dortmund.
<http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-22644>

Müller, C.H. (2019): Statistik und die Zuverlässigkeit von technischen Produkten, in: *Faszination Statistik. Einblicke in aktuelle Forschungsfragen und Erkenntnisse*. Eds. W. Krämer, C. Weihs, Springer, 157-163.

2.9.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

Abbas, S., Fried, R., **Heinrich, J.**, Horn, M., Jakubzik, M., Kohlenbach, J., **Maurer, R.**, Michels, A., **Müller, C.H.** (2019): Detection of anomalous sequences in crack data of a bridge monitoring, in: *Applications in Statistical Computing - From Music Data Analysis to Industrial Quality Improvement*. Eds. **K. Ickstadt**, H. Trautmann, G. Szepannek, N. Bauer, K. Lübke, M. Vichi, Springer, 251-269.

Heeke, G., **Heinrich, J.**, **Maurer, R.** (2019): Neue Erkenntnisse zur Ermüdungsfestigkeit von Spannbeton unter sehr hohen Lastwechselzahlen, *Beton- und Stahlbetonbau 114*, 242-254.

Heinrich, J., **Maurer, R.** (2018): Check of resistance to fatigue on existing prestressed concrete bridges by monitoring, *Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, 987-994.

Heinrich, J., **Maurer, R.**, **Leckey, K.**, **Müller, C.H.**, **Ickstadt, I.** (2021): Detektieren ermüdungsbedingter Spannstahlbrüche mittels Rissmonitoring im Versuch und am Bauwerk. *Bauingenieur 96*, 92-101.

Hermann, S., **Ickstadt, K.**, **Müller, C.H.** (2018): Bayesian prediction for a jump diffusion process with application to crack growth in fatigue experiments, *Reliability Engineering and System Safety 179*, 83-96.

Leckey, K. (2019): Prediction intervals for load sharing systems with acceleration, in: *Proceedings of 11th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2019) from 3-7 June, 2019*, in Hong Kong SAR, 8 pages.

One of three MMR2019 Best Paper Awards: <http://mmr2019.org/public.asp?page=awards.htm>

Leckey, K., **Müller, C.H.**, Szugat, S., **Maurer, R.** (2020): Prediction intervals for load sharing systems in accelerated life testing, *Quality and Reliability Engineering International 36*, 1895-1915.
<https://doi.org/10.1002/qre.2664>

Malcherczyk, D.A., **Leckey, K.**, **Müller, C.H.** (2021): K-sign depth: From asymptotics to efficient implementation, *Journal of Statistical Planning and Inference 215*, 344-355.

Müller, C.H., Meinke, S.H. (2018): Trimmed likelihood estimators for stochastic differential equations with an application to crack growth analysis from photos, *Archives of Data Science, Series A* (Online First), 3 (1).
<https://doi.org/10.5445/KSP/1000083488/01>

Müller, C.H., Meyer, R. (2021+): Inference of intensity based models for load-sharing systems with damage accumulation, erscheint in: *IEEE Transactions on Reliability*.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.9.3 Ausstattung des Teilprojekts B5

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2013 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungsquelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	1. Ch.H. Müller, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Frequentistische Statistik	Fak. Statistik (Do)	5		Grundausstattung
	2. K. Ickstadt, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Bayessche Statistik	Fak. Statistik (Do)	5		Grundausstattung
	3. R. Maurer, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Betonbau	Fak. Arch. / Bauing. (Do)	5		Grundausstattung
	4. M. Horn, geb. Dagge, M.Sc., wiss. Ang.	Frequentistische Statistik	Fak. Statistik (Do)	4		Grundausstattung
	5. D. Malcherczyk, M.Sc., wiss. Ang.	Frequentistische Statistik	Fak. Statistik (Do)	4		Grundausstattung
	6. H. Dohme, M.Sc., wiss. Ang.	Frequentistische Statistik	Fak. Statistik (Do)	4		Grundausstattung
	7. J. Rathjens, M.Sc., wiss. Ang.	Bayessche Statistik	Fak. Statistik (Do)	6		Grundausstattung
	8. M. Bettin, Dipl.-Ing., wiss. Ang.	Betonbau	Fak. Arch. / Bauing. (Do)	6		Grundausstattung
Nichtwissenschaftliches Personal	9. H. Große-Oetringhaus, Verw. Ang.		Fak. Statistik (Do)	3		Grundausstattung
	10. M. Vujanic, Verw. Ang.		Fak. Arch. / Bauing. (Do)	3		Grundausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissenschaftliches Personal	11. S.T. Ganme, M.Sc., wiss. Ang.	Bayessche Statistik	Fak. Statistik (Do)		Doktorand	
	12. K. Leckey, Dr., wiss. Ang.	Frequentistische Statistik	Fak. Statistik (Do)		PostDoc	
	13. J. Heinrich, Dipl.-Ing., wiss. Ang.	Betonbau	Fak. Arch. / Bauing. (Do)		Doktorand	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Christine H. Müller:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 3 – 7.

2. *Prof. Dr. Katja Ickstadt:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 3 – 7.

3. *Prof. Dr. Reinhard Maurer:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2, 4, 6, 7.

4. *Melanie Horn, geb. Dagge, M.Sc.:*

Arbeitete gemeinsam mit Ch.H. Müller an Eigenschaften der Vorzeichentiefe und unterstützte die Auswertung des Brückenmonitorings (Module 3, 5).

5. *Dennis Malcherczyk, M.Sc.:*

Arbeitete mit Ch.H. Müller an Eigenschaften der Vorzeichentiefe (Modul 3).

6. *Hendrik Dohme, M.Sc.:*

Arbeitete mit Ch.H. Müller an Eigenschaften der Vorzeichentiefe und unterstützte die Auswertung des Brückenmonitorings (Module 3, 5).

7. *Jonathan Rathjens, M.Sc.:*

Arbeitete mit K. Ickstadt an Bayesschen hierarchischen Modellen und deren Analyse mit MCMC-Verfahren und promoviert auf diesem Gebiet (Module 3, 4).

8. *Dipl.-Ing. Matthias Bettin:*

Unterstützte die experimentellen Arbeiten am Lehrstuhl Betonbau (Module 1, 2).

9. *Heike Große-Oetringhaus:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in der Fakultät Statistik.

10. *Mirjana Vujanic:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung am Lehrstuhl Betonbau.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

11. *Sophie T. Ganme, M.Sc.:*

Arbeitete gemeinsam mit K. Ickstadt an Bayesschen Methoden für Schädigungsprozesse und für das Brückenmonitoring und wird darüber promovieren.

12. *Dr. Kevin Leckey:*

Arbeitete gemeinsam mit Ch.H. Müller an frequentistischen Methoden für Schädigungsprozesse und für das Brückenmonitoring (Module 3 bis 7).

13. *Jens Heinrich, Dipl.-Ing.:*

Forschte und promovierte über Ermüdungsfestigkeit von Baustoffen und Bauteilen im Stahl- und Spannbeton, betreute die Versuche an den weiteren Versuchsträgern sowie das Brückenmonitoring und lieferte fachspezifisches Wissen bei der Modellierung und der Methodenentwicklung (Module 1, 2, 4, 6, 7).

2.10.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C1

2.10.1.1 Titel

Modellwahl und dynamische Abhängigkeitsstrukturen

2.10.1.2 Projektleitung

Dette, Holger, Prof. Dr., *4. Mai 1961, deutsch

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Mathematik, Lehrstuhl für Stochastik

D-44780 Bochum

Telefon: 0234-32-28284

E-Mail: holger.dette@rub.de

Dehling, Herold, Prof. Dr., *22. Dezember 1954, deutsch

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Mathematik,

Lehrstuhl für Wahrscheinlichkeitstheorie und ihre Anwendungen

D-44780 Bochum

Telefon: 0234-32-25678

E-Mail: herold.dehling@rub.de

2.10.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.10.2.1 Bericht

Gegenstand des Projekts waren verbesserte statistische Modelle und Verfahren der Modellwahl für die Analyse hochdimensionaler dynamischer Daten. Dabei wurden neue Methoden der Modellvalidierung für funktionale Daten unter komplexen und zeitvariablen Abhängigkeitsstrukturen vorgestellt und mit Hilfe empirischer Prozesstheorie neue Resampling-Methoden für langzeitabhängige Daten entwickelt. Weitere Schwerpunkte waren Übergänge von schwacher zu starker Abhängigkeit und von stationären zu nichtstationären Phasen und Copula-Periodogramme.

In Modul 1 ("Modellwahl und Validierung") haben wir in der letzten Förderphase neue Maße für die Modellanpassung in der funktionalen Datenanalyse untersucht. Im Gegensatz zu der häufig verwendeten Hauptkomponentenanalyse, wo die Modellannahmen (wie z.B. Stationarität) für extrahierte Hauptkomponenten überprüft werden (vgl. z.B. Horváth und Kokoska 2012), arbeiten wir direkt mit den funktionalen Daten ("fully functional approach", vgl. Aue, Rice und Sönmez 2018). Ein wesentlicher Schwerpunkt waren dabei "relevante" Hypothesen, bei denen die Nullhypothese die Form "das Maß für die Modellanpassung ist kleiner als ein vorgegebener Schwellenwert" erhält. Gemeinsam mit Teilprojekt T1 wurden in Dette, Kokot und Aue (2020) und Dette und Kokot (2021a) erstmalig Testverfahren im Zweistichprobenproblem für Mittelwertfunktionen von Zeitreihen mit Werten in Banachräumen entwickelt (zu Kovarianzoperatoren siehe Dette und Kokot 2021b). Dabei gingen auch Resultate aus Dehling (1983) ein. Eine wesentliche Herausforderung bestand in der Konstruktion konsistenter Schätzer für die Menge der Extrema der Differenz der Mittelwertfunktionen und in der Entwicklung von neuen Bootstrapverfahren für die Quantifizierung der Unsicherheiten. In Zusammenarbeit mit den Teilprojekten A1 und C3 wurden dabei auch Methoden zum Erkennen von relevanten Strukturbrüchen in stationären funktionalen Zeitreihen entwickelt.

Für Zeitreihen mit Werten in Hilberträumen schlugen Dette, Kokot und Volgushev (2020) verteilungsfreie Tests für relevante Hypothesen vor, die ohne eine Schätzung der long-run-variance auskommen. Dafür wurden die in Shao (2010, 2015) eingeführten Methoden der Selbst-Normalisierung substantiell erweitert, so dass diese auch für relevante Hypothesen einsetzbar sind. So konnten wir dann erstmalig relevante Hypothesen bzgl. der Eigenwerte und Eigenfunktionen des Kovarianzoperators der (stationären) funktionalen Zeitreihen testen (Aue, Dette und Rice 2021, Dette und Kutta 2021). In solchen Anwendungen ist eine Schätzung der long-run-variance praktisch unmöglich, da diese von dem gesamten Spektrum des Kovarianzoperators abhängt, und im Prinzip unendlich viele Eigenwerte geschätzt werden müssten.

In Zusammenarbeit mit Teilprojekt A7 entwickeln Bücher, Dette und Heinrichs (2020) neue Testverfahren, um die Frage "Stationarität oder Nichtstationarität" zu beantworten und so stationäre Phasen in funktionalen Daten zu identifizieren. Bagchi und Dette (2020) schlagen ein neues Maß für Abweichungen von der Separabilität bei funktionalen Zeit-Raum Daten vor und bestimmen die asymptotische Verteilung eines zugehörigen Schätzers. Der resultierende Test verbessert die bisherigen Verfahren von Aston, Pigoli und Tavakoli (2017) und Constantinou, Kokoszka und Reimherr (2017) substantiell.

Aufbauend auf Kley et al. (2016) und Birr et al. (2017) wurden in Modul 2 ("Neue Ansätze und Anwendungen im Frequenzbereich") Eigenschaften des Wigner-Ville Spektrums untersucht und die Eindeutigkeit der zeitabhängigen Quantils-Spektraldichten nachgewiesen. Diese Methoden waren grundlegend für neue Copula-basierte Abhängigkeitsmaße (Van Hecke, Volgushev und Dette 2018). Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen in diesem Modul war die Validierung der Stationarität einer funktionalen Zeitreihe mit Methoden im Frequenzbereich. Dafür untersuchen Bagchi, Characiejus und Dette (2018) zunächst die "white noise" Hypothese in stationären funktionalen Zeitreihen und van Delft, Characiejus und Dette (2021) erweiterten dann diese Methodik auf Tests der Hypothese eines zeitunabhängigen Spektraldichte-Operators eines funktionalen lokal stationären Prozesses. Wesentlich war hier die Entwicklung eines Maßes für Abweichungen von der Stationarität mit den in Modul 1 entwickelten Techniken. Im Gegensatz zu den bisher verfügbaren Methoden (vgl. Paparoditis 2010) können mit diesen Verfahren auch nichtlineare temporale Änderungen in den seriellen Abhängigkeiten entdeckt werden.

Außerdem wurden neue Abstandsmaße definiert, um die Ähnlichkeit der Spektralmaße von nichtstationären funktionalen Zeitreihen zu beschreiben. Van Delft und Dette (2021) haben diese dann eingesetzt, um mit Hilfe von "spectral clustering" neue Cluster-Verfahren zu entwickeln. Damit erhalten sie erstmalig Methoden für nicht-stationäre Prozesse (vgl. Abb.1). Ein weiterer Schwerpunkt bestand in der Entwicklung von (asymptotisch) verteilungsfreien Testverfahren, um Spektraloperatoren, ihre Eigenwerte und Eigenfunktion von zwei funktionalen Zeitreihen zu vergleichen. Hier kamen die in Modul 1 entwickelten Methoden der Selbst-Normalisierung zum Einsatz und es konnten neue Tests für relevante Hypothesen für die Autokovarianzstruktur funktionaler Zeitreihen entwickelt werden.

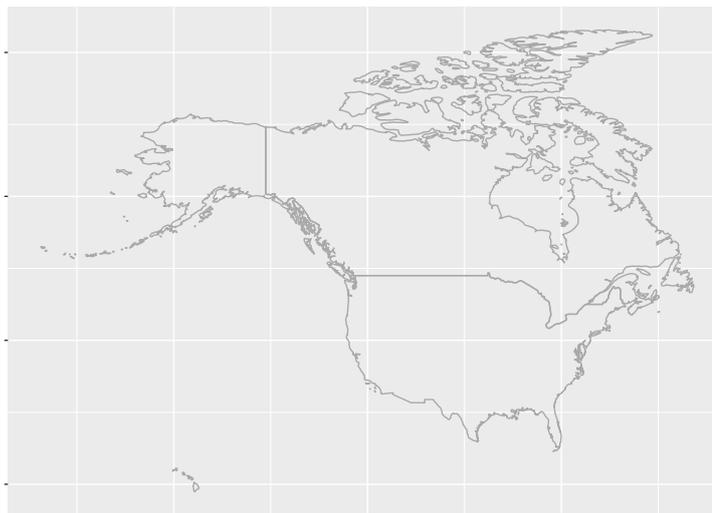


Abb. 1: Clustering von Wetterstationen in den Vereinigten Staaten aufgrund von Jahrestemperaturdaten

Modul 3 ("Empirische Prozesse abhängiger Daten") hatte mathematisch-statistische Grundlagen für die Bestimmung der asymptotischen Verteilung von Schätzern und Teststatistiken in dynamischen Modellen zum Gegenstand. In Kooperation mit Teilprojekt C5 haben Betken et al. (2021) das asymptotische Verhalten der empirischen Verteilung ordinaler Muster bei langzeitabhängigen Daten untersucht und aufbauend auf Schnurr und Dehling (2017) aus der zweiten

Förderphase ordinale Musterabhängigkeit als Alternative zu anderen Korrelationsmaßen vorgestellt. Dehling et al. (2020a) weisen die Gültigkeit des Bootstrap für die Abstandskorrelation als Maß für Abhängigkeit zweier stochastischer Prozesse nach und Betken und Wendler (2018) zeigen, dass Subsampling-Verfahren für sehr allgemeine Statistiken auch im langzeitabhängigen Fall funktionieren. In Kooperation mit Teilprojekt C3 untersuchen Schmidt et al (2021) das asymptotische Verhalten von U-Statistiken, deren Einträge lokale Stichprobenvarianzen eines lokal stationären schwach abhängigen Prozesses sind. Als Anwendung entwickeln sie einen Test auf konstante Varianzfunktion in einem lokal stationären Prozess. Mit Hilfe von Ergebnissen in Dehling und Taqqu (1989) über die Konvergenz des klassischen empirischen Prozesses langzeitabhängiger Daten hat Buchsteiner (2018) die Konvergenz des durch Funktionenklassen indizierten empirischen Prozesses nachgewiesen. Aufbauend auf Dehling et al. (2015) und Dehling et al. (2020b) untersuchen Dehling et al. (2021) das asymptotische Verhalten des Zweistichproben empirischen U-Prozesses, und, motiviert durch die klassischen Arbeiten von Aaronson et al. (1996) und Borovkova et al. (2001), hat Giraudo (2021a, 2021b, 2021c) das asymptotische Verhalten von U-Statistiken unter sehr schwachen Annahmen an die Abhängigkeitsstruktur der Daten abgeleitet.

In Modul 4 ("Quantilsregression und –autoregression") haben Behl et al. (2018) in Zusammenarbeit mit Teilprojekt A3 ein neues Kriterium (FIC-Kriterium) zur fokussierten Modellwahl (vgl. Claeskens und Hjort 2003) für die Quantilsregression entwickelt und die Vorteile dieses Modellwahlverfahrens bei der Analyse des Rebound-Effekts im Individualverkehr demonstriert. Ferner wurden die in der zweiten Förderphase erzielten Ergebnisse eingesetzt, um gemeinsam mit Teilprojekt A1 einen "mass excess"-Ansatz zu entwickeln, um relevante Abweichungen in der Mittelwertfunktion von lokal stationären Zeitreihen zu entdecken (Dette und Wu 2019). Im Gegensatz zu "klassischen" Strukturbruchverfahren, bei denen davon ausgegangen wird, dass die Mittelwertfunktion stückweise konstant ist, sind hier auch stetig variierende Erwartungswerte erlaubt. Eine typische Anwendung sind Änderungen (z.B. um mehr als 1°C) von der globalen Durchschnittstemperatur vor der Industrialisierung (vgl. Abb. 2).

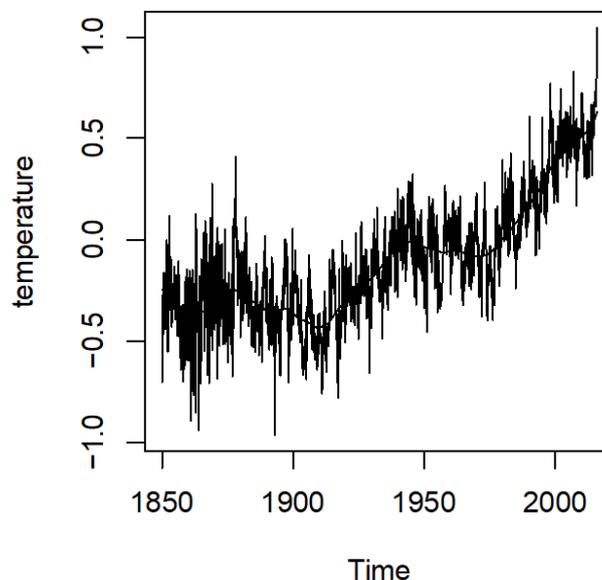


Abb. 2: Globale Temperatur (und geschätzter Trend) zwischen 1850 und 2019

Die im Antrag formulierten Projektziele wurden erreicht. Bei den Forschungsarbeiten in Modul 4 zur Quantilsregression haben wir uns mehr auf die Modellwahl konzentriert, da wir keinen geeigneten Mitarbeiter mit Kenntnissen in "optimal transport" rekrutieren konnten.

Das Projekt C1 war eng mit vielen anderen Teilprojekten des SFBs vernetzt. So haben wir gemeinsam mit A1 und A7 neue Testverfahren im nichtstationären Kontext entwickelt (u.a. Dette und Wu 2019 oder Bücher, Dette und Heinrichs 2021). Das Teilprojekt T1 hat uns bei der

Konstruktion von effizienten Tests für das Bio-Äquivalenzproblem bei funktionalen Daten unterstützt (vgl. Dette und Kokot 2021a) und zum Thema "Stationarität in funktionalen Zeitreihen" wurde ebenfalls intensiv mit den Teilprojekten A1 und A7 zusammengearbeitet. Schließlich haben wir mit A3 im Bereich Modellwahl kooperiert. In Kooperation mit Teilprojekt C3 haben wir neue robuste Strukturbruchtests bei abhängigen Daten und gemeinsam mit C5 statistische Verfahren bei fraktionalen Ornstein-Uhlenbeck Prozessen entwickelt.

Neben den zahlreichen internationalen Kooperationen, die durch unsere Publikationen dokumentiert sind, gab es außerdem regelmäßig stattfindende Tagungen zu dem Thema "New Developments in Econometrics and Time Series". In den Jahren 2017-2019 wurden diese gemeinsam mit dem EIFE-Einaudi Institute for Economics and Finance (Rom), der Universität Kopenhagen und der Universität Graz organisiert. Eine weitere für das Jahr 2020 geplante Tagung in Rennes musste wegen der Pandemie abgesagt werden.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.10.2.2):

- Aaronson, J., Burton, R., Dehling, H., Gilat, D., Hill, T., Weiss, B. (1996): Strong laws for L- and U-statistics, *Transactions of the American Mathematical Society* 348(7), 2845-2866.
- Aston, J.A.D., Pigoli, D., Tavakoli, S. (2017): Tests for separability in nonparametric covariance operators of random surfaces, *Annals of Statistics* 45(4), 1431-1461.
- Aue, A., Dette, H., Rice, G. (2021): Two-sample tests for relevant differences in the eigenfunctions of covariance operators, erscheint in: *Statistica Sinica*.
<https://arxiv.org/abs/1909.06098>
- Bagchi, P., Characiejus, V., Dette, H. (2018): A simple test for white noise in functional time series, *Journal of Time Series Analysis* 39(1), 54-74.
- Behl, P., Dette, H., Frondel, M., Vance, C. (2018): A focused information criterion for quantile regression: Evidence for the rebound effect, *Quarterly Review of Economics and Finance* 71, 223-227.
- Betken, A., Buchsteiner, J., Dehling, H., Münker, I., Schnurr, A., Woerner, J. (2021): Ordinal patterns in long-range dependent time series, *Scandinavian Journal of Statistics* 48, 969-1000.
- Birr, S., Dette, H., Hallin, M., Kley, T., Volgushev, S. (2018): On Wigner-Ville spectra and the uniqueness of time-varying quantile-based spectral densities, *Parzen Special Issue of the Journal of Time Series Analysis* 39(5), 242-250.
- Birr, S., Volgushev, S., Kley, T., Dette, H., Hallin, M. (2017): Quantile spectral analysis for locally stationary time series, *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B* 79(5), 1619-1643.
- Borovkova, S., Burton, R., Dehling, H. (2001): Limit theorems for functionals of mixing processes with applications to U-statistics and dimension estimation, *Transactions of the American Mathematical Society* 353(11), 4261-4318.
- Buchsteiner, J. (2018): The function-indexed sequential empirical process under long-range dependence, *Bernoulli* 24, 2154-2175.
- Bücher, A., Dette, H., Heinrichs, F. (2020): Detecting deviations from second-order stationarity in locally stationary functional time series, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 72(4), 1055-1094.
- Constantinou, P., Kokoszka, P., Reimherr, M. (2017): Testing separability of space-time functional processes, *Biometrika* 104(2), 425-437.
- Dehling, H. (1983): Limit theorems for sums of weakly dependent Banach space valued random variables, *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete* 63, 393-432.
- Dehling, H., Fried, R., Garcia, I., Wendler, M. (2015): Change-point detection under dependence based on two-sample U-statistics, in: Dawson et al.: Asymptotic Laws and Methods in Stochastics, *Fields Institute Communications* 76, 195-220.
- Dehling, H., Fried, R., Wendler, M. (2020b): A robust method for shift detection in time series, *Biometrika* 107(3), 647-660.
- Dehling, H., Taqqu, M.S. (1989): The empirical process of some long-range dependent sequences with an application to U-statistics, *Annals of Statistics* 17(4), 1767-1783.
- Dette, H., Kokot, K. (2021b): Detecting relevant differences in the covariance operators of functional time series - a sup-norm approach, erscheint in: *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*.
<https://arxiv.org/abs/2006.07291>
- Dette, H., Kokot, K. (2021a): Bio-equivalence tests in functional data by maximum deviation, *Biometrika* 108(4), 895-913.

- Dette, H., Kutta, T. (2021): Detecting structural breaks in eigensystems of functional time series, *Electronic Journal of Statistics* 15(1), 944-983.
- Giraudó, D. (2021a): Limit theorems for U-statistics of Bernoulli data, *ALEA, Latin American Journal of Probability and Mathematical Statistics* 18, 793-828.
- Giraudó, D. (2021b): Bound on the maximal function associated to the law of the iterated logarithm for Bernoulli random fields, *Stochastics*.
<https://doi.org/10.1080/17442508.2021.1920942>
- Giraudó, D. (2021c): Maximal function associated to the bounded law of the iterated logarithm via orthomartingale approximation, *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 461(1), 124792.
- Horváth, L., Kokoszka, P. (2012): Inference for Functional Data with Applications, *Springer Series in Statistics*, New York.
- Kley, T., Volgushev, S., Dette, H., Hallin, M., et al. (2016): Quantile spectral processes: Asymptotic analysis and inference, *Bernoulli* 22(3), 1770-1807.
- Papadimitis, E. (2010): Validating stationarity assumptions in time series analysis by rolling local periodograms, *Journal of the American Statistical Association* 105, 839-851.
- Shao, X. (2010): A self-normalized approach to confidence interval construction in time series, *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B.* 72(3), 343-366.
- Shao, X. (2015): Self-normalization for time series: A review of recent developments, *Journal of the American Statistical Association* 110, 1797-1817.
- Schnurr, A., Dehling, H. (2017): Testing for structural breaks via ordinal pattern dependence, *Journal of the American Statistical Association* 112, 706-720.
- Van Delft, A., Characiejus, V., Dette, H. (2021): A nonparametric test for stationarity in functional time series, *Statistica Sinica* 31(3), 1375-1395.
- Van Delft, A., Dette, H. (2020): Pivotal tests for relevant differences in the second order dynamics of functional time series, erscheint in: *Bernoulli*.
<https://arxiv.org/abs/2004.04724>
- Van Hecke, R., Volgushev, S., Dette, H. (2018): Fourier analysis of serial dependence measures, *Journal of Time Series Analysis* 39(1), 75-89.

2.10.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Bagchi, P., Dette, H. (2020): A test for separability in covariance operators of random surfaces, *Annals of Statistics* 48(4), 2303-2322.
- Betken, A., Wendler, M. (2018): Subsampling for general statistics under long-range dependence, *Statistica Sinica* 28, 1199-1224.
- Bücher, A., Dette, H., Heinrichs, F. (2021): Are deviations in a gradually varying mean relevant? A testing approach based on sup-norm estimators, *Annals of Statistics* 49(6), 3583-3617.
- Dehling, H., Giraudó, D., Sharipov, O. (2021): Convergence of the empirical two-sample U-statistic with beta-mixing data, *Acta Mathematica Hungarica* 164, 377-412.
- Dehling, H., Matsui, M., Mikosch, T., Samorodnitsky, G., Tafakori, L. (2020a): Distance covariance for discretized stochastic processes, *Bernoulli* 26, 2758-2789.
- Dette, H., Kokot, K., Aue, A. (2020): Functional data analysis in the Banach space of continuous functions, *Annals of Statistics* 48(2), 1168-1192.
- Dette, H., Kokot, K., Volgushev, S. (2020): Testing relevant hypotheses in functional time series via self-normalization, *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B* 82(3), 629-660.
- Dette, H., Wu, W. (2019): Detecting relevant changes in the mean of nonstationary processes - a mass excess approach, *Annals of Statistics* 47(6), 3578-3608.
- Van Delft, A., Dette, H. (2021): A similarity measure for second order properties of non-stationary functional time series with applications to clustering and testing, *Bernoulli* 27(1), 469-501.
- Schmidt, S., Wornowizki, M., Fried, R., Dehling, H. (2021): An asymptotic test for constancy of the variance under short-range dependence, *Annals of Statistics* 49(6), 3460-3481.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.10.3 Ausstattung des Teilprojekts C1

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. H. Dette, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grund- ausstattung
	2. H. Dehling, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	5		Grund- ausstattung
	3. T. Kutta, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grund- ausstattung
	4. D. Giraudo, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grund- ausstattung
Nichtwissen- schaftliches Personal	5. M. Stein, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Bo)	3		Grund- ausstattung
	6. G. Koenig, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Bo)	3		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	7. P. Bagchi, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	8. A. van Delft, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	9. S. Schmidt, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		Doktorandin	
	10. O. Sharipov, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc/ Gastprofessor	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Holger Dette:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2, und 4.

2. *Prof. Dr. Herold Dehling:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.

3. *Tim Kutta, M.Sc.:*

Arbeitete in Modul 1 zu Tests auf relevante Hypothesen.

4. *Dr. Davide Girauda:*

Arbeitete in Modul 3 zu empirischen Prozessen und U-Statistiken abhängiger Daten.

5. *Martina Stein:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Bochum.

6. *Gabriele Koenig:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Bochum.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

7. *Dr. Pramita Bagchi:*

Arbeitete mit H. Dette in Modul 1 und 2 zur Validierung der Modellannahme der Separabilität und des "white noise" in funktionalen Daten.

8. *Dr. Anne van Delft:*

Arbeitete mit H. Dette in Modul 2 zu Methoden im Spektralbereich, insbesondere zu Clustering für funktionale nicht notwendig stationäre Prozesse.

9. *Sara Schmidt, M.Sc.:*

Arbeitete mit H. Dehling zum asymptotischen Verhalten von U-Statistiken von Dreiecks-schemata bei abhängigen Daten.

10. *Dr. Olimjon Sharipov:*

Arbeitete mit H. Dehling zu empirischen Prozessen und Bootstrapverfahren bei schwach abhängigen hochdimensionalen Daten.

2.11.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C2

2.11.1.1 Titel

Optimale Versuchsplanung für dynamische statistische Modelle

2.11.1.2 Projektleitung

Dette, Holger, Prof. Dr., *4. Mai 1961, deutsch

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Mathematik, Lehrstuhl für Stochastik

D-44780 Bochum

Telefon: 0234-32-28284

E-Mail: holger.dette@rub.de

Kunert, Joachim, Prof. Dr., *2. Februar 1955, deutsch

Technische Universität Dortmund, Fakultät Statistik,

Lehrstuhl für Mathematische Statistik und Naturwissenschaftliche Anwendungen

D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-3113

E-Mail: kunert@statistik.tu-dortmund.de

2.11.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.11.2.1 Bericht

Gegenstand des Projekts war die Versuchsplanung für dynamische statistische Modelle, insbesondere eine allgemeine Theorie zur Versuchsplanung für (nichtparametrische) Regressionsmodelle mit korrelierten Beobachtungen. Weitere Themen waren die Versuchsplanung für dynamische Prozesse und Versuchsplanung unter Modellunsicherheit. Bei Modellunsicherheit interessierten uns zum einen Versuchspläne für die Modellwahl, zum anderen Versuchspläne, die robust gegen die Vernachlässigung von Störeinflüssen im Modell sind.

In Modul 1 ("Versuchsplanung für Regressionsmodelle mit abhängigen Fehlern") entwickeln Dette, Konstantinou und Zhigljavsky (2017) die allgemeine Theorie der optimalen Versuchsplanung in linearen Regressionsmodellen mit korrelierten Beobachtungen weiter. Im Gegensatz etwa zu Kiselak und Stehlik (2008), Harman und Stulajter (2011) oder Dette und Kunert (2008, 2014) werden dabei nicht Schätzmethoden in speziellen Modellen untersucht, sondern allgemeine zeitstetige lineare Modelle unter der Annahme betrachtet, dass die ganze Trajektorie des Fehlerprozesses beobachtbar ist. Dette, Pepelyshev und Zhigljavsky (2019) bestimmen optimale Schätzer im zeitstetigen Modell, die im Anschluss mit diskreten Maßen approximiert werden können, um effiziente, in der Praxis implementierbare Versuchspläne zu erhalten. Dabei betrachten wir erstmalig auch den Fall, dass Fehlerprozesse mit differenzierbaren Pfaden beobachtet werden können und untersuchen auch Modelle mit multivariaten Prädiktoren.

Zur Untersuchung der Robustheit von Versuchsplänen bezüglich Modellungenauigkeiten bestimmen Neumann und Kunert (2017, 2021) Versuchspläne, die den mittleren quadratischen Fehler (mean squared error, MSE) der Schätzer minimieren, falls bestimmte zusätzliche Störparameter auftauchen, die im Modell nicht berücksichtigt werden. Damit verallgemeinern diese Autoren die Ergebnisse von Azais und Druilhet (1997) substantiell, die nur Versuchspläne mit konstanter Varianz vergleichen.

In Modul 2 ("Versuchsplanung für Regressionsmodelle mit dynamischen Aspekten") lag der Schwerpunkt auf dynamischen Modellen, wie sie etwa für enzymatische Reaktionen mit Inhibitoren Verwendung finden (Bogacka et al. 2011). Hier verifizieren Schorning, Dette, Kettelhake und Möller (2018) erstmalig die numerischen Ergebnisse dieser Autoren (inklusive teilweiser Korrektur). In Erweiterung zu der bisherigen Literatur liefert diese Arbeit außerdem eine explizite Charakterisierung der optimalen Versuchspläne mit minimalem Träger.

Andere Arbeiten dieser Förderperiode beschäftigen sich mit c-optimaler Versuchsplanung für polynomiale Modelle, um eine optimale Schätzung der individuellen Koeffizienten zu ermöglichen. Hier können wir in vielen Fällen die optimalen Versuchspläne explizit bestimmen (Dette, Melas, Shpilev 2020, 2021). Außerdem entwickeln Duarte, Wong und Dette (2018) mit Hilfe semi-definierte Programmierung effiziente Algorithmen für die Berechnung optimaler Versuchspläne, die auch in Modellen mit höherdimensionalem Parametervektor zuverlässige Ergebnisse liefern.

Dette, Konstantinou und Schorning (2021) verwenden Ergebnisse von Dette, Pepelyshev und Zhigljavsky (2016) aus der zweiten Förderphase für optimale Versuchspläne in nichtparametrischen Regressionsmodellen mit korrelierten Fehlern. Sie untersuchen Reihenschätzer für die unbekannte Regressionsfunktion und erweitern damit den Ansatz von Efromovich (2008) substantiell, der nur den unabhängigen Fall betrachtet. Diese Resultate liefern auch neue Ergebnisse zur allgemeinen Schätztheorie in nichtparametrischen Regressionsmodellen, die in der Regel nur den unabhängigen Fall betrachtet (vgl. Tsybakov 2009). Dette, Konstantinou, Schorning und Gösmann (2019) bestimmen optimale Versuchspläne für die Reihenschätzung mit Hilfe der sphärischen harmonischen Polynome und zeigen, dass Gleichverteilungen auf der Sphäre optimal sind.

Singh, Kunert und Stufken (2021) zeigen, dass in Versuchspläne für Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) Experimenten mit korrelierten Beobachtungen das optimale Design von der Größe der Korrelationen abhängt, und dass sogenannte k-lag Orthogonale Designs für große Bereiche sehr gute Effizienz aufweisen (vgl. Abb. 1). Im Gegensatz zu Kao (2015), die nur unkorrelierte Fehler zulässt, sind somit erstmals Abhängigkeiten in den Fehlern erlaubt. Bei der Konstruktion von k-lag Orthogonalen Designs erweitern Singh, Kunert und Stufken (2021) Verfahren von Lin et al. (2017).

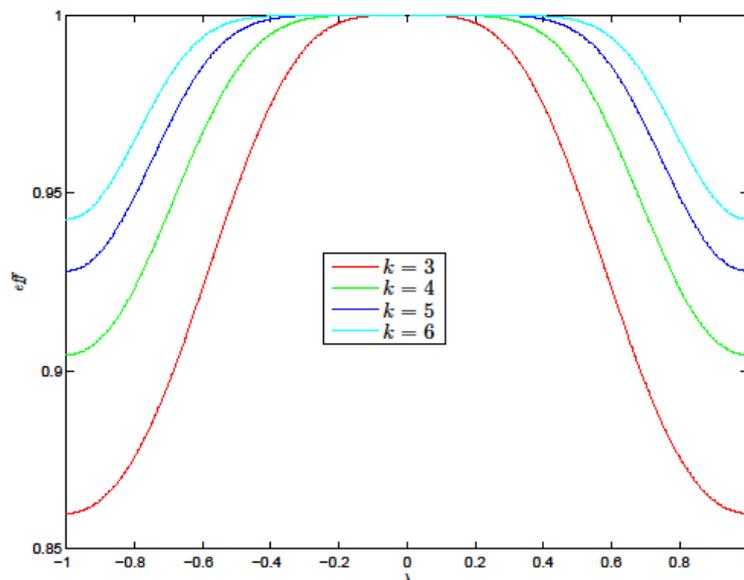


Abb. 1: Effizienz des k-lag Orthogonalen Designs für unterschiedliche k.

Modul 3 ("Optimale Versuchsplanung und Modellwahl") erweitert die bisherige Literatur über Versuchsplanung zur Modellwahl in Richtung verschachtelter Modelle (Stigler 1971) und T-Optimalitätskriterium und seine Erweiterungen (López-Fidalgo, Tommasi und Trandafir 2007, Dette und Titoff 2009). Dabei werden ausschließlich parametrische Regressionsmodelle betrachtet. Dette, Guchenko, Melas und Wong (2018) erweitern die Resultate von Otsu (2008) substantiell und bestimmen erstmalig KL-optimale Versuchspläne (vgl. Tommasi und López-Fidalgo 2010) für die Modellwahl in semiparametrischen Regressionsmodellen. Als Alternative zu den klassischen Ansätzen, entwickeln Alhorn, Schorning und Dette (2019) und Alhorn, Dette und Schorning (2021) in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten C1 und T1 erstmalig neue Optimalitätskriterien für die Versuchsplanung bei Modellunsicherheit, die direkt die bei der Modellwahl verwendeten Verfahren berücksichtigen. Dabei untersuchen sie den Einfluss der

optimalen Versuchsplanung auf AIC-, BIC- und Model-Averaging Verfahren in nicht notwendig verschachtelten Regressionsmodellen (für einen Vergleich dieser Methoden für uniform designs siehe Schorning, Bornkamp, Bretz und Dette 2016), und zeigen, dass ein durch Versuchsplanung optimiertes Model-Averaging bessere Ergebnisse liefert als durch Versuchsplanung optimierte AIC- und BIC-Methoden.

Modul 4 ("Versuchsplanung für inverse statistische Probleme") war ursprünglich zur Unterstützung von Teilprojekt C4 gedacht. Dieses wurde jedoch nicht zur Weiterförderung empfohlen. Dennoch wurden die gemeinsamen Forschungsarbeiten während der Auslauffinanzierung dieses Teilprojekts fortgesetzt. Insbesondere wurden die Arbeiten zu Bayes-optimalen Versuchsplänen für nichtlineare Fehler-in-Variablen Modelle, die bzgl. der Annahmen an die Modellparameter robust sind, abgeschlossen (vgl. auch Konstantinou und Dette 2017).

Das Projekt C2 hat mit vielen verschiedenen anderen Teilprojekten des SFBs kooperiert. So sind unsere Versuchspläne zur Modellwahl (Alhorn, Schorning und Dette 2019, Alhorn, Dette und Schorning 2021) in enger Kooperation mit C1 entstanden. Diese Ergebnisse wurden in Teilprojekt T1 bei Modellwahl für Dosiswirkungskurven eingesetzt. Außerdem wurde weiter mit B1 über Versuchsplanung für multivariate verallgemeinerte lineare Modelle zusammengearbeitet, die bei der Optimierung der dort betrachteten Beschichtungsprozesse eine zentrale Rolle spielen (Dette, Hoyden, Kuhnt und Schorning 2017). Diese Arbeiten dauern zum Teil noch an und werden nach dem Ende des Sonderforschungsbereichs fortgesetzt. Hier sehen wir einige der im SFB 823 kreierte Ideen, die über den aktuellen SFB hinausweisen und die künftige einschlägige Forschung befruchten werden.

Es gab außerdem zahlreiche internationale Kooperationen, von denen wir die Tagungen *Latest Advances in the Theory and Applications of Design and Analysis of Experiments* an der Banff International Research Station for Mathematical Innovation and Discovery in Kanada (2017) und *Design of Experiments: New Challenges* am Centre International de Rencontres Mathématiques (Luminy) erwähnen, die Holger Dette mit verschiedenen internationalen Kooperationspartnern organisiert hat.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.11.2.2):

- Azais, J.-M., Druilhet, P. (1997): Optimality of neighbour balanced designs when neighbour effects are neglected, *Journal of Statistical Planning and Inference* 64, 353-367.
- Bogacka, B., Patan, M., Johnson, P.J., Youdim, K., Atkinson, A. (2011): Optimum design of experiments for enzyme inhibition kinetic models, *Journal of Biopharmaceutical Statistics* 21(3), 555-572.
- Dette, H., Hoyden, L., Kuhnt, S., Schorning, K. (2017): Optimal designs for thermal spraying, *Journal of the Royal Statistical Society Ser. C* 66, 53-72.
- Dette, H., Konstantinou, M., Zhigljavsky, A. (2017): A new approach to optimal designs for correlated observations, *Annals of Statistics* 45(4), 1579-1608.
- Dette, H., Kunert, J., Pepelyshev, A. (2008): Exact optimal designs for weighted least squares analysis with correlated errors, *Statistica Sinica* 18, 135-154.
- Dette, H., Kunert, J. (2014): Optimal designs for the Michaelis Menten model with correlated observations, *Statistics: A Journal of Theoretical and Applied Statistics* 48(6), 1254-1267.
- Dette, H., Melas, V.B., Shpilev, P. (2021): Some explicit solutions of c-optimal design problems for polynomial regression, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 73, 61-82.
- Dette, H., Melas, V.B., Shpilev, P. (2020): Optimal designs for estimating individual coefficients in polynomial regression with no intercept, *Statistics & Probability Letters* 158, 108636.
- Dette, H., Pepelyshev, A., Zhigljavsky, A. (2016): Optimal designs in regression with correlated errors, *Annals of Statistics* 44(1), 113-152.
- Dette, H., Titoff, S. (2009): Optimal discrimination designs, *Annals of Statistics* 37(4), 2056-2082.
- Duarte, B.P.M., Wong, W.K., Dette, H. (2018): Adaptive grid semidefinite programming for finding optimal designs, *Statistics and Computing* 28, 441-460.
- Efromovich, S. (2008): Optimal sequential design in a controlled non-parametric regression, *Scandinavian Journal of Statistics* 35(2), 266-285.
- Harman, R., Stulajter, F. (2011): Optimality of equidistant sampling designs for the Brownian motion with a quadratic drift, *Journal of Statistical Planning and Inference* 141(8), 2750-2758.

- Kao, M.-H. (2015): Universally optimal fMRI designs for comparing hemodynamic response functions, *Statistica Sinica* 25, 499-506.
- Konstantinou, M., Dette, H. (2017): Bayesian D -optimal designs for error-in-variables models, *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 33(3), 269-281.
- Lin, Y.-L., Phoa, F.K.H., Kao, M.-H. (2017): Optimal design of fMRI experiments using circulant (almost-) orthogonal arrays, *Annals of Statistics* 45, 2483-2510.
- Kiselak, J., Stehlik, M. (2008): Equidistant D -optimal designs for parameters of Ornstein-Uhlenbeck process, *Statistics and Probability Letters* 78, 1388-1396.
- López-Fidalgo, J., Tommasi, C., Trandafir, P.C. (2007): An optimal experimental design criterion for discriminating between non-normal models, *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B* 69(2), 231-242.
- Otsu, T. (2008): Optimal experimental design criterion for discriminating semi-parametric models, *Journal of Statistical Planning and Inference* 138, 4141-4150.
- Schorning, K., Bornkamp, B., Bretz, F., Dette, H. (2016): Model selection versus model averaging in dose finding studies, *Statistics in Medicine* 35, 4021-4040.
- Stigler, S. (1971): Optimal experimental design for polynomial regression, *Journal of the American Statistical Association* 66, 311-318.
- Tommasi, C., López-Fidalgo, J. (2010): Bayesian optimum designs for discriminating between models with any distribution, *Computational Statistics & Data Analysis* 54(1), 143-150.
- Tsybakov, A.B. (2009): Introduction to Nonparametric Estimation, *Springer Series in Statistics*, New York, London.

2.11.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Alhorn, K., Dette, H., Schorning, K. (2021): Optimal designs for model averaging in non-nested models, *Sankhya* 83, 745-778.
- Alhorn, K., Schorning, K., Dette, H. (2019): Optimal designs for frequentist model averaging, *Biometrika* 106(3), 665-682.
- Dette, H., Guchenko, R., Melas, V.B., Wong, W.K. (2018): Optimal discrimination designs for semi-parametric models, *Biometrika* 105(1), 185-197.
- Dette, H., Konstantinou, M., Schorning, K. (2021): Optimal designs for series estimation in nonparametric regression with correlated data, *Statistica Sinica* 31(4), 1-25.
- Dette, H., Konstantinou, M., Schorning, K., Gösmann, J. (2019): Optimal designs for regression with spherical data, *Electronic Journal of Statistics* 13(1), 361-390.
- Dette, H., Pepelyshev, A., Zhigljavsky, A. (2019): The BLUE in continuous-time regression models with correlated errors, *Annals of Statistics* 47(4), 1928-1959.
- Neumann, C., Kunert, J. (2017): On MSE-optimal crossover designs. *Annals of Statistics* 46, 2939-2959.
- Neumann, C., Kunert, J. (2021): On MSE-optimal circular crossover designs, *Journal of Statistical Theory and Practice* 15, 85.
- Schorning, K., Dette, H., Kettelhake, K., Möller, T. (2018): Optimal designs for non-competitive enzyme inhibition kinetic models, *Statistics* 52(6), 1359-1378.
- Singh, R., Kunert, J., Stufken, J. (2021): On optimal fMRI designs for correlated errors, *Journal of Statistical Planning and Inference* 212, 84-96.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.11.3 Ausstattung des Teilprojekts C2

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. H. Dette, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	5		Grund- ausstattung
	2. J. Kunert, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	10		Grund- ausstattung
	3. J. Gösmann, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	5		Grund- ausstattung
	4. C. Neumann, Dr., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	5		Grund- ausstattung
Nichtwissen- schaftliches Personal	5. M. Stein, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Bo)	3		Grund- ausstattung
	6. E. Siebracht, Verw. Ang.		Fak. Statistik (Do)	3		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	7. M. Konstantinou, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	8. K. Schorning, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		Doktorandin/ PostDoc	
	9. G. Dierickx, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	10. R. Singh, Dr., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)		PostDoc	
	11. S. Urbanik, Dr., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)		Doktorandin/ PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Holger Dette:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1-4.

2. *Prof. Dr. Joachim Kunert:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.

3. *Josua Gösmann, M.Sc.:*

Arbeitete in Modul 2 zur Versuchsplanung für Reihenschätzung.

4. *Dr. Christoph Neumann:*

Arbeitete in Modul 1 zur Versuchsplanung bei Modellunsicherheit.

5. *Martina Stein:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Bochum.

6. *Erika Siebracht:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Dortmund.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

7. *Dr. Maria Konstantinou:*

Brachte ihre Expertise zur Versuchsplanung für abhängige Beobachtungen und für inverse Modelle in das Projekt ein. Sie arbeitete in den Modulen 1, 2 und 4.

8. *Dr. Kirsten Schorning:*

Brachte ihre Expertise zur Versuchsplanung zur Modellwahl in das Projekt ein. Sie arbeitete in den Modulen 1, 2 und 3.

9. *Dr. Gauthier Dierickx:*

Arbeitete mit H. Dette im Modul 3 und unterstützte die Forschungsarbeiten durch seine Expertise zur asymptotischen Statistik.

10. *Dr. Rakhi Singh:*

Arbeitete in Modul 2 zu Versuchsplänen mit dynamischen Aspekten.

11. *Dr. Sarah Urbanik:*

Arbeitete in Modul 3 zur Versuchsplanung für Überlebenszeitmodelle.

2.12.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C3

2.12.1.1 Titel

Analyse von Strukturbrüchen in Prozessdaten

2.12.1.2 Projektleitung

Dehling, Herold, Prof. Dr., *22. Dezember 1954, deutsch
Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Mathematik,
Lehrstuhl für Wahrscheinlichkeitstheorie und ihre Anwendungen
D-44780 Bochum
Telefon: 0234-32-25678
E-Mail: herold.dehling@rub.de

Fried, Roland, Prof. Dr., *31. Dezember 1968, deutsch
Technische Universität Dortmund, Fakultät Statistik,
Mathematische Statistik und naturwissenschaftliche Anwendungen
D-44221 Dortmund
Telefon: 0231-755-3119
E-Mail: fried@statistik.tu-dortmund.de

2.12.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.12.2.1 Bericht

In der dritten Förderphase haben wir unser Augenmerk verstärkt auf robuste und nichtparametrische Methoden für kompliziertere Fragestellungen wie multiple Strukturbrüche, multivariate Prozesse und Änderungen in höheren Momenten oder anderen Verteilungscharakteristika wie das Randverhalten gerichtet. Dabei haben wir verschiedene Abhängigkeitsstrukturen wie kurzes und langes Gedächtnis betrachtet und Methoden erarbeitet, die ohne restriktive Annahmen zuverlässig funktionieren. Einige unserer Prozeduren sind bereits frei verfügbar über das R-Paket `robcp`, das wir laufend erweitern.

In Modul 1 ("Robuste Schätzer und Strukturbruchtests") haben wir Schätzer und Tests mit günstigen Eigenschaften in schwierigen Datensituationen wie zum Beispiel Strukturbruch in Kombination mit Ausreißerkontamination oder schwerrändrigen Fehlerverteilungen untersucht. Dehling, Fried und Wendler (2020) konstruierten einen robusten Test für einen Strukturbruch in der Lage anhand der medianen paarweisen Differenz zwischen den Beobachtungen vor und nach jedem möglichen Strukturbruchzeitpunkt. Hierfür leiteten sie erstmals die Asymptotik von Zweistichproben-U-Quantilen unter schwacher Abhängigkeit her.

In mehreren Arbeiten haben wir Schätzer und Tests mit guten Eigenschaften selbst bei multiplen Strukturbrüchen konstruiert. Gemeinsame Idee war die Anwendung eines Schätzers auf viele nicht-überlappende Blöcke konsekutiver Beobachtungen und die Kombination der Ergebnisse. Beispielsweise wird die empirische Varianz aller Beobachtungen durch einen einzelnen Strukturbruch beliebig stark verzerrt und ist nicht länger konsistent. Axt und Fried (2020) untersuchten die Konsistenz des Mittelwerts der empirischen Varianzen von Teilblöcken bei multiplen Strukturbrüchen in Abhängigkeit von der Anzahl der Blöcke. Axt, Dürre und Fried (2021) modifizierten die mediane absolute Differenz vom Median (MAD) mittels einer blockweisen Zentrierung, um Robustheit gegen multiple Strukturbrüche und gegen Ausreißer zu erreichen. Wachsen dabei jeweils nicht nur die Anzahlen der Blöcke, sondern auch die Blocklängen ausreichend schnell, so haben beide Schätzer die gleiche asymptotische Verteilung und die gleiche asymptotische Effizienz wie der Ausgangsschätzer.

In Kooperation mit Teilprojekt C1 konstruierten Schmidt et al. (2021) einen Test auf Strukturbruch in der Varianz anhand von Ginis mittlerer Differenz zwischen den logarithmierten blockweisen empirischen Varianzen. Für den Beweis der asymptotischen Normalität der resultierenden Teststatistik unter der Nullhypothese konstanter Varianz entwickelten sie eine

allgemeine neue Theorie für Dreiecksschemata von geschachtelten U-Statistiken schwach abhängiger Beobachtungen. Der resultierende Test ist unter schwachen Regularitätsannahmen an die Mittelwerts- und Varianzfunktion konsistent zur Entdeckung beliebiger nicht konstanter Varianzfunktionen. Schmidt (2021) konstruierte einen Test auf eine beliebige Änderung der Mittelwertfunktion über Ginis mittlere Differenz zwischen lokalen Mittelwerten. Dieser Test ist unter schwachen Regularitätsannahmen konsistent gegen sehr allgemeine Änderungen des Mittelwertes, selbst bei nicht konstanter Varianz. Gerstenberger, Vogel und Wendler (2020) entwickelten einen Test auf Strukturbruch in der Varianz durch Vergleich von Ginis mittlerer Differenz sowie von Quantilen paarweiser Differenzen, zum einen berechnet für die Anfangsdaten und zum anderen für den gesamten Datensatz.

CUSUM-basierte Teststatistiken mit Gewichtung an den Rändern weisen höhere Macht bei Strukturbrüchen am Beginn oder am Ende des Beobachtungsintervalls auf. Dehling, Vuk und Wendler (2022) untersuchten erstmals entsprechende Verfahren bei robusten rangbasierten Strukturbruchtests, bestimmten die asymptotische Verteilung auch unter der Alternative und zeigten, dass auch in diesem Fall die gewichteten Verfahren höhere Macht bei einem frühen oder späten Strukturbruch aufweisen.

In Modul 2 ("Strukturbrüche in Abhängigkeiten") konstruieren wir Tests auf Änderungen in der Abhängigkeitsstruktur der Zeitreihe. Dürre und Fried (2019a) entwickelten einen allgemeinen Ansatz für asymptotische Tests, die Robustheit bei schweren Rändern und Ausreißer erzielen, auf Basis robuster Transformationen der Daten beispielsweise mittels der Huber-Funktion. Dürre und Fried (2020) wenden dies zur Konstruktion von Tests auf Änderung in der Autokovarianzstruktur an. Motiviert durch Schnurr und Dehling (2017) zu Tests auf Strukturbruch in der ordinalen Musterabhängigkeit bei Prozessen mit kurzem Gedächtnis untersuchen Betken et al. (2021a) zusammen mit C1 und C5 ordinale Muster in Prozessen mit langem Gedächtnis. Betken et al. (2021b) vergleichen ordinale Musterabhängigkeit von Prozessen mit klassischen Abhängigkeitsmaßen wie Pearsons Korrelationskoeffizient und Kendalls τ . Als Alternative zum Pearsonschen Korrelationskoeffizienten schlugen Szekely, Rizzo und Bakirov (2007) die Abstandskorrelation als Abhängigkeitsmaß vor und bestimmten das asymptotische Verhalten bei unabhängigen Daten. Betken und Dehling (2021) entwickelten neue asymptotische Theorie für Hilbertraum-wertige Prozesse mit langem Gedächtnis und untersuchten erstmals das Verhalten der Abstandskorrelation bei derlei Abhängigkeiten.

In Modul 3 ("Robuste und nichtparametrische Prozessüberwachung") leiteten wir Prozeduren für die Echtzeit-Erkennung von Sprüngen unter schwachen Annahmen an den datengenerierenden Prozess her. Abbas und Fried (2020) entwickelten Kontrollkarten, die lokal-lineare Trends und Ausreißer in den Daten ohne wesentliche Erhöhung der Fehlalarmrate tolerieren und ohne Kenntnis der Fehlerverteilung auskommen. Gemeinsam mit Teilprojekt B5 haben wir diese Prozeduren in Abbas et al. (2019) für das Monitoring der Rissbreite in Brücken adaptiert.

In Modul 4 ("Langes Gedächtnis und Strukturbrucherkennung") haben wir die Untersuchungen zu Strukturbruchtests bei Prozessen mit langem Gedächtnis fortgesetzt. Dehling et al. (2013, 2017) hatten mit dem Wilcoxon-Test erstmals einen Rangtest auf Strukturbruch vorgestellt und hinsichtlich der asymptotischen Verteilung unter der Hypothese sowie unter benachbarten Alternativen analysiert. Betken und Wendler (2021) behandelten sehr allgemeine Rangtests auf Strukturbruch. Tewes (2017) untersuchte Tests auf Strukturbruch in der Verteilung auf Basis der empirischen Verteilungsfunktion unter lokalen Alternativen. Zur Bestimmung der Testgrenzen zeigte Tewes (2018) die Gültigkeit von Block-Bootstrap-Verfahren bei Prozessen mit langem Gedächtnis. Tewes, Nordman und Politis (2019) wiesen eine Verbindung zwischen blockweisem Bootstrap und der Faltung einer subsampling Verteilung auf und zeigten so die Gültigkeit des Block-Bootstrap unter minimalen Annahmen an die zugrundeliegenden Daten. Betken und Kulik (2019) entwickelten Tests auf Strukturbruch in der Lage, der Varianz und dem tail index in Long Memory Stochastic Volatility (LMSV) Modellen. Mit Hilfe eines Selbstnormierungsansatzes erhielten sie eine unter der Hypothese asymptotisch verteilungsfreie Teststatistik. In Kooperation mit Teilprojekt C1 untersuchten Betken, Giraudo und Kulik (2022)

das asymptotische Verhalten des empirischen Prozesses bei LMSV Daten an den Rändern und entwickelten einen Test auf Strukturbruch im tail index basierend auf dem Hill-Schätzer.

Prozesse mit langem Gedächtnis weisen ähnliche Charakteristika auf wie Prozesse mit kurzem Gedächtnis und Strukturbrüchen. Berkes et al. (2006) stellten einen Test auf Basis des CUSUM-Prinzips vor, der beide Prozesstypen unterscheiden kann, jedoch anfällig gegen Ausreißer in den Daten ist. Gerstenberger (2021) erarbeitet eine robuste Alternative hierzu, indem sie die CUSUM-Statistik durch die Wilcoxon-Statistik ersetzt. Ein wichtiger Baustein hierbei ist die von Gerstenberger (2018) bestimmte Asymptotik rangbasierter Strukturbruchschätzer bei Prozessen mit langem Gedächtnis.

In Modul 5 ("Strukturbruchtests für Paneldaten") entwickelten wir Tests für Strukturbrüche in Panels mit möglicherweise vielen Zeitreihen (Dürre und Fried 2019b), teils in Kooperation mit A5 hinsichtlich der Gehälter von Vorstandsmitgliedern. Aufgrund des Wechsels des Projektmitarbeiters Alexander Dürre nach Brüssel konnte die Verallgemeinerung der Ergebnisse auf möglichst schwache und realistische Annahmen noch nicht abgeschlossen werden. Wir führen dies weiter. Ansonsten wurden alle Projektziele erreicht.

Wir haben in der dritten Förderphase eng mit dem Teilprojekt C1 kooperiert, insbesondere zum asymptotischen Verhalten von Schätzern und Teststatistiken bei abhängigen Daten und zu empirischen Prozessen. In Kooperation mit C5 untersuchten wir ordinale Muster in Zeitreihen mit langem Gedächtnis, und mit A5 sowie B5 Strukturbrüche in großen Panels beziehungsweise in der Rissentwicklung. Zudem haben wir eng mit der Arbeitsgruppe unseres ehemaligen Mitarbeiters M. Wendler (Universität Greifswald, jetzt Universität Magdeburg) zu robusten Tests auf Strukturbruch in Zeitreihen kooperiert und jährliche gemeinsame Klausurtagungen abgehalten. Mit der Arbeitsgruppe von A. Schnurr (Universität Siegen) haben wir zu neuen Abhängigkeitsmaßen, insbesondere zur ordinalen Musterabhängigkeit von Zeitreihen mit kurzem und langem Gedächtnis, kooperiert. Unsere Mitarbeiterin A. Betken hat eng mit R. Kulik (University of Ottawa) zu Strukturbruch in Long Memory Stochastic Volatility kooperiert. Nach dem Weggang an die Universität Twente (Niederlande) bzw. die Université libre de Bruxelles (Belgien) haben wir die Zusammenarbeit mit unseren ehemaligen Mitarbeitern A. Betken zur Abstandskorrelation und A. Dürre zu robusten Tests fortgesetzt.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.12.2.2):

- Abbas, S., Fried, R., Heinrich, J., Horn, M., Jakubzik, M., Kohlenbach, J., Maurer, R., Michels, A., Müller, C.H. (2019): Detection of anomalous sequences in crack data of a bridge monitoring, in: Ickstadt, K., Trautmann, H., Szepannek, G., Bauer, N., Lübke, K., Vichi, M. (Hrsg.). *Applications in Statistical Computing*, 251-269. Springer.
- Berkes, I., Horvath, L., Kokoszka, P., Shao, Q.-M. (2006): On discriminating between long-range dependence and change in the mean, *Annals of Statistics* 34, 1140-1165.
- Betken, A., Buchsteiner, J., Dehling, H., Münker, I., Schnurr, A., Woerner, J.H.C. (2021a): Ordinal patterns in long-range dependent time series, *Scandinavian Journal of Statistics* 48, 969-1000.
- Betken, A., Dehling, H., Nüßgen, I., Schnurr, A. (2021b): Ordinal pattern dependence as a multivariate dependence measure, *Journal of Multivariate Analysis* 186, 104798, 19 Seiten.
- Betken, A., Dehling, H. (2021): Distance correlation for long-range dependent time series.
<https://arxiv.org/pdf/2107.03041.pdf>
- Betken, A., Giraudo, D., Kulik, R. (2022): Change-point tests for the tail parameter of long range dependent stochastic volatility time series, *Statistica Sinica* (online first).
<https://doi.org/10.5705/ss.202020.0265>
- Dehling, H., Rooch, A., Taqqu, M.S. (2013): Nonparametric change-point tests for long-range dependent data, *Scandinavian Journal of Statistics* 40, 153-173.
- Dehling, H., Rooch, A., Taqqu, M.S. (2017): Power of change-point tests for long-range dependent data. *Electronic Journal of Statistics* 20, 1-14.
- Dehling, H., Vuk, K., Wendler, M. (2022): Change-point detection based on weighted two-sample U-statistics, *Electronic Journal of Statistics* 16(1), 862-891.
<https://doi.org/10.1214/21-EJS1964>
- Dürre, A., Fried, R. (2019a): Robust change point tests by bounded transformations.
<https://arxiv.org/pdf/1905.06201.pdf>

- Dürre, A., Fried, R. (2019b): Robust change point detection in panel data.
<https://arxiv.org/pdf/1611.02571v2.pdf>
- Dürre, A., Fried, R. (2020): Robust test for detecting changes in the autocovariance function of a time series, *Austrian Journal of Statistics* 49, 35-45.
- Gerstenberger, C. (2018): Robust Wilcoxon-type estimation of change-point location under short-range dependence, *Journal of Time Series Analysis* 39, 90-104.
- Schmidt, S. (2021): Detecting changes in the trend function of a heterogeneous time series.
<https://arxiv.org/pdf/2108.09206.pdf>
- Schnurr, A., Dehling, H. (2017): Testing for structural breaks via ordinal pattern dependence, *Journal of the American Statistical Association* 112, 706-720.
- Szekely, G.J., Rizzo, M.L., Bakirov, N.K. (2007): Measuring and testing dependence by correlation of distances, *Annals of Statistics* 35, 2769-2794.
- Tewes, J. (2017): Change-point tests under local alternatives for long-range dependent processes, *Electronic Journal of Statistics* 11, 2461-2498.
- Tewes, J. (2018): Block bootstrap for the empirical process of long-range dependent data, *Journal of Time Series Analysis* 39, 28-53.

2.12.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Abbas, S., Fried, R.** (2020): Robust control charts for the mean of a locally linear time series, *Journal of Statistical Computation and Simulation* 90, 2741-2765.
- Axt, I., Dürre, A., Fried, R.** (2021): Robust scale estimation under shift in the mean, *Statistics*.
<https://doi.org/10.1080/02331888.2021.1977812>
- Axt, I., Fried, R.** (2020): On variance estimation under shifts in the mean, *AstA Advances in Statistical Analysis* 104, 417-457.
- Betken, A., Kulik, R.** (2019): Testing for change in stochastic volatility with long range dependence, *Journal of Time Series Analysis* 40, 707-738.
- Betken, A., Wendler, M.** (2021): Rank-based change-point analysis for long-range dependent time series, erscheint in: *Bernoulli*.
<https://arxiv.org/abs/2004.06574>
- Dehling, H., Fried, R., Wendler, M.** (2020): A robust method for shift detection in time series, *Biometrika* 107, 647-660.
- Gerstenberger, C.** (2021): Robust discrimination between long-range dependence and a change in mean, *Journal of Time Series Analysis* 42, 34-62.
- Gerstenberger, C., Vogel, D., Wendler, M.** (2020): Tests for scale changes based on pairwise differences, *Journal of the American Statistical Association* 115, 1336-1348.
- Schmidt, S., Wornowizki, M., Fried, R., Dehling, H.** (2021): An asymptotic test for constancy of the variance under short-range dependence, *Annals of Statistics* 49(6), 3460-3481.
- Tewes, J., Nordman, D., Politis, D.** (2019): Convolved subsampling estimation with application to block bootstrap, *Annals of Statistics* 47(1), 468-496.

b) Andere Veröffentlichungen

Entfällt

c) Patente

Entfällt

2.12.3 Ausstattung des Teilprojekts C3

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. H. Dehling, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grund- ausstattung
	2. R. Fried, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	10		Grund- ausstattung
	3. S. Abbas, M.Sc., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	15		Grund- ausstattung
	4. S. Görz, M.Sc., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)	15		Grund- ausstattung
	5. K. Vuk, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grund- ausstattung
Nichtwissen- schaftliches Personal	6. C. Hösl, Verw. Ang.		Fak. Statistik (Do)	3		Grund- ausstattung
	7. J. Engel Verw. Ang.		Fak. Statistik (Do)	3		Grund- ausstattung
	8. G. Koenig, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Bo)	3		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	9. A. Dürre, Dr., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)		Doktorand/ PostDoc	
	10. I. Axt, Dr., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)		Doktorandin/ PostDoc	
	11. J. Gierse, M.Sc., wiss. Ang.	Statistik	Fak. Statistik (Do)		Doktorandin	
	12. J. Tewes, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	13. C. Gerstenberger, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	
	14. A. Betken, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Herold Dehling:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2, 4 und 5.

2. *Prof. Dr. Roland Fried:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2, 3 und 5.

3. *Sermad Abbas, M.Sc.:*

Arbeitete mit R. Fried in Modul 3 an robusten Kontrollkarten unter schwachen Annahmen.

4. *Sheila Görz, M.Sc.:*

Arbeitete mit R. Fried in Modul 1 und 2 an der Entwicklung eines R-Pakets für unsere Prozeduren.

5. *Kata Vuk, M.Sc.:*

Arbeitete mit H. Dehling in Modul 1 an gewichteten Teststatistiken.

6. *Carina Hösl:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Dortmund.

7. *Jennifer Engel:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Dortmund.

8. *Gabriele Koenig:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Bochum.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

9. *Dr. Alexander Dürre:*

Arbeitete mit R. Fried in den Modulen 1, 2 und 5.

10. *Dr. Ieva Axt:*

Arbeitete mit R. Fried in Modul 1 an robusten Schätz- und Testmethoden unter Strukturbruch.

11. *Jana Gierse, M.Sc.:*

Arbeitete mit R. Fried in Modul 2 an robusten Schätz- und Testmethoden unter Strukturbruch.

12. *Dr. Johannes Tewes:*

Arbeitete mit H. Dehling in Modul 4 an Strukturbruchtest bei langzeitabhängigen Prozessen.

13. *Dr. Carina Gerstenberger:*

Arbeitete mit H. Dehling in Modul 4 an Tests zur Unterscheidung von langem und kurzem Gedächtnis.

14. *Dr. Annika Betken:*

Arbeitete mit H. Dehling in den Modulen 2 und 4.

2.13.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C5

2.13.1.1 Titel

Statistik komplexer stochastischer Modelle in der Finanzmathematik

2.13.1.2 Projektleitung

Woerner, Jeannette H.C., Prof. Dr., *14. November 1972, deutsch
TU Dortmund, Fakultät für Mathematik und Fakultät für Statistik
D-44221 Dortmund

Telefon: 0231-755-3055

E-Mail: jeannette.woerner@math.tu-dortmund.de

Belomestny, Denis, Prof. Dr., *14. April 1976, russisch
Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Mathematik
Thea-Leymann-Str. 9, D-45127 Essen

Telefon: 0201-183-7425

E-Mail: denis.belomestny@uni-due.de

2.13.2 Entwicklung des Teilprojekts

2.13.2.1 Bericht

Ziel des Projektes waren statistische Verfahren für zeitstetige stochastische Modelle, die aufgrund von nicht Ergodizität, komplexen Abhängigkeitsstrukturen oder räumlichen bzw. hochdimensionalen Aspekten innovative Herangehensweisen erfordern. Im Modul 1 haben wir aufbauend auf Schnurr und Dehling (2017) aus der 2. Phase gemeinsam mit Teilprojekt C3 das Konzept der ordinalen Muster auf langzeitabhängige Zeitreihen ausgedehnt (vgl. Betken et al. 2021). Die Idee hinter ordinalen Mustern ist, die relative Position aufeinanderfolgender Datenpunkte und die Eigenschaften der dabei entstehenden Muster zum Schätzen charakteristischer Größen der Zeitreihen zu nutzen. Wir haben dieses Konzept auf langzeitabhängige Zeitreihen, stationär oder allgemeiner nur mit stationären Zuwächsen angewendet und asymptotischen Eigenschaften für Schätzer der Musterwahrscheinlichkeiten bewiesen. In einigen Fällen erhält man hier keine klassischen zentralen Grenzwertsätze gegen eine Normalverteilung, sondern gegen eine Rosenblattverteilung. Diese Resultate erweitern die Ansätze von Sinn und Keller (2011) zum Schätzen des Hurst Parameters auf $H > 3/4$.

In Belomestny et al. (2018) entwickeln wir eine neue Methode der semiparametrischen statistischen Schätzung für zeitkontinuierliche Lévy-Prozesse mit gleitendem Mittelwert. Wir leiten die Konvergenzraten der vorgeschlagenen Schätzer ab und beweisen deren Optimalität im Sinne von Minimax. In Belomestny et al. (2019a) untersuchen wir statistische Inferenz für einen zeitkontinuierlichen gleitenden Durchschnitts-Lévy-Prozess L , insbesondere die Schätzung des Lévy-Maßes ν von L aus niederfrequenten Beobachtungen des resultierenden Prozesses Z . Wir haben einen konsistenten Schätzer konstruiert, seine Konvergenzraten abgeleitet und seine Leistungsfähigkeit anhand eines numerischen Beispiels veranschaulicht. Auf mathematischer Ebene stellen wir einige neue Ergebnisse zum exponentiellen Mischen für zeitkontinuierliche gleitende durchschnittliche Lévy-Prozesse auf.

Modul 2 hatte die Parameterschätzung in stochastischen partiellen Differentialgleichungen zum Gegenstand. Hier konnten wir unsere Expertise in der Methode der quadratischen Variationen (sowie Variationen höherer Ordnungen) von stochastischen Prozessen als Startpunkt verwenden. Die Idee ist, auszunutzen, dass die empirische Version der Variation eines Lösungsprozesses geeigneter stochastischer (partieller) Differentialgleichungen auf einem gegebenen Intervall im Grenzwert auf eine einfache Art von den unbekanntem Parametern abhängt und somit zu deren Schätzung benutzt werden kann. Shevchenko, Slaoui und Tudor (2020) haben eine solche Konstruktion in der Ortskomponente der Lösung der fraktionellen Wellengleichung erfolgreich für die Schätzung des Hurst-Parameters genutzt, vgl. auch Shevchenko (2020). Shevchenko (2021a) entwickelte weitere Parameterschätzer, indem sie die quadratischen

Variationen in der Zeitkomponente sowie auf Zeit-Ort-"Rechtecken" betrachtete. Auch für die Lösung einer Diffusionsgleichung mit beschränkter Drift konnte diese Methode zur Schätzung des Hurst-Parameters angewendet werden (vgl. Gairing, Imkeller, Shevchenko, Tudor 2019).

Eng verbunden mit diesen Fragestellungen und motiviert durch partielle stochastische Differentialgleichungen ist auch eine Verallgemeinerung ins Räumliche; hierbei werden anstelle von stochastischen Prozessen Zufallsfelder auf geometrischen Objekten betrachtet. In diesem Zusammenhang hat Shevchenko (2021b) die Methode der quadratischen Variation genutzt, um Parameter isotroper Gaußscher Zufallsfelder auf der Sphäre zu schätzen, insbesondere den Hurst-Parameter einer fraktionellen Brownschen Bewegung auf der Einheitssphäre. Darüber hinaus befassen sich Shevchenko und Todino (2020) mit asymptotischen Eigenschaften solcher Zufallsfelder und beweisen einen zentralen Grenzwertsatz für sogenannte Needle-Koeffizienten - ein Ergebnis, das für statistische Analysen der Hintergrundstrahlung in der Kosmologie von hoher Relevanz ist (siehe z.B. Marinucci und Peccati 2011).

In Belomestny et al. (2019a) untersuchen wir die Schätzung der Kovarianzmatrix eines p -dimensionalen normalen Zufallsvektors auf der Grundlage von n unabhängigen, durch additives Rauschen verfälschten Beobachtungen. Es wird nur eine allgemeine nichtparametrische Annahme über die Verteilung des Rauschens getroffen, ohne die Kovarianzmatrix durch Sparsity einzuschränken. Für dieses hochdimensionale semiparametrische Entfaltungsproblem schlagen wir adaptive spektrale Schwellenwertschätzer vor, etablieren eine Orakel-Ungleichung für diese Schätzer unter Modellfehlspezifikation und leiteten nicht asymptotische Minimax-Konvergenzraten ab. Ebenfalls angesprochen wird die auf indirekten Beobachtungen basierende Schätzung von Matrizen mit niedrigem Rang, und die Verallgemeinerung auf elliptische Verteilungen.

Im Rahmen dieses Moduls untersuchen Belomestny et al. (2021a) auch das Problem der Dichteentfaltung unter allgemeinen Annahmen über die Messfehlerverteilung. Normalerweise werden Entfaltungsschätzer mit Hilfe von Fourier-Transformationsverfahren konstruiert, und es wird angenommen, dass die charakteristische Funktion der Messfehler keine Nullstellen auf der reellen Linie hat. Diese Annahme ist ziemlich streng und wird in vielen interessanten Fällen nicht erfüllt. Wir haben eine neue Methode zur Konstruktion optimaler Dichte-Entfaltungsschätzer im allgemeinen Rahmen entwickelt, die verschwindende und nicht verschwindende charakteristische Funktionen der Messfehler abdeckt. Wir leiten obere Schranken für das Risiko der vorgeschlagenen Schätzer ab und geben hinreichende Bedingungen an, unter denen Nullen der entsprechenden charakteristischen Funktion keine Auswirkungen auf die Schätzgenauigkeit haben. Darüber hinaus zeigen wir, dass die abgeleiteten Bedingungen auch in einigen spezifischen Problemfällen notwendig sind.

Modul 3 widmete sich der Statistik verallgemeinerter und nichtlinearer Diffusionsprozesse. Anknüpfend an unsere Ergebnisse zu fraktionellen Ornstein-Uhlenbeck-Prozessen aus Förderphase 1 und 2 (vgl. Dehling, Franke und Woerner 2017) konstruieren Shevchenko und Woerner (2021) einen Kleinste-Quadrate-Schätzer für die Driftparameter von nicht ergodischen fraktionellen Ornstein-Uhlenbeck-Prozessen mit periodischer Drift und beschreiben dessen asymptotisches Verhalten. Bemerkenswerterweise erhält man teilweise nicht Gaußsche Grenzverteilungen mit einer exponentiellen Rate. Darüber hinaus nutzt Shevchenko in ihrer Dissertation (2020) die Konstruktion des Kleinste-Quadrate-Schätzers in Dehling, Franke und Woerner (2017), um einen nichtparametrischen Driftschätzer für ergodische fraktionelle Ornstein-Uhlenbeck-Prozesse zu definieren und dessen Konsistenz im quadratischen Mittel zu beweisen.

Ein weiterer Fortschritt auf dem Gebiet fraktioneller Diffusionen ist Shevchenko und Tudor (2020) durch mehrere Schätzer für den Driftparametervektor einer mit einem Rosenblatt-Prozess getriebenen Ornstein-Uhlenbeck-Gleichung gelungen, die sich mit pfadweise Integralen definieren lassen und somit einen Übergang zu diskreten Beobachtungen ermöglichen. Dies ist eine wichtige Entwicklung im Hinblick auf praktische Anwendungen der Schätzverfahren für die

hier betrachteten Modelle. Auch für diese Schätzer haben Shevchenko und Tudor asymptotische Aussagen bewiesen.

Im Bereich Bessel- und Dunkl-Prozesse, die eng mit dem in der Finanzmathematik populären Cox-Ingersoll-Ross Modell verbunden sind, haben wir im eindimensionalen Fall in Hufnagel und Woerner (2021+) Martingale-Schätzfunktionen basierend auf Eigenfunktionen für den unbekannten Driftparameter hergeleitet und deren Effizienz untersucht. Bisher wurden Martingale-Schätzfunktionen nur im Zusammenhang mit ergodischen Diffusionen untersucht, vgl. Kessler und Sørensen (1999), Sørensen (2012). Wir konnten dieses Konzept durch die Anwendung einer Ort-Zeit-Transformation nun auch für nicht ergodische Prozesse nutzen. Des Weiteren haben wir gezeigt, dass sich diese Methode auch auf eine größere Klasse polynomialer Diffusionen anwenden lässt. Im mehrdimensionalen Fall haben Korniyk, Voit und Woerner (2019) Martingale basierend auf symmetrischen Polynomen hergeleitet, die die Grundlage für Martingalschätzfunktionen im Mehrdimensionalen bilden.

In Belomestny et al. (2021b) untersuchen wir das Problem der semiparametrischen Schätzung für eine Klasse von stochastischen McKean-Vlasov-Differentialgleichungen. Unser Ziel war es, den Driftkoeffizienten einer MV-SDE auf der Grundlage von Beobachtungen des entsprechenden Partikelsystems zu schätzen. Wir schlagen ein semiparametrisches Schätzverfahren vor, leiten die Konvergenzraten für den resultierenden Schätzer ab und zeigen, dass die erhaltenen Raten im Wesentlichen optimal im Sinne der Minimax sind.

Alle angestrebten Projektziele wurden damit im Wesentlichen erreicht. Eine Ausnahme ist Modul 4 zur Modellierung von Elektrizitätsdaten. Dieser konnte nicht wie geplant durchgeführt werden, da zum einen der Kooperationspartner Dr. Seibert von der Universität Augsburg die Universität verlassen hat und auch kein passender Ersatz für Herrn Dr. Kobe (TU Dortmund) gefunden wurde, der ebenfalls die Universität verlassen hat.

Das Projekt C5 hat besonders von Kooperationen mit C1 und C3 profitiert. Bei langzeitabhängigen Modellen haben wir die Verbindung von Methoden zeitstetiger Prozesse mit Techniken aus der Zeitreihenanalyse erfolgreich umgesetzt. Sehr fruchtbar war auch die enge Kooperation mit dem Projekt B3 im Bereich Spektralanalyse von Musikzeitreihen. Insbesondere haben wir die Verbindung von Methoden der Strukturbruchanalyse im Spektralbereich mit iterativen PCA Techniken aus Signalverarbeitung erfolgreich umgesetzt. Ebenfalls sehr produktiv war die Kooperation mit C. Tudor (Universität Lille), die durch einen vom SFB finanzierten Forschungsaufenthalt von R. Shevchenko vertieft wurde. Weiterhin hat das Projekt von Kooperation mit Herrn Dr. Panov (HSE, Moskau) und Herrn Prof. Goldenshluger (Uni Haifa) profitiert. Dabei wurden neuartige Laplace-Transformation-basierte Methoden für die Schätzung vom Levy-Maß einer zeitkontinuierlichen gleitenden Durchschnitts-Lévy-Prozessen entwickelt.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.13.2.2):

- Dehling, H., Franke, B., Woerner, J.H.C. (2017): Estimating drift parameters in a fractional Ornstein Uhlenbeck process with periodic mean, *Statistical Inference for Stochastic Processes* 20, 1-14.
- Hufnagel, N., Woerner, J.H.C. (2021+): Martingale estimation functions for Bessel processes, *Statistical Inference Stochastic Processes*.
<https://doi.org/10.1007/s11203-021-09250-8>
- Marinucci, D., Peccati, G. (2011): Random fields on the sphere: representation, limit theorems and cosmological applications, London Mathematical Society Lecture Note Series 389, *Cambridge University Press, Cambridge*.
- Kessler M, Sørensen, M (1999): Estimating equations based on eigenfunctions for a discretely observed diffusion process, *Bernoulli* 5, 299-314.
- Schnurr, A., Dehling, H. (2017): Testing for structural breaks via ordinal pattern dependence, *Journal of the American Statistical Association* 112(518), 706-720.
- Shevchenko, R. (2020): Limit theorems and statistical inference for solutions of some stochastic (partial) differential equations, *Dissertation, Fakultät für Mathematik, TU Dortmund*.
<https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/38538>
- Shevchenko, R. (2021a): On quadratic variations for the fractional-white wave equation, *Preprint*.
<https://arxiv.org/abs/2111.13659>

- Shevchenko, R. (2021b): Quadratic variations for Gaussian isotropic random fields on the sphere, *Preprint*.
<https://arxiv.org/pdf/2105.11970.pdf>
- Shevchenko, R., Todino, A.P. (2020): Asymptotic behaviour of level sets of needlet random fields, *Preprint*.
<https://arxiv.org/abs/2011.02856>
- Shevchenko, R., Tudor, C. A. (2020): Parameter estimation for the Rosenblatt Ornstein-Uhlenbeck process with periodic mean, *Statistical Inference for Stochastic Processes* 23, 227-247.
- Sinn, M., Keller, K. (2011): Estimation of ordinal pattern probabilities in Gaussian processes with stationary increments, *Computational Statistics and Data Analysis* 55, 1781-1790.
- Sørensen, M. (2012): Estimating functions for diffusion-type processes, in: Kessler, M., Lindner, A., Sørensen, M. (Hrsg.): *Statistical methods for stochastic differential equations* 124, CRC Press, Boca Raton.

2.13.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Belomestny, D., Orlova, T., Panov, V.** (2018): Statistical inference for moving-average Lévy-driven processes: Fourier-based approach, *Statistica Neerlandica* 73(1), 1-18.
- Belomestny, D., Panov, V., Woerner, J.C.H.** (2019a): Low-frequency estimation of continuous-time moving average Lévy processes, *Bernoulli* 25(2), 902-931.
- Belomestny, D.; Trabs, M., Tsybakov, A.B.** (2019b): Sparse covariance matrix estimation in high-dimensional deconvolution, *Bernoulli* 25(3), 1901-1938.
- Belomestny, D., Goldenschluger, A.** (2021a): Density deconvolution under general assumptions on the distribution of measurement errors, *Annals of Statistics* 49(21), 615-649.
- Betken, A., Buchsteiner, J., Dehling, H., Münker, I., Schnurr, A., **Woerner, J.H.C.** (2021): Ordinal patterns in long-range dependent time series, *Scandinavian Journal of Statistics* 48(3), 969-1000.
- Gairing, J., Imkeller, P., **Shevchenko, R., Tudor, C.A.** (2019): Hurst index estimation in stochastic differential equations driven by fractional Brownian motion, *Journal of Theoretical Probability* 33, 1691-1714.
- Kornyik, M., Voit, M., **Woerner, J.H.C.** (2019): Some martingales associated with multivariate Bessel processes, *Acta Mathematica Hungarica* 163, 194-212.
- Shevchenko, R., Slaoui, M., Tudor, C.A.** (2020): Generalised k-variations and Hurst parameter estimation for the fractional wave equation via Malliavin calculus, *Journal of Statistical Planning and Inference* 207, 155-180.
- Shevchenko, R., Woerner, J.H.C.** (2021+): Inference for fractional Ornstein-Uhlenbeck type processes with periodic mean in the non-ergodic case, *Stochastic Analysis and Applications*.
<https://doi.org/10.1080/07362994.2021.1942916>

b) Andere Veröffentlichungen

- Belomestny, D., Pilipauskaitė, V., Podolskij, M.** (2021b): Semiparametric estimation of McKean-Vlasov SDEs.
[arXiv:2107.00539](https://arxiv.org/abs/2107.00539).

c) Patente

Entfällt

2.13.3 Ausstattung des Teilprojekts C5

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2010 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. J. Woerner, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Do)	7		Grund- ausstattung
	2. D. Belomestny, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik/ Statistik	Fak. Mathematik (Du-E)	7		Grund- ausstattung
	3. R. Shevchenko, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Do)	8		Grund- ausstattung
	4. N. Hufnagel, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Do)	8		Grund- ausstattung
	5. S. Blömker, M.Sc., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Do)	8		Grund- ausstattung
	6. V. Krätschmer, Dr., apl. Prof.	Stochastik/ Statistik	Fak. Mathematik (Du-E)	8		Grund- ausstattung
Nichtwissen- schaftliches Personal	7. I. Rzepka, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Do)	4		Grund- ausstattung
	8. S. Kuhlmann, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Do)	4		Grund- ausstattung
	9. N. Obszanski, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Du-E)	4		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	10. B. Szozda, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Do)		PostDoc	
	11. T. Orlova, Dipl.-Math., wiss. Ang.	Stochastik/ Statistik	Fak. Mathematik (Du-E)		Doktorandin	
	12. R. Shevchenko, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Do)		Doktorandin/ PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Jeannette Woerner:*
Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2, und 3.
2. *Prof. Dr. Denis Belomestny:*
Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1, 2 und 3.
3. *Radomyra Shevchenko, M.Sc.:*
Arbeitete in Modul 2 und 3 zum Thema Schätzen in stochastischen (partiellen) DGLs.
4. *Nicole Hufnagel, M.Sc.:*
Arbeitete in Modul 3 zu Bessel- und Dunkl-Prozessen.
5. *Stefan Blömker, M.Sc.:*
Arbeitete in Modul 3 zu fraktionellen Prozessen.
6. *Prof. Dr. Volker Krätschmer:*
Unterstützte durch wissenschaftliche Beratung im Bereich Risikomanagement.
7. *Ilona Rzepka:*
Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Dortmund.
8. *Sarah Kuhlmann:*
Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Dortmund.
9. *Nicole Obzanski:*
Zuständig für Terminkoordination, Buchhaltung und Textverarbeitung in Essen.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

10. *Dr. Benedykt Szozda:*
Arbeitete in Modul 3 zum Thema Schätzen in stochastischen partiellen DGLs und Volterra Prozessen.
11. *Tatiana Orlova, M.Sc.:*
Arbeitete in Modul 1 zum Thema Schätzen von zeitkontinuierlichen gleitenden Durchschnitts-Lévy-Prozessen.
12. *Dr. Radomyra Shevchenko:*
Arbeitete in den Modulen 2 und 3 zum Thema Schätzen in stochastischen (partiellen) DGLs.

2.14.1 Allgemeine Angaben zum Transferprojekt T1

2.14.1.1 Titel

Modellwahl in Dosiswirkungsstudien unter Nichtidentifizierbarkeit

2.14.1.2 Projektleitung

Dette, Holger, Prof. Dr., *4. Mai 1961, deutsch

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Mathematik, Lehrstuhl für Stochastik

D-44780 Bochum

Telefon: 0234-32-28284

E-Mail: holger.dette@rub.de

2.14.1.3 Anwendungspartner

Novartis Pharma GmbH, Roonstr. 25, D-90429 Nürnberg

Ansprechpartner:

Dr. Christian Sieder, Head Biometrics Department, Clinical & Regulary Affairs/Medizin

Novartis Pharma GmbH, Roonstr. 25, D-90429 Nürnberg

Telefon: 0911-273-12-426

E-Mail: christian.sieder@novartis.com

Prof. Dr. Frank Bretz, Head Statistical Methodology

Novartis Pharma AG, CH-4002 Basel

Telefon: 0041 61-324-4064

E-Mail: frank.bretz@novartis.com

Novartis bietet innovative medizinische Lösungen an, um damit auf die sich verändernden Bedürfnisse von Patienten und Gesellschaften einzugehen. Novartis konzentriert sich auf drei Geschäftsfelder: innovative verschreibungspflichtige Pharmazeutika, Augenheilkunde (Ophthalmologie) und Generika. Novartis ist das einzige Unternehmen mit weltweit führenden Positionen in diesen Bereichen.

Mit Hauptsitz in Basel, Schweiz, beschäftigen die Novartis Konzerngesellschaften rund 121.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in mehr als 140 Ländern auf der ganzen Welt. Der Umsatz liegt bei 49,4 Mrd. USD (2015).

2.14.2 Entwicklung des Transferprojekts

2.14.2.1 Bericht

Gegenstand des Transferprojektes war die Umsetzung und die Überprüfung der in den ersten beiden Förderphasen entwickelten Verfahren zur Modellwahl und Versuchsplanung, um diese für den Kooperationspartner Novartis im Bereich von Dosiswirkungsstudien einsetzbar zu machen. Dabei haben wir unsere Forschungsarbeit auf eine realitätsnahe Modellierung von Dosiswirkungsbeziehungen, den Nachweis der Ähnlichkeit von verschiedenen Dosiswirkungsbeziehungen und auf eine optimale Versuchsplanung für die Modellwahl von Dosiswirkungskurven konzentriert.

In Modul 1 ("Allgemeine Verteilungen und Optimalität") haben wir zunächst ein grundlegendes statistisches Problem bei der Datenanalyse in der Phase II einer klinischen Studie untersucht: Für eine adäquate Modellierung der Dosiswirkungsbeziehung ist aus einer gegebenen Klasse von Kandidatenmodellen (vgl. Abb. 1) ein "möglichst gutes" Modell auszuwählen, mit dem dann ein Behandlungseffekt nachgewiesen werden kann. Eine wesentliche Schwierigkeit besteht in der Tatsache, dass die vom Industriepartner verwendeten Modelle nicht identifizierbare Modellparameter enthalten, so dass die Anwendung klassischer Verfahren theoretisch nur mit sehr anspruchsvollen mathematischen Methoden gerechtfertigt werden kann. Die bisher verfügbaren Verfahren (vgl. Dette et al. 2015, Baayen, Hougaard und Pipper 2015, Gutjahr und Bornkamp 2017) kommen im Gegensatz zu der häufig verwendeten MCP-Mod Methode (vgl. u.a.

Pinheiro et al. 2014) ohne Vorwissen über die unbekanntenen Modellparameter aus, setzen aber normalverteilte Fehler im Regressionsmodell voraus. Wir konnten zunächst zeigen, dass eine Erweiterung der Methodik von Gutjahr und Bornkamp (2017) auf den Fall allgemeiner Verteilungen nicht möglich ist, da die dafür benötigten "exakten" Formeln zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten mit Hilfe von "tubes" auf der Einheitssphäre nicht zur Verfügung stehen (im Fall der Normalverteilung findet man solche Formeln z.B. Hotelling 1939, vgl. auch Abb 2.).

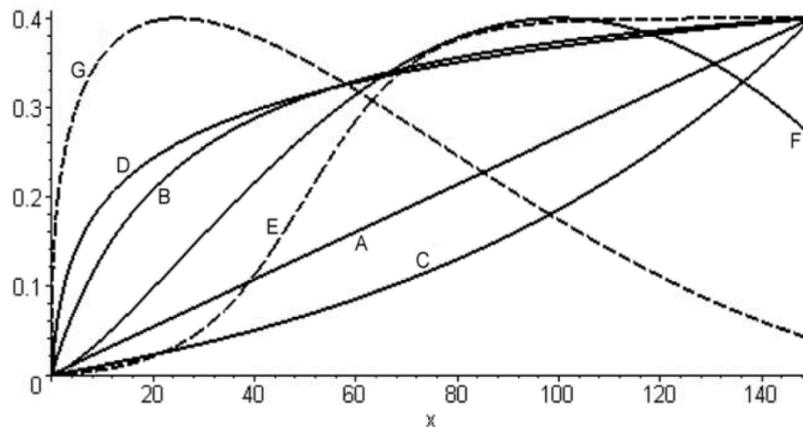


Abb. 1: verschiedene Modelle für die Beschreibung einer Dosis-Wirkungsbeziehung

Als alternativen Ansatz haben dann Bastian et al. (2021) in Zusammenarbeit in dem Teilprojekt C1 zwei neue Bootstrap-Verfahren entwickelt. Das erste Verfahren basiert im Wesentlichen auf einem parametrischen Bootstrap (mit einer zusätzlichen Nebenbedingung), während beim zweiten Verfahren die Bootstrap-Stichproben direkt aus der asymptotischen Verteilung der Modellparameter gezogen werden. Beide Methoden können für Binomial-, Negativ-Binomial- und Weibull-Verteilung verwendet werden, und ein Vergleich zeigt leichte Vorteile für den parametrischen Bootstrap. Diese Verfahren benötigen kein Vorwissen über die unbekanntenen Modellparameter und verbessern die mittlerweile von der European Medical Agency (EMA) qualifizierten (EMA/CHMP/SAWP/757052/2013, 2014), und von der U.S. Food and Drug Administration (FDA) als "fit-for-purpose" eingestufte Methode MCP-Mod. (<http://www.fda.gov/downloads/Drugs/DevelopmentApprovalProcess/UCM508700.pdf>, 2016)

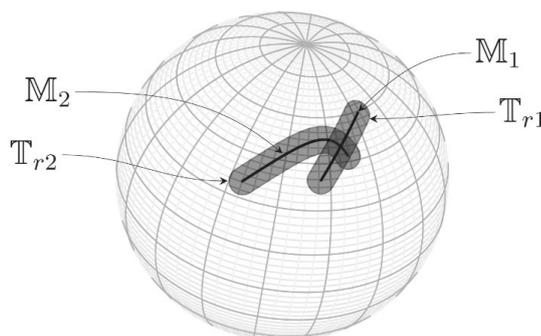


Abb. 2: "Tubes" für Berechnung der exakten Verteilung des LR-Tests bei Normalverteilungsannahme

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschungsarbeiten war die Entwicklung von effizienten Verfahren für den Nachweis der Ähnlichkeit von Dosiswirkungskurven. Diese Forschungsrichtung ergab sich, weil wir in den Diskussionen mit den Kooperationspartnern von Novartis festgestellt haben, dass die Resultate des Teilprojekts C1 aus der zweiten Förderungsperiode auch für Wissenschaftler der European Medicines Agency (EMA) und des *Institut national de la santé et de la recherche médicale* (Inserm) von Interesse seien könnten. Unsere Kooperationspartner haben auch die entsprechenden Kontakte vermittelt. Hier konnten die Ergebnisse von Dette et al. (2018) aus der zweiten Förderungsphase des SFB verwenden, und gemeinsam mit den Kollegen von Novartis neue und effiziente Verfahren entwickeln, durch die man die Ähnlichkeit

von Dosiswirkungskurven nachweisen kann. Zunächst erweitern Bretz et al. (2018) die Methodik aus Liu et al. (2009) und konstruieren einen Test auf Ähnlichkeit für die Hypothesen

$$H_0: d_\infty(m_1, m_2) > e \quad H_1: d_\infty(m_1, m_2) \leq e$$

mit Hilfe von Konfidenzbereichen. Hier bezeichnen m_1 und m_2 (parametrische) Modelle für die Dosiswirkungskurven in zwei Stichproben,

$$d_\infty(m_1, m_2) = \sup_{x \in X} |m_1(x) - m_2(x)|$$

die maximale Differenz zwischen den beiden Kurven über den Dosisbereich X und e ein Schwellenwert, der angibt, ab wann man die Modelle als ähnlich bezeichnet. In weiteren Schritten wurden dann aufbauend auf den Arbeiten im Teilprojekt C1 (vgl. Dette et al. 2018) neue und effizientere Bootstrap-Tests für die oben spezifizierten Hypothesen entwickelt. Dabei standen insbesondere Modelle mit einem gemeinsamen Placebo Effekt (vgl. Möllenhoff et al. 2020) und Modelle, in denen neben der Dosiswirkung auch Nebenwirkungen modelliert werden (vgl. Möllenhoff et al. 2021) im Fokus der Untersuchungen.

Mit Kollegen von der EMA haben wir außerdem diese Resultate erweitert, um Lösungsprofile (dissolution profiles) zu vergleichen (vgl. Möllenhoff et al. 2018 und Collignon et al. 2019). Gleichzeitig haben wir gemeinsam mit Kollegen vom Inserm und der Food and Drug Administration (FDA) Methoden für Modelle mit zufälligem Parameter entwickelt (vgl. Möllenhoff et al. 2020 und Loingeville et al. 2020). Die Kollegen von Novartis haben uns bei diesen Forschungsarbeiten unterstützt, erscheinen aber auf diesen Publikationen nicht, da die Behörden (EMA und FDA) den Eindruck vermeiden wollten, dass Pharmaunternehmen einen Einfluss auf die mit den Universitäten durchgeführten Forschungsarbeiten genommen haben.

Modul 2 ("Versuchsplanung"): Gemeinsam mit dem Teilprojekt C1 und C2 wurde die in den bisherigen Förderphasen des SFBs entwickelte Methodik der optimalen Versuchsplanung zur Modellwahl auf die in Dosiswirkungsstudien verwendeten Modelle erweitert. Im Gegensatz zu den bisher in der Literatur vorgeschlagenen Methoden (vgl. z.B. Stigler 1971, López-Fidalgo, Tommasi und Trandafir 2007, Tommasi und López-Fidalgo 2010) haben wir uns auf Optimalitätskriterien konzentriert, die besser die spezifischen Aspekte von Modellwahlverfahren (wie z.B. AIC oder BIC, vgl. Claeskens and Hjort 2008) reflektieren. Dabei wurden zunächst verschachtelte Modelle (hyperbolic Emax, EMAX und Michaelis Menten) untersucht, in denen sich ein Modell als Spezialfall des anderen ergibt, und optimale Versuchspläne für model-averaging Schätzer entwickelt (vgl. Alhorn, Schorning und Dette 2019). Bei diesem Verfahren wird für ein Zielfunktional zunächst in jedem Modell ein Schätzwert bestimmt und dann ein gewichtetes Mittel bzgl. der verschiedenen Modelle ermittelt, wobei für in die Gewichte auch Information aus anderen Modellwahlkriterien (AIC/BIC) einfließen. Ein wichtiges Zielfunktional ist die minimale effektive Dosis, d.h. die kleinste Dosisstufe, bei der ein vorgegebener Behandlungseffekt erzielt wird. Ein optimaler Versuchsplan minimiert dann die Varianz des model-averaging Schätzers bzgl. der Wahl der Messstellen. Alhorn, Dette und Schorning (2021) erweitern dann diese Methodik auf Klassen von nicht verschachtelten Modellen. Hier minimiert der optimale Versuchsplan die mittlere quadratische Abweichung des model-averaging Schätzers.

Modul 3 ("Implementierung und Vergleich der Methoden"): Die von Bastian et al. (2021) entwickelten Bootstrap-Verfahren zur Modellwahl, um einen Behandlungseffekt zu entdecken, wurden in R implementiert und sollen langfristig in das R-package `Dose-Finding` (vgl. Bornkamp, Pinheiro und Bretz 2009) integriert werden. Die Verfahren in Möllenhoff et al. (2018) zum Nachweis der Ähnlichkeit wurden in dem R-package `simDissolution` implementiert. Die anderen Verfahren zum Vergleich von Dosiswirkungskurven sind bereits ebenfalls implementiert und sollen langfristig in das R-package `TestingSimilarity` integriert werden. In allen in Abschnitt 3.2.2 zitierten Arbeiten findet man auch einen Vergleich der neuen Methoden mit den bisher verfügbaren Verfahren.

Ein gewisses Problem bei der Umsetzung des am Anfang der Förderperiode angekündigten Arbeitsprogramms war die Covid-Pandemie ab Anfang 2020, da ab dieser Zeit kaum Treffen mit

den Kooperationspartnern in Basel stattfinden konnten, sondern die Zusammenarbeit per Videokonferenz stattfinden musste. Sehr fruchtbar war die enge Kooperation mit den anderen Teilprojekten des SFBs. So sind alle unsere Ergebnisse in enger Kooperation mit den Teilprojekten C1 und C2 entstanden. Umgekehrt hat unser Teilprojekt aber auch die Arbeiten in anderen Projekten stark beeinflusst. Insbesondere wurden die in Teilprojekt A1 und C1 durchgeführten Forschungsarbeiten zum Testen auf relevante Unterschiede in den Mittelwertfunktionen von stationären funktionalen Zeitreihen durch die Untersuchungen in T1 zur Ähnlichkeit von Dosiswirkungskurven inspiriert (vgl. Dette, Kokot und Aue 2020, Dette und Kokot 2021). Unsere Ergebnisse zu model-averaging Schätzung waren auch für einige Teilprojekte aus dem A-Bereich von Interesse.

Literatur zum Forschungsgegenstand (sofern nicht unter 2.14.2.2):

- Alhorn, K., Dette, H., Schorning, K. (2021): Optimal designs for model averaging in non-nested models, *Sankhya* 83, 745-778.
- Alhorn, K., Schorning, K., Dette, H. (2019): Optimal designs for frequentist model averaging, *Biometrika* 106(3), 665-682.
- Baayen, C., Hougaard, P., Phipper, C.B. (2015): Testing effect of a drug using multiple nested models for the dose-response, *Biometrics* 71(2), 417-427.
- Bornkamp, B., Pinheiro, J., Bretz, F. (2009), MCPMod: An R Package for the design and analysis of dose-finding studies, *Journal of Statistical Software* 29(7), 1-23.
- Claeskens, G. Hjort, N.L. (2008): Model Selection and Model Averaging, *Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics*, Cambridge University Press.
- Dette, H., Titoff, S., Volgushev, S., Bretz, F. (2015): Dose response signal detection under model uncertainty, *Biometrics* 71, 996-1008.
- Dette, H., Möllenhoff, K., Volgushev, S., Bretz, F. (2018): Equivalence of dose response curves, *Journal of the American Statistical Association* 113, 711-729.
- Gutjahr, G., Bornkamp, B. (2017): Likelihood ratio tests for a dose-response effect using multiple nonlinear regression models, *Biometrics* 73(1), 197-205.
- Hotelling, H. (1939): Tubes and spheres in n-spaces, and a class of statistical problems, *American Journal of Mathematics* 61, 440-460.
- Liu, W., Bretz, F., Hayter, A.J., Wynn, H.P. (2009). Assessing nonsuperiority, noninferiority, or equivalence when comparing two regression models over a restricted covariate region, *Biometrics* 65(4), 1279-1287.
- López-Fidalgo, J., Tommasi, C., Trandafir, P.C. (2007): An optimal experimental design criterion for discriminating between non-normal models, *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B* 69 (2), 231-242.
- Pinheiro, J., Bornkamp, B., Glimm, E., Bretz, F. (2014): Model-based dose finding under model uncertainty using general parametric models, *Statistics in Medicine* 33, 1646-1661.
- Stigler, S. (1971): Optimal experimental design for polynomial regression, *Journal of the American Statistical Association* 66, 311-318.
- Tommasi, C., López-Fidalgo, J. (2010): Bayesian optimum designs for discriminating between models with any distribution, *Computational Statistics & Data Analysis* 54(1), 143-150.

2.14.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung und Buchveröffentlichungen

- Bretz, F., Möllenhoff, K., Dette, H., Liu, W., Trampisch, M.** (2018): Assessing the similarity of dose response and target doses in two non-overlapping subgroups, *Statistics in Medicine* 37(5), 722-738.
- Collignon, O., Möllenhoff, K., Dette, H.** (2019): Equivalence analyses of dissolution profiles with the Mahalanobis distance: a regulatory perspective and a comparison with a parametric maximum deviation-based approach, *Biometrical Journal* 61(3), 779-782.
- Dette, H., Kokot, K., Aue, A.** (2020): Functional data analysis in the Banach space of continuous functions, *Annals of Statistics* 48(2), 1168-1192.
- Dette, H., Kokot, K.** (2021): Bio-equivalence tests in functional data by maximum deviation, *Biometrika* 108(4), 895-913.
- Loingeville, F., Bertrand, J., Nguyen, T.T., Sharan, S., Feng, K., Sun, W., Han, J., Grosser, S., Zhao, L., Fang, L., Möllenhoff, K., Dette, H., Mentré, F.** (2020): New model-based bioequivalence statistical

approaches for pharmacokinetic studies with sparse sampling, *American Association of Pharmaceutical Scientists Journal* 22, 141.

Möllenhoff, K., Dette, H., Bretz, F. (2021): Equivalence tests for binary efficacy-toxicity responses, erscheint in: *Biostatistics*.

<https://arxiv.org/abs/1910.08769>

Möllenhoff, K., Bretz, F., Dette, H. (2020): Equivalence of regression curves sharing common parameters, *Biometrics* 76(2), 518-529.

Möllenhoff, K., Loingeville, F., Bertrand, J., Nguyen, T.T., Sharan, S., Zhao, L., Fang, L., Sun, G., Grosser, S., Mentré, F., Dette, H. (2020): Efficient model-based bioequivalence testing, *Biostatistics* 23(1), 314-327.

Möllenhoff, K., Dette, H., Kotzagiorgis, E., Volgushev, S., Collignon, O. (2018): Regulatory assessment of drug dissolution profiles comparability via maximum deviation, *Statistics in Medicine* 37(20), 2968-2981.

b) Andere Veröffentlichungen

Bastian, P., Dette, H., Kokot, K., Bornkamp, B., Bretz, F. (2021): Dose response signal detection by parametric and least squares bootstrap, *SFB 823 Discussion Paper* 17/21.

c) Patente

Entfällt

2.14.3 Ausstattung des Transferprojekts T1

Das Teilprojekt wurde seit Juli 2017 im Sonderforschungsbereich gefördert.

	lfd. Nr., Name, akad. Grad, Dienststellung	engere Fach- zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	Projektmitarbeit in Wochenstunden	Kategorie	Finanzierungs- quelle
<i>Vorhandenes Personal</i>						
Wissen- schaftliches Personal	1. H. Dette, Prof. Dr., Univ.-Prof.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	5		Grund- ausstattung
	2. K. Möllenhoff, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)	10		Grund- ausstattung
Nichtwiss. Personal	3. M. Stein, Verw. Ang.		Fak. Mathematik (Bo)	3		Grund- ausstattung
<i>Anwendungspartner</i>						
Wissen- schaftliches Personal	4. B. Bornkamp, Dr.	Statistik	Novartis	4		Grund- ausstattung
	5. F. Bretz, Priv.-Doz. Dr.	Statistik	Novartis	2		Grund- ausstattung
<i>Mit bewilligten Mitteln finanziertes Personal</i>						
Wissenschaftl. Personal	6. K. Kokot, Dr., wiss. Ang.	Stochastik	Fak. Mathematik (Bo)		Doktorand/ PostDoc	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (vorhandene Mittel):

1. *Prof. Dr. Holger Dette:*

Leitete das Projekt und bearbeitete die Module 1 – 3.

2. *Dr. Kathrin Möllenhoff:*

Arbeitete mit H. Dette in Modul 1 und 3 zu Ähnlichkeit von Dosis-Wirkungskurven und zur Implementierung der entwickelten Methoden.

3. *Martina Stein:*

Zuständig für logistische und sekretariatsmäßige Unterstützung in Bochum.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (Anwendungspartner):

4. *Dr. Björn Bornkamp:*

Unterstützte die Arbeiten im Bereich Biostatistik, insbesondere in den Bereichen Dosisfindungsstudien und adaptiver Versuchsplanung.

5. *Prov.-Doz. Dr. Frank Bretz:*

Unterstützte die Arbeiten durch seine Expertise bei Bayes-Methoden und pharmakokinetischen Modellierungsansätzen.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die letzte Förderperiode (bewilligte Mittel):

6. *Dr. Kevin Kokot:*

Arbeitete mit H. Dette in den Modulen 1 – 3.

B Programmspezifischer Teil

1 Übersicht zu Teilprojekten und finanzielle Ausstattung

Projektbereich A: Ökonometrie

TP	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Teilprojektleitende, Institut, Ort	Projektlaufzeit
A1	Zeitvariable Abhängigkeitsstrukturen in den Renditen risikobehafteter Kapitalanlagen	Ökonometrie, Empirische Kapitalmarktforschung, Mathematische Statistik	Prof. Dr. W. Krämer, Fakultät Statistik, TU Dortmund Prof. Dr. H. Dette, Fakultät für Mathematik, RU Bochum Prof. Dr. V. Golosnoy, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, RU Bochum (ab 07/17) JProf. Dr. D. Wied, Fakultät Statistik, TU Dortmund (von 7/13 bis 04/16) Dr. R. Weißbach, Fakultät Statistik, TU Dortmund (bis 10/09)	07/2009 - 12/2021
A3	Dynamische Modellierung von Produktionstechnologien	Ökonometrie, Empirische Energie- und Wirtschaftsforschung	Prof. Dr. Ch.M. Schmidt, RWI, Essen Prof. Dr. M. Frondel, RWI, Essen Prof. Dr. M. Wagner, Fakultät Statistik, TU Dortmund (von 07/13 bis 10/19)	07/2009 - 12/2021
A4	Faktorallokation und Preisbildung bei aggregierten Risiken auf Finanzmärkten	Makro-ökonomische Theorie, Ökonometrie	Prof. Dr. L. Linnemann, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, TU Dortmund Prof. Dr. Ch. Hanck, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Duisburg-Essen (ab 07/17) Prof. Dr. M. Wagner, Fakultät Statistik, TU Dortmund (von 07/13 bis 10/19) Prof. Dr. W. Krämer, Fakultät Statistik, TU Dortmund (bis 06/13) Prof. Dr. A. Schabert, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, TU Dortmund (bis 04/13)	07/2009 - 12/2021
A5	Tarifvertragliche Bindung, effiziente Verhandlungen und Beschäftigungsdynamik	Arbeitsmarktforschung, Empirische Wirtschaftsforschung, Verhandlungstheorie	Prof. Dr. K. Kraft, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, TU Dortmund Prof. Dr. P. Jung, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, TU Dortmund (ab 07/17) Prof. Dr. W. Leininger, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, TU Dortmund (bis 06/17)	07/2009 - 12/2021
A6	Calibration Errors in Risk Management	Stochastische Prozesse, Finanzmathematik	Prof. Dr. D. Belomestny, Fachbereich Mathematik, Universität Duisburg-Essen	03/2011 - 06/2013
A7	Statistische Modellierung von Abhängigkeiten in der Finanzökonomie mittels Copulas	Ökonometrie, Empirische Kapitalmarktforschung, Mathematische Statistik	Prof. Dr. A. Bücher, Fakultät für Mathematik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf JProf. Dr. G.N.F. Weiß, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, TU Dortmund (bis 04/16) Prof. Dr. P.N. Posch, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, TU Dortmund (ab 07/17)	07/2013 - 12/2021

Projektbereich B: Technometrie

TP	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Teilprojektleitende, Institut, Ort	Projektlaufzeit
B1	Modellierung und Kontrolle thermodynamischer Beschichtungsprozesse	Werkstofftechnik, Industrielle Statistik, Technometrie	Prof. Dr. W. Tillmann, Fakultät Maschinenbau, TU Dortmund Prof. Dr. S. Kuhnt, Fachbereich Informatik, FH Dortmund	07/2009 – 12/2021
B2	Charakterisierung des dynamischen Prozessverhaltens bei der inkrementellen Blechumformung	Produktionstechnik, inkrementelle Blechumformung, Statistische Versuchsplanung	Prof. Dr. J. Kunert, Fakultät Statistik, TU Dortmund Prof. Dr. A. E. Tekkaya, Fakultät für Maschinenbau, TU Dortmund Prof. Dr. A. Brosius, Fakultät für Maschinenbau, TU Dortmund (bis 07/12)	07/2009 – 06/2013
B3	Statistische Modellierung zeitlich und spektral hoch aufgelöster Audio-daten in Hörhilfen	Statistische Signalanalyse, Musik- und Sprachsignalverarbeitung, nichtparametrische Statistik, Hörhilfen	Prof. Dr. R. Martin, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, RU Bochum Prof. Dr. D. Belomestny, Fachbereich Mathematik, Universität Duisburg-Essen (ab 06/17) Prof. Dr. C. Weihs, Fakultät Statistik, TU Dortmund (bis 06/17)	07/2009 – 12/2021
B4	Statistische Prozessmodellierung bei der Bearbeitung inhomogener mineralischer Untergründe	Spanende Fertigung, Werkstofftechnik, Statistische Versuchsplanung und Modellierung	Prof. Dr. D. Biermann, Fakultät Maschinenbau, TU Dortmund Prof. Dr. W. Tillmann, Fakultät Maschinenbau, TU Dortmund Prof. Dr. Ch.H. Müller, Fakultät Statistik, TU Dortmund (ab 07/17) Prof. Dr. C. Weihs, Fakultät Statistik, TU Dortmund (bis 06/17)	07/2009 – 12/2021
B5	Statistische Methoden für Schädigungsprozesse unter zyklischer Beanspruchung	Konstruktiver Ingenieurbau, Bayes-Statistik, Robuste Statistik	Prof. Dr. Ch.H. Müller, Fakultät Statistik, TU Dortmund Prof. Dr. K. Ickstadt, Fakultät Statistik, TU Dortmund Prof. Dr. R. Maurer, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, TU Dortmund	07/2013 – 12/2021
B6	Robuste Analyse hydrologischer Zeitreihen mit Anwendung für die hochwasserstatistische Regionalisierung	Hydrologie, Zeitreihenanalyse, Extremwertstatistik, Robuste Statistik	Prof. Dr. R. Fried, Fakultät Statistik, TU Dortmund Prof. Dr. A. Schumann, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, RU Bochum	07/2013 – 06/2017

Projektbereich C: Theorie/Methodik

TP	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Teilprojektleitende, Institut, Ort	Projektlaufzeit
C1	Modellwahl und dynamische Abhängigkeitsstrukturen	Zeitreihenanalyse, Modellwahl, Mathematische Statistik	Prof. Dr. H. Dette, Fakultät für Mathematik, RU Bochum Prof. Dr. H. Dehling, Fakultät für Mathematik, RU Bochum (ab 07/13) Prof. Dr. A. Rohde, Fakultät für Mathematik, RU Bochum (von 07/13 bis 11/16) Prof. Dr. U. Gather, Fakultät Statistik, TU Dortmund (bis 06/13) Prof. Dr. M. Hallin, Université libre de Bruxelles CP 120, ECARES Bruxelles (bis 06/13)	07/2009 – 12/2021
C2	Optimale Versuchsplanung für dynamische statistische Modelle	Optimale Versuchsplanung, Dynamische Prozesse	Prof. Dr. H. Dette, Fakultät für Mathematik, RU Bochum Prof. Dr. J. Kunert, Fakultät Statistik, TU Dortmund Prof. Dr. C. Weihs, Fakultät Statistik, TU Dortmund (bis 06/17)	07/2009 – 12/2021
C3	Analyse von Strukturbrüchen in Prozessdaten	Mathematische Statistik, Stochastik, Zeitreihenanalyse, Prozesskontrolle	Prof. Dr. H. Dehling, Fakultät für Mathematik, RU Bochum Prof. Dr. R. Fried, Fakultät Statistik, TU Dortmund	07/2009 – 12/2021
C4	Rekonstruktion zeitvariabler Verteilungen in statistischen inversen Problemen	Inverse Probleme, Angewandte Statistik, Mathematische Statistik	Prof. Dr. Dr. W. Rhode, Fakultät Physik, TU Dortmund Priv.-Doz. Dr. N. Bissantz, Fakultät für Mathematik, RU Bochum Dr. M. Birke, Fakultät für Mathematik, RU Bochum (bis 10/11)	07/2009 – 06/2017
C5	Statistik komplexer stochastischer Modelle in der Finanzmathematik	Mathematische Statistik, Stochastische Prozesse, Finanzmathematik	Prof. Dr. J. H. C. Woerner, Fakultät für Mathematik, TU Dortmund Prof. Dr. D. Belomestny, Fachbereich Mathematik, Universität Duisburg-Essen (ab 07/13) Prof. Dr. H. Dehling, Fakultät für Mathematik, RU Bochum (bis 06/13) Dr. B. Franke, Fakultät für Mathematik, RU Bochum (bis 06/13)	07/2010 – 12/2021

Projektbereich T: Transfer

TP	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Teilprojektleitende, Institut, Ort	Projektlaufzeit
T1	Modellwahl in Dosiswirkungsstudien unter Nicht-identifizierbarkeit	Mathematische Statistik, Biometrie	Prof. Dr. H. Dette, Fakultät für Mathematik, RU Bochum	07/2017 – 12/2021

Beteiligte Einrichtungen:

- **TU Dortmund**
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen,
Fakultät für Mathematik,
Fakultät Maschinenbau,
Fakultät Physik,
Fakultät Statistik,
Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät.
- **Ruhr-Universität Bochum**
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik,
Fakultät für Mathematik,
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft.
- **Universität Duisburg-Essen**
Fachbereich Mathematik,
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.
- **Fachhochschule Dortmund**
Fachbereich Informatik.
- **Heinrich Heine Universität Düsseldorf**
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät.

Außeruniversitäre Einrichtung:

- **RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, Essen.**

Ausländisches Forschungszentrum:

- **ECARES – European Center for Advanced Research in Economics and Statistics.**

Die folgende Tab. 1 beziffert die bewilligte Ergänzungsausstattung des SFB 823 für jedes Jahr seiner Förderung. Die Nachanträge der TP A6 und C5 und die damit verbundenen, zusätzlichen bewilligten Mittel sind in der Ausstattung der entsprechenden Haushaltsjahre berücksichtigt worden.

Tab. 1: Bewilligte Ergänzungsausstattung des SFB 823

Haushalts-jahr	Personal-mittel	Sachmittel	Investitions-mittel	Globale Mittel	Gesamt
2009/2	650,7	129,9	100,0	-	880,6
2010	1.351,5	267,6	-	-	1.619,1
2011	1.450,5	331,3	-	-	1.781,8
2012	1.460,3	295,4	-	-	1.775,7
2013/1	730,3	145,0	-	-	875,3
2013/2	846,5	110,2	99,7	49,5	1.105,9
2014	1.732,2	160,4	30,0	128,0	2.050,6
2015	1.782,0	156,2	-	185,0	2.123,2
2016	1.814,4	154,5	-	185,0	2.153,9
2017/1	927,5	73,3	-	192,5	1.193,3
2017/2	973,4	120,1	36,2	37,5	1.167,2
2018	1.818,8	156,4	-	160,0	2.135,2
2019	1.866,4	171,4	-	180,0	2.217,8

2020	1.920,0	93,6	-	165,0	2.178,6
2021/1	978,9	121,0	-	605,3	1.705,2
Summe	20.303,4	2.486,3	265,9	1.887,8	24.943,4

(Alle Angaben in 1.000 €)

2 Strukturwirkung des Sonderforschungsbereichs am Standort

2.1 Schwerpunktbildung und internationale Sichtbarkeit

Der SFB 823 hat vielfältige Auswirkungen auf die Wissenschaftsstruktur des Standorts Dortmund gehabt. So hat er die Existenz der Fakultät Statistik garantiert, der einzigen eigenständigen ihrer Art im ganzen deutschen Sprachgebiet. Als kleinste Fakultät der TU Dortmund war sie immer wieder Bestrebungen nach Zusammenlegungen mit anderen Fakultäten ausgesetzt; diese waren mit dem Hinweis auf den SFB leicht abzubiegen. Die hier Forschenden sehen in der Eigenständigkeit der Fakultät einen sonst nirgendwo in Deutschland vorhandenen Standortvorteil und Effizienzgewinn. Auch hat der SFB 823 eine vorgezogene Wiederbesetzung der Professur des Sprechers bewirkt; allein schon die Wiederbesetzung selbst wäre ohne den SFB möglicherweise unsicher gewesen, genauso wie die fachnahe Nachfolge des nach Österreich gewechselten Projektleiters Martin Wagner. Ganz wesentlich von SFB-Beteiligten vorangetrieben wurde auch die Einrichtung des neuen englischsprachigen Master-Studiengangs Econometrics – der erste seiner Art in der Bundesrepublik – sowie die Einrichtung des Kompetenzfeldes "Empirische Wirtschaftsforschung" im Rahmen der Universitätsallianz Metropole Ruhr. Beides hat die Angewandten Wirtschaftswissenschaften an den beteiligten Universitäten deutlich gestärkt und diese innerhalb der Sozialwissenschaften zu einem Schwerpunkt ausgewiesen. Ferner wurde mit Hilfe der SFB-Förderung im Jahr 2020 am RWI die Forschungsgruppe "Prosoziales Verhalten" unter Leitung von Mark Andor (A3) etabliert.

In der Ruhr-Universität Bochum wurde im Jahr 2011 zusätzlich eine Professur (W2) für mathematische Statistik ausgeschrieben und besetzt (Angelika Rhode), die von 2013 bis 2017 im SFB 823 Teilprojektleiterin war. Außerdem wurden in Bochum durch die Universitätsleitung zwei 75 %-Stellen TVL E13 als zusätzliche Grundausstattung für den SFB zur Verfügung gestellt.

Auch die Fakultät für Mathematik der TU Dortmund hat während der Laufzeit des Sonderforschungsbereichs eine Reihe von Professuren neu besetzt. In den meisten Fällen handelte es sich zwar um Nachfolgen nach Renteneintritt, aber die Fakultät hat dabei stets die Ausrichtungen und Schwerpunkte aktueller Entwicklungen in Forschung und Lehre angepasst und so auch strukturelle Aktualisierungen vorgenommen. Seit 2009 wurde die Hälfte der W2/W3-Professuren der Fakultät neu besetzt; einige Professuren wurden und werden vorweg wiederbesetzt (Zusatzmittel für die doppelten Abiturjahrgänge, Tenure-Track-Programm). Besondere Schwerpunkte und Akzente werden zudem durch die Einrichtung von Juniorprofessuren gesetzt (u.a. Stochastik, Numerik, Optimierung, Angewandte Analysis). Als eine thematische Klammer haben sich in den letzten Jahren u.a. Partielle Differentialgleichungen (PDE) herausgebildet, wobei mit Blick auf den SFB Stochastische PDEs hervorzuheben sind. Die personelle (Grund-)Ausstattung konnte u.a. auch durch Zusatzmittel für die Lehre gesteigert werden, so dass die Arbeitsgruppen (auch durch

andere Projekte) fortlaufend gewachsen sind und insbesondere die Nachwuchswissenschaftler auf verschiedenen Karrierestufen kollegial zusammenarbeiten und sich austauschen können.

Wie in der Statistik üblich, geschah die nationale und internationale Präsentation der im SFB erarbeiteten Forschungsergebnisse in erster Linie durch Publikationen in Fachzeitschriften. Hier waren wir mit 867 Publikationen in referierten Journalen sehr erfolgreich, viele davon in den Topjournalen ihrer jeweiligen Disziplin. International sichtbar wurde der SFB und sein Standort Dortmund aber auch durch einen regen Personalaustausch und durch die vom SFB (mit)organisierten großen Konferenzen, siehe Tabelle 1.4 im wissenschaftlichen Teil dieses Abschlussberichts. Die SFB-initiierte Konferenzreihe "New Developments in Econometrics and Time Series" etwa zählt sicher zu den derzeit höchstklassigen in der Statistik überhaupt, eine Teilnahme gilt sozusagen als Ritterschlag. Diese Reihe wird auch nach Auslaufen des SFBs weitergeführt und stellt damit einen wichtigen Teil seines wissenschaftlichen Fußabdrucks dar.

Beim Thema "Sichtbarkeit des SFBs" sollte insbesondere die Funktion des Projektleiters Christoph M. Schmidt als Vorsitzender des Sachverständigenrates für die Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2013–2020) hervorgehoben werden. "Hier ... konnte ich die Arbeit unseres SFB-Projektes hervorragend einbringen. Ganz konkret gilt das etwa für die Energiewende, denn unser Projekt beschäftigt sich mit der Modellierung von Substitutionsbeziehungen in Produktionsprozessen, bei denen im dynamischen Kontext großskalige Investitionen vonnöten sind. Besonders wichtig ist dabei eine verlässliche Schätzung der Anreizwirkung von Preisvariationen auf die Investitionsintensität" (Zitat aus dem Interview mit Christoph M. Schmidt aus dem SFB-Infobrief Nr. 19).

2.2 Personelle Entwicklung

In der nachfolgenden Tab. 2 findet sich eine Übersicht der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die seit Beginn des SFBs neu an einem der SFB-Standorte (Dortmund, Bochum, Duisburg-Essen oder Düsseldorf) hinzugekommen sind.

Tab. 2: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Standort

TP	Art der Stellung	1. Förderperiode 2009/2 – 2013/1		2. Förderperiode 2013/2 – 2017/1		3. Förderperiode 2017/2 – 2021/1	
		M	W	M	W	M	W
A1	(JProf. Wied) Juniorprofessur	-	-	1	-	-	-
A3, A4	(Prof. Wagner) W3/C4	-	-	1	-	-	-
A4	(Prof. Hanck) W3/C4	-	-	-	-	1	-
A5	(Prof. Jung) W3/C4	-	-	-	-	1	-

TP	Art der Stellung	1. Förderperiode 2009/2 – 2013/1		2. Förderperiode 2013/2 – 2017/1		3. Förderperiode 2017/2 – 2021/1	
		M	W	M	W	M	W
A6, B3, C5	(Prof. Belomestny) W3/C4	1	-	-	-	-	-
A7	(Prof. Bücher) W3/C4	-	-	1	-	-	-
A7	(JProf. Weiß) Juniorprofessur	-	-	1	-	-	-
A7	(Prof. Posch) W3/C4	-	-	-	-	1	-
B4, B5	(Prof. Müller) W3/C4	-	-	-	1	-	-
B5	(Prof. Ickstadt) W3/C4	-	-	-	1	-	-
B5	(Prof. Maurer) W3/C4	-	-	1	-	-	-
B6	(Prof. Schumann) W3/C4	-	-	1	-	-	-
C1	(Prof. Rohde) W2/C3	-	-	-	1	-	-
C5	(Prof. Woerner) W3/C4	-	1	-	-	-	-
C5	(PD Franke) Nachwuchs- gruppenleitung	1	-	-	-	-	-

2.3 Wissenschaftlicher Nachwuchs

Die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses wurde im SFB 823 von Beginn an sehr ernst genommen. So haben wir - durchaus nicht ohne Widerstände - den eigenen Betriebskindergarten "9 x kluge Zwerge" etabliert und damit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern die Koordination von Familie und Beruf erleichtert. Ferner hatten Nachwuchskräfte die Möglichkeit, in einer eigens dafür gegründeten und von ihnen selbst geleiteten "SFB Akademie" akademische Sekundärtugenden wie das Auftreten auf Konferenzen, das Verfassen wissenschaftlicher Abhandlungen oder Konfliktmanagement in Teams zu üben. Dazu wurden auf Kosten des SFBs externe Referenten eingestellt. Die folgenden Seminare (chronologisch sortiert) fanden statt:

- Stimm- und Sprechtraining (10.12.2009)
- Zwischen Chaos und Perfektion – Dissertation als Projekt managen (18.01. und 12.02.2010)
- Stimm- und Sprechtraining (19.08.2010)

- Scientific Presentation (29.11.2010)
- Small talk as icebreaker: Getting into conversation confidently (02.08.2011)
- Team work & leadership competencies in academia and beyond: Youngster - team player – keyplayer (03.08.2011)
- Speed-Reading (27.09.2012)
- Berufs- und Karriereplanung für Promovenden (07.-08.10.2013)
- Kommunikation & Präsentation im wissenschaftlichen Kontext (17.-18.09.2014)
- Konfliktmanagement (19.09.2014)
- Stimm- und Sprechtraining (21.09.2015)
- Zeitmanagement in der Promotion (22.09.2015)
- Networking für Wissenschaftler (23.09.2015)
- Gesprächsführung und Beratungskompetenz (05.09.2016)
- Team- und Führungskompetenz in der Wissenschaft und außerhalb (06.-07.09.2016)
- Promotionsbegleitende Karrierestrategien (27.09.2017)
- Bewerbung in & außerhalb der Wissenschaft (28.09.2017)
- Wissenschaftliches Schreiben (06.12.2017)
- Stimme & Sprache: Wie das Reden leichter und wirkungsvoller gelingt (24.09.2018)
- Hochschuldidaktik: Wider die gähnende Lehre (25.09.2018)
- Konfliktmanagement in der Wissenschaft: Vom Kleinkrieg zur Konfliktkultur (26.09.2018)
- Kommunikation & Präsentation im akademischen Kontext (03.09.2019).

Parallel dazu hat die SFB-Akademie auch Einführungen in Fachthemen angeboten, etwa einen Kurs in Versuchsplanung von Projektleiter Claus Weihs. Diese zwanglose – da "bonzenfreie" - Austausch- und Weiterbildungsplattform war ein großer Erfolg; man traf sich zusätzlich in Themenzirkeln wie Finanzdaten, Strukturbruch, Versuchsplanung und Inverse Probleme, und hat so auch auf Mitarbeiterebene eine projektübergreifende Verzahnung eingeführt.

Auch im "PostDoc Coaching" hat sich der SFB 823 von Beginn an engagiert. Individuell geschah dieses durch die Einbindung von noch nicht dauerhaft beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern auf Projektleiterstellen, durch die Entsendung auf Vortragsreisen und durch eine forciert frühe Beteiligung der Projektmitarbeiterinnen und –mitarbeiter an nationalen und internationalen Fachkonferenzen, sowie institutionell über die durch die Exzellenzinitiative geförderte "Research School" in Bochum, das "Science Career Net Ruhr" und dessen "Global Young Faculty"-Programm. Unter anderem auch als Konsequenz daraus ist es uns gelungen, insgesamt 27 Nachwuchskräfte in Professuren außerhalb des SFBs zu platzieren. Das sind (in alphabetischer Reihenfolge):

Annika Betken, C3, University of Twente
 Melanie Birke, C4, Universität Bayreuth
 Bernd Bischl, B4, Ludwig-Maximilians Universität München
 Alexander Brosius, B2, Technische Universität Dresden
 Axel Bücher, A7, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
 Anne van Delft, A1/C1, Columbia University, New York
 Brice Franke, C5, Université de Bretagne Occidentale
 Benedikt Funke, C5, TH Köln

Timo Gerkmann, B3, Universität Hamburg
 Peter Grösche, A3, Hochschule Anhalt
 Jiaying Gu, C1, University of Toronto
 Falko Jüßen, A4, Bergische Universität Wuppertal
 Andreas Neuenkirch, C5, Universität Mannheim
 Vladimir Panov, C5, Humboldt-Universität zu Berlin
 Alexander Schnurr, C5, Universität Siegen
 Kirsten Schorning, C2, Technische Universität Dortmund
 Martin Schumann, A4, Maastricht University
 Eftychia Solea, A1, École Nationale de la Statistique et de l'analyse de l'information (ENSAI)
 Stephan Sommer, A3, Hochschule Bochum
 Harald Tauchmann, A3, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
 Heike Trautmann, B4, Westfälische Wilhelms-Universität Münster
 Mathias Vetter, A1, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
 Stanislav Volgushev, A1, C1, University of Toronto
 Gregor Weiß, A7, Universität Leipzig
 Rafael Weißbach, A1, Universität Rostock
 Martin Wendler, C3, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
 Dominik Wied, A1, Universität zu Köln.

Wie viele der hier aufgeführten Nachwuchskräfte davon gern bestätigen werden, geht dieser Karrieresprung zum guten Teil auf den SFB zurück. Auf diesen Erfolg als "Durchlauferhitzer" für guten wissenschaftlichen Nachwuchs sind wir ganz besonders stolz.

Die nächste, nach Formatvorlage erstellte Tabelle von Vertragslaufzeiten weist eine hohe Zahl kurzfristiger Verträge aus. Diese wurden in der Regel mehrmals verlängert.

Tab. 3: Vertragslaufzeiten aller im SFB 823 angestellten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler während der 3. Förderperiode

Vertrags- laufzeit	Anzahl der wissenschaftl. Mitarbeitenden insgesamt	Doktoranden/innen und Vergleichbare		Postdoktoranden/innen und Vergleichbare	
		M	W	M	W
bis 12 Monate	56	26	9	24	7
bis 24 Monate	28	12	7	8	2
bis 36 Monate	9	1	2	1	5
bis 48 Monate	8	5	1	2	0

Eine Übersicht über die Anzahl der abgeschlossenen Promotionen in den einzelnen Förderperioden differenziert nach Geschlecht und wissenschaftlicher Einrichtung findet sich in Tab. 4.

Tab. 4: Abgeschlossene Promotionen innerhalb der wissenschaftlichen Einrichtungen

Wissenschaftliche Einrichtung	1. Förderperiode 2009/2 – 2013/1		2. Förderperiode 2013/2 – 2017/1		3. Förderperiode 2017/2 – 2021/1	
	M	W	M	W	M	W
Fak. Architektur und Bauingenieurwesen (Do)	-	-	1	-	-	-
Fak. Mathematik (Do)	-	-	3	-	-	1
Fak. Maschinenbau (Do)	-	-	2	1	1	-
Fak. Physik (Do)	1	-	-	-	-	-
Fak. Statistik (Do)	12	4	11	2	12	5
Fak. WiWi (Do)	3	-	2	-	1	1
Fak. Bau- und Umwelt-ingenieurwissenschaften (Bo)	-	-	1	-	-	-
Fak. Elektrotechnik und Informationstechnik (Bo)	1	-	1	-	-	-
Fak. Mathematik (Bo)	9	3	10	4	5	6
Fak. WiWi (Bo)	3	-	3	-	4	-
FB Mathematik (Du-E)	1	-	-	-	-	-
Fak. WiWi (Du-E)	-	-	-	-	3	-

Die Themen von Lehrveranstaltungen an den beteiligten Fakultäten der Standorte Dortmund, Bochum und Duisburg-Essen bildeten eine sehr gute Grundlage für die Forschungsgebiete des SFB 823. Ein Teil der Vorlesungen und Seminare waren bereits vor der Einrichtung des SFBs fester Bestandteil des Lehrprogramms. Zusätzlich wurden viele Lehrveranstaltungen zu aktuellen Themen mit Forschungsbezug zum SFB 823 seit 2009 in erster Linie durch den Sonderforschungsbereich und seine Mitglieder initiiert. So trug die enge Kooperation der beiden Projektleiter Claus Weihs (Statistik, TU Dortmund) und Rainer Martin (Elektrotechnik und Informationstechnik, RU Bochum) im Projekt B3 wesentlich zu einer neuen, fachübergreifenden Vorlesung mit dem Thema "Musikdatenanalyse" bei. Diese standortübergreifende Vorlesung wird auch zukünftig jährlich angeboten und führt Studierende an das Thema der Musik(signal)verarbeitung heran.

Neben der Lehre für den Bachelor- und Masterstudiengang Statistik bietet die Fakultät Statistik seit dem WS 2019/2020 zusammen mit den Fakultäten Informatik und Mathematik zahlreiche neu konzipierte Veranstaltungen für die Studenten der Studiengänge "Data Science" (deutschsprachiger Bachelor und internationaler Master) an. Und auch der an der Universitätsallianz Ruhr angesiedelte Master-Studiengang "Econometrics" hat durch die im SFB 823 vorangetriebene Vernetzung hinsichtlich seines Angebots an Lehrveranstaltungen profitieren können.

Zudem spiegelt sich die Vernetzung der Disziplinen auch in der fächerübergreifenden Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses wider. Beispielsweise werden durch die Themenwahl der Seminare und durch die ausgewählten Projekte in der Veranstaltung "Fallstudien/Case Studies" an der Fakultät Statistik die Studentinnen und Studenten sehr früh an aktuelle Forschungsfragen des SFB 823 herangeführt. So haben jährlich etwa 30 Studenten an den beteiligten Fakultäten ihre Abschlussarbeit über SFB bezogene Themen geschrieben. Dies verkürzt die Einarbeitungsphase bei späterer Mitarbeit im SFB und damit die Promotionsdauer.

2.4 Gleichstellung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und Vereinbarkeit von wissenschaftlicher Karriere und Familie

Ergänzend zu den allgemeinen Maßnahmen zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses legt der SFB 823 besonderen Wert auf die gezielte Förderung einer gleichberechtigten Teilhabe von Männern und Frauen an der Wissenschaft. Hervorzuheben sind folgende Maßnahmen; zumindest teilweise wurden damit unsere Ziele (gemessen am im Verlauf des SFBs steigenden Anteil von Frauen unter Mitarbeitern, Promovenden und Projektleitern) auch erreicht:

Die *Kindertagespflegestelle "9 x kluge Zwerge"*. Diese ging am 15. November 2011 unter großer Anteilnahme der Medien offiziell in Betrieb. Das bei der feierlichen Eröffnung am häufigsten erwähnte Wort war "Pilotprojekt". Danach haben mehrere Universitäten andernorts dieses Konzept übernehmen wollen. Die Einrichtung wird mit jährlich ca. 40.000 € (davon 12.500 € aus Mitteln der Gleichstellung) durch den SFB und mit ca. 21.000 € von anderen Drittmittelprojekten kofinanziert. Nach Ende des SFBs wird diese Kindertagespflegestelle von der Stabsstelle Chancengleichheit, Familie und Vielfalt der TU Dortmund fortgeführt. Sie ist für unter 3-jährige Kinder von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gedacht, die sich in der Qualifizierungsphase (Promotion, Habilitation etc.) in einem DFG-Projekt befinden. Die Kinderbetreuung wird weiterhin aus DFG-Mitteln finanziert und ist daher Beschäftigten in DFG-Projekten vorbehalten.

Der *Dual Career Service der TU Dortmund*. Dieser arbeitet mit dem Verein windo e.V. zusammen, der sich für einen familienfreundlichen Wissenschaftsstandort Dortmund einsetzt. Sein Serviceangebot ist speziell an die Partnerinnen und Partner bzw. Familien der neu berufenen Professoren und Professorinnen gerichtet, die gemeinsam in der Region Dortmund leben und arbeiten wollen.

Das Programm *Mentoring³*. Dieses wurde speziell zur Förderung von Frauen an der TU Dortmund gemeinsam mit den anderen UA Ruhr-Hochschulen innerhalb des *ScienceCareerNet*

Ruhr initiiert und soll Postdoktorandinnen/Habilitandinnen und Doktorandinnen beim Erreichen dieses Laufbahnzieles helfen und setzt dabei auf einer Individualbetreuung durch eine erfahrene Wissenschaftlerin/einen erfahrenen Wissenschaftler, ergänzt durch ein professionelles Rahmenprogramm mit Seminaren sowie Netzwerkveranstaltungen verschiedener Art. Die folgenden Projektmitarbeiterinnen des SFBs haben daran teilgenommen: Ronja Walter, Stefanie Neimann, Katrin Knies, Marlene Doert, Kira Alhorn, Sara Schmidt und Sophie Tchanyou Ganme.

2.5 Forschungsinfrastruktur und Forschungsdaten

Ein großer Teil der für die empirischen Projekte benötigten Daten wurde über öffentlich zugängliche Datenbanken wie das sozioökonomische Panel SOEP, das IAB Betriebspanel, die deutsche Finanzdatenbank, Hoppenstedts Handbuch der deutschen Aktiengesellschaften, Compustat, Thomson Reuters Datastream oder Morningstar Document Research bezogen. Das gilt insbesondere für die Projekte des ökonomischen A-Bereiches. Hier war die Kooperation mit dem befreundeten SFB 649 "Ökonomisches Risiko" in Berlin und dessen exzellente Datenversorgung über das Berliner "Research Data Center" eine große Hilfe. In Projekt A3 wurden aber auch mit Hilfe von Umfrageinstituten Haushalte zu Energiekonsum und Mobilitätsverhalten befragt; diese Daten stehen über das Forschungsdatenzentrum (FDZ) Ruhr am SFB 823 beteiligten Leibniz-Instituts für Wirtschaftsforschung (RWI, Essen) der Allgemeinheit zur Verfügung. Das FDZ Ruhr wurde im Jahr 2010 durch den Rat für Sozial- und Wirtschaftsdaten (RatSWD) akkreditiert und orientiert seinen Leistungskatalog an dessen Kriterien; im Bereich der Forschung befasst es sich insbesondere mit Fragen der Regionalforschung und dabei insbesondere der regionalen Ungleichheit, sowie mit Analysen des Immobilienmarkts und des demographischen Wandels.

Ebenfalls allgemein verfügbar, wenn auch nicht über die Plattform des SFBs, sind von uns genutzte Daten des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung IAB, die grundsätzlich nur über Datenfernverarbeitung zugänglich sind. Nicht allgemein verfügbar sind die im SFB 823 genutzten Daten aus kommerziellen Datenbanken (Bureau van Dyck, Projekt A5) oder Daten der Kienbaum GmbH, die nur dem Lehrstuhl Kraft zur Verfügung gestellt wurden und an keine anderen externen Nutzer weitergegeben werden dürfen.

In den Ingenieurprojekten wurden Daten dagegen vorzugsweise selbst erzeugt und auf unserer Netzseite allgemein verfügbar gemacht. Insbesondere unsere mit exzellentem Aufwand erzeugten Daten zu Rissbildungen in Beton bei Brücken sind sicher auch für andere Forscher von großem Nutzen. Die betreffende Netzseite wird auch nach Ende des SFB weiter gepflegt und steht Forschern weltweit zur Verfügung.

Dort finden sich neben den bereits erwähnten Forschungsdaten auch teilprojektspezifisch entwickelte Softwarepakete wieder. Für eine langfristige Nachnutzung sind sämtliche Quellen zudem in einem nicht-kommerziellen von der TU Dortmund bereitgestellten Cloud-Speicher hinterlegt; diese Sciebo-Projektbox ist insbesondere für eine langfristige Nutzung angelegt.

2.6 Erkenntnistransfer und Öffentlichkeitsarbeit

Der Transfer der Erkenntnisse aus dem SFB 823 in andere Bereiche der Gesellschaft geschah fast notwendigerweise auf einer eher populärwissenschaftlichen Ebene. Häufige Plattformen dafür waren das Magazin *Mundo* der TU Dortmund sowie die lokale Tagespresse. Siehe etwa in *Mundo* 15/2011 "Musik in den Ohren", hier will B3-Projektleiter Rainer Martin "Hörgeräte konzerttauglich machen", oder in *Mundo* 20/2014 der vierseitige Bericht "Datenflut aus dem All" über das internationale IceCube-Projekt mit Beteiligung von C4-Projektleiter Wolfgang Rhode, um nur einige Beispiele zu nennen. Auch der Artikel "Medikamentenstudien – mit Mathe die optimale Dosis finden" von Holger Dette und Kirsten Schorning im Wissenschaftsmagazin *RUBIN* der Ruhr-Universität Bochum liefert SFB 823-Ergebnisse zur Versuchsplanung aus C2. Ebenfalls in *RUBIN* erschienen ist ein weiterer Artikel zu B3: "Wie digitale Signalverarbeitung Hörgeräte verbessert und die Kommunikation erleichtert" (Frühjahr 2011).

Auf einer überregionalen Ebene ist es uns gelungen, Ergebnisse aus dem SFB und die dahinterstehenden Köpfe in fast allen nationalen Zeitungen, Zeitschriften und Magazinen einer breiteren Öffentlichkeit zu präsentieren. Besonders Wirtschaftsthemen haben die Medien immer wieder interessiert. Siehe etwa u.a. "Der falsche Charme der Charts" (W. Krämer in der *FAZ* vom 14.07.2012); "Muster ohne Wert?" (Gastbeitrag zur Energiewende von Ch.M. Schmidt in der *WirtschaftsWoche* vom 03.06.2013); "Deflation ist noch weit weg" (W. Krämer im *Focus* 05/2015), "Kein europäisches Schatzamt!" (Ch.M. Schmidt in der *FAZ* vom 8.07.2015); "Warum sind die Investitionen so schwach?" (Ch.M. Schmidt in der *FAZ* vom 14.11.2016); "Nationale Alleingänge beim Klimaschutz bringen wenig" (Ch.M. Schmidt in der *Welt* vom 19.11.2016), "Teure Umwelt- und Gesundheitspanik" (W. Krämer in der *FAZ* vom 21.08.2017), oder "Ein sozialer Ausgleich für die Klimapolitik" (M. Frondel u. a. in der *FAZ* vom 11.10.2021). Nicht immer ist es uns dabei gelungen, den SFB 823 *expressis verbis* ins Gespräch zu bringen, aber immerhin wurden die da erzielten Ergebnisse popularisiert.

Häufig zu Gast waren SFB-Vertreter auch in Rundfunk und Fernsehen, etwa Teilprojekt B3 mit: "Formeln für die Ohren: Wie Mathematik und Statistik Hörgeräte verbessern" (*WDR 5 Leonardo* vom 22.12.2011) oder Teilprojekt A3 mit: "Energiewende: Was muss getan werden?" (*WDR 5 Morgenecho* vom 22.01.2013), siehe auch die Interviews mit Ch.M. Schmidt: "Energiewende – Was läuft schief?" (*Deutsche Welle* am 25.03.2014) und mit M. Frondel "Teurer Strom und steigender CO₂-Ausstoß" (*Deutschlandfunk* am 11.11.2013), M. Frondel "Wie viel Potential steckt im Energie-Sparen?" (*SWR 2 Forum* vom 07.08.2014) sowie W. Krämer: "Irrsinn auf dem Wohnungsmarkt" (Interview in *ZDFzoom* vom 21.09.2016), um auch hier nur eine Auswahl aufzuführen.

Auch war der SFB oft in der Fachpresse vertreten – neben einer Reihe ähnlicher Beiträge – etwa durch:

- M. Frondel: "Der Rebound-Effekt von Energieeffizienz-Verbesserungen", *Energie-wirtschaftliche Tagesfragen* 2012,
- M. Frondel, Ch.M. Schmidt und N. aus dem Moore: "Die Energiewende und der Strompreis: Von Gewinnern und Verlierern", *ifo Schnelldienst* 65 (17), 3-8 (2012),

- M. Frondel: "Versorgungssicherheit mit Strom: Kann der Markt es richten?", Wirtschaftswissenschaftliches Studium 2015.

Insgesamt elf SFB Projekte haben auch die Möglichkeit genutzt, ihre Ergebnisse in dem von Walter Krämer und Claus Weihs herausgegebenen populärwissenschaftlichen Sammelwerk "Faszination Statistik" (Springer 2019) einer breiteren Öffentlichkeit zu präsentieren. Aktuell präparieren Walter Krämer und Claus Weihs eine englische Übersetzung.

Zum Thema Unsicherheit und Risiko war SFB-Sprecher Walter Krämer ein gefragter Interviewpartner und Referent (Thünen-Vorlesung des Vereins für Socialpolitik, Grohmann-Vorlesung der Deutschen Statistischen Gesellschaft) mit ebenfalls mehreren Dutzend Beiträgen unter anderem in der *Frankfurter Allgemeinen Zeitung*, im *Focus*, in der *Wirtschaftswoche*, in der *taz* und in der *Neuen Zürcher Zeitung*. Der besseren Transmission statistischer Einsichten aller Art dient die von Walter Krämer zusammen mit Gerd Gigerenzer und Thomas Bauer im Jahr 2012 begründete Aktion "Unstatistik des Monats" sowie die von Walter Krämer eingerichtete AG "Statistical Literacy" der Deutschen Statistischen Gesellschaft.

Als weiterer Indikator für die Öffentlichkeitswirksamkeit des SFB 823 kann auch die *Cicero* Rangliste der 500 medienpräsentesten deutschen Intellektuellen angesehen werden, hier sind Walter Krämer und Christoph M. Schmidt seit Jahren Dauergäste.

Nicht ohne Öffentlichkeitswirkung blieb auch unser Brückenmonitoring in der 3. Förderphase. Damit konnte eine abgängige alte Spannbetonbrücke so lange sicher unter Verkehr gehalten werden, bis der Ersatzneubau möglich war. Dazu ist die folgende Publikation entstanden:

J. Heinrich, R. Maurer, K. Leckey, C.H. Müller, K. Ickstadt: Detektieren ermüdungsbedingter Spannstahlbrüche mittels Rissmonitoring im Versuch und am Bauwerk. *Bauingenieur*, Band 96 (2021) Nr. 3.

2.7 Interne Kooperation und Organisation

Die Verwaltung und Organisation des SFBs geschah zentral durch das Projekt Z. Dieses hat einmal jährlich ein zweitägiges Präsenztreffen aller Projekte organisiert, in der Regel mit Übernachtung in einem Hotel, in dem im Anschluss an den offiziellen Veranstaltungsteil auch persönliche Verbindungen gefestigt und Pläne für weitere Projekte geschmiedet worden sind. Zwischenzeitlich geschah die SFB-weite Kommunikation durch einen regelmäßigen Infobrief; der letzte von insgesamt 20 wurde im Januar 2022 verschickt. Zusätzlich gab es auf mittlerer Ebene zahlreiche projektübergreifende Arbeitsgruppen mit regelmäßigen Treffen zu Themen wie "Strukturbrüche", "Paneldaten mit räumlicher Korrelation" sowie "Optimale Versuchsplanung". Diese Themenzirkel haben sich als Selbstläufer etabliert, die Vorzüge dieser in der Sprache der Mitarbeiter "zwanglosen und bonzenfreien Austauschebene" waren auch den neuen SFB-Mitarbeitern direkt ersichtlich. Und auch waren die Seminare der Jungen Akademie ein gern genutztes Forum zum Austausch über Projektgrenzen hinweg.

2.8 Hinweise an die Deutsche Forschungsgemeinschaft

Der SFB 823 hat den beteiligten Lehrstühlen und Instituten aus unterschiedlichen Fakultäten der Universitätsstandorte Dortmund, Bochum, Duisburg-Essen und Düsseldorf eine herausragende Möglichkeit der interdisziplinären Zusammenarbeit und Bündelung der Forschungskompetenzen geboten. Dies kam auch der wissenschaftlichen Entwicklung der Doktoranden zugute, welche sich durch die fachübergreifende Zusammenarbeit ein umfassendes Querschnittwissen aneignen konnten. Gleichzeitig hat der SFB 823 zur Bildung und Stärkung der wissenschaftlichen Profile an der TU Dortmund sowie entsprechender Netzwerke im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld geführt.

Die organisatorische und programmtechnische Umsetzung des SFBs durch die DFG war hervorragend. Dies betrifft in erster Linie die Unterstützung durch die DFG-Geschäftsstelle, insbesondere bei der Einrichtung der Kindertagespflegestelle "9 x kluge Zwerge". Durch den intensiven Austausch mit den Referentinnen der DFG war eine reibungsfreie Durchführung unseres SFB Programms sowie der damit verbundenen, formellen Prozeduren (Antragstellung, Begutachtung, Abschlussbericht) immer garantiert.

Das Finanzmodell des SFBs, bestehend aus Projektmitteln, pauschalen Mitteln und der Programmpauschale hat sich als sehr zielführend erwiesen. So standen dem Verbund neben den geplanten Kosten in den jeweiligen Teilprojekten auch übergreifende Mittel zur Deckung des Overheads (Programmpauschale) und unvorhersehbarer Aufwendungen (Pauschale Mittel) zur Verfügung. Die pauschalen Mittel wurden für die Anschubfinanzierung hochqualifizierter Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler verwendet; so konnte unbürokratisch durch Vorstandsentscheid eine optimale und zugleich flexible Vergabe der pauschalen Mittel erfolgen.

Begrüßenswert insbesondere in Hinblick auf den Werdegang wissenschaftlicher Nachwuchskräfte ist die verglichen mit anderen Programmen längere Förderperiode von vier Jahren; sie bietet genügend Zeit für eine Promotion. Demgegenüber stehen jedoch der erhebliche Arbeitsaufwand sowie lange Planungs- und Vorlaufzeiten für die Initiierung eines SFBs. Die lange Dauer des Antragsverfahrens, angefangen von einem Beratungsgespräch bei der DFG, dem Erstellen einer Skizze sowie eines anschließenden Vollantrags, gefolgt von einer wissenschaftlichen Begutachtung durch ein Fachgremium und einer abschließenden Abstimmung des DFG-Senats ist zwar durchaus nachvollziehbar. Auf der anderen Seite jedoch sollten zeitlicher und inhaltlicher Umfang des Antragsverfahrens in einem ausgewogenen Verhältnis zum eigentlichen Zweck eines Forschungsverbundes stehen.

Die am SFB 823 beteiligten Forscher und Forscherinnen sind auf jeden Fall dankbar für die ihnen gewährte Unterstützung und würden sich freuen, wenn die DFG auch in Zukunft die Forschungsförderung als ihre primäre Aufgabe verstünde.