

INSTITUTE OF TELECOMMUNICATIONS TU WIEN

DOCUMENTATION
JANUARY 1 – DECEMBER 31, 2021

INHALT / CONTENTS

	Seite / Page
Kontaktpersonen / Contacts	3
Mitarbeiter des Instituts / Staff members	5
Sponsoren und Projektpartner / Sponsors and Cooperation Partners	9
Aktuelle Forschungsgebiete: Übersicht / Current Research Areas: Synopsis	11
Ernennungen und Preise / Nominations and Awards	21
Veranstaltungen / Events	21
Lehrveranstaltungen / Course Program	22
Gastvorträge von Institutsmitgliedern / Guest Talks by Members of the Institute	25
Forschungsprojekte / Research Projects	25
Dissertationen / Doctoral Dissertations	27
Diplom- und Masterarbeiten / Diploma and Master Theses	27
Zeitschriftenartikel / Publications in Scientific Journals	28
Patente	29
Vorträge und Posterpräsentationen (ohne Tagungsband-Eintrag) / Lectures and poster presentations (without conference proceedings entry)	29
Vorträge und Posterpräsentationen (mit Tagungsband-Eintrag) / Lectures and poster presentations (with conference proceedings entry)	30

Technische Universität Wien
Institute of Telecommunications
Gusshausstrasse 25/E389
1040 Wien, Austria
Tel.: +43 1 58801 – ext.
Email: E389.office@tuwien.ac.at
<https://www.nt.tuwien.ac.at>

KONTAKTPERSONEN / CONTACTS

Nebenstelle / Extension

Vorstand

Univ. Prof. Ing. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Christoph Mecklenbräuer 38910

Sekretariat / Secretariat

Fr. Andrea Engelmaier 38901

Fr. Sladjana Virag 38954

Buchhaltung / Accounting

Fr. Brigitte Halzl 38915

Fr. Eva Schwab 38937

IT-Services

Ing. Walter Schüttengruber 38964

Ing. Bernhard Wistawel 38924

Embedded Systems Support

Ing. W. Gartner, MSc 38905

Hausangelegenheiten, Brandschutz & Arbeitssicherheit

Ing. W. Schüttengruber 38964

Datenschutzansprechperson

Fr. Brigitte Halzl 38915

Informationssicherheitsansprechperson

Ing. Bernhard Wistawel 38924

○ Mobilkommunikation / Mobile Communications

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. M. Rupp 38967

Christian Doppler (CD-)Labor für Zuverlässige Drahtlose Konnektivität für eine Gesellschaft in Bewegung

Dipl.-Ing. Dr. techn. S. Schwarz 38985

○ Multimedia-Systeme / Multimedia Systems

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. N. Görtz 38925

○ Flexible Funksysteme / Flexible Wireless Systems

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. C. F. Mecklenbräuer 38980

○ Communication Networks

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. T. Zseby 38910

○ Signalverarbeitung / Signal Processing

Ao.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. F. Hlawatsch 38963

○ Theorie der Telekommunikation / Communication Theory

Ao.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. G. Matz 38916

NETWORKS

SIGNAL PROCESSING

WIRELESS COMMUNICATIONS



ZSEBY



MATZ



GÖRTZ



HLAWATSCH



SCHWARZ



RUPP



MECKLENBRÄUKER



GOISER

MITARBEITER DES INSTITUTS / STAFF MEMBERS

Stand: 01.04.2022

Professor_innen:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Goiser
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Norbert Görtz
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Hlawatsch
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Matz
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Christoph Mecklenbräuker
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Rupp
Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Schwarz
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Tanja Zseby

Beamte des wissenschaftlichen Dienstes:

Senior Scientists:

Mag.rer.soc.oec. Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Fabini
MSc Dr.techn. Felix Iglesias Vazquez
Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Langwieser
Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Svoboda

Universitätsassistent_innen:

Dipl.-Ing. BSc Ashury Mehdi
Dipl.-Ing. Thomas John Bucco
Dipl.-Ing. BSc Thomas Dittrich
Dipl.-Ing. BSc Agnes Fastenbauer
Dipl.-Ing. BSc Lisa Marie Geiginger
Dipl.-Ing. BSc Alexander Hartl
Dipl.-Ing. Fares Meghdouri
Dipl.-Ing. BSc Mariam Mussbah
Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Pichler
Dipl.-Ing. BSc Richard Prüller
Dipl.-Ing. BSc Danilo Radovic
Dipl.-Ing. BSc Tripkovic Sonja
MSc Zhao Shengya

Projektassistent_innen:

MSc BSc Bernhard Brenner

Dipl.-Ing. Jan Dorazil

Dipl.-Ing. BSc Lukas Eller

Dipl.-Ing. BSc Herbert Groll

MSc Hao Le

Dipl.-Ing. Angelika Hermanek

MSc Huang Zeyu

Dipl.-Ing. BSc Thomas Kropfreiter

Dipl.-Ing. Martin Lerch

MSc Charmae F. Mendoza

Dipl.-Ing. BSc. Faruk Pasic

Dipl.-Ing. BSc Stefan Pratschner

MSc Artan Salihu

Doz.Dr. Diana Stoeva

Dipl.-Ing. BSc Bashar Tahir

Studentische Mitarbeiter_innen:

BSc Frederic Ban Pascal

Benedikt Herold

Stefan Pichler

Philipp Schwarzingger

David Stadlmann

Roland Strieder

Projektmitarbeiter_innen:

Adam Blagojevic

BSc Alexander Bokor

BSc Christoph Buchner

BSc Aleksandra Dordevic

BSc Christian Eliasch

BSc Michael Girsch

BSc Kiril Kirev

BSc Gerfried Krainz

Florian Alexander Kiss

BSc Thomas Lipovec

Daniel Amadeus Maierhofer

BSc Jan Matthias Nausner

BSc Armand Nabavi

BSc Kevin Niederwanger

BSc Reingruber Philipp
BSc Areen Shiyahin Odeh Khairallah
BSc Daniel Schützenhöfer
Weixelbaumer Roman
BSc Wilfried Wiedner
BSc Mislav Zane (karenziert)

Bedienstete des nichtwissenschaftlichen Dienstes:

Andrea Engelmaier
Ing. MSc Wolfgang Gartner
Brigitte Halzl
Eva Schwab
Ing. Walter Schüttengruber
Sladjana Virag
Ing. Bernhard Wistawel

Zugeteilt dem Institut:

Privatdoz. Dipl.-Ing. Drtechn. Slavisa Aleksic
O.Univ. Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Ernst Bonek
Mag.rer.soc.oec. Dipl.-Ing. Dr.techn. Sebastian Caban
Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Garn
Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Admela Jukan
Univ.Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Walter Leeb
Em.O.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Mecklenbräuker
Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Molisch
Privatdoz. Dr. Fabio Ricciato
Univ.Do. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Riegl
Ao. Univ. Prof.i.R. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Arpad Ludwig Scholtz
Em.O.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harmen R. Van As
Univ.Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Weinrichter
Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Winzer
Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Zemen

Lehrbeauftragte:

Univ.Lektor Dipl.-Ing. Stefan Cecil
OR i.R. Univ.Lektor Dipl.-Ing. Dr.techn. Walter Ehrlich-Schupita
Univ.Lektor Dipl.-Ing. Kurt Lamedschwandner
Univ.Lektor Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Neubauer
Univ.Lektor Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Wess

Gastforscher_innen:

Prof. Dr. Bernard Fleury

Prof. PhD Guan Ke

Weitere Mitarbeiter_innen:

Ass.Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Doblinger

Sophie My Rupp

Im letzten Jahr sind folgende Mitarbeiter_innen ausgeschieden:

Dott.mag. Maximilian Bachl

Dipl.-Ing. Dr.techn. Claudia Breitenfellner

BSc Christoph Buchner

BSc Martin Fraunhofer

MSc Michal Harvanek

BSc Edgar Philip Jirousek

BSc Kiril Kirev

Dipl.-Ing. BSc Manuel Lobinger

Dipl.-Ing. MSc Ljiljana Marijanovic

Dipl.-Ing. BSc Kevin Niederwanger

Matthias Nitzschke

MSc Carlos Andres Pachajoa Mejia

BSc Valentin Platzgummer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Vaclav Raida

MSc Blanca Ramos Elbal

BSc Alexander Schreiner

Dipl.-Ing. BSc Erik Sausa

Dipl.-Ing. Dr. techn. Driton Statovci

SPONSOREN UND PROJEKTPARTNER / SPONSORS AND COOPERATION PARTNERS

Acoustics Research Institute, Austrian Academy of Sciences
AIT Austria Institute of Technology GmbH
ANDATA Artificial Intelligence Labs
Austrian Science Fund (FWF)
A1 Telekom Austria AG, Austria
Brno University of Technology, Czech Republic
Bundesministerium für Inneres
Bundesministerium für Landesverteidigung und Sport (BMLV)
Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus: Oberste Fernmeldebehörde
Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
CentraleSupélec, Frankreich
Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE), La Spezia, Italy
Centre national de la recherche scientifique CNRS (CNRS), PARIS 75794, France
Christian Doppler Forschungsgesellschaft
COMLAB AG Ey 13 | CH-3063 Ittigen
Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni (CNTT), Parma 43124, Italy,
COST-Action CA15104 IRACON
Deutsche Bahn AG
Dipl.-Ing. Dr. Hermann Bühler GmbH
Department of Electrical and Computer Engineering, Stony Brook University / NY, USA
Diamond Aircraft Industries GmbH
Dimetor GmbH
Disaster Competence Network Austria
EMS Solutions GmbH, Wien, Austria
Fakultät für Informatik, TU Wien
FFG – Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft GmbH
FH Salzburg
GREENERWAVE (Greenerwave SAS), VALBONNE 06560, France
Ikarus Security Software GmbH
Ilwerke vkw AG
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe (TU Wien)
Jinan University, Guangzhou, China
Johannes Kepler University, Linz, Austria
Komobile W7
Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm, Sweden
Kuratorium für Verkehrssicherheit

National Center for Scientific Research "DEMOKRITOS" (NCSR), Agia Paraskevi 15341, Greece
 Nec Laboratories Europe GmbH (NEC), Heidelberg 69115, Germany
 Nokia Solutions and Networks, Ulm, Deutschland
 Nokia Solutions and Networks OY (Nokia Bell), Espoo 02610, Finland
 Numerical Harmonic Analysis Group (NuHAG), Universität Wien
 OeAD, Agentur für Bildung und Internationalisierung
 Österreichische Bundesbahnen (ÖBB)
 Österreichische Rundfunksender GmbH & Co KG (ORS)
 Propagation Ideas and Solutions GmbH (PIDSO)
 Radio-Amateur-Klub der Technischen Universität Wien
 School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xian, China
 Siemens AG Österreich
 Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia
 SWARCO Futurit Ges.m.b.H
 Technische Universität Graz (TU Graz)
 Technische Universität Ilmenau (TU Ilmenau)
 Technische Universität München, Deutschland
 Technologieplattform Smart Grids Austria
 Telefonica Investigacion y Desarrollo Sa (TID), MADRID , Spain
 T-Mobile Austria GmbH
 TÜV Austria
 TU Wien Institut für Mechanik und Mechatronik
 Universidad Pompeu Fabra (UPF), Barcelona, Spain
 University of California San Diego (UCSD), San Diego, USA
 University of Edinburgh, Großbritannien
 University of Southern California (USC), Los Angeles, USA
 Universität Wien, Institut für Europarecht, Internationales Recht und Rechtsvergleichung
 Wave Up S.r.l. (WAVE UP SRL), SIENA, Italy
 Wien Leuchtet (MA33)
 Wiener Netze GmbH
 Wiener Stadtwerke Holding AG
 Wiener Wissenschafts-, Forschungs- und Technologiefonds (WWTF)
 Wirtschaftsagentur Wien

AKTUELLE FORSCHUNGSGEBIETE: ÜBERSICHT / CURRENT RESEARCH AREAS: SYNOPSIS

Mobilkommunikation

Der Fokus der Forschung auf diesem Gebiet liegt für uns im Bereich der mobilen zellularen Netze. Hier werden die folgenden Schwerpunkte behandelt: Messung und Simulation von Funkübertragungsstrecken der fünften Generation (5G) und darüber hinaus, speziell im Bereich sogenannter Millimeterwellen und Full-Dimension MIMO Systeme; Entwicklung und Verbesserung von Sende/Empfangs Signalverarbeitungsalgorithmen; Simulation und Optimierung dichter heterogener Mobilfunknetze mit verteilten Antennen und sogenannten elektromagnetisch rekonfigurierbaren intelligenten Oberflächen; Analyse und Modellierung des paket-vermittelten Verkehrs und schichtübergreifende Optimierung von Diensten in Mobilfunknetzen.

Ein signifikanter Teil der Forschung im Bereich Mobilkommunikation findet im Zuge des Christian Doppler (CD-)Labors für Zuverlässige Drahtlose Konnektivität für eine Gesellschaft in Bewegung statt. Gemeinsam mit unseren Unternehmenspartnern A1 Telekom Austria AG, Nokia Solutions and Networks und ÖBB Infrastruktur AG, haben wir es uns in diesem CD-Labor zum Ziel gesetzt einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung von Mobilfunktechnologien der 5. Generation und darüber hinaus zu leisten, wobei unser Fokus auf Szenarien mit sich (potentiell schnell) bewegenden (menschlichen und maschinellen) Benutzern liegt (Autos, Züge aber auch Fußgänger und Radfahrer). Hierbei liegen unsere Schwerpunkte auf drei Forschungsmodulen, die wir jeweils gemeinsam mit einem Unternehmenspartner behandeln: 1) In Modul 1 widmen wir uns gemeinsam mit Nokia Solutions and Networks, einem Weltmarktführer im Bereich Kommunikationsnetze, der Verbesserung der Physikalischen Schicht für schnell bewegte Benutzer. Kernthemen dieses Moduls sind massive Mehrfachantennensysteme und elektromagnetisch rekonfigurierbaren intelligenten Oberflächen. Unsere Forschung zielt dabei vor allem auf die Optimierung der Ressourceneffizienz und Robustheit dieser Technologien im Bereich hoher Mobilität ab. 2) In Modul 2 untersuchen wir gemeinsam mit A1 Telekom Austria AG, dem führenden österreichischen Mobilfunkanbieter, innovativen Technologien die das Potential haben den Mobilfunk entscheidend voran zu bringen. Speziell liegt unser Fokus in diesem Modul auf der drahtlosen Kommunikation im Millimeterwellen Bereich (ungefähr 30 – 300 GHz) und auf der nicht orthogonalen Mehrbenutzerkommunikation. Mobilfunk im Millimeterwellen Bereich bietet zahllose Herausforderungen, hat jedoch auch äußerst großes Potential, da dort viel ungenutzte Bandbreite zur Verfügung steht, die signifikante Steigerungen der Netzkapazität von Mobilfunknetzen verspricht. Die nicht orthogonale Kommunikation mit mehreren Benutzern bietet im Vergleich zur orthogonalen Kommunikation speziell im Hinblick auf Verkürzung der Latenzzeiten, sowie Erhöhung der Anzahl der gleichzeitig bedienbaren Benutzer Vorteile. Allerdings verlangt sie auch nach verbesserten Signalverarbeitungsmethoden an den Sendern und Empfängern, um die überlagerten Benutzer voneinander trennen zu können. 3) In Modul 3 entwickeln wir gemeinsam mit ÖBB Infrastruktur AG Lokalisierungsmethoden auf Basis drahtloser Kommunikationstechnologien unter Einsatz von klassischen Signalverarbeitungsmethoden sowie Methoden des maschinellen Lernens. Die entwickelten Techniken und Algorithmen ermöglichen eine Analyse großräumiger Personenströme im öffentlichen Verkehr und unterstützen eine dynamische Optimierung des Mobilfunknetzes auf Basis zeitlich und räumlich aufgelöster Bedarfsvorhersagen.

Ein wichtiger Teil unserer Entwicklungstätigkeit, zur Umsetzung der Forschungsergebnisse, umfasst die Implementierung und Erweiterung unserer 5G Link- und System- Level Simulatoren, den Vienna Cellular Communication Simulators (VCCS). Diese Simulatoren stehen frei zur akademischen Nutzung auf der Instituts-Webseite zum Download bereit und zählen zu den erfolgreichsten Simulatoren dieser Art weltweit. Die Simulatoren werden auch auf kommerzieller Basis vertrieben und von zahlreichen 3GPP Firmen eingesetzt. Im Jahr 2021 lag der Fokus speziell auf unserem System Level Simulator, der nun seit dem Release 1.2 zahlreiche neue Features und Übertragungsmodi unterstützt, speziell in den Bereichen non-orthogonal multiple access, massive MIMO, traffic models und Interfaces zu verwandten Softwaretools um noch mehr Konfigurationsmöglichkeiten anbieten zu können.

In geförderten Forschungsprojekten mit dem Industriepartner, A1 Telekom Austria AG haben wir an der Entwicklung und Verfeinerung von Analysemethoden und Modellen für Verkehrsströme in

Netzen der fünften Generation gearbeitet. Im BRIDGE Projekt SEMONE werden die Performance-daten von verteilten Messungen ausgewertet und zusammengeführt mit netzinternen Datenquellen. Das aktuelle Forschungsthema orientiert sich an der Frage wie man ein reaktives Netzwerk mit nicht intrusiven Methoden zuverlässig vermessen kann. Dies ist eine große Herausforderung da Messungen auf unabhängigen und nicht überwachten Endgeräten stattfinden sollen. Das Ziel ist es, basierend auf diesen Informationen Modelle zu erstellen, um das Netz und die Daten detailgetreu zu simulieren und analytisch in Echtzeit zu optimieren. Im Jahr 2021 wurden beim Projektpartner kostspielige drive-tests schrittweise durch crowd-source Messungen ersetzt.

Die Omnipräsenz von Internetdiensten spiegelt sich auch in der neuen Mobilität der Benutzer. In diesem Kontext hat es auch weiterhin eine Zusammenarbeit mit der ÖBB TS gegeben, mit dem Ziel noch mehr Kunden ein perfektes mobiles Serviceerlebnis in Zügen zukommen zu lassen. In einer Erweiterung dieser Aktivitäten wurden nun auch Optimierungen an der Mobilfunk-relevanten Infrastruktur entlang Bahnstrecken und in Tunnels mit der ÖBB PV vorgenommen. Im Anschluss an diese Aktivitäten konnten wir in diesem Jahr auch für weitere internationale Firmen im Bahnsektor aktiv werden. In Zusammenarbeit mit der Deutschen Bahn AG und MM-1 haben wir Mess-methodiken entwickelt, um die Mobilfunkqualität entlang von Zugstrecken zu evaluieren.

Im Zuge der Entwicklung von immer neuen Diensten haben sich die Anforderungen an die Qualität von Netzwerken geändert. In diesem Jahr konnte die bestehende direkte Kooperation mit A1 Telekom Austria AG weitergeführt werden und um neue Themen erweitert werden. Ziel der Forschungstätigkeiten ist es, die Leistungsfähigkeit von Internetzugängen im Allgemeinen in einem globalen operatorweiten Kontext erfassbar zu machen. Das spezielle Augenmerk liegt hierbei auf mobilen Zugängen der Technologien LTE, 5G in hybrider Kombination. Die Herausforderung ist die aktuelle gesellschaftliche Entwicklung Richtung Home-Office welche zu einem verstärkten Einsatz von mobilen Technologien als Internetanschluss führt. Mit Hilfe der in der Forschungsgruppe aufgebauten Kompetenzen werden Optimierungen gefunden, den Verkehr auch in Zukunft zuverlässig anbieten zu können.

Im Bereich der Vermessung von Mobilfunk Abdeckung im Feld in 3D haben wir in den letzten Jahren aktiv an der Entwicklung von autonomen Testverfahren gearbeitet. Im Zuge dieser Aktivitäten wurde ein Prototype für modifizierte autonomen Flugdrohnen mit einer entsprechenden Software zur Optimierte Planung der Missionen entworfen. Aktuell erweitern wir das autonomen Messverfahrens mittels künstlicher Intelligenz zur optimierten Erfassung von Wegpunkten.

Die Spezialausbildung in der Mobilkommunikation, zu der verschiedene Bereiche des Instituts beitragen, zieht Studenten der ganzen Welt an. Internationale Kontakte werden schon während des Master Studiums geknüpft: in Zusammenarbeit mit den technischen Universitäten Bratislava und Brünn bieten wir ein gemeinsames internationales Mobilfunkseminar an, welches trotz Covid-19 in geringerem Umfang online stattfinden konnte. Das Seminar in Zusammenarbeit mit den Technischen Universitäten München und der ETH Zürich mussten wir gemeinsam absagen.

Mobile Communications

In the broad field of mobile communications, our group focuses on major topics within the scope of next-generation mobile cellular networks: link layer measurements and simulations of fifth generation (5G) and beyond mobile communications, simulation and optimization of heterogeneous cellular networks with distributed antennas and reconfigurable intelligent surfaces, traffic analysis and simulation at the IP layer and cross-layer optimizations.

A significant part of our research in the field of mobile communications is financed by the Christian Doppler (CD-)Laboratory for Dependable Wireless Connectivity for the Society in Motion. Together with our corporate partners A1 Telekom Austria AG, Nokia Solutions and Networks and ÖBB Infrastruktur AG, we set our objective within this CD-Lab on significantly contributing to the development of 5G and beyond mobile communications technologies, with a focus on scenarios with (potentially fast) moving (human and machine-type) users (cars, trains, but also pedestrians and cyclists). Our work is partitioned into the following three research modules: 1) In research module 1, we investigate together with Nokia Solutions and Networks, a world market leader for communication networks, possible strategies for enhancing the physical layer of mobile network technologies, especially for high-mobility users. The core topics of this research module are massive

multiple-input multiple-output technologies and reconfigurable intelligent surfaces. We are targeting an enhancement of the resource efficiency and the robustness of such technologies for high-mobility scenarios. 2) In research module 2, we examine together with our partners from A1 Telekom Austria AG, the leading Austrian mobile network operator, innovative technologies that have the potential to substantially advance mobile communications. Specifically, our focus is on wireless communications in the millimeter-wave band (approximately 30 to 300 GHz) and on non-orthogonal multiple access schemes. Mobile communication in the millimeter-wave band face countless challenges, but it also has significant potential since a vast amount of untapped spectrum is available in that regime, promising corresponding enhancements in mobile network capacities. Non-orthogonal multiple access, as compared to orthogonal multiple access, has the advantages of potentially providing a lower access latency, as well as, supporting a larger number of simultaneous connections. However, these advantages can only be realized with more sophisticated and complicated signal processing at the transmitters and receivers. 3) In research module 3, we develop together with ÖBB Infrastruktur AG, responsible for Austria's railroad infrastructure, localization techniques based on wireless communication technologies, utilizing classical signal processing techniques (based on signals times and/or angles of arrival) but also novel machine learning concepts, such as deep neural network learning. These methods facilitate large scale analysis of person flows in public transportations and support a dynamic learning-based self-optimization of the mobile network utilizing spatiotemporal demand variations and predictions.

To enable computer-based investigation of dense heterogeneous cellular networks and facilitate the evaluation of coordination methods developed for such networks, we rely on our Vienna Cellular Communications Simulators (VCCS), a suite of in-house developed Matlab-based mobile communication simulators, publicly available for academic users to download on our webpage. The free simulators are highly popular within the scientific community and a commercial version is in usage by a number of 3GPP companies. In 2021 our main focus was on extending the capabilities of our system-level simulator for 5G networks, building the basis for the research work conducted in our industrial cooperation. New releases of our simulators are continuously made available to our partners, following the newest developments within mobile network standardizations. In 2021 the VCCS-5G system level simulator version 1.2 was published, providing features such as non-orthogonal multiple access, massive MIMO, traffic models and interfaces to related software tools.

In an FFG funded research cooperation with our industry partner A1 Telekom Austria AG, we are developing and refining analytical methods and models for traffic flows in 5G networks. In this BRIDGE project, SEMONE performance benchmarks transform from centrally coordinated measurements to crowdsourced distributed events at the end terminal of the users. The current research challenge is the integration of non-intrusive benchmark measurements for reactive networks. The goal is a distributed setup to analyze, measure and simulate operational mobile networks. In the past year crowdsourcing was finally used to replace parts of common drive-testing.

Internet usage for nomadic customers is becoming a central element for planning in mobile networks. In this context, we continued the cooperation with the Austrian Federal Railways (ÖBB-TS). We currently work towards identifying room for improvements for mobile coverage in high-speed trains. In this context, we are also further developing our performance measurement algorithms towards ultra-fast probing to allow tests in motion. Since 2020 we optimize the mobile coverage provided by infrastructure along the rails for service on trains together with the ÖBB-PV. Following these activities, we started cooperation with other international companies in the rail sector. With the Deutsche Bahn AG, and MM-1 we did carry out the development of a measurement methodology for service quality onboard high speed trains.

The demand for new mobile communication services has changed the requirements for the quality monitoring of 5G based networks. In this year, we continued our cooperation action with A1 in this area. The focus is on mobile access technologies, LTE and 5G, and the hybrid combination. The challenge is the current social development towards nomadic home-office usage, which leads to increased use of mobile networks as the last mile. This strong increase in volume generated at the customer side is a challenge for the quality-of-service system of existing solutions. With the help of this research, we develop a method to measure and characterize the traffic flows and optimize their resource consumptions.

Measuring the performance of mobile communications in 3D is a new research challenge we picked up in recent years. We focus on the development of fully autonomous test vehicles collecting measurement data along the optimized path. In 2021, we extended the modified aerial drones with a software module for optimized mission planning. The drone is currently largely autonomous, measuring using artificial intelligence.

The dedicated course plan in mobile communications attracts students from all over the world. International socializing is an activity already in the master program: together with the technical universities in Bratislava and Brno, we offered an International Seminar on Mobile Communications this year due to Covid-19 online and in reduced form. The cooperation with the Technical Universities of Munich and ETH Zurich we conduct as part of the Mobile Communications Seminar lecture will hopefully restart in 2022.

Christian Doppler Labor für „Zuverlässige Drahtlose Konnektivität für eine Gesellschaft in Bewegung“

Das Christian Doppler Labor für Zuverlässige Drahtlose Konnektivität für eine Gesellschaft in Bewegung beschäftigt sich mit grundlegenden Forschungsfragen der drahtlosen Kommunikation, die speziell im Bereich großer Nutzerdichten mit sowohl statischen als auch bewegten Benutzern (wie zum Beispiel im städtischen Bereich) auftreten. Ziel des Labors ist es, die Netzkapazität und den Datendurchsatz von Mobilfunknetzen speziell für solche Szenarien signifikant zu verbessern und gleichzeitig auch eine zuverlässige Kommunikation selbst bei hoher Mobilität zu gewährleisten. Dementsprechend liegt das Hauptaugenmerk der Forschungsarbeiten der Mitarbeiter des Labors auf Fragen der Verfügbarkeit, Latenzzeit, Ausfallsicherheit und Effizienz der drahtlosen Kommunikation.

Das CD-Labor hat seine Arbeit im Jänner 2016 mit den drei Unternehmenspartnern A1 Telekom Austria AG, Kathrein Werke-KG und Nokia Solutions and Networks aufgenommen. Im Jahr 2019 wurde das Labor um einen vierten Unternehmenspartner, ÖBB Infrastruktur AG, erweitert. Im Hauptfokus des CD-Labors liegen Mobilfunktechnologien der fünften Generation. Seit 2020 beschäftigen wir uns auch vermehrt mit vielversprechenden Nachfolgetechnologien für Mobilfunknetze der sechsten Generation. Die Forschungstätigkeiten des CD-Labors erstrecken sich von messtechnischen Charakterisierungen des drahtlosen Übertragungskanal, speziell bei höheren Frequenzen, über Optimierungen der Sende-/Empfangssignalverarbeitung auf Link-Ebene, bis hin zu großräumigen Netzanalysen auf System-Ebene. Das CD-Labor beschäftigt derzeit sechs Doktoranden und Doktorandinnen, die von acht Master-Studierenden tatkräftig unterstützt werden. Wir kooperieren in unseren Forschungsarbeiten mit zahlreichen Außer- und Inner-Europäischen Universitäten und Forschungseinrichtungen und organisieren regelmäßig wissenschaftliche Events, um unsere Ergebnisse zu teilen und zu promoten. Nach erfolgreicher 5-Jahresevaluierung im Oktober 2020, befindet sich das CD-Labor bereits in der finalen Erweiterungsphase bis Ende 2022.

Christian Doppler Laboratory for „Dependable Wireless Connectivity for the Society in Motion“

The Christian Doppler Laboratory for Dependable Wireless Connectivity for the Society in Motion addresses fundamental research questions arising from large numbers of static and mobile wireless users especially within urban agglomerations. The research focus is not only on enhancing mobile network capacity and best-effort high data rate services, but equally on dependable (reliability- and delay-critical) data transmissions. Under these circumstances we focus on questions relating to efficiency, reliability, latency and availability of wireless communications.

The CD-lab started its work in January 2016 with three work modules. Each of the modules is associated to one of our three industrial partners Nokia Solutions and Networks (Module 1), A1 Telekom Austria AG (Module 2) and Kathrein-Werke KG (Module 3). In January 2019 the Lab was extended by a fourth research module with the industrial partner ÖBB Infrastruktur AG. The main scope of the laboratory is on 5G mobile communication technologies. Since 2020, our research additionally focuses on the most promising 6G candidate technologies. Our research work within the CD-lab encompasses measurement-based wireless channel characterizations, especially at higher carrier frequencies, optimization of transmitter and receiver signal processing on link level, as well as,

large-scale network analyses on a system level. The CD-lab currently finances six doctoral students and eight Master-level students. In addition, we cooperate with many Universities and research institutions within and outside of Europe. We also regularly organize scientific events to share our results with other researchers and to promote our work. After a successful scientific 5-years evaluation in October of 2020, the CD-lab is now in its final extension phase until the end of 2022.

Multimedia Systems

Research in this field is about **multimedia signal processing for big data** and **coding for multimedia transmission**. On the signal-processing side, the work particularly involves advanced methods for big data such as compressed sensing, iterative recovery algorithms in particular, as well as advanced machine learning, with applications, e.g., in image processing and communications.

Compressed Sensing (CS):

Compressed sensing is about (re-)sampling (digital) signals at a sampling rate far below the classical sampling theorem; perfect (or at least very high quality) recovery is still possible, with suitable structure (such as „sparsity“) in the signal. In practical applications (such as MRI scanners) the vector dimension of the signals can be very large (100000 and more), so extremely efficient recovery algorithms are crucial as well as good dictionaries to perform the sampling process, which is in fact a multiplication with a measurement matrix (the dictionary). Work items include fast recovery of very high-dimensional signals with different types of „structure“ (including „sparsity“) by iterative algorithms, in particular the application of approximate message passing (AMP) to problems in image processing but also in communications.

Machine Learning:

Estimation of Information Measures: While information theoretic quantities such as entropy and mutual information are extensively used in the training and evaluation of machine learning systems, this usage is profoundly different from their applications in coding theorems. In the context of machine learning, these quantities need to be estimated. We investigate specifically adapted algorithms for this estimation problem, necessary conditions, and fundamental limitations.

Information Theory and Computability: In addition to the statistical properties of information measures, we analyze their computability in various models of computation. In particular, we consider information inequalities, the "rules" of information theory, as well as operational definitions of capacities and coding rates.

Coding:

Error-correction channel coding has a key role in digital communication systems. Due to delay constraints of the applications, codes with small-to-medium block size are of particular interest. A special problem, which is very important in practice, is the realization of a flexible “adjustable” code rate, as time-variant fading channels necessarily require adaptive modulation and coding. We investigate Low-Density Parity-Check (LDPC) codes specifically constructed for those situations. A key problem of code design is to avoid short cycles in the code graph in order to allow for better decoding results. On the one hand we investigate code designs that avoid short cycles by construction, on the other hand we have introduced a transformation-based representation of quasi-cyclic LDPC codes that allows for a simple cycle analysis that can be used in numerical code design. We also consider extensions of those techniques to design codes with adjustable code rate.

Beyond the conceptual side of research in algorithms, we also work on implementing channel encoders and decoder by programmable hardware (FPGA, Field-Programmable Gate Arrays). The goal is a highly efficient realization of practically relevant LDPC channel encoders and decoders in order to investigate their performance at very low bit-error rates and to compare measurements with analytical results.

Flexible Funksysteme

Inzwischen ist 5G allgemein verfügbar. Das Internet ist mobil und erlaubt die Übertragung, Verteilung, Speicherung und Manipulation von Information. Die aktuellen Herausforderungen in der Digitalisierung betreffen die 5G Anwendungen in der *Produktion*, zum *Transport*, zur *Verteilung*, *Lagerung*

und *Manipulation* von materiellen Objekten („Internet der Dinge“). Funktechnologien müssen zunehmend *verlässlich* („dependable“) funktionieren. Dies erfordert wesentliche Verbesserungen der Verfügbarkeit und Übertragungslatenz, garantierten Datendurchsatz, sowie Energieeffizienz und Kosten. Wir befassen uns daher mit 5G/6G Funktechnologien, insbesondere im Zentimeter- und Millimeterwellenbereich, sowie verlässlichen Übertragungsverfahren für hochmobile Teilnehmer, deren Verhalten bei hoher Netzlast, sowie energieeffizienter Nachrichtenübertragung.

Die Verwendung von MIMO Übertragungsverfahren mittels Antennengruppen ist der kommerzielle Stand der Technik im Mobilfunk. Deutliche Verbesserungen gegenüber 3G wurden bereits in 4G erreicht hinsichtlich spektraler Effizienz durch dynamische Ressourcenallokation unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslast, MIMO Verfahren mit Vorkodierung und Antennenmultiplex. *Massive* MIMO Übertragungsverfahren und rekonfigurierbare Meta-Oberflächen werden Basistechnologien für 5G und 6G Netze.

Im Zusammenhang mit dem jüngsten Aufschwung an peer-to-peer und ad-hoc Netzen erlebt auch die direkte Funkkommunikation zwischen mobilen Teilnehmern eine Renaissance, insbesondere hinsichtlich der Kommunikation von Fahrzeugen für den kooperativen Straßenverkehr (C-V2X) für aktive Sicherheitssysteme. Das Institut leitet das Projektkonsortium „Intelligent InterSection“. Dieses Projekt richtet ein Kreuzungsverkehrssystem ein, um die Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz für alle Verkehrsteilnehmer zu verbessern. Durch einen breiten, integrativen, interdisziplinären, auf den Menschen ausgerichteten Designansatz werden die Bedürfnisse, Ziele und Einschränkungen aller Beteiligten erfasst und in quantitative Schlüsselleistungsindikatoren und eine technische Problembeschreibung gegossen. Neuartige Methoden und Werkzeuge zur Modellierung, Kalibrierung, Simulation, Schätzung, Vorhersage und Steuerung des heterogenen Kreuzungsverkehrs sowie neuartige Mittel und Anwendungsfälle der 5G-Kommunikation werden kombiniert, um die Verkehrssituationen in Echtzeit zu optimieren. Die daraus resultierenden Vorteile der intelligenten Kreuzung werden durch detaillierte Co-Simulationen, Validierung und Demonstrationstests untersucht und mit allen Beteiligten bewertet. Damit bietet das Projekt eine solide Grundlage für eine spätere Umsetzung in städtischen Verkehrssystemen, die die Verkehrssicherheit und -effizienz für alle Nutzer gleichermaßen verbessert. Kooperative Systeme sind im Straßenverkehr ein wichtiges Forschungsfeld geworden. Darüber hinaus eröffnet die funkbasierte Vernetzung von Sensoren und Messgeräten eine Vielzahl neuer Anwendungsfelder im Telematikbereich: *Intelligent Transport, Smart Metering, Intelligent Production, u.v.m.*

Großes Potential an Einsparung von Ressourcen, die ein Kommunikationssystem in Anspruch nimmt, wird durch den Einsatz nichtlinearer Detektionsverfahren erreicht. Die Nichtlinearität wird an die Störzusammensetzung angepasst, so dass die Störung diskriminiert und die Information weitgehend unberührt gelassen wird. Solche Kommunikationssysteme werden als störungstolerante Kommunikationssysteme bezeichnet.

Eine Familie von Funksystemen zeichnet sich durch extreme Breitbandigkeit bei gleichzeitig niedriger spektraler Leistungsdichte aus. Diese ultrabreitbandigen Übertragungsverfahren ermöglichen eine energieeffiziente Kommunikation zwischen elektronischen Sensoren und Aktuatoren über kurze Reichweiten in Gebäuden und stören existierende schmalbandige Systeme nur wenig. Hier steht weniger die spektrale Effizienz, als vielmehr die Leistungseffizienz der Übertragungsverfahren im Vordergrund und sie ermöglichen drahtlose Sensorik und robuste eingebettete Systeme, die weder eine Batterie noch eine externe Antenne erfordern. Wir erforschen pulsbasierte UWB-Übertragung für leistungseffiziente Funkschnittstellen im Nahbereich mittels integrierter Antennen am integrierten Schaltkreis zur Lokalisierung und Datenübertragung. Dies ermöglicht eine verlässliche Assoziation von Daten mit materiellen Objekten: Ein Schlüssel für das Internet der Dinge.

Flexible Wireless Systems

In the meanwhile, 5G is generally available. The Internet has become mobile and allows the transmission, distribution, storage, and manipulation of information. The next challenges for “digitalization” concern 5G applications for production, transportation, distribution, storage, and manipulation of objects (“internet of things”). Wireless technologies need to become dependable. This requires major improvements in availability (coverage) and transmission latency, packet delivery guarantees, guaranteed data rates, as well as energy efficiency and cost structure. Therefore, we

investigate 5G/6G transmission techniques, notably in the centimeter and millimeter wave bands, dependable connectivity for highly mobile users, their behavior at high network load, as well as energy efficient data transmission.

The use of MIMO transmission using antenna array technology has become the commercial state of the art in mobile communications. Major improvements compared to 3G have been achieved in 4G networks in terms of spectral efficiency by dynamic resource allocation which takes into account the current system load, advanced precoding techniques, and spatial multiplexing. Massive MIMO transmission and reconfigurable meta-surfaces will be core 5G/6G technologies.

Direct radio communication between mobile entities enjoys a renaissance in connection with the recent interest in peer-to-peer and ad-hoc networks. This is especially true for cooperative vehicle-to-everything (C-V2X) communication to enable advanced active safety. The institute leads the project consortium “Intelligent Intersection”. This project establishes an intersection traffic system to improve road safety and traffic efficiency for all road users. Through a broad, inclusive, interdisciplinary human-centered design approach, all stakeholders’ needs, goals, and limitations are captured and cast into quantitative key performance indicators and a technical problem description. Novel methods and tools to model, calibrate, simulate, estimate, predict and control heterogeneous intersection traffic, as well as novel means and use cases of 5G communication will be combined to optimize the traffic situations in real time. The resulting real-world benefits of the intelligent intersection will be studied via detailed co-simulations, real-world validation and demonstration tests, and re-assessed with all stakeholders. Hence, the project provides a sound basis for later realization in urban traffic systems that improves road safety and efficiency alike, for all users. Co-operative systems have become an important field of research in the area of telematics. Wireless networking of sensors and instrumentation enables new application fields: Intelligent Transport, Smart Metering, Intelligent Production, etc.

Nonlinear detection techniques offer resource efficient solutions in communication systems. The nonlinearity is adapted to the interference scenario, such that the interference is discriminated whereas the information of interest is detected largely unperturbed. Such communication systems are interference resilient.

One family of wireless systems features extreme bandwidths and low power spectral densities. These ultra-wideband (UWB) transmission techniques enable energy efficient communication among electronic sensors and actuators over short ranges in buildings. They cause little interference to existing small bandwidth systems. Here, the spectral efficiency is of less importance than the power efficiency of the transmission scheme in short-range links. Key applications are low-power sensor networks and robust embedded systems which require neither batteries, nor external antennas. We explore UWB impulse-radio techniques experimentally with integrated on-chip antennas for power-efficient short-range wireless communication, sensing, and localization. Thus, UWB technology provides a dependable association of data with objects: A key to the Internet of Things.

Communication Networks

The main research areas of the communication networks (CN) group at the Institute of Telecommunications (IT) are network security and secure communication in Cyber-Physical Systems (CPSs). The group is especially active in the field of reactive security measures, with focus on network supervision and anomaly detection methods. For Cyber-Physical Systems protection the group works on secure communication solutions for smart grid environments and Cyber-Physical production systems.

Network Security

The protection of communication networks against new and unexpected attacks remains a challenging task. Attacks become more sophisticated. New vulnerabilities emerge every day. Proactive solutions often fail if new attack strategies are used or undetected vulnerabilities are exploited. Therefore, network supervision methods are essential to establish situational awareness in communication networks. They help to detect anomalies in communication patterns and provide the first step for the detection of new attack types.

The communication networks group works on network supervision and network protection methods, anomaly detection techniques and mitigation strategies.

Secure Communication in Cyber-Physical Systems

Cyber-physical systems (CPS) interconnect real world physical systems with computational components in cyberspace. Cyber-physical systems provide the basis for many critical infrastructures (such as smart power grids) and are therefore tempting targets for all kinds of attackers. As a consequence, communication networks for cyber-physical systems have high security demands. Interfering with supervision and control functions in cyberspace can influence real world physical systems, which can lead to the damage of physical devices, malfunction of critical processes and endangerment of human lives.

The Communication Networks group works on methods to protect and supervise communication networks for Cyber-Physical Systems. The group focuses on secure communication methods for smart grid environments and Cyber-Physical production systems. The group works on IPv4 and IPv6 based communication in smart grids for smart metering and wide area monitoring systems (WAMS).

Signalverarbeitung

Die Entwicklung statistischer Signalverarbeitungsmethoden zur Verfolgung multipler Objekte in zentralisierten und dezentralen Szenarien stellt einen Schwerpunkt unserer Arbeit dar. Ein Beispiel ist die Detektion von Fahrzeugen und die Schätzung ihrer zeitabhängigen Positionen aufgrund von Daten, die z.B. von Radar-, Sonar- oder bildgebenden Sensoren geliefert werden. Verteilte Algorithmen für dezentrale Sensornetze haben den Vorteil, ohne eine zentrale Verarbeitungseinheit oder Kommunikation zwischen weit entfernten Sensoren auszukommen. Unser besonderes Interesse gilt der Lokalisierung und Verfolgung einer unbekannten Anzahl von mobilen Objekten mit unbekannter Zuordnung zu den Messdaten. Unsere aktuellen Forschungsergebnisse in diesem Bereich betreffen die Integration eines Klassifikators und kontextueller Information sowie Methoden zur probabilistischen Objektzuordnung zwischen den Sensoren.

Ein wesentliches Ergebnis unserer Arbeit war die Einführung von Faktorgraphen und des “belief propagation”-Algorithmus im Bereich der multiplen Objektverfolgung. Die auf diesem Ansatz beruhenden Methoden zeichnen sich durch hohe Effizienz, Skalierbarkeit und Vielseitigkeit aus, und sie sind in der Lage, die Messdaten mehrerer Sensoren zu kombinieren und sich adaptiv auf zeitvariante Systembedingungen anzupassen. Wir entwickelten ferner Algorithmen zur multiplen Objektverfolgung, bei denen die Objektzustände und die Messdaten durch endliche Zufallsmengen modelliert werden. Die Verwendung einer speziellen Klasse endlicher Zufallsmengen erlaubte die Schätzung gesamter Objekttrajektorien mit einer konsistenten Identifikation der Objekte.

Eine zweite aktuelle Forschungsrichtung ist die medizinische Signalverarbeitung. Motiviert durch die Tatsache, dass die Analyse der Bewegung von Arterien Rückschlüsse auf eine Arterienverkalkung ermöglicht, entwickelten wir ein Zustandsraummodell und eine Methode zur Schätzung der Bewegung der Halsschlagader basierend auf einer Ultraschall-Videosequenz. Unsere Methode kombiniert einen “optical flow”-Algorithmus mit einem erweiterten Kalman-Filter und ist robust gegenüber Fehlern in den Ultraschallbildern.

Methoden der Signalverarbeitung sind eine wesentliche Komponente mehrerer weiterer Forschungsgebiete. Ergänzende Beschreibungen von Forschungsaktivitäten im Bereich der Signalverarbeitung finden sich in den Abschnitten Mobilkommunikation, Theorie der Telekommunikation, Flexible Funksysteme und Multimediasysteme.

Signal Processing

The development of statistical signal processing methods for multi-object tracking in centralized and decentralized scenarios is a major focus of our work. An example is the task of detecting vehicles and estimating their time-varying positions based on data provided by sensing devices such as radar, sonar, or cameras. Distributed algorithms for decentralized sensor networks have the advantage of not requiring a central processing unit or communication between distant sensors. We are mainly interested in the challenging case where the number of objects and the association between measurements and objects are unknown. Our recent results in this area concern the integration of a

classifier and of contextual information, as well as methods for probabilistic object association between sensors.

A notable outcome of our research has been the introduction of factor graphs and the belief propagation algorithm to the field of multi-object tracking. The belief propagation approach is advantageous because of its superior efficiency, scalability, and versatility. Our belief propagation-based multi-object tracking algorithms are able to fuse the measurements of multiple sensors and to continually adapt to time-varying system parameters. We also devised multi-object tracking algorithms in which the object states and the measurements are modeled by finite point processes. In particular, the use of marked finite point processes enables the estimation of entire object trajectories with consistent identification of the objects.

Another line of our research is medical signal processing. Motivated by the fact that an analysis of the movement of arteries yields effective indicators for atherosclerosis, we developed a state-space model and a method for tracking the movement of the carotid artery based on an ultrasound video sequence. Our method achieves superior robustness to artifacts specific to the ultrasound modality by using a joint fusion-and-tracking approach that combines an optical flow algorithm with an unscented Kalman filter.

Signal processing methods are an essential part of several other research areas. For complementary signal processing research, see the sections Mobile Communications, Communication Theory, Flexible Wireless Systems, and Multimedia Systems.

Theorie der Telekommunikation

Schwerpunkt unserer Arbeiten sind Methoden der Signalverarbeitung für Big Data und drahtlose Kommunikations- und Sensornetze.

Das junge Gebiet der Graphsignalverarbeitung wird erfolgreich zur Analyse von Datensätzen aus sozialen Netzwerken, Kommunikationsnetzen, Infrastrukturnetzen, biologischen Netzen, sowie von Multimediadaten eingesetzt. Hier haben wir Verfahren entwickelt, die es erlauben, fehlende Datenpunkte in abgetasteten Graphsignalen zu rekonstruieren. Als Gütekriterium für die Glattheit des Signals verwendeten wir dabei die durch den zugrundeliegenden Graphen induzierte Totalvariation. Dies führte zu nichtdifferenzierbaren Minimierungsproblemen, welche wir mittels moderner Methoden der konvexen Optimierung lösten. Die resultierenden Algorithmen zeichnen sich durch hohe Recheneffizienz und die Eignung zur verteilten Implementierung aus, was die praktische Anwendung auf Big-Data-Datensätze ermöglicht. Anhand eines Datensatzes mit Amazon-Produkten und deren Bewertungen konnten wir die hervorragende Leistungsfähigkeit unserer Methode demonstrieren.

Weiters beschäftigten wir uns mit dem Problem des Lernens der Struktur eines Graphen anhand großer, möglicherweise unvollständiger und fehlerbehafteter Datensätze. Wir formulierten diese Aufgabe als quadratisches Optimierungsproblem und lösten dieses mit einer effizienten Implementierung des ADMM-Algorithmus, die linear mit der Anzahl an Datenpunkten skaliert und daher auch für große Datensätze geeignet ist. Die Leistungsfähigkeit unserer Methoden stellten wir anhand echter Daten unter Beweis. Dabei gelang es uns unter anderem, aus anonymen Abstimmungs-ergebnissen des Österreichischen Nationalrats die Fraktionszugehörigkeit der Abgeordneten zu bestimmen.

Als dritten Schwerpunkt im Bereich Graphsignalverarbeitung setzten wir uns mit dem „Clustering“-Problem auseinander, d.h. mit der Gruppierung von Datenpunkten so dass die Gruppen möglichst homogen sind (Punkte innerhalb der Gruppe möglichst ähnlich) während verschiedene Gruppen möglichst gut separiert sind (Punkte in verschiedenen Gruppen möglichst unähnlich). Dazu entwickelten wir Verfahren, die auf vorzeichenbehafteten Graphen basieren und entweder mittels des Graphspektrums oder durch Minimierung der Totalvariation die Datencluster bestimmen. Bei Letzterem konnten wir beweisen, dass die Ergebnisse im Großteil der Fälle mit dem optimalen aber numerisch aufwändigen Kantenschnitt übereinstimmen.

Gemeinsam mit der *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL, Schweiz) erforschten wir effiziente Methoden zur Dekodierung von *low-density parity check* (LDPC) Codes. Dabei entwickelten wir quantisierte *message-passing* Algorithmen, welche den Informationsfluss im Code-Graphen maximieren und sich besonders gut in Hardware realisieren lassen. Eine Hardware-Synthese eines Decoders für

10GigabitEthernet in 28nm CMOS-Technologie führte zum weltweit schnellsten Durchsatz von mehr als 500 Gigabit pro Sekunde bei einer Chipfläche von ca. 20mm².

Moderne Übertragungssysteme (z.B. der Mobilfunkstandard *LTE Advanced*) verwenden immer häufiger Rückkanäle zur Verbesserung der Verbindungsqualität. Für derartige Kommunikationssysteme mit Feedback untersuchten wir die maximal erzielbaren Übertragungsraten für komprimierte Feedbacksignale (wie es in der Praxis immer der Fall ist). Es gelang uns zu zeigen, dass lineare Codierung hier im Gegensatz zu verrauschtem Feedback nichtverschwindende Übertragungsraten erzielt. Eine Erweiterung dieser Ergebnisse auf Mehrbenutzersysteme führte zur Entwicklung von Superposition-Codes, welche eine Adaption an die Qualität der Feedbacksignale ermöglichen und dadurch die Übertragungsrate maximieren. Das dabei auftretende Problem der besten Ressourcenverteilung lösten wir mithilfe von Algorithmen zur konvex-konkaven Optimierung.

Communication Theory

The focus of our research is on wireless communication and sensor networks and on signal processing for Big Data.

The young field of graph signal processing is being successfully applied for the analysis of datasets from social networks, communication networks, infrastructure networks, biological networks, and multimedia. In this area, we developed methods for the reconstruction of missing data points in sampled graphed signals. As a metric for the smoothness of the graph signal we used the total variation induced by the underlying graph. This led to non-smooth minimization problems, which we solved using modern methods of convex optimization. The resulting algorithms are computationally efficient and suited for distributed implementation, which enables the practical applications to massive datasets. We could verify the excellent performance of our scheme using a real-world dataset of Amazon products and ratings.

We furthermore considered the problem of learning the structure of a graph from huge but possibly incomplete and noisy data sets distributed implementations. We formulated this problem as a quadratic optimization problem and we proposed to solve this problem using an efficient implementation of the ADMM algorithm that scales linearly with the number of data points and thus is well-suited for large-scale data. Numerical experiments with real-world data confirmed the excellent performance of our method. Among other things we managed to determine the party affiliation of Austrian Members of Parliament from anonymous voting results in the Austrian National Council.

Another key focus of our work in the area of graph signal processing was the problem of clustering, i.e., grouping data points such that groups are maximally homogeneous (points within a group are similar) whereas distinct groups are as much separated as possible (points in distinct groups are maximally dissimilar). For this purpose, we developed methods that build on signed graphs and use either the graph spectrum or total variation minimization to determine the data clusters. For the latter we were able to prove that in the majority of cases the clustering results coincide with the optimal but numerically intractable graph cut.

In cooperation with *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL, Switzerland) we explored efficient decoder architectures for low-density parity check (LDPC) codes. More specifically, we devised quantized message passing algorithms that maximize the information flow in the code graph and particularly well suited for hardware realization. The synthesis of a decoder for 10GigabitEthernet in 28nm CMOS technology lead to a record-breaking throughput of more than 500 Gigabit per second at 20mm² chip area.

Modern communication systems (e.g., the mobile radio standard *LTE Advanced*) more and more rely on feedback channels to improve link quality. For this type of transmission with feedback we analyzed the maximum achievable information rates for the case where the feedback is quantized (as is always the case in practice due to rate limitations). We managed to show that contrary to noisy feedback linear encoding achieves non-vanishing rates. An extension of these results to multi-user systems led to the development of superposition codes, which enable an adaptation to the quality of the feedback signal and thereby maximize the transmission rate. We could solve the associated problem of determining the best resource allocation via algorithms for convex-concave optimization.

ERNENNUNGEN UND PREISE / NOMINATIONS AND AWARDS

Stefan Schwarz: Kardinal-Innitzer Förderungspreis 2020, Preisverleihung aufgrund Corona im Nov. 2021.

Richard Prüller, Thomas Blazek, Stefan Pratschner, Markus Rupp, On the Parametrization and Statistics of Propagation Graphs, Proc. of Eucap, Germany , March 2021.(best paper award)

Faculty Award: Best Diploma Thesis: Sonja Tripkovic, Construction of Mobile Performance Maps using Clustered Crowdsourced Measurements

VERANSTALTUNGEN / EVENTS

Special Session: Distributed and Cell-Free Massive MIMO Systems, Asilomar SSC Nov. 2021.
Organizers: Stefan Schwarz

Special Session: Signal Processing for Advanced Mobile Communications – Towards 6G, EUSIPCO, Aug. 2021, Organizers: Stefan Schwarz and Lucas Ribeiro, TU Illmenau

Informationstechnisches Kolloquium: Digitalisierung für das Erreichen der Klimaziele. Due to the Covid.-19 pandemic, this event was moved to May 18, 2021. Organizers: Christoph Mecklenbräuker, Helmut Malleck, Thomas Zemen, Veranstalter: OVE, TU Wien, AIT.

LEHRVERANSTALTUNGEN / COURSE PROGRAM

Im Studienjahr 2021

1. PFLICHTLEHRVERANSTALTUNGEN / MANDATORY COURSES

			WS	SS
Görtz, Pichler	Signals and Systems 2	VU	----	3.0
Goiser, Schwarz	Telekommunikation	VU	----	3.5
ProfessorInnen und AssistentInnen	Data Communication	VO	----	2.0
Görtz	Wireless Communications 2	VO	----	2.0
Mecklenbräuker, Rupp, Radovic,	Wireless Communications 1	VU	----	4.0
Hlawatsch, Bucco, Ptacek	Digital Communications 1	VU	----	3.0
Fabini, Hartl	Communication Networks 2	VU	----	3.0
Goiser, Radovic	Lab Wireless Communications	LU	----	2.0
Mecklenbräuker, Zhao	Wave propagation	VU	3.0	----
Zseby	Communication Networks 1	VO	3.0	----
Hlawatsch, Bucco, Mircheski	Digital Communications 2	VU	3.0	----
Rupp, Prüller, Tripkovic	Signal Processing 1	VU	3.0	----
Matz, Dittrich	Signal Processing 2	VU	3.0	----

2. WAHLEHRVERANSTALTUNGEN / OPTIONAL COURSES

			WS	SS
Ehrlich-Schupita	Messgeräte der Hochfrequenztechnik A	KO	----	1,5
Hlawatsch, Rupp, Matz	Research Projects in Advanced Signal Processing	SE	3.0	3.0
ProfessorInnen und AssistentInnen	Computer oriented projects	AG	4.0	4.0
Rupp, Mecklenbräuker, Schwarz	International Seminar on Mobile Communication	SE	----	3.0
Matz	Signal Detection	VO	----	2.0

Langwieser	Practical Implementation of Radio Frequency Circuits	PR	----	3.0
Mecklenbräuker, Langwieser, Ehrlich-Schupita	Antenna Design and Realization	PR	----	2.0
Matz	Graphical models in signal processing and communication	VO	----	2.0
Hlawatsch	Parameter Estimations Methods	VO	----	2.0
Matz, Mecklenbräuker	Convex Optimization for Signal Processing and Communication	VO	----	2.0
ProfessorInnen	Bachelor Thesis and Seminar	PR	10.0	10.0
Görtz	Practical Courses (Transitional Rules B.-Thesis)	PA	2.0	2.0
Mecklenbräuker, Rupp	Telecommunication	VU	----	4.0
Ehrlich-Schupita, Neubauer, Lamedschwandner, Cecil	Selected Topics in Electromagnetic Fields and Waves	VU	----	4.0
Goiser	Einführung in die Telekommunikation	VU	----	3.0
Zseby, Iglesias, Meghdouri	Network Security	VU	----	2.0
Zseby	Communication Networks Seminar	SE	----	2.0
Rupp, Mecklenbräuker, Svoboda	Seminar Wireless Communication	SE	----	3.0
Hlawatsch,	Signal Processing Seminar	SE	----	3.0
Gartner	Lab FPGA Programming Fundamentals using VHDL	LU	----	2.0
Görtz, Pichler	Signal Processing for Big Data	SE	----	2.0
Mecklenbräuker, Langwieser, Pratschner	Centimeter and Milimeter Waves	PR	----	2.0
Schwarz	5 th Generation Wireless Technologies	VO	----	2.0
Mecklenbräuker, Pratschner	Shortwave Radio Communication	VO	1.5	----

Langwieser Soklic	Computer Aided RF Circuit Design	PR	3.0	----
Rupp	DSP Seminar	SE	1.0	----
Matz, Mecklenbräuker	MIMO Communications	VO	2.0	----
Matz	Wireless OFDM Systems	VO	2.0	----
Görtz	Practical Course (Transitional Rules B.-Thesis)	PA	2,0	----
Wess	Selected Topics in Signals and Systems	VU	4.0	----
Zseby, Meghdouri, Iglesias	Network Security – Advanced Topics	VU	2.0	----
Görtz	Source Coding	VO	2.0	----
Rupp, Svoboda	Advanced Wireless Communications 1	VO	2.0	----
Görtz, Matz	Digital Communications Seminar	SE	3.0	----
Goiser	Advanced Wireless Communications 2	VO	2.0	----
Mecklenbräuker, Zemen	Advanced Wireless Communications 3	VO	2.0	----
Rupp	Machine Learning Algorithms	VU	4.0	----
Hlawatsch	Bayesian Machine Learning	VO	2.0	----

GASTVORTRÄGE VON INSTITUTSMITGLIEDERN / GUEST TALKS BY MEMBERS OF THE INSTITUTE

Markus Rupp: Invited talk "6G Wireless for Smart Trains", Webinar on Enabling Technologies and Requirements for Future Rail Transport Vertical. Beijing, China, July 2021.

Christoph Mecklenbräuker, Shengya Zhao, Robert Langwieser: "Intelligent surfaces for 6G", Plenary Talk at EURECOM Scientific Council, Sophia-Antipolis, France, 8. Oct. 2021.

Stefan Schwarz: "Non-Coherent Multi-Resolution Broadcasting using Grassmannian Product Codebooks, invited talk at Workshop on Smart Antennas 2021

Markus Rupp: Invited talk "6G Wireless for Smart Trains", Telecommunications Forum, Vienna, Nov. 2021.

FORSCHUNGSPROJEKTE / RESEARCH PROJECTS

SIGNALVERARBEITUNG / SIGNAL PROCESSING

Agent Localization and Inference of Dynamic Environments (FWF Grant P 32055-N31) *Contact:* F. Hlawatsch *Partner:* FWF *Duration:* 07.2019 - 07.2023

Advanced Bayesian Tracking Methods for Medical Imaging and Mobile Communications (WTZ Project CZ 09/2019 between TU Wien and TU Brno, Czech Republic)
Contact: F. Hlawatsch *Partner:* OeAD *Duration:* 01.01.2019 – 31.12.2021

Frames, Reconstruction, and Applications (WTZ project HR 03/2020 between Austria and Croatia)
Contact: Diana. T. Stoeva, *Partner:* OeAD *Duration:* 01.01.2020 - 31.12.2022

MOBILKOMMUNIKATION / MOBILE COMMUNICATIONS

MAR22TDD

Contact: M. Rupp *Partner:* A1 Telekom Austria AG *Duration:* 11.2021 - 12.2022

MAR2021-DSS

Contact: M. Rupp *Partner:* A1 Telekom Austria AG *Duration:* 11.2020 - 12.2021

MAR2021_Coexist

Contact: M. Rupp *Partner:* A1 Telekom Austria AG *Duration:* 11.2020 - 12.2021

CD-Labor für Zuverlässige Drahtlose Konnektivität für eine Gesellschaft in Bewegung

Contact: S. Schwarz *Partners:* A1 Telekom Austria AG, Nokia Solutions and Networks
ÖBB Infrastruktur AG *Duration:* 01.2016 - 12.2022

5G Terrestrial Broadcast in Rel. 16

Contact: S. Schwarz *Partner:* ORS *Duration:* 11.2020 - 12.2021

Optimization of Wireless Remote Repeater Distribution Systems in Tunnels for Trains

Contact: P. Svoboda *Partner:* ÖBB-Infrastruktur AG *Duration:* 10.2019 - 12.2021

SEMONE: High Precision Service Performance Maps for Adaptive Mobile Network Optimization (FFG Bridge)

Contact: P. Svoboda *Partner:* FFG, A1 Telekom Austria AG *Duration:* 03.2019 - 12.2021

A15GMoMa A1 5G Mobile Machbarkeit

Contact: P. Svoboda *Partner:* Telekom Austria AG *Duration:* 10.2020 – 09.2021

A1WLAN21 WLAN Home Networks 2021

Contact: P. Svoboda *Partner:* A1 Telekom Austria AG *Duration:* 07.2021 – 12.2021

21DBStudie Studie zur Evaluierung von Messpositionen in einem ICE BR 412

Contact: P. Svoboda

Partner: Drillisch Netz AG

Duration: 10.2021 -03.2022

LowSin LTE Low SINR Performance Evaluation

Contact: P. Svoboda

Partner: A1 Telekom Austria AG

Duration: 08.2021 – 02.2022

A1 Stratified Sampling 5G TDD

Contact: P. Svoboda

Partner: A1 Telekom Austria AG

Duration: 10.2021 – 14.04.2022

FLEXIBLE FUNKSYSTEME / FLEXIBLE WIRELESS SYSTEMS

Datenfusion von K/X-Band (Radar mit visuellen Sensoren für luftgestützte Plattformen DARVIS),
TAKE OFF Project No. 867400,

Contact: C. Mecklenbräuker, Partners: AIT Austrian Institute of Technology GmbH,
PIDSO-Propagation Ideas and Solutions GmbH,

Diamond Aircraft Industries GmbH.

Duration: 04.2019 - 09.2021

Fixed Access Research 2021 (FAR2021)

Contact: C. Mecklenbräuker, Partner: A1 Telekom Austria AG

Duration: 13.2021 - 08.2021

Flash-Dynamic Spectrum Sharing,

Contact: C. Mecklenbräuker, Partner: T-Mobile Austria GmbH, Duration: 09.2021–10.2021

Intelligent InterSection (IntIntSec), FFG, IKT der Zukunft, 8. Ausschreibung, Project No. 880830,

Contact: C. Mecklenbräuker, Partners: TU Wien Institut für Mechanik und Mechatronik, SWARCO
Futurit GmbH, komobile W7 GmbH, ANDATA
Entwicklungstechnologie GmbH & Co KG, Kuratorium für
Verkehrssicherheit, Wien Leuchtet (MA33).

Duration: 15.10.2020 - 14.10.2023

Windkraft,

Contact: C. Mecklenbräuker, Partners: Dipl.-Ing. Dr. Hermann Bühler GmbH, Bundesministerium
für Landesverteidigung, Duration: 06.2020 - 06.2021

COMMUNICATIONS NETWORKS

TÜV AUSTRIA Research Lab for Safety and Security in Industry (#SafeSecLab)

Contact: T. Zseby

Partner: TÜV AUSTRIA, TU Wien

Duration: 01.2020 - 12.2023

MALORI - MALware cOmmunication in cRITICAL Infrastructures (FFG KIRAS
Programm, Fördernummer 873511)

Contact: Joachim Fabini

Partners: AIT Austrian Institute of Technology, IKARUS Security
Software GmbH, illwerke vkw AG, Wiener Netze GmbH,
Universität Wien, Institut für Europarecht, Internationales Recht und
Rechtsvergleichung, Bundesministerium für Inneres.

Duration: 1.1.2020 – 30.06.2022

SecTULab - Secure TU Distance Learning Laboratories (TU .dcall Lehre 2020, Project DCL017)

Contact: Joachim Fabini

Partners: TU DigitalOffice, TU.IT.

Duration: 1.10.2020 - 30.6.2021

Doctoral College on Secure and Intelligent Human-Centric Digital Technologies (SecInt)

Contact: T. Zseby,

Partners: Faculty of Informatics (TU Wien), Faculty of Mathematics
and Geoinformation (TU Wien)

DISSERTATIONEN / DOCTORAL DISSERTATIONS: (eigene und begutachtete)

- M. Bachl: *"Machine Learning Methods for Communication Networks - Characterization and Analysis of Selected Use Cases"*; Betreuer/in(nen), Begutachter/in(nen): T. Zseby, M. Welzl, A. Rauber; E389, 2021; Rigorosum: 25.06.2021.
- L. Marijanovic: *"Multiplexing Services in 5G New Radio: Optimal Resource Allocation based on Mixed Numerology and Mini-slot Approach"*; Betreuer/in(nen), Begutachter/in(nen): S. Schwarz, M. Rupp, H. Arslan, J. Blumenstein; Institute of Telecommunications, 2021; Rigorosum: 18.02.2021.
- S. Paudel: *"Detecting false data injection attacks against smart grid wide area monitoring systems"*; Betreuer/in(nen), Begutachter/in(nen): T. Zseby, P. Smith, K. McLaughlin, W. Kastner; E389, 2021; Rigorosum: 24.09.2021.
- S. Pratschner: *"Separability of Closely Spaced Users in Massive MIMO Systems"*; Betreuer/in(nen), Begutachter/in(nen): S. Schwarz, F. Kaltenberger, K. Handea; E389, 2021; Rigorosum: 12.02.2021.
- V. Raida: *"Data-Driven Estimation of Spatiotemporal Performance Maps in Cellular Networks"*; Betreuer/in(nen), Begutachter/in(nen): M. Rupp, V. Poulkov, R. Verdone; E389, 2021; Rigorosum: 24.08.2021.

DIPLOM- und MASTER-ARBEITEN / DIPLOMA and MASTER THESES (eigene und betreute):

- J. De Bettignies: *"LSTM Autoencoders for Botnet Detection"*; Betreuer/in(nen): T. Zseby, A. Hartl; E389, 2021; Abschlussprüfung: 15.12.2021.
- A. Fastenbauer: *"System level abstraction and evaluation of non-orthogonal multiple access transmissions"*; Betreuer/in(nen): S. Schwarz, B. Tahir; Telecommunications, 2021; Abschlussprüfung: 07.10.2021.
- L. Geiginger: *"Classification of encrypted QUIC network traffic"*; Betreuer/in(nen): T. Zseby, F. Meghdouri; E389, 2021; Abschlussprüfung: 18.11.2021.
- S. Hellmayr: *"Estimating network properties by inference from heterogeneous measurement sources"*; Betreuer/in(nen): M. Rupp, P. Svoboda; E389, 2021; Abschlussprüfung: 18.11.2021.
- A. Hermanek: *"Sequential Bayesian Optical Flow Estimation Using Temporal Coherence"*; Betreuer/in(nen): F. Hlawatsch, J. Dorazil; E389, 2021; Abschlussprüfung: 07.10.2021.

- J. Křivák: *"Analysis of feeding techniques of a patch antenna array for 5G NR"*; Betreuer/in(nen): J. Láčák, C. Mecklenbräuker, R. Langwieser; Institute of Telecommunications, 2021; Abschlussprüfung: 27.08.2021.
- B. Kreidl: *"Bayesian Nonparametric Inference in State-Space Models with an Application to Extended Target Tracking"*; Betreuer/in(nen): F. Hlawatsch, R. Repp; E389, 2021; Abschlussprüfung: 21.01.2021.
- M. Lobinger: *"Distributed Antenna Systems in 5G Mobile Communications"*; Betreuer/in(nen): S. Schwarz, C. Mendoza; E389, 2021; Abschlussprüfung: 18.11.2021.
- K. Niederwanger: *"Evaluation of Intelligent Surfaces in Railroad Communication"*; Betreuer/in(nen): B. Tahir, S. Schwarz; Institute of Telecommunications, 2021; Abschlussprüfung: 07.10.2021.
- F. Pasic: *"Emulation Techniques for High Speed Train Measurements in 6G Mobile Communications"*; Betreuer/in(nen): M. Rupp, S. Pratschner; Institute of Telecommunications, 2021; Abschlussprüfung: 12.07.2021.
- A. Schreiner: *"An Effective Method to Approximate PIM-Distortions in a Multicarrier-System"*; Betreuer/in(nen): M. Rupp, S. Pratschner; E389, 2021; Abschlussprüfung: 17.06.2021.
- E. Zeraliu: *"Comparison of Ensemble-based Feature Selection Methods for Binary Classification of Imbalanced Data Sets"*; Betreuer/in(nen): T. Zseby, Felix Vazquez; E389, 2021; Abschlussprüfung: 18.08.2021.

ZEITSCHRIFTENARTIKEL / PUBLICATIONS IN SCIENTIFIC JOURNALS

- G. Artner, C. Mecklenbräuker: "NFT-QSL auf Ethereum Blockchain"; QSP Amateurfunkjournal des Österreichischen Versuchssenderverbandes, 46. Jahrgang (2021), 9; S. 16 - 17.
- C. Coronel, C. Wiesmeyr, H. Garn, B. Kohn, M. Wimmer, M. Mandl, M. Glos, T. Penzel, G. Klösch, A. Stefanic-Kejik, M. Böck, E. Kaniusas, S. Seidel: *"3D Camera and pulse oximeter for respiratory events detection"*; IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 25 (2021), 1; S. 181 - 188.
- Z. Huang, J. Piñeiro, T. Domínguez-Bolaño, X. Cai, X. Yin: *"Empirical Dynamic Modeling for Low-Altitude UAV Propagation Channels"*; IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE (2021), 21052499; S. 5171 - 5185.
- F. Iglesias Vazquez, T. Zseby, A. Zimek: *"Clustering Refinement"*; International Journal of Data Science and Analytics, (2021).
- G. Koliander, G. Pichler: *"Modelling the utility of group testing for public health surveillance"*; Infectious Disease Modelling, 6 (2021), S. 1009 - 1024.
- T. Li, F. Hlawatsch: *"A Distributed Particle-PHD Filter Using Arithmetic-Average Fusion of Gaussian Mixture Parameters"*; Information Fusion, 73 (2021), S. 111 - 124.

W. Liu, S. Schwarz, M. Rupp, T. Jiang: *"Pairs of Pilots Design for Preamble-Based Channel Estimation in OQAM/FBMC Systems"*; IEEE Wireless Communications Letters, 10 (2021), 3; S. 488 - 492.

Wenfeng Liu, Stefan Schwarz, Markus Rupp, Da Chen, and Tao Jiang, *"Block-wise preamble design in OQAM/FBMC systems with interference cancellation, "* IEEE WC Letters, vol. 25, no.3, pp. 1015-1018, March 2021

C. Mecklenbräuker: *"Bandwacht - das fremde Wesen"*; QSP Amateurfunkjournal des Österreichischen Versuchssenderverbandes, 2021 (2021), 6; S. 17 - 18.

F. Meghdouri, F. Iglesias Vazquez, T. Zseby: *"Modeling Data with Observers"*;angenommen für Intelligent Data Analysis (2021).

G. Pichler, P. Piantanida, G. Matz: *"Distributed information-theoretic clustering"*; angenommen für Information and Inference: A Journal of the IMA (2021).

S. Schwarz, M. Rupp: *"Reliable Multi-Point Transmissions over Directional MISO TWDP Fading Channels"*; IEEE Transactions on Vehicular Technology, 70 (2021), 2; S. 1394 - 1409.

D. Statovci, P. Ödling, C. Zhang, C. Mecklenbräuker: *"Network Modeling and Performance Evaluation for G.fast"*; IEEE Access, **9** (2021), S. 164026 - 164036.

B. Tahir, S. Schwarz, M. Rupp: *"Analysis of Uplink IRS-Assisted NOMA under Nakagami-m Fading via Moments Matching"*; IEEE Wireless Communications Letters, 10 (2021), 3; S. 624 - 628.

M. Torkudzor, S. Schwarz, J. Abdulai, M. Rupp: *"Energy efficiency, latency and reliability trade-offs in M2M uplink scheduling"*; IET Communications, 15 (2021), 10 S.

M. Wagner, H. Groll, A. Dormiani, V. Sathyanarayanan, C. Mecklenbräuker, P. Gerstoft: *"Phase Coherent EM Array Measurements in a Refractive Environment"*; IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69 (2021), 10; S. 6783 - 6796.

Patente

A. F. Molisch, T. Pohl, C. Mecklenbräuker, H. Hammoud, Y. Zhang: *"Spinning Directional Antenna in Centimeter and Millimeter Wave Bands"*; Patent: USA, Nr. 63/137320; eingereicht: 14.01.2021.

VORTRÄGE UND POSTERPRÄSENTATIONEN (OHNE TAGUNGSBAND-EINTRAG) / LECTURES AND POSTER PRESENTATIONS (WITHOUT CONFERENCE PROCEEDINGS ENTRY)

T. Dittrich, G. Matz: *"Unsupervised Clustering on Signed Graphs with Unknown Number of Clusters"*; Poster: 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2020), Amsterdam (eingeladen); 18.01.2021 - 22.01.2021; in: *"2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)"*, IEEE, (2021), 5 S.

S. Schwarz, B. Tahir: *"Non-Coherent Multi-Resolution Broadcasting using Grassmannian Product Codebooks"*; Vortrag: ITG Workshop on Smart Antennas, Eurecom, French Riviera (eingeladen); 10.11.2021 - 12.11.2021; in: *"Proc. 25th International ITG Workshop on Smart Antennas 2021 (WSA 2021)"*, ITG-Fachbericht, 300 (2021), ISBN: 978-3-8007-5688-9; S. 1 - 6.

T. Zseby: "*Detecting Malware Communication: Challenges and Approaches*"; Vortrag: Vienna CyberSecurity and Privacy Research Cluster: System Security Workshop, online (eingeladen); 10.12.2021.

T. Zseby: "*Hidden Malware Communication in Critical Infrastructures*"; Vortrag: IEEE IAS/PELS/IES Austria Chapter Digital Transformation Technology Webinar (together with Project Sinergy), online (eingeladen); 25.11.2021.

C. Mecklenbräuker, P. Gerstoft, E. Ollila: "*Qualitatively Robust Bayesian Learning for DOA from Array Data using M-Estimation of the Scatter Matrix*"; in: "*International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2021)*", IEEE Xplore, 2021, (eingeladen), 6 S.

C. Mecklenbräuker, S. Zhao, R. Langwieser: "*Intelligent surfaces for 6G*"; Hauptvortrag: EURECOM Scientific Council, Sophia-Antipolis, France (eingeladen); 08.10.2021.

J. Fabini et al.: "*MALORI: Malware-Kommunikation in kritischen Infrastrukturen*"; Poster: 11. KIRAS Fachtagung, Wien (eingeladen); 04.10.2021; in: "*Wissenschaft(f) Sicherheit Geförderte KIRAS-Projekte 2016-2018*", BMLRT (Hrg.); Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Stabstelle für Sicherheitsforschung und Technologietransfer, 1 (2021), S. 98 - 99.

J. Fabini: "*Malware Communication in Critical Infrastructures: The MALORI Project*"; Vortrag: Vienna CyberSecurity and Privacy Research Cluster: System Security Workshop, Vienna (eingeladen); 10.12.2021.

VORTRÄGE UND POSTERPRÄSENTATIONEN (MIT TAGUNGSBAND-EINTRAG) / LECTURES AND POSTER PRESENTATIONS (WITH CONFERENCE PROCEEDINGS ENTRY)

G. Del Grosso, G. Pichler, P. Piantanida: "*Privacy-Preserving Synthetic Smart Meters Data*"; Vortrag: 2021 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA; 16.02.2021 - 18.02.2021; in: "*2021 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*", IEEE (Hrg.); 2021 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), (2021), ISSN: 2472-8152.

T. Dittrich, G. Matz: "*A Maximum A Posteriori Relaxation For Clustering The Labeled Stochastic Block Model*"; Poster: 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Dublin, Ireland; 23.08.2021 - 27.08.2021; in: "*Proc. 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*", (2021), 5 S.

T. Dittrich, G. Matz: "*Non-Convex Total Variation Minimization for Signed Graph Cut Clustering*"; Poster: 2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (ACSSC 2021), Pacific Grove, CA, USA; 31.10.2021 - 03.11.2021; in: "*2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*", (2021), 5 S.

C. Eliasch, T. Blazek, C. Mecklenbräuker: "*Maps of Road User Occupancy in Intersections and their Impact on Target Tracking Performance*"; Vortrag: Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove (CA), USA; 31.10.2021 - 03.11.2021; in: "*55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*", (2021), Paper-Nr. 1400, 5 S.

L. Eller, P. Svoboda, M. Rupp: "*Bayesian Inference of Sector Orientation in LTE Networks based on End-User Measurements*"; Vortrag: 2021 IEEE 94rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Online Only; 27.10.2021 - 28.10.2021; in: "*Proc. 94rd IEEE Vehicular Technology Conference*", (2021).

L. Eller, P. Svoboda, M. Rupp: "*Propagation-aware Gaussian Process Regression for Signal-Strength Interpolation along Street Canyons*"; Vortrag: 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki (virtual); 25.04.2021 - 19.05.2021; in: "*Proc. 93rd IEEE Vehicular Technology Conference*", (2021).

J. Fabini, A. Hartl, F. Meghdouri, C. Breitenfellner, T. Zseby: "*SecTULab: A Moodle-Integrated Secure Remote Access Architecture for Cyber Security Laboratories*"; Vortrag: The 16th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2021), Vienna, Austria; 17.08.2021 - 20.08.2021; in: "*ARES 2021: The 16th International Conference on Availability, Reliability and Security*", Association for Computing Machinery, New York, United States (2021), ISBN: 978-1-4503-9051-4; Paper-Nr. 148, 11 S.

L. Hao, S. Schwarz, M. Rupp: "*Analysis and Optimization of Reconfigurable Intelligent Surfaces Assisted MIMO Systems*"; Poster: 2021 Joint EuCNC & 6G Summit, Porto, Portugal; 08.06.2021 - 11.06.2021; in: "*2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*", (2021), ISBN: 978-1-6654-1526-2; S. 13 - 18.

A. Hartl, J. Fabini, Ch Roschger, P. Eder-Neuhauser, M. Petrovic, R. Tobler, T. Zseby: "*Subverting Counter Mode Encryption for Hidden Communication in High-Security Infrastructures*"; Vortrag: The 16th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2021), Wien; 17.08.2021 - 20.08.2021; in: "*ARES 2021: The 16th International Conference on Availability, Reliability and Security*", Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2021), ISBN: 978-1-4503-9051-4; Paper-Nr. 301, 11 S.

M. Hofer, D. Löschenbrand, J. Blumenstein, H. Groll, S. Zelenbaba, B. Rainer, L. Bernadó, J. Vychodil, T. Mikulasek, E. Zöchmann, S. Sangodoyin, H. Hammoud, B. Schrenk, R. Langwieser, S. Pratschner, A. Prokes, A. F. Molisch, C. Mecklenbräuker, T. Zemen: "Wireless Vehicular Multiband Measurements in Centimeterwave and Millimeterwave Bands"; in: "International Symposium on Personal, Indoor, Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC 2021)", IEEE, 2021, 6 S.

S. Hollerer, C. Fischer, B. Brenner, M. Papa, S. Schlund et al.: "*Cobot attack: a security assessment exemplified by a specific collaborative robot*"; Vortrag: 10th CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technologies (DET 2021) - Digital Technologies as Enablers of Industrial Competitiveness and Sustainability, Budapest; 11.10.2021 - 13.10.2021; in: "*Procedia Manufacturing*", 54 (2021), ISSN: 2351-9789; S. 191 - 196.

E. Jirousek, Z. Huang, S. Pratschner, R. Langwieser, S. Schwarz, M. Rupp: "*MmWave Fronthaul-To-Backhaul Interference in 5G NR Networks*"; in: "32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)", IEEE (Hrg.); IEEE, 2021, ISBN: 978-1-7281-7586-7, S. 1 - 6.

K. Kirev, S. Pratschner, S. Schwarz: "*Measurement-Based Performance Evaluation of 5G NR Broadcasting*"; Poster: 30th European Conference on Communications (EUCNC), Porto, Portugal; 08.06.2021 - 11.06.2021; in: "*Proc. 30th European Conference on Communications*", (2021).

K. Kirev, S. Schwarz, S. Pratschner: "*Measuring and Assessing the Performance of 5G NR Broadcast Systems at Low Mobility*"; Vortrag: 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki (virtual); 25.04.2021 - 19.05.2021; in: "*Proc. 93rd IEEE Vehicular Technology Conference*", (2021), ISBN: 978-1-7281-8964-2; S. 1 - 5.

F. Meghdouri, F. Iglesias Vazquez, T. Zseby: "*Shedding Light in the Tunnel: Counting Flows in Encrypted Network Traffic*"; Vortrag: 21st IEEE International Conference on Data Mining, Auckland, New Zealand; 07.12.2021 - 10.12.2021; in: "*IEEE ICDM Workshop on Data Mining and Machine Learning for Cybersecurity*", IEEE, (2021), S. 798 - 804.

F. Meghdouri, T. Schmied, T. Gärtner, T. Zseby: "*Controllable Network Data Balancing with GANs*"; Poster: NeurIPS workshop on Deep Generative Models and Downstream Applications 2021, Online; 06.12.2021 - 14.12.2021.

C. Mendoza, S. Schwarz, M. Rupp: "*Deep Reinforcement Learning for Dynamic Access Point Activation in Cell-Free MIMO Networks*"; Vortrag: 25th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2021), EURECOM, French Riviera; 10.11.2021 - 12.11.2021; in: "*Proc. of 25th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2021)*", (2021), ISBN: 978-3-8007-5686-5.

M. Mussbah, S. Schwarz, M. Rupp: "*Beam Selection-Based Hybrid Precoding*"; Vortrag: 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki (virtual); 25.04.2021 - 28.04.2021; in: "*Proc. 93rd IEEE Vehicular Technology Conference*", (2021), ISBN: 978-1-7281-8964-2.

M. Mussbah, S. Schwarz, M. Rupp: "*Reduced Complexity Approximate Message Passing for Hybrid Architecture Based Millimeter Wave Massive MIMO Channel Estimation*"; Poster: ITG Workshop on Smart Antennas, EURECOM, French Riviera; 10.11.2021 - 12.11.2021; in: "*Proc. of 25th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2021)*", (2021), ISBN: 978-3-8007-5688-9.

F. Pasic, S. Pratschner, R. Langwieser, D. Schützenhöfer, E. Jirousek, H. Groll, S. Caban, M. Rupp: "*Sub 6 GHz versus mmWave Measurements in a Controlled High-Mobility Environment*"; in: "*Proceedings of the 25th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2021)*", VDE Verlag, Berlin-Offenbach, Germany, 2021, ISBN: 978-3-8007-5686-5, S. 13 - 16.

R. Prestros, K. Hollaus, B. Auinger, M. Leumüller: "*Benchmark for the Near-Field Problem: Simulation versus Measurement*"; in: "2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE", 1; F. Maradei, M. Feliziani, M. Sarto (Hrg.); 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, IEEE, Danvers, MA, USA, 2021, ISBN: 978-1-7281-5579-1, Paper-Nr. 20096561, 5 S.

R. Prüller, T. Blazek, S. Pratschner, M. Rupp: "*On the Parametrization and Statistics of Propagation Graphs*"; Vortrag: 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Düsseldorf, Germany; 22.03.2021 - 26.03.2021; in: "*Proceedings of the 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation*", (2021), ISBN: 978-88-31299-02-2; 5 S.

D. Radovic, C. Mecklenbräuker, T. Blazek: "*OTFS Performance Over Different Measured Vehicular 60 GHz Millimeter-Wave Channels*"; in: "*29th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*", herausgegeben von: IEEE; IEEE Xplore, 2021, 5 S.

B. Ramos Elbal, M. Rupp: "*Coexistence of DSRC and C-V2X communication: modeling a competing scenario*"; Vortrag: IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Finland (virtual); 13.09.2021 - 16.09.2021; in: "*2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*

L. Ribeiro, S. Schwarz, M. Haardt: "*Low-Complexity Zero-Forcing Precoding for XL-MIMO Transmissions*"; Vortrag: 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Dublin, Ireland; 23.08.2021 - 27.08.2021; in: "*Proc. 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*", (2021), ISBN: 978-9-0827-9706-0; S. 1 - 5.

A. Salihu, S. Schwarz, M. Rupp: "*Towards Scalable Uncertainty Aware DNN-based Wireless Localisation*"; Vortrag: 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Dublin, Ireland; 23.08.2021 - 27.08.2021; in: "*Proceedings of 29th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2021*", IEEE, (2021).

S. Schwarz: "*Non-Coherent Broadcasting based on Grassmannian Superposition Transmission*"; Vortrag: International Symposium on Information Theory (ISIT'21), Melbourne, Australia; 12.07.2021 - 20.07.2021; in: "*Proc. International Symposium on Information Theory (ISIT'21)*", (2021), ISBN: 978-1-5386-8209-8; S. 1 - 6.

S. Schwarz, M. Rupp: "*Tree-structured quantization on Grassmann and Stiefel manifolds*"; Vortrag: Data Compression Conference (DCC), Snowbird, Utah; 23.03.2021 - 26.03.2021; in: "*Proc. of the 2021 Data Compression Conference*", (2021), ISBN: 978-1-6654-0333-7; S. 1 - 5.

B. Tahir, S. Schwarz, M. Rupp: "*Outage Analysis of Uplink IRS-Assisted NOMA under Elements Splitting*"; Vortrag: 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki (virtual); 25.04.2021 - 28.04.2021; in: "*Proceedings of the 93rd IEEE Vehicular Technology Conference*", (2021), ISBN: 978-1-7281-8964-2.

B. Tahir, S. Schwarz, M. Rupp: "*IRS-Assisted Code-Domain MIMO-NOMA*"; Vortrag: 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Dublin, Ireland (virtual); 23.08.2021 - 27.08.2021; in: "*Proceedings of the 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*", (2021), ISBN: 978-9-0827-9706-0; S. 821 - 825.

S. Tripkovic, P. Svoboda, V. Raida, M. Rupp: "*Cluster Density in crowdsourced Mobile Network Measurements*"; Vortrag: 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki (virtual); 25.04.2021 - 19.05.2021; in: "*Proc. 93rd IEEE Vehicular Technology Conference*", (2021).

S. Zhao, R. Langwieser, C. Mecklenbräuker: "Reconfigurable Digital Metasurface for 3-Bit Phase Encoding"; In: "*International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2021)*", IEEE Xplore, 2021, 6 S.

H. Zhu, J. Rodríguez-Piñero, Z. Huang, T. Domínguez-Bolaño, X. Cai, X. Yin, J. Lee, D. Matolak: "On the End-to-End Latency of Cellular-Connected UAV Communications"; in: "*2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*", 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE, 2021.