

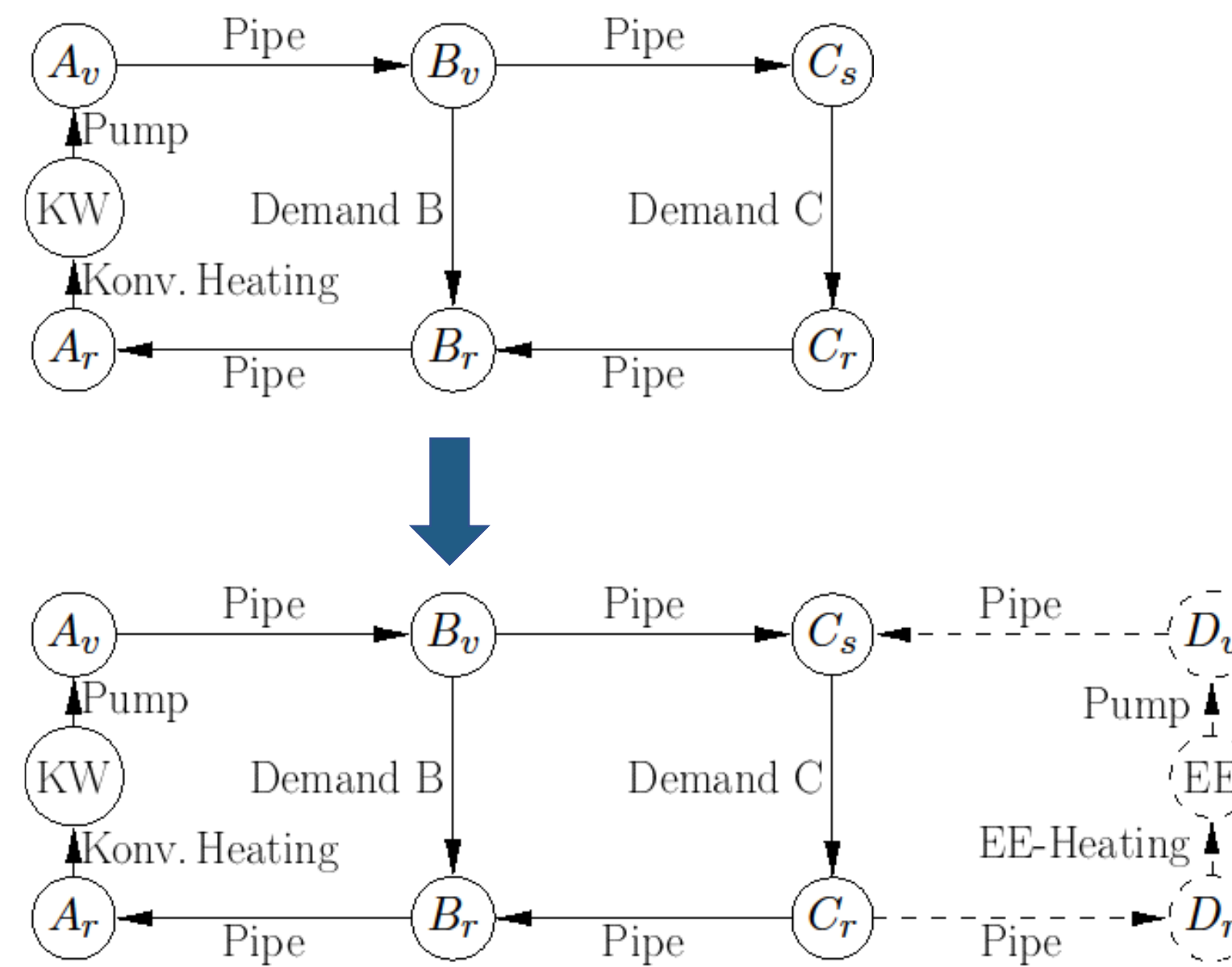
EnEff:Wärme MeFlexWärme

Methodenbaukasten für Flexible Wärmenetze der Zukunft – Steady State Zustandsanalyse und optimale Sensorplatzierung

A. Hintergrund des Projektes

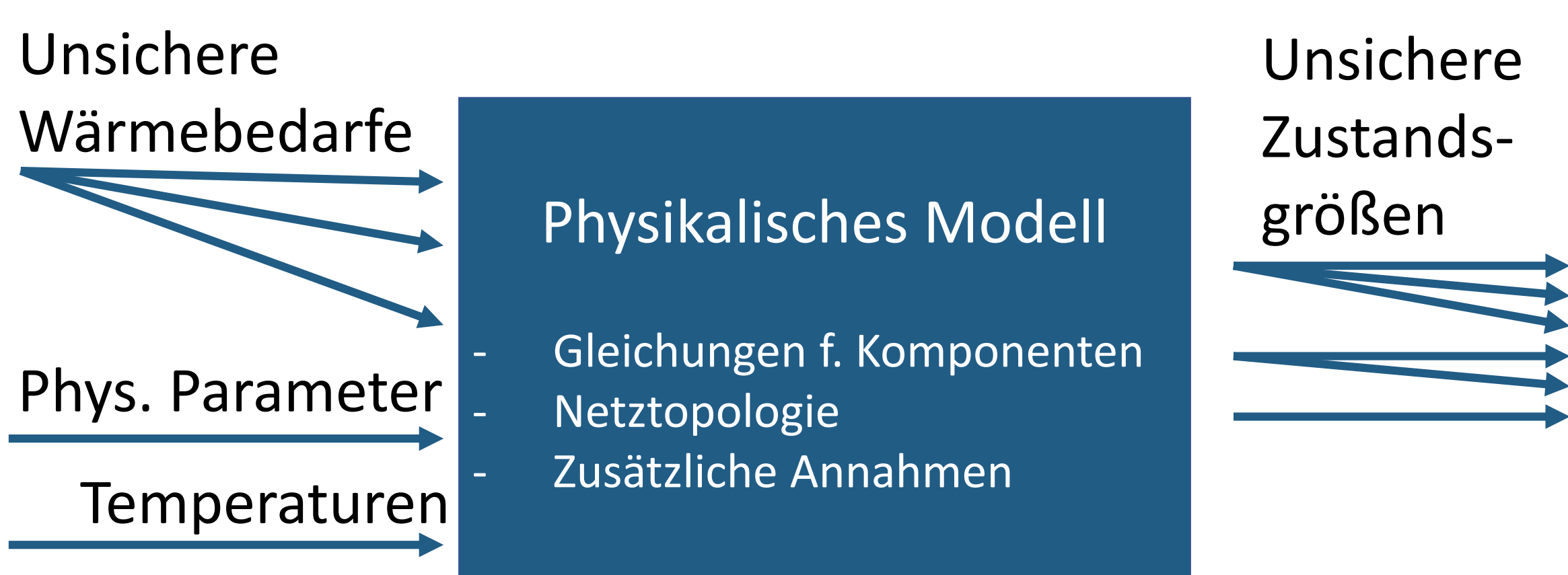
Bei der Dekarbonisierung des Energiesektors stellt der Wärmesektor als größter Endenergieverbraucher ein entscheidendes Handlungsfeld dar. Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von Biomasse ist die Elektrifizierung des Wärmesektors notwendig, um **CO₂-Neutralität** zu erreichen. Gleichzeitig erlaubt es Power-to-heat Flexibilität aus dem Wärmesektor in den Stromsektor zu übertragen.

Fernwärmenetze können genutzt werden, um flexible Verbraucher, Erzeuger und Speicher zu vernetzen und so Flexibilitätspotenziale im Wärmesektor zu erschließen. In MeFlexWärme werden Methoden für diesen **flexiblen Betrieb** der traditionell reinen Verteilnetze entwickelt.



Da die Wärmeentnahmestellen in der Regel ohne eigene Pumpe betrieben werden muss Netzseitig eine **Mindestdruckdifferenz** zwischen Vor- und Rücklauf sichergestellt werden. Dies geschieht in der Regel dadurch, dass der Druckunterschied am **Schlechtpunkt** gemessen und die Kraftwerkspumpe darauf geregelt wird. Der Schlechtpunkt ist der Verbraucher, an dem die geringste Druck-differenz erwartet wird.

Wird das Netz nun um **dezentrale Erzeugung** erweitert, so ändert sich der Schlechtpunkt je nach Einspeise- und Entnahmesituation. Um einen **sicheren Betrieb** zu gewährleisten muss der Netzzustand mit Hilfe weiterer **Sensoren** geschätzt werden. Die dafür zusätzlich eingesetzten Sensoren sollen so platziert werden, dass sie die **maximale Information** für die Zustandsschätzung liefern.



B. Steady State Zustandsberechnung

Die Steady State Zustandsberechnung wird unter anderem für die Sensoroptimierung benötigt. Es wird angenommen, dass die Zustandsvariablen (Druck, Temperatur, Massenstrom) sowie Wärmeeinspeisungen und -entnahmen **zeitlich konstant** sind. Die Vorlauftemperatur des Kraftwerks sowie die Rücklauftemperaturen und die Wärmebedarfe der Verbraucher gehen als Eingangsgrößen in das Modell ein. Für die Verbraucher errechnet sich der **Massenstrom** aus der lokal vorliegenden Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie dem jeweiligen **Wärmebedarf**. Entlang der Rohre werden **Wärme- und Druckverluste** abhängig von den jeweiligen **Temperaturen** und **Massenströmen** modelliert. In den Knoten gelten Massen- und Energieerhaltung. Das sich daraus ergebende nichtlineare Gleichungssystem wird mit einer Kombination aus einer **Fixpunktiteration** und einem **Newtonverfahren** gelöst.

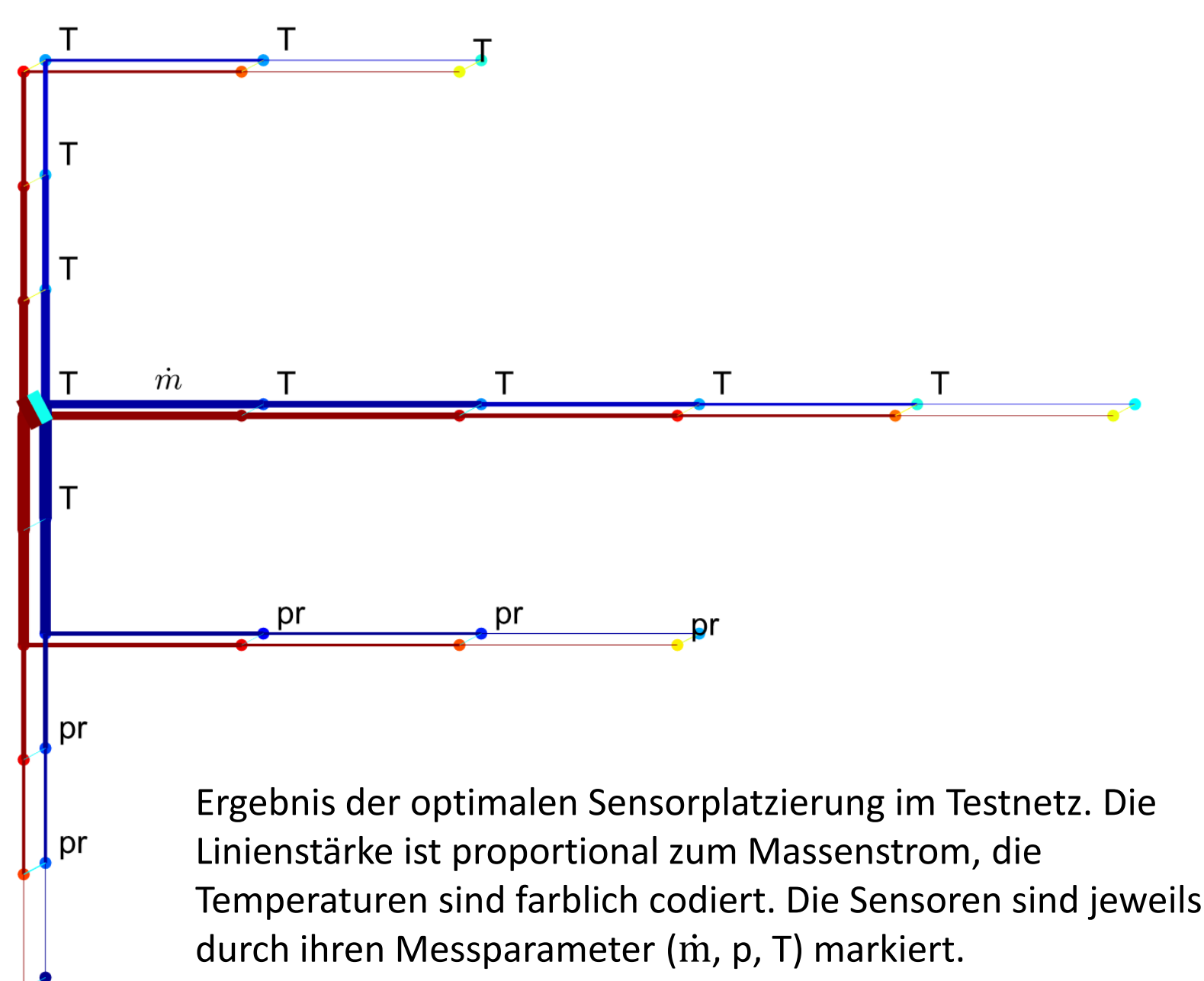
C. Auswahl der optimalen Sensorpositionen

Der Einbau neuer Sensoren ω in bestehende Fernwärmenetze ist mit großem organisatorischem und finanziellem **Aufwand** verbunden. Die Sensorpositionen werden daher optimiert, um die **maximale Information** über das physikalische System zu liefern. Für diese Optimierung wird angenommen, dass die Wärmebedarfe der Verbraucher **unsicherheitsbehaftet** sind. Die Modellierung des Fernwärmenetzes überträgt diese Unsicherheit auf die Zustandsgrößen. Aus der **Jakobimatrix** J des Modells nach den unsicheren Eingangsgrößen und der **Messgenauigkeit der Sensoren** Σ lässt sich die **Fisherinformationsmatrix** F berechnen. Sie ist ein Maß dafür, wie gut eine Zustandsschätzung für ein gegebenes Set an Sensoren maximal sein kann. Zur Ermittlung der optimalen Sensorpositionen wird die Summe aus einem

Designkriterium Ψ der inversen Fisherinformationsmatrix F^{-1} und einem Strafterm für die **Kosten der Sensoren** $p(\omega)$ minimiert. Je nach Gewichtung des Strafterms werden die Kosten für mehr Sensoren gegen den Informationsgewinn abgewogen. Zusätzliche **Nebenbedingungen** im Optimierungsproblem garantieren die Verwendung bereits verbauter Sensoren (A) und schließen die Verwendung unsinniger Sensorpositionen aus (B).

$$\begin{aligned} \min_{\omega} \quad & \Psi(F^{-1}) + \kappa p(\omega) \\ \text{s. t.} \quad & F = J^T \Sigma^{-1} J \\ & \Sigma = \text{diag}(\sigma_i) \\ & \Omega = \text{diag}(\omega_i) \\ & A\omega = 1 \\ & B\omega = 0 \end{aligned}$$

Optimale Sensorplatzierung



Ergebnis der optimalen Sensorplatzierung im Testnetz. Die Linienstärke ist proportional zum Massenstrom, die Temperaturen sind farblich codiert. Die Sensoren sind jeweils durch ihren Messparameter ($\dot{m}$, p , T) markiert.

D. Ergebnisse der optimalen Sensorplatzierung

Zur Validierung der Ergebnisse wird das nebenstehende Testnetz optimiert. Es besteht aus drei separaten Strängen, die insgesamt **17 Verbraucher** versorgen. Als Designkriterium wird die Spur der inversen Fischerinformationsmatrix verwendet. κ wird so gewählt, dass genau **17 Sensoren** platziert werden. In der nachstehenden Tabelle wird das optimierte Set für verschiedene Designkriterien mit zufälligen Sets von je 17 Sensoren verglichen. Das gleiche Designkriterium innerhalb der ersten 10.000 Stichproben wurde bei **zufälligen Sets** erst mit **24 Sensoren** erreicht.

$\Psi(F^{-1})$	$\text{trace}(F^{-1})$	$\det(F^{-1})$	$\lambda_{\max}(F^{-1})$
Optimiert:	6.584e+03	7.165e+04	6.233e+03
Zufällige Auswahl 1:	1.732e+04	1.804e+24	9.035e+03
Zufällige Auswahl 2:	8.758e+05	2.092e+31	8.606e+05
Zufällige Auswahl 3:	4.262e+05	6.128e+27	3.852e+05

Ansprechpartner



Andreas Bott
64289, Darmstadt, Deutschland
Landgraf-Georg str. 4
Tel.: +49 6151 16-21720
Fax: +49 6151 16-21712
E-Mail: andreas.bott@eins-tu-darmstadt.de

Alexander Matei
64289, Darmstadt, Deutschland
Dolivostraße 15
Tel.: +49 6151 16-23456
Fax: +49 6151 16-23445
E-Mail: matei@mathematik.tu-darmstadt.de

