

# Fluktuationsspektroskopie an quasi-zweidimensionalen molekularen Metallen



## Masterarbeit

vorgelegt am: 02. Juni 2014

am Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt  
am Main

Name: David Zielke  
Matrikelnummer: 4858203  
Erstgutachter: Prof. Dr. J. Müller  
Zweitgutachter: Prof. Dr. M. Lang



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Elektronische Fluktuationen im Festkörper</b>	<b>5</b>
1.1 Fluktuationen im Zeitraum . . . . .	5
1.2 Autokorrelationsfunktion . . . . .	9
1.3 Spektrale Leistungsdichte . . . . .	10
1.4 Die häufigsten Rauscharten . . . . .	13
1.4.1 Thermisches Rauschen . . . . .	13
1.4.2 Schrotrauschen . . . . .	14
1.4.3 $1/f$ -Rauschen . . . . .	14
1.4.4 Telegraphenrauschen . . . . .	21
1.5 Zweites Spektrum . . . . .	22
1.5.1 Berechnung des Zweiten Spektrums . . . . .	24
1.5.2 Modellsysteme . . . . .	25
<b>2 Experimenteller Aufbau</b>	<b>29</b>
2.1 Kryostatentechnik . . . . .	29
2.1.1 Funktionsweise . . . . .	29
2.1.2 Probenstab und Probenhalter . . . . .	31
2.1.3 Steuerung . . . . .	31
2.2 Messaufbau . . . . .	32
2.2.1 Fluktuationsspektroskopie . . . . .	32
2.2.2 Verwendete Geräte . . . . .	35
2.2.3 Externe Rauschquellen . . . . .	36
2.2.4 Messmethoden . . . . .	36
2.3 Messablauf . . . . .	39

2.4	Signalverarbeitung mittels Datenerfassungskarte . . . . .	40
2.4.1	Abtast-Theorem . . . . .	40
2.4.2	Signalaufzeichnung . . . . .	41
2.4.3	Spektrenberechnung . . . . .	41
2.4.4	Programmcode . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Quasi-zweidimensionale Organische Ladungstransfersalze</b>	<b>45</b>
3.1	$\kappa$ -(BEDT-TTF) <sub>2</sub> X . . . . .	45
3.1.1	Das Phasendiagramm . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>53</b>
4.1	Ohmscher Widerstand . . . . .	53
4.2	Spektrale Leistungsdichte . . . . .	57
4.3	Frequenzexponent $\alpha$ . . . . .	61
4.4	Zweites Spektrum . . . . .	64
	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>71</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>80</b>

# Einleitung

Die Untersuchung stark korrelierter elektronischer Systeme stellt ein aktuelles Forschungsgebiet der Festkörperphysik dar. Beginnend mit der Entdeckung der Supraleitung im Jahr 1911 durch den niederländischen Physiker Heike Kamerlingh Onnes wurden immer wieder Anstrengungen unternommen, um weitere supraleitende Materialien mit immer höheren Übergangstemperaturen  $T_c$  zu finden. Infolgedessen wurden viele neuartige Materialien synthetisiert, insbesondere die Klasse der organischen Ladungstransfersalze.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Ladungstransfersalz der  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>-X Familie untersucht. Dabei stellt BEDT-TTF das Donatormolekül und X eines von vielen möglichen Anionmolekülen dar. Donator- und Akzeptormolekül gehen zusammen eine Wasserstoffbrückenbindung ein. Die Moleküle ordnen sich dabei in einer Schichtstruktur an. Durch den Überlapp benachbarter Donator-Molekülorbitale können die Elektronen delokalisieren, wodurch ein begünstigter Ladungstransfer in zwei Raumrichtungen gegeben ist. Dieser verleiht der  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>-X Familie ihre quasi-Zweidimensionalität. Im Bereich des Temperatur-Druck-Phasendiagramms lassen sich mehrere Charakteristika nennen: Zunächst können durch die Substitution des Anions X verschiedene statische Positionen im Phasendiagramm erreicht werden. Zusätzlich kann durch Anlegen von hydrostatischem Druck die Position im Phasendiagramm weiter verändert werden, ebenso wie durch eine Deuterierung der Ethylen-Endgruppen des BEDT-TTF-Moleküls. Dies hat zur Folge, dass eine Vielzahl elektronischer Zustände innerhalb dieser Familie realisierbar sind: Neben einem metallischen Bereich mit supraleitendem Grundzustand existiert auch ein paramagnetisch isolierender Bereich mit antiferromagnetischem Grundzustand. Dabei sind beide Bereiche durch einen Bandbreiten getriebenen Mott Metall-Isolator-Übergang (MIT) erster Ordnung voneinander getrennt. Dieser Übergang besitzt einen kritischen Endpunkt zweiter Ordnung. Weiterhin existiert ein glasartiger Übergang bei

$T_G \approx 75$  K, beim dem ein Teil der Molekülstruktur eingefroren wird. Aufgrund des reichhaltigen Phasendiagramms mit einem Mott Metall-Isolator-Übergang werden diese Systeme oft als Modellsysteme für die Untersuchung des MIT angesehen.

Zur Untersuchung des Metall-Isolator-Übergangs und des kritischen Endpunkts wird in dieser Arbeit die Fluktuationsspektroskopie angewandt. Dafür wird die spektrale Leistungsdichte des elektrischen Widerstands am teilweise deuterierten quasi-zweidimensionalen Ladungstransfersalz  $\kappa$ -[(h-ET)<sub>0,2</sub>(d-ET)<sub>0,8</sub>]<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br bestimmt. Diese Methode ist besonders sensitiv auf korrelationsgetriebene Ordnungsphänomene sowie auf strukturelle Anregungen, welche das Elektronensystem beeinflussen. Um sich dem Bereich des MIT möglichst nah annähern zu können, wird das zu untersuchende Ladungstransfersalz mit unterschiedlichen Kühlraten abgekühlt. Dies hat einen subtilen Einfluss auf die Bandbreite des System, wodurch kleine Verschiebungen der Position im Phasendiagramm realisiert werden können. Mit Hilfe der Fluktuationsspektroskopie lassen sich Informationen über die Dynamik der am Ladungstransport beteiligten Elektronen gewinnen und damit Rückschlüsse auf die physikalischen Prozesse im Inneren des Festkörpers ziehen.

Als weitergehende Untersuchung der Ladungsträgerdynamik wird das sogenannte zweite Spektrum berechnet, um mögliche nicht-gauß'sche Fluktuationen im Bereich des kritischen Endpunktes aufzudecken. Dazu wurde eine Software geschrieben, die es einem ermöglicht, aus dem aufgezeichnetem Spannungssignal direkt das zweite Spektrum zu berechnen.

Zu Beginn dieser Arbeit wird im ersten Kapitel zunächst eine theoretische Einführung gegeben, in der die mathematische Beschreibung von Fluktuationen im Zeitraum erklärt wird. Nachfolgend werden die Begriffe der Autokorrelationsfunktion und der spektralen Leistungsdichte eingeführt. Anschließend folgt eine kurze Betrachtung der häufigsten Rauscharten und abschließend die theoretischen Grundlagen für das zweite Spektrum. Im zweiten Kapitel wird die verwendete Kryostatentechnik und der Messaufbau sowie der Messablauf erklärt. Zusätzlich wird die Signalverarbeitung im Bezug auf die Berechnung des zweiten Spektrums dargelegt. Kapitel Drei beschäftigt sich mit den physikalischen Grundlagen und Eigenschaften der  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>-X Salze. Abschließend werden im vierten Kapitel die Ergeb-

nisse der Widerstandsanalyse, der Fluktuationsspektroskopie und die des zweiten Spektrums gezeigt und diskutiert.



# Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das teilweise deuterierte organische Ladungstransfersalz  $\kappa$ -[(h-ET)<sub>0,2</sub>(d-ET)<sub>0,8</sub>]<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br untersucht. Ziel der Arbeit war es, die Ladungsträgerdynamik in unmittelbarer Nähe zum Mott Metall-Isolator-Übergang und dessen kritischen Endpunkt zu untersuchen. Durch seine Lage im Phasendiagramm eignete sich das untersuchte Ladungstransfersalz im Besonderen um dieses Ziel zu erreichen. Um sich im Temperatur-Druck-Phasendiagramm stetig dem MIT zu nähern, wurde die Probe mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in einem Kryostaten von Raumtemperatur bis ca. 10 K heruntergekühlt. Aus der Literatur war bereits bekannt, dass die Kühlrate die Bandbreite  $W$  beeinflusst [45]. Dies ist eine elegante Weise, um mit nur einer physikalischen Probe den Bereich um den MIT „abzuscannen“.

Als Messmethode kam dabei neben einer hochauflösenden Widerstandsmessung die Fluktuationsspektroskopie zum Einsatz. Mit dieser Methode war es möglich, die Stärke des Widerstandsrauschens zu bestimmen und zudem die Ladungsträgerdynamik genauer zu untersuchen.

Die Auswertung des spezifischen Widerstands ergab ein sehr systematisches Verhalten. In Abhängigkeit der Kühlrate  $q$ , mit welcher die Glasübergangstemperatur  $T_G \approx 75$  K durchschritten wird, ändert sich das elektronische Verhalten der Probe. Mit zunehmender Abkühlrate konnte so die Position im Phasendiagramm in kleinen Schritten dem Mott MIT angenähert werden. Dabei lies sich das Verhalten des spezifischen Widerstands mit der s-förmigen Übergangslinie des MIT in Einklang bringen. Insgesamt konnten die Widerstandsmessungen den aus der Literatur bekannten Verlauf bestätigen [57].

Die Fluktuationsspektroskopie lieferte zwei wichtige Größen. Zum einen die spektrale Leistungsdichte des normierten Widerstandsrauschens  $S_R/R^2$  bei der Frequenz  $f = 1$  Hz, und zum anderen den dazugehörigen Frequenzexponenten  $\alpha$ . Dabei zeigt das Widerstandsrauschen eine starke Zunahme im Temperaturbereich von  $T = 20 - 50$  K

für alle Abkühlraten. Zudem konnte eine Systematik herausgefunden werden: Mit zunehmender Kühlrate stieg das Rauschniveau weiter an und wurde bei  $q = 5 \text{ K/min}$  maximal. Bei weiter zunehmender Kühlrate sank das Niveau wieder und nahm bei  $q = 32 \text{ K/min}$  einen ähnlich hohen Wert wie bei  $q = 5 \text{ K/min}$  an. Dieses Verhalten lässt die Vermutung zu, dass mit zunehmender Kühlrate der Abstand zum Mott MIT verringert wurde und die kritischen Fluktuationen stark anstiegen. Bei noch größeren Kühlraten ist dann der MIT überschritten, was sich in einer Abnahme der Fluktuationen äußert. Dies ist konsistent mit der Annahme, dass das Elektronensystem eine Art Glasübergang erfährt, als „Vorbote“ für den MIT [60]. Die Betrachtung des Widerstands unterstützt diese These zusätzlich. Die Zunahme der Fluktuationen für die schnellste Abkühlrate könnte möglicherweise durch den höheren Grad an Unordnung, die beim Durchschreiten des Glasübergangs eingefroren wird, erklärt werden. Zusätzlich waren im Temperaturbereich zwischen 40-80 K kleinere Sprünge im normierten Widerstandsrauschen zu finden. Diesen konnte jedoch keine Gemeinsamkeit mit einer anderen Größe zugeordnet werden, weshalb die Ursache für das Auftreten weiterhin unklar bleibt. Zudem konnte bei allen Abkühlraten ein breites Maximum im Bereich der Glasübergangstemperatur gemessen werden. Dies bestätigt frühere Messungen [18]. Die Analyse des Frequenzexponenten  $\alpha$  zeigt ebenfalls im Bereich der Glasübergangstemperatur und im Bereich um den MIT eine deutliche Signatur. In beiden Fällen steigt der Frequenzexponent  $\alpha$  von Werten  $\alpha < 1$  auf Werte  $\alpha > 1$ . Dies stellt eine Verlangsamung der Ladungsträgerdynamik dar und unterstützt die These, dass das elektronische System im Bereich des MIT einen glasartigen Übergang erfährt. Sowohl die Zunahme der Fluktuationen als auch die Verlangsamung der Ladungsträgerdynamik wurden bereits in anderen Systemen mit MIT beobachtet, sowohl für zwei- als auch dreidimensionale Systeme [60, 61]. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dieses Feature in einem weiteren zweidimensionalen System nachgewiesen werden. Dabei steht die Frage im Raum, ob es sich dabei um ein universelle Feature des Mott Metall-Isolator-Übergangs handelt und ist Gegenstand aktueller Forschungen.

Der Vergleich der theoretischen Vorhersage des Frequenzexponenten  $\alpha$  durch das DDH-Modell mit den experimentell bestimmten Werten zeigte eine gute Übereinstimmung für alle Kühlraten. Jedoch wurden bei Temperaturen um  $T = 34 \text{ K}$  starke Abweichungen festgestellt, wodurch die Annahme gerechtfertigt ist, dass bei dieser Temperatur die Grundannahme des DDH-Modells - nämlich voneinander unabhän-

gige Fluktuatoren - nicht mehr erfüllt ist.

Um diese Tatsache weitergehend zu untersuchen, wurde das zweite Spektrum über eine selbstgeschriebene Software berechnet. Tatsächlich zeigte sich bei genau  $T = 34$  K ein frequenzabhängiges zweites Spektrum. Jedoch existierte in einer ersten Abkühlrate von  $q = 10$  K/min nur eine einzige Messung in diesem Temperaturbereich. Um weitere Punkte aufzunehmen, wurde zu einem späteren Zeitpunkt eine zweite Einkühlung mit  $q = 10$  K/min vorgenommen. Jedoch zeigen sowohl der spezifische Widerstand als auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung des gemessenen Spannungssignals enorme Unterschiede im Bezug auf die erste Einkühlung mit gleicher Geschwindigkeit. Auch wenn das zweite Spektrum bei den wiederholten Messungen in einem sehr schmalen Temperaturbereich eine Frequenzabhängigkeit aufwies, so muss dennoch davon ausgegangen werden, dass im Falle der zweiten Einkühlung eher ein Zustand der Phasenseparation als kritische Fluktuationen zu einem frequenzabhängigen zweiten Spektrum geführt haben. Die Betrachtung des erhöhten Widerstands bei diesen Messungen und die damit korrespondierende Position im Phasendiagramm sind konsistent mit der Literatur [62].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich mit Hilfe der Fluktuationsspektroskopie wichtige und aufschlussreiche Analysen des Mott Metall-Isolator-Übergangs in der Familie der  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>-X Ladungstransfersalze durchführen lassen konnten. Dabei war die Nähe von  $\kappa$ -[(h-ET)<sub>0,2</sub>(d-ET)<sub>0,8</sub>]<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br im Phasendiagramm zur MIT-Übergangslinie von entscheidender Bedeutung. Die selbstgeschriebene Software zur Berechnung der zweiten Spektren ist dabei sensitiv auf Abweichungen von nicht gauß-artigen Fluktuationen.

Für nachfolgende Untersuchungen der kritischen Fluktuationen und der Ladungsträgerdynamik sollten auf jeden Fall weitere Messungen im Bereich um  $T \approx 34$  K durchgeführt werden, um eine höhere Statistik zu bekommen. Zusätzlich könnte eine längere Datenaufzeichnung bei einer Abkühlrate von  $q = 10$  K/min weitere interessante Ergebnisse liefern, da hier sowohl das normierte Widerstandsrauschen maximal, als auch die Signaturen des Frequenzexponenten  $\alpha$  am deutlichsten waren. Ebenso könnte eine magnetfeldabhängige Messung weitere Aufschlüsse zum Verhalten der Ladungsträger am MIT liefern.

Auf der technisch-experimentatorischen Seite sollte eine bessere Schirmung des gesamten Experiments gegenüber externen Rauschbeiträgen angestrebt werden. Nicht zuletzt durch die vorhandenen Peaks in den ersten Oktaven der spektralen Leistungsdichten war die Auflösung der zweiten Spektren beschränkt. Zudem besitzen die organischen Ladungstransfersalze ein hohes intrinsisches Rauschniveau, wodurch die Fluktuationsspektroskopie an ihnen relativ dankbar durchzuführen ist. Bei Materialien mit geringerem intrinsischen Rauschen könnte eine Fluktuationsspektroskopie möglicherweise nicht mehr durchführbar sein, da dann die externen Rauschbeiträge dominieren.

Zudem sollte in Erwägung gezogen werden, die Softwareversion von Python 2.x auf Python 3.x zu wechseln. Damit sind längere Messaufzeichnungen möglich, was der Auflösung des zweiten Spektrums wesentlich zugutekommt. Außerdem könnten dann mehrere Berechnungen parallel laufen, was die Auswertegeschwindigkeit erhöht.

# Literatur

- [1] Sh. Kogan. „Electronic Noise and Fluctuations in Solids“. Cambridge University Press, 1996 (siehe S. 6).
- [2] Rudolf Müller. „Beschreibung des Rauschens im Zeitbereich“. German. In: *Rauschen*. Bd. 15. Halbleiter-Elektronik. Springer Berlin Heidelberg, 1990, S. 20–41 (siehe S. 7, 9, 10, 14).
- [3] Jens Brandenburg. „Fluktuationsspektroskopie an organischen Ladungstransfersalzen“. 2010 (siehe S. 8, 11, 37, 51, 58, 60).
- [4] J.H. Jeans. „XI. On the partition of energy between matter and Æther“. In: *Philosophical Magazine Series 6* 10.55 (1905), S. 91–98 (siehe S. 10).
- [5] A. Khintchine. „Korrelationstheorie der stationären stochastischen Prozesse“. In: *Mathematische Annalen* 109 (1934), S. 604–615 (siehe S. 12).
- [6] J. B. Johnson. „Thermal Agitation of Electricity in Conductors“. In: *Phys. Rev.* 32 (1 1928), S. 97–109 (siehe S. 13).
- [7] H. Nyquist. „Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors“. In: *Phys. Rev.* 32 (1 1928), S. 110–113 (siehe S. 13).
- [8] W. Schottky. „Über spontane Stromschwankungen in verschiedenen Elektrizitätsleitern“. In: *Annalen der Physik* 362.23 (1918), S. 541–567 (siehe S. 14).
- [9] Richard F. Voss und John Clarke. „ $1/f$ -noise in music and speech“. In: *Nature* 258.5533 (1975), S. 317–318 (siehe S. 14).
- [10] Per Bak u. a. „Unified Scaling Law for Earthquakes“. In: *Phys. Rev. Lett.* 88 (17 2002), S. 178501 (siehe S. 14).
- [11] C.-K. Peng u. a. „Long-range correlations in nucleotide sequences“. In: *Nature* 356.6365 (1992), S. 168–170 (siehe S. 14).

- [12] C.-K. Peng u. a. „Long-range anticorrelations and non-Gaussian behavior of the heartbeat“. In: *Phys. Rev. Lett.* 70 (9 1993), S. 1343–1346 (siehe S. 14).
- [13] David L. Gilden. „Cognitive emissions of 1/f noise“. In: *Psychological Review* 108.1 (2001), S. 33–56 (siehe S. 14).
- [14] B. Raquet. „Electronic Noise in Magnetic Materials and Devices“. English. In: *Spin Electronics*. Hrsg. von Michael Ziese und Martin J. Thornton. Bd. 569. Lecture Notes in Physics. Springer Berlin Heidelberg, 2001. Kap. 11, S. 232–273 (siehe S. 14, 16, 17, 21).
- [15] J. B. Johnson. „The Schottky Effect in Low Frequency Circuits“. In: *Phys. Rev.* 26 (1 1925), S. 71–85 (siehe S. 15).
- [16] F.N. Hooge. „1/f noise is no surface effect“. In: *Physics Letters A* 29.3 (1969), S. 139–140 (siehe S. 16).
- [17] W. H. Press. „Flicker Noise in Astronomy and Elsewhere“. In: *Comments Astrophysics and Space Physics* 7.4 (1978), S. 103–119 (siehe S. 17).
- [18] Benedikt Hartmann. „Fluktuationsspektroskopie an dem organischen Ladungstransfersalz  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl.“ Magisterarb. Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt am Main, 2012 (siehe S. 18, 32, 38, 48, 60, 63, 72).
- [19] J. Bernamont. „Fluctuations of resistance in the metallic conductor of a weak volume“. In: *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L' Academie des Sciences* 198 (1934), S. 1755–1758 (siehe S. 17–19).
- [20] F. K. Du Pré. „A Suggestion Regarding the Spectral Density of Flicker Noise“. In: *Phys. Rev.* 78 (5 1950), S. 615–615 (siehe S. 18).
- [21] A. Van Der Ziel. „On the noise spectra of semi-conductor noise and of flicker effect“. In: *Physica* 16.4 (1950), S. 359–372 (siehe S. 18).
- [22] P. Dutta, P. Dimon und P. Horn. „Energy Scales for Noise Processes in Metals“. In: *Physical Review Letters* 43.9 (1979), S. 646–649 (siehe S. 19).
- [23] B. Raquet u. a. „1/f noise in the half-metallic oxides CrO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, and La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub>“. In: *Phys. Rev. B* 59.19 (Mai 1999), S. 12435–12443 (siehe S. 20, 33).

- 
- [24] D. M. Fleetwood, T. Postel und N. Giordano. „Temperature dependence of the  $1/f$  noise of carbon resistors“. In: *Journal of Applied Physics* 56.11 (1984), S. 3256–3260 (siehe S. 20).
- [25] J. H. Scofield, D. H. Darling und W. W. Webb. „Exclusion of temperature fluctuations as the source of  $1/f$  noise in metal films“. In: *Phys. Rev. B* 24 (12 Dez. 1981), S. 7450–7453 (siehe S. 20).
- [26] K. S. Ralls u. a. „Discrete Resistance Switching in Submicrometer Silicon Inversion Layers: Individual Interface Traps and Low-Frequency Noise“. In: *Phys. Rev. Lett.* 52 (3 Jan. 1984), S. 228–231 (siehe S. 22).
- [27] Jens Müller u. a. „Single-electron switching in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  / GaAs Hall devices“. In: *Phys. Rev. B* 74.12 (Sep. 2006) (siehe S. 22).
- [28] Hans Gerhard (Hg.) Rönz Bernd Strohe. „Lexikon Statistik (German Edition)“. Gabler, 1994 (siehe S. 22).
- [29] I. Raičević u. a. „Non-Gaussian noise in the in-plane transport of lightly doped  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ : Evidence for a collective state of charge clusters“. In: *Phys. Rev. B* 83.19 (Mai 2011) (siehe S. 23).
- [30] G. M. Khera und J. Kakalios. „Temperature and doping dependence of non-Gaussian  $1/f$  noise and noise statistics in hydrogenated amorphous silicon“. In: *Phys. Rev. B* 56 (4 Juli 1997), S. 1918–1927 (siehe S. 24).
- [31] Clare C. Yu. „Why Study Noise Due to Two Level Systems: A Suggestion for Experimentalists“. English. In: *Journal of Low Temperature Physics* 137.3-4 (2004), S. 251–265 (siehe S. 24–28).
- [32] M. B. Weissman. „What is a spin glass? A glimpse via mesoscopic noise“. In: *Rev. Mod. Phys.* 65 (3 Juli 1993), S. 829–839 (siehe S. 24, 26, 41).
- [33] M WEISSMAN, N ISRAELOFF und G ALERS. „Spin-glass fluctuation statistics: mesoscopic experiments in Mn“. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 114 (1-2 1992), S. 87–130 (siehe S. 25–27).
- [34] J. Jaroszyński, Dragana Popović und T. M. Klapwijk. „Universal Behavior of the Resistance Noise across the Metal-Insulator Transition in Silicon Inversion Layers“. In: *Phys. Rev. Lett.* 89 (27 Dez. 2002), S. 276401 (siehe S. 26).

- [35] N. Leps. *Rauschmessungen an hochorientiertem pyrolytischen Graphit*. 2006 (siehe S. 30).
- [36] Harry H Binder. „Lexikon der chemischen Elemente: Das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten (German Edition)“. S. Hirzel, 1999 (siehe S. 31).
- [37] U. Kiencke und H. Jäkel. „Signale und Systeme“. Oldenbourg, 2008 (siehe S. 40).
- [38] Sarah Ottersbach. „Fluktuationsspektroskopie mittels schneller Datenerfassung und softwaregestützter Datenanalyse - Anwendung auf den Ladungsordnungsübergang in Nickelaten“. Magisterarb. Goethe-Universität Frankfurt, 2013 (siehe S. 40, 42).
- [39] Naoki Toyota, Michael Lang und Jens Müller. „Low-Dimensional Molecular Metals (Springer Series in Solid-State Sciences)“. Springer, 2007 (siehe S. 45, 51).
- [40] K. Kanoda. „Electron correlation, metal-insulator transition and superconductivity in quasi-2D organic systems,  $(\text{ET})_2\text{X}$ “. In: *Physica C: Superconductivity* 282–287, Part 1 (1997). Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors V, S. 299–302 (siehe S. 46).
- [41] Robert Rommel. „Transport- und Ordnungsphänomene niedrigdimensionaler organischer Ladungstransfersalze“. Diss. Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt am Main, 2013 (siehe S. 46).
- [42] B J Powell und Ross H McKenzie. „Quantum frustration in organic Mott insulators: from spin liquids to unconventional superconductors“. In: *Reports on Progress in Physics* 74.5 (2011), S. 056501 (siehe S. 46).
- [43] Jens Müller. „Fluctuation Spectroscopy: A New Approach for Studying Low-Dimensional Molecular Metals“. In: *ChemPhysChem* 12.7 (2011), S. 1222–1245 (siehe S. 47, 49, 51).
- [44] Lorenz Bartosch, Mariano de Souza und Michael Lang. „Scaling Theory of the Mott Transition and Breakdown of the Grüneisen Scaling Near a Finite-Temperature Critical End Point“. In: *Phys. Rev. Lett.* 104 (24 Juni 2010), S. 245701 (siehe S. 48, 50).

- 
- [45] T. Sasaki u. a. „Real Space Imaging of the Metal–Insulator Phase Separation in the Band Width Controlled Organic Mott System  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br“. In: *Journal of the Physical Society of Japan* 74.8 (2005), S. 2351–2360. eprint: <http://journals.jps.jp/doi/pdf/10.1143/JPSJ.74.2351> (siehe S. 49, 51, 52, 56, 60, 68, 71).
- [46] P. W. Anderson. „Absence of Diffusion in Certain Random Lattices“. In: *Phys. Rev.* 109 (5 März 1958), S. 1492–1505 (siehe S. 48).
- [47] F. Kagawa, K. Miyagawa und K. Kanoda. „Unconventional critical behaviour in a quasi-two-dimensional organic conductor“. In: *Nature* 436.7050 (Juli 2005), S. 534–537 (siehe S. 50).
- [48] Mario Zacharias, Lorenz Bartosch und Markus Garst. „Mott Metal-Insulator Transition on Compressible Lattices“. In: *Physical Review Letters* 109.17 (Okt. 2012) (siehe S. 50).
- [49] J. C. Dyre. „A model for the generic alpha relaxation of viscous liquids“. In: *EPL (Europhysics Letters)* 71.4 (2005), S. 646 (siehe S. 51).
- [50] Hiroki Akutsu, Kazuya Saito und Michio Sorai. „Phase behavior of the organic superconductors  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]X (X = Br and Cl) studied by ac calorimetry“. In: *Phys. Rev. B* 61 (6 Feb. 2000), S. 4346–4352 (siehe S. 51).
- [51] J. Müller u. a. „Glass-like transition in  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br at  $T_g \sim 75$  K – implications for the superconducting ground-state properties“. In: *Journal de Physique IV (Proceedings)* 114 (Apr. 2004), S. 341–342 (siehe S. 51).
- [52] T. Sasaki u. a. „Electronic correlation in the infrared optical properties of the quasi-two-dimensional  $\kappa$ -type BEDT-TTF dimer system“. In: *Phys. Rev. B* 69 (6 Feb. 2004), S. 064508 (siehe S. 52).
- [53] P. Limelette u. a. „Mott Transition and Transport Crossovers in the Organic Compound  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl“. In: *Phys. Rev. Lett.* 91 (1 Juli 2003), S. 016401 (siehe S. 52).
- [54] K. Miyagawa u. a. „Antiferromagnetic Ordering and Spin Structure in the Organic Conductor,  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl“. In: *Physical Review Letters* 75.6 (Aug. 1995), S. 1174–1177 (siehe S. 52).

- [55] Peter Lunkenheimer u. a. „Multiferroicity in an organic charge-transfer salt that is suggestive of electric-dipole-driven magnetism“. In: *Nat Mater* 11.9 (Sep. 2012), S. 755–758 (siehe S. 52).
- [56] K. Miyagawa, A. Kawamoto und K. Kanoda. „Proximity of Pseudogapped Superconductor and Commensurate Antiferromagnet in a Quasi-Two-Dimensional Organic System“. In: *Phys. Rev. Lett.* 89 (1 Juni 2002), S. 017003 (siehe S. 52).
- [57] X. Su u. a. „Structural disorder and its effect on the superconducting transition temperature in the organic superconductor  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br“. In: *Phys. Rev. B* 57.22 (Juni 1998), R14056–R14059 (siehe S. 55, 71).
- [58] T. Stalcup, J. Brooks und R. Haddon. „Temporal processes in a polymeric anion-based organic superconductor“. In: *Phys. Rev. B* 60.13 (Okt. 1999), S. 9309–9312 (siehe S. 56).
- [59] Jens Müller Jens Brandenburg und John A Schlueter. „Sudden slowing down of charge carrier dynamics at the Mott metal–insulator transition in  $\kappa$ -(D<sub>8</sub>-BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br“. In: *New Journal of Physics* 14.2 (2012), S. 023033 (siehe S. 62).
- [60] S. Bogdanovich und D. Popović. „Onset of Glassy Dynamics in a Two-Dimensional Electron System in Silicon“. In: *Phys. Rev. Lett.* 88 (23 Mai 2002), S. 236401 (siehe S. 63, 72).
- [61] Swastik Kar u. a. „Observation of Non-Gaussian Conductance Fluctuations at Low Temperatures in Si:P(B) at the Metal-Insulator Transition“. In: *Phys. Rev. Lett.* 91 (21 Nov. 2003), S. 216603 (siehe S. 63, 72).
- [62] T. Sasaki u. a. „Imaging Phase Separation near the Mott Boundary of the Correlated Organic Superconductors  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>X“. In: *Physical Review Letters* 92.22 (Juni 2004) (siehe S. 68, 73).

