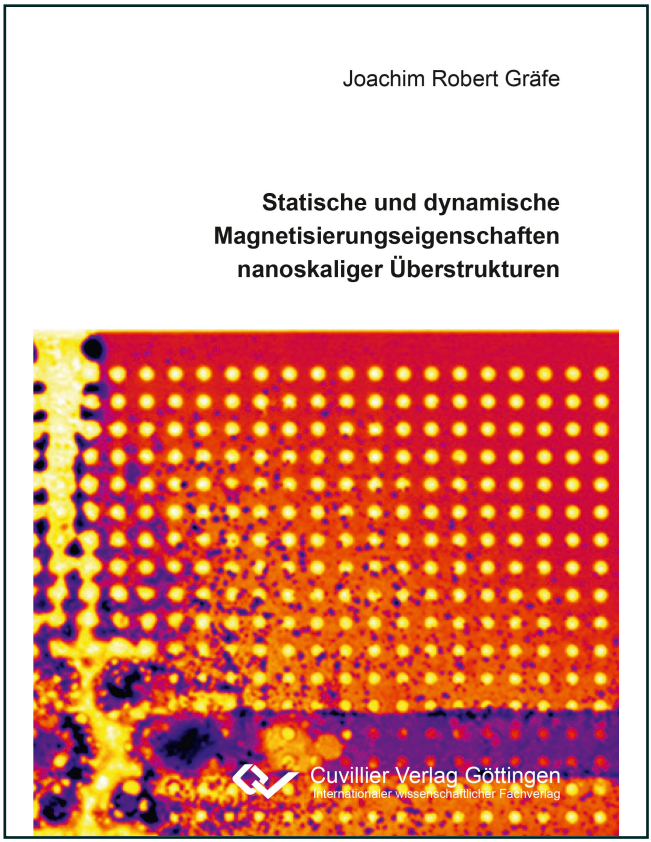
Joachim Gräfe (Autor)

Statische und dynamische Magnetisierungseigenschaften nanoskaliger Überstrukturen



https://cuvillier.de/de/shop/publications/7363

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

Teil I

Einleitung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der Magnetismus fasziniert die Menschheit mindestens seit Thales von Milet (634 - 546 v. Chr.) dieses Phänomen in natürlich auftretendem Magnetit beschrieb [98]. Heute ist der Magnetismus ein aktives Forschungsfeld, in dem es nach wie vor neue Entdeckungen gibt und aus dem technische Entwicklungen stammen, die aus dem Alltagsleben nicht mehr wegzudenken sind. Einige der vielfältigen Anwendungen von Magneten sind Elektromotoren, Datenspeicher wie Festplatten und Arbeitsspeicher oder Lautsprecher [25, 98]. Die rasanten Fortschritte in Strukturierung und Mikroskopie auf der Nanoskala ein neues Zeitalter der Magnetismusforschung eingeläutet. Heute ist es möglich magnetische Materialien auf der Längenskala der relevanten Wechselwirkung, nämlich der Dipol-Dipol- und der Austauschwechselwirkung, zu dimensionieren und die daraus resultierende Veränderung der magnetischen Eigenschaften nanoskopisch abzubilden.

Magnetische Dünnfilme spielen hierbei eine vorherrschende Rolle. Eine attraktive Möglichkeit die lokalen magnetischen Eigenschaften auf der Nanoskala zu verändern ist das Erzeugen von Löchern, welche bei einer periodischen Anordnung zu so genannten Antidotgittern führt. Durch diese Antidotgitter können zum einen die fundamentalen magnetischen Eigenschaften, wie das Koerzitivfeld [15, 38, 108] oder die Anisotropie [13, 32, 107], gezielt eingestellt werden. Zum anderen werden in diesen Nanostrukturen neuartige Phänomene wie künstliches Spineis [31, 36, 66], Spinglas [54], Paare von magnetischen Monopolen [63] und eine Aufhebung der Dünnfilmanisotropie [28] beobachtet. Daraus ergeben sich verschiedene Anwendungen. Im statischen Regime werden Antidotgitter beispielsweise als *Bit Patterned Media* (BPM)-Speicher diskutiert. Hier stellt das superparamagnetische Limit keine Einschränkung dar, da keine isolierten Materialinseln auftreten, wodurch höhere Speicherdichten in Datenträgern erreicht werden können [14, 43, 103].

In diesen Systemen sind auch ihre fundamentalen Anregungen, die Spinwellen (im Wellenbild) oder Magnonen (im Teilchenbild) ein wichtiger Forschungsbereich. Wie bei den analogen Anregungen in der Elektrostatik, den Plasmonen, kann ihre Dispersionsrelation komplex und anisotrop sein [95]. In Antidotgittern werden diese dynamischen Eigenschaften durch periodische Variation des magnetischen Materials beeinflusst. Ähnlich zu photonischen Kristallen kann es zur Ausbildung einer Bandstruktur für Spinwellen kommen [48, 56]. Diese weist ein komplexes Wechselspiel verschiedener Spinwellentypen, wie z. B. Damon-Eshbach- oder *Backward Volume*-Moden auf, das im magnonischen Kristall gezielt beeinflusst werden kann [48, 56].

In Bezug auf Anwendungen hat sich der Begriff der Magnonik etabliert [52]. Hier

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

erfolgt der Informationstransport im Gegensatz zur Elektronik oder Spintronik lediglich durch Spinwellen, was zu einer deutlich kleineren Verlustleistung führt [52, 56]. Ebenso finden magnonische Kristalle in der Hochfrequenz (RF)-Technik als Spinwellenleiter und -filter eine Anwendung [56].

Aufbauend auf den bisherigen makroskopischen Experimenten und theoretischen Arbeiten, die in der Literatur beschrieben wurden, sollen vor allem reguläre Antidotgitter im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen, deren Ummagnetisierungsmechanismen, geometrische Frustrationen und magnonisches Verhalten noch ungeklärt sind. Dabei sollen moderne Nanostrukturierungverfahren genutzt werden, die auch eine großflächige Probenherstellung erlauben. Zu deren Charakterisierung sollen wesentlich optimierte *First-Order Reversal Curve* (FORC) Messungen zum Einsatz kommen, um einen tieferen Einblick in die mikroskopischen Ummagnetisierungsmechanismen zu erhalten. Durch hochauflösende magnetische *Scanning X-ray Microscopy* (SXM) sollen die Magnetisierungslandschaften direkt visualisiert werden. Mit der Kombination dieser Methoden soll es möglich werden die physikalischen Mechanismen umfassenden aufzuklären. Mit SXM ist es möglich auch das Magnetisierungsverhalten mit einer einzigartigen Kombination von räumlicher (ca. 20 nm) und zeitlicher Auflösung (ca. 60 ps) zu untersuchen. Dies soll genutzt werden um die komplexe Spinwellendymamik erstmals vollständig direkt abzubilden. Hierbei sollen insbesondere die entsprechenden Dispersionrelationen ermittelt und die Möglichkeit einer Spinwellenfokussierung erforscht werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1 Stand der Forschung

Im nachfolgenden wird ein kurzer Überblick über die Forschung anderer in den relevanten Teilgebieten des Nanomagnetismus gegeben, auf denen die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse aufbauen. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf Antidotgitterstrukturen, die das wesentliche Strukturmuster der in Teil III diskutierten Ergebnisse sind.

1.1 Anisotropie und Koerzitivfelder Magnetischer Antidotgitter

Antidotgitter, regelmäßige Anordnungen von Löchern, sind ein einfacher Ansatz eine periodische Modulation der magnetischen Eigenschaften eines Dünnfilms zu erreichen, weshalb sie seit einiger Zeit im Fokus der Forschung sind [112]. Ein solches Antidotgitter, das durch seinen Lochdurchmesser d, den Lochabstand a und die Breite w des Materialstegs zwischen zwei Löchern charakterisiert wird, ist schematisch in Abbildung 1.1(a) gezeigt. Die Filmdicke t ist mit 20 nm - 50 nm klein, so dass die Antidotgitter entlang ihrer Dicke homogen magnetisiert sind. Hier sind für ein hexagonales Gitter auch die charakteristischen nächster Nachbar ((nn))- und übernächster Nachbar ((nnn))-Richtungen angedeutet, die den kleinsten bzw. größten Abstand zweier benachbarter Löcher aufweisen. Die Modulation der magnetischen Eigenschaften, die durch den Übergang von magnetischem Material zu Luft bewirkt wird, ist so drastisch, dass die Nanostrukturierung der bestimmende Einfluss auf die makroskopischen magnetischen Eigenschaften wird [26, 107, 112].

Unabhängig von der Güte der Ordnung der Antidotgitter zeigt sich insbesondere eine Erhöhung des Koerzitivfelds der magnetischen Dünnfilme [77, 89, 112]. Es ist naheliegend, dass die Löcher als Störung des magnetischen Materials als Verankerungspunkte für Domänenwände agieren. Im Allgemeinen steigt das Koerzitivfeld mit der Lochgröße d und nimmt mit der Stegbreite w ab [112]. Eine strenge systematische Relation zwischen den geometrischen Parametern des Antidotgitters und

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

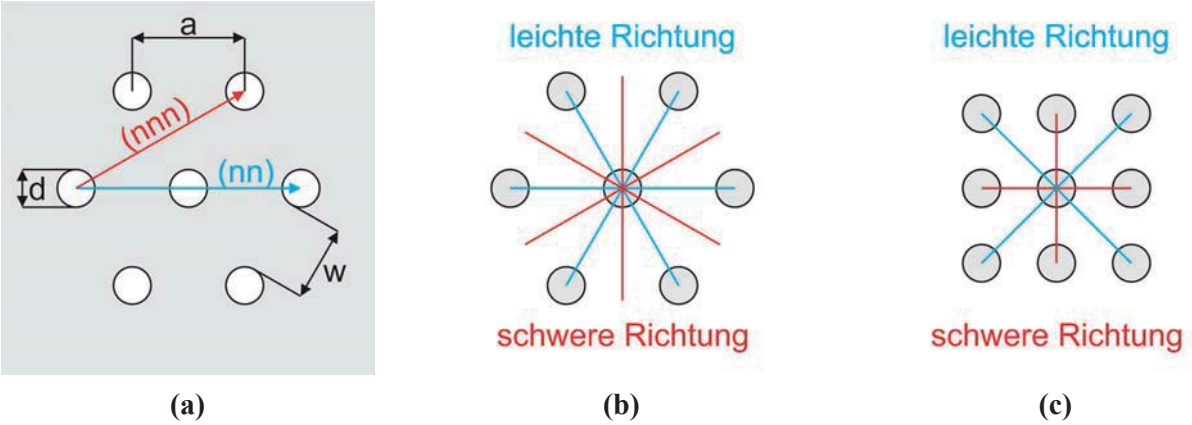


Abbildung 1.1: Schematische Skizzen der geometrischen Eigenschaften von Antidotgittern. *(a)* verdeutlicht den Lochabstand a, den Lochdurchmesser d und die Breite w des Materialstegs zwischen zwei Löchern. Die Filmdicke t ist ausreichend klein, um das Antidotgitter als zweidimensionale Struktur zu behandeln. Des Weiteren sind die (nn)- und (nnn)-Richtungen eingezeichnet. Außerdem ist die magnetische Anisotropie von Antidotgittern anhand der Orientierungen der leichten und schweren Richtungen in *(b)* hexagonalen und *(c)* quadratischen Gittern skizziert [107].

dem daraus resultierenden Koerzitivfeld wurde jedoch bisher nicht gefunden [77]. Typischerweise basiert die analytische Modellierung auf mikromagnetischen Überlegungen zu Punktdefekten [39] woraus Adeyeye *et al.* [1] einen $H_c \propto 1/w$ Zusammenhang für lange, flache Drähte abgeleitet haben. Dies wurde dann vielfach auf Antidotgitter übertragen [11, 12, 77, 82, 85, 89, 102, 106]. Dabei wurde in der Literatur jedoch jeweils nur ein eingeschränkter Parameterbereich abgedeckt oder nur ein einzelnes Material betrachtet, so dass eine allgemeine Gültigkeit der $1/w$-Relation nicht nachgewiesen werden konnte [77]. Paz *et al.* [77] erweiterten das Modell eines Verankerungspunkts um eine effektive Verankerungsregion, erreichten damit jedoch keine erhebliche Verbesserung des Modells [26].

Ein fundamentales Problem ist die Herstellung einer signifikanten Anzahl von Proben mit ausreichender Qualität und die zuverlässige Bestimmung des Koerzitivfelds: erstes ist bei der Verwendung serieller Nanolithographiemethoden wie *Electron Beam Lithography* (EBL) oder *Focused Ion Beam* (FIB) problematisch, da große Flächen nur sehr langsam strukturiert werden; zweites ist bei vielen Magne-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tometriemethoden schwierig, da häufig große Proben benötigt werden.

Ebenso wie das Koerzitivfeld wird die Anisotropie des magnetischen Dünnfilms von den strukturellen Parametern des Antidotgitters dominiert [13, 31, 107, 112]. Die Problematik der Herstellung vieler Proben für eine systematische Untersuchung ist dabei dieselbe wie zuvor für den Fall des Koerzitivfelds. In der Arbeit von Wang *et al.* [107] wurden verschiedene Antidotgittersymmetrien in Eisenfilmen untersucht. Die magnetische Anisotropie folgt vollständig der Symmetrie des Antidotgitters, d. h. dass beispielsweise in einem hexagonalen Antidotgitter alle 60° und in einem quadratischen Gitter alle 90° eine leichte Richtung auftritt [107]. Dies ist in Abbildungen 1.1(b) bzw. 1.1(c) schematisch illustriert.

1.2 Ummagnetisierungsprozesse in Antidotgittern

Um die zuvor besprochenen makroskopischen magnetischen Eigenschaften der Antidotgitter gezielt zu beeinflussen, ist ein detailliertes Verständnis des mikroskopischen Ursprungs des Magnetisierungsverhaltens notwendig. Dabei standen insbesondere Antidotgitter in in der Filmebene magnetisierten Materialien im Fokus, da in dieser Geometrie der starke Einfluss der Antidotgitter aufgrund der Streufelder, die aus den Lochwänden austreten, offensichtlich ist [42, 104, 112].

Zur Aufklärung der mikroskopischen Magnetisierungskonfiguration wurden verschiedene Ansätze unternommen [8, 24, 38, 58, 64, 65, 86, 105]. Konsens in der Literatur ist, dass die Ummagnetisierung auf der Nukleation von Domänen und deren Ausbreitung durch das Antidotgitter basiert [8, 32, 112]. Die Domänenwände verlaufen dabei auf der kürzesten Strecke zwischen zwei benachbarten Löchern, da so die Länge und Energie der Domänenwand minimiet wird [8, 32, 112]. Dies führt auch dazu, dass die Ausbreitung der Domänen immer entlang einer (nn)-Richtung erfolgt [8, 32, 112]. Zusätzlich kommt es bei einer Magnetisierung entlang der schweren Richtung des Antidotgitters zu einer anfänglichen Relaxation der Magnetisierung in eine leichte Richtung durch Ablenkung an den Löchern, um Streufelder zu vermeiden [32, 112].

Obwohl mikromagnetische Simulationen [8, 24, 105] auf komplexe intermediäre Magnetisierungsmuster hindeuteten, konnten bisher nicht alle Teilschritte des Ummagnetisierungsprozesses abgebildet werden. Bei mikroskopischen Ansätzen lag dies daran, dass die notwendige laterale Auflösung in magneto-optischer Kerr-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Effekt (MOKE)-Messungen [58] nicht erreicht wurde. Bei *Photo Electron Emission Microscopy* (PEEM)-Untersuchungen [38, 64] war die Ordnung der kolloidlithographischen Antidotgitter nicht ausreichend und die Aufklärung des mikroskopischen Mechanismus wurde durch eine Vielzahl von Gitterdefekten und die Mischung von (nn)- und (nnn)-orientierten Teilbereichen unterbunden [29, 64].

Ein weiterer Ansatz zur Aufklärung der Ummagnetisierungsprozesse, der nicht auf der lateralen Auftrennung und Abbildung der mikroskopischen Teilschritte basiert, sind FORC-Messungen [7, 8, 29, 65]. Dafür wird eine Vielzahl von Nebenhysteresen gemessen, aus denen sich die so genannte FORC-Verteilung bestimmen lässt, in der Ummagnetisierungsprozesse nach ihrem mikroskopischen Koerztiv-H_c und Interaktionsfeld H_u getrennt sind (vgl. Kapitel 2.3). Bisherige Untersuchungen [8, 65] scheiterten jedoch entweder an einer unzureichenden Magnetfeldauflösung oder einer Überlagerung von (nn)- und (nnn)-orientierten Teilbereichen in kolloidlithographischen Antidotgittern, die die Auftrennung der Teilschritte verhinderte [29].

Da in senkrecht magnetisierten Materialien grundsätzlich erhebliche Streufelder auftreten und die Antidotgitterstrukturierung senkrecht zur Magnetisierungsrichtung erfolgt, wird ein kleinerer Einfluss auf diese Materialien erwartet und solche Antidotgitter fanden in der Literatur nur wenig Beachtung [42, 104, 112]. Lediglich Tripathy und Adeyeye [104] untersuchten zwei Antidotgitter mit relativ kleinen Löchern in senkrecht magnetisierten Materialien und fanden auch für diese Systeme eine Erhöhung des Koerzitivfelds durch die Nanostrukturierung. Antidotgitter mit weiteren Gitterparametern oder eine Aufklärung des mikroskopischen Mechanismus hinter der Koerzitivfelderhöhung blieben in der Literatur aus [30].

1.3 Antidotgitter als Realisierung Magnonischer Kristalle

Die Magnonik ist ein relativ junges und aktives Forschungsfeld und wurde in ihrer jetzigen Definition 2006 von Kruglyak *et al.* [52] begründet [48, 51, 56]. Im Allgemeinen beschäftigt sich die Magnonik mit der Beeinflussung und technologischen Nutzung von Spinwellen [51]. So kann ein magnonisches Bauelement konzeptionell in vier Komponenten zerlegt werden, was in Abbildung 1.2(a) schematisch dargestellt ist. Es besteht aus einer Spinwellenquelle, die Spinwellen erzeugt, die sich dann in ein funktionales Medium ausbreiten. Über einen externen Kontrollme-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

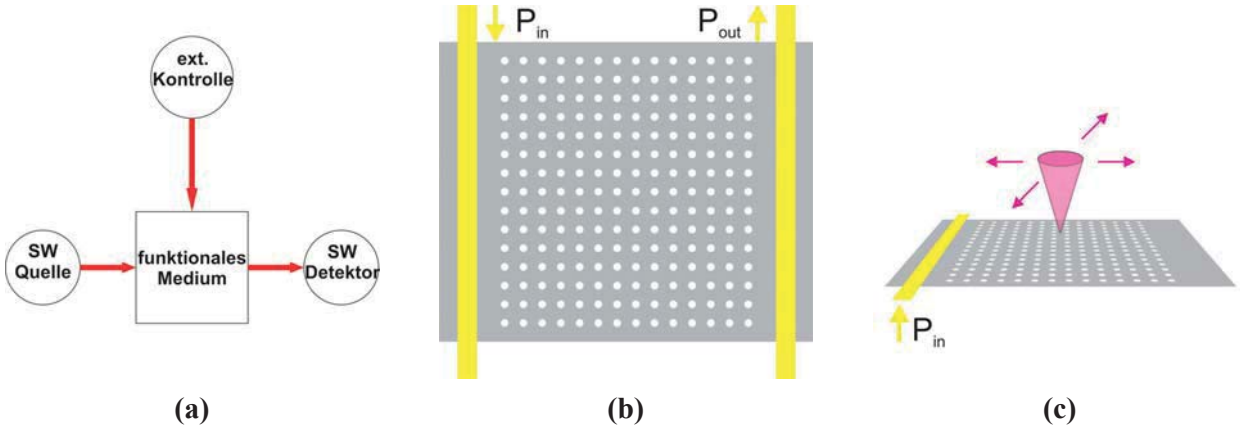


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung von magnonischen Bauteilungen und ihrer Untersuchung. *(a)* zeigt das allgemeine Schema eines solchen Bauteils nach [51]. Dabei gibt es eine Spinwellenquelle (*input*) und einen Spinwellendetektor (*output*). Zwischen diesen beiden Komponenten werden die Spinwellen durch ein funktionales magnonisches Medium beeinflusst, das sich extern ansteuern lässt. *(b)* zeigt den schematischen Aufbau einer AESWS Messung bei der koplanare Wellenleiter als Spinwellenquelle und -detektor eingesetzt werden und die Veränderung der Spinwellenintensität und -frequenz beim Durchgang durch ein magnonisches Medium bestimmt werden kann. *(c)* zeigt das Schema einer optischen, zweidimensional rasternden Methode zur Detektion der Spinwellen. Dabei erfolgt die Anregung nach wie vor durch einen koplanaren Wellenleiter. Die Detektion erfolgt jedoch ortsaufgelöst im gesamten magnonischen Medium. Dadurch kann die Veränderung der Spinwelleneigenschaft beim Durchgang durch das magnonische Medium direkt abgebildet werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

chanismus ist es möglich das funktionale Medium zu steuern. Abschließend gibt es einen Spinwellendetektor, der die Spinwellen nach der Beeinflussung durch das funktionale Medium detektiert [51].

Je nachdem wie das funktionale Medium ausgelegt ist, lassen sich verschiedene magnonische Bauteile realisieren [51]. Wird ein homogenes Medium eingesetzt, das ein statisches Potential für Spinwellen aufweist, arbeitet das Bauteil als Phasenschieber oder als Verzögerungsstrecke. Eine externe Ansteuerung des Mediums kann dann beispielsweise durch konstante äußere Magnetfelder erfolgen, die die Magnetisierung und damit das magnonische Potential verschieben [51]. Wird das funktionale Medium jedoch durch schnelle dynamische Magnetfelder verändert, können Bauteile realisiert werden, die als Frequenzschieber oder Verstärker für Spinwellen agieren [51, 93]. Ein funktionales Medium mit alternierendem Potential für Magnonen kann schließlich als geometrisches Interferenzsystem oder Spinwellenfilter eingesetzt werden [51].

Antidotgitter sind eine Umsetzung eines solchen Mediums mit periodisch alternierendem Potential für Spinwellen [48]. Ein solches Metamaterial für Spinwellen wird in Analogie zu photonischen Kristallen magnonischer Kristall genannt [48, 51]. Da bei nanoskaligen Antidotgittern der Lochabstand a die selbe Größenordnung wie die Wellenlänge λ haben kann, kann es zur Bildung einer Bandlücke kommen, was durch Bragg-Reflektion oder andere Konzepte für periodische Medien beschrieben werden kann [48]. Aufgrund des komplexen und anisotropen Dispersions- und Ausbreitungsverhaltens der Spinwellen muss es jedoch nicht zwangsläufig zur Bildung einer Bandlücke in magnonischen Kristallen kommen [48].

Experimentell kommen bei der Untersuchung magnonischer Systeme im Wesentlichen integrale Mikrowellentechniken wie ferromagnetische Resonanz (FMR) mit *Vector Network Analyzer* (VNA) oder *All Electrical Spin Wave Spectroscopy* (AES-WS) zum Einsatz, was schematisch in Abbildung 1.2(b) illustriert ist [56]. Dabei dienen koplanare Wellenleiter als Spinwellenquellen und -detektoren. So können die Absorption, Reflektion und Transmission des untersuchten magnonischen Mediums bestimmt werden [56]. Durch den Einsatz moderner VNA kann dabei in sehr kurzer Zeit ein großer Parametersatz an Frequenzen und Magnetfeldern untersucht werden. Aus diesen Daten lässt sich dann die feld- und frequenzabhängige Zustandsdichte für Spinwellen in einem magnonischen Kristall gewinnen [56]. Da bei diesen elektrischen Charakterisierungsmethoden lediglich die Eingangs- und Ausgangsleistung verglichen wird, liefern diese Messungen keine Informationen über die laterale Verteilung der Spinwellen im magnonischen System. Um die Lokali-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.