



Westsächsische Hochschule Zwickau
University of Applied Sciences



Transportmessungen in $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ -Strukturen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering

Vico Liersch

Geboren am 19.05.1990 in Lauchhammer

WHZ-Westsächsische Hochschule Zwickau
Nanotechnologie

&

HZDR- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung
Transportphänomene und Nanostrukturen

Ausgabedatum: 01.08.2017

Abgabedatum: 16.01.2018

Betreuung: Prof. Dr. Wieland Zahn (WHZ)
Dr. Artur Erbe (HZDR)

Zusammenfassung

Die Informationstechnik hat sich in den letzten Jahrzehnten beständig weiterentwickelt und es wird nach wie vor nach Möglichkeiten gesucht, die Speicherdichte bzw. Bauteilfunktionalität zu erhöhen. Dafür ist das Erforschen neuer Materialien, die für solche Anwendungen Potential besitzen, ein wichtiger Bestandteil. Eine vielversprechende Legierung ist in diesem Zusammenhang $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$, deren magnetische Eigenschaften je nach Ordnungszustand (B2: geordnet, A2: ungeordnet), sowohl paramagnetisch als auch ferromagnetisch bei Raumtemperatur sein können. Genau dieser Sachverhalt könnte für die Informationstechnologie von besonderem Interesse sein. In dieser Arbeit wird die Herstellung von mikrostrukturierten $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Bauteilen beschrieben. Diese dienen zur Untersuchung des Magnetowiderstandes, insbesondere dem Erforschen des Zusammenhangs zwischen den einzelnen magnetischen Zuständen der Legierung und deren Widerständen. Weiterhin beinhaltet diese Arbeit die Untersuchung einer strominduzierten Zustandsänderung der Mikrostrukturen. Für diese Mikrostrukturen wurden polykristalline Leiterbahnen mit Hilfe von Elektronenstrahlolithografie und Dünnschichtabscheidungen sowie mittels Lift-off Prozessierung hergestellt. Die Untersuchungen des Magnetowiderstandes wurden dabei in einer hochsensitiven Messstation mit Heliumkühlung bei Tieftemperaturen durchgeführt. Die strominduzierten Messungen fanden bei Raumtemperatur ihre Anwendung, da die Zustandsänderung auf strominduziertem Heizen basiert. Diese Arbeit legt die Grundlagen für zukünftige in-situ Untersuchungen von Widerstandseffekten bei Ordnungs/Unordnungs-Phasenübergängen in ähnlichen Materialsystemen.

Abstract

The advancement of information technology, not only in terms of data storage density but also with respect to the development of functional devices, is critically dependent on the study of new materials. A promising alloy is $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$, whose magnetic properties can be transformed from paramagnetic to ferromagnetic due to an order (B2)- disorder (A2) phase transition. In this thesis, the fabrication of $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ microstructures is shown. These microstructures are made to investigate their magnetoresistance in particular the correlation of their magnetic properties and their resistance. Additionally, a current induced phase transition was examined. Therefore, polycrystalline conducting paths were fabricated by electron beam lithography, thin film deposition and lift-off processing. The exploration of the magnetoresistance was realized using a highly sensitive probestation, at temperatures below 25 K. The current induced measurements were performed at room temperature, since the phase transition occurs mainly due to a process of joule heating. This work sets the stage for in situ investigations of the resistance effects of order-disorder phase transition in similar materials.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VII
VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN	VIII
1 EINFÜHRUNG.....	1
2 GRUNDLAGEN.....	3
2.1 MAGNETISMUS	3
<i>Diamagnetismus.....</i>	<i>3</i>
<i>Paramagnetismus.....</i>	<i>3</i>
<i>Ferromagnetismus und Antiferromagnetismus</i>	<i>4</i>
<i>Formanisotropie.....</i>	<i>6</i>
2.2 MAGNETOWIDERSTÄNDE.....	7
2.2.1 <i>Anisotroper Widerstands Effekt (AMR).....</i>	<i>7</i>
2.2.2 <i>Riesenmagnetowiderstandseffekt (GMR).....</i>	<i>8</i>
2.3 $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ LEGIERUNG	10
2.4 STROM-WÄRME-GESETZ	11
3 METHODEN	12
3.1 AUFBRINGEN DER MATERIALIEN.....	12
3.1.1 <i>Magnetronspütern</i>	<i>12</i>
3.1.2 <i>Bedampfen.....</i>	<i>14</i>
3.2 RÖNTGENREFLEKTOMETRIE	16
3.3 MESSEN DER MAGNETISCHEN EIGENSCHAFTEN.....	18
3.3.1 <i>MOKE.....</i>	<i>18</i>
3.3.2 <i>KERR-Mikroskopie.....</i>	<i>22</i>

3.4	SCHREIBEN DER STRUKTUREN.....	23
3.4.1	<i>Elektronenstrahl-Lithografie (EBL)</i>	23
3.5	AUSHEIZEN.....	33
3.6	IONENBESTRAHLUNG.....	34
3.7	WIDERSTANDSMESSGERÄTE	35
3.7.1	<i>ASTRID-Widerstandsmessgerät</i>	35
3.7.2	<i>Probestation-Tiefemperatur-Widerstandsmessgerät</i>	36
4	ERGEBNISSE	37
4.1	STROM INDUZIERTER PHASENÜBERGANG	37
4.1.1	<i>Elektrische Eigenschaften der Drähte</i>	37
4.1.2	<i>Löschen der Magnetisierung</i>	43
4.2	GMR-MESSUNG	47
5	AUSBLICK	54
6	LITERATURVERZEICHNIS	

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: BETHE-SLATER-KURVE [5]	4
ABBILDUNG 2: HYSTERESEKURVE EINES FERROMAGNETEN [6].....	5
ABBILDUNG 3: VERHALTEN DER DOMÄNEN IM MAGNETFELD [5].....	5
ABBILDUNG 4 STABMAGNET MIT STREUFELDLINIEN [27]	6
ABBILDUNG 5 AMR IN PERMALLOY FÜR PARALLELE UND SENKRECHTE AUSRICHTUNG DES MAGNETFELDES (BZW. DER MAGNETISIERUNG) ZUM STROM [8].....	7
ABBILDUNG 6 SPINSTREUUNG DER ELEKTRONEN IN EINER MULTILAYER GMR- STRUKTUR A) PARALLEL UND B) ANTIPARALLEL [12].....	8
ABBILDUNG 7 ZUSTANDSDICHTE DER 3D- UND 4S-BANDSTRUKTUREN EINES FERROMAGNETEN [12]	8
ABBILDUNG 8 PHASENDIAGRAMM UND KRISTALLSTRUKTUR VON $Fe_{60}Al_{40}$ [15].....	10
ABBILDUNG 9 DARSTELLUNG DER STOßKASKADE EINES SPUTTERPROZESSES....	12
ABBILDUNG 10 SCHEMATISCHER AUFBAU EINER THERMISCHEN (LINKS) UND EINER ELEKTRONENSTRAHL- (RECHTS) BEDAMPFUNGSANLAGE [17].....	15
ABBILDUNG 11 SCHEMATISCHER AUFBAU DER RÖNTGENREFLEKTOMETRIE	16
ABBILDUNG 12 XRR-MESSUNG EINES CA. 40 NM DICKEN $Fe_{60}Al_{40}$ FILMES.....	17
ABBILDUNG 13 DARSTELLUNG DER VERSCHIEDENEN GEOMETRIEN DES MOKE- EFFEKTES	18
ABBILDUNG 14 MOKE-MESSUNG EINES 20 NM DICKEN FILMS FÜR 3 VERSCHIEDENE PHASENZUSTÄNDE.....	19
ABBILDUNG 15 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES MOKE-AUFBAUS.....	19
ABBILDUNG 16 LICHTMIKROSKOPISCHE AUFNAHME EINES DRAHTSYSTEMS MIT $Fe_{60}Al_{40}$ DRAHT UND GOLDKONTAKTEN	20
ABBILDUNG 17 KERR-MIKROSKOP [26].....	22
ABBILDUNG 18 DARSTELLUNG LINKS DES GMR-DESIGNS UND RECHTS DES CIPT- DESIGNS MIT GOLDKONTAKTEN.....	23
ABBILDUNG 19 STRUKTURFORMEL FÜR PMMA VOR UND NACH DEM BELICHTUNGSPROZESS MIT ELEKTRONEN [21].....	24
ABBILDUNG 20 SKIZZE (RECHTS) FÜR DAS SCHREIBFELD ALIGNMENT FÜR ZWEI DER VIER POSITIONEN UND RESULTIERENDE LICHTMIKROSKOPAUFNAHME (LINKS).....	28
ABBILDUNG 21 DESIGN FÜR DEN STROMINDUZIERTE PHASEN-ÜBERGANG, MIT DEN GRAU GESTRICHELTEN LINIEN ALS SCHREIBFELDGRENZEN.	29

ABBILDUNG 22	PROBENSTRUKTUR MIT SCHREIBFELDGRENZEN (LINKS OBEN), ÜBERLAPPUNGEN OHNE SCHREIBFELDGRENZEN (RECHTS OBEN), BEIDES ZUSAMMENGEFASST (RECHTS UNTEN). LICHTMIKROSKOPIE AUFNAHME NACH BEIDEN BELICHTUNGEN MIT EINSCHNITTEN AN DEN SCHREIBFELDGRENZEN (LINKS UNTEN).....	30
ABBILDUNG 23	DARSTELLUNG DES LIFT-OFFS FÜR EIN- UND ZWEILACKSYSTEME	31
ABBILDUNG 24	PROBE MIT GOLDKONTAKTEN OHNE HAFTBESCHICHTUNG	32
ABBILDUNG 25	HOCHVAKUUM ROHROFEN	33
ABBILDUNG 26	LICHTMIKROSKOPISCHE AUFNAHME DER PROBE MIT LACK UND FENSTER VOR DER IONENBESTRAHLUNG	34
ABBILDUNG 27	MESSSYSTEM ASTRID FÜR WIDERSTANDSMESSUNGEN.....	35
ABBILDUNG 28	PROBESTATION FÜR TIEFTEMPERATUR MAGNETOWIDERSTANDSMESSUNGEN, OHNE ABDECKUNG (GEÖFFNET).....	36
ABBILDUNG 29	WIDERSTANDSMESSUNGEN ZUR STROMINDUZIERTEN ZERSTÖRUNG DER DRÄHTE.....	37
ABBILDUNG 30	LICHTMIKROSKOPISCHE BILDER LINKS VOR DER ZERSTÖRUNG, RECHTS NACH DER ZERSTÖRUNG DURCH EINEN STROM VON 34 MA.....	37
ABBILDUNG 31	LIFT-OFF NACH DER TITAN-GOLD-BESCHICHTUNG, MIT FEHLERN DER STRUKTUR (LINKS) UND EINEM KOMPLETTEN DRAHTSYSTEM (RECHTS).	38
ABBILDUNG 32	DESIGN EINES DRAHTSYSTEMS DESSEN STRUKTUR VOLLSTÄNDIG AUS $Fe_{60}Al_{40}$ BESTEHT	39
ABBILDUNG 33	WIDERSTANDSMESSUNG ZUM DURCHBRECHEN DER OXIDBARRIERE MIT EINER SPANNUNG VON 2 V	40
ABBILDUNG 34	KERR-MIKROSKOP BILD EINES $Fe_{60}Al_{40}$ DESIGNS MIT BESTRAHTEM DRAHT, DIE ROTEN PFEILE MARKIEREN DEN STROMFLUSS ZUM DURCHBRECHEN DER OXIDBARRIERE	40
ABBILDUNG 35	LICHTMIKROSKOPISCHES BILD NACH EINER SPANNUNGSENTLADUNG DES KEITHLEYS AN DER MESSSTATION ASTRID	41
ABBILDUNG 36	VERGLEICH DER WIDERSTÄNDE VON 5 $Fe_{60}Al_{40}$ DRÄHTEN FÜR 3 VERSCHIEDENE ZUSTÄNDE	41
ABBILDUNG 37	MOKE-MESSUNG LINKS FÜR VOR UND NACH 15 MA STROMBEHANDLUNG UND DIE STROMBEHANDLUNG (RECHTS) MIT 15 MA	43
ABBILDUNG 38	DARSTELLUNG DES WIDERSTANDSVERLAUFES FÜR VERSCHIEDENE STROMSTÄRKEN, FÜR BESTRAHLTE DRÄHTE	44
ABBILDUNG 39	ZEIT DES MAXIMUMS VOM WIDERSTANDSVERLAUF IN ABHÄNGIGKEIT ZUR STROMSTÄRKE.....	45

ABBILDUNG 40 MOKE-MESSUNG VON BESTRAHLTEN DRÄHTEN, WELCHE UNTERSCHIEDLICH LANGE EINEM STROM VON 17.5 MA AUSGESETZT WAREN	45
ABBILDUNG 41 MOKE-MESSUNG VON BESTRAHLTEN DRÄHTEN, VOR UND NACH DEM STROMDURCHFLUSS.....	46
ABBILDUNG 42 DARSTELLUNG DES GMR-DESIGNS	47
ABBILDUNG 43 WIDERSTANDSMESSUNG EINES STRUKTURELL BESTRAHLTEN $FE_{60}AL_{40}$ DRAHTES, IN ABHÄNGIGKEIT VON DEM MAGNETFELD	48
ABBILDUNG 44 WIDERSTANDSMESSUNG EINER BESTRAHLTEN GMR-PROBE IN ABHÄNGIGKEIT DES MAGNETFELDES, MIT SKIZZEN DES DOMÄNENVERHALTENS.....	49
ABBILDUNG 45 KERR-MIKROSKOP BILD EINES $FE_{60}AL_{40}$ STREIFENS MIT FERROMAGNETISCHEN BEREICHEN VON 0.5 μ M UND 2 μ M IN ANTIPARALLELER AUSRICHTUNG DER MAGNETISIERUNGEN.....	50
ABBILDUNG 46 KERR-MIKROSKOP BILD FÜR STRUKTURELLE BESTRAHLUNG EINES $FE_{60}AL_{40}$ -STREIFENS MIT NE-IONEN BEI 25 KEV FÜR VERSCHIEDEN DOSEN	51
ABBILDUNG 47 KERR-MIKROSKOP BILD FÜR STRUKTURELLE BESTRAHLUNG EINES $FE_{60}AL_{40}$ -STREIFENS MIT NE-IONEN BEI 20 KEV FÜR VERSCHIEDEN DOSEN	52
ABBILDUNG 48 HYSTERESEN DER VERSCHIEDENEN BESTRAHLTEN ABSCHNITTE	53
ABBILDUNG 49 DESIGN FÜR DIE KERR-MIKROSKOP IN-SITU MESSUNG MIT DEN GROßEN KONTAKTFLÄCHEN UND RECHTS OBEN FÜR DIE HIM IN-SITU MESSUNG	55
ABBILDUNG 50 HIM BILD DER VIER GOLDSTREIFEN FÜR DIE KONTAKTIERUNG AUF DEM $FE_{60}AL_{40}$ DRAHT MIT KONTAKTSPITZEN DES HIM'S	56

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 PERMEABILITÄTSZAHLEN DER VERSCHIEDENEN ARTEN DES MAGNETISMUS	4
TABELLE 2 VERWENDETE SPUTTERPARAMETER.....	13
TABELLE 3 INTENSITÄTEN DER EINZELNEN STRUKTURBESTANDTEILE.....	21
TABELLE 4 PROZESSSCHRITTE ZUR HERSTELLUNG EINER PROBE	26
TABELLE 5 VERWENDETE HEIZPARAMETER	33

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

AMR	Anisotropic Magnetoresistance (Anisotroper Magnetoresistiver Effekt)
CIPT	Current Induced Phase Transition (Strominduzierter Phasenübergang)
EBL	Electron-Beam-Lithography (Elektronenstrahlolithografie)
EL9	Elektronen empfindlicher Lack
GMR	Giant Magnetoresistance (Riesenmagnetowiderstand)
hdp	Hexagonal Dichteste Packung
kfz	Kubisch Flächenzentriert (fcc - engl. face centered cubic)
krz	Kubisch Raumzentriert (bcc - engl. body centered cubic)
MOKE	Magneto-Optischer Kerr-Effekt
MRAM	Magnetoresistive Random Access Memory (Magnetischer Arbeitsspeicher)
PE	Primär-Elektronen
PMMA	Polymethylmethacrylat (Elektronen empfindlicher Lack)
PVD	Physical Vapour Deposition (Physikalische Gasphasenabscheidung)
REM	Raster Elektron Mikroskop (SEM)
SE	Sekundär-Elektronen
SRAM	Static Random Access Memory
TMR	Tunnel Magnetoresistance (Tunnelmagnetowiderstand)
VSM	Vibrating Sample Magnetometer

1 Einführung

In der heutigen Zeit sind magnetische Phänomene allgegenwärtig. Deutlich wird dies daran, dass sie in sehr vielen technischen Geräten zum Einsatz kommen; sei es der Elektromotor in einer Bohrmaschine, ein Kompass oder die Speichertechnik in Computer-Festplatten. Aus Forschungssicht sind bei letzteren neben den Speicherzellen vor allem die Festplatten-Leseköpfe von Interesse, da sie zum Teil auf dem Riesenmagnetowiderstandseffekt (GMR) basieren. Dieser Effekt tritt auf, wenn zwei ferromagnetische Schichten durch eine dünne paramagnetische Schicht voneinander getrennt sind. In solchen Dreischichtsystemen kann nun ein elektrischer Widerstand gemessen werden, der je nach der magnetischen Ausrichtung der ferromagnetischen Schichten zueinander variiert. Eine parallele Orientierung besitzt einen relativ niedrigen Widerstand und eine antiparallele Orientierung einen relativ hohen Widerstand. Auf diese Kombination basierende Bauelemente, sind sowohl auf den Spin der Elektronen als auch deren Ladung angewiesen und fallen somit in dem Bereich der Spintronik. Der GMR-Effekt wurde 1988 von Albert Fert und Peter Grünberg entdeckt, wofür sie 2007 den Nobelpreis erhielten [1]. 1997 fand dieser Effekt erstmalig Anwendung in einer IBM-Computerfestplatte und heutzutage basieren darauf weitere Anwendungen wie z.B. magnetische Arbeitsspeicher (MRAM). Der Vorteil von MRAM gegenüber konventionellem RAM ist die nichtflüchtige Datenspeicherung, bei einer ähnlich hohen Lesegeschwindigkeit wie der von SRAM. Eine Schwierigkeit für GMR-Elemente liegt jedoch in der vertikalen Anordnung, wodurch der Herstellungsprozess erschwert wird. Die magnetischen Eigenschaften eines Materials hängen von den enthaltenen Atomen und deren Anordnung, also der Gitterstruktur ab. $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ ist eine Legierung, deren magnetische Eigenschaften stark von der jeweiligen Atomanordnung abhängen. Die geordnete Phase, die B2-Struktur, ist paramagnetisch und als energetischen Grundzustand durch Ausheizen zu erlangen. Die ungeordnete metastabile A2-Struktur ist ferromagnetisch und teilweise während der Abscheidung bzw. vollständig mittels Ionenbestrahlung zu erreichen. Mit Hilfe einer räumlich scharf beschränkten Umstrukturierung, welche z.B. mittels eines Helium Ionen Mikroskops (HIM) erfolgen kann, könnte die Herstellung eines lateralen GMR-Elementes ermöglicht werden. Derartige laterale GMR-Elemente wären einfacher in Bauelemente zu integrieren als die bisherigen vertikalen Schichtstrukturen. Abgesehen davon wäre eine lokale interne Schaltmöglichkeit der Ordnungsphase und damit des Magnetismus im Bauelement selbst von großem Vorteil, da eine Ionenbestrahlung in diesem Fall ausscheidet und das Heizen des gesamten Bauelementes ebenfalls Schwierigkeiten bereiten könnte. In dieser Arbeit wird daher die Herstellung von Mikrometergroßen Strukturen aus $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ beschrieben, um zum

einen ein laterales GMR-Element herzustellen und zum anderen mögliche Methoden zu untersuchen die eine lokale Phasenänderung in solch kleinen Strukturen ermöglichen, wie z. B. das lokale Erhitzen der Strukturen mittels eines elektrischen Stromes, um die ungeordnete Phase wieder zu ordnen und deren Magnetisierung zu ändern.

2 Grundlagen

2.1 Magnetismus

Bereits vor unserer Zeitrechnung wurden Magnete als Kompass genutzt, jedoch gelang eine erste umfassende Erklärung für dieses Phänomen erst im 19. Jahrhundert durch James Clerk Maxwell [2]. Seit dem 20. Jahrhundert ist bekannt, dass die magnetische Eigenschaft eines Materials durch die magnetischen Momente der einzelnen Atome bestimmt wird. Das magnetische Moment wird durch die Spin- und Bahnbewegung der Elektronen verursacht. Der Kern besitzt ebenfalls ein magnetisches Moment, welches aber drei Größenordnungen kleiner ist und somit zumeist vernachlässigt werden kann.

Diamagnetismus

Der Diamagnetismus tritt auf wenn die magnetischen Momente im Atom sich gegenseitig aufheben. Die Atome besitzen keine ungepaarten Elektronen und das entsprechende Material kein spontanes magnetisches Moment. Befindet sich ein Diamagnet in einem äußeren Magnetfeld, so wird nach der Lenzschen Regel ein Strom in den Elektronenhüllen im Atom induziert, welcher ein magnetisches Moment erzeugt das dem Magnetfeld entgegenwirkt. In einem Supraleiter 1. Art entspricht der Betrag des induzierten Feldes genau dem des äußeren B-Feldes und er wird daher als idealer Diamagnet bezeichnet. Das Induzieren eines magnetischen Feldes tritt immer auf, wird bei nicht diamagnetischen Stoffen von anderen Effekten überlagert.

Paramagnetismus

Hier besitzen die einzelnen Atome ein magnetisches Moment, auf Grund der ungepaarten Elektronen. Die einzelnen Momente der Atome sind jedoch voneinander isoliert. Beim Anlegen eines äußeren B-Feldes richten sich die Momente parallel zu dem Feld aus und verstärken dieses leicht. Verschwindet das Feld, dann bricht auch die parallele Ausrichtung wieder zusammen [3, 4].

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0 * \mu_r * H \quad (1)$$

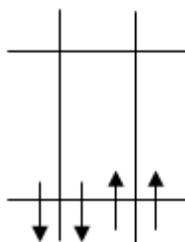
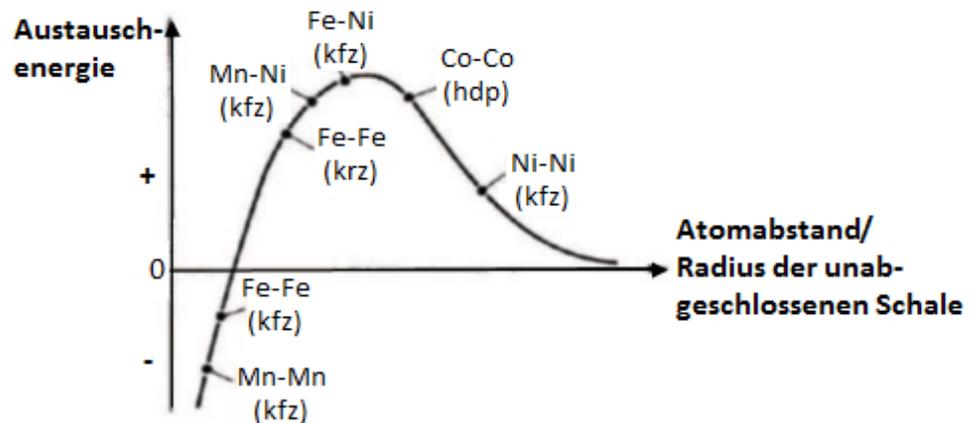
Die Gleichung 1 beschreibt dabei, wie sich Materialien in einem magnetischen Feld verhalten würden. B entspricht der magnetischen Flussdichte, H der magnetischen Feldstärke, μ_0 der Permeabilität im Vakuum und μ_r die Permeabilität im jeweiligen Material. Die Permeabilität ist vereinfacht die Durchlässigkeit eines Materials für ein externes Magnetfeldes. In der Tabelle 1 sind die verschiedenen Permeabilitätszahlen der verschiedenen magnetischen Zustände aufgelistet. Hierbei ist anzumerken, dass der Diamagnet und der Paramagnet nur geringfügig von 1 abweichen.

Tabelle 1 Permeabilitätszahlen der verschiedenen Arten des Magnetismus

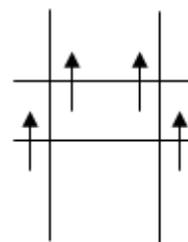
Art der Magneten	Permeabilitätszahl
Idealer Diamagnet	0
Diamagnet	<1
Paramagnet	>1
Ferromagnet	>>1

Ferromagnetismus und Antiferromagnetismus

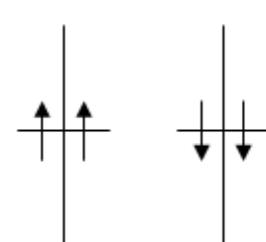
Durch die quantenmechanische Austauschwechselwirkung können sich die magnetischen Momente der Elektronen spontan über größere Bereiche (Domänen) parallel (Ferromagnetismus) oder antiparallel (Antiferromagnetismus) zueinander ausrichten. Diese Austauschwechselwirkung wird durch den Atomabstand und den Atomradius beeinflusst, wie in Abbildung 1 für die 3d-Übergangsmetalle (Co, Fe, Ni) ersichtlich ist.



geringer Atomabstand,
starke Niveaufspaltung,
hoher Energieaufwand zur
Neuverteilung der Elektronen:
Antiferromagnetismus



mittlerer Atomabstand,
geringe Niveaufspaltung,
wenig Energieaufwand zur
Neuverteilung der Elektronen:
Ferromagnetismus



großer Atomabstand,
keine Kopplung:
Paramagnetismus

Abbildung 1: Bethe-Slater-Kurve [5]

Die Kurve in Abbildung 1 zeigt die Austauschwechselwirkung aufgetragen über dem Quotienten von Atomabstand zu Atomradius. Dabei führt eine negative Austauschwechselwirkung zu Antiferromagnetismus und eine positive zu Ferromagnetismus.

Der Grund für die Austauschwechselwirkung liegt im Zusammenwirken von elektrostatischer Coulomb-Energie und dem Pauli-Prinzip [5].

Dies bedeutet aber nicht, dass die magnetischen Momente über den gesamten Festkörper in dieselbe Richtung zeigen müssen. Das ist meist nur in begrenzten Ausdehnungen, den Domänen, bzw. den weißchen Bezirken, der Fall. Die Größe dieser Domänen ist stoffabhängig und beträgt typischerweise einige Nanometer bis zu wenige Mikrometer. Aus energetischen Gründen kompensieren sich die einzelnen Domänen in einem Festkörper teilweise gegenseitig. Ohne angelegtes Feld kann das Gesamtmoment gleich Null (siehe Abbildung 3) sein. Durch das Anlegen eines magnetischen Feldes werden die Domänen deren Hauptmagnetisierungscomponenten dem äußeren magnetischen Feld entgegengesetzt sind zu Gunsten derer Domänen mit umgekehrter Orientierung in ihrer Ausdehnung vermindert. Dies ist bis zu einem bestimmten H-Wert reversibel, d.h. beim Abschalten des Feldes kehren die Domänen wieder in ihren Ursprungszustand zurück. Dieser Bereich stellt den Anfangsbereich der Neukurve in der Hysterese dar (siehe Abbildung 2). Wird diese Schwelle überschritten, bleibt das magnetische Moment auch nach dem Verschwinden des H-Feldes erhalten. Nimmt das H-Feld weiter zu, richten sich die magnetischen Momente der Bezirke in Richtung des Feldes aus [6], was die Sättigung darstellt (siehe *Abbildung 2*).

Nach der Sättigung ist die Rückkehr zum Punkt ($H = 0, B = 0$) bei einem linearen quasistatischen Feldverlauf typischerweise nicht mehr möglich. Das nach der Sättigung ohne externes Feld verbleibende Moment bzw. Feld wird als Remanenz (B_r) bezeichnet. Die Umkehrung des globalen magnetischen Moments erfolgt dann ab der Koerzitivfeldstärke H_c .

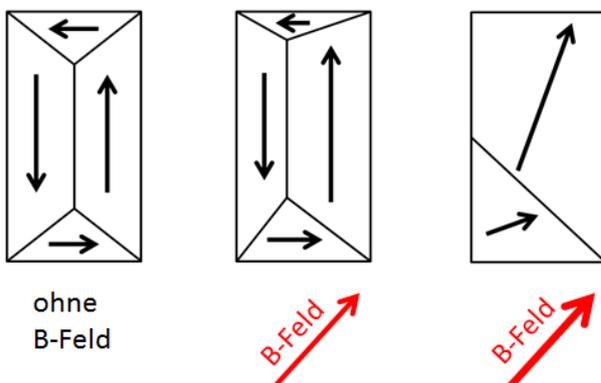


Abbildung 3: Verhalten der Domänen im Magnetfeld [6]

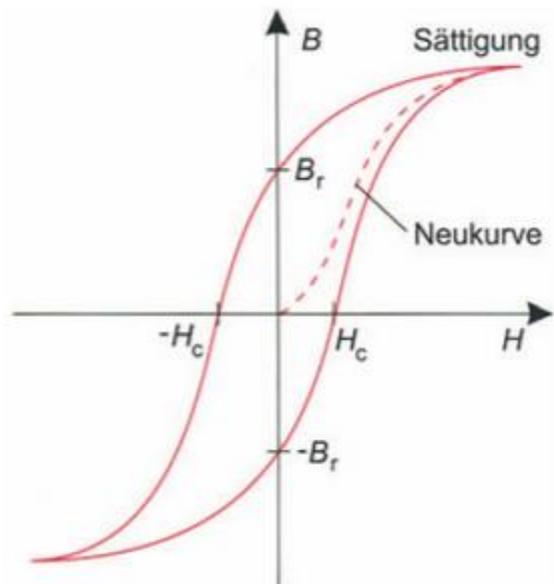


Abbildung 2: Hysteresekurve eines Ferromagneten [7]

Um einen magnetisierten Stoff wieder komplett zu entmagnetisieren, wird z.B. ein magnetisches Wechselfeld angelegt, wobei die Amplitude immer weiter verringert wird. Eine andere Methode ist das Erhitzen des Magneten auf eine bestimmte Temperatur (Curie-Temperatur T_c), bei der er seine ferromagnetische Eigenschaft verliert und paramagnetisch wird [7].

Formanisotropie

Die magnetische Anisotropie beschreibt den Sachverhalt, dass ein ferromagnetischer Festkörper Vorzugsrichtungen bzw. Vorzugsebenen für die Ausrichtung der Magnetisierung besitzt. Diese werden als leichte Achsen bzw. leichte Ebenen bezeichnet. Zum einen existiert die von der Spin-Bahn-Wechselwirkung hervorgerufene Kristallanisotropie, auf Grund derer sich die Magnetisierung in einem einkristallinen System bevorzugt entlang von bestimmten Kristallachsen ausrichtet. Diese Anisotropie ist in polykristallinen Materialien allerdings zumeist gering da sich die individuellen Vorzugsrichtungen der einzelnen Körner gegenseitig fast vollständig kompensieren. Daneben werden in jedem Fall magnetische Anisotropien durch die Gestalt der Probe erzeugt (Formanisotropie). Als Beispiel für eine leichte Achse kann ein Dünnelement betrachtet werden. Bei diesem würde die leichte Achse entlang derjenigen

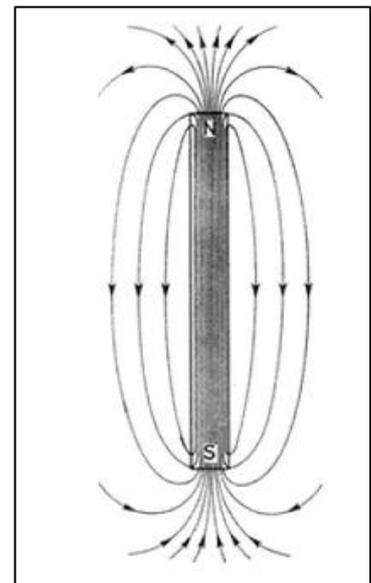


Abbildung 4 Stabmagnet mit Streufeldlinien [29]

Raumrichtung liegen für welche das Dünnelement die kleinsten Stirnflächen aufweist und somit als energieärmster Zustand die wenigsten Streufelder, bzw. magnetischen Oberflächenladungen verursacht (siehe Abbildung 4). Das bedeutet die Richtung mit der größten Längenausdehnung wäre bevorzugt und könnte bereits bei kleinen Magnetfeldern oder auch spontan ihre Magnetisierungsrichtung dementsprechend ausrichten. Das sieht man z.B. in dem linken Domänenbild in Abbildung 3 (Landau Domänenstruktur), hier sind die größten Bezirke von oben nach unten bzw. umgekehrt orientiert. Weiterhin sind die vier verschiedenen Richtungen so zueinander ausgerichtet, dass die Streufelder selbst möglichst nicht aus dem Körper heraus zeigen und das gesamte magnetische Moment null beträgt.

Die schwere Achse in dem Beispiel dünner Film würde aus der Ebene hinaus zeigen und somit die meisten magnetischen Oberflächenladungen erzeugen. Um die Magnetisierung aus der Ebene hinaus zu drehen würden deshalb stärkere Magnetfelder benötigt werden als bei den leichten Achsen. Die Streufeldenergie ist bei einer Ausrichtung entlang der leichten Achse minimal und entlang der schweren Achse maximal.

2.2 Magnetowiderstände

2.2.1 Anisotroper Widerstands Effekt (AMR)

Dieser Effekt beschreibt die elektrische Widerstandsänderung eines Magneten, wenn sich dessen Magnetisierungsrichtung gegenüber der Stromrichtung ändert. Es gibt dabei zwei wesentliche Schaltanordnungen, die Parallele und die Senkrechte. In ferromagnetischen Metallen und Legierungen ist dieser magneto-resistive Effekt bei Raumtemperatur und kleinen Feldern nur etwa bis zu 2% groß. Im Gegensatz zu Nichtferromagneten steigt der Widerstand bei paralleler Ausrichtung der Magnetisierung zum Strom und sinkt bei senkrechter Orientierung dazu, siehe Abbildung 5 links, worin der Widerstand über dem angelegten Magnetfeld aufgetragen ist für parallele und senkrechte Orientierung zueinander. Der Grund für diesen Effekt liegt in der Spin-Bahn-Kopplung. Ein vereinfachtes Modell ist im rechten Teil der Abbildung zu sehen. Die um die Atomkerne lokalisierten Elektronenorbitale sind leicht deformiert und tragen zur unterschiedlichen Streuung der Leitungselektronen beim durchlaufen des Gitters bei. Eine senkrechte Ausrichtung des Magnetfeldes zur Stromrichtung verursacht eine Ausrichtung der Orbitale, wodurch deren Streufläche für die Leitungselektronen verringert wird und der Widerstand sinkt. Bei einer parallelen Ausrichtung hingegen, vergrößert sich die Streufläche und somit der Widerstand [8]. Genutzt wurde dies z.B. in den 90er Jahren in Festplatten für den Lesekopf.

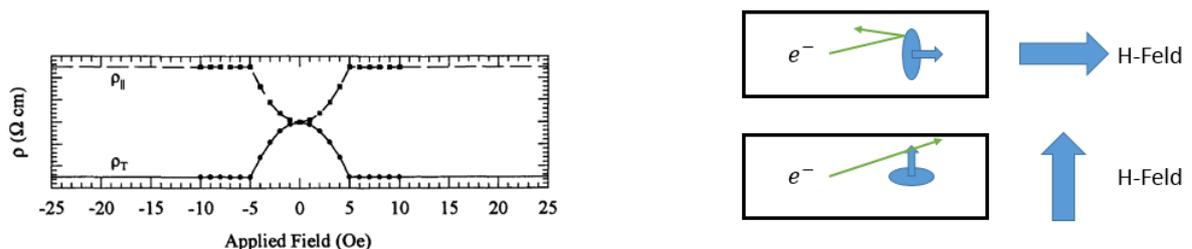


Abbildung 5 AMR in Permalloy für parallele und senkrechte Ausrichtung des Magnetfeldes (bzw. der Magnetisierung) zum Strom [8]

2.2.2 Riesenmagnetowiderstandseffekt (GMR)

Dieser Effekt ist erst seit 1988 bekannt durch die Arbeiten um die Forscher P. Grünberg und A. Fert [9, 10]. Der GMR tritt auf, wenn zwei ferromagnetische Schichten durch eine nichtferromagnetische, elektrisch leitende dünne Schicht voneinander getrennt sind. Wichtig ist das diese paramagnetische Schicht dick genug ist um eine direkte Austauschwechselwirkung zwischen den Ferromagneten zu unterdrücken. Damit ist ein Umschalten der Magnetisierungsrichtungen der Schichten von parallel zu antiparalleler Orientierung möglich. Die relative Widerstandsänderung auf Grund des GMR kann bei Raumtemperatur in Multilagen fast 50% betragen [11].

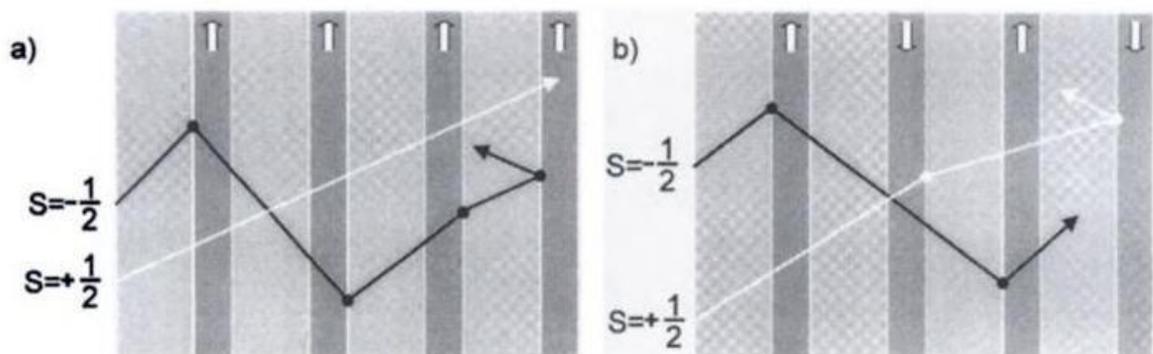


Abbildung 6 Spinstreuung der Elektronen in einer Multilayer GMR-Struktur a) parallel und b) antiparallel [12]

In Abbildung 6 sieht man ein Multilagen-GMR-Element mit (a) paralleler und (b) antiparalleler

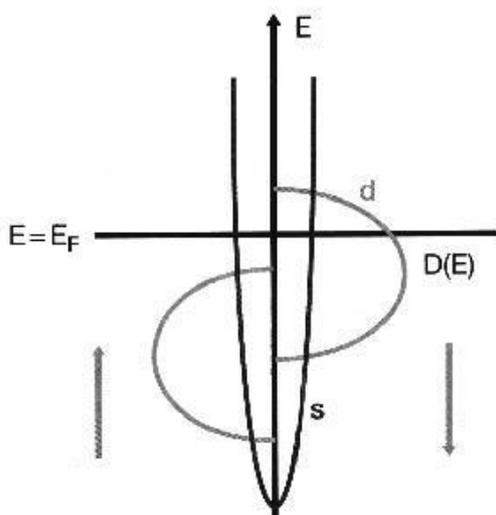


Abbildung 7 Zustandsdichte der 3d- und 4s-Bandstrukturen eines Ferromagneten [13]

Orientierung. Bei der parallelen Magnetisierungsausrichtung, finden weniger Streuprozesse statt, da nur Spin-down Elektronen stark gestreut werden und Spin-up nur wenig und ohne große Behinderungen die Strecke durchlaufen können, wodurch der Widerstand vergleichsweise gering ist. Die antiparallele Orientierung streut dagegen beide Elektronenarten sehr häufig, womit sie einen höheren Widerstand besitzt. Dieser Widerstandsunterschied tritt auf Grund der Aufspaltung des 3d-Bandes in Spin-up und Spin-down auf bei gleichzeitiger Entartung des 4s Bandes [13] (siehe Abbildung 7). In den betrachteten

Ferromagneten wird die elektrische Leitung hauptsächlich von den 4s Elektronen getragen, auf Grund ihrer geringeren effektiven Masse besitzen sie eine höhere Beweglichkeit als die 3d Elektronen. Für die Streuung der Leitungselektronen (4s) – wodurch der Widerstand entsteht –, muss beachtet werden, dass im Wesentlichen zwei verschiedene Streuprozesse dafür existieren. Die s-s-Streuung und die s-d-Streuung, wobei die Letzt genannte der dominierende Streuprozess und somit entscheidend für den Widerstand ist. Die s-d-Streuung ist wegen der Spin-Aufspaltung im 3d-Band spinabhängig. Aus diesem Grund erfahren Spin-down Elektronen (Minoritätsladungsträger) in einem ferromagnetischen Material mit einer Bandaufspaltung wie in Abbildung 7 mehr s-d-Streuprozesse als Spin-up Elektronen (Majoritätsladungsträger), da die Spin-down Zustandsdichte in der Nähe der Fermi-Energie im d-Band höher ist als die Spin-up Zustandsdichte. Somit können 4s-Spin-up Elektronen einfach in freie Zustände des 3d-Bandes streuen, was hingegen für die Spin-down Elektronen schwer ist, weil die entsprechenden Zustände größtenteils besetzt sind (wobei in diesem Bild die Spin-Flip Streuung vernachlässigt wird). Je nach Magnetisierungsrichtung ändert sich die Spin-Orientierung der Majoritäts- und Minoritätsladungsträger, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist. Im Fall der antiparallelen Konfiguration der GMR-Struktur ändert sich diese Orientierung mit jeder Schicht, für die parallele Konfiguration bleibt sie jedoch gleich. Fließt nun ein elektrischer Strom durch einen Ferromagneten so werden auch die beteiligten Elektronen spinpolarisiert. Entscheidend für das Auftreten des GMR-Effektes ist, dass die Polarisierung des Stroms nicht in der nichtferromagnetischen Zwischenschicht verloren geht. Das heißt die Spindiffusionslänge – also die Länge über der die Spinpolarisation eines Stromes in einem Material erhalten bleibt – muss größer sein als der Abstand zwischen den ferromagnetischen Schichten [12].

2.3 Fe₆₀Al₄₀ Legierung

Gewöhnlich ist Ferromagnetismus Folge einer erhöhten Ordnung, welche die Austauschwechselwirkung zwischen Atomen ermöglicht. Diese nimmt mit steigender Temperatur ab, auf Grund der Zunahme von Unordnung (Bewegung) im Kristallgitter. Das hier verwendete Fe₆₀Al₄₀ ist nach dem Beschichten ferromagnetisch, somit befindet es sich in der chemisch ungeordneten A2-Phase (Struktur), bzw. in einer Mischphase. Bei der A2-Struktur sind die Eisen und Aluminium-Atome zufällig in einem kubisch raumzentrierten (krz/bcc) Gitter angeordnet, wodurch eine hinreichend starke Austauschwechselwirkung zwischen den Fe-Atomen möglich wird und die Legierung somit ferromagnetisch ist. Wird die Legierung erhitzt ordnen sich die Atome in die B2-Struktur um. Diese energetisch niedrigere Phase besteht auch nach dem Abkühlen fort. In der B2-Struktur bleibt die kubisch raumzentrierte Struktur bestehen, auf Grund der neuen Anordnung der Atome im Gitter. Dabei bleibt die kubisch raumzentrierte Struktur bestehen, dabei sind die Atome aber nicht mehr zufällig angeordnet, sondern das zentrierte Atom ist Aluminium und die äußeren sind Eisen. Das Aluminium Atom in der Mitte stört dabei die Austauschwechselwirkung der Eisenatome und verursacht dadurch die paramagnetische Eigenschaft der Legierung. Diese B2 Ordnung kann in der Folge z.B. mittels Ionenbeschuss zerstört werden, um dadurch die A2-Phase zu realisieren [14]. Dank dieser Eigenschaft könnte es möglich sein mithilfe von Fe₆₀Al₄₀ ein laterales GMR-Element herzustellen.

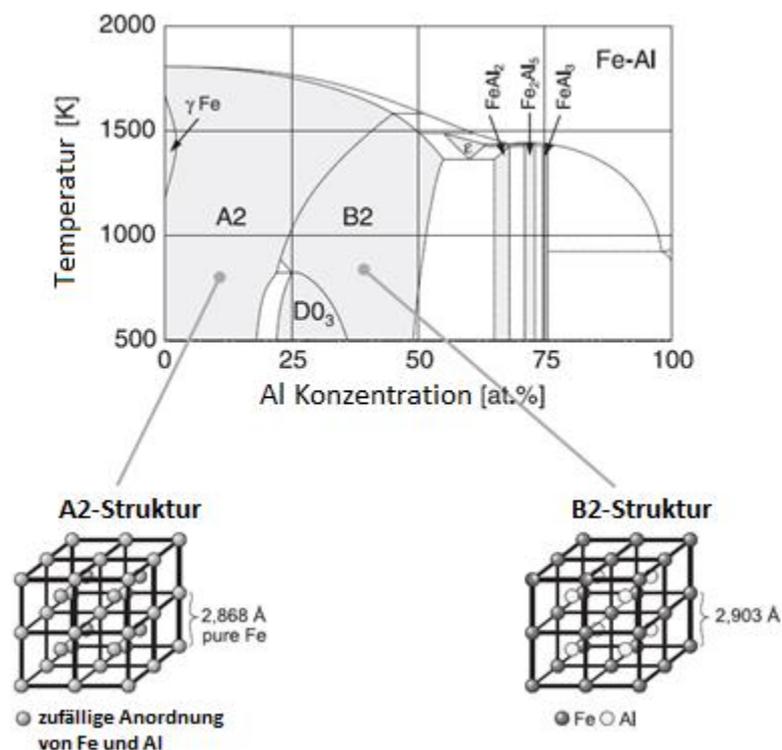


Abbildung 8 Phasendiagramm und Kristallstruktur von Fe₆₀Al₄₀ [15]

2.4 Strom-Wärme-Gesetz

Das Strom-Wärmegesetz, wird auch als Joulesches Wärmegesetz bezeichnet. Dieses bezieht sich auf die entstehende Wärme in stromdurchflossenen Leitern, die für Metalle im Allgemeinen auf Grund des Ohm'schen Widerstandes (R) entsteht. Die Wärme entwickelt sich dabei durch Elektronen-Atomrumpfstöße. Diese Stöße verursachen eine Übertragung von kinetischer Energie, wodurch eine erhöhte Gitterschwingungsenergie entsteht, infolgedessen die Temperatur des Leiters ansteigt [16]. Die entstandene Wärme ist dabei proportional zur Leistung eines elektrischen Systems (vgl. Gleichung 5).

$$P = U * I \quad (2)$$

$$U = R * I \quad (3)$$

$$P = I^2 * R = \frac{U^2}{R} \quad (4)$$

$$Q_W = I^2 * R * t = \frac{U^2}{R} * t \quad (5)$$

Der quadratische Einfluss von Stromstärke I und Spannung U auf die Leistung P und somit die Wärme Q_W ist in den Gleichungen 2-5 erkennbar.

Die zugeführte Wärmeenergie verursacht eine Erwärmung des Leiters auf eine bestimmte Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$. Diese lässt sich aus dem Quotienten von Wärme und der stoffspezifischen Wärmekapazität (C_ϑ) berechnen (siehe Gleichung 6). Bleibt die Leistung konstant, steigt die Temperatur auf Grund der linear wachsenden Wärme ebenfalls linear über der Zeit an.

$$\Delta\vartheta = \frac{Q_W}{C_\vartheta} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_W = \frac{dQ_W}{dt} = P \quad (7)$$

Dies ist jedoch nicht der Fall, da auf Grund der Erwärmung der Leiter eine höhere Temperatur besitzt als seine Umgebung. Diese Temperaturdifferenz verursacht einen Wärmefluss (\dot{Q}_W) vom Leiter weg. Der Wärmeabtransport erfolgt durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Für eine konstant eingespeiste Leistung stellt sich somit ein Gleichgewicht bei einer bestimmten Temperatur ein (siehe Gleichung 7).

3 Methoden

3.1 Aufbringen der Materialien

3.1.1 Magnetronspütern

Das DC Magnetronspütern, ist ein plasmagestütztes Gasphasenabscheidungs (PVD) - Verfahren, welches mittels Kathodenzerstäubung das Substrat mit dem Kathodenmaterial beschichtet. Hierbei wird ein elektrisch leitfähiges Material, die Kathode (Target), mit energetischen Ionen beschossen. Um diesen Prozess erfolgreich zu gewährleisten ist das Plasma von entscheidender Bedeutung. Für die Zündung des Plasmas ist eine hohe Spannung notwendig. Bei dieser lösen sich Elektronen aus der Kathode und bewegen sich zur Anode, dabei stoßen sie mit dem Arbeitsgas zusammen und ionisieren es. In dem hier genutzten Aufbau ist das Arbeitsgas ein Edelgas (Argon), da kein Reaktivspütern erfolgen soll und das reine Kathodenmaterial ($\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$) als Beschichtung dient. Die positiv geladenen Argon-Ionen werden dabei zur negativ geladenen Kathode beschleunigt. Das Auftreffen führt zu einer Rekombination des Ions zu einem Neutralteilchen und zu Stoßprozessen (auch Stoßkaskade genannt) im Material selbst, wodurch Atome aus diesem herausgeschlagen werden (Abbildung 9).

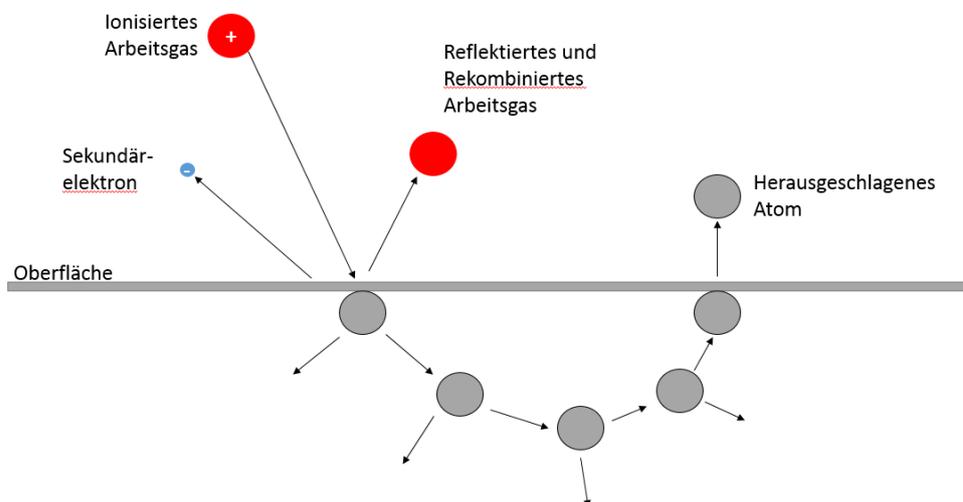


Abbildung 9 Darstellung der Stoßkaskade eines Sputterprozesses

Weiterhin werden Sekundärelektronen aus dem Target gelöst, die durch weitere Ionisierung das Plasma aufrecht erhalten [17]. Im Unterschied zu anderen Sputterprozessen treten während des Magnetronspüterns nicht nur elektrische Felder, sondern auch magnetische Felder auf. Letztere verursacht eine spiralförmige Bewegung der Elektronen auf Grund der Lorentzkraft. Somit verlängert sich deren Weg zur Anode und die Wahrscheinlichkeit mit

einem Arbeitsgas-Atom zusammen zu stoßen ist erhöht. Dadurch ist es möglich bei gleichbleibender Sputterrate einen geringeren Druck zu verwenden. Das führt zu einer geringeren Streuung des Kathodenmaterials auf dem Weg zum Substrat und gleichzeitig zu einer weniger porösen Beschichtung. Die wesentlich größere Masse der Ionen im Vergleich zu Elektronen verhindert eine starke Ablenkung im Magnetfeld. Das Plasma ist vor allem dort gut ersichtlich, wo die Magnetfeldlinien parallel zur Targetoberfläche sind. Das ist auch der Grund für die typischerweise auftretenden Gräben auf dem Target [18].

Das Magnetronspütern wird z.B. bei Legierungen verwendet deren einzelne Bestandteile stark unterschiedliche Schmelztemperaturen besitzen, weshalb sie durch gewöhnliches Bedampfen nicht als stöchiometrische Legierung abgeschieden werden können. $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ ist eine solche Legierung: Eisen besitzt eine Schmelztemperatur von 1540 °C gegenüber der von Aluminium mit 660 °C. Beim Magnetronspütern sind die Leistung, der Gasdruck und die Substrattemperatur wichtige Parameter. Das Target muss gekühlt werden um eine konstante Sputterrate zu gewährleisten.

In der nachfolgenden Tabelle sind die in dieser Arbeit verwendeten Parameter für die $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Abscheidung aufgelistet. Die Dicke der aufgetragenen Schicht wurde mittels Röntgenreflektometrie (XRR) gemessen, welches im nachfolgenden Kapitel „Röntgenreflektometrie“ beschrieben wird. Aus diesen Messungen wurde die Sputterrate bei einer Leistung von 25 W berechnet. Der Basisdruck in der Sputterkammer liegt im unteren E-9 mbar Bereich. Durch das Argon (Arbeitsgas) wird dieser für den Sputterprozess auf 3,0E-3 mbar erhöht, was einen Argon Fluss von 43,0 sccm entsprach. Vorab jeder Abscheidung erfolgt ein Vorsputtern von 2-3 Minuten wodurch das Target von möglichen Verunreinigungen und Oxiden befreit wird. Die Vorsputterzeit wird nach öffnen der Kammer erhöht.

Tabelle 2 Verwendete Sputterparameter

Sputterparameter	
Basisdruck	1-3E-9 mbar
Sputterdruck (Argon)	3*10E-3 mbar
Leistung	25 W
Stromstärke	77±1 mA
Spannung	327± 2 V
Vorsputtern	2 min
Sputterzeit	9 min 30 s
Sputterrate	~ 0.7 Å/s

3.1.2 Bedampfen

Ein weiteres PVD-Verfahren ist das thermische Verdampfen. Hierbei wird das Ausgangsmaterial bis zu einer Schmelze erhitzt und der dabei entstehende Materialdampf bewegt sich zum Substrat, woran dieser kondensiert. Um dabei mögliche Zusammenstöße mit Restgasatomen zu minimieren, findet das thermische Verdampfen im Hochvakuum statt. Dadurch wird die mittlere freie Weglänge höher als der Abstand zwischen der Verdampferquelle und dem Substrat. Es ist dabei notwendig, dass der Prozessdruck unter dem Gasdruck des zu abscheidenden Materials liegt um das Austreten von Atomen aus der Schmelze zu ermöglichen.

Das thermische Verdampfen geschieht z.B. für Materialien mit einer geringen Schmelztemperatur, wie zum Beispiel Aluminium, über einen elektrischen Heizstrom, also über einen Widerstandsverdampfer. Bei Materialien mit höheren Schmelztemperaturen geschieht dies über einen Elektronenstrahlverdampfer, etwa für Gold und Titan. In diesem Fall wird ein aus einer Glühwendel bereitgestellter Elektronenstrahl mittels elektrischen Feldes auf das zu bedampfende Material geschossen. Durch das Abbremsen der Elektronen im Material erhitzt sich dieses und schmilzt. Der Schmelzprozess sollte dabei möglichst langsam vonstattengehen um ein plötzliches Herausspritzen des Materials aus dem Tiegel zu vermeiden. Dafür wird der Strom bei beiden Prozessen nur langsam erhöht, so dass sich die Wärme relativ langsam ausbreiten kann und keine Spannungen im Target entstehen. Die Abscheidungsrate wird über einen Schwingquarz während der Verdampfung laufend kontrolliert und somit die Dicke der aufgedampften Schicht bestimmt. Der Schwingquarz verändert durch das abgeschiedene Material seine Eigenfrequenz, da seine Masse zunimmt. Auf Grund der bekannten Geometrie des Quarzes und mit Kenntnis der Dichte und der akustischen Impedanz des jeweiligen Materials, welches sich abscheidet, lässt sich dann die Rate berechnen. Bei der gewünschten Rate wird anschließend die Verschlussklappe geöffnet, welcher das Substrat zuvor von dem Prozess getrennt hat [19].

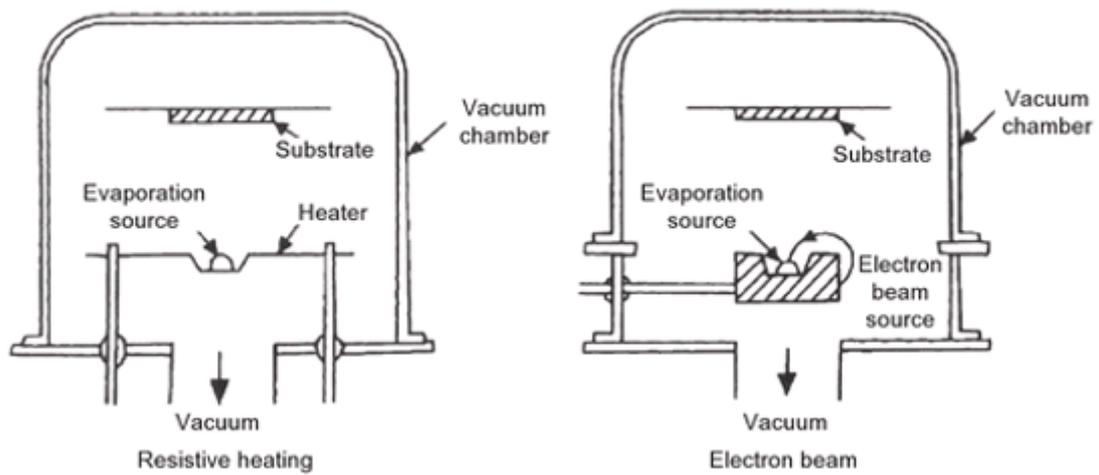


Abbildung 10 Schematischer Aufbau einer thermischen (links) und einer Elektronenstrahl- (rechts) Bedampfungsanlage [17]

3.2 Röntgenreflektometrie

Die Röntgenreflektometrie auch XRR (X-Ray Reflectometry) genannt, wurde 1985 entwickelt und dient zur Messung der Schichtdicken an ebenen Proben im Bereich von 3 – 300 nm [20]. Diese Methode ermöglicht eine zerstörungsfreie Untersuchung von Filmen, welche immer als Referenzproben gleichzeitig mit den strukturierten Proben (beschrieben im EBL Kapitel) hergestellt wurden. XRR bezieht sich dabei auf die Totalreflektion an Grenzschichten und deren Interferenz miteinander, wobei der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Der interessante Winkelbereich von θ liegt dabei zwischen 0° und 5° . Der schematische Aufbau wird in Abbildung 11 ersichtlich. Die Röntgenstrahlen werden über einen Monochromator auf die Probe ausgerichtet und anschließend über einen Detektor erfasst.

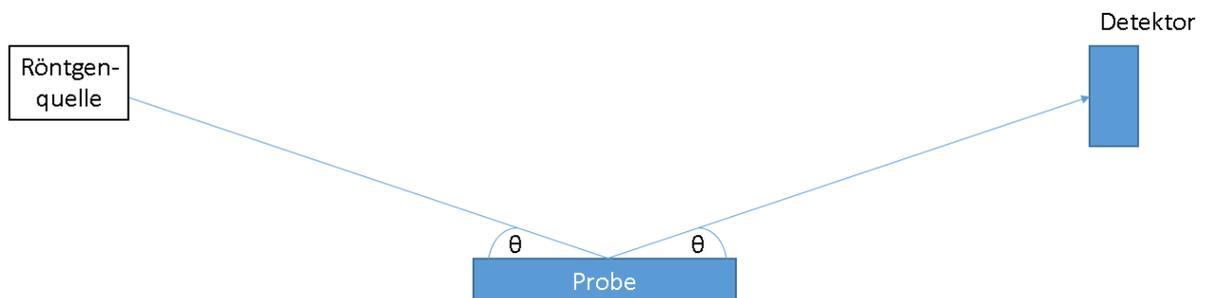


Abbildung 11 Schematischer Aufbau der Röntgenreflektometrie

Für gewöhnlich startet eine Messung knapp unterhalb von null Grad, im negativen Winkelbereich. Der erste Peak stellt die direkte Einstrahlung der Röntgenstrahlen auf den Detektor dar. Damit dieser dabei keinen Schaden nimmt werden Absorber zwischen geschaltet und deren Absorption anschließend für die IPS (Impulse pro Sekunde) berücksichtigt. Der darauffolgende Anstieg zeigt die Totalreflektion an der Oberfläche. Wenn der Einfallswinkel den kritischen Winkel überschreitet, ist wiederum ein starker Abfall zu erkennen. Die anschließende Oszillation der Intensität wird durch die Interferenz der reflektierten Röntgenstrahlen von der Oberfläche und der Grenzschicht, bzw. deren Phasenunterschied zueinander verursacht. Dabei können sich verschiedene Interferenzen überlagern. Wie hier die eigentliche Schichtdicke von $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ und deren passivierte Aluminiumoxid Schicht, letztere mit einer größeren Periode, auf Grund der kleineren

Schichtdicke.

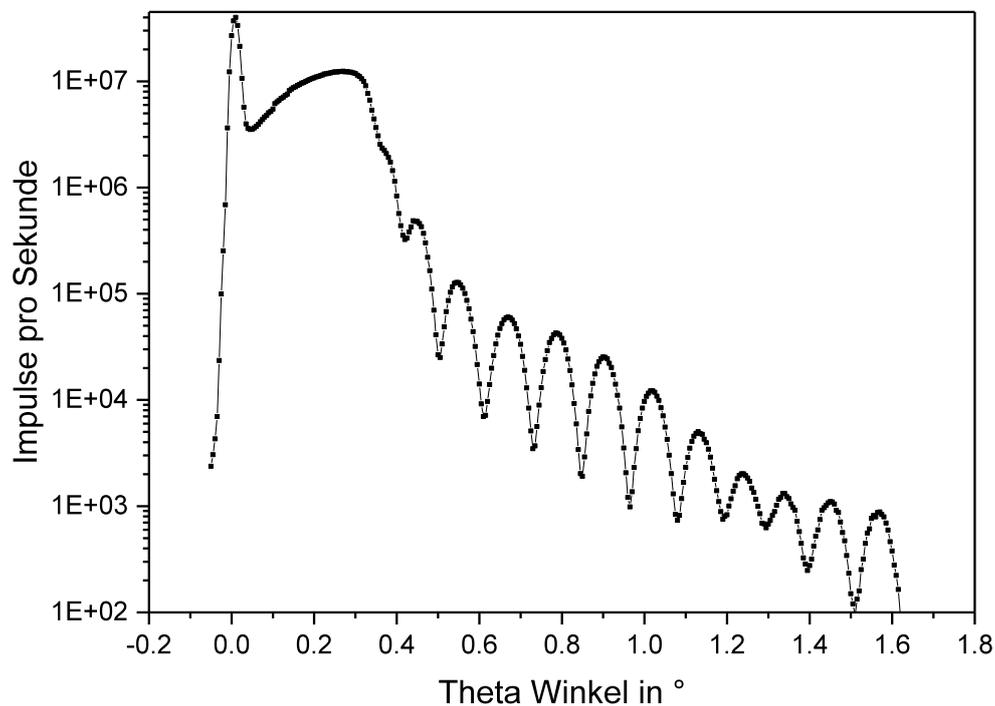


Abbildung 12 XRR-Messung eines ca. 40 nm dicken $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Filmes

Weiterhin lässt sich aus dem kritischen Winkel die Dichte der obersten Schicht ermitteln, und anhand des Abfalls der Intensität ist es außerdem möglich die Rauigkeit zu bestimmen. Die für diese Arbeit wesentliche Schichtdicke (d) wird wie folgt über die Winkel (θ) von zwei Maxima bestimmt.

$$d = \frac{n * \lambda}{2 * [\sin(\theta_2) - \sin(\theta_1)]} \quad (8)$$

Umso weiter weg die Maxima voneinander sind, umso genauer wird das Ergebnis. Die Wellenlänge λ ist von der jeweiligen Röntgenstrahlung abhängig, hier wurde $\text{Cu}_{K\alpha}$ mit 0,154 nm verwendet. Der Index n stellt die ganzzahlige Anzahl der Perioden zwischen den beiden Maxima dar.

Eine Berechnung für die Differenz zwischen dem letzten Maxima und dem Zweiten bzw. Dritten ergibt eine Schichtdicke von 39,4 nm mit 2-3 nm Toleranz. Dies entspricht in etwa 40 nm, welches das Ziel der Herstellung war.

3.3 Messen der magnetischen Eigenschaften

Die magnetischen Messungen sind ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit um die Fragestellung zu beantworten in welchem Magnetzustand sich die Probe befindet.

Der Vorteil der magnetooptischen Kerr-Effekt Magnetometrie (MOKE) -Messung ist dabei ihre schnelle Einsatzmöglichkeit, im Vergleich z.B. zum vibrating sample magnetometer (VSM).

3.3.1 MOKE

Der magnetooptische Kerr-Effekt tritt auf, wenn linear polarisiertes Licht an einem magnetischen Stoff reflektiert wird und sich dadurch die Lichtpolarisation ändert. Dieser Effekt wird genutzt, um die Magnetisierungsrichtung und das Ummagnetisierungsverhalten eines Stoffes, insbesondere dünner Filme, schnell und in-situ zu untersuchen. Bei einem MOKE-Magnetometer sind diese Messungen vor allem für Proben möglich, deren Fläche größer als 1mm^2 ist. Je nachdem, wie die Magnetisierungsrichtung des Stoffes und die Einfallsebene des polarisierten Lichtes zueinander ausgerichtet sind, wird die MOKE-Messung in drei verschiedene Geometrien kategorisiert (siehe Abbildung 13). Hier sind die verschiedenen Geometrien nach der Stärke des Kerr-Signals von links nach rechts dargestellt. Dabei gibt polar MOKE das stärkste Signal. Die Signalstärke fällt mit jeder Geometrie um eine Größenordnung ab.

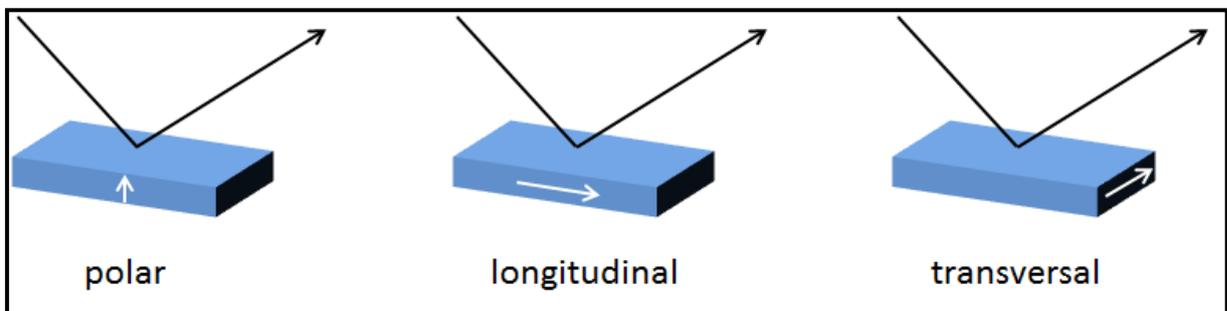


Abbildung 13 Darstellung der verschiedenen Geometrien des MOKE-Effektes

In dieser Arbeit wird der longitudinale MOKE genutzt. Hier liegt die Magnetisierungsrichtung parallel zur Probenoberfläche und in der Einfallsebene des Lichtes. Damit wird eine Messung der Magnetisierung dünner Schichten, wie der hier verwendeten 20 nm und 40 nm dicken Filme auf Silizium Substraten möglich. In dem Diagramm in Abbildung 14 ist ersichtlich, dass die erhitzte Probe kein Kerr-Signal mehr aufweist und somit auch nicht mehr oder höchstens noch schwach magnetisiert ist. Es liegt hier also die paramagnetische B2 Phase von $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ vor. Die mit Ionen bestrahlte Probe zeigt das größte Signal und deutet damit auch auf die stärkste Magnetisierung und die A2 Phase hin. Nach der Abscheidung besitzt $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$

ebenfalls ein Kerr-Signal. Das liegt daran, dass sich hier die Legierung in einer Mischphase aus A2 und B2 befindet.

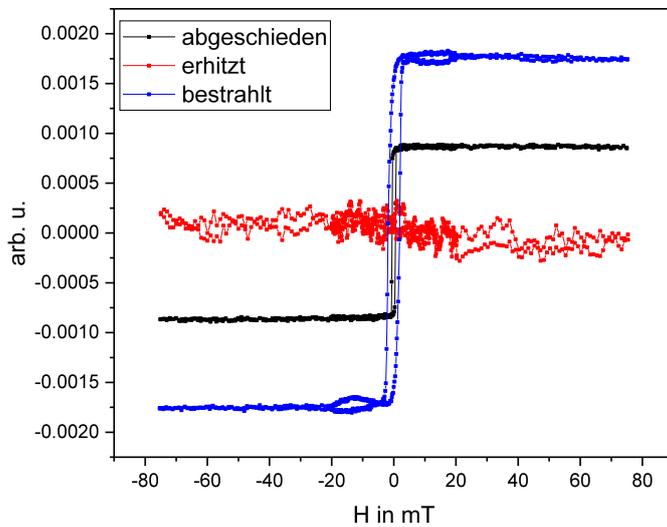


Abbildung 14 MOKE-Messung eines 20 nm dicken Films für 3 verschiedene Phasenzustände

Der longitudinale MOKE-Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung 15 dargestellt. Zu Beginn wird der Laserstrahl derart polarisiert, dass die magnetische Komponente in derselben Ebene des einfallenden Lichts und der Achse des angelegten H-Feldes liegt. Das

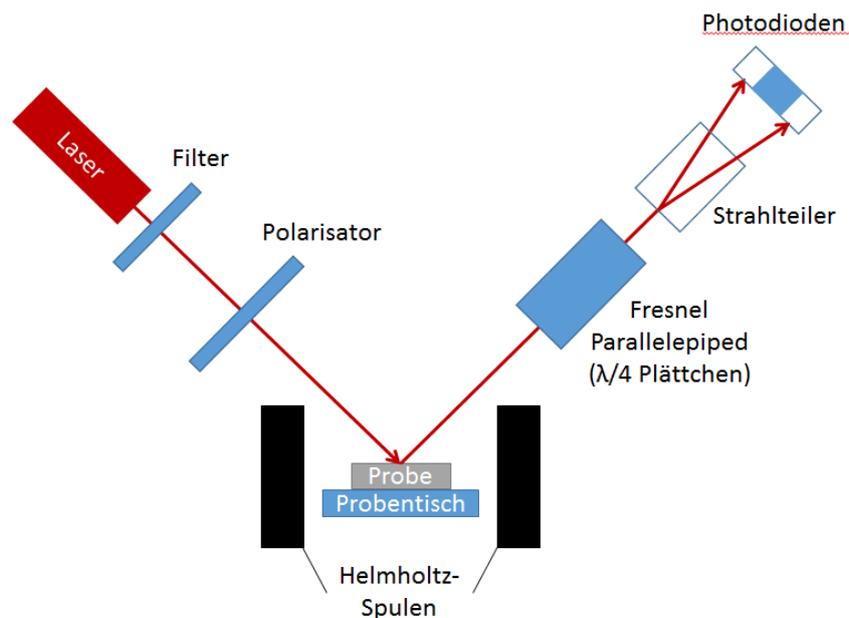


Abbildung 15 Schematische Darstellung des MOKE-Aufbaus

reflektierte Licht ist dann elliptisch polarisiert und wird am darauffolgenden Fresnelschen Parallelepiped in linear polarisiertes Licht umgewandelt (dies wirkt wie ein $\lambda/4$ -Plättchen). Durch ein doppelbrechendes Material wird der Laserstrahl anschließend in parallel und senkrecht polarisiertes Licht aufgespalten. Beide Teilstrahlen treffen nach Durchlaufen des Strahlteilers auf je eine Photodiode. In Abhängigkeit vom Intensitätsunterschied zwischen den Dioden lässt sich die Differenz in der Polarisierung und damit die relative Stärke der Magnetisierung ermitteln. Um eine Überbestrahlung zu vermeiden, lassen sich verschieden starke Filter vor den Laser schalten.

Für die zu untersuchenden strukturierten Proben (Drahtsysteme siehe nachfolgende Abbildung 16) ist es weiterhin wichtig, den magnetischen $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Streifen mit dem Laser zu

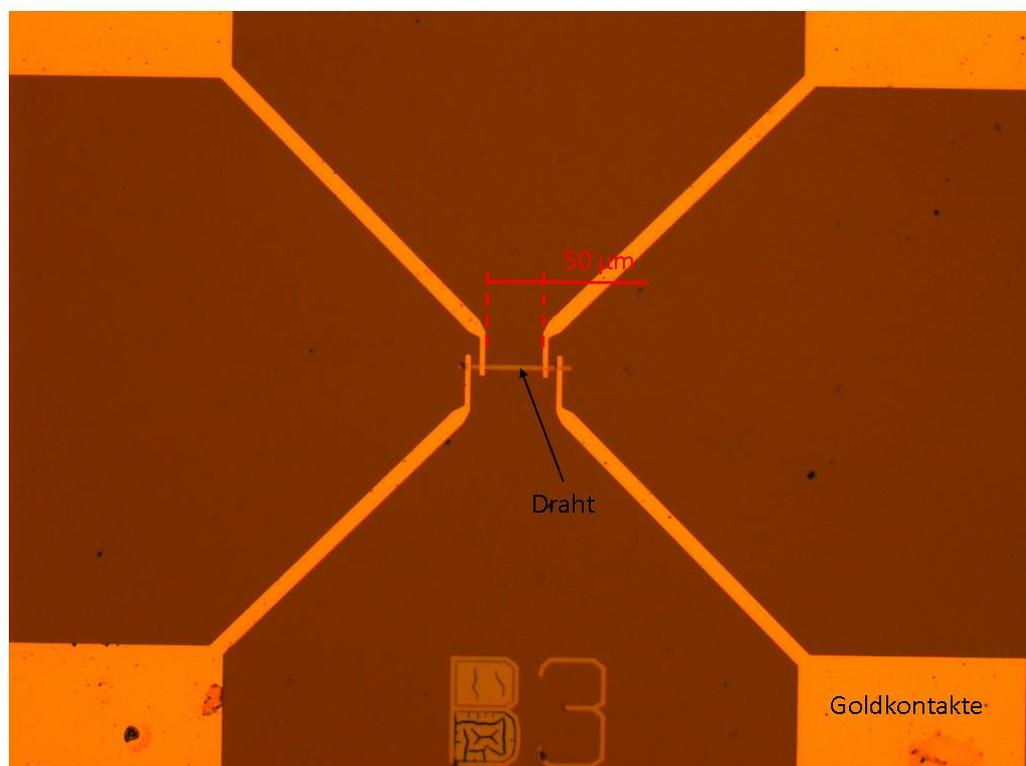


Abbildung 16 Lichtmikroskopische Aufnahme eines Drahtsystems mit $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Draht und Goldkontakten

treffen. Dieser Draht besitzt eine Fläche von $50 \times 5 \mu\text{m}^2$. Der ionenbestrahlte Anteil ist jedoch nur $40 \times 5 \mu\text{m}^2$ groß. Für eine Messung ist es jedoch zuerst erforderlich den Draht längs zum Magnetfeld auszurichten. Somit wird das vollständige Ummagnetisieren des Drahtes auf Grund der Formanisotropie ermöglicht. Um diesen Bereich jedoch genau zu treffen und auszurichten ist ein mikrometergenauer und drehbarer Probenstisch erforderlich, welcher mittels Motoren über den Computer gesteuert werden kann. Das Zielen erfolgt dabei zuerst über eine Kamera, in welcher man das gestreute Licht an Strukturen des auftreffenden Laserstrahls erkennen kann und somit den Laserspot in die Nähe der zu untersuchenden

Struktur bringt. Für eine präzisere Justierung werden die Intensitätsunterschiede für Substrat, Goldzuleitungen und Draht genutzt (Design wird im Abschnitt EBL beschrieben). Hierbei reflektiert Gold am stärksten und das Substrat Silizium mit einer rund 250 nm dicken Siliziumdioxid Schicht am schwächsten. Der Draht befindet sich mit der Intensität leicht über der des Substrats. Der Draht wird vom Laserstrahl komplett abgedeckt, jedoch ist der Laserpunkt etwa 60 – 70 µm groß und wird durch den schrägen Einfall entlang einer Achse noch etwas vergrößert. Somit werden sowohl das Substrat, als auch Teile der Goldzuleitung ebenfalls getroffen.

Tabelle 3 Intensitäten der einzelnen Strukturbestandteile

Material	Gold Zuleitungen	Substrat (SiO ₂ /Si)	Fe ₆₀ Al ₄₀
Intensität [u.E]	~ 4,0	~ 2,0	~ 2,4

Die effektivste Zielmethode, mit welcher es gelingt die Ergebnisse zu reproduzieren, ist es sich an den Zuleitungen zu orientieren. Dabei wird zunächst die Goldzuleitung gesucht. Dabei ist es wichtig herauszufinden ob der Messpunkt sich gerade über oder unter dem zu untersuchenden Draht befindet. Wenn eine der Zuleitungen vom Laserpunkt erfasst wird, steigt die Intensität schlagartig. Anschließend wird der Probenstisch solange in Richtung der andern Zuleitung bewegt, bis diese erreicht wird. Das ganze erfolgt in 10 µm- bis 20 µm-Schritten. Danach bewegt man den Laserpunkt zur Mitte und von dort aus hoch, bzw. runter direkt in Richtung Draht in 10 µm Schritten. Die plötzliche Intensitätserhöhung stellt den Draht dar. Hier wird ebenfalls nochmals die Mitte ausgelotet, in dem der Laserpunkt längs zum Draht bewegt wird und sich aus einem Intensitätsabfall auf das Verlassen der Struktur schließen lässt. Weiterhin muss noch die Mitte bezüglich einer Verschiebung nach oben und unten bestimmt werden. Dies erfolgt erneut in dem die höchste Intensität gesucht wird, dabei wird immer der Probenstisch nach oben und unten verschoben und die Schrittweiten von 10 µm über 5 µm und 2 µm bis zu 1µm verringert. Nach Abschluss kann die Messung begonnen werden.

Es ist möglich, im Messprogramm mehrere Schleifendurchgänge zu überlagern, um das Rauschen zu minimieren und somit das Signal stärker hervorzuheben. Standardmäßig werden in dieser Arbeit fünf Schleifen überlagert. Anschließend wird die Kurve zentriert und der Faradayeffekt abgezogen, welcher eine schräge Sättigung in der Hysterese verursacht. Der Faradayeffekt entsteht dabei in den Linsen des Aufbaus, hier wird die Polarisation auf Grund des B-Feldes in Richtung der Strahlrichtung gedreht.

3.3.2 KERR-Mikroskopie

Das KERR-Mikroskop dient zur Untersuchung der orts aufgelösten Magnetisierung kleiner Strukturen, welche für die Transportmessungen in $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ verwendet wurden. Das KERR-Mikroskop ist dabei ein modifiziertes Lichtmikroskop mit einem Polarisator-Analysator-Paar im Strahlengang um den magneto-optischen Kerr-Effekt zu messen. Weiterhin befinden sich zwei Spulenpaare im Umfeld der Probe um Magnetfelder in den lateralen x- und y-Richtungen zu erzeugen und so die Probe in bestimmte Richtungen zu magnetisieren. Die verwendete Lichtquelle ist eine Weißlichtquelle für eine uniaxiale Untersuchung, sowie als Alternative zwei Leuchtdioden, eine blaue und eine rote, für die gleichzeitige Untersuchung der Magnetisierung in beide lateralen Raumrichtungen die Magnetisierung gleichzeitig untersuchen zu können. Die Darstellung der magnetischen Orientierung entlang einer bestimmten Achse erfolgt in Grautönen und lässt sich mit dem paramagnetischen Substrat, welches neben den Strukturen zu sehen ist, vergleichen. Weiterhin besteht die Möglichkeit ein abklingendes Wechselfeld anzulegen und die Probe damit zu entmagnetisieren.

Ein Nachteil des KERR-Mikroskops ist es, dass das Signal schwächer ausfällt als beim MOKE-Aufbau. Im Gegenzug lässt sich hier jedoch die Magnetisierung orts aufgelöst darstellen und es ermöglicht die Aufnahme hochauflösender Bilder. Im Vergleich zum MOKE-Aufbau in 3.3.1, erlaubt das KERR-Mikroskop kleinere Strukturen zu untersuchen und zu messen mit Objektiven bis zu hundertfacher Vergrößerung.



Abbildung 17 KERR-Mikroskop [28]

3.4 Schreiben der Strukturen

3.4.1 Elektronenstrahl-Lithografie (EBL)

Die Transportmessungen in $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Strukturen sollen anhand von dünnen Drähten erfolgen, die u.a. mit Hilfe von Elektronenstrahlolithografie hergestellt werden.

Die dazu entwickelten Designs sind in der nachfolgenden Abbildung 18 zu sehen. Das Linke dient der Messung von Magnetowiderständen (GMR-Design) und das rechte Design wird für die strominduzierte Manipulation der Sättigungsmagnetisierung (CIPT-Design) verwendet.

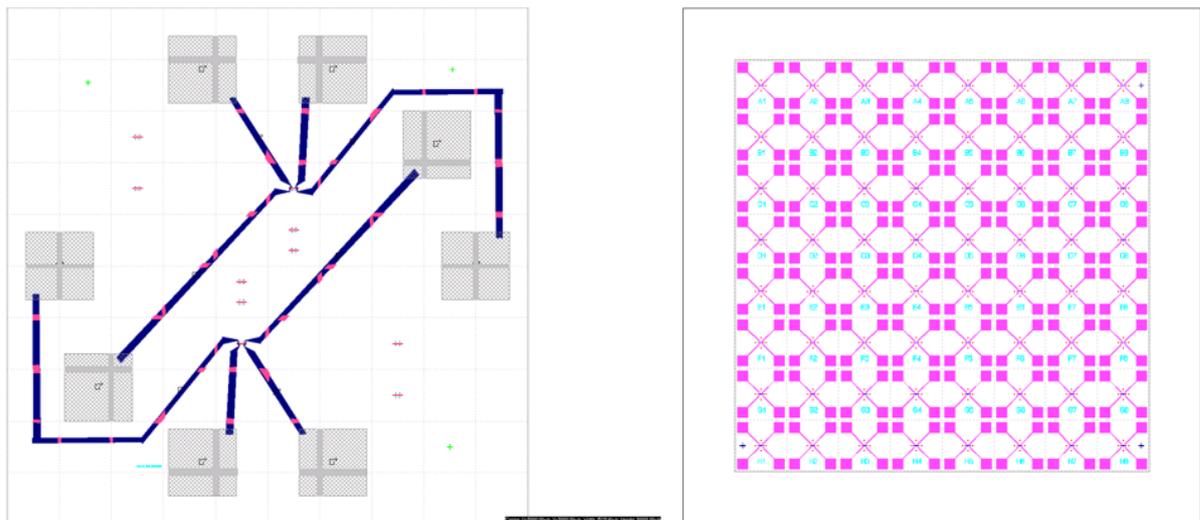


Abbildung 18 Darstellung links des GMR-Designs und rechts des CIPT-Designs mit Goldkontakten

Substrataufbereitung:

Das hier verwendete Silizium-Substrat wird einer 15 minütigen Reinigung in einem $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ heißen Säurebad (50 Vol. % 31 %iges Wasserstoffperoxid + 50 Vol. % 96 %ige Schwefelsäure) unterzogen. Anschließend entfernt eine Spülung in deionisiertem Wasser alle Säurerückstände. Die Herstellung der isolierenden 250 nm dicken Siliziumdioxidschicht (SiO_2) erfolgt mittels Trockenoxidation. Dazu werden für 5 h und 57 min bei $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ drei Standardliter Sauerstoff pro Minute in den Oxidationsofen geleitet. Die Substrataufbereitung erfolgte durch Gabriele Schnabel (HZDR).

Belacken:

Anschließend wird ein elektronenempfindlicher Lack auf dem Substrat mittels Spin-Coating aufgetragen. Dabei wird das Substrat auf 4000 Umdrehungen/min beschleunigt. Zum Aushärten des Lacks wird das Substrat für 10 min auf einer Heizplatte bei $180\text{ }^{\circ}\text{C}$

ausgebacken. Das hier verwendete Zweilacksystem besteht aus den Positivlacken EL9 (247 nm) und PMMA (127 nm). Durch den Einsatz dieser beiden Lacke bei festgelegter Rotationsgeschwindigkeit entstehen reproduzierbare und homogene Lackschichten. Diese bilden die Grundvoraussetzung für die nachfolgende Strukturierung des Substrates mittels Elektronenstrahl-Lithografie.

Schreiben der Strukturen

Elektronenstrahlolithografie zu Englisch „electron beam lithography“ kurz EBL ist eine Technik, welche es ermöglicht Strukturen im Nanometerbereich zu erzeugen. Das Grundprinzip ist hierbei dasselbe wie bei einem Rasterelektronenmikroskop (REM). Eine Glüh- bzw. Feldemissionskathode erzeugt Primärelektronen (PE). Diese werden in einem elektrischen Feld beschleunigt und dabei von Elektronenlinsen und Blenden fokussiert. Der Elektronenstrahl rastert den zu untersuchenden Bereich ab. Durch Stoßprozesse der PE mit der Probe werden Sekundärelektronen (SE) herausgelöst. Für die Abbildung im REM erfasst dann ein Elektronendetektor in der Regel diese SE, wobei jeder Bildpunkt eine Helligkeit zugewiesen bekommt, die von der Anzahl der ankommenden SE abhängt. Der Winkel zum Detektor, die Probenoberfläche (Rauigkeit) und das Probenmaterial beeinflussen die Anzahl der detektierten SE. Wichtig ist hierbei, dass die Probe leitfähig ist und keine Ladungen auf der Oberfläche entstehen, die den Elektronenstrahl beeinflussen. Der Probenhalter ist aus diesem Grund geerdet und besitzt Klemmen zur Fixierung der Probe. Die Probe kann weiterhin mit Kupfertape über den Lack mit dem Probenhalter befestigt werden, um Aufladungen zu reduzieren.

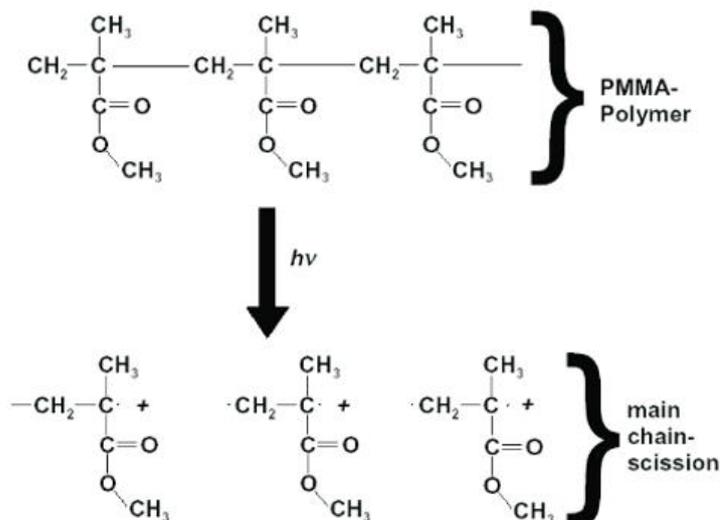


Abbildung 19 Strukturformel für PMMA vor und nach dem Belichtungsprozess mit Elektronen [21]

Eine EBL Anlage besteht prinzipiell aus einem REM, gekoppelt mit einem bewegungsfähigen Probenhalter, im Idealfall mit einer präzisen interferometrischen Positionskontrolle, wodurch der Halter nanometergenau gesteuert werden kann. Zusätzlich wird eine Belichtungssoftware und ein schneller Patterngenerator verwendet [22]. Mit Hilfe der Bilderzeugung und der Software lässt sich die Position des Substrates bestimmen. Dies geschieht meist über die Eckpunkte, welche anvisiert und in der Software markiert werden. Der Probenhalter fährt nach der Programmierung der Belichtung selbstständig an die gewünschten Bereiche des Substrates. Hierbei wird der Elektronenstrahl automatisch an- und ausgeschaltet, abhängig davon ob er sich über einem zu belichtenden Bereich befindet. Somit erfolgt nur innerhalb der gewünschten Strukturen eine Belichtung. Weiterhin hängt die gewählte Bestrahlungsintensität vom jeweiligen Lack ab. Anhand einer vorhergehenden Strommessung lässt sich die notwendige Verweilzeit des Elektronenstrahls an einem zu belichtenden Probenort berechnen. Der Strom hängt dabei stark von der gewählten Blendengröße ab. Kleine Strukturen werden hierbei präzise mit einer kleinen Blende (Durchmesser der Apertur 10 μm) geschrieben wohingegen für größere Flächen (Probenkontakte) eine große Blende (Durchmesser der Apertur 60 μm) verwendet wird, um prinzipiell höhere Schreibgeschwindigkeiten zu erreichen.

Bei der EBL wird ein Lack verwendet, der gegenüber dem Elektronenstrahl empfindlich ist also seine chemischen Eigenschaften dort, wo der Elektronenstrahl auftrifft, ändert. In Abbildung 19 ist dies am Beispiel von PMMA verdeutlicht. Es ist erkennbar, dass auf Grund der Elektronenbestrahlung das langkettige Molekül in kurzkettige Moleküle aufgespalten wird [21]. Das geschieht durch die Sekundärelektronen im Lack, wodurch die Dosis auch bei verschiedenen Dicken des Lacks für einen jeweiligen Lack konstant bleibt. Nach der Belichtung, wird der bestrahlte Bereich durch einen chemischen Entwickler abgelöst, so dass die belichteten Bereiche nach dem Entwickeln nun keinen Lack mehr aufweisen (Positivlack). Bei einem Negativlack wäre dieser Effekt genau umgekehrt, d.h. die belichtete Struktur würde im Gegensatz zum unbestrahlten Umfeld erhalten bleiben. Als Entwickler wird für 90 s ein Lösungsmittelbad (Methylisobutylketon und Isopropanol im Mischungsverhältnis 1:3) verwendet. Der Einsatz eines Stoppers (30 s in Isopropanol) beendet den Entwicklungsprozess kontrolliert und entfernt die überschüssige Entwicklerlösung.

Insgesamt gibt es zwischen der Herstellung des Substrats und der Ionenbestrahlung acht Prozessschritte, die alle selbstständig durchgeführt wurden. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 4 Prozessschritte zur Herstellung einer Probe

Prozessschritt	Prozess	Parameter											
P1	Belacken	<table border="1"> <tr> <td>Photoresist</td> <td>EL9</td> <td>PMMA A4</td> </tr> <tr> <td>Umdrehungen</td> <td>4000 U/min</td> <td>4000 U/min</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Aushärten</td> <td>180 °C</td> <td>180 °C</td> </tr> <tr> <td>10 min</td> <td>10 min</td> </tr> </table>	Photoresist	EL9	PMMA A4	Umdrehungen	4000 U/min	4000 U/min	Aushärten	180 °C	180 °C	10 min	10 min
		Photoresist	EL9	PMMA A4									
		Umdrehungen	4000 U/min	4000 U/min									
		Aushärten	180 °C	180 °C									
10 min	10 min												
P2	EBL-Strukturieren + Entwickeln der Drähte	Dosis: 120 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$											
		Entwickler: Methylisobutylketon											
		Isopropanol 90s											
	Stopper: Isopropanol 30s												
P3	Beschichten + Lift-off	Sputtern: 40 nm $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$											
		Lift-off: Aceton 3 - 20 h											
P4	Ausheizen	Temperatur: 500 °C											
		Dauer: 60 min											
		Temp.-Rate: 5 K/min heizen											
		10 K/min abkühlen											
P5	Belacken	<table border="1"> <tr> <td>Photoresist</td> <td>EL9</td> <td>PMMA A4</td> </tr> <tr> <td>Umdrehungen</td> <td>4000 U/min</td> <td>4000 U/min</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Aushärten</td> <td>180 °C</td> <td>180 °C</td> </tr> <tr> <td>10 min</td> <td>10 min</td> </tr> </table>	Photoresist	EL9	PMMA A4	Umdrehungen	4000 U/min	4000 U/min	Aushärten	180 °C	180 °C	10 min	10 min
		Photoresist	EL9	PMMA A4									
		Umdrehungen	4000 U/min	4000 U/min									
		Aushärten	180 °C	180 °C									
10 min	10 min												
P6	EBL-Strukturieren + Entwickeln der Kontakte	Dosis: 120 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$											
		Entwickler: Methylisobutylketon											
		Isopropanol 90s											
	Stopper: Isopropanol 30s												
P7	Beschichten	Verdampfen: 5 nm Ti 60 nm Au											
P8	Lift-off	Aceton 3 – 20 h											

Der zweite Beschichtungsschritt war dabei nicht unmittelbar mit dem Lift-off verbunden. Der Grund dafür ist, dass die Beschichtung mit Titan und Gold nicht in jedem Fall eigenständig durchgeführt wurde und somit der Lift-off z.T. erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgte.

Hindernisse die während des Prozesses auftreten können

In diesem Abschnitt wird geschildert welche Schwierigkeiten während des Prozesses auftraten und wie diese gelöst wurden.

Bereits beim Belacken der Substrate kann ein Problem auftreten, nämlich dass der Lack nicht ausreichend auf dem Substrat haftet. Dies liegt zumeist an den Wassermolekülen, welche sich auf der Oberfläche anlagern. Die Lösung für dieses Problem ist: das Substrat vor dem Belacken für 2 min auf die Heizplatte zu legen und auf 90 °C zu erhitzen, um die restlichen Wassermoleküle zu verdampfen. Eine Alternative wäre es ein Sauerstoffplasma zu verwenden um denselben Effekt zu erhalten ohne die Probe erhitzen zu müssen. Dies gilt insbesondere für temperatur-empfindliche Proben, welche aber korrosionsbeständig sein sollten um ein Oxidieren zu verhindern. Die hier verwendeten $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Proben sind auf Grund der schützenden Aluminiumoxid Schicht, die sich an deren Oberfläche bildet, korrosionsbeständig.

Anschließend wird die Probe mittels Elektronenstrahlithografie strukturiert. Hier ist eine der kritischen Phasen das Schreiben der Strukturen über die Schreibfeldgrenzen. Das Schreibfeld ist der Bereich auf einer Probe in dem der Probenstisch nicht verfahren wird, sondern nur der Elektronenstrahl abgelenkt wird. An den Grenzen zwischen den Schreibfeldern können leicht Unterbrechungen der Strukturen auftreten. Um diese möglichst zu verhindern ist es wichtig den Elektronenstrahl vorher korrekt einzustellen. Dies geschieht, indem der Fokus auf die Fokusebene eingestellt wird und der Astigmatismus korrigiert wird. Anschließend wird das Schreibfeld justiert. Hierbei wird eine Struktur oder ein Schmutzpartikel genutzt. Dieser wird in die Mitte der bildgebenden Software gebracht und somit direkt unter die Elektronenoptik. Anschließend wird dieser Punkt als Zentrum markiert. Der interferometrische Probenstisch fährt nun präzise und automatisch vier Positionen an, so dass sich der Punkt jeweils an einem Rand eines Schreibfelds befindet. Die für diese Position notwendige Auslenkung des Elektronenstrahls wird nun jeweils manuell nachkorrigiert und dadurch das Schreibfeld kalibriert. In Abbildung 20 ist das Verfahren Schreibfeldkorrektur für zwei Anfahrpunkte skizziert. Die Lichtmikroskopaufnahme zeigt die Probe nach dem einstellen des Schreibfelds und dem Entwickeln. Hier ist zu sehen, dass sich durch das Abbilden des Staubkorns an den vier Verfahrspositionen eine Art Kreuz

gebildet hat, weil dort bereits teilweise der Lack mit entwickelt wurde. Das liegt an der Belichtung, auf Grund der Bildaufnahme des Staubkornes an einer Schreibfeldgrenze.

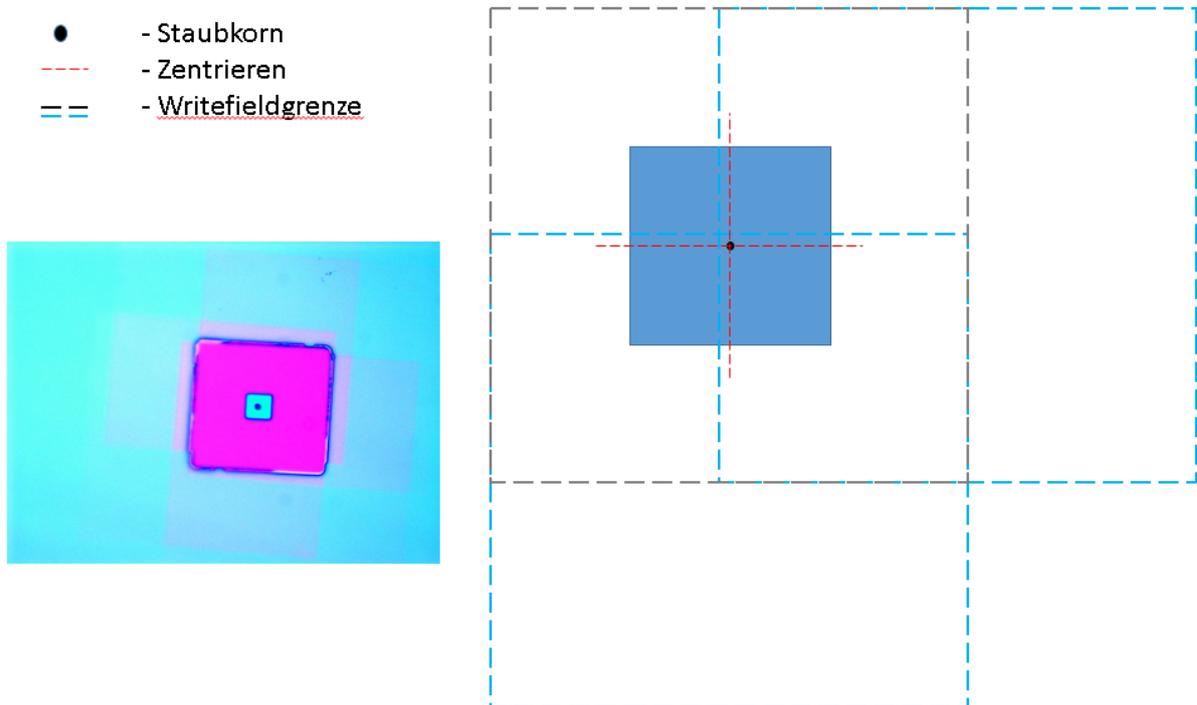


Abbildung 20 Skizze (rechts) für das Schreibfeld Alignment für zwei der vier Positionen und resultierende Lichtmikroskopaufnahme (links)

Die Schreibfeldkorrektur wird immer durchgeführt um die Struktur möglichst präzise herzustellen. Dennoch stellt diese Korrektur nicht vollständig sicher dass keine Unterbrechungen der Strukturen an den Schreibfeldgrenzen auftreten. Um das Problem zu umgehen, können die Schreibfeldgrenzen so gewählt werden, dass sich die gesamte miteinander verbundene Struktur in einem solchen Feld befindet, wie z.B. bei den Strukturen für den strominduzierten Phasen-Übergang.

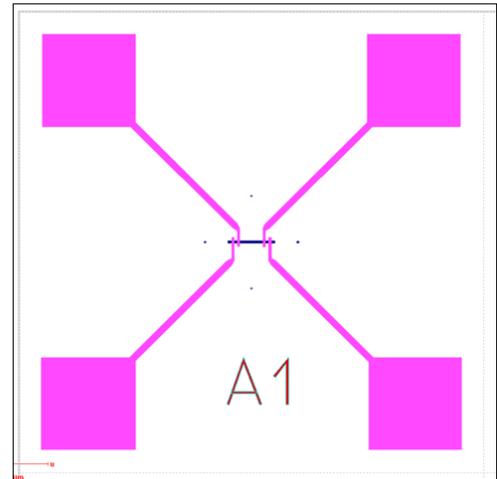
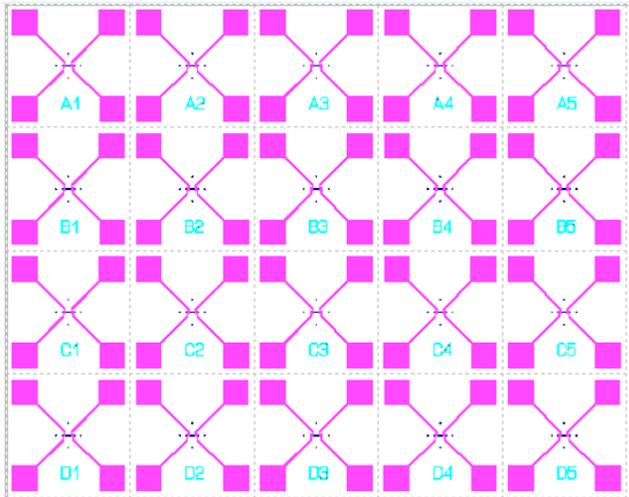


Abbildung 21 Design für den strominduzierten Phasen-Übergang, mit den grau gestrichelten Linien als Schreibfeldgrenzen.

In der oben zu sehenden Abbildung markieren die grau gestrichelten Linien die Schreibfeldgrenzen, welche die gesamte Struktur eines Drahtes (blau) sowie dessen Kontakte (magenta) umschließt. Hierfür wurde das größte mögliche Schreibfeld von $1000\ \mu\text{m} \times 1000\ \mu\text{m}$ genutzt. Bei größeren Strukturen, welche über die Schreibfeldgrenzen hinausgehen wie z.B. bei den Proben für Magnetowiderstandsmessungen, werden zusätzliche Strukturen in den kritischen Bereichen der Schreibfeldgrenzen eingefügt (rot in der nachfolgenden Abbildung 22) Diese werden in einem zweiten Belichtungsschritt mit einem verschobenen Schreibfeld geschrieben.

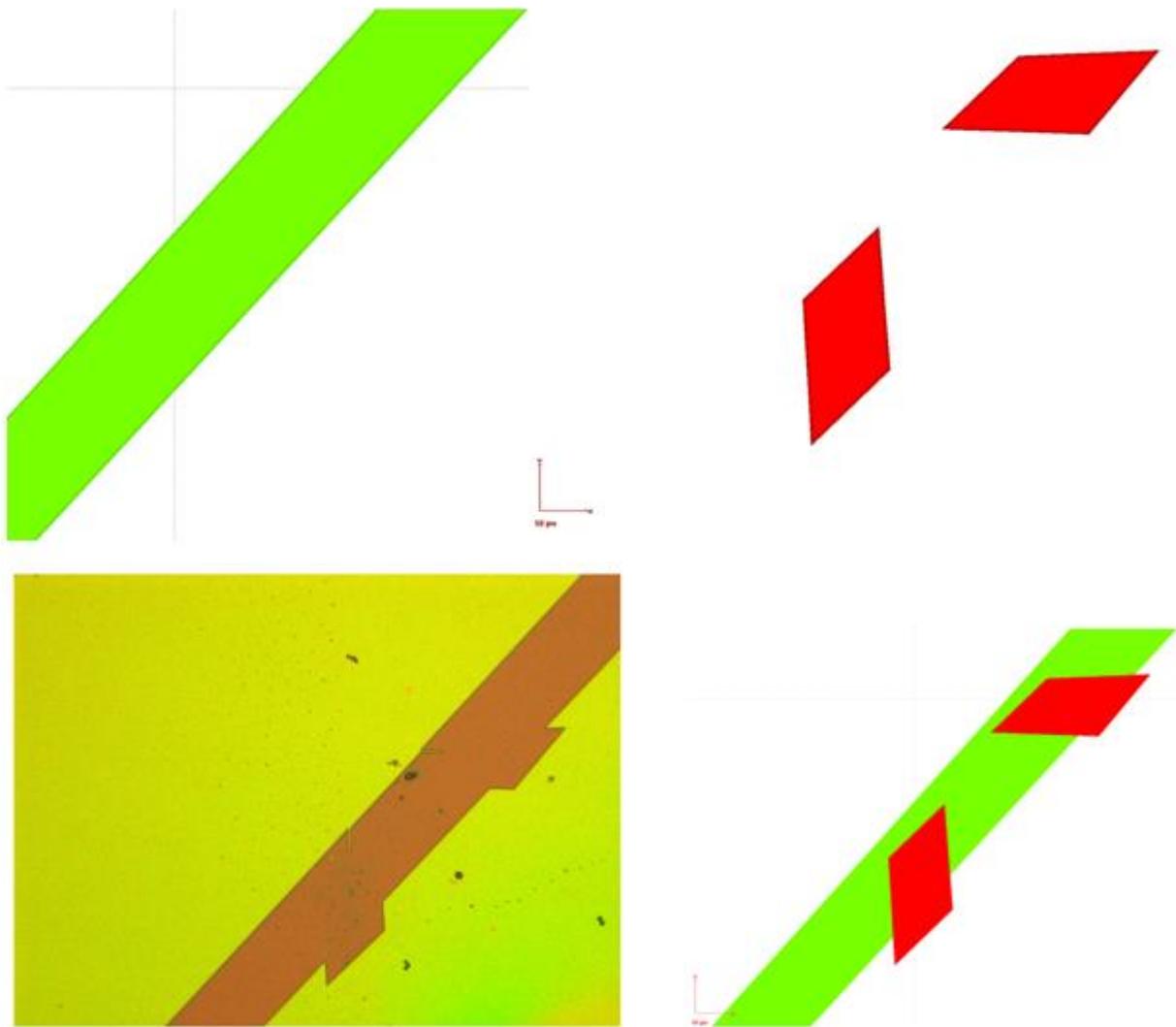


Abbildung 22 Probenstruktur mit Schreibfeldgrenzen (links oben), Überlappungen ohne Schreibfeldgrenzen (rechts oben), beides zusammengefasst (rechts unten). Lichtmikroskopie Aufnahme nach beiden Belichtungen mit Einschnitten an den Schreibfeldgrenzen (links unten).

Das Ergebnis dieses Prozesses ist in der Abbildung 22 zu sehen. Oben das Design mit den beiden verschiedenen Belichtungsschritten und somit einer zweifachen Belichtung vom kritischen Bereich, unten rechts beide zusammen gefasst. Unten links die geschriebene Struktur nach dem Entwickeln, um welche sich der nicht bestrahlte Lack befindet. Die Schreibfeldgrenzen lassen sich auf Grund der beiden Einschnitte in der Struktur sehr gut erkennen. Eine vollständige Trennung des Streifens wurde mittels der Doppelbelichtung des Abschnitts verhindert.

Weiterhin gab es Schwierigkeiten beim Lift-off, welcher nicht immer vollständig funktionierte. Das trat vor allem zu Beginn auf, als noch lediglich eine einzelne Lackschicht verwendet

wurde. Die Verwendung von Zweilacksystemen hat die Ausbeute beim Lift-off stark verbessert. Hierbei werden wie bereits beschrieben zwei elektronenempfindliche Lacke nacheinander auf das Substrat aufgetragen, wobei wichtig ist, dass der untere Lack empfindlicher auf die Bestrahlung reagiert als der obere um einen Überhang im Profil zu erzeugen. In der nachfolgenden Abbildung 23 ist dies anhand der hier verwendeten Lacke dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Schicht im Fall des einlagigen Lacks sowohl an dessen Rändern, als auch mit dem oben aufliegenden Material leicht verbinden kann. Dies macht den Lift-off schwierig, weil keine Angriffsfläche für das Aceton geboten wird bzw. der metallische Film zusammenhängend bleibt. Dadurch verbleiben z.B. Reste auf der Probe, die nicht zur Struktur gehören und diese somit unbrauchbar werden lassen. Die Lackdicke für den Lift-off sollte immer mindestens zwei- bis dreimal der Höhe der zu beschichtenden Materialien entsprechen, hier also etwa 120 nm. Dadurch wird verhindert, dass sich die Materialien auf dem Substrat und auf dem Lack verbinden. Dennoch werden Teile der Lackseitenränder mit beschichtet. Daher kann es, wie in der Abbildung 23 zu sehen, zu der Entfernung der Struktur kommen. Der Überhang im Zweischichtsystem verhindert ein Anheften der Materialien an den Rändern des Lacks und ermöglicht somit einen einfachen Lift-off-Prozess. Der Prozess selbst kann mittels Pipette beschleunigt werden, indem ein leichter Acetonfluss über der Probe erzeugt wird und somit überschüssige Lackreste schneller entfernt werden. Bei größeren Rückständen kann hier auch ein Ultraschallbad verwendet werden. Die verwendeten Strukturen sind ausreichend groß genug um diese Behandlung unbeschadet zu überstehen, dennoch wird eine niedrige Leistungsstufe für die Verwendung eines Ultraschallbads empfohlen.

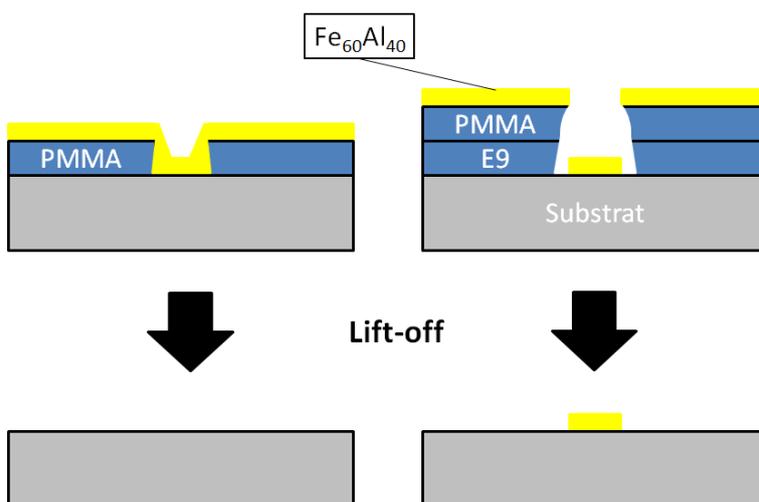


Abbildung 23 Darstellung des Lift-offs für Ein- und Zweilacksysteme

Ein bereits bekannter Fakt ist das Gold in vielen Fällen eine Haftbeschichtung wie z.B. Titan oder Chrom benötigt um auf Oberflächen zu halten. Die Entscheidung fiel hier auf Titan, weil es häufig Verwendung findet und sich somit Proben verschiedener Forschungsprojekte gleichzeitig beschichten ließen. Ein Beschichtungsversuch ohne Haftbeschichtung war wenig erfolgreich und wurde nur unternommen, weil weder Titan noch Chrom zu einem gewissen Zeitpunkt verfügbar waren.

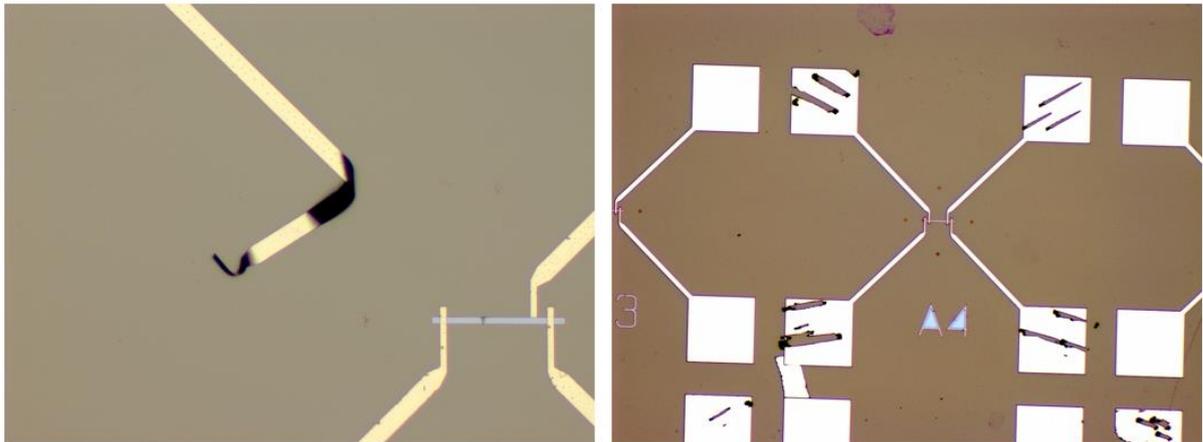


Abbildung 24 Probe mit Goldkontakten ohne Haftbeschichtung

In der obenstehenden Abbildung ist diese Probe zum einen links nach dem Lift-off zu sehen. Hier sieht man, wie sich das Gold bereits teilweise vom Substrat abgelöst hat. Dennoch waren einige Drähte und deren Goldkontakte vollständig. Das rechte Bild zeigt solch eine Struktur, jedoch wurde durch das Aufsetzen der Kontaktspitzen (siehe Abschnitt ASTRID) das Gold entfernt. Eine Messung war dennoch möglich, nur mussten für wiederholte Messungen die Positionen der Spitzen verändert werden, was die Anzahl der Messungen stark begrenzte.

3.5 Ausheizen

Das Ausheizen erfolgte in einem Hochvakuum Rohrofen um die Eigenschaften der Proben gezielt zu beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mittels Heizen bei $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ die magnetischen Eigenschaften verändert. Der verwendete Ofen ermöglichte das Erhitzen im Vakuum, wodurch Oxidation und Diffusionseffekte von Fremdatomen an der Probenoberfläche stark reduziert werden. Zusätzlich führt eine Wärmebehandlung meist zum Ausheilen von Defekten in der Gitterstruktur. Dabei



Abbildung 25
Hochvakuum Rohrofen

wird der Heizprozess immer ohne Lack durchgeführt, da dieser sonst auf der Probe festbacken würde und sie somit zerstört wäre. Weiterhin geschieht das Ausheizen nur vor dem Aufbringen weiterer Materialien, um ein ineinander Diffundieren dieser zu verhindern.

Tabelle 5 Verwendete Heizparameter

Heizparameter	
Basisdruck	2E-6 mbar
Heizen pro min.	5 K
Abkühlen pro min.	10 K
Zieltemperatur	500 °C
Zeit bei Zieltemperatur	60 min

Die verwendeten Parameter im Eurotherm Controller sind aus der Tabelle 5 abzulesen. Hierbei ist zu beachten, dass auf Grund des großen Volumens und der geringen Kühlung des Ofens, der Abkühlprozess maximal 10 K die Minute beträgt. Insgesamt werden 24 h benötigt um den Ofen von 500 °C auf 30 °C abzukühlen. Dies führt dann zum gewünschten Effekt der Phasenumwandlung, in die paramagnetische B2-Phase.

3.6 Ionenbestrahlung

Die Ne-Ionenbestrahlung dient zur Umwandlung des $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ von der geordneten paramagnetischen Phase in die ferromagnetische ungeordnete Phase. Diese Bestrahlung erfolgte zum einen mittels eines Ionenimplanters, also einer vollständigen Bestrahlung der Probenoberfläche. Daher müssen die Bereiche welche nicht bestrahlt werden sollen vor den Ionen geschützt werden. Dies erfolgt in einem weiteren Lithografie-Schritt. Bei diesem wird die Schichtdicke des Lacks so gewählt, dass die Ionen diesen nicht durchdringen können. Das vorher verwendete Lacksystem besitzt diese Anforderungen. In Abbildung 26 ist die bereits beschriebene Probe mit Lack und Fenster zu sehen. Das Fenster ist hier der einzige Bereich in dem die Ionenbestrahlung nun tatsächlich erfolgt.

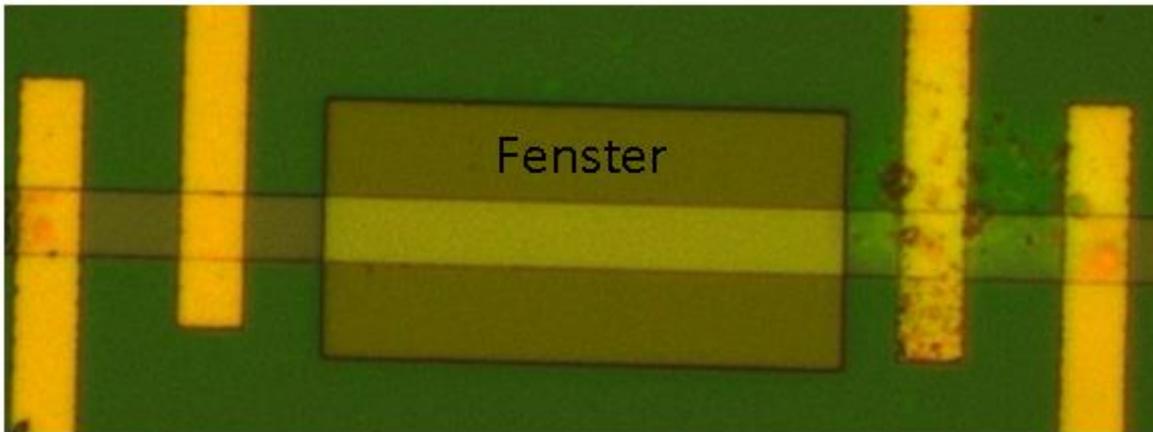


Abbildung 26 Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe mit Lack und Fenster vor der Ionenbestrahlung

Nach der Ionenbestrahlung erweist sich der Lack als äußerst Widerstandsfähig gegenüber dem Lösungsprozess mittels Aceton. Die Anwendung eines Sauerstoffplasmas für 10 min entfernt jedoch die Lackreste.

Eine weitere Möglichkeit der Bestrahlung bietet das Helium Ionen Mikroskop (HIM). Dessen Funktionsweise ist der EBL sehr ähnlich; es werden ein genauer Probenstisch und eine Belichtungssoftware verwendet. Der Unterschied zu einem REM ist die Verwendung von Ionen zum Herausschlagen der SE, anstatt von Elektronen. Diese Ionen können je nach Bedarf Helium-, aber auch Neon-Ionen sein. Der Vorteil dieser Bestrahlung, ist dass kein weiterer Lithografie-Schritt notwendig ist und somit eine schnelle und direkte Prozessierung ermöglicht wird. Weiterhin ist das HIM für die GMR-Proben erforderlich, da es einen lediglich 2-3 Nanometer großen fokussierten Ionenstrahl besitzt. Nur damit ist eine direkte Strukturierung von ferro- und paramagnetischen Bereichen von wenigen Nanometern Größe nebeneinander möglich.

3.7 Widerstandsmessgeräte

Nach Herstellung einer Probe erfolgten die Widerstandsmessungen zum einen an der Messstation ASTRID für die strominduzierte Änderung der Sättigungsmagnetisierung und zum anderen an einer Lakeshore Probestation für die GMR-Proben.

3.7.1 ASTRID-Widerstandsmessgerät

Die Messstation ASTRID (siehe Abbildung 27) wird bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur betrieben. Das Kontaktieren der Probe erfolgte durch vier Messarme (2), welche die Voraussetzung für die erforderliche Vierpunktmessung bilden. Die Messarme sind über Druckluft einzeln verschiebbar. Zur Feinjustage besitzen alle Kontakte Feintriebe für jede Raumachse. Weiterhin lassen sich die Kontaktspitzen mittels Hebelarm (3) gleichzeitig auf die Probe absenken. Nachdem optischen zielen, wird simultanes Aufsetzen am Rand der Probe getestet und eingestellt. Überprüft wird das Ganze mit dem Mikroskop (1). Das Auftreffen der Kontaktspitzen wird durch ein vorwärtsschieben der Spitzen wahrgenommen. Zusätzlich ist der Probestisch mikrometergenau bewegbar, wodurch das schnelle Kontaktieren wiederkehrender Strukturen ermöglicht wird. Daher besitzen die CIPT-Proben eine Matrix mit passenden Kontaktstellen für die Messarme. Die Widerstandsmessungen wurden mit dem Labornetzgerät Keithley 2401 durchgeführt. Dieses ist auf 1 A und 20 V begrenzt. Die Probe selbst wurde mittel Vakuum fixiert, um ein Verschieben zu vermeiden. Außerdem besitzt ASTRID ein Spulenpaar (4) zur Erzeugung eines Magnetfeldes. Das Magnetfeld an diesem Messsystem wurde für die durchgeführten Messungen jedoch nicht benötigt. Für Messungen im Magnetfeld dient das nachfolgend beschriebene System.

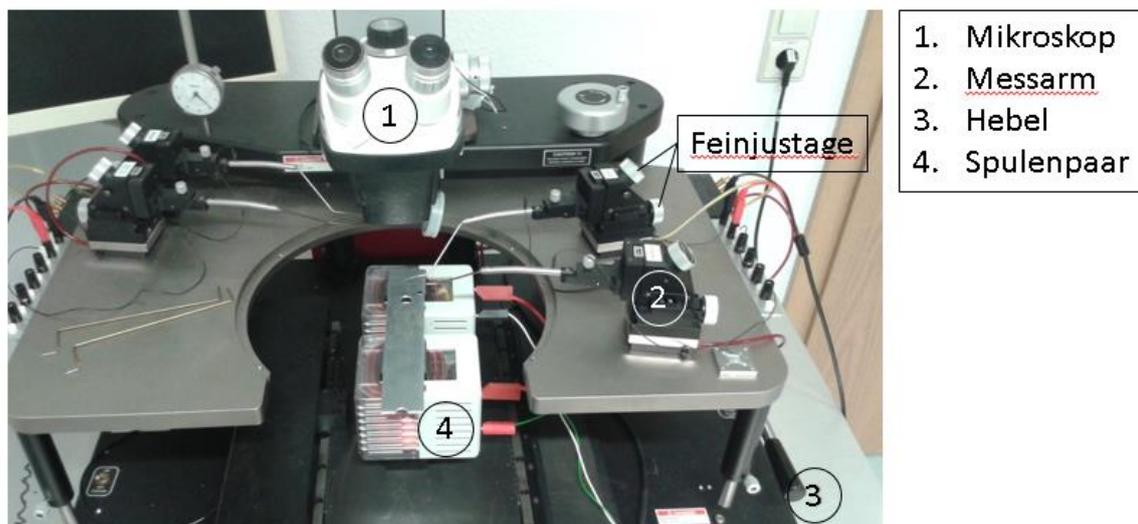
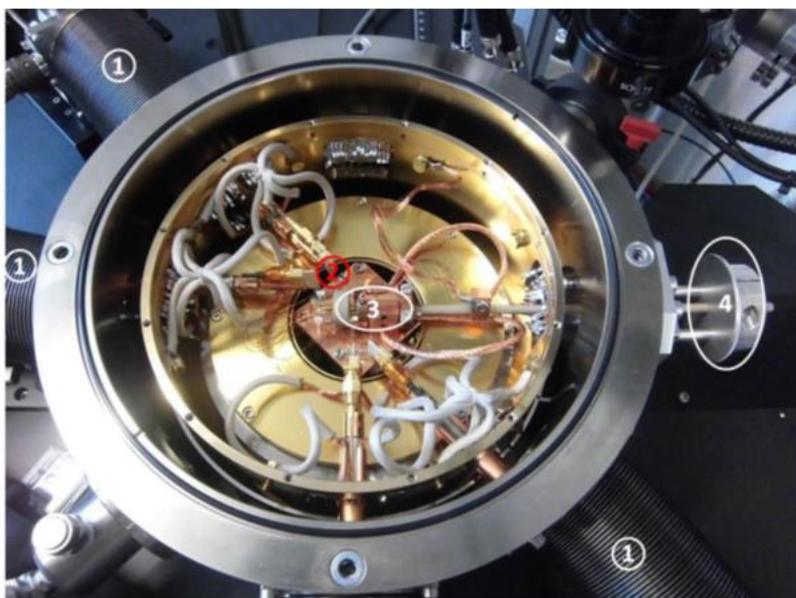


Abbildung 27 Messsystem ASTRID für Widerstandsmessungen

3.7.2 Probestation-Tieftemperatur-Widerstandsmessgerät

Die Magnetowiderstandsmessungen der GMR Designs fanden an einem Spitzenmessplatz statt. Dieser kann im Vakuum, bei tiefen Temperaturen und mit einem angelegten Magnetfeld betrieben werden. Das Kontaktieren der Probe erfolgte mit Hilfe der 4 Messarme (1), welche die Möglichkeit für Vierpunktmessungen geben, unterstützt durch ein Mikroskop. Die tiefen Temperaturen werden durch eine He Kühlung erreicht. Somit ist es möglich, eine Temperatur von 4,2 K zu erreichen, welche benötigt wird um den supraleitenden Magneten zu verwenden (max. 2,5 T). Das Magnetfeld ist dabei aus der Probestation heraus gerichtet und somit vertikal zum Boden. Durch verschiedene Probenhalter sind In-plane und Out-Of-Plane-Einstellungen des Magnetfeldes zur Probengeometrie möglich. Der In-Plane Probenhalter ermöglicht dabei die Drehung der Probe. Damit kann das Magnetfeld sowohl senkrecht zum Strom, als auch parallel dazu ausgerichtet werden. Die Anlage ist außerdem noch mit einer Heizplatte ausgestattet, welche unabhängig von der Magnettemperatur die Probe auf einer konstanten Temperatur halten kann. Die Widerstandsmessungen an der Probestation wurden mit einem Keithley 2410 durchgeführt. Dieses ist auf 1 A und 1 kV begrenzt.



1. Messarm
2. Messspitzen
3. In-Plane-Probenhalter
4. Winkeleinstellung

Abbildung 28 Probestation für Tieftemperatur Magnetowiderstandsmessungen, ohne Abdeckung (geöffnet)

4 Ergebnisse

4.1 Strom induzierter Phasenübergang

4.1.1 Elektrische Eigenschaften der Drähte

Nach der erfolgreichen Herstellung einer Probe mit Goldkontakten, wurde diese auf ihre Belastbarkeit hinsichtlich elektrischer Ströme untersucht. Hierbei wurden hohe Ströme angelegt um zu sehen, ab welcher Stromstärke die Drähte durchbrennen.

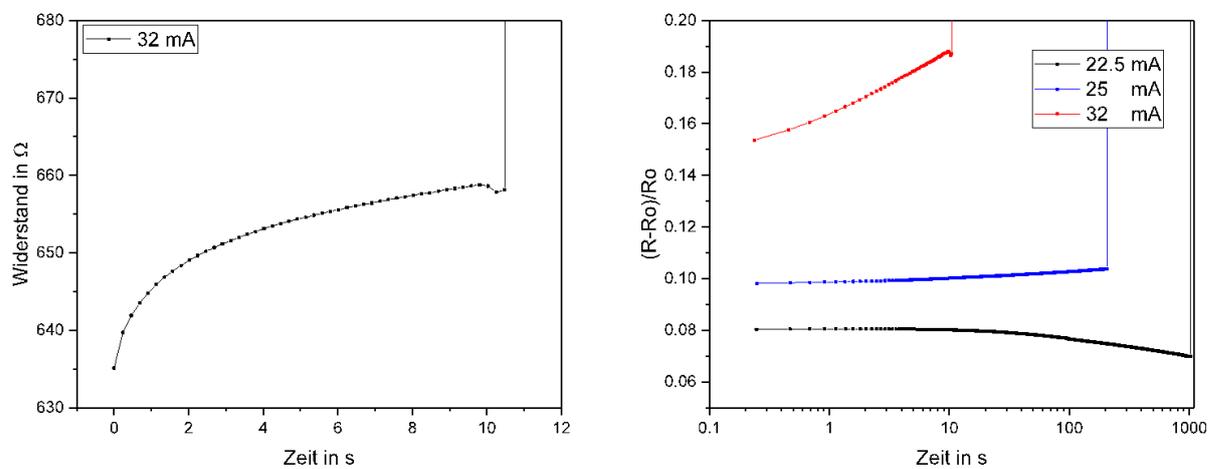


Abbildung 29 Widerstandsmessungen zur strominduzierten Zerstörung der Drähte

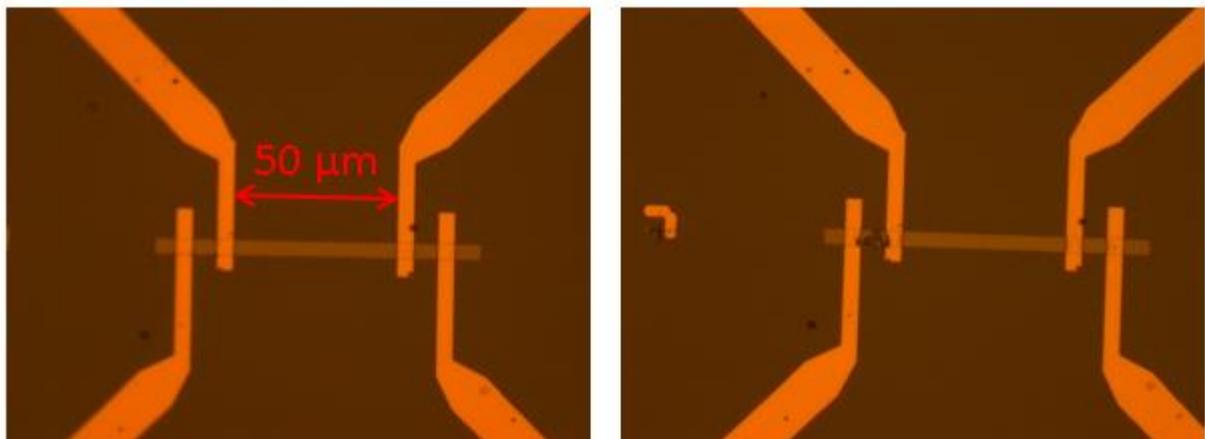


Abbildung 30 Lichtmikroskopische Bilder links vor der Zerstörung, rechts nach der Zerstörung durch einen Strom von 34 mA

In der Abbildung 29 und Abbildung 30 ist erkenntlich dass die Dauer des Stromflusses bis der Draht zerstört ist wie erwartet mit zunehmender Stromstärke abnimmt. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Schwachstelle in diesem Design der Interface-Übergang zwischen Gold, Titan und dem Draht aus der Eisen-Aluminium-Legierung ist. Dies war bei allen Drahtsystemen der Fall, die durch hohe Ströme zerstört wurden.

Bei weiterführenden Messungen wurde herausgefunden, dass die einzelnen Drahtsysteme unterschiedlich gut hohe Ströme verkraften. Dies liegt besonders am Lift-off, welcher nicht an allen Drähten gleichermaßen gut funktioniert hat, siehe Abbildung 31. Es sind hier größtenteils fehlende Strukturen zu sehen, nur im untersten Bild ließ sich ein Teil des Lackes nicht entfernen. Das Entfernen von Strukturen kann ebenfalls noch nach weiteren Lift-off Prozessen auftreten, in dem beim Ersten sich der Lack nicht vollständig gelöst hatte und sich noch teilweise an der Struktur befindet. Im Vergleich oben wurden Drähte mit sehr ähnlichen Lift-off Ergebnissen verwendet wie in der Abbildung 31 rechts zu sehen. Dennoch sind Lackreste zwischen den $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Drähten und den Kontakten nicht auszuschließen.

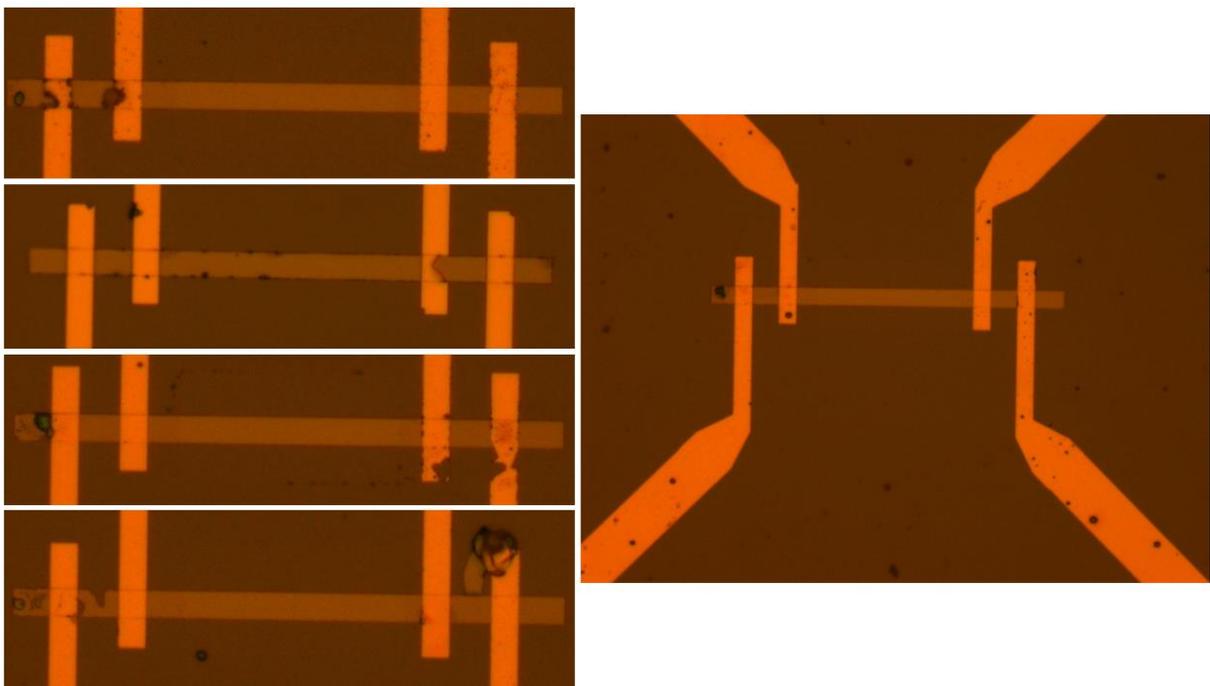


Abbildung 31 Lift-off nach der Titan-Gold-Beschichtung, mit Fehlern der Struktur (links) und einem kompletten Drahtsystem (rechts)

Trotz einiger fehlerhafter Drähte ist die Mehrzahl der Drähte sehr ähnlich und somit vergleichbar. Weiterhin hat die Änderung des Designs, die Kontaktierung mit Gold zu realisieren, anstatt alles aus $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ herzustellen (siehe Abbildung 32), einige sehr nützliche Vorteile. Dazu zählt zum Beispiel die Verringerung des Gesamtwiderstandes der Struktur. Hierdurch wurde es ermöglicht mit dem verwendeten Keithley 2401, welches eine maximale Spannung von 20 V anlegen kann, um Stromstärken von bis zu 34 mA zu erreichen.

Weiterhin entfällt die Oxidbarriere an der Oberfläche der Kontaktflächen für die Kontaktspitzen des Messaufbaus auf Grund der verwendeten Goldschicht. Dadurch wurde die vor der Messung für die sichere Kontaktierung notwendige Vorbereitungszeit stark verringert. Allerdings verlängert sich durch den weiteren Prozessschritt auch deutlich die Herstellungszeit der Proben.

Im Nachfolgenden wird gezeigt wie der Prozess zur Entfernung der Oxidbarriere erfolgte. Eine vollständig aus $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ hergestellte Struktur bildet eine dünne Schutzschicht von wenigen Nanometern aus Aluminiumoxid auf Grund der Oberflächenpassivierung.

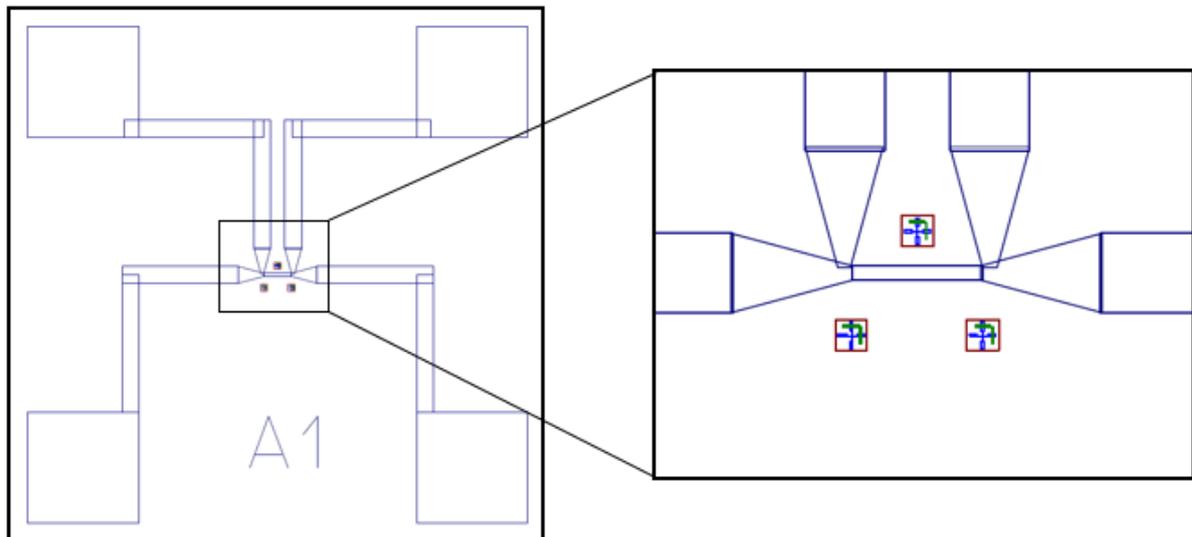


Abbildung 32 Design eines Drahtsystems dessen Struktur vollständig aus $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ besteht

Um eine stabile Widerstandsmessung durchführen zu können muss diese Schutzschicht erst einmal durchbrochen werden. Hierfür wird zu Beginn für kurze Zeit eine höhere Spannung von bis zu 10 V und einem maximalen Strom von 4 mA angelegt. Dieses in der Telekommunikation übliche Verfahren (fritten) wurde ein wenig abgeschwächt, indem der Strom nur geringfügig und Stufenweise erhöht wurde. Dies sollte einen Phasenübergang durch eine Temperatur Erhöhung verhindern. In der Abbildung 33 sieht man die Stufenweise Entfernung der Oxidschicht.

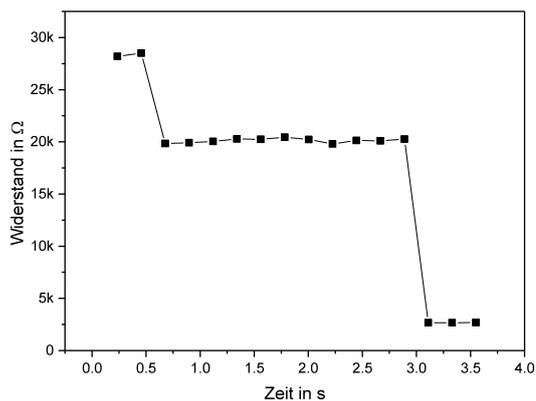


Abbildung 33 Widerstandsmessung zum Durchbrechen der Oxidbarriere mit einer Spannung von 2 V

Das Ganze erfolgte 2-5-mal für je eine Zweipunktmessung. Der Erfolg ist anhand eines konstanten Widerstandes bei gleicher Stromstärke ersichtlich. In der nachfolgenden Abbildung 34 ist die Stromrichtung für eine solche Prozedur veranschaulicht.

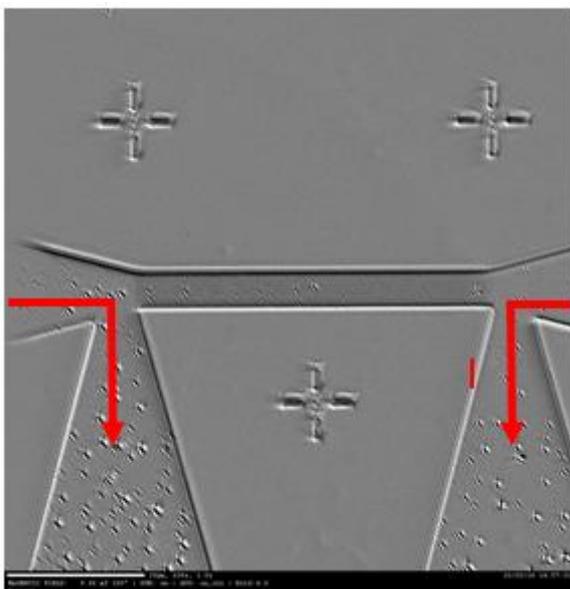


Abbildung 34 KERR-Mikroskop Bild eines $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Designs mit bestrahltem Draht, die roten Pfeile markieren den Stromfluss zum Durchbrechen der Oxidbarriere

Auch wenn der Strom nicht durch die zu untersuchende Struktur fließt so könnte doch die Wärme, verursacht durch den Stromfluss, sich bis dahin ausbreiten. Daher der Einsatz von geringen Strömen um ein Erhitzen des Drahtes und eine möglicherweise damit einhergehenden Phasenübergang auszuschließen.

Zusätzlich wurde anhand des neuen Designs mit Goldkontakten erkannt, dass es ungewollte Spannungsentladungen vom Keithley selbst gibt. Diese sind im Fall des geringeren Gesamtwiderstandes des neuen Designs stark genug um den Draht zu zerstören (siehe Abbildung 35). Solche Entladungen sind damit prinzipiell auch in der Lage eine Phasenänderung herbeizuführen, welche im alten Design ebenfalls unbemerkt auftreten könnte. Um diesen Effekt auszuschließen wurden in der Folge alle Kontaktspitzen geerdet und erst wenn diese sich auf den jeweiligen Kontaktflächen befanden, wurde die Erdung entfernt. Anschließend kann die Widerstandsmessung begonnen werden.



Abbildung 35 Lichtmikroskopisches Bild nach einer Spannungsentladung des Keithleys an der Messstation ASTRID

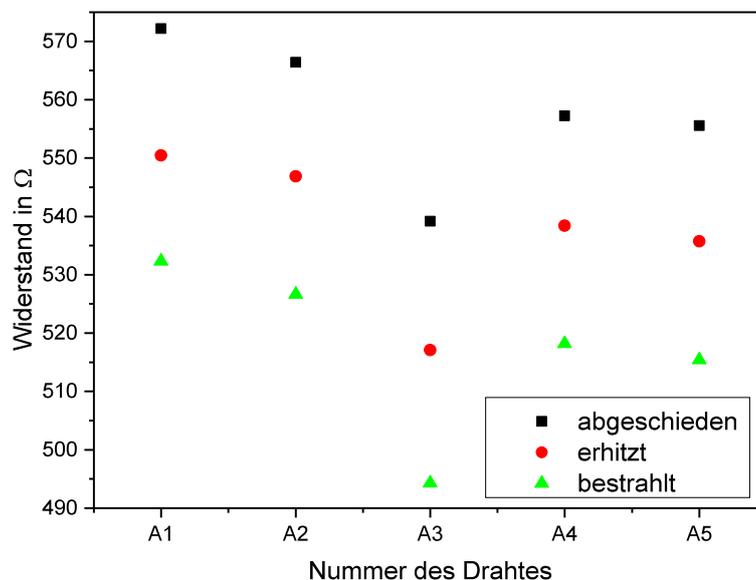


Abbildung 36 Vergleich der Widerstände von 5 Fe₆₀Al₄₀ Drähten für 3 verschiedene Zustände

In der Abbildung 36 sind die unterschiedlichen Widerstände von fünf verschiedenen Drähten für ihre jeweiligen magnetischen Zustände dargestellt. Die hier verwendete Probe bestand dabei komplett aus $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$, sowohl Draht als auch Kontakte. Dabei ist ersichtlich, dass der Widerstand sowohl vom abgeschiedenen zum erhitzten Draht, als auch vom erhitzten zum bestrahlten Draht sinkt. Erklären lässt sich das dadurch, dass die abgeschiedenen Drähte in einer Mischphase vorliegen, das heißt sowohl die A2- als auch die B2-Phase vorhanden sind. Es wird auf Grund von früheren Messungen erwartet, dass die A2-Phase einen geringeren und die B2-Phase einen höheren Widerstand aufweist. Die Mischphase hat daher vor allem auf Grund von Abscheidungsdefekten einen hohen Widerstand. Durch Erhitzen wird dieser dann in der paramagnetischen B2 Phase geringer, auf Grund des Ausheilens der Defekte bei den Drähten. Nach der Ionenbestrahlung ist der Widerstand am geringsten, was der ferromagnetischen A2-Phase des Drahtes zu zuschreiben ist.

4.1.2 Löschen der Magnetisierung

Die Untersuchung des strominduzierten Löschvorgangs der Magnetisierung wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Hierbei wurde der Magnetismus mittels magnetooptischem Kerr-Effekt untersucht und durch das Messsystem ASTRID verändert. Die Vorgehensweise entspricht dabei der im Abschnitt MOKE beschriebenen.

Entsprechend den Ergebnissen aus 4.1.1, wurden Ströme kleiner als 22,5 mA verwendet. Die hier genutzten Ströme waren 15 mA bis 20 mA, zum einen um eine vorzeitige Zerstörung des Drahtes zu vermeiden und zum anderen um einen Heizprozess zu ermöglichen, für den der Strom nicht zu niedrig gewählt werden darf.

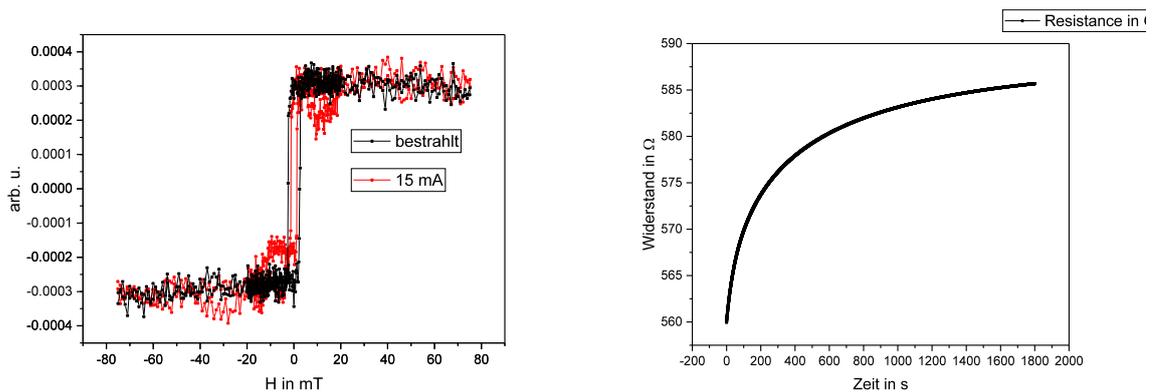


Abbildung 37 MOKE-Messung links für vor und nach 15 mA Strombehandlung und die Strombehandlung (rechts) mit 15 mA

Im Diagramm links in Abbildung 37 ist eine MOKE-Messung gezeigt. Diese zeigt keine signifikante Änderung in der Stärke des Signals. Zwischen den beiden Messungen floss ein Strom von 15 mA durch den Draht, wobei im rechten Diagramm der Widerstand des Drahtes über der Zeit aufgetragen ist. Hier ist ein abfallender Anstieg erkenntlich, der auf Grund der Erwärmung des Drahtes auftreten könnte. Die magnetische Messung zeigt, dass die Stromstärke für eine Änderung des Magnetismus bzw. der Ordnungsphase noch zu gering ist. Vermutlich wird die für eine Umsortierung der Atome notwendige kritische Temperatur noch nicht erreicht.

Aus diesem Grund wurde im Folgenden mit höheren Strömen gemessen.

In der nachfolgenden Abbildung 38 ist der Drahtwiderstand für mehrere Ströme über der Zeit aufgetragen. Jeder Kurve zeigt dabei ein Maximum im Widerstand.

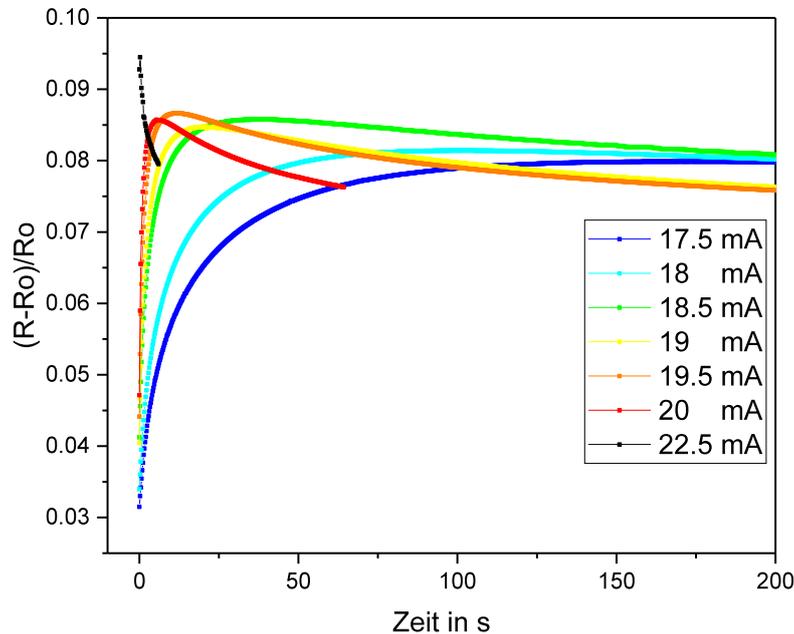


Abbildung 38 Darstellung des Widerstandsverlaufes bei verschiedene Stromstärken, für bestrahlte Drähte

Die Y-Werte wurden dabei wie folgt berechnet,

$$Y = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (9)$$

R_0 ist hierbei der Widerstand bei 0,1 mA vor dem Anlegen des eigentlichen Stromes.

R entspricht dem gemessenen Wert. Auffällig ist dass sich das Maximum mit zunehmender Stromstärke in Richtung kleiner Zeiten verschiebt. Um dies zu verdeutlichen wurden die Zeitpunkte der Maxima über der Stromstärke im unten stehenden Diagramm aufgetragen (Abbildung 39).

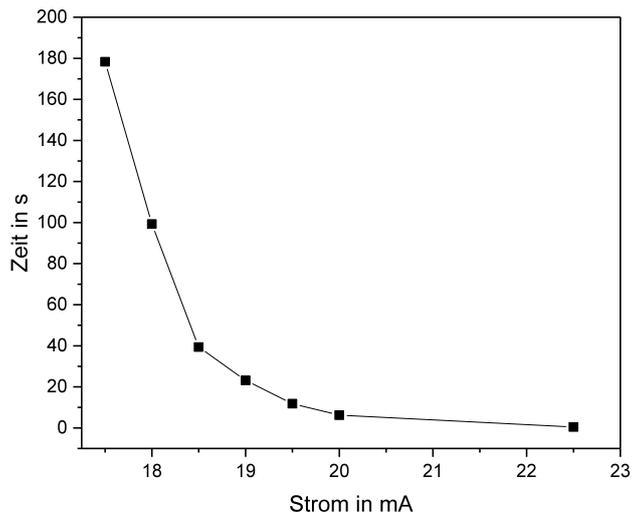


Abbildung 39 Zeitpunkt des Widerstandsmaximums in Abhängigkeit der Stromstärke

Um herauszufinden was diese Maxima bedeuten wurden MOKE Messungen vor und nach den Strommessungen an verschiedenen Drähten vorgenommen (siehe Abbildung 40).

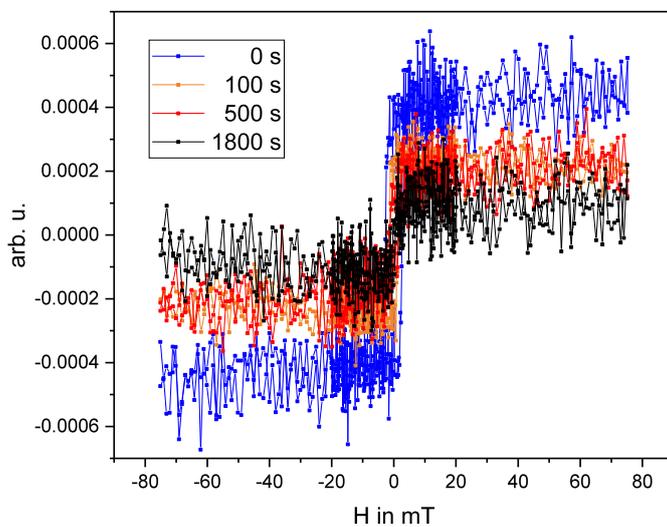


Abbildung 40 MOKE-Messung von bestrahlten Drähten, welche unterschiedlich lange einem Strom von 17.5 mA ausgesetzt waren

Hier ist erkenntlich das sich die Magnetisierung bereits vor dem Maximum, welches bei rund 180 s liegt, geändert hat. Bereits nach 100 s hat sich die Magnetisierung reduziert. Mit zunehmender Zeit wird die Magnetisierung weiter verringert. Nach 30 min, also 1800 s ist der

Sprung der Hysterese bereits genau so groß wie das Rauschen und nur nach dem Überlagern der fünf einzelnen Messschleifen zu erkennen. Hier hat sich das Signal auf ein Drittel des Ausgangssignals reduziert.

Eine Annahme zu der Entstehung des Maximums ist, dass sich sowohl die Phasenumwandlung von A2 zu B2 und das Erwärmen des Drahtes, als auch das gewöhnliche Ausheizen von Defekten überlagern. Die Phasenumwandlung verursacht eine Widerstandserhöhung, ebenso der Anstieg der Temperatur. Die Ausheilung von Defekten wiederum verringert den Widerstand. Das Maximum kann dabei den Punkt darstellen bei dem die Phasenumwandlung eine geringere Änderung verursacht als das Ausheizen von Defekten.

Auch bei höheren Strömen, wie etwa bei 20 mA ist die Verringerung der Magnetisierung deutlich zu sehen (siehe Abbildung 41). Für 20 mA wurden nur 65 Sekunden benötigt um eine deutliche Veränderung herbeizuführen, wogegen nach ungefähr derselben Zeit für 17,5 mA der Wert noch fast doppelt so groß ist. Wie erwartet wird bei höheren Strömen die Magnetisierung schneller verringert, was sich durch eine höhere Temperatur des Drahtes erklären lässt.

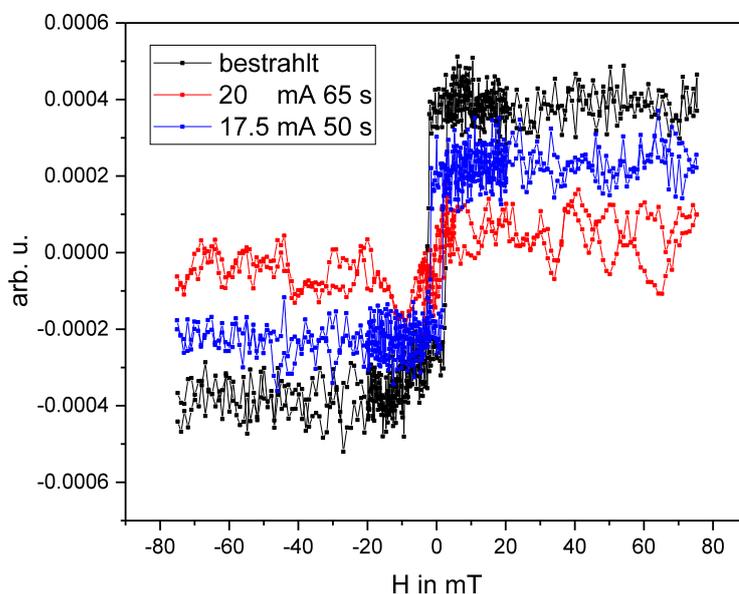


Abbildung 41 MOKE-Messung von bestrahlten Drähten, vor und nach dem Stromdurchfluss

4.2 GMR-Messung

Die GMR-Messungen wurden in der Probestation durchgeführt, bei einer Probentemperatur von etwa 20 K. GMR ist eine Abkürzung für Giant-Magneto-Resistance, zu Deutsch Riesenmagnetowiderstand. Die Probe, die hierfür hergestellt wurde, ist auf einen speziellen Probenhalter zugeschnitten, mit welchem eine in-plane Messung ermöglicht wird.

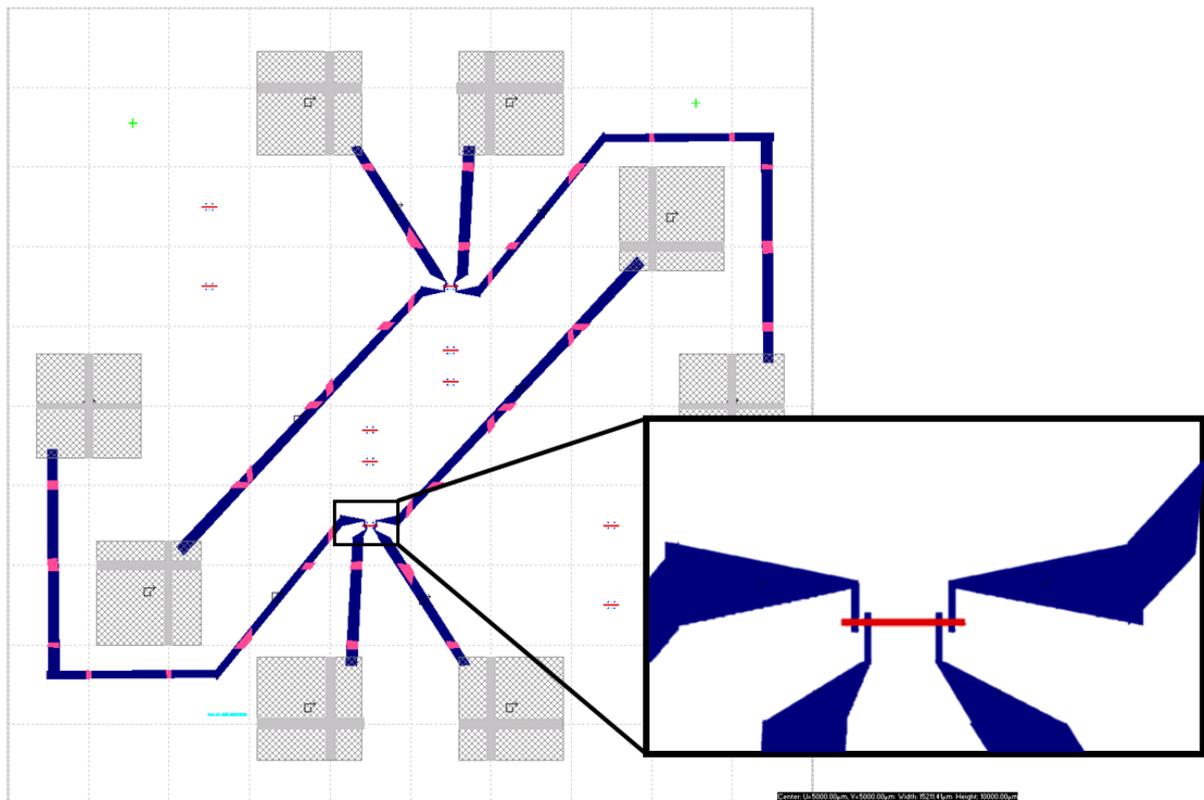


Abbildung 42 Darstellung des GMR-Designs

Das verwendete Design ist in der oben zu sehenden Abbildung 42 dargestellt. Die Kontaktflächen befinden sich hierbei an Positionen die von den beweglichen elektrischen Kontaktstiften getroffen werden. Diese werden dann mithilfe von Schraubverbindungen auf den Kontaktflächen fixiert und durch die passivierte Schutzschicht gedrückt. Dadurch wird eine Widerstandsmessung ermöglicht, ohne dass die Oxidschicht vorher mittels Fritten entfernt werden müssen.

Der hier verwendete Probendraht ist 100 µm lang, 10 µm breit und 40 nm dick. Das Material ist $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ und es wurde magnetisch in Domänen mit alternierender Breite strukturiert. Diese ferromagnetischen Domänen sind zum einen 100 nm und zum anderen 20 nm breit und werden jeweils von 50 nm breiten paramagnetischen Streifen separiert. Die ferromagnetischen Strukturen wurden mittels des Helium-Ionen-Mikroskops geschrieben. Dabei wurde eine Spannung von 20 keV und eine Dosis von $6\text{E}14 \text{ Ne/cm}^2$ verwendet.

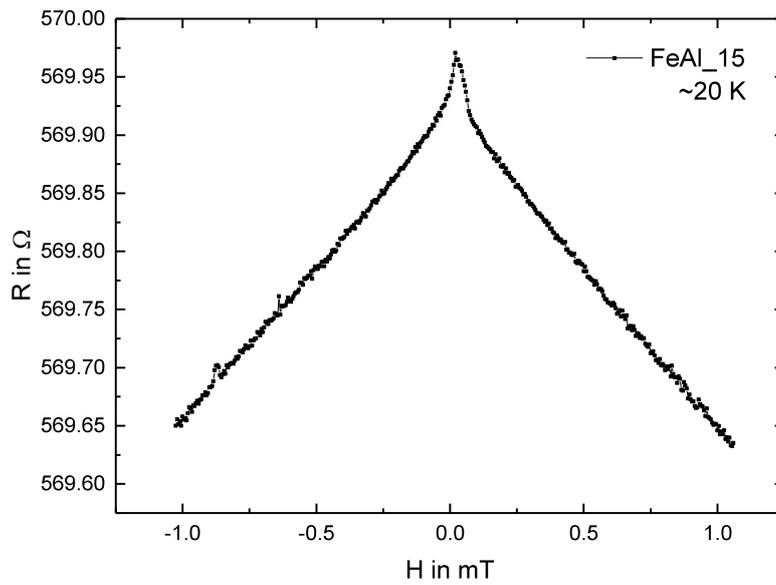


Abbildung 43 Widerstandsmessung eines strukturell bestrahlten $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Drahtes, in Abhängigkeit des angelegten Magnetfelds

In Abbildung 43 ist der Widerstand über dem extern angelegten Magnetfeld aufgetragen. Zu erkennen ist ein beständiger Abfall des Widerstandes mit zunehmendem H-Feld. Bisher liegt noch keine Theorie für dieses Phänomen vor, aber es könnte sein dass das auch bei anderen magnetischen Materialien auftritt.

Die nachfolgende Abbildung 44 zeigt eine Widerstandsschleifenmessung, von -150 mT bis 150 mT und wieder zurück. Die Widerstandsänderung ist hierbei in Prozent vom Gesamtwiderstand angegeben und der lineare Untergrund (der beständige Abfall des Widerstandes über dem Magnetfeld) wurde hierfür abgezogen.

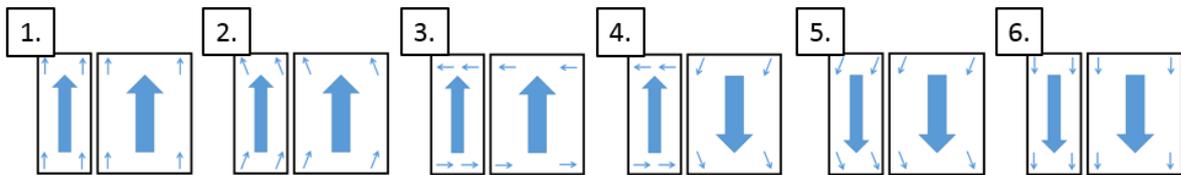
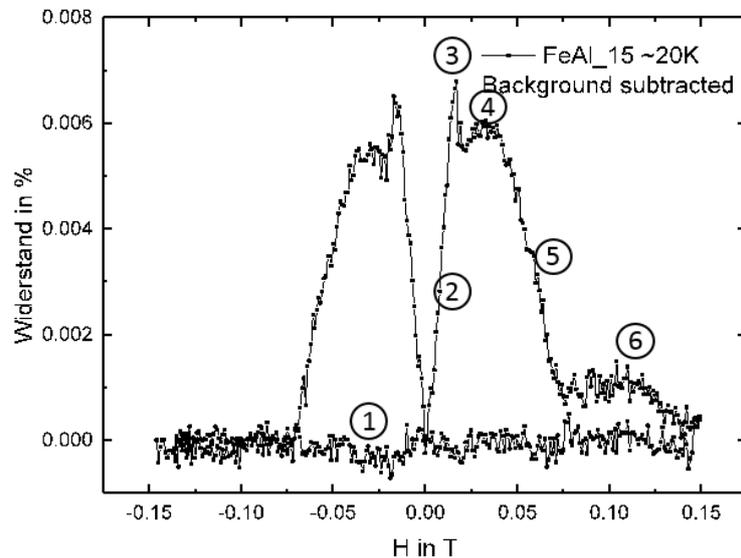


Abbildung 44 Widerstandsmessung einer bestrahlten GMR-Probe in Abhängigkeit des Magnetfeldes, mit Skizzen des Domänenverhaltens

Zu sehen sind die Widerstandsspitzen (3), an denen jeweils eine Schulter (4) angrenzt. Die Spitzen lassen sich mit dem AMR erklären. Verdeutlicht wird das in den schematischen Domänenstrukturen unter dem Diagramm. Hier wird ersichtlich das zu Beginn des Anstiegs nur am Rande der Domäne sich die Magnetisierungsrichtungen leicht drehen und somit den Widerstand erhöhen. Dies erfolgt soweit dass die Ränder in Richtung des Stromflusses zeigen und somit den vollen AMR-Effekt und den damit verbundenen höchsten Widerstand aufweisen. Der Abfall nach dem Plateau stellt die gesamte neue Ausrichtung der breiten Domänen dar. Die Schulter könnte den GMR beinhalten, welcher hier aber nur sehr klein ist und vom AMR der kleinen Domänen vermutlich überlagert wird. Gründe für die geringe Größe des möglichen GMR Effektes könnte eine zu geringe Spindiffusionslänge der B2-Phase von $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ sein, so dass der spinpolarisierte Strom bereits einen Großteil seiner Polarisation wieder verloren hat bevor die Elektronen die folgende Domäne erreichen. Eine

weitere Möglichkeit ist, dass der meiste Teil des Stromes über die Aluminium Atome fließt und dadurch magnetische Abhängigkeiten nur schwer bewiesen werden können. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, wäre das Anlegen einer höheren Stromstärke. Diese müsste bereits an einen kritischen Bereich angrenzen, um den Stromfluss über Eisenatome ebenfalls zu erzwingen und so die Magnetowiderstandseffekte verstärken. Ein anderer Weg wäre das wechseln der $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Legierung zu einer FeV Legierung, welche dieselben magnetischen Eigenschaften aufweist. Vanadium hätte hingegen aber einen höheren Widerstand als Aluminium oder Eisen. Somit wäre das eine Möglichkeit diese Theorie zu überprüfen.

Des Weiteren wurde für zukünftige Messungen untersucht, bei welcher Bestrahlungsdosis das unterschiedliche Schaltverhalten der verschieden großen magnetischen Strukturen am deutlichsten zum Vorschein kommt. Hierfür wurde die Beschleunigungsspannung auf 20 keV und 25 keV festgelegt. Auf dem $100\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ großen und 40 nm dicken Draht betragen die Breiten der zu bestrahlenden Strukturen 20 nm und 100 nm, welche im Abstand von 50 nm wiederkehrend erzeugt wurden. Zur Verdeutlichung der Struktur ist dies für vergrößerte ferromagnetische Bereiche mit Breiten von $0.5\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$ in Abbildung 45 gezeigt. Um deren unterschiedliches Schaltverhalten zu zeigen, liegt hier eine antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen vor.

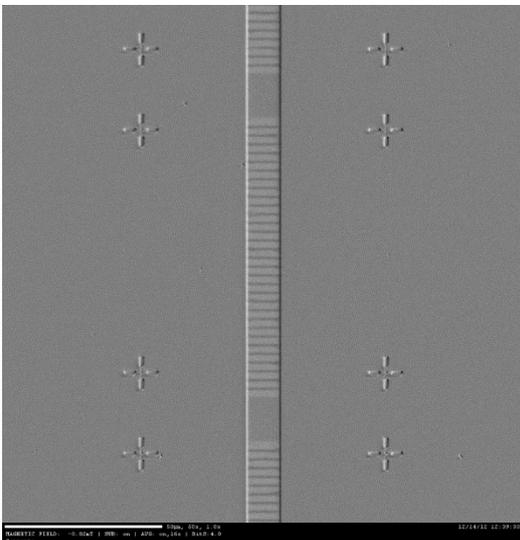
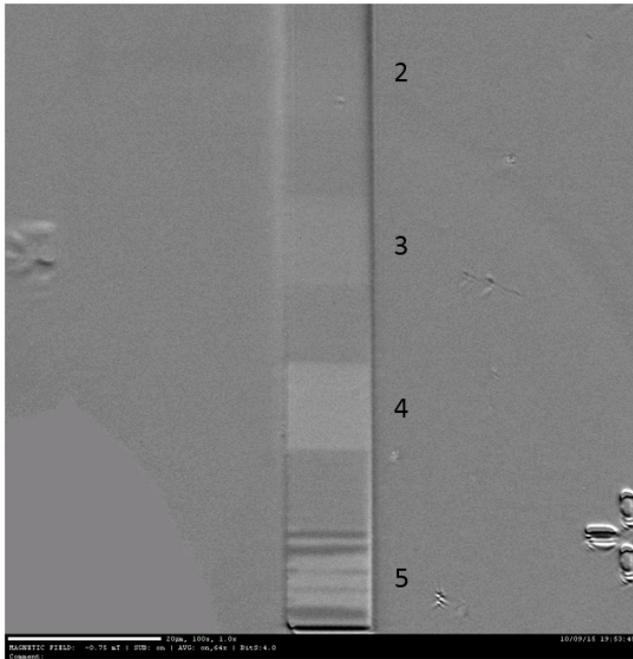


Abbildung 45 KERR-Mikroskop Bild eines $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Drahts mit ferromagnetischen Bereichen von $0.5\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$ Breite bei antiparalleler Ausrichtung der Magnetisierungen

Weiterhin wurde untersucht welche die optimale Dosis für die Bestrahlung von 40 nm dicken Drähten ist, welche eine magnetische Struktur wie oben beschrieben aufweisen sollen. Dafür

wurden auf einem Draht mehrere 10 µm große Abschnitte mit verschiedenen Dosen strukturiert bestrahlt.



Ferro: 100 nm/ 20 nm
Para: 50 nm
Draht: 100 µm x 10 µm x 40 nm

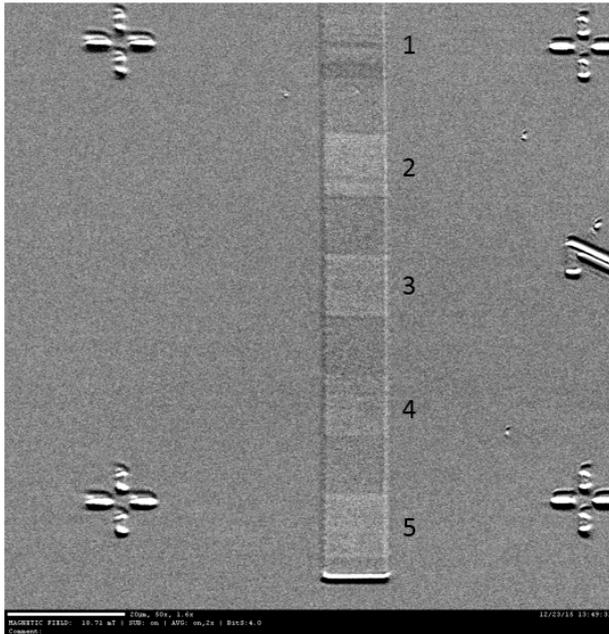
Abstand zwischen den Dosistests
auf dem Draht: 10µm

Dosis über 10 µm strukturiert bei 25 keV
gelistet von oben nach unten

Dosis 1: 1E13 Ne/cm²
Dosis 2: 6E13 Ne/cm²
Dosis 3: 1E14 Ne/cm²
Dosis 4: 6E14 Ne/cm²
Dosis 5: 1E15 Ne/cm²
2 µm paramagnetisch

Abbildung 46 KERR-Mikroskopische Abbildung der strukturierten Bestrahlung eines Fe₆₀Al₄₀-Streifens mit Ne-Ionen bei 25 keV für verschiedene Dosen

Diese Strukturen wurden mit verschiedenen Dosen im HIM geschrieben. Hierbei wurden Dosen von 1E13 Ne/cm² bis 1E15 Ne/cm² mit 20 keV und mit 25 keV Beschleunigungsspannung untersucht. Die anschließende Untersuchung des magnetischen Verhaltens erfolgte im KERR-Mikroskop. Es ist erkenntlich (siehe Abbildung 46), dass unterhalb einer Dosis von 1E14 Neon/cm² bei einer Beschleunigungsspannung von 25 keV kein Unterschied zu den paramagnetischen Bereichen zu erkennen ist, welche sowohl dem Substrat in der Umgebung als auch den 10 µm Abständen zwischen den einzelnen Dosistests entsprechen. Das beste Ergebnis erzielte bei 25 keV Beschleunigungsspannung die Dosis von 6E14 Ne/cm². Derselbe Prozess wurde ebenfalls mit 20 keV Beschleunigungsspannung durchgeführt (siehe Abbildung 47). Hier wurden jedoch Dosen unter 1E14 ausgelassen, da diese bereits bei höherer Spannung keinen Ferromagnetismus im Ergebnis erkennen ließen.



Ferro: 100 nm/ 20 nm
Para: 50 nm
Draht: 100 μm x 10 μm x 40 nm

Abstand zwischen den Dosistests
auf dem Draht: 10 μm

Dosis über 10 μm strukturiert bei 20 keV
gelistet von oben nach unten

Dosis 1: 1E14 Ne/cm²

Dosis 2: 3E14 Ne/cm²

Dosis 3: 6E14 Ne/cm²

Dosis 4: 9E14 Ne/cm²

Dosis 5: 6E14 Ne/cm² 100 nm paramagnetisch
2 μm paramagnetisch

Abbildung 47 KERR-Mikroskopische Abbildung der strukturierten Bestrahlung eines Fe₆₀Al₄₀-Streifens mit Ne-Ionen bei 20 keV für verschiedene Dosen

Vielmehr wurde hier das Hauptaugenmerk auf die Dosis 6E14 Ne/cm² gelegt, bei welcher auch 2 verschiedene Abstände der ferromagnetischen Strukturen zueinander verwendet wurden: Zum einen 50 nm wie zuvor, zum anderen 100 nm. Alle Dosen führten zu einem deutlich erkennbaren Ferromagnetismus.

Um eine besser geeignete Dosis herauszufinden wurde danach das Schaltverhalten im KERR-Mikroskop untersucht. Auf Grund der Formanisotropie sollten die beiden unterschiedlich großen ferromagnetischen Strukturen ihre Magnetisierungsrichtung bei verschiedenen Magnetfeldern ändern.

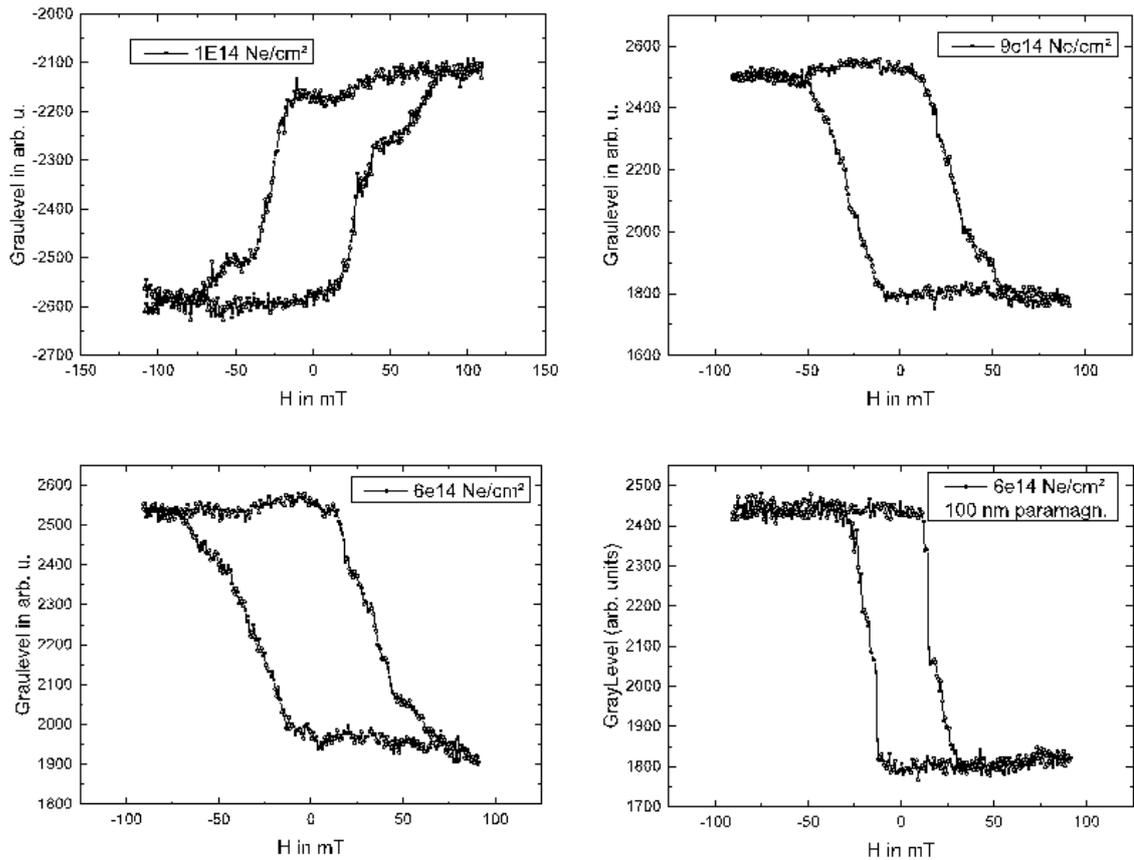


Abbildung 48 Hysteresen der verschiedenen bestrahlten Abschnitte

Der Magnetismus wird dabei wie schon in den vorherigen Bildern zu sehen in verschiedenen Graustufen angegeben. Hier ist zu erkennen, dass die deutlichste Stufe (entsprechend einem separaten Schalten der verschiedenen breiten Bereiche), bei einer Dosis von $1E14 \text{ Ne/cm}^2$ auftritt. Die Stufe tritt nicht mittig zur Y-Achse auf, weil die Flächen der beiden alternierenden magnetischen Bereiche unterschiedlich groß sind. Es ist also ersichtlich, dass für ein besseres Ergebnis eine Bestrahlung bei 20 keV und einer Dosis von $1E14 \text{ Ne/cm}^2$ genutzt werden sollte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Herstellung von Mikrostrukturen zur Untersuchung des Magnetismus an dünnen $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Drähten und dessen strominduzierte Änderungen gezeigt. Des Weiteren wurde eine laterale GMR-Teststruktur elektrisch charakterisiert, bei der die magnetische Strukturierung mittels HIM erfolgte.

Zunächst konnte gezeigt werden, dass sich $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Schichten mit der gewünschten Dicke sputtern lassen. Die magnetischen Eigenschaften wurden hierbei mittels Ausheizen (paramagnetisch) und durch Ionenbestrahlung (ferromagnetisch) eingestellt. Mit Hilfe von EBL konnten die magnetischen Bereiche festgelegt werden, sowie mit dem HIM die magnetische Strukturierung weiter verkleinert werden.

Die Proben für die strominduzierte Phasenumwandlung wurden nach anfänglicher Nutzung des alleinigen Materials $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$, anschließend in einem Zweischritt Lithografieprozess hergestellt unter Verwendung von Goldkontakten. Dabei wurden die $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Drähte dann mit Hilfe eines dritten Lithografieschrittes bestrahlt und die bestrahlten Bereiche ($40\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$) mittels MOKE vermessen. Die strominduzierte Änderung der Magnetisierung wurde realisiert und somit eine Phasenumwandlung des Drahtes vollzogen. Für einen einfacheren Herstellungsprozess dieses Designs sollte ebenfalls das HIM für die Ionenbestrahlung verwendet werden. Somit würde ein zusätzliches Ausheizen der Probe überflüssig werden, da auf Grund der geringeren verwendeten Temperatur beim Aushärten des Lacks der Lithografieschritt erschwert wird.

Weiterhin wurden GMR-Teststrukturen der bereits existierenden Herstellungsmethode mit dem HIM modifiziert. Hierdurch wurden ferromagnetische Streifenbreiten von rund 20 nm und paramagnetische Trennbereiche um 50 nm erreicht. Die elektrische Charakterisierung erfolgte mittels hochsensitiver Transportmessungen im Tieftemperaturbereich, unter Nutzung einer Helium-Kühlung. Diese Messungen erlaubten eine Interpretation des magnetischen Umkehrprozesses, bei welcher der AMR gezeigt werden konnte und Anzeichen für einen vermutlich vorliegenden GMR gefunden wurden. Weiterhin wurden Messungen magnetischer Strukturen mit verschiedenen Ionenstrahlparametern vorgenommen, mit dem Ziel für kommende Proben bessere Ergebnisse zu erreichen.

Um die Herstellung $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Proben mit mehreren Lithografieschritten zu verbessern, sollte nachdem Lift-off der Legierung ein Sauerstoffplasma für wenige Minuten verwendet werden, um Lackreste auf den $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Strukturen gänzlich zu entfernen. Auf Grund der passivierten Aluminiumoxidschicht der Legierung hat dies keinen Einfluss auf das Material.

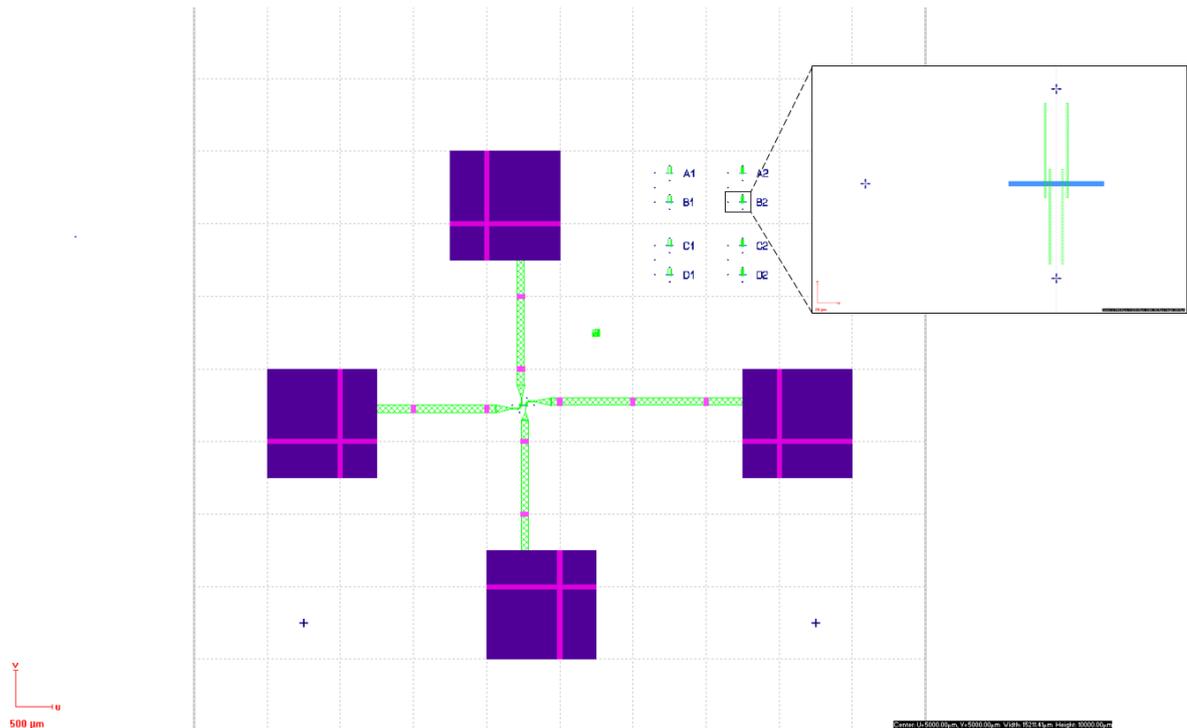


Abbildung 49 Design für die KERR-Mikroskop in-situ Messung mit großen Kontaktflächen und rechts oben mit Strukturen für die HIM in-situ Messung

Nachdem eine Phasenänderung mittels Strom erreicht wurde. Wäre ein nächstes Konzept, während dieses Überganges die magnetischen Eigenschaften zu messen. Die Weiterführung dieser Idee zeigt sich in einem bereits konzipierten Design (Abbildung 49) für KERR-Mikroskopie Messungen während des strominduzierten Phasenüberganges, siehe Abbildung 49. Hierfür wird, während Strom angelegt wird, die Probe mittels KERR-Mikroskop auf ihre magnetischen Eigenschaften untersucht. Dafür muss die Probe nur an einen dafür ausgelegten Probenhalter kontaktiert werden, in dem Drähte durch Silberleitlack sowohl an der Probe (den großen Kontaktflächen), als auch an den Probenhalter befestigt werden (Wirebonding).

Angesichts des Erreichens eines Phasenüberganges von ferromagnetisch zu paramagnetisch, wäre es von Vorteil diesen wieder umkehren zu können ohne auf eine Ionenbestrahlung angewiesen zu sein, damit eine Integration in elektrische Bauelemente gewährleistet werden könnte. Eine weitere Idee ist diesen umgekehrten Übergang mittels ultrakurzer elektrischer Pulse mit hohen Amplituden zu erreichen. Die geordneten Strukturen des paramagnetischen $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Drahtes sollten mittels Elektromigration wieder in Unordnung versetzt werden können. Hierfür ist möglicherweise auch ein schnelles pulsgesteuertes Wechselfeld mit ausreichend Strom vonnöten, außerdem ein neues Design mit niedrigem elektrischem Widerstand um ausreichend schnelle und starke Pulse zu ermöglichen.

Abgesehen davon wurden Proben für HIM-in-situ Messungen entwickelt um den Widerstand während des Ionenbestrahlens messen zu können, wie in Abbildung 50 zu sehen. Dies ist Dank der internen Messspitzen im HIM möglich. Diese können nanometergenau verschoben werden und benötigen nur sehr geringe Kontaktflächen von rund 0,5 µm Breite. Beide Designs wurden für erste Testmessungen auf einer Probe vereint um die Prozessierung und HIM-Strahlzeit so gering wie möglich zu halten, siehe Abbildung 49.

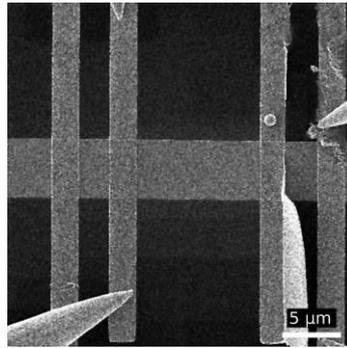


Abbildung 50 HIM Bild der vier Goldstreifen für die Kontaktierung auf dem $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Draht mit Kontaktspitzen des HIM

Für das GMR-Element sind wie in Kapitel 4.2 bereits erwähnt keine erheblichen Riesenmagnetowiderstandseffekte zu erkennen und die gemessenen Widerstandseffekte sind relativ klein. Ein Grund hierfür könnte sein, dass der größte Teil des Stromes über die Aluminiumatome fließt. Hierfür könnten ähnliche Eisenlegierungen mit A2- und B2-Phase eine Alternative bieten. Beispiele hierfür wären FeRh, welches eine ferromagnetische und eine antiferromagnetische Phase besitzt oder FeV, welches ähnlich wie $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ eine ferromagnetische und eine paramagnetische Phase zeigt. Der Vorteil von Vanadium ist, dass dessen elektrischer Widerstand höher wäre als der von Aluminium und auch der von Eisen. Somit wäre der Stromfluss über die Eisen-Atome begünstigt.

Weiterhin könnte die Entfernung zwischen den ferromagnetischen Bereichen zu groß sein, so dass sich hier die Spinpolarisation des Stromes wieder aufhebt und dadurch kein Effekt zu erkennen ist. Um dies zu überprüfen ist ein vertikales TMR-Element mit einer $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ Legierung als Strompolarisator mit nur einer 1 bis maximal 3 nm dicken Tunnelschicht in Bearbeitung.

Insgesamt wurden in dieser Arbeit wichtige neue Erkenntnisse betreffend den Einsatz von $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ in möglichen lateralen spintronischen Bauelementen gewonnen. Abschließend wurden Empfehlungen für die weitere Erforschung des Themas erarbeitet.

6 Literaturverzeichnis

- [1] J.M.D.Coye, Magnetism and magnetic materials, Cambridge University Press, 2010.
- [2] B. Mahon, The Man Who Changed Everything The Life of James Clerk Maxwell, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- [3] B. u. Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 6 Festkörper 2. Auflage, 2005.
- [4] G. Krautheim, *Vorlesungsskript Festkörperphysik*, WHZ, 2012.
- [5] Schäfer und Bergmann, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 6 Festkörper 2. Auflage, 2005.
- [6] C. Weißmantel und C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, 1979.
- [7] H.-D. K. u. J. S. H. J. Eichler, Das Neue Physikalische Grundpraktikum, Springer, 2001.
- [8] J. Nickel, „Magnetoresistance Overview,“ Computer Peripherals Laboratory, 1995.
- [9] M.Baibich, „Giant Magneto Resistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices,“ *Physical Review Letters*, 1988.
- [10] P. F. S. W. Z. G.Binasch, „Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange,“ *Physical Review*, 1988.
- [11] T. K. a. K. T. Hiroyuki Narisawa, „Current perpendicular to film plane type giant magnetoresistance effect using a Ag-Mg spacer and Co₁₀Fe₂Mn₃Si Heusler alloy electrodes,“ *Applied Physics Express*, 2015.
- [12] S.Tumanski, Thin Film Magnetoresistive Sensors, IOP Publishing Ltd, 2001.
- [13] [Online]. Available: <https://th.fhi-berlin.mpg.de/th/lectures/TFK-Sem-2001/gmr/sld006.htm>.
- [14] E. M. e. al., „Two-fold origin of the deformation-induced ferromagnetism in bulk Fe₆₀Al₄₀ (at.%) alloys,“ *New Journal of Physics*, 2008.
- [15] W. M. V. B. u. K. H. L. Hammer, „Equilibration processes in surfaces of the binary alloy Fe-Al,“ *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002.
- [16] J. Heintze und P. Bock, Lehrbuch zur Experimentalphysik, Bd. 3: Elektrizität und Magnetismus, Springer Spektrum, 2016.
- [17] Kiyotaka Wasa, Isaku Kanno, Hidetoshi Kotera, Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nanomaterials, and MEMS, Elsevier Inc., 2012.

- [18] M. Berginski, Lichtstreuende Oberflächen, Schichten und Schichtsysteme zur Verbesserung der Lichteinkopplung in Silizium- Dünnschichtsolatzellen, Forschungszentrum Jülich, 2008.
- [19] K. S. Harsha, Principles of Vapor Deposition of Thin Films, Elsevier Ltd., 2006.
- [20] G. T. R. S. H. B. C. G. Lothar Spieß, Moderne Röntgenbeugung: Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker, Bd. 2, Wiesbaden: Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2009, pp. 453 - 463.
- [21] P. D. U. Hartmann, *Versuch: Elektronenstrahlolithographie*, Universität des Saarlandes.
- [22] G. Wiederrecht, Handbook of Nanofabrication, Elsevier, 2010.
- [23] „<http://winfuture.de/news,86599.html>,“ IBM, Fujifilm, 10 April 2015. [Online]. [Zugriff am 5 April 2016].
- [24] „<http://www.spektrum.de/news/daten-erobern-die-dritte-dimension/1342375>,“ 21 April 2015. [Online]. [Zugriff am 5 April 2015].
- [25] H. S. Nalwa, Handbook of Thin Film Materials, 2002.
- [26] S. Foner, „Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer,“ *Review of Scientific Instruments*, 15 Januar 1959.
- [27] T. u. K. S. Mitani, „Fe/MgO/FeCo(00) epitaxial magnetic tunnel junctions prepared by using in situ plasma oxidation,“ *Journal of Applied Physics*, 2003.
- [28] „HZDR-Instrumentelle Ausstattung und Geräte,“ HZDR, 19 11 2015. [Online]. Available: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=2667>. [Zugriff am 05 01 2018].
- [29] H. B. Horst Steffen, Elektrotechnik Grundlagen, Bd. 6, 2007, pp. 142-144.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere außerdem, dass ich keine andere als die angegebene Literatur verwendet habe. Diese Versicherung bezieht sich auch auf alle in der Arbeit enthaltenen Zeichnungen, Skizzen, bildlichen Darstellungen und dergleichen. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Zwickau den 16.01.2018

Vico Liersch