

# DAAD-Rise Erfahrungsbericht: Spin Pumping an ICMAB, Alba und der Universität von Barcelona

Peter Manshausen

August 2018

## 1 Einleitung

Im Herbst 2017 bewarb ich mich zum zweiten Mal für das DAAD RISE Programm, nachdem ich im Sommer davor sechs Wochen in St Andrews an der Computermodellierung von Lichtausbreitung gearbeitet hatte. Dieses Mal bekam ich die Zusage für ein Projekt am Institut für Materialwissenschaften in Barcelona (ICMAB) unter Anleitung von Ferran Macià, bei dem ich mich mit Spin Pumping und Spinwellen befasste und dazu Experimente mit den Methoden der Ferromagnetischen Resonanz (FMR) und des Röntgendiffraktions (XMCD) an neuartigen, magnetischen und nichtmagnetischen Materialien machte. Dieses Projekt verband Inhalte, die ich im sechsten Semester in Festkörperphysik behandelt hatte mit Elementen der Quantenmechanik und ich lernte viel über experimentelle Methoden und Datenanalyse. Aber auch der nicht-fachliche Teil dieses Sommerpraktikums war sehr lohnend und ich kann eine Bewerbung bei RISE im Allgemeinen und am ICMAB im Besonderen herzlich weiterempfehlen.

## 2 Vorbereitung und Organisation

Sehr wichtig ist die frühzeitige Suche nach einer Wohnung in Barcelona, da der Markt sehr angespannt ist. Fündig wird man bei Webseiten wie pisocompartido.com, idealista.es und uniplaces.com. Zu beachten ist, dass Zimmer in Barcelona nicht unbedingt ein Fenster nach draußen haben. Außerdem ist es ein sehr großer Vorteil, eine Klimaanlage in der Wohnung zu haben. Ich habe mich entschieden, trotz der Lage des Instituts in Bellaterra auf dem Campus der Universität Autònoma, nach einem Zimmer in Barcelona selbst zu suchen und mit dem Zug täglich zu pendeln (etwa 40 min). Dazu hatte ich das Glück, ein Zimmer ganz in der Nähe der Plaça Catalunya und damit mitten im Zentrum und direkt an einer der sogenannten Ferrocarril-Stationen (Züge der katalanischen Generalitat) zu finden. Für das Zimmer in der Wohnung, die ich mit dem Vermieter und zwei anderen teilte, zahlte ich €420 im Monat.

Was die Anreise betrifft ist Barcelonas Flughafen natürlich bestens angebunden. Wer nicht fliegen möchte hat aber die Möglichkeit, beispielsweise in zwei Tagen mit einem Stopp in Paris sehr bequem nach Barcelona zu kommen. Paris erreicht man aus dem Westen Deutschlands von den Großstädten in ca. vier Stunden und die Strecke Paris-Barcelona dauert im TGV nur 6h30. So bin ich nach Barcelona angereist, für die Rückfahrt kaufte ich ein Interrail-Ticket (5 aus 15 Tagen für €200) und legte noch einige Zwischenstopps in Frankreich ein.

### 3 Barcelona und Umgebung

Barcelona ist eine wunderschöne Stadt und bietet definitiv genügend Sehenswürdigkeiten um einen einige Wochenenden lang zu beschäftigen. Besonders zu erwähnen sind die Gebäude Gaudís (Sagrada Família, Parque Güell, la Pedrera. . .), die Festung von Montjuïc und die Bunker nördlich des Hipster-Viertels Gràcia für tolle Aussichten über die Stadt, sowie die hübschen Stadtviertel mit unzähligen Bars und Restaurants (einige Tipps: die Tapasbar Nou Can Codina und die Weinbar Salvatge in Gràcia, Bar und Café El Jardí im Raval, die vielen Pinxtos-Bars der Calle Blai im Poble Sec, der schicke Food Court El Nacional am Passeig de Gràcia, die Skybar des Iberostar-Hotels an der Plaça Catalunya für den Sonnenuntergang oder die Mondfinsternis sowie die Skate-Bar Nevermind, die günstige und bei Einheimischen beliebte Bar Oveja negra und das vegane Restaurant Veggie Garden im Raval). Außerdem gibt es die Stadtstrände, die man sehr gut nach der Arbeit zwischen 17h und 20h besuchen kann. Zum Wandern bietet sich die Region um Montserrat an, eine Stunde mit dem Zug R5 von der Pl. de Espanya. Um abgesehen von der Arbeitsgruppe und evtl. der WG einige soziale Kontakte zu bekommen kann man Couchsurfing Hangouts benutzen oder zu den vielen Couchsurfing Events gehen, bei denen man mit Einheimischen und Reisenden die Stadt erkunden kann.

## 4 Fachlicher Teil – Overview of Experiments and Analysis

### 4.1 Introduction

During my internship, I conducted my own measurements of FMR in the magnetism lab of the University of Barcelona and was part of the measurements done by the group of my supervisor Ferran Macià at the Alba synchrotron. Here, I will focus on the FMR-experiments I did myself and explain the Alba-measurements only briefly. To make this overview accessible to the research group for further internships or other projects, I have decided to write this part of my report in English.

## 4.2 Theoretical Background

In a magnetic field, magnetic moments will tend to line up with the field, thus reducing their magnetostatic energy. In a perfect system, the temporal evolution of a non-equilibrium magnetization  $\mathbf{M}$  is described by:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\mu_0\gamma\mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

where  $\mu_0$  is the magnetic constant and  $\gamma$  the gyromagnetic ratio. This situation is classically analogous to a spinning top of angular momentum  $\mathbf{L}$  (takes the role of the magnetization), which is not completely upright, under the influence of the torque exerted by gravity (takes the role of  $\mathbf{H}$ ). But, like a spinning top, in a real magnetic system, a phenomenological damping term is added to the equation of motion to take into account dissipation of magnetic moment direction. This gives the so-called Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\mu_0\gamma\mathbf{M} \times \mathbf{H} + \frac{\alpha}{M_s}(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}) \quad (2)$$

Here,  $M_s$  is the saturation magnetization and  $\alpha$  the dimensionless Gilbert damping parameter. This, like equation 1 describes a movement with a circular precession component. The precession frequency in the case of a thin film sample is given by:

$$f_0 = \frac{\mu_0\gamma}{2\pi} \sqrt{\mathbf{H}(\mathbf{H} + \mathbf{M})} \quad (3)$$

If now we send an excitation at this frequency into the sample, for example in the form of an electromagnetic (microwave) signal, then the magnetization will be excited to precess around its preferred axis. Turning this around, it is possible to send a specific frequency into the material and to vary the field, measuring the transmission amplitude. This is the concept of Ferromagnetic Resonance (FMR). In this project, we were interested in the differences of damping between materials. Some materials show a phenomenon known as spin pumping: conduction of spins away from the excited magnetic material, for example into a non-ferromagnetic layer. The stronger the spin pumping of a material, the higher the damping parameter  $\alpha$ . This can be measured indirectly by means of the absorption peak linewidth which is described theoretically as:

$$\Delta H = \Delta H_0 + \frac{2\pi\alpha}{\gamma} f \quad (4)$$

Comparing the dependence of the linewidth on the frequency of different materials, we find which materials or which combinations thereof are good spin conductors.

## 4.3 Measurements

We conducted measurements of FMR on a coplanar waveguide, connected to a Vector Network Analyzer (VNA) sending a microwave input signal and measuring the transmission on the other side of the sample on the waveguide. Both

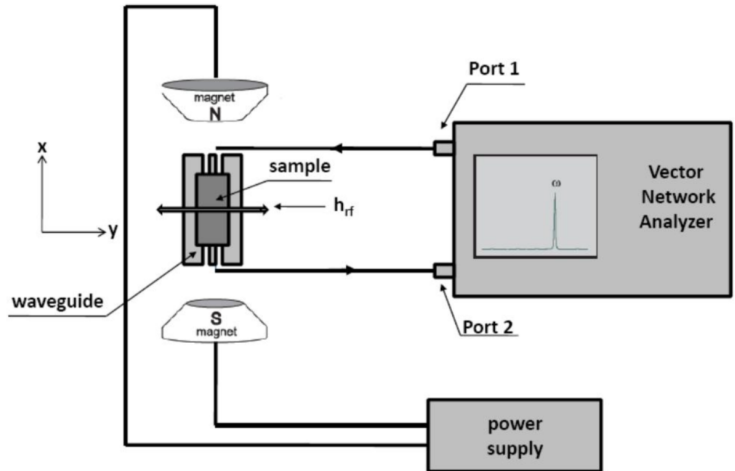


Figure 1: Our experimental FMR setup at University of Barcelona

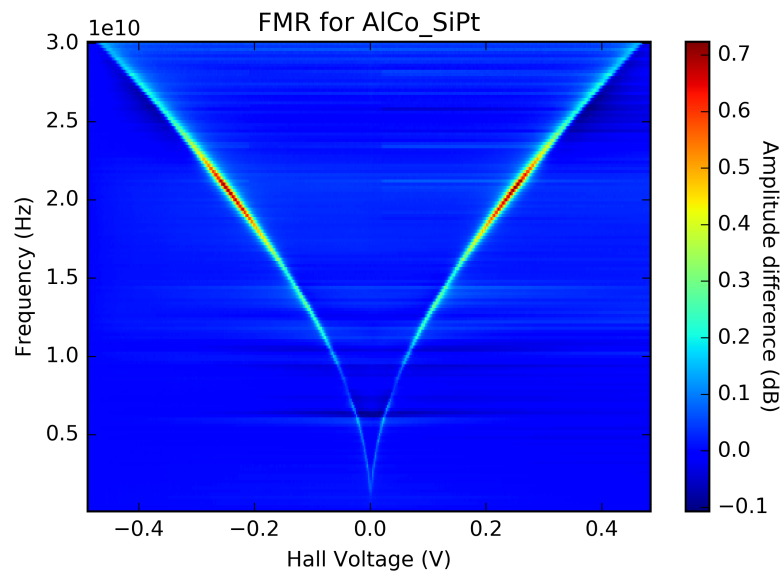


Figure 2: A typical result of an FMR measurement, here for a sample with a 20nm layer of Cobalt separated from a layer of Silicon and Platinum by a thin (5nm) layer of Aluminum. The colour shows the amplitude of the transmitted signal divided by the input signal in dB as a function of frequency and field.

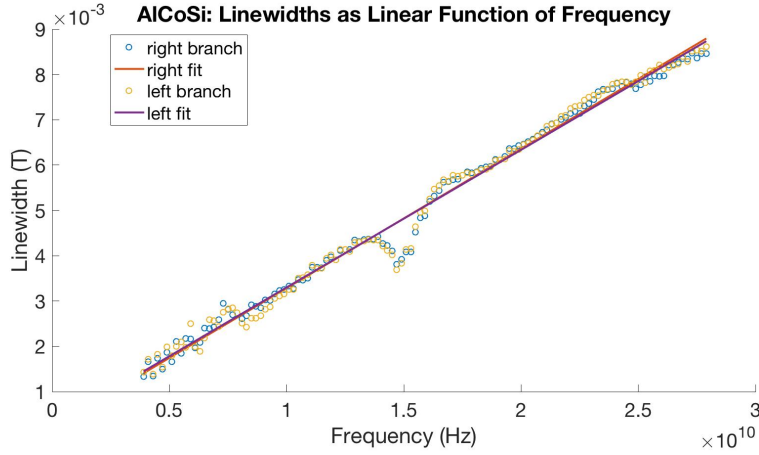


Figure 3: An example of the linewidths as a function of frequency for the AlCo-Si sample. Right and left branch refer to positive and negative fields, respectively.

the waveguide and the sample are placed in the magnetic field of Helmholtz coils. The field was applied in-plane in all measurements. Figure 1 shows the experimental setup. In Figure 2, a plot of typical result of the FMR measurements is shown. We recognize the shape of the resonant frequency curve clearly following the theoretical prediction of equation 3. But the parameter we are truly interested in is the damping  $\alpha$ , which we find by fitting the peak to a Lorentzian-Anti-Lorentzian shape and then fitting this peak's FWHM as a function of frequency to equation 4. The result is displayed in Figure 3. This procedure was repeated for six different samples: three AlCo-samples and three Ni samples with layers of SiSiO, SiPt and CuBi. Table 1 shows the experimental results obtained.

Sample	AlCoAl-SiO	AlCoAl-Pt	AlCoAl-CuBi	Ni-SiO	Ni-Pt	Ni-CuBi
$\alpha(10^{-3})$	$4.44 \pm 0.03$	$4.18 \pm 0.03$	$6.08 \pm 0.07$	$15.4 \pm 0.7$	$19.4 \pm 0.7$	$15.8 \pm 0.7$

Table 1: The experimental values of the Gilbert damping parameter for our six samples

We can see, that, as expected, Platinum is a better material for spin pumping than SiO on Ni. But for the AlCoAl samples, it is slightly less damping than SiO. This may be explained by the effective blocking of the platinum layer by the aluminum. Conversely, on the AlCoAl sample, CuBi is an extremely good spin conductor, an effect which is much less pronounced on Nickel. To double-check our results, we can make use of the known literature values for the saturation magnetization  $M_s$ , which we can find by fitting the peak position

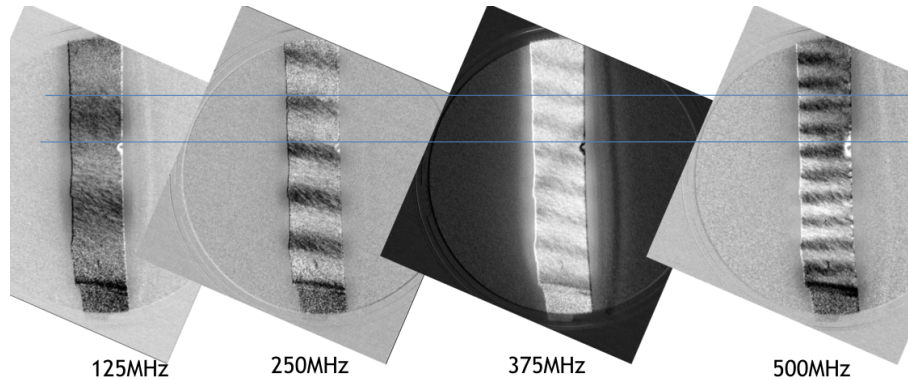


Figure 4: Spin waves in Ni on a piezoelectric substrate with SAWs at the first four harmonics of the IDTs - due to an approximately linear dispersion relation, doubling the frequency halves the wavelength.

to equation 3. We find values of  $M_s(Co) = 1.8T$  and  $M_s(Ni) = 0.49T$  for all three samples of each magnetic material, which are in reasonable accord with literature values of  $M_{s,lit}(Co) = 1.7T$  and  $M_{s,lit}(Ni) = 0.55T$ .

#### 4.4 Measurements at Alba synchrotron

At the synchrotron, measurements focused mainly on the generation of spin waves in magnetic and non-magnetic materials by a combination of surface acoustic waves (SAW) with the magnetoelastic effect. These were made visible by X-Ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD) using Alba's synchrotron radiation. In the experiment, IDTs were used to generate SAWs in a piezoelectric substrate on which a magnetic material was mounted. In this material, magnetic XMCD contrast was observed, a direct measurement of spin waves induced by SAWs. Figure 4 shows an example of Spin waves on Ni.

## 5 Personal Conclusion

During this internship, I learned a lot about some very specific measurement techniques used in the domain of spintronics such as FMR and XMCD, I learned how to use Matlab for scientific data analysis and was able to visit both a cleanroom for lithography and two synchrotron beamlines. What's more, I worked in a group of motivated researchers who gave me valuable insight into how experiments are planned, conducted, analyzed and discussed. I want to thank Joan Manel Hernandez from UB and Michael Foerster from Alba for their patient explanations and of course Ferran Macià for his great explanations of spintronics and the organization of this enriching internship in Barcelona.