

# **Erzeugung und Messung kohärenter, ultra-schneller Gitterschwingungen in Nanostrukturen mit Hilfe eines Anrege-Abfrage-Experiments**

Paul Becker  
(paul.becker@udo.edu)

Alina Nasr-Esfahani  
(alina.esfahani@udo.edu)

Durchführung: 09.08.2018, 1. Abgabe: xx.xx.2018

## **Inhaltsverzeichnis**

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Theorie</b>  | <b>2</b> |
| 1.1      | Akkustische Gitterschwingungen durch Anregung mit einem Laserpuls . . | 2        |
| 1.2      | Anrege-Abfrage-Experimente und asynchrones optisches Abtasten . . . . | 3        |
| <b>2</b> | <b>Durchführung</b>   | <b>3</b> |
| <b>3</b> | <b>Auswertung</b>   | <b>4</b> |
| <b>4</b> | <b>Diskussion</b>   | <b>4</b> |

## 1 Theorie

Mithilfe eines Anrege-Lasers werden in einem Festkörper akkustische Gitterschwingungen im GHz-Bereich durch ultrakurze Laserpulse angeregt. Diese werden daraufhin mit einem Abfrage-Laser spektroskopisch untersucht.

### 1.1 Akkustische Gitterschwingungen durch Anregung mit einem Laserpuls

In einem Gallenol-Film auf einem Galliumarsenid-Substrat werden akkustische Gitterschwingungen durch ultrakurze Laserpulse angeregt. Die Gitterschwingungen besitzen bei einem flachen Film ohne Oberflächenstruktur zunächst keine bevorzugte Frequenz. Die Intensität der Schwingung steigt also nach der Anregung schlagartig an und fällt aufgrund der Energiedissipation einem exponentiellen Abfall ähnlich ab. Das Abkühlen des Materials nach der Anregung durch den Laserpuls kann mithilfe des 3-Temperatur-Modells beschrieben werden.

Durch den Laserpuls wird den Elektronen im Gitter Energie hinzugefügt, das System ist nicht mehr im Gleichgewichtszustand. Durch Elektron-Elektron-Wechselwirkung wird die große Menge hinzugefügter Energie zunächst von wenigen Elektronen verteilt auf eine große Anzahl Elektronen; die Elektronen haben dann alle die gleiche Temperatur  $T_e$  und folgen einer Fermi-Dirac-Verteilung. Die Anzahl von Spin-up und Spin-down Elektronen kann sich unterscheiden. Die Energie wird dann durch Elektron-Phonon-Wechselwirkung auf das Gitter übertragen, das bis dahin noch unbeeinflusst von der Energieaufnahme war und die Temperatur von Elektronen und Gitter nähern sich einem Gleichgewicht an. Die Anregung mit dem Laserpuls resultiert in einer Reduzierung des magnetischen (Spin-)Moments durch Wechselwirkungen mit Phononen bzw. Elektronen. Die Temperaturänderung der drei Systeme kann durch gekoppelte Differentialgleichungen beschrieben werden [4, 2]:

$$c_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = -g_{el}(T_e - T_l) - g_{es}(T_e - T_s) + P(t) \quad (1.1.1)$$

$$c_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = -g_{el}(T_l - T_e) - g_{sl}(T_l - T_s) \quad (1.1.2)$$

$$c_s(T_s) \frac{\partial T_s}{\partial t} = -g_{es}(T_s - T_e) - g_{sl}(T_s - T_l), \quad (1.1.3)$$

wobei  $P(t)$  die zugeführte Leistung des Laserpulses beschreibt und  $c_i(T_i)$  die temperaturabhängigen Wärmekapazitäten von System  $i$  und  $g_{ij}$  die Kopplungskonstanten zwischen System  $i$  und  $j$  sind. Die Temperaturänderung folgt also einem exponentiellen Abfall. Die Änderung der Reflektivität ist abhängig von der Abweichung der Temperatur der einzelnen Systeme vom Gleichgewichtszustand:

$$\frac{\Delta R}{R} = c_1 \cdot \Delta T_e + c_2 \cdot \Delta T_l + c_3 \cdot \Delta T_s. \quad (1.1.4)$$

Sobald die Oberflächenstruktur periodisch verändert wird, kommt es zu konstruktiver und destruktiver Interferenz. Da es sich bei den Schwingungen um Rayleigh-Wellen handelt, sind die Schwingungen an der Oberfläche lokalisiert. Rayleigh-Wellen haben eine Geschwindigkeitskomponente in Ausbreitungsrichtung und senkrecht dazu. Ihre Geschwindigkeit und Eindringtiefe sind abhängig von ihrer Frequenz. Zu dem Abfall der Schwingungsamplitude kommen periodische Gitterschwingungen hinzu, deren Amplitude und Frequenz von der Struktur der Oberfläche des Films abhängen. Die Frequenz

der Schwingungen lässt sich über die Dispersionsrelation  $f = v_s/\lambda$  abschätzen, wobei  $\lambda = 1047\text{ nm}$  die Laser-Wellenlänge und  $v_s = 2500\text{ m s}^{-1}$  die Schallgeschwindigkeit in Galfenol [1] ist. Die Größenordnung der Schwingungsfrequenz liegt im Bereich von wenigen GHz.

## 1.2 Anrege-Abfrage-Experimente und asynchrones optisches Abtasten

Bei Anrege-Abfrage-Experimenten wird die Probe durch einen ersten Laserpuls (der pump-Puls) angeregt, dann wird ein zweiter Laserpuls (der probe-Puls) zur spektroskopischen Analyse der angeregten Probe verwendet. Um die zeitliche Entwicklung der Probe untersuchen zu können, muss der probe-Puls jeweils mit unterschiedlichem zeitlichen Abstand zu dem pump-Puls auf der Probe eintreffen. Das kann durch eine mechanische Verzögerung erreicht werden. Bei diesem Ansatz ist die Messgeschwindigkeit allerdings begrenzt und durch Fehler in Justage und Kalibration kann es zu Messungenauigkeiten kommen. Stattdessen werden zwei Laser mit leicht unterschiedlicher Repetitionsrate verwendet. Das Verfahren wird "asynchrones optisches Abtasten" genannt.

## 2 Durchführung

Zur Messung der Gitterschwingungen wird ein pump-probe-Aufbau verwendet. Die durch die Oszillation der Gitterschwingungen hervorgerufene, periodische Reflektivitätsänderung wird bestimmt, indem die Intensität des von der Probe reflektierten probe-Laserstrahls mit einer Photodiode gemessen wird. Dazu wird der in Abbildung 1 schematisch dargestellte Aufbau zunächst einjustiert. Sowohl der pump-Laser mit einer Wellenlänge von  $1047\text{ nm}$  und einem Fokus von  $20\text{ }\mu\text{m}$ , als auch der probe-Laser mit einer Wellenlänge von  $780\text{ nm}$  und einem Fokus von  $2\text{ }\mu\text{m}$  müssen auf die gleiche Stelle auf der Probe gerichtet sein. Das reflektierte Licht muss weiterhin auf die beiden Photodioden treffen.

Als erstes wird der Film ohne Höhenprofil angeregt und die Reflektivität gemessen. Daraus wird die Energiedissipation im Galfenol-Film bestimmt. Diese Messung wird im Folgenden von allen weiteren Messungen als Untergrund subtrahiert. Es werden vier Gitter unterschiedlicher Tiefe vermessen und für das tiefste Gitter außerdem die Polarisation gedreht. Aus der Intensität wird die Oszillation der Reflektivitätsänderung der Probe bestimmt. Mit einer Fouriertransformation der Messwerte in der Zeitdomäne lassen sich Amplitude, Frequenz und Breite des Signals untersuchen.

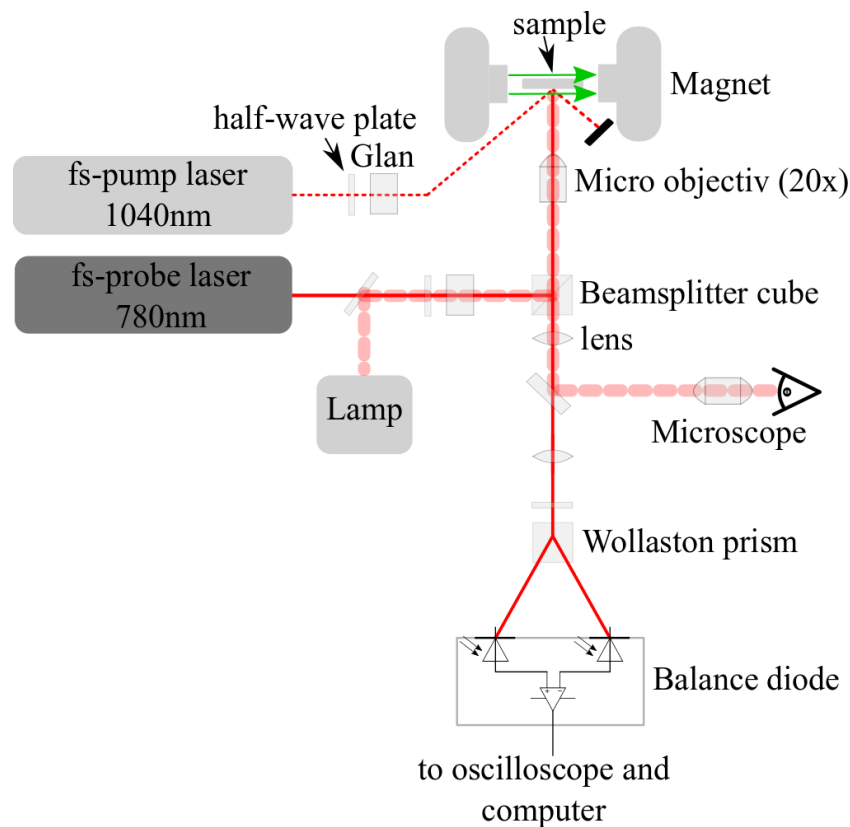


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Messapparatur [3]

### 3 Auswertung

Super tolle Ergebnisse

### 4 Diskussion

Richtig geil gemessen.

### Literatur

- [1] Haim Abramovich. *Intelligent Materials and Structures*. De Gruyter, 2016.
- [2] Federico Cilento. „Non-equilibrium phase diagram of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Y}_{0.08}\text{Ca}_{0.92}\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$  cuprate superconductors revealed by ultrafast optical spectroscopy“. In: (2011).
- [3] Felix Godejohann. *Erzeugung und Messung kohärenter, ultra-schneller Gitterschwingungen in Nanostrukturen mit Hilfe eines Anrege-Abfrage-Experiments. Versuchsanleitung Lehrstuhlversuch E2*. TU Dortmund. Dortmund, Deutschland, 2018.
- [4] Maarten van Kampen. „Ultrafast spin dynamics“. In: *Technische Universiteit Eindhoven* (2003).