

Drehmomentmessung auf Wirbelstromprinzip

Konrad Slanec Entwicklungsbüro • Dachauerstr.237 c • D – 80637 München

Tel. : +49 (0) 89 48 95 10 86 • Fax: +49 (0) 89 48 95 10 87 • Mobile: +49 (0) 171 822 1009 • E-Mail: messtechnik@nanuq.eu

Messtechnik • Sensorik • Mechatronische Systeme • Umweltsimulationstests

08.Oktober 2013 S. 1

Motivation

Berührungslose Drehmomentmessung an ferromagnetischen Werkstoffen, die auf dem magnetoelastischen Effekt beruht, ist in vielen Varianten verfügbar. Wegen der hohen Komplexität, Abhängigkeit von Toleranzen vieler Parameter und dadurch hoher Herstellungskosten, eignet sie sich hauptsächlich für spezielle Anwendungen in Kleinserie. Die Lösungen für Großserienanwendungen bei niedrigen Kosten (z.B. Automobilindustrie) sind selten, weil parallele Entwicklung in verschiedenen technischen Disziplinen notwendig ist.

Drehmomentmessung kann auch mit Wirbelstromsensorik erfolgen, die sich bereits in verschiedenen Varianten für Abstandsmessung für automobiler Anwendungen bewährt hat.

Das Entwicklungsziel ist, das vorhandene und validierte System (Sensorkopf und Elektronik) für die Drehmomentmessung anzupassen. Die Machbarkeit ist mit positiven Ergebnis untersucht. Die wesentliche Entwicklungsarbeit ist jedoch mit den Werkstoffeigenschaften der Welle verbunden, da die notwendigen Parameter und deren Toleranzen von keinem Lieferanten vorliegen.

Drehmomentsensorik auf dem Wirbelstromprinzip (1)

Die Einwirkung eines Drehmoments auf eine Welle verursacht Deformationen und somit Scher- bzw. Schubkräfte. Die Scherkräfte auf einem ferromagnetischen Werkstoff führen zu Änderungen der Orientierung der magnetischen Domänen und somit der **magnetischen Permeabilität** (Villary-Effekt, magnetoelastischer Effekt). Über die Änderung der Permeabilität kann über die Scherkräfte das einwirkende Drehmoment erfasst werden.

Die Beziehung zwischen dem Drehmoment **T** und der Scherspannung **τ** auf einer massiven Welle vom Radius **r** ist:

$$T \sim \tau * r^3,$$

und für ein Rohr mit dem Außenradius **r_a** und dem Innenradius **r_i** :

$$T \sim \tau * (r_a^4 - r_i^4) / r_a.$$

Für komplexe Formen ist die Verteilung der Scherspannungen analytisch nicht zu erfassen. Auch eine FEM Analyse würde nur so gut sein wie die getroffenen Annahmen.

.

Drehmomentsensorik auf dem Wirbelstromprinzip (2)

Die magnetische Permeabilität als skalare Größe *hängt nicht von der Richtung* der entstandenen Spannung ab. Deshalb muss für die Bestimmung des Drehmoments über die Änderung der Permeabilität konstruktiv sichergestellt werden, dass die Spannungen im Messbereich nur durch das einwirkende Drehmoment erzeugt werden.

Es gibt Magnetfeldsensoren, die nicht nur die Permeabilität sondern auch die Orientierung der magnetischen Domänen messen. Diese Sensoren sind hauptsächlich empfindlich auf mechanische Toleranzen und haben sehr niedrige Signaldynamik.

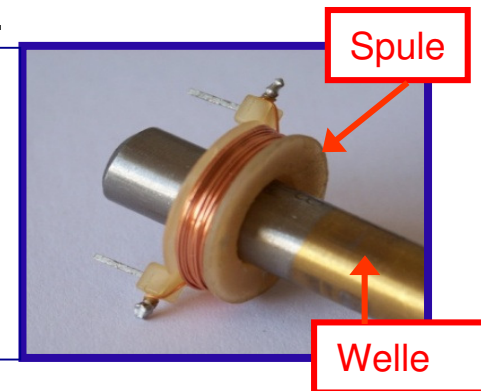
Die Permeabilität wird oft mit induktiven Meßsystemen gemessen, bei denen mit einer Spule nach anlegen einer Wechselspannung ein Magnetfeld in dem Prüfling erzeugt wird und dadurch eine Spannung in einer zweiten Spule induziert wird. Diese Spannung ist proportional der magnetischen Permeabilität. Das System ist zwar robust, aber um ausreichend hohe Signaldynamik zu erreichen, sind relativ große Spulen und hohe Ströme ($>> 100 \text{ mA}$) in der Primärspule erforderlich.

Drehmomentsensorik auf dem Wirbelstromprinzip (3)

Permeabilität kann auch durch die Messung der Wirbelstromverluste in einem Schwingkreis mit einer Spule bestimmt werden. Die erforderlichen Betriebsströme in der Spule für eine ausreichende Signaldynamik liegen deutlich unter 10 mA. Dadurch sind die Spule und der für den Sensorkopf erforderliche Bauraum klein.

Einfache Darstellung der Anordnung Spule - Welle

Für den Drehmomentsensor wird die Spule auf einen Spulenkörper gewickelt und um die drehende Welle positioniert. Der Einfluss von mechanischen Toleranzen (z. B. Koaxialität, axiale Bewegung) ist dadurch vernachlässigbar. Alternativ kann die Spule als eine flexible Leiterplatte ausgebildet sein.



Die Wirbelstromverluste in dem Schwingkreis hängen hauptsächlich von

- ✚ der Geometrie des Prüflings und der Spule,
- ✚ der elektrischen Leitfähigkeit des Prüflings,
- ✚ der Frequenz des eingespeisten Stromes in die Spule,
- ✚ der **magnetischen Permeabilität** des Prüflings,
- ✚ der Temperatur des Prüflings und der Spule.

Weitere Störfaktoren, die auch die Verluste beeinflussen, sind die parasitären Kapazitäten der Spule und des Oszillators, sowie die elektrisch leitenden Materialien in der Umgebung der Spule.

Drehmomentsensorik auf dem Wirbelstromprinzip (4)

Die Wirbelstromverluste in dem Schwingkreis werden über die Induktivität und die Impedanz der Spule bestimmt. Die Induktivität L einer Spule mit gegebener Geometrie und N Windungen über einem metallischen Teil der Permeabilität μ ist für den Gleichstrom in der Spule gegeben durch:

$$L \sim \mu * N^2.$$

Eine Änderung der Permeabilität ändert die Induktivität der Spule. Wegen der Wirbelstromverluste hängt die Induktivität der Spule in einem Schwingkreis zusätzlich von der Frequenz f ab.

Die Wirbelströme werden in dem Prüfling nur in der elektrisch leitfähigen Schicht bis zu einer Tiefe – Skintiefe δ - induziert. Die Skintiefe hängt von der elektrischen Leitfähigkeit σ , magnetischen Permeabilität μ und der Frequenz f ab:

$$\delta \sim 1 / \text{SQRT}(\sigma * \mu * f) .$$

Eine Änderung der Permeabilität wird auch die Skintiefe ändern und somit den elektrischen Widerstand. Dadurch werden die Spulenimpedanz und die Verluste beeinflusst. Die Änderung der Induktivität der Spule wird die Frequenz des Schwingkreises ändern, wodurch wieder die Skintiefe geändert wird ...

Drehmomentsensorik auf dem Wirbelstromprinzip (5)

Die Summe aller komplexen Einflüsse auf den Schwingkreis durch die Änderung der Permeabilität können über die Messung der Frequenz und der Amplitude bestimmt werden. Die Auswerteelektronik für die Drehmomentmessung kann von der verfügbaren Elektronik für Abstandsmessung auf Wirbelstrombasis nach entsprechender Modifikation übernommen werden.

***Hinweis:** Die Signaldynamik für die Abstandsmessung ist vielfach höher als für das Drehmoment. Im ersten Fall sind die Wirbelstromverluste bei großer Entfernung des Metallteils vernachlässigbar klein und bei geringer Entfernung maximal. Bei der Drehmomentmessung verursacht die Welle auch im unbelasteten Zustand hohe Verluste im Schwingkreis. Deshalb sind die Verlustunterschiede aufgrund der Änderung der Permeabilität deutlich geringer.*

Die Beziehung zwischen der Permeabilität und den Werkstoffeigenschaften wird von den Werkstoffherstellern nicht angegeben. Für die meisten Anwendungen sind die mechanischen Eigenschaften von Stahllegierungen von Bedeutung. Auch diese sind mit großen Toleranzen behaftet.

Drehmomentsensorik auf dem Wirbelstromprinzip (6)

Für die berührungslose Drehmomentmessung basierend auf der Änderung der magnetischen Permeabilität des Werkstoffes ist die Kenntnis der Beziehung hauptsächlich folgender Werkstoffeigenschaften und Umweltbedingungen zu der Permeabilität notwendig:

- + Scherspannung (Schub- und Normalspannung) im elastischen Bereich,
- + Abhängigkeit von der Spannung-Dehnung Charakteristik,
- + Ermüdungsverhalten,
- + Bearbeitung (mechanisch, thermisch, chemisch),
- + Oberflächenqualität (Rauhtiefe, Mikrorisse),
- + Magnetfeldstärke,
- + Temperatur,
- + Frequenz.

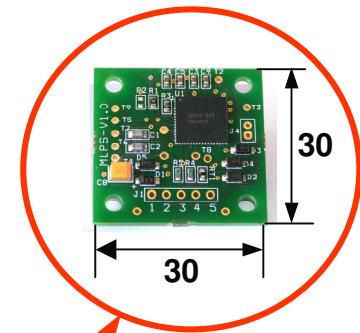
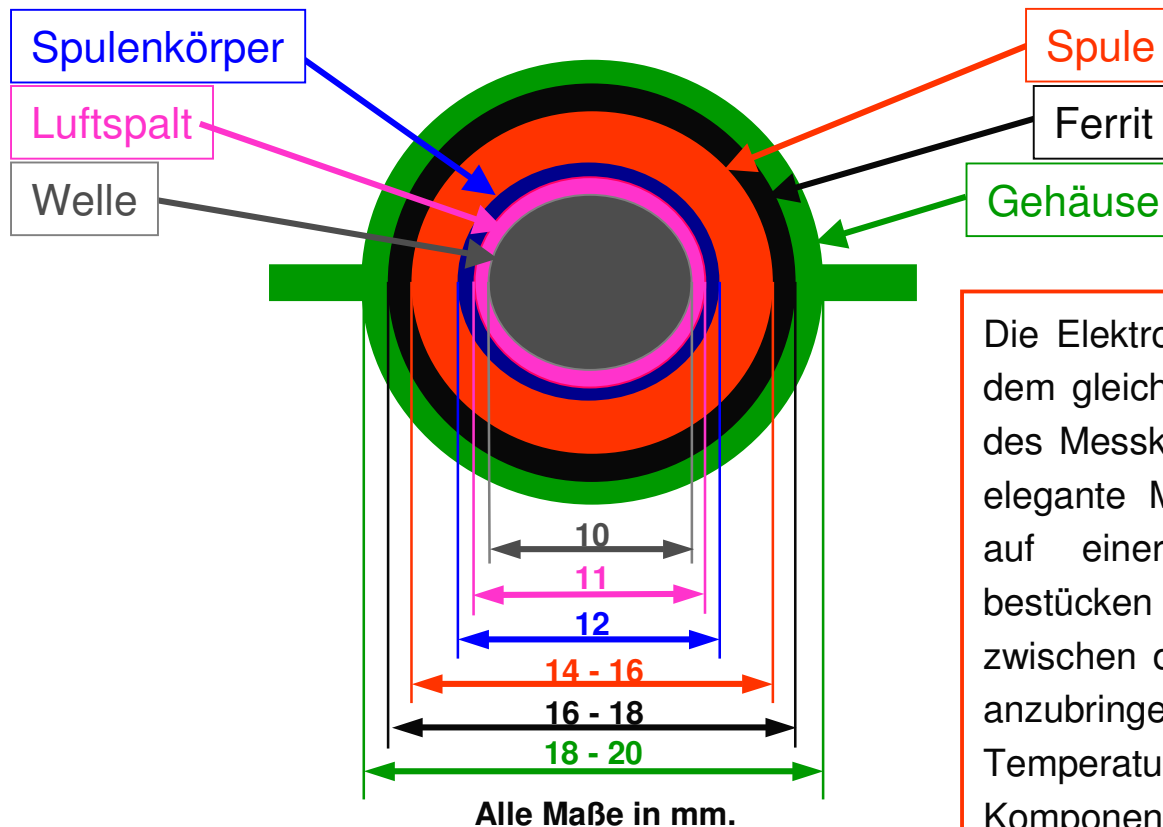
Da solche Grundsatzuntersuchungen nicht vorliegen aber aufwendig sind, wird die Entwicklung für den Serieneinsatz empirisch durchgeführt.

Vor- und Nachteile der Wirbelstromtechnologie für Drehmomenterfassung

- + Aufteilung der Welle ist nicht erforderlich.
- + Montage des Messkopfes (Spule) ist nicht toleranzbehaftet,
- + Die Welle kann sich radial und axial bewegen,
- + Die Auswerteelektronik muss nicht in der Nähe des Sensorkopfes liegen,
- + Redundanz ist gewährleistet über die gleichzeitige Messung von zwei Parametern.
- Die Richtung der Drehmomenteinwirkung kann nicht erfasst werden,
- Radiale und axiale Belastungen der Welle müssen konstruktiv vermieden werden, da sich dadurch erzeugte Spannungen mit der durch das Drehmoment erzeugten Spannung überlagern,
- U.U. schwierige Demontage des Sensorkopfes im Fehlerfall,
- Genaue Einhaltung der Materialeigenschaften der Welle ist erforderlich.

Aufbaumöglichkeiten für einen Drehmomentsensor für Serienproduktion

Beispiel: Radialer Messkopfaufbau mit $D = 10$ mm Welle, Messkopflänge $L = 12-20$ mm (ohne Elektronik)



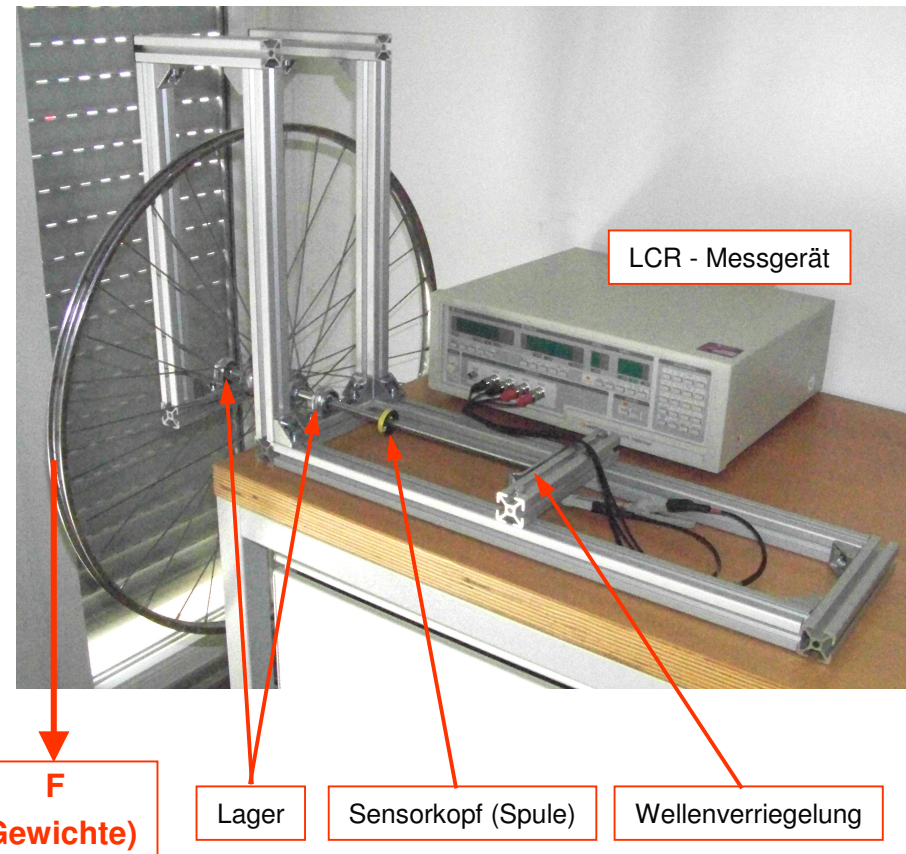
Die Elektronik kann entweder seitlich in dem gleichen Gehäuse, oder außerhalb des Messkopfes liegen. Eine besonders elegante Möglichkeit ist, die Elektronik auf einer flexiblen Leiterplatte zu bestücken und sie als eine Schicht z. B. zwischen dem Ferrit und dem Gehäuse anzubringen. Für extrem hohe Temperaturen (bis 210°C) können die Komponenten in ein Flex-ASIC integriert werden (Silicon-on-Insulator technology).

Der Aufbau entspricht prinzipiell den Patentansprüchen in DE 103 23 318 A1, 2003

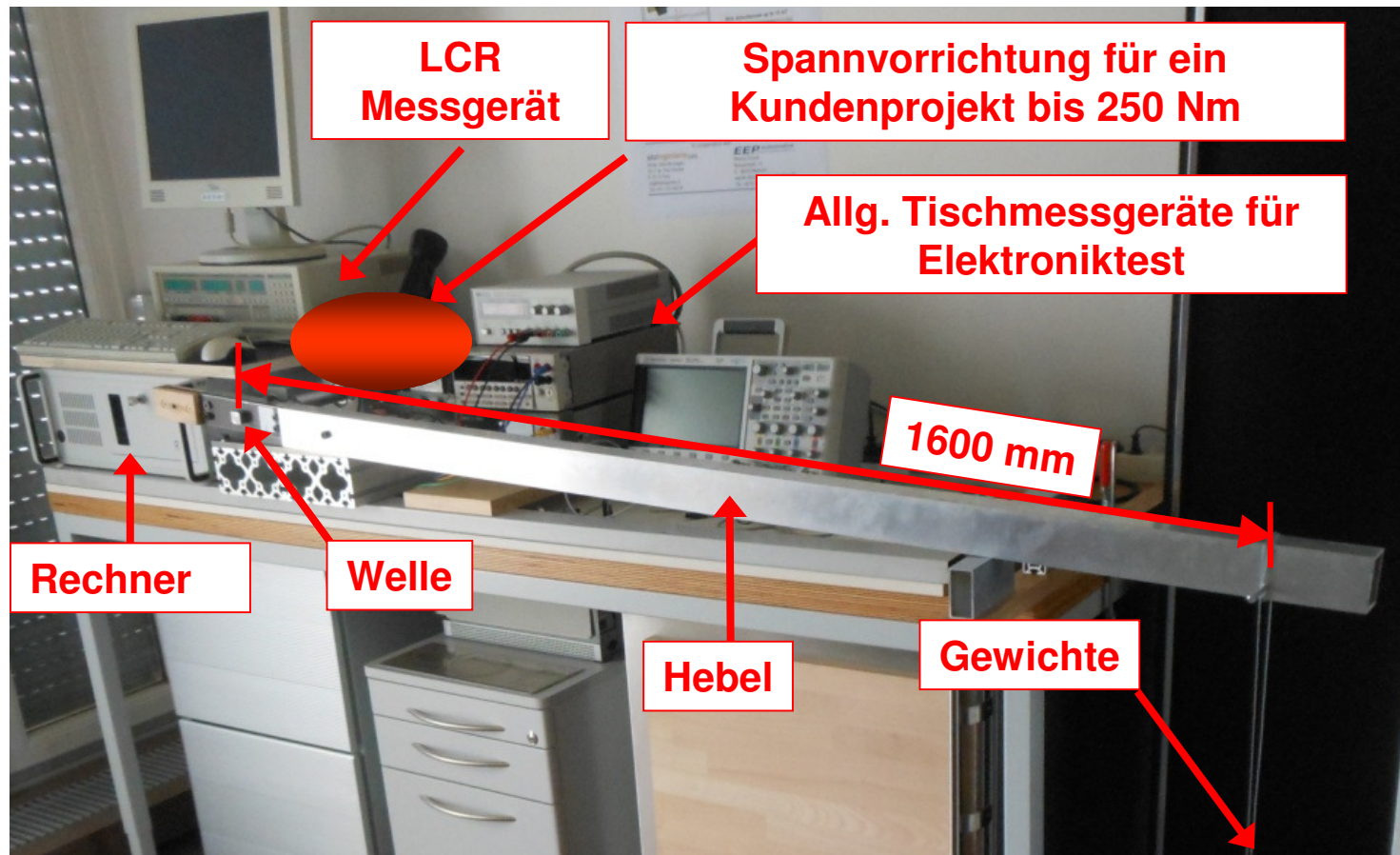
Einfache Testvorrichtung (2010)

Die wesentliche Anforderung an die Vorrichtung ist: einfacher Wechsel der Welle und der Sensorköpfe. Um bei der Verdrehung der Welle immer den gleichen Angriffswinkel der Kraft zu gewährleisten wurde eine Fahrradfelge verwendet.

Maximales Drehmoment liegt bei ca. 30 Nm. Längere Wellen können leicht adaptiert werden.



Beispiel einer Messvorrichtung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

***Wir würden uns über den Erhalt Ihrer
Anforderungen freuen!***

Proprietary data. All rights reserved by Konrad Slanec Entwicklungsbüro including the right to file industrial property rights. Konrad Slanec Entwicklungsbüro retains the sole power of distribution, such as reproduction, copying, distribution, adaptation, merger and translation. Reproduction, copying, distribution, adaptation, merger and translation, in part or whole, without the prior written consent of Konrad Slanec Entwicklungsbüro, is prohibited.

The information given in this document shall in no event be regarded as a guarantee of conditions or characteristics.