Transport fragiler Gemälde
Ein Projekt, mitfinanziert durch die Eidgenössische Komission für Technologie und Innovation (KTI)

Messtechnik und Auswertungssoftware
Teil 1: Mess- und Datenloggersysteme

Marcel Ryser, Cornelius Palmbach, Matthias Läuchli, Thomas Fankhauser, Nathalie Bäschlin, Anita Hoess, Katharina Sautter

Einführung

Um Aussagen über die mechanische Belastung von Gemälden während eines Transports machen zu können, wird ein Mess- und Datenloggersystem benötigt, welches in der Lage ist, Beschleunigungen während eines längeren Zeitraums zu erfassen. Die Anforderungen an ein solches System sind bei diesem Projekt sehr hoch und vielfältig. So sind nicht nur einzelne Schocks von Interesse, sondern auch kontinuierliche Vibrationen an verschiedenen Stellen am Gemälde und an den Transportkisten, und dies während eines Zeitraums von bis zu einer Woche. Das Mess- und Datenloggersystem sollte zudem möglichst kompakt sein und wenige bis keine Modifikationen und Eingriffe an den Transportkisten und am Gemälde selbst erfordern. Um Vibrationen zu messen und auch Aussagen über das Frequenzverhalten machen zu können, muss das Beschleunigungssignal mit einer hohen Frequenz abgetastet werden. Dies bedeutet wiederum, dass dabei grosse Datenmengen erzeugt und gespeichert werden müssen. Auch die Energieversorgung des Systems ist ein nicht zu unterschätzendes Detail.
Während des Projekts zeigte es sich, dass ein einzelnes System allein nicht alle diese Anforderungen erfüllen kann. Daher wurden zwei Messkonzepte verfolgt, zum einen ein kompaktes Messsystem für Transportmonitorings realer Gemäldetransporte und zum anderen ein sehr genaues System für Vergleichsmessungen an verschiedenen Transportkisten.
Beim Konzept für Transportmonitorings wurde der kommerziell erhältliche Datenlogger MSR165 der Firma MSR Electronics GmbH evaluiert. Seine Vorteile liegen in seiner kompakten Bauweise, wobei Sensoren, Energieversorgung und Datenspeicher in einem Gehäuse ohne Kabel untergebracht sind. Der Datenlogger kann bis zu 1600 Messpunkte pro Sekunde abspeichern und erlaubt eine kontinuierliche Messung mit einer Dauer von bis zu drei Tagen.
Für Vergleichs- und Verifizierungsmessungen an Transportkisten mit konventionellen und überarbeiteten Dämpfungssystemen wurde dagegen ein komplexeres und etwas genaueres System verwendet. Das Herzstück bildet der Echtzeit-Controller CompactRIO der Firma National Instruments. Mit diesem kann an bis zu 16 verschiedenen Stellen synchron die Beschleunigung gemessen und abgespeichert werden. Dieses System kann mit einer noch höheren Frequenz von bis zu 54000 Messpunkten pro Sekunde aufzeichnen, ist jedoch sehr kostspielig und durch die nötigen Verkabelungen und die externe Energieversorgung für ein Transportmonitoring nicht geeignet. Nachfolgend werden die zwei verwendeten Mess- und Datenloggersysteme etwas genauer erläutert.

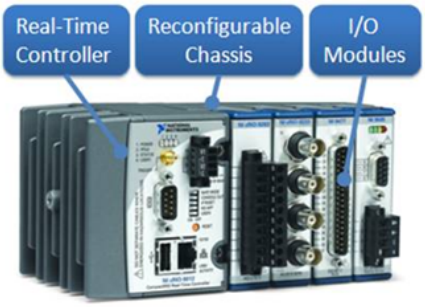

Abbildung 1: Echtzeit-Controller NI cRIO, Quelle: http://www.ni.com

Messsystem NI cRIO

Der CompactRIO (cRIO) von National Instruments (NI) (Abbildung 1) ist ein rekonfigurierbares Embedded-System für Erfassungs-, Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Es ist modular aufgebaut, das heisst, es können verschiedenste I/O-Module der C-Serie von NI kombiniert in das cRIO Chassis gesteckt werden. Programmiert wird das Gerät mit

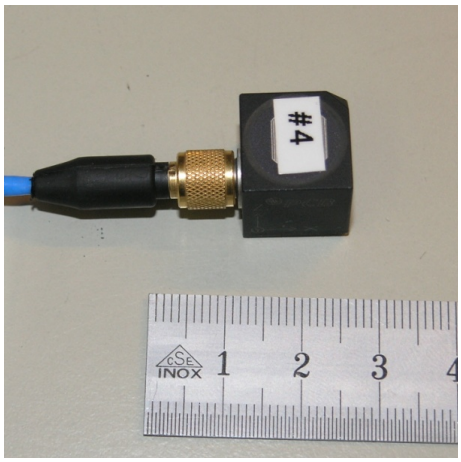

Abbildung 2: Triaxialer Beschleunigungssensor PCB 356A16

der Software LabVIEW von NI. Das System benötigt eine externe Speisung mit einer Spannung von 6-35 V und hat einen internen Speicher mit einer Kapazität von 2 GB.
Für unsere Anwendung, die Erfassung von Beschleunigungssignalen, wurde der cRIO als reines Loggersystem konfiguriert. Da das System über keine eigenen Sensoren verfügt, werden externe Sensoren benötigt. Im vorliegenden Fall kamen triaxiale Beschleunigungssensoren des Herstellers PCB Piezotronics, Inc. zum Einsatz (Abbildung 2). Die Beschleunigungssensoren haben eine spezielle Daten- und Speiseschnittstelle (IEPE). Daher werden entsprechende Module benötigt, welche die Sensoren auslesen können. Das verwendete Mess- und Loggersystem besteht somit aus folgenden Komponenten: Ein Echtzeit-Controller cRIO-9014 mit einem 4-Slot Chassis, dazu bis zu vier 4-Kanal-Analogeingangsmodule, wodurch das System maximal 16 Kanäle zur Verfügung hat. Die Messrate kann gewählt werden und beträgt theoretisch bis zu 54000 S/s (Messpunkte pro Sekunde), wobei, um die Datenmenge zu reduzieren, mit 2000 S/s gearbeitet wurde. Der interne Speicher ist für so viele Kanäle jedoch zu klein, weswegen die Daten auf einem externen 32 GB USB-Stick gespeichert werden. Als Beschleunigungssensoren werden triaxiale Beschleunigungsaufnehmer verwendet, welche per Kabel angeschlossen werden. Dadurch ist es mit entsprechender Verkabelung möglich, an verschiedenen Stellen synchron auf jeweils drei Achsen die Beschleunigung aufzuzeichnen. Als Speisung für das System wird ein Bleiakkumulator (Autobatterie) verwendet.
Die Programmierung des Systems setzt spezielle Softwarekenntnisse voraus. Durch den grossen Bleiakkumulator sowie die Verkabelung ist das System ziemlich unhandlich. Die gesamte Hardware ist zudem sehr kostenintensiv und komplex. Dadurch ist dieses Messsystem für das Transportmonitoring nicht geeignet. Für sehr präzise Messungen an neuen Dämpfungsmaterialien, Transportkisten usw. ist dieses System durch die synchrone Aufzeichnung (siehe [1] Teil 2), die sehr genauen Sensoren und die Flexibilität des cRIO-Messsystems allerdings klar zu bevorzugen.

Technische Spezifikationen

• Hersteller / Model:	NI-cRIO-9014
• I/O Module:	NI 9233/9234
• Abmessungen, Gewicht:	20 x 10 x 8 cm, ca. 1.1 kg
• Anz. Steckplätze für Module:	4
• Interner Speicher:	2 GB, erweiterbar durch externen USB-Stick (z.B. 32 GB)
• Energieversorgung:	6-35 V DC
• Speisung:	Blei-Akkumulator, 12 V, 60 Ah
• PC-Software:	LabVIEW von National Instrument
• Beschleunigungssensoren:	PCB 356A16 und PCB 356A14
• Empfindlichkeit:	100 mV/g
• Max. Beschleunigung:	±50 g
• Frequenzbereich:	0.5 Hz - 5 kHz
• Abmessung, Gewicht:	14.0 x 20.3 x 14.0 mm, 7.4 g

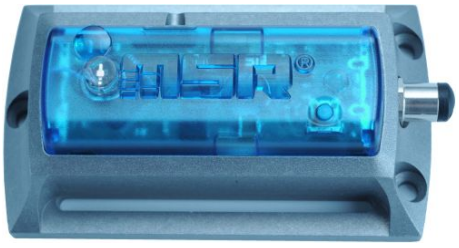

Abbildung 3: Datenlogger MSR165, Quelle: www.msr.ch

Messsystem MSR165

Die kompakten Datenlogger vom Typ MSR165 der Firma MSR Electronics GmbH (Abbildung 3) verfügen trotz ihres geringen Gewichts und ihrer geringen Baugrösse je nach Gerätekonfiguration sowohl über einen internen triaxialen Beschleunigungssensor, einen Feuchtigkeitssensor, einen Temperatursensor als auch über einen integrierten Akku. Diese Kompaktheit ermöglicht es, die Datenlogger direkt am Rahmen eines Gemäldes oder an der Innenwand der Transportkiste zu befestigen. Meist muss dazu weder die Transportverpackung speziell angepasst werden, noch sind Auswirkungen auf die Konzeption der Verpackung und die üblichen

Abläufe beim Handling der Transportkiste zu erwarten, unter anderem, weil keine Kabel verlegt werden müssen. Mit den Datenloggern sind sowohl kontinuierliche Messungen mit einer hohen Messrate möglich, als auch Messungen, bei denen lediglich die Belastungen aufgezeichnet werden, welche über einem zuvor definierten Schwellwert liegen. Die internen Sensoren können auch statische Beschleunigungen messen, so dass es auch möglich ist, die Lage des Gemäldes während des Transports zu überwachen. Da mit einem einzigen Gerät nicht nur Vibrationen und Schocks, sondern auch Klimaschwankungen innerhalb der Transportkiste aufgezeichnet werden können, muss kein zusätzlicher Klimalogger mehr mitgeführt werden. Die grosse zur Verfügung stehende Speicherkapazität und der leistungsstarke Lithium-Polymer-Akku erlauben eine lückenlose Aufzeichnung der Belastungen, auch bei mehrtägigen Transporten. Die Datenaufzeichnung kann entweder manuell per Taster ausgelöst werden, oder aber der Datenlogger wird so programmiert, dass er sich zu einer bestimmten Uhrzeit automatisch an- und später auch wieder ausschaltet. Die einfache Bedienung, die Möglichkeit, den Akku direkt über den USB-Anschluss eines Notebooks aufladen und gleichzeitig die Messparameter programmieren und die Messdaten auslesen zu können, erleichtert die Handhabung des Datenloggers erheblich gegenüber dem Messsystem NI cRIO. Es ist daher geradezu prädestiniert für Transportmonitorings während Gemäldetransporten.

Vorteile

- Klein und leicht
- Hohe Messrate
- Kabellos
- Grosse Daten- und Akku-Kapazität
- Lange Messdauer

Nachteile

- Messrate ist nicht konstant
- Synchrone Messungen mit mehreren Datenloggern sind nicht möglich (siehe [1] Teil 2)

Technische Spezifikationen

- Hersteller: MSR Electronics GmbH
- Abmessungen, Gewicht: 39 x 23 x 72 mm, 69 g
- Triaxialer Beschleunigungssensor:
  - Messbereich: ±15 g
  - Genauigkeit: ±0.15 g bei 25 ˚C
  - Messrate: bis zu 1600/s (±15 %)
- Temperatur/Feuchtigkeitssensor:
  - Messbereich: 0-100 % RF, -20…+65 ˚C
  - Genauigkeit: ±2 % RF (10-85 %), ±4 % RF (85-95 %), ±0,5 ˚C (-10…+65 ˚C)
  - Messrate: 1/s bis alle 12 h
- Energieversorgung: LiPo-Akku 800 mAh, aufladbar per USB-Schnittstelle
- Speicher: 4 GB microSD-Karte
- Datenaufzeichnung: kontinuierlich oder mit Schwellwert
- Maximale Messdauer: 3 Tage bei maximaler Messrate (mit Schwellwerten auch länger)
- PC-Software: Kostenlose Setup-, Reader-, Viewer- und Onlinesoftware
- Interface: USB

Prüf- und Simulationssysteme

Wie verhalten sich eine Leinwand, ein Rahmen oder auch eine Transportkiste bzw. die darin eingebauten Polstermaterialien bei Einwirkung von Vibrationen und Schocks? Um diese Frage beantworten zu können, wurde im Rahmen früherer Untersuchungen [2] eine Rüttelstrecke gebaut, welche später durch eine professionelle elektrodynamische Schwingprüfanlage ergänzt wurde. Der Grund für den Einsatz einer Rüttelstrecke besteht darin, reproduzierbare Messungen zu ermöglichen. So kann ein Beschleunigungsprofil an verschiedenen Polstermaterialien oder Testgemälden beliebig oft wiederholt werden. Dadurch wird eine vergleichende Aussage über deren Schwing- und Dämpfungsverhalten ermöglicht. Als Beschleunigungsprofile kommen Sinusschwingungen, definiertes Rauschen in bestimmten Frequenzbereichen („noise“) oder sogar reale, bei Transporten aufgezeichnete Signale in Frage. Diese Prüf- und Simulationssysteme wurden intensiv eingesetzt und erlaubten effiziente Tests von diversen Polstermaterialien und deren Kombinationen.

Rüttelstrecke

Die Rüttelstrecke für Gemälde (Abbildung 4) ist ein Eigenbau des Instituts für mechatronische Systeme (ifms). Sie wurde bereits im Rahmen früherer Untersuchungen [2] konstruiert und verwendet. Die Rüttelstrecke ist so konzipiert, dass durch wenige Umbauten ein Wechsel der Anregungsrichtung möglich ist (Anregung in allen drei Richtungen X, Y und Z getrennt voneinander).

Technische Spezifikationen

- Antrieb: 4 Voice-Coils (Tauchspulen)
- Max. Beschleunigung: 50 m/s (bei 20 kg Nutzmasse)
- Max. Fahrweg: 70 mm
- Frequenzbereich: 0-100 Hz
- Beschleunigungsprofile: Sinus, Schock, Frequenzgang, Rauschen und selbst eingemessene reale Beschleunigungsprofile
- Steuerung: dSpace Rapid Prototyping oder NI cRIO

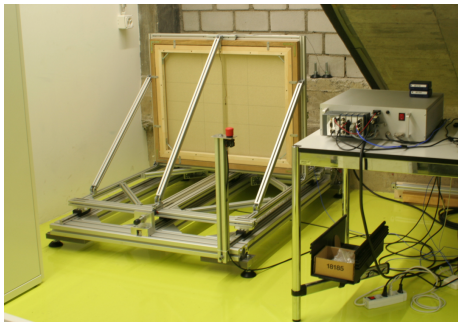

Abbildung 4: Rüttelstrecke mit darauf montiertem Testgemälde

Shaker (elektrodynamische Schwingprüfanlage)

Im Vergleich zur Rüttelstrecke verfügt der Shaker (Abbildung 5) über eine höhere mechanische Steifigkeit, wodurch die gerätespezifischen Eigenschwingungen minimiert und somit die Präzision, die Reproduzierbarkeit und die Wiedergabegenauigkeit der Anregung während der Messungen erhöht wird. Dies führt auch zu einem grösseren nutzbaren Frequenzbereich, erlaubt die Ermittlung höherer Eigenfrequenzen und eine zuverlässigere Bestimmung des Übertragungsverhaltens von Dämpfungsmaterialien.

Durch das Kippen der Anregungseinheit ist ein einfacher Wechsel der Anregungsrichtung möglich (Anregung in allen drei Richtungen X, Y und Z getrennt voneinander).

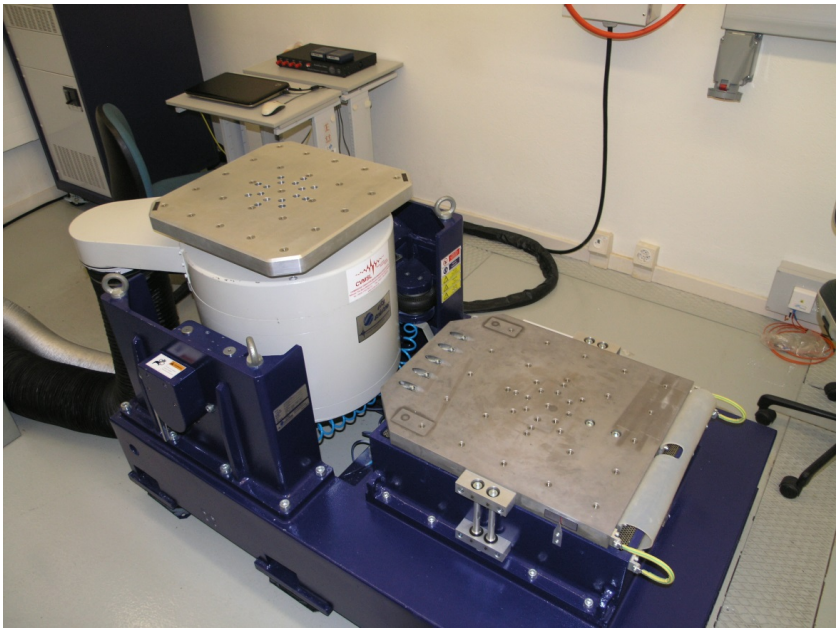

Abbildung 5: Elektrodynamische Schwingprüfanlage (Shaker)

Technische Spezifikationen

- Hersteller / Model: ETS Solutions, MPA102 / L620M / GT500M
- Antrieb: elektromagnetische Spule
- Sinuskraft und Rauschen: je 6 kN
- Schockkraft (6 ms, ½ Sinus): 12 kN
- Frequenzbereich: 3-3500 Hz
- Max. Beschleunigung: 100 g
- Max. Geschwindigkeit: 2 m/s
- Max. Fahrweg: 51 mm (Peak to Peak)
- Max. Zuladung statisch: 300 kg (Nutzlast mindestens 30 kg)
- Headexpander (500 x 500 mm) für Anregung in X-Richtung
- Gleittisch (500 x 500 mm) für Anregung in Y- und Z-Richtung
- Regelsystem: VRM-4 Medallion und Softwarepaket für synthetische Profile (Sinus, Schock, Frequenzgang, Rauschen) und selbst eingemessene reale Profile
- Kühlung: Kühlluftgebläse mit Schallschutzgehäuse

Literatur

[1] M. Ryser, C. Palmbach, T. Fankhauser, N. Bäschlin, M. Läuchli, A. Hoess, und K. Sautter, „Messtechnik und Auswertungssoftware“, 2015.

[2] C. Palmbach, „Messung transportbedingter Schwingungen an textilen Bildträgern“, Diplomarbeit, Berner Fachhochschule BFH, Hochschule der Künste Bern HKB, Bern, 2007.