

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines kostengünstigen, vernetzten Messsystems an mehreren Positionen einer Brücke, um deren Zustand präzise feststellen zu können. In dieser Masterarbeit wurde hierfür ein neues Messsystem entwickelt, das als zuverlässiger Datenlogger der beiden Beschleunigungssensoren ADXL355 und IIS3DWB funktioniert. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass der Datenverlust bei der maximalen Abtastrate der Sensoren so gering wie möglich gehalten wird. Das System bildet somit das Grundgerüst für das finale Ziel eines geeigneten Messsystems zur Zustandsüberwachung von Gebäudestrukturen, insbesondere von Brücken. Dementsprechend wurde es von Grund auf für gute Erweiterbarkeit ausgelegt.

Die beiden Beschleunigungssensoren können ohne Datenverlust während des Messbetriebs bei ihrer maximalen Datenrate betrieben werden. Nur während der Synchronisation alle fünf Minuten werden für etwa 120 ms keine Beschleunigungsdaten aufgezeichnet. Die Zuverlässigkeit der gewonnenen Messdaten konnte außerdem auf einem kontrollierten Prüfstand erfolgreich bestätigt werden.

Eine wesentliche Herausforderung dieser Arbeit bestand in der Übertragung und Speicherung der Beschleunigungsdaten. Die Datenmengen waren dabei weniger kritisch, als die sehr kurz getakteten Zeiten zwischen den Übertragungen, da die Sensoren FIFOs besitzen, die regelmäßig ausgelesen werden müssen. Daher wurde beschlossen die beiden Beschleunigungssensoren auf zwei einzelne STM32F412G Mikrocontroller aufzuteilen. Das System, das den ADXL355 ansteuert, dient dabei als Master für das Slavesystem, welches den IIS3DWB beinhaltet. Die Geschwindigkeit der SPI-Kommunikation konnte außerdem erheblich durch den Einsatz von Direct Memory Access erhöht werden. Eine weitere Hürde bildeten die sehr langsamen und unregelmäßigen Zugriffszeiten der microSD-Karten. Diese Problematik konnte durch die Nutzung der richtigen Speicherkarten, Implementierung eines Ringpuffers und weitere Optimierungen minimiert werden.

Es gibt nun mehrere Möglichkeiten das Messsystem weiter auszubauen. Der interessanteste Punkt hierbei wäre die Vernetzung des bisher entwickelten Messsystems mit weiteren baugleichen Systemen, um so an mehreren Positionen einer Brücke Daten aufzuzeichnen. Es wurden vom Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik der Universität Bayreuth bereits gleichzeitige Messungen mit dem ADXL355 an verschiedenen Punkten einer Autobahnbrücke durchgeführt, jedoch liefen die Aufzeichnungen nach einer Weile nichtmehr synchron zwischen den einzelnen Messsystemen. Dieses Phänomen ist auf den unterschiedlichen zeitlichen Drift der

Mikrocontroller zurückzuführen. Um das Problem zu beheben, wurden bereits im Rahmen des Projekts Untersuchungen zu unterschiedlichen Methoden der kabellosen Kommunikation umgesetzt. Dabei stellte sich LoRa (von „long range“) als vielversprechende Funktechnologie für diesen Einsatz heraus [17]. LoRa könnte relativ einfach in das Mastersystem integriert werden. Eine Kommunikation zwischen den Messsystemen würde beispielsweise während der Neusynchronisation des Master-Mikrocontrollers stattfinden. Durch den weitgehend konstanten Zeitversatz mittels LoRa zwischen Sender und Empfänger [17], könnte die Laufzeit automatisiert berechnet und bei der Synchronisation der Systeme berücksichtigt werden.

Sollte eine Vernetzung über LoRa in das Messsystem integriert werden, wäre es außerdem sinnvoll eine benutzerfreundliche Steuerung mithilfe des Displays und Joysticks in das Mastersystem zu integrieren. So ist es möglich ein Messsystem als „Taktgeber“ auszuwählen, ohne speziellen Code auf den Mikrocontroller aufspielen zu müssen. Mit einer Steuerung könnte man außerdem beispielsweise die Anzahl der Messsysteme angeben, die Aufzeichnungsdauer pro Binärdatei ändern oder auch das Datum und die Startuhrzeit eintragen. Letztere können in die RTC integriert werden und als Zeitstempel an den Anfang jeder Binärdatei geschrieben werden, was bei der späteren Datenverwaltung behilflich wäre. Zusätzlich zum Zeitstempel wären Angaben der Temperatur und Luftfeuchtigkeit sinnvoll, da sich das Baumaterial und damit auch das Resonanzverhalten der Brücke mit Schwankungen der Umgebungsverhältnisse verändern. Beide Beschleunigungssensoren besitzen zwar bereits integrierte Temperatursensoren, allerdings sind diese recht unpräzise und unzuverlässig. Es empfiehlt sich also dedizierte Sensoren für Temperatur und Feuchtigkeit dem Messsystem hinzuzufügen.

Weiterhin könnte die Speicherung der Daten modifiziert werden, um einen noch stabileren Messbetrieb zu gewährleisten. Der STM32F412G besitzt die Möglichkeit für mehrere parallele DMA-Streams. Somit ist es auch möglich, dass zeitgleich eine SPI-Übertragung mit DMA und eine SDIO-Kommunikation mit DMA stattfinden. Eine sinnvolle Weiterentwicklung wäre also das Beschreiben der microSD-Karten mittels DMA, wofür die FatFs Implementation von STMicroelectronics angepasst werden müsste. Alternativ könnten die Daten, statt direkt auf eine microSD-Karte, zwischenzeitlich auf einen NOR-Flash Speicherchip geschrieben werden und anschließend gesammelt auf die microSD-Karte übertragen werden. So könnten Daten zuverlässig während des Messbetriebs gespeichert werden, allerdings würden während der Übertragung auf die SD-Karte keine weiteren Messdaten aufgenommen werden können. Das bedeutet, die Gesamtdatenrate über einem längeren Zeitraum wäre durch die Zwischenspeicherung auf NOR-Flash geringer.

Zusätzlich könnte die Möglichkeit untersucht werden die Sensoren an nur einem Mikrocontroller zu betreiben. In Frage käme beispielsweise ein STM32H747I-DISCO, da dieser sowohl über einen Arm Cortex-M7, als auch über einen Arm Cortex-M4 Prozessorkern verfügt. So könnten möglicherweise die Aufgaben des Auslesens der FIFOs und der Speicherung der Messdaten auf einer microSD-Karte aufgeteilt werden. Mit dem performanteren System könnten eventuell sogar noch weitere Sensoren zum System hinzugefügt werden, beispielsweise Ultraschallmikrofone.

Für den Einsatz an einer Brücke sollte vorerst noch der Energiebedarf des Messsystems ermittelt und gegebenenfalls weiter optimiert werden, da als Stromquelle lediglich Akkus verwendet werden können. Schlussendlich müssen die neu gewonnenen Messdaten durch das Hinzukommen des IIS3DWB analysiert werden und auf ihre Brauchbarkeit untersucht werden. Hierbei sollten auch Erkenntnisse über die Limitationen des Systems gewonnen werden können. So kann das Messsystem weiter angepasst und kalibriert werden, um das Ziel einer aussagekräftigen und verlässlichen Zustandsdiagnose von Brückenbauwerken und anderen Gebäudestrukturen zu erreichen.