

Entwicklung eines kostengünstigen, IoT-fähigen Shaketable-Systems

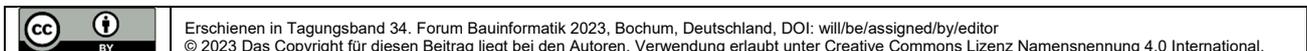
Carlos Chillón Geck, Thamer Al-Zuriqat, Patricia Peralta Abadia und Kosmas Dragos

Institut für Digitales und Autonomes Bauen, Technische Universität Hamburg, Blohmstraße 15,
21079 Hamburg, Deutschland

E-Mail: thamer.al-zuriqat@tuhh.de

Abstract: Shaketables sind nützliche Hilfsmittel zur Validierung von Bauwerksmonitoringsystemen. Kommerziell erhältliche Shaketables sind jedoch meist teuer und für Forschungs- und Lehrinrichtungen oft kaum finanzierbar. Darüber hinaus führt der zunehmende Online-Unterricht, der durch die COVID-19-Pandemie stärker in den Vordergrund trat, dazu, dass Forschende und Studierende zur Durchführung von Experimenten nicht physisch in Labore kommen können. Deshalb wird in diesem Beitrag die Implementierung und Validierung eines kostengünstigen, Internet of Things (IoT)-fähigen, Shaketable-Systems (IoT-STS) vorgestellt. Das IoT-STS wurde aus handelsüblichen Komponenten zusammengesetzt und enthält eine Mobile App, um Zeitverläufe von Verschiebungen über einen IoT-basierten Cloud-Service an einen Mikroprozessor zu senden, der über Aktuatoren Schwingungen auf den Shaketable ausübt. Umgekehrt sendet der Mikroprozessor die ausgegebenen Verschiebungsdaten, die die vom Shaketable reproduzierte Bewegung repräsentieren, an die Cloud für einen Fernzugriff und die Visualisierung. Zur Validierung des IoT-STS werden die über die Mobile App eingegebenen Zeitverläufe der Verschiebung mit den von einem Potentiometer aufgezeichneten Ausgangsverschiebungsdaten verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte IoT-STS Schwingungen präzise auf Teststrukturen übertragen kann, per Fernzugriff nutzbar ist und somit insbesondere vor dem Hintergrund des seit der COVID-19-Pandemie zugenommenen Online-Unterrichts ein wertvoller Mehrwert ist.

Keywords: Bauwerksmonitoring; Shaketables; Internet of Things (IoT); COVID-19; Mobile Apps



1 Einleitung

Bauliche Infrastruktur ist einer Vielzahl von dynamischen Einflüssen ausgesetzt, wie z. B. Belastungen durch Wind, Verkehr oder Erdbeben [1]. Schwingungen können je nach Intensität zu einem raschen Verlust der Integrität baulicher Infrastruktur führen oder die Zustandsverschlechterung durch Ermüdung beschleunigen [2]. Die Auswirkungen dynamischer

Anregungen auf Infrastrukturbauwerke haben dazu veranlasst, das dynamische Verhalten von Bauwerken in Labortests mit Teststrukturen und Shaketables zu untersuchen [3]. In diesem Zusammenhang haben Forschungs- aber auch Lehrinstitute Laborversuche an Shaketables in ihre Forschungsansätze und Lehrveranstaltungen integriert, insbesondere zur Validierung von Structural Health Monitoring (SHM)-Systemen, die typischerweise zum Monitoring des dynamischen Verhaltens von Bauwerken eingesetzt werden [4]. Die Kosten für handelsübliche Shaketables können jedoch relativ hoch sein, so dass Shaketables für Forschungs- und Lehrinstituten schwierig finanzierbar sind. Darüber hinaus wird der Bedarf an Lösungen für Fernversuche in Laboren aufgrund von Home Office an Forschungs- und Lehrinstituten infolge der COVID-19-Pandemie immer größer [5]. Deshalb können Forschungs- und Lehrinstitute von der Verwendung kostengünstiger Shaketables mit Internet-of-Things (IoT)-Funktionen profitieren.

Beispielsweise wurde in [6] über die Entwicklung preiswerter Shaketable berichtet. In [7] haben die Autor/innen einen kostengünstigen Shaketable zu einem Gesamtpreis von 650 EUR auf Arduino-Basis entwickelt, der in der Lage ist, Strukturen mit einem Gewicht von bis zu 120 kg mit einer maximalen Frequenz von 17 Hz zu erregen. In [8] wurde ein preiswerter Shaketable zum Preis von 2500 EUR vorgestellt, der mit einem rückgekoppelten Steuerungssystem ausgestattet ist, das präzise Verschiebungen des Shaketables in Echtzeit gewährleistet. Andere Studien haben auch über Ansätze zur Entwicklung von Shaketables mit Fernsteuerungsmöglichkeiten berichtet, darunter ferngesteuerte Shaketables für online Lehrveranstaltungen [9], Frameworks für ferngesteuerte Shaketables [10] und programmierbare Shaketables mit IoT-basierten Schnittstellen [11]. Ungeachtet der vorgenannten Arbeiten gab es bislang nur wenige Ansätze für IoT-fähige, kostengünstige Shaketables. In diesem Beitrag wird die Implementierung und Validierung eines kostengünstigen, IoT-fähigen Shaketable-Systems (IoT-STS) vorgestellt. Zunächst wird die Implementierung des IoT-STS beschrieben, gefolgt von der Validierung. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung und Schlussfolgerungen sowie einem Ausblick auf zukünftige Forschung.

2 Implementierung des kostengünstigen IoT-STS

Die schematische Darstellung der IoT-Architektur ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Architektur wurde in früheren Arbeiten [12] bereits im Detail vorgestellt und umfasst (i) eine Anwendungsschicht, (ii) eine Verarbeitungsschicht, (iii) eine physische Schicht und (iv) eine Sicherheitsschicht. Die *Anwendungsschicht* unterstützt die Fernsteuerung und Datenvisualisierung über Benutzerschnittstellen, die von Mobile Apps unterstützt werden. Die *Verarbeitungsschicht* umfasst einen IoT-basierten Cloud-Dienst, der als Datenbank für die Analyse, Speicherung und den Abruf von Daten dient. Die *physische Schicht* umfasst den IoT-fähigen, kostengünstigen Shaketable, der einen Mikroprozessor, ein Gateway mit IoT-Kommunikationsfunktionen sowie Sensoren und Aktoren enthält, die mit der realen Welt interagieren. Die *Sicherheitsschicht* bietet Authentifizierungs- und Verschlüsselungsprotokolle zur Einhaltung der Datensicherheitsanforderungen.

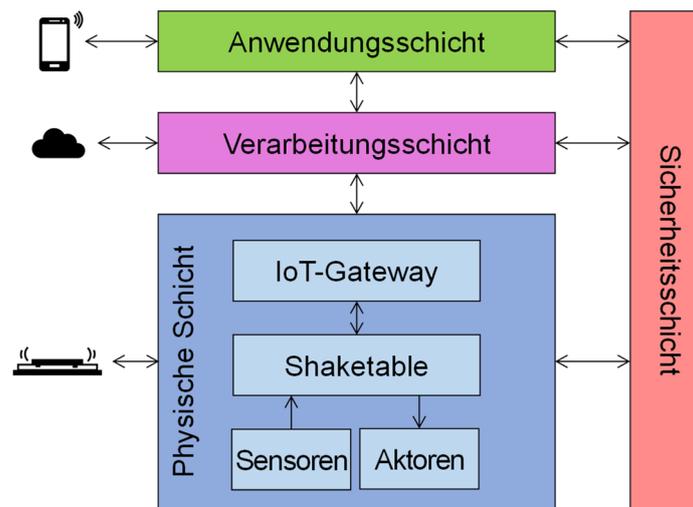


Abbildung 1: Vierschichtige IoT-Architektur des IoT-STS

Die Komponenten des IoT-STS sind in Abbildung 2 dargestellt, die das fertig implementierte IoT-STS zeigt. Das IoT-STS besteht aus einem ESP32-Mikroprozessor, der die Erregungen über einen Kontrollalgorithmus steuert, sowie aus Sensoren bzw. Aktoren und den Elementen des IoT-fähigen, kostengünstigen Shaketables, zu denen ein Schrittmotor gehört, eine lineare Kugelumlaufspindel, eine bewegliche Plattform mit einer Tischplatte, die entlang zweier linearer Führungsschienen, ein Treiber und die Stromversorgung gleiten. Insgesamt wurden für den Bau des kostengünstigen IoT-STS 15 Teile gekauft, deren Gesamtkosten sich auf 341,83 EUR belaufen.

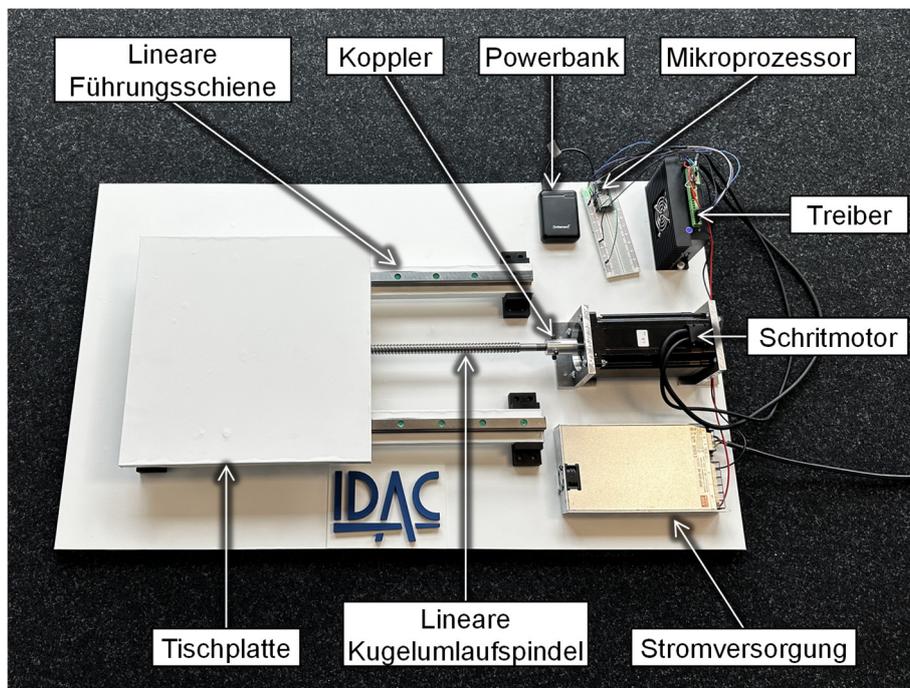


Abbildung 2: Hardwarekomponenten des Shaketables als Teil der physischen Schicht des IoT-STS

Der in den ESP32-Mikroprozessor eingebettete Steueralgorithmus ruft die Anregungsparameter zur Erzeugung periodischer und zufälliger Anregungen aus der Datenbank des IoT-basierten Cloud-Dienstes ab. Die Parameter für periodische Schwingungen sind Amplitude A , Winkelfrequenz ω , Zeitschritt Δt und Gesamtdauer T_{tot} , während die Parameter für zufällige Schwingungen $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n]^T$ sind. Technisch gesehen werden die Parameter als Textdateien zusammen mit dem Zeitschritt Δt und der Gesamtdauer T_{tot} hochgeladen. Um die Schwingungen zu reproduzieren, wird in jedem Zeitschritt ($\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$) die Verschiebung Δx_i in eine Drehbewegung umgewandelt, die vom Schrittmotor erzeugt wird und von der Art der Anregung abhängt. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Steuerungsalgorithmus für periodische (sinusförmige) Erregungen, wobei die Verschiebung Δx_i einer periodischen Erregung mit einer Amplitude A und einer Frequenz ω durch Gleichung 1 berechnet wird.

$$\Delta x_n = A(\sin 2\pi\omega t_i - \sin 2\pi\omega t_{i-1}) \quad (1)$$

Die für die Erzeugung von Δx_i notwendige Drehbewegung entspricht der Anzahl der elektrischen Impulse NP , die vom Mikrocontroller an den Schrittmotor gesendet werden. Der Wert NP ist definiert als das Verhältnis der Verschiebung Δx_i zur Einheitsverschiebung des Shaketables Δx_{unit} ($NP = \Delta x_i / \Delta x_{unit}$). Die Einheitsverschiebung Δx_{unit} ist die Strecke, die die lineare Kugelumlaufspindel zurücklegt, wenn ein Impuls an den Schrittmotor gesendet wird. Für das IoT-STS gilt: $\Delta x_{unit} = 0,0125$ mm. Der Schrittmotor wird so eingestellt, dass er sich entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn dreht, je nach Vorzeichen der Verschiebung Δx_i . Die jedem Impuls entsprechende Zeitverzögerung t_d wird durch das Verhältnis des Zeitschritts Δt_i zur Anzahl der Impulse geschätzt ($t_d = \Delta t_i / NP$). Um die Verschiebung Δx_i zu erzeugen, sendet der Mikrocontroller die elektrischen NP -Impulse nacheinander an den Schrittmotor und sorgt dabei für eine ausreichende Zeitverzögerung zwischen den aufeinanderfolgenden Impulsen, um die Zeit t_d einzuhalten. Nachdem alle NP -Impulse gesendet wurden, wird der tatsächliche Zeitfortschritt mit dem Zeitschritt Δt_i verglichen und, falls erforderlich, eine zusätzliche Verzögerung angewendet. Wenn der Zeitschritt korrekt eingehalten wird, fährt der Steuerungsalgorithmus mit der nächsten Verschiebung Δx_{i+1} fort.

Die Mobile App ist in der Programmiersprache Java implementiert. Benutzer/innen müssen sich anmelden, um den Shaketable aus der Ferne bedienen zu können. Nach der Anmeldung bietet die Anwendung Optionen zur Kalibrierung des Shaketables und zur Definition von Anregungsparametern, die an den Mikroprozessor gesendet werden. Die Anwendung ist mit der Datenbank des IoT-basierten Cloud-Dienstes verbunden, der es der Anwendung ermöglicht, Anregungsparameter an den Mikroprozessor zu senden und vom Mikroprozessor ausgegebene Verschiebungsdaten zu empfangen und zu visualisieren. Der nächste Abschnitt beschreibt die Validierungstests und erörtert die Ergebnisse der Verwendung des kostengünstigen IoT-STS.

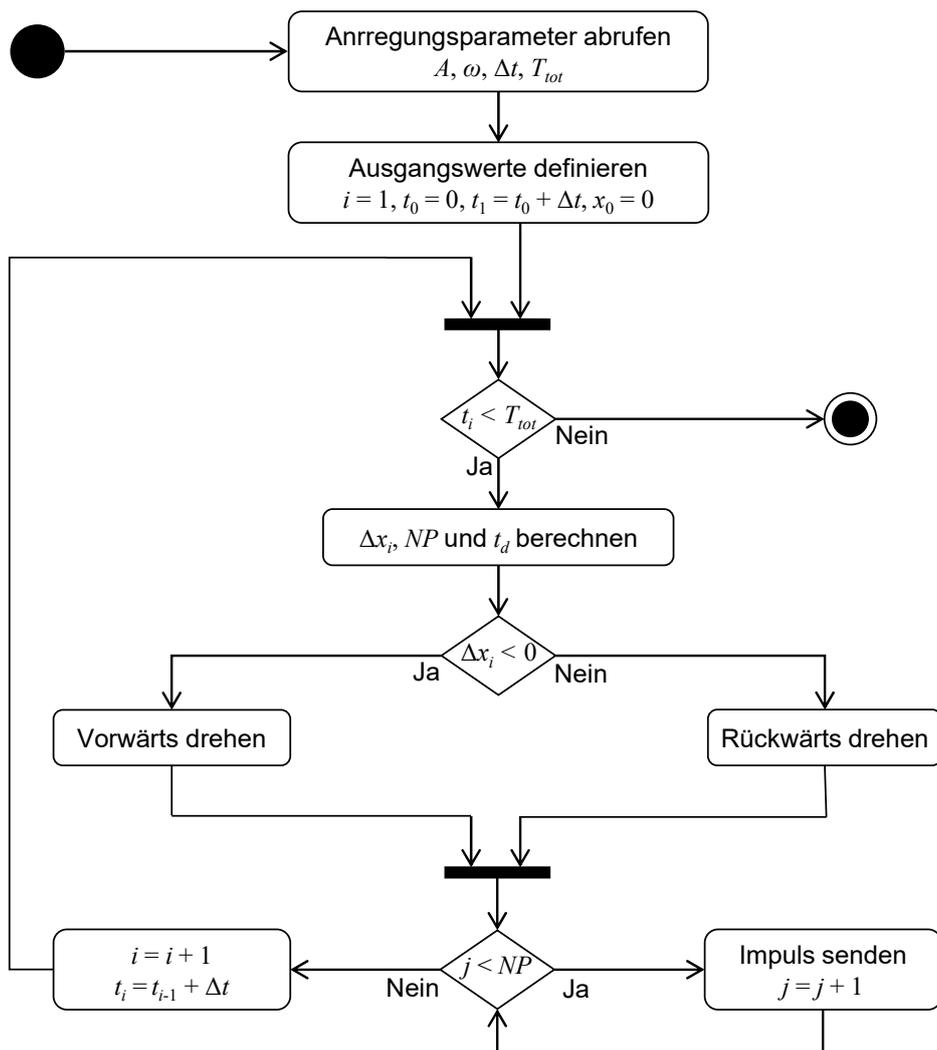


Abbildung 3: Der in den Mikroprozessor des IoT-STS eingebettete Steuerungsalgorithmus.

3 Validierungstests des IoT-STS

In diesem Abschnitt wird das IoT-STS durch zwei Tests validiert. Im ersten Test wird die Fähigkeit des kostengünstigen Shaketable als Teil des IoT-STS, periodische Schwingungen zu reproduzieren, für eine breite Palette von Amplituden und Frequenzen validiert. Die in dieser Studie getesteten Amplituden reichen von 1 mm bis 20 mm und die Frequenzen von 1 Hz bis 5 Hz. Die Ergebnisse, die mit den periodischen Schwingungen erzielt wurden, sind in Abbildung 4 für zwei Kombinationen von Amplituden und Frequenzen dargestellt. Wenn die Frequenz variiert (unter Berücksichtigung einer maximalen Amplitude von 20 mm), kann der Shaketable periodische Erregungen bis zu 5 Hz genau reproduzieren. Insbesondere bei einer Anregungsfrequenz von 5 Hz beträgt die Frequenz der ausgegebenen Verschiebungsdaten 4,99 Hz und weist einen Fehler von 0,2 % auf. Wenn die Amplitude bei einer konstanten Frequenz von 2 Hz variiert, reproduziert der Shaketable eine

maximale Amplitude von 15 mm mit einem Fehler von 3 % zwischen der Anregungsfrequenz und der Frequenz der ausgegebenen Verschiebungsdaten.

Im zweiten Test wird die Fähigkeit des IoT-STS-Systems, zufällige Erregungen zu reproduzieren, validiert. Die Parameter der zufälligen Erregung werden an den Shaketable gesendet. Sie werden durch seismische Verschiebungen repräsentiert, die aus einer Aufzeichnung der Bodenbewegung (GM) des Erdbebens von 2015 in Coquimbo (Chile) gewonnen wurden. Bevor die zufälligen Erregungsparameter an den Mikroprozessor gesendet werden, wird die GM-Aufzeichnung skaliert, um die Verschiebungen an die Einstellungen des Shaketables anzupassen. Die Verschiebungen im GM werden um den Faktor 6 skaliert, so dass zwei Testfälle entstehen: (i) ohne Skalierung der Zeit und (ii) mit einer Skalierung der Zeit um den Faktor 36. Die Ergebnisse der Zufallsanregungen sind in Abbildung 5 dargestellt. Sie zeigen, dass die Zufallsanregung genau reproduziert wird, wenn die Zeit nicht skaliert wird. Wenn die Zeit hingegen skaliert wird, ist eine kumulative Diskrepanz zu beobachten. Im Mikroprozessor müssen die Pulse NP und die Verzögerung t_d natürliche Zahlen sein und werden daher "abgeschnitten". Beim abschneiden werden NP und t_d auf die nächstliegenden positiven ganzen Zahlen abgerundet. Infolgedessen ist die kumulative Diskrepanz auf die kleinen Inkremente in der Verschiebung und der Zeit zurückzuführen, die von den abgeschnittenen Werten von t_d und NP nicht richtig erfasst werden.

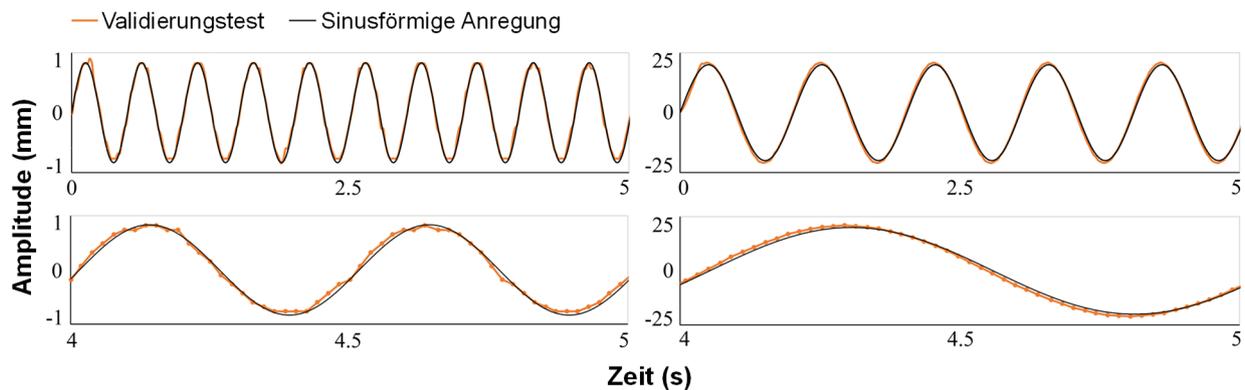


Abbildung 4: Ergebnisse des ersten Validierungstests (periodische Erregungen) für 2 Hz mit 1 mm (links) und für 1 Hz mit 20 mm (rechts)

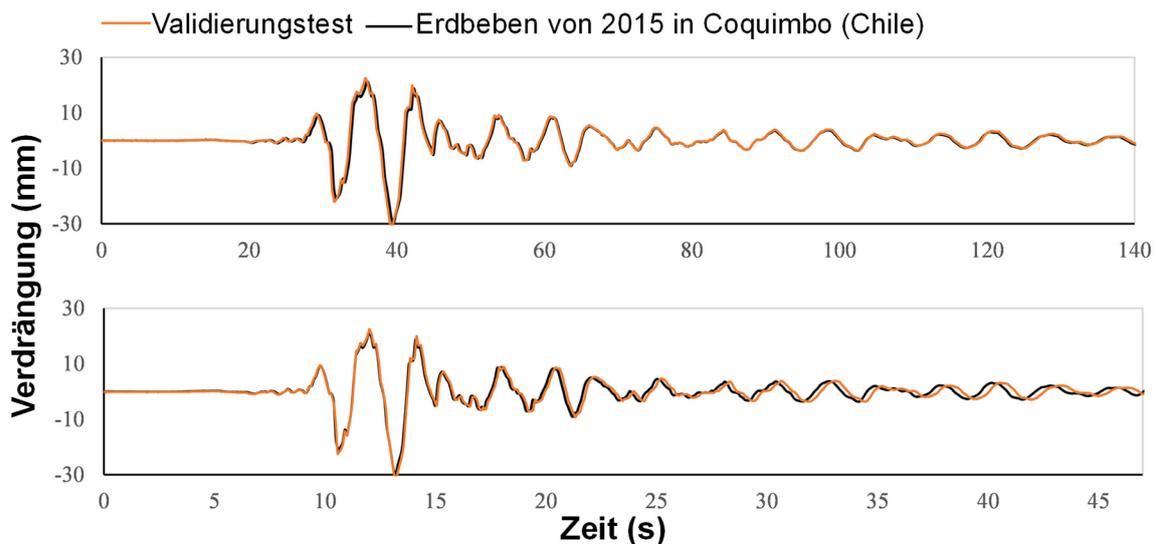


Abbildung 5: Ergebnisse des zweiten Validierungstests (Zufallsanregungen), ohne Skalierungszeit (oben) und mit Skalierungszeit (unten).

4 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Beitrag wurde die Implementierung und Validierung eines kostengünstigen, IoT-fähigen Shaketable-Systems (IoT-STs) vorgestellt. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen für kostengünstige Shaketables verwendet das IoT-STs handelsübliche Komponenten und ermöglicht den Fernzugriff auf den Shaketable mithilfe von IoT-Technologien. Der Shaketable besteht aus einem ESP32-Mikroprozessor, einem Schrittmotor mit einem Schritt-Servo-Treiber, einer linearen Kugelumlaufspindel und einer beweglichen Plattform, auf der Teststrukturen montiert werden können. Im Gegensatz zu kommerziellen Shaketables liegen die Gesamtkosten für alle Komponenten unter 350 EUR. In den ESP32-Mikroprozessor wurde ein Steuerungsalgorithmus eingebettet, der den Shaketable mit benutzerdefinierten Parametern anregt. Die Erregungsparameter werden von der Mobile App über einen IoT-basierten Cloud-Service an den ESP32-Mikroprozessor gesendet. Dieser Cloud-Dienst wird auch für den Empfang und die Visualisierung der vom Mikroprozessor ausgegebenen Verschiebungsdaten verwendet, die der vom Shaketable reproduzierten Bewegung entsprechen. Die Validierungstests haben gezeigt, dass der Shaketable in der Lage ist, periodische und zufällige Erregungen zu erzeugen, und dass das IoT-STs über IoT-Technologien ferngesteuert werden kann. Zukünftige Arbeiten könnten sich auf die Kopplung des Shaketables mit einem kostengünstigen Motorsteuerungssystem konzentrieren.

References

- [1] K. Dragos and K. Smarsly, "Decentralized infrastructure health monitoring using embedded computing in wireless sensor networks," in *Dynamic Response of Infrastructure to Environmentally Induced Loads*, A. Sextos and G. D. Manolis, G. D., Eds., Cham: Springer International Publishing, pp. 183-201, 2017.
- [2] K. Smarsly, D. Hartmann, and K. H. Law, "Structural Health Monitoring of Wind Turbines Observed by Autonomous Software Components – 2nd Level Monitoring," In *Proceedings of the 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Moscow, Russia, 06/27/2012.
- [3] J. P. Lynch, and K. J. Loh, "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring," *Shock and Vibration Digest*, 38(2), pp. 91-128, 2006.
- [4] T. Al-Zuriqat, C. Chillón Geck, K. Dragos, and K. Smarsly, "Adaptive fault diagnosis for simultaneous sensor faults in structural health monitoring systems," *Infrastructures*, 8(3), p. 39, 2023.
- [5] K. Dragos, G. D. Manolis, and K. Smarsly, "Automated wireless structural health monitoring and control using tuned liquid column dampers," In *Proceedings of ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Crete, Greece, 06/24/2019.
- [6] C. R. Farrar and K. Worden, *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2012.
- [7] E. Damcı and Ç. Şekerci, "Development of a low-cost single-axis shake table based on arduino," *Experimental Techniques*, 43(2), pp. 179-198, 2019.
- [8] A. Danish, N. Ahmad, and U. Salim, "Manufacturing and performance of an economical 1-D shake table," *Civil Engineering Journal*, 5(9), pp. 2019-2028, 2019.
- [9] A. Maxwell, Z. Jiang, and C. Chen, "Mobile learning for undergraduate course through interactive apps and a novel mobile shake table laboratory," In *Proceedings of the 2017 ASEE Annual Conference and Exposition*, Columbus, Ohio, USA, 04/06/2017.
- [10] S. Wirgau, A. Gupta A., and V. Matzen, "Internet-enabled remote observation and control of a shake table experiment," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 20(4), pp. 271-280, 2006.
- [11] H. Tariq, F. Touati, M. A. E. Al-Hitmi, D. Crescini, and A. B. Manouer, "Design and implementation of programmable multi-parametric 4-degrees of freedom seismic waves ground motion simulation IoT platform," In *Proceedings of the 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Tangier, Morocco, 06/24/2019.
- [12] J. J. Peralta Abadía and K. Smarsly, "An introduction and systematic review on machine learning for smart environments/cities: An IoT approach," in *Intelligent Systems Reference Library*, G. Marques, A. González-Briones, and J. M. Molina Lopez, Eds. Cham: Springer International Publishing, pp 1-23, 2022.