

Technischer Bericht mit fachlicher Stellungnahme
Nr. 2023-BE-82

- Auftraggeber:** CEU GmbH – CEU Central European University Private University
Quellenstraße 51
1100 Vienna
Austria
(nachfolgend Auftraggeber genannt)
- Auftragnehmer** Dr. Ing. Kerstin Kracht
Freiberufliche Ingenieurin für Schwingungstechnik & Strukturdynamik
Markgrafenweg 1
19230 Toddin
Germany
(nachfolgend Auftragnehmer genannt)
- Involvierte Personen:** Prof. Khadija von Zinnenburg Carroll (Projektsteuerung seitens Auftraggeber)
Verena Melgarejo Weinandt (Projektassistenz seitens Auftraggeber)
Dr. Ing. Kerstin Kracht (Auftragnehmer)
Dipl. Ing. Kerstin Tegeler (Beratende Ingenieurin seitens Auftragnehmer)
- Projekt:** Entwicklung einer schwingungsoptimierten Transportkiste für den
„Federkopfschmuck“, der aktuell am Weltmuseum Wien, Österreich, ausgestellt
wird.

Liste der Revisionen:

Revision	Datum	Ursache
	07.09.2025	Original

Aufgabenstellung:

Zu entwickeln ist eine schwingungsoptimierte Transportkiste für den „Federkopfschmuck“, der aktuell am Weltmuseum Wien, Österreich, ausgestellt wird. Diese technische Entwicklung soll auf der Basis der schwingungsoptimierten Schutzverpackung, mit der das „Tahitianische Trauerkostüm“ des The British Museum, London, im Jahr 2023 erfolgreich von London nach Tahiti reiste, erfolgen. Des Weiteren sind die Resultate der abschließenden Hardwaretests kritisch unter Bezugnahme des Berichtes MB11JWMN03 von Prof. Johann Wassermann, TU Wien datiert auf den 31. März 2012 zu erörtern.

Die Entwicklung und Testung der Transportkiste wurden erfolgreich durchgeführt. Die fachliche Stellungnahme befindet sich am Ende dieses Berichtes.

Toddin, d. 07.09.2025



Dr.-Ing. Kerstin Kracht

Inhalt

1. Hintergrund.....	3
2. Objekt	3
3. Technischer Entwicklungsprozess der schwingungsoptimierten Transportkiste	4
4. Durchgeführte Testmessungen.....	6
4.1 Übersicht durchgeführte Messungen	6
3.2 Verwendete Geräte.....	6
3.3 Messaufbau.....	7
3.4 Messergebnisse	7
5. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	8
6. Fachliche Stellungnahme	8

1. Hintergrund

Es ist umstritten, wie und wann der „Federkopfschmuck“, der aktuell im Weltmuseum Wien ausgestellt wird, Mexiko verlassen hat und nach Österreich kam. Da dieser Federkopfschmuck das letzte bekannte Exemplar seiner Art weltweit ist, wird der Wunsch gehegt, dieses Objekt auch in seinem Herkunftsland Mexiko zu zeigen. Ein Forschungsprojekt, an dem Wissenschaftler beider betreffender Nationen, Österreich und Mexiko, beteiligt waren und in den Jahren 2010 bis 2012 durchgeführt wurde, erörterte die Transportierfähigkeit des Objektes.

In Bezug auf die Transportierfähigkeit des Objektes wird auf der Internetseite des Weltmuseums Wien (<https://www.weltmuseumwien.at/der-federkopfschmuck/#transport>, letzter Aufruf: 07.09.2025) geschrieben, dass sich im Laufe des besagten Projektes auf „[...] eine Beschleunigungsintensität, die der Federkopfschmuck ohne unannehmbares Schadensrisiko aushalten könnte [...]“, geeinigt wurde. „[...] Mexiko beauftragte Prof. Dr. Wassermann (TU Wien, Institut für Mechanik und Mechatronik) zu ermitteln, ob ein Transport des Kopfschmucks ohne Überschreitung dieses Wertes möglich wäre. Er stellte fest, dass der Transport mit den üblichen Transportmitteln für internationale Leihgaben, dem Kraftfahrzeug und dem Flugzeug, praktisch nicht ohne Schadensrisiko durchzuführen wäre. [...]“. Hieraus schließt das Weltmuseum: „[...] Im Falle des Kopfschmucks ist eine geeignete Transportsicherung aufgrund seiner Konstruktion und seiner Materialien praktisch nicht umsetzbar. [...]“.

Unterschiedliche Personen, Vereinigungen und Institutionen hegen Zweifel an diesem Urteil. Einerseits werden die auferlegten Schwingungsgrenzwerte nicht umfassend und eindeutig beschrieben und begründet. Andererseits hat sich die Transportkistenteknologie in den vergangenen zehn Jahren in Bezug auf die Schwingungsisolation sehr stark verbessert, so dass eine Überprüfung des Urteils der Museumswissenschaftler angebracht erscheint.

2. Objekt

Grundsätzlich sind für die Entwicklung schwingungsoptimierter Transportkisten für Kunstwerke und Kulturobjekte Informationen über das betreffende Objekt und die Anforderungen der Restauratoren für den Erhalt des Objektes essenziell. In der Regel arbeiten die Entwicklungsingenieure sehr eng mit den zuständigen Restauratoren zusammen.

Im vorliegenden Projekt konnten trotz mehrmaliger Versuche des Auftraggebers, die erforderlichen Informationen zu ermitteln und Kontakt mit den Restauratoren herzustellen, lediglich die folgenden Daten (Zitat aus der Email von Jonathan Fine an Khadija von Zinnenburg Carroll vom 18.7.2023):

- „[...] 1. Maße des Supports: 192,5 x 152,5 cm
- 2. Gesamtgewicht von Support und Objekt: 27,9876 kg
- 3. Der Penacho liegt auf einer Fläche die 23° zur Ebene angewinkelt ist. [...]“

erhoben werden. Diese werden in Abbildung 1 veranschaulicht.

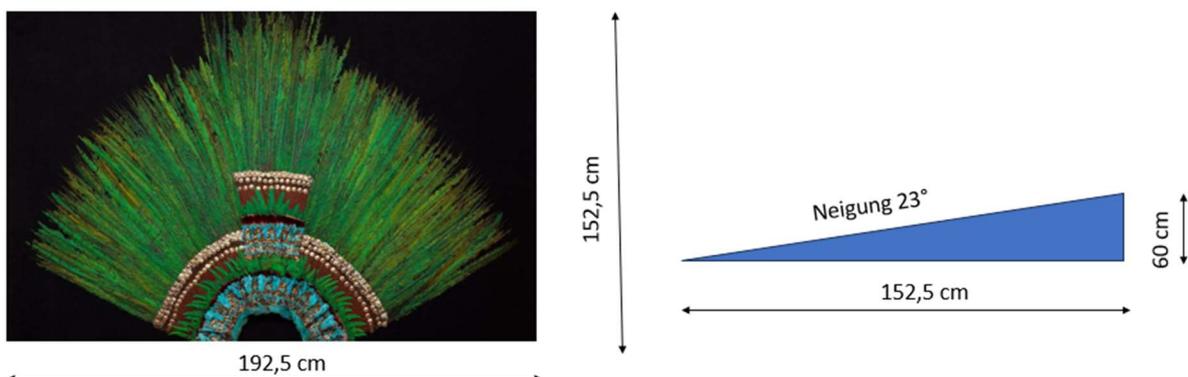


Abbildung 1: „Federkopfschmuck“, seine Abmaße und Geometrie der Unterlage

Wichtige tiefergehende Informationen über den Zustand und begründete Anforderungen für den Erhalt des Objektes sowie aktuelle Messdaten zur Charakterisierung der Schwingungsexposition des Objektes während der Ausstellung konnten nicht oder nicht aus erster Hand ermittelt werden. Daher basieren die Entwicklungen und Erörterungen in diesem Projekt auf den obigen Angaben, dem Bericht MB11JWMN03 von Prof. Johann Wassermann, TU Wien datiert auf den 31. März 2012 sowie auf den Informationen, die auf der Internetseite des Weltmuseum Wien (<https://www.weltmuseumwien.at/der-federkopfschmuck/>, letzter Aufruf: 07.09.2025) zur Verfügung gestellt werden.

Der Internetseite ist zu entnehmen, dass der prekäre Erhaltungszustand auf einen früheren Insektenbefall und dem typischen Abbau organischer Naturmaterialien über einen Zeitraum von 500 Jahren zurückzuführen ist. Ursache des fragilen Zustandes sei aber auch der grundsätzliche Aufbau des Kopfschmucks.

Mit u. a. apparativen Untersuchungen im Rahmen eines Projekts im Zeitraum 2010 – 2012 wurden erhebliche Schäden festgestellt. Beispielsweise wurden an den 374 langen Quetzalfedern des Kopfschmucks mehr als 170 Brüche dokumentiert. Außerdem haben einige Metallornamente das umgebende Material beschädigt sowie „[...] Als der Kopfschmuck für das mit modernsten Techniken durchgeführte Konservierungsprojekt von seiner Halterung genommen wurde, stellte man fest, dass fast 2.000 Federfragmente abgebrochen und auf der Halterung verblieben waren. [...]“.

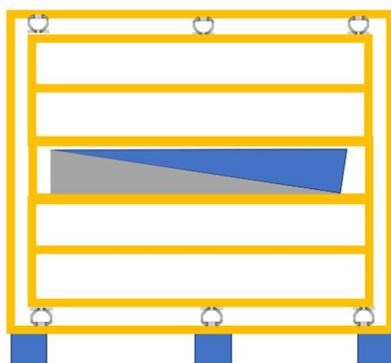
Dementsprechend wurde der Federkopfschmuck als ein äußerst fragiles Artefakt kategorisiert.

Dem Abschnitt 1 „Task“ des o. g. Berichtes von Prof. Wassermann ist zu entnehmen: „[...] During an informal meeting, held at the Museum for Ethnology (MVK) on January 30th 2012, it was decided to clarify the technical requirements for a safe aerial transport of this ancient, over 600 years old featherheaddress. It is required to reduce the affecting forces (e.g. due to acceleration, vibration and thrust) to a predefined maximal threshold. This value was defined to be 0.04 g (0.39 m/s²) in all 3 dimensions, as was measured in the exhibition hall on October 6th 2011. This value was accepted and found to be safe by both austrian and mexican collaboration partners.[...]“ werden folgende Werte für die maximalen Beträge der Beschleunigungsamplituden in den drei Raumrichtungen entnommen:

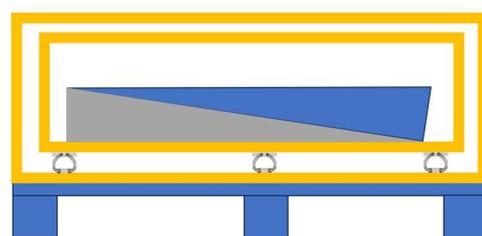
$$|a_{1_{max}}| = |a_{2_{max}}| = |a_{3_{max}}| = 0.04 \text{ g}, \quad (1)$$

3. Technischer Entwicklungsprozess der schwingungsoptimierten Transportkiste

Aufgrund des erfolgreichen Transportes des ähnlich fragilen Objektes „Tahitianische Trauerkostüm“ des The British Museum, London, sollte die schwingungsoptimierte Schutzverpackung für den Federkopfschmuck auf demjenigen Design basieren. Diese Überlegung führte zu dem Grunddesign, das in der Abbildung 2 (links) skizziert ist.



Basisdesign „Tahitianische Trauerkostüm“



Basisdesign „Federkopfschmuck“

Abb. 2: Grundlegende Designs für die schwingungsoptimierte Schutzverpackung des „Federkopfschmucks“

Aufgrund der größeren Abmaße des „Federkopfschmucks“ und der damit verbundenen Größe und Gewicht der Kiste wurde das Grundkonzept modifiziert. Das initiale Kistendesign für die Rechnungen und Parameteroptimierung ist in Abbildung 2 (rechts) gezeigt.

Die Außenkiste besitzt die Abmaße $B \times T \times H = 2278 \text{ mm} \times 1878 \text{ mm} \times 1558 \text{ mm}$ und die Innenkiste $B \times T \times H = 2050 \text{ mm} \times 1650 \text{ mm} \times 1330 \text{ mm}$. Eine wirksame Schwingungsisolation setzt Federelemente mit einer sehr steifen Ankopplung an die Umgebung voraus. Einfache Holzwände können die benötigte Steifheit kaum liefern. Aus diesem Grund wurden die Korpora der Innen- und Außenkiste aus Aluminiumprofilen konstruiert. Die Innenkiste wurde als Resultat eines Abwägungs- und Optimierungsprozesses mit Drahtseilfedern an die Außenkiste gekoppelt.

Gemäß dem in der Kistenentwicklung typischen Vorgehen wurden im nächsten Schritt die Parameter der Aluminiumprofile und Drahtseilfedern mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) optimiert (verwendete Software: Siemens SamceffField 17.1 und BOSS40). Allerdings musste an dieser Stelle der Entwicklung von Dummy-Zielwerten ausgegangen werden, da eine Diskussion der Anforderungen zum Schutz des Objektes bis heute nicht mit den für das Objekt verantwortlichen Personen (in der Regel der am Museum tätigen Restauratoren) geführt werden konnte.

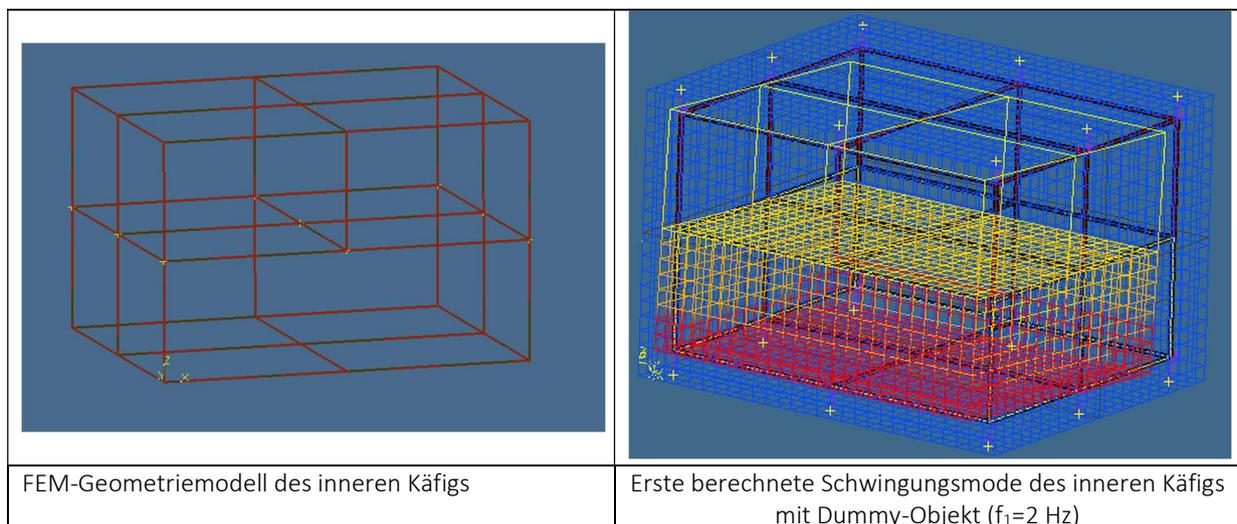


Abb. 3: Selektierte FEM-Geometrie und -Simulationsergebnis

Die Innenkiste ist ein Rahmenwerk aus Aluminiumprofilen (Abbildung 3, links), welches einem Käfig gleicht. Diese Struktur ist sehr steif, so dass diese durch die Restschwingungen, die die Federn passieren, nicht zu Deformationen angeregt wird.

Wie in der Abbildung 3 (rechts) dargestellt wird, ist die erste berechnete Schwingform eine Kippbewegung um die Schwerachse in Längsrichtung. Dementsprechend wird der „Federkopfschmuck“ in der Schwerebene des inneren Rahmenwerkes positioniert. Somit wird sichergestellt, dass sich das Objekt an dem Ort in der Kiste befindet, der am wenigsten schwingt.

Die Außenkiste besteht ebenfalls aus einem Rahmenwerk. Diese ist zum Schutz der innen befindlichen Systeme und für eine zusätzliche Aussteifung mit abnehmbaren Holzplatten beplankt. Die Gesamtkonstruktion der Außenkiste ist so steif, dass die größte Frequenz einer Starrkörpereigenmode der elastisch gelagerten Innenkiste maximal 20 % der kleinste Eigenfrequenz der Außenkiste beträgt. Hierfür sorgen insgesamt 8 Drahtseilfedern (Willbrandt Typ SX 6-73-85-78), die die innere Kiste mit Dummy-Objekt „schwebend“ in der Außenkiste lagern.

Die beschriebene schwingungsoptimierte Schutzverpackung für den „Federkopfschmuck“ wurde von Winter Art Service in Wien gebaut. Das Produkt wird in Abbildung 4 gezeigt.

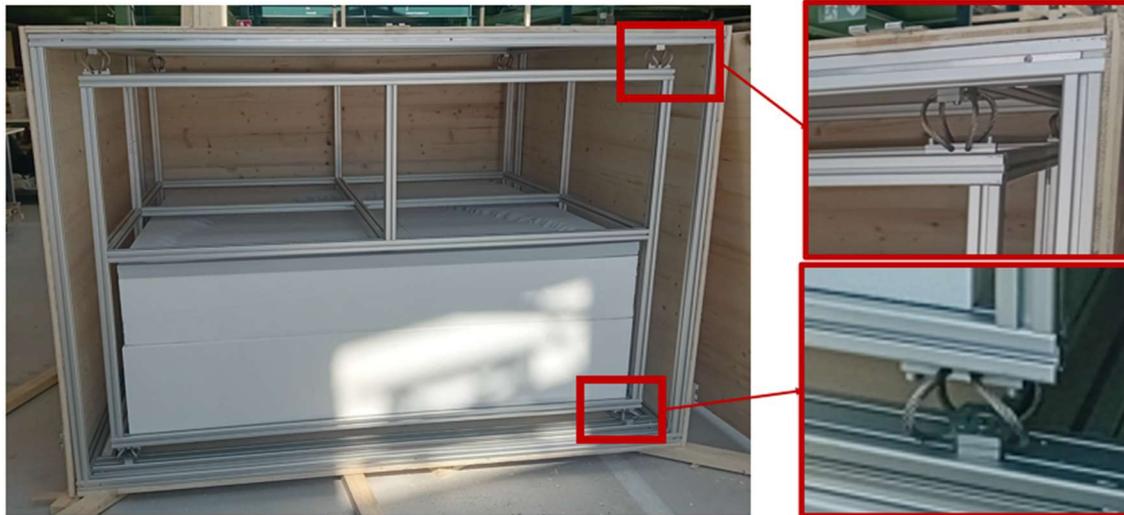


Abb. 4: Realisierte schwingungsoptimierte Schutzverpackung

4. Durchgeführte Testmessungen

Verpackungen werden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit mit physikalischen Transportsimulationen und Falltest getestet. Diese Tests sind in Richtlinien beschrieben. Ein Beispiel hierfür ist die ASTM 4169D. In diesem Projekt wurde im Fall der Tauglichkeitstest auf die Schwingungsverhalten der Innenkiste im Vergleich zum Schwingungsverhalten der Außenkiste fokussiert.

4.1 Übersicht durchgeführte Messungen

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen sind in Tabelle 1 dokumentiert.

Nr. der Messung	Art der Messung
1	Langsamere Fahrt mit dem Gabelstapler
2	Schnellere Fahrt mit dem Gabelstapler (inkl. Fahrt über Bodenwellen)
3	Vorsichtiges Absetzen der Kiste mit dem Gabelstapler
4	Sehr schnelles Absetzen der Kiste mit dem Gabelstapler

Tabelle 1: Durchgeführte Tests

3.2 Verwendete Geräte

In Tabelle 2 sind die für die Schwingungsmessungen verwendeten Messgeräte und Software aufgelistet.

Bezeichnung	Anzahl	Spannungsproportionale physikalische Größe	Hersteller und Typ
Triaxialer Accelerometer	2	Beschleunigung	PCB-356A16
Messsystem	1	---	Siemens/LMS SCADAS Mobile 1a
Software	1	---	Siemens Testlab

Tabelle 2: Verwendete Messgeräte und Software

3.3 Messaufbau

Der Messaufbau ist in Abbildung 5 dokumentiert.



Abb. 5: Schwingungsoptimierte Schutzverpackung für den „Federkopfschmuck“ beim Hardwaretest

Die Position des Antwortsensors ist der Punkt der Innenkiste, der genau wie die anderen Ecken, die größten Beschleunigungsamplituden aufweist.

3.4 Messergebnisse

Die maximalen Beschleunigungsamplituden werden in Tabelle 3 dokumentiert. Hierbei wird, wie in der Museumsbranche üblich, zwischen Vibrationen und Stößen unterschieden. Dabei sind Vibrationen Ereignisse, die länger andauern als ein Bruchteil einer Sekunde, während die kurzzeitigeren Ereignisse als Stöße bezeichnet werden.

Mess.-Nr.	Vibrationen				Stöße			
	Referenz		Antwort		Referenz		Antwort	
	Richtung	$ a_{max} $	Richtung	$ a_{max} $	Richtung	$ a_{max} $	Richtung	$ a_{max} $
1	1	0,14 g	1	0,11 g	1	1,43 g	1	0,69 g
	2	0,1 g	2	0,1 g	2	0,75 g	2	0,3 g
	3	0,1 g	3	0,1 g	3	0,64 g	3	0,4 g
2	1	0,17 g	1	0,11 g	1	1,22 g	1	0,36 g
	2	0,13 g	2	0,11 g	2	0,92 g	2	0,36 g
	3	0,12 g	3	0,12 g	3	0,8 g	3	0,38 g
3	1	0,04 g	1	0,04 g	1	0,15 g	1	0,11 g
	2	0,02 g	2	0,02 g	2	0,14 g	2	0,14 g
	3	0,02 g	3	0,02 g	3	0,13 g	3	0,13 g
4	1	k. A.	1	k. A.	1	5,2 g	1	0,9 g
	2	k. A.	2	k. A.	2	2,1 g	2	0,7 g
	3	k. A.	3	k. A.	3	2,4 g	3	0,78 g

Tabelle 3: Transmissibilitäten im Zeitbereich bezogen auf die Referenz in MP 2

Das Dummy-Objekt wurde mit Schaumstoffkeilen in dem Innenrahmen fixiert. Die Schaumstoffkeile haben sich bei dem Stoß während der Messung 4 gelöst. Aus diesem Grund konnte der Ausschwingvorgang nicht bewertet werden.

Die Innenkiste antwortet während aller vier Messungen mit Schwingungen in einem Frequenzband von 1,7 Hz bis maximal 17 Hz. Die angeregten Frequenzen kommen darin diskret vor.

5. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die schwingungsoptimierte Schutzverpackung für den „Federkopfschmuck“ wurde auf Basis der schwingungsoptimierten Kiste für das „Tahitianische Trauerkostüm“ des The British Museum, London, entwickelt. Dies betrifft insbesondere die erreichte Schwingungsisolations- und Stoßenergieabsorptionsfähigkeit. Die Testergebnisse zeigen deutlich, dass je größer die eingebrachte Energie ist, desto größer ist der Reduktionsgrad. Dies ist ein typisches Verhalten für elastische Elemente mit progressiven Steifigkeitsverhalten. Hiermit kann sichergestellt werden, dass die Beschleunigungsamplituden ein gesetztes Maß nicht überschreiten. In den beiden Fällen „Tahitianische Trauerkostüm“ und „Federkopfschmuck“ wurden für die jeweiligen Schwerpunkte der Innenkiste eine maximale Beschleunigungsamplitude in Höhe von < 1 g in der Hauptanregungsrichtung während eines Fluges festgelegt. Zudem wurde das maximal angeregte Frequenzband auf 1,9 Hz bis 18 Hz determiniert. Zumindest bei dem „Tahitianische Trauerkostüm“ konnte davon ausgegangen werden, dass Schwingungen mit Frequenzen des festgelegten Frequenzbandes im Rahmen des determinierten Beschleunigungsamplitudenbandes das Objekt (so wie es von den Restauratoren verpackt worden war) nicht schädigen werden. Bei dem „Federkopfschmuck“ fehlen entsprechende Informationen.

Das nachgewiesene Schwingungsverhalten der schwingungsoptimierten Transportkiste für den „Federkopfschmuck“ kann weiter verbessert werden, wenn die Fixierung des Objektlagers an den Innenkäfig sehr steif ist und zudem Vakuumisulationspaneele für die thermische Isolierung verwendet werden. Des Weiteren wird in jedem Fall empfohlen, die Performance der elastischen Lagerung auf das reale Objekt und seine Lagerung in dem Innenkäfig anzupassen.

6. Fachliche Stellungnahme

Die in diesem Projekt beschriebene schwingungsoptimierte Transportkiste für den „Federkopfschmuck“ ist in der Lage, einwirkende Vibrationen und Stöße während des Handlings, des Lkw-Transportes und während des Fluges in gleicher Weise oder besser zu reduzieren als die schwingungsoptimierte Kiste für das „Tahitianische Trauerkostüm“ des The British Museum, London.

Der Reduktionsgrad der zweitgenannten Kiste war so groß, dass das Kostüm ohne nennenswerte weitere Schädigungen im Tahitianischen Museum eingetroffen ist. Diese Kiste wurde so konzipiert, dass maximale Beschleunigungsamplituden in Höhe von 1 g im Schwerpunkt der Innenkiste im Frequenzbereich von 2 Hz bis 18 Hz aufgetreten sind.

Seitens des Weltmuseums Wien wurde im Fall des „Federkopfschmuckes“ der Grenzwert für die Beschleunigungsamplituden auf 0,04 g gesetzt. Wie Prof. Wassermann, TU Wien, in seinem Bericht MB11JWMN03 vom 31. März 2012 korrekt herleitet, sind weder passive noch aktive Elemente in der Lage diesen Wert während einer LKW-Transportes und Fluges einzuhalten. Dieser Schluss ist auch heute noch richtig.

Die vom Weltmuseum Wien veranschlagten Grenzwerte für die zulässigen maximalen Beschleunigungsamplituden sind zu hinterfragen.

1. Die Angabe eines Grenzwertes für dynamische Lasten muss Amplituden- und Frequenzwerte beinhalten.
2. Der Wert 0,04 g wurde bei einer Messung „[...] in the exhibition hall on October 6th 2011[...]“ erfasst. Der Messwert kann als korrekt angenommen werden, da das Grundrauschen in Museumsgebäuden mit “normaler” Besucherfrequenz in belebter Umgebung in der Regel genau diesem Wert entspricht. Das Grundrauschen enthält keine Ereignisse wie Konzerte und das Anrempeln von Vitrinen durch Besucher. Im Übrigen beträgt das Grundrauschen einer Außenhaut einer Transportkiste im Laderaum eines Lkws m Leerlauf und im Flugzeug während des Fluges 0,03 bis 0,05 g.
3. Die Erfahrungen aus dem Transport des „Tahitianischen Trauerkostüms“ zeigen, dass Schwingungen mit Werten bis 1 g im Frequenzbereich von 2 Hz bis 18 Hz offenbar fragile Federobjekte nicht schädigen.

Abschließend wird empfohlen, die Grenzwerte zulässiger Schwingungen für den „Federkopfschmuck“ neu und vor allem vollständig zu definieren. Die Definition sollte auf ein wissenschaftliches Fundament des Restaurierungs- und des Ingenieurwesens gestellt werden.

Anmerkung: Heutzutage können schwingungsoptimierte Transportkisten mit passiven Elementen und integrierten Vakuumisulationspaneelen für die Klimastabilität eine maximale Anregung des transportierten Objektes in seinem Schwerpunkt in Höhe von 0,5 g bzw. 1 g in einem Frequenzband von 2 Hz bis 16 Hz während des LKW- bzw. Flugtransportes gewährleisten.

Toddin, d. 07.09.2025

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kerstin Kracht', written in a cursive style.

Dr.-Ing. Kerstin Kracht