

# Mehrschichtwand zum Schutz von kerntechnischen Anlagen und kritischer Infrastruktur

Viktor Vlaski<sup>1</sup>, Anna Gallinat<sup>1</sup>, Jörg Moersch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Max Aicher Engineering GmbH, Teisenbergstraße 7, 83395 Freilassing

**Zusammenfassung:** Bei der Bemessung von kerntechnischen Anlagen und kritischer Infrastruktur sind unter anderem auch die Lastfälle Flugzeugabsturz (FLA), Explosion und Beschuss mit einem Projektil zu berücksichtigen. Um beim Bau neuer sowie bei der Nachrüstung bestehender Anlagen im Falle von erhöhten Anforderungen die erforderliche Widerstandsfähigkeit gegen diese Lastfälle zu erhöhen, wurde von der Max Aicher Engineering GmbH die Mehrschichtwand (Multi-Layer-Wall-System - MLWS) [1] entwickelt. Die MLWS besteht aus zwei oder mehreren Stahlbetonplatten, zwischen denen in Leerräumen z. B. Stahlrohre montiert sind, die durch plastische Deformationen Energie absorbieren.

In dieser Veröffentlichung werden auf der Grundlage von Vergleichsberechnungen die Vorteile der MLWS im Vergleich zur massiven Stahlbetonwand (MW) dargestellt. Bei der MLWS sind nach den o. g. Einwirkungen auf der Innenseite geringere Verformungen als bei der MW und auch keine Schädigungen durch Perforation festzustellen. Es werden bei der MLWS, anders als bei der MW, auch die von kurzzeitigen Anregungen, wie FLA, Explosion und Projektilbeschuss verursachten, hochfrequenten Anteile der Vibrationen gefiltert, was vorteilhaft für empfindliche Komponenten im Inneren der Gebäudestruktur, ist.

## 1 Mehrschichtwand (Multi-Layer-Wall-System MLWS)

### 1.1 Einführung

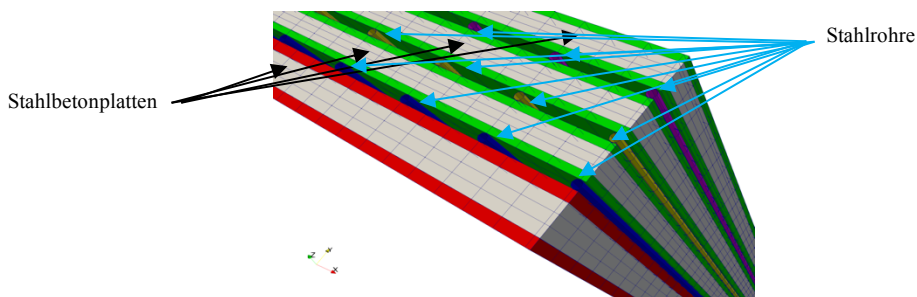
Bei der Bemessung von kerntechnischen Anlagen ist es erforderlich alle möglichen Szenarien zu berücksichtigen, die auch bei einer extremen externen Einwirkung ein sicheres Herunterfahren der Anlage ermöglichen und den Austritt von Strahlung verhindern. Bei den ersten zwei Generationen von Kernkraftwerken wurde von einigen Regulierungsbehörden, wie z.B. Deutschland und Schweiz, gefordert, dass die Widerstandsfähigkeit gegen den Flugzeugabsturz (FLA) eines Militärflugzeugs [2] nachgewiesen werden muss. Seit dem

Anschlag vom 11 September 2001 verlangen immer mehr Regulierungsbehörden, dass auch die Widerstandsfähigkeit gegen den Absturz eines Passagierflugzeugs gewährleistet ist. Diese Anforderung betrifft sowohl Kernkraftwerke als auch kerntechnische Anlagen wie z.B. Zwischenlager. Anders als beim Lastfall Absturz eines Militärflugzeugs, besteht bis heute keine einheitliche Regelung für die Ermittlung der Lastfunktion für den Absturz eines Passagierflugzeugs. Manche Regulierungsbehörden legen sich auf Airbus A320, andere auf Boeing 747 und manche auf Airbus A380 fest. In der Regel wird die anzuwendende Lastfunktion von Regulierungsbehörden und Betreibern festgelegt und klassifiziert. Lediglich die Versagenskriterien des Stahlbetons sind in RCC-CW [3] und US NRC [4] aufgeführt.

Zur Gewährleistung der Widerstandsfähigkeit einer Stahlbetonwand gegen den Aufprall eines A320 ist eine Wandstärke von mindestens 1,80 m erforderlich. Manche Regulierungsbehörden haben die Anforderungen an der Widerstandsfähigkeit der Gebäudestruktur auf A380 angehoben. Es stellt sich daher die Frage wie die Widerstandsfähigkeit wirtschaftlich erhöht werden kann.

Eine weitere wichtige Anforderung von Regulierungsbehörden ist, dass beim Lastfall FLA die induzierten hochfrequenten Vibrationen bei der Bemessung und Qualifizierung von Komponenten berücksichtigt werden müssen [5]. Massivwände verfügen jedoch nicht über Eigenschaften, die eine Absorption hochfrequenter Vibrationen ermöglichen.

Die hier vorgestellte MLWS (Abbildung 1) ermöglicht die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit im Vergleich zur Massivwand, absorbiert hochfrequente Vibrationen und ist bei Erhöhung der Anforderungen auch zur Nachrüstung von bestehenden Anlagen geeignet.



**Abbildung 1:** Mehrschichtwand (MLWS)

Die in diesem Bericht dokumentierten Berechnungen wurden mit LS-DYNA [6] durchgeführt, unter Anwendung des Winfrith concrete [7] Materialmodels für Beton.

## 2 Lastfall Flugzeugabsturz (FLA)

Die Wirkungsweise der MLWS beim Lastfall Flugzeugabsturz (FLA) eines Airbus A320 wurde bereits auf der SMiRT-26 [8] vorgestellt. Die dort detailliert erläuterten dynamischen Eigenschaften der MLWS sind nachfolgend kurz zusammengefasst:

- Beim FLA werden die Stahlrohre der MLWS plastisch verformt (Abbildung 2). Dadurch wird Energie absorbiert und hochfrequente Anteile der induzierten Erschütterungen gefiltert [1], [5], [8]
- Wie aus Abbildung 3 ersichtlich ist, sind die Dehnungen auf der Innenseite der MLWS erheblich geringer als bei einer Massivwand MW mit identischer Wandstärke

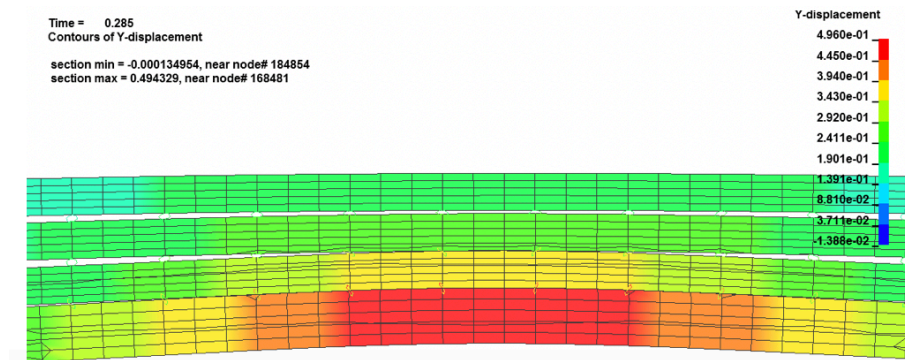


Abbildung 2: Verformungszustand der MLWS

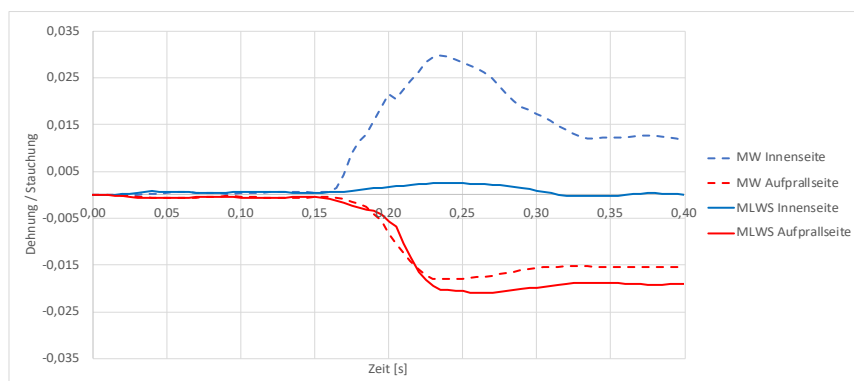


Abbildung 3: Max. Dehnungen und Stauchungen der MW und MLWS beim FLA A320

### 3 MLWS zum Schutz von kritischer Infrastruktur beim Lastfall Explosion

Die vorteilhaften Eigenschaften der MLWS beim Lastfall FLA [8] sind die Grundlage zur Entwicklung einer skalierten Mehrschichtwand zum Schutz von kritischer Infrastruktur, wie z.B. kerntechnische Zwischenlager, militärische und strategisch wichtige Einrichtungen, gegen terroristische Anschläge mit Explosiv. Diese Entwicklung greift die Experimente der Universität der Bundeswehr [9] auf, bei denen demonstriert wurde, dass Thujahecken und Wasserstrahlen, dargestellt in Abbildung 4, die Kraft der Explosion um 60% bzw. 50% verringern.



Abbildung 4: Experimente der Universität der Bundeswehr

Numerische und experimentelle Studien [10] haben zu der Erkenntnis geführt, dass 30 cm starke Stahlbetonplatten nicht in der Lage sind, einer Explosion von 2 kg TNT zu widerstehen. In diesem Beitrag werden die Berechnungsergebnisse der dynamischen Antwort einer 40 cm starken MW und einer 26 cm starken MLWS vorgestellt, die einer Explosion von 2 kg PETN ausgesetzt sind.

### 3.1 Massivwand (MW) beim Lastfall Explosion

Die dynamische Antwort der MW mit den Abmessungen 2m / 2m / 0,40 m auf eine Explosion von 2 kg PETN ist in Abbildung 5 dargestellt. Die MW wird perforiert und versagt. Aus den Verschiebungszeitverläufen ist ersichtlich, dass hochfrequente Schwingungen von der Außenseite ungefiltert nach innen übertragen werden.

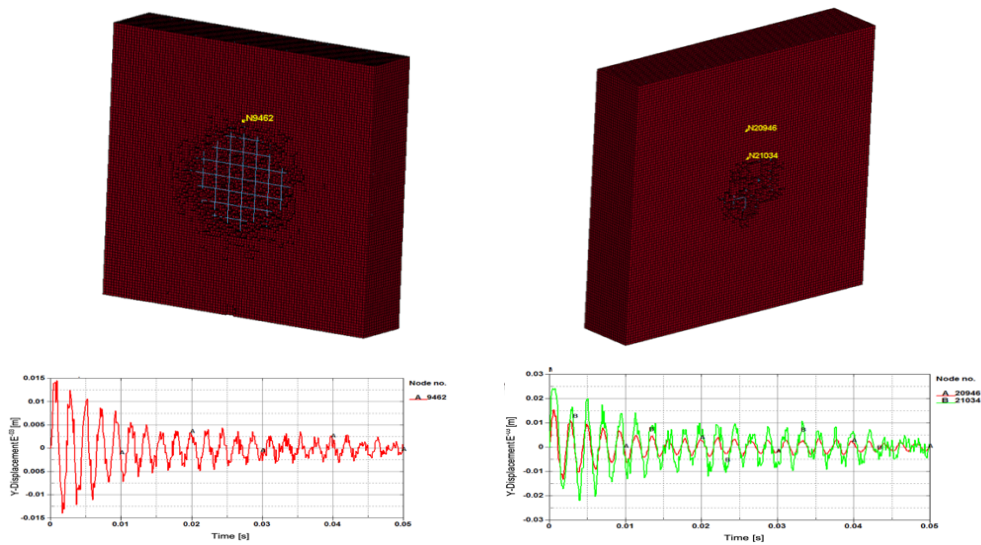


Abbildung 5: Dynamische Antwort MW, Außenseite (links) und Innenseite (rechts)

### 3.2 MLWS beim Lastfall Explosion

Die MLWS, dargestellt in Abbildung 6, hat die äußeren Abmessungen 2,0m / 2,0m / 0,26m und besteht aus zwei Stahlbetonplatten mit einer Stärke von je 0,12m, zwischen denen im Leerraum von 2 cm die verformbaren Stahlrohre montiert sind.

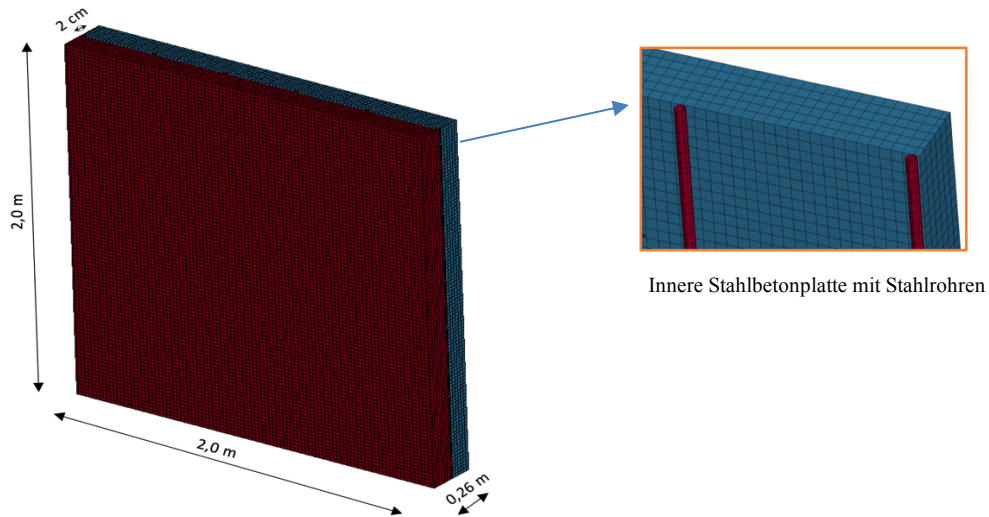


Abbildung 6: MLWS für den Lastfall 2 kg PETN

Die dynamische Antwort der MLWS auf den Lastfall 2 kg PETN ist in Abbildung 7 dargestellt.

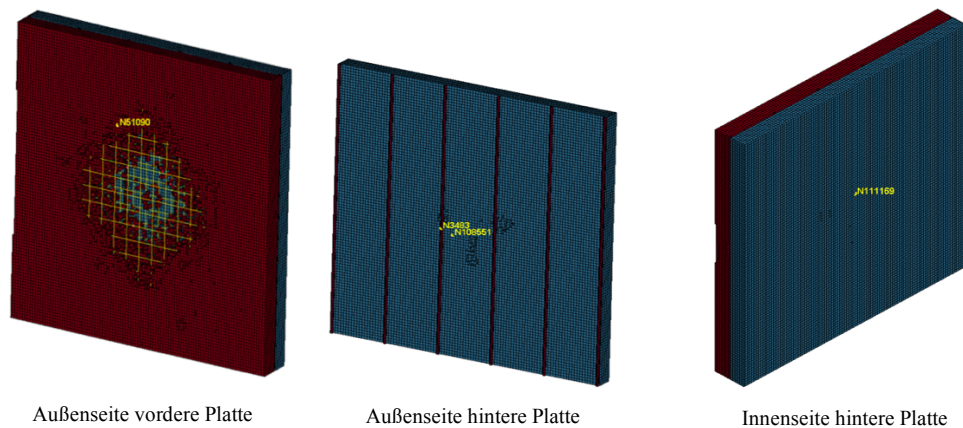
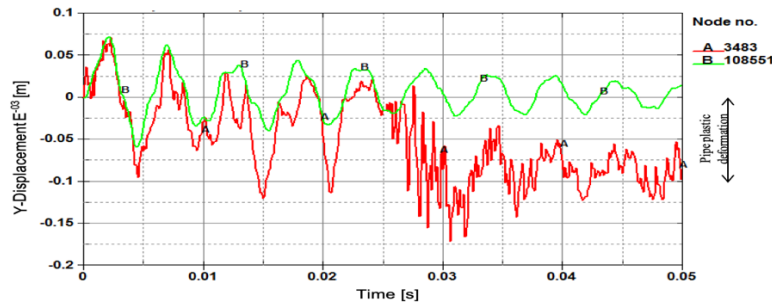


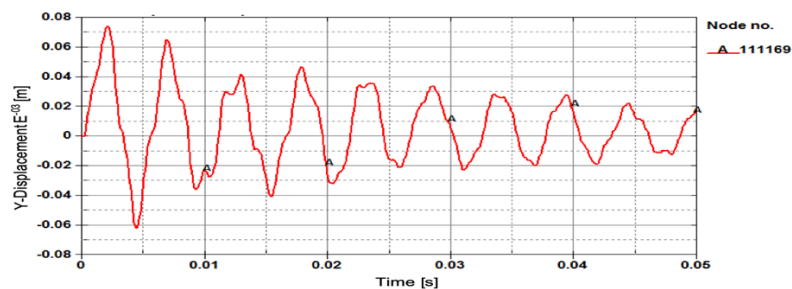
Abbildung 7: Schadensbild der MLWS beim Lastfall 2 kg PETN

Bei der MLWS wird die vordere Stahlbetonplatte geopfert bzw. vollkommen zerstört, während die hintere Stahlbetonplatte auf der Innenseite keine Schäden aufweist. Die Verschiebungszeitverläufe der Stahlrohre und des Betons auf der hinteren Stahlbetonplatte

(Abbildung 8) zeigen, dass durch nichtlineare Verformungen Energie absorbiert wird und hochfrequente Schwingungen gefiltert werden, d.h. nicht auf der Innenseite der MLWS ankommen (Abbildung 9).



**Abbildung 8:** Verschiebungszeitverläufe Stahlrohr (rot) und Beton (grün) beim Lastfall 2 kg PETN

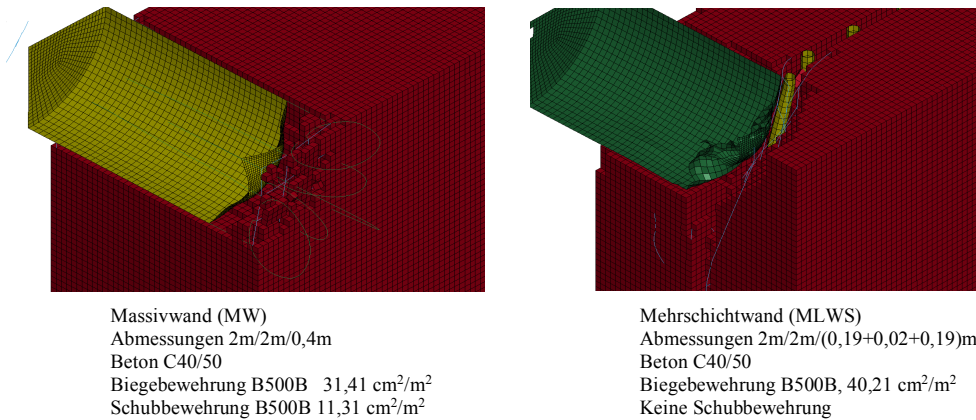


**Abbildung 9:** Verschiebungszeitverlauf der MLWS-Innenseite beim Lastfall 2kg PETN

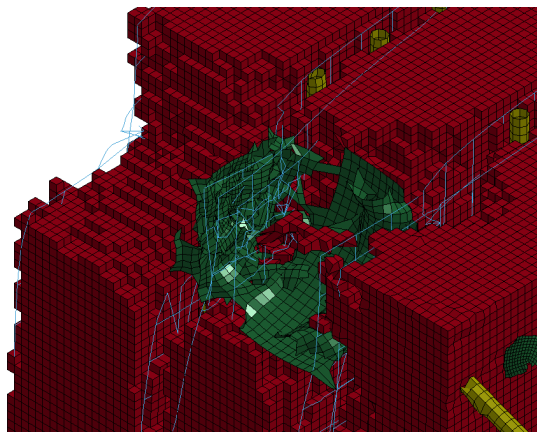
## 4 MLWS beim Lastfall Beschuss mit Projektil

Wie bei den Lastfällen FLA und Explosion, verhält sich die MLWS auch beim Lastfall Projektilbeschuss vorteilhaft im Vergleich zur MW. Bei ähnlicher Gesamtmenge von Beton und Bewehrung widersteht die MLWS dem Lastfall Beschuss eines 29 kg schweren Projektils mit der Aufprallgeschwindigkeit 100 m/s [11] während die MW versagt, wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist. Die erhöhte Widerstandsfähigkeit der MLWS ist auf die Dissipation von Energie zurückzuführen, die durch die plastische Deformation der Stahlrohre ermöglicht wird.

Ein großer Vorteil der MLWS im Vergleich zur MW ist, dass bei Erhöhung der Anforderungen eine Nachrüstung durch neue Stahlbetonplatten zwischen denen verformbare Stahlrohre montiert sind, beliebig möglich ist und das auch mit Stahlbetonfertigteilen realisiert werden kann. Wenn z.B. die Anforderung der Widerstandsfähigkeit einer bestehenden Wand von einer Aufprallgeschwindigkeit von 100 m/s auf 350 m/s erhöht wird, kann dies durch eine zusätzliche, dritte Stahlbetonplatte, und Stahlrohren erfüllt werden, wie aus Abbildung 11 ersichtlich ist.



**Abbildung 10:** Endzustand MW und MLWS bei Projektilbeschuss  $V=100$  m/s



**Abbildung 11:** Endzustand MLWS mit 3 Stb.-Platten bei Projektilbeschuss  $V=350$  m/s

## 5 Vorteile der MLWS im Vergleich zur MW

Die MLWS ist für Neubauten und auch zur Nachrüstung bestehender Gebäudestrukturen bei erhöhten Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit einsetzbar. Bei vergleichbaren Beton- und Stahlmengen weist die MLWS eine deutlich höhere Widerstandsfähigkeit auf als eine MW.

Durch die plastische Verformung der Stahlrohre wird Energie absorbiert und es werden hochfrequente Anteile der induzierten Vibrationen gefiltert. Dies ist insbesondere für empfindliche Geräte innerhalb der Gebäudestruktur, wie z.B. Relais, von großer Bedeutung.

Die Modularität der MLWS ermöglicht beliebige Erhöhungen der Widerstandsfähigkeit der Gebäudestruktur durch den Einbau zusätzlicher Stahlrohre und Stahlbetonplatten.

## Literatur

- [1] MAX AICHER GMBH & CO. KG, Patent Nr. DE102018220289, "Multilayer Wall with Energy Absorbing Elements", Deutsches Patent- und Markenamt, 2021
- [2] DIN 25449, Bauteile aus Stahl- und Spannbeton in kerntechnischen Anlagen – Bauteile aus Stahl- und Spannbeton in kerntechnischen Anlagen – Sicherheitskonzept, Einwirkungen, Bemessung und Konstruktion, 2008
- [3] AFCEN, Rules for Design and Construction of PWR Nuclear Civil Works RCC-CW, 2018
- [4] US NRC, "Guidance for the Assessment of Beyond-Design-Basis Aircraft Impacts, Regulatory Guide 1.217", U.S. Nuclear Regulatory Commission, USA, 2011
- [5] VLASKI, V., FILA, A., SCHNEIDER, O., PAPANDREOU, D., "Reduction of External Hazard (Fast Impact) Induced Vibrations", TINCE, Paris, 2013
- [6] LS-DYNA, "LS-DYNA Keywords User's Manual, Version 10/18/18 (R:10580)", Lawrence Livermore Software Technology Corporation, USA, 2018
- [7] SCHWER, L. (2011), "The Winfrith Concrete Model: Beauty or Beast? Insights into the Winfrith Concrete Model", 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg
- [8] VLASKI, V., GALLINAT, A., MOERSCH, J., "Multilayer Wall System for Protection of Nuclear Facilities against Airplane Crash", SMiRT-26, Berlin, 2022
- [9] UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR, Thujen gegen den Terror, <https://www.dabonline.de/2019/02/14/thujen-gegen-den-terror/>
- [10] FANG, W. ET AL., "Reinforced Concrete Slab Subjected to Close-in Explosion", LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, Germany, 2008
- [11] HERVE, G., Description of Iris Phase 3 Project, Paris, 2016
- [12] VLASKI, V., FILA, A., SCHNEIDER, O., PAPANDREOU, D., "Reduction of External Hazard (Fast Impact) Induced Vibrations", TINCE, Paris, 2013