

# Paletten-Shuttle-Lager: Dynamik und Wechselwirkung auf den Regalbau

Pallet Shuttle Systems: Dynamics and interaction with the rack

Manmit Padhy  
Georg Fischer  
Martin Mittwollen  
Simon Weber  
Viktor Milushev

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

In diesem Beitrag wird, nach einem kurzen Rückblick auf die im Vorgänger-Artikel von 2021 [AA21] beschriebenen Grundlagen zur Erfassung und Erforschung des dynamischen Verhaltens von Paletten-Shuttle-Regallagern, die Vorgehensweise zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens des Regalbaus bei Paletten-Shuttle-Systemen vorgestellt. Neben den individuellen Modellierungen für Regalbau, Shuttle-Fahrzeuge und Satelliten-Fahrzeuge werden die Referenzmodelle mit den für die Simulation genutzten Parametern präsentiert. Mit Unterstützung durch Eigenfrequenzstudien werden Lastfälle für diverse Worst-Case-Szenarien erarbeitet und numerisch simuliert sowie die Ergebnisse analysiert und vorgestellt. Eine Studie zu Potenzialen der Querschnittsoptimierung bei den Regalprofilen ergänzt die Betrachtungen. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf weitere Arbeitsschritte, um letztendlich mit den erzielten Ergebnissen eine Handreichung zur belastungsoptimierten Auslegung von Regalbauten anbieten zu können. Diese soll die dynamischen Wechselwirkungen zwischen im leeren oder voll beladenen Regal (gleichzeitig oder gestaffelt) beschleunigten bzw. gebremsten Shuttles und Satelliten beschreiben. Entsprechende Empfehlungen für die Dimensionierung des Regals aber auch Steuerungsstrategien der Shuttle- bzw. Satelliten-Fahrzeuge in Bezug auf Beschleunigungsvorgänge und deren Gleichzeitigkeit bzw. Staffelung sollen Eingang in die Hinweise finden – im Sinne einer optimalen, ressourcenschonenden Auslegung des Stahlbaus der Regale.

*[Schlüsselwörter: Paletten-Shuttle-Lager, Eigenfrequenz, Resonanzanregung, Schwingungen, Finite-Element-Analyse]*

## Abstract:

After a short review of the basics described in the previous article of 2021 for the acquisition and investigation of the dynamic behaviour of pallet shuttle racking systems, in this article, the procedure for the determination of the dynamic behaviour of the racking

structure in pallet shuttle systems is presented. In addition to the individual modelling for racking, shuttles and satellites, the reference models with the parameters used for the simulation are presented. With the support of eigenfrequency studies, load cases for various worst-case scenarios are developed and numerically simulated, and the results are analyzed and presented. A study on the potentials of cross-section optimization of the rack profiles completes the considerations. Finally, there is an outlook on further work steps, in order to finally be able to offer a handbook for the load-optimized design of racking structures with the results obtained. This should describe the dynamic interactions between accelerated, braked shuttles and satellites in empty or fully loaded racking (simultaneously or staggered). Corresponding recommendations for the dimensioning of the racking, but also control strategies of the shuttle or satellite vehicles with regard to acceleration processes and their simultaneity or staggering, should find their way into the information - in the sense of an optimal, resource-saving design of the steel construction of the racking.

*[Keywords: Pallet SBS/RS, Eigenfrequency, Resonance excitation, Vibration, Finite-Element-Analysis]*

## 1 EINLEITUNG

Shuttle-Systeme sind in heutigen Lagersystemen nicht mehr wegzudenken. Aufgrund der Entkoppelung der horizontalen und vertikalen Bewegungen können bei diesem System gleichzeitig Ein-/Auslager- und Förderprozesse im Regal durchgeführt werden [VDI15]. Um den maximalen Durchsatz zu erreichen, fährt auf jeder Ebene auf extra am Regal angebrachten Fahrstienen mindestens ein Shuttle-Fahrzeug. Der vertikale Transport erfolgt über an den Gassenenden installierte Liftsysteme.

Durch die gleichzeitige Bewegung der einzelnen Shuttle Fahrzeuge auf den einzelnen Ebenen wirken große dynamische Kräfte auf den Regalbau (auch Stahlbau). Neben dem Eigengewicht von Lagergut und Stahlbau

werden zusätzliche Lasten durch die beladenen Shuttle-Fahrzeuge über die mit dem Regal fest verbundenen Fahrschienen eingebracht. Hinzukommend werden dynamische Kräfte durch das Beschleunigen, Bremsen oder den Aufprall in den Endanschlag (im folgenden Pufferstoß) in den Regalbau eingeleitet. Dies kann zu unerwünschten Schwingungen, bis hin zu einem Totalversagen des Regalbaus führen.

Aus diesem Grund muss der Regalbau für Shuttle-Systeme so widerstandsfähig ausgelegt werden, dass neben den statischen Kräften auch die zusätzlichen dynamischen Krafteinwirkungen ertragen werden können.

Daher ist die Zielsetzung im Projekt DynamReg, einen Beitrag zur belastungsgerechten Gestaltung, Auslegung und Dimensionierung des Regalbaus für den Einsatz von Shuttle-Systemen zu liefern und einen Leitfaden mit Handlungsempfehlungen für Hersteller und Anwender zur Verfügung zu stellen.

Aufbauend auf der ersten Veröffentlichung zu diesem Forschungsvorhaben [AA21], die sich vor allem mit dem Stand der Forschung und der Modellbildung des Shuttle-Fahrzeuges und Regals befasst hat, werden in dieser Veröffentlichung unter anderem folgende wissenschaftlich-technischen Fragestellungen beantwortet:

- Welchen Einfluss hat das gleichzeitige Abbremsen mehrerer Shuttle-Fahrzeuge auf das Schwingungsverhalten des gesamten Shuttle-Systems bzw. Regals?
- Wie groß ist die dadurch entstehende maximale Auslenkungsamplitude der oberen Enden der Regalstützen?
- Kann es durch einen Tippbetrieb der Shuttle- oder Satelliten-Fahrzeuge zu einer Resonanzschwingung des Regals kommen?
- Wie hängt das Schwingungsverhalten der Regale von Beschleunigungsvorgängen der Fahrzeuge ab?

## 2 LITERATUR UND NORMEN

Shuttle-Systeme gewinnen zunehmend an Bedeutung und sind aufgrund ihrer Vorteile – höhere und skalierbare Leistung, bessere Raumausnutzung – inzwischen zu einer Alternative gegenüber dem klassischen Hochregallager mit Regalbediengerät geworden. [ME18]

Eine systematische Literaturrecherche hat ergeben, dass es über 200 Veröffentlichungen zu Shuttle-Systemen gibt. All diese Veröffentlichungen befassen sich jedoch nur mit Leistungsberechnungen, Steuerungsstrategien oder

Energiebedarfsrechnungen. Die Auswirkungen von dynamischen Kräften oder die Dimensionierung und Auslegung des Regalbaus von Shuttle-Systemen wird dabei nicht betrachtet.

In der vorhandenen Richtlinie VDI 2692 und in der FEM-Regel 9.860 werden Funktion und Aufbau von Shuttle-System und die Berechnung von Fahrtzeiten beschrieben, jedoch nicht die Auslegung des Regalbaus näher betrachtet [VDI15] [FEM17].

Für klassische Regale und die Auslegung von Regalen für den Einsatz von Regalbediengeräten gibt es bereits einige Forschungsarbeiten sowie Normen und FEM Regeln. So gibt es bereits zahlreiche Forschungsarbeiten zur statischen Betrachtung des Regalbaus und des Einflusses von dynamischen Einwirkungen auf den Regalbau durch Erdbeben. Auch wurden bereits der Einfluss von Schwingungen von RBG und die Wechselwirkungen zwischen RBG und Hochregallager näher untersucht. Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Forschungsarbeiten, Normen und Richtlinien kann in [AA21] nachgeschlagen werden.

Die Literaturrecherche hat jedoch auch gezeigt, dass es weder Literatur noch Forschungsarbeiten zum dynamischen Verhalten der Regale beim Einsatz von Shuttle-Systemen gibt.

Um den Einfluss von dynamischen wirkenden Kräften in Shuttle-Systemen zu untersuchen, soll ein Gesamtmodell entwickelt werden, welches die Wechselwirkungen zwischen Regal, Shuttle-Fahrzeugen, Lift und Ladung abbildet. Mit diesem Gesamtmodell können dann die oben genannten Fragestellungen beantwortet werden.

## 3 REFERENZMODELL

Abhängig vom Anwendungsfall können Shuttle-systeme sehr schnell sehr komplex werden. Dies liegt vor allem an den unabhängig voneinander agierenden Systemkomponenten (Lifte, Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug).

Bei einem Paletten-Shuttlesystem mit Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug (siehe Abbildung 1) wird die Palette am Übergabepunkt zum Lift von einem Satelliten-Fahrzeug aufgenommen, indem dieses unter die Palette fährt und diese anhebt.

Der vertikale Transport des Satelliten-Fahrzeugs mit geladener Palette zu den einzelnen Lagerebenen erfolgt über den Lift am Ende der Gasse. Dort wird das Satelliten-Fahrzeug mit Palette vom Shuttle-Fahrzeug aufgenommen und fährt anschließend in horizontaler Richtung (x-Richtung) zum vorgesehenen Lagerkanal. Das Satelliten-Fahrzeug mit geladener Palette verlässt das Shuttle-Fahrzeug, fährt in horizontaler Richtung (z-Richtung) in

den Lagerkanal hinein und lädt die Ladeeinheit dort am vorgesehenen Lagerplatz ab. Anschließend fährt das Satelliten-Fahrzeug zurück zum Shuttle-Fahrzeug. Bei einer Auslagerung erfolgt der gesamte Ablauf in umgekehrter Reihenfolge.

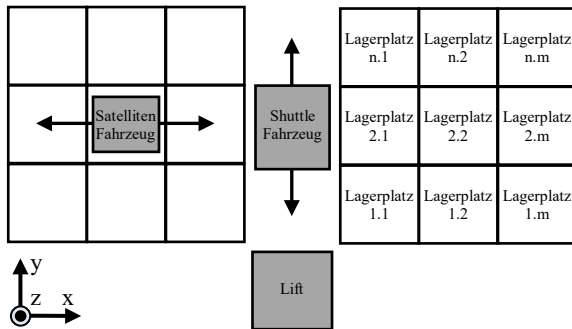


Abbildung 1. Draufsicht auf das betrachtete Shuttle-System.

Da Shuttle-Systeme je nach Kundenwunsch sehr unterschiedlich und flexibel gestaltet werden können (z. B. keine Bindung an quaderförmige Außenkontur), wurde als repräsentatives Modell eines Shuttle-Systems ein Referenzmodell eines Regalsystems definiert, das einen marktüblichen Aufbau aufweist und eine große Bandbreite abdeckt.

Das betrachtete Referenzmodell für den Regalbau hat folgende Eigenschaften:

- Betrachtet wird eine Gasse eines Palettenlagers, mit Regalen auf beiden Seiten (Aufbau des Regals wie in Abbildung 1)
- Das Palettenlager ist freistehend (keine Silobauweise) und fest mit dem Boden verschraubt
- Pro Lagerkanal können 6 Paletten hintereinander gelagert werden (z-Richtung)
- In einem Fach können 2 Paletten nebeneinander gelagert werden (x-Richtung). Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen zwei Regalstützen 2 Palettenbreiten plus Freimaße beträgt.
- Alle Komponenten (u. a. Stützrahmen, Träger, Fahrschiene, Verstrebungselemente) des Regals sind fest miteinander verschraubt.
- Länge der Lagergasse und Anzahl der Lagerebenen werden über die Anzahl der Lagermodule  $n_x$  und  $n_y$  variabel eingestellt

[AA21]. Für das Referenzregal wurde  $n_x = 18$  (entspricht 52,2 m) und  $n_y = 8$  (entspricht 18,8 m) gewählt.

Das Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug wird als einfaches 4-Rad-Fahrzeug abgebildet. Dazu wurde für die Abmessungen ein Durchschnittswert aus mehreren auf dem Markt befindlichen Shuttle- und Satelliten-Fahrzeugen herangezogen. Für Last, Geschwindigkeit und Beschleunigung wurden jedoch jeweils maximale Werte gewählt, um Worst-Case-Szenarien abbilden zu können.

Das Liftsystem wurde im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes nicht weiter betrachtet, da dies ein eigenständiges und freistehendes System ist und nur für die Sicherung des stetigen Fahrschienen-Übergangs mit dem Regal verbunden ist. Daher kann der Einfluss der durch den Lift erzeugten dynamischen Kräfte auf den Regalbau (und umgekehrt) vernachlässigt werden.

#### 4 MODELLBILDUNG

Um die Wechselwirkung der Regal-Fahrzeuge mit dem Regal effizient untersuchen zu können, werden numerische Modelle benötigt. Abbildung 2 stellt das Schema der Modellbildung dar, die in diesem Projekt angewendet wird. Die beiden Fahrzeuge-Modelle sind vom Aufbau analog und unterscheiden sich nur in den Eingangsgrößen.

Die mit den Fahrzeug-Modellen berechneten Größen (Kräfte und Positionen der Fahrzeuge) werden in das FEM Regal-Modell als Input eingegeben. Somit ist es möglich, Regalbelastungen bei beliebigen Fahrzeug-Bewegungsprofilen zu untersuchen.

##### 4.1 SHUTTLE- UND SATELLITEN- FAHRZEUG

Die beiden Fahrzeuge besitzen im Allgemeinen unterschiedliche dynamische Kennwerte und Tragfähigkeiten, die dadurch unterschiedliche Krafteinwirkungen auf das Regal verursachen. Diese Parameter sind vom Einsatzgebiet und von den Herstellern abhängig. Um das Grenzverhalten des Regals untersuchen zu können, wurden anhand einer Marktstudie die Fahrzeugparameter so ausgewählt, dass sie die höchste Beanspruchung für das Regal erzeugen.

Abbildung 3 stellt die schematische Darstellung der Regal-Fahrzeuge dar. Das Shuttle-Fahrzeug verfährt in x-Richtung (Gassenlängsrichtung), während das Satelliten-Fahrzeug nur den Transport der Paletten in z-Richtung (Lagerkanal) ausführt. Beide Fahrzeuge haben jeweils nur einen Freiheitsgrad. Die dynamischen Kräfte, die ins Regal

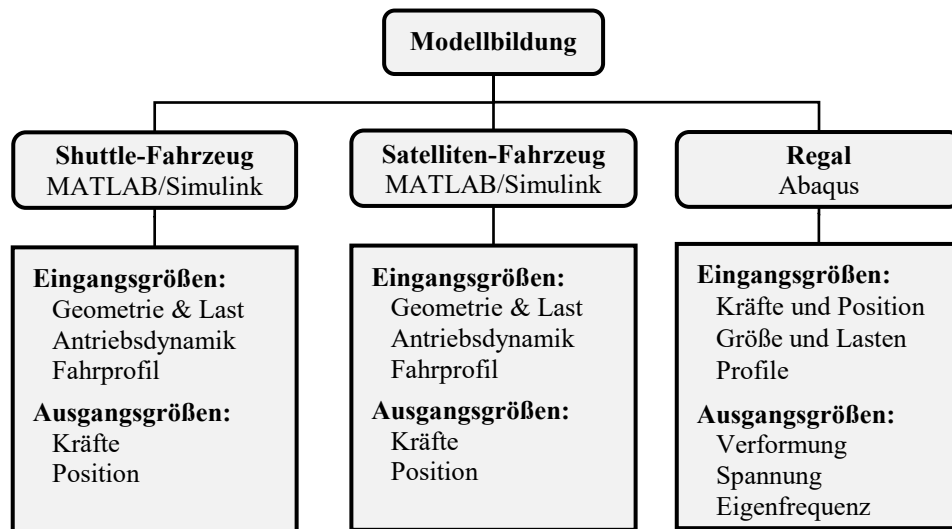


Abbildung 2. Das Schema der verwendeten Modelle. Die Fahrzeug-Modelle unterscheiden sich nur in den Parameterwerten.

eingeleitet werden, sind mit den Indizes  $(\cdot)_U$  für die Umfangs- sowie  $(\cdot)_P$  für die Normalkraft bezeichnet.

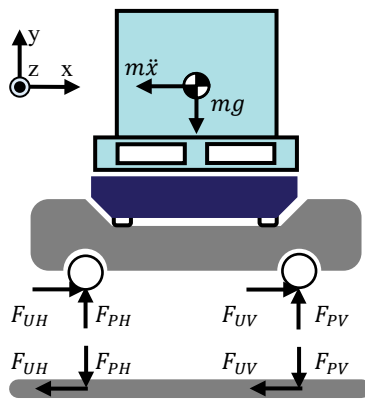


Abbildung 3. Schematische Darstellung des Shuttle- sowie des Satelliten-Fahrzeugs mit Palettenlast.

Für die Herleitung dieser Kräfte wird auf [AA21] und [W198] verwiesen. Die Masse  $m$  des Shuttle-Satelliten-Systems besteht aus der Masse des jeweiligen Fahrzeugaufbaus  $m_A$  und der Last  $m_L$ . Beim Satelliten-Fahrzeug ist  $m_L$  gleich der maximalen Last der transportierten Palette von 1.500 kg. Beim Shuttle-Fahrzeug entspricht  $m_L$  der Summe aus  $m_A$  des Satelliten-Fahrzeugs (200 kg) und der transportierten Palette von 1.500 kg.

In Tabelle 1 sind die ausgewählten Antriebsparameter aufgelistet. Bei diesen Parametern wird zwischen beladenem  $(\cdot)_{Voll}$  und unbeladenem Zustand  $(\cdot)_{Leer}$  unterschieden. Die beiden Fahrzeuge werden mit einem Beschleunigungsprofil gesteuert und mit einem Allradantrieb (Antriebsteilung:  $i = 0.5$ ) modelliert.

Tabelle 1. Für die Simulation verwendete Antriebsparameter.

Fahrzeug	$m_L$ [kg]	$m_A$ [kg]	$i$ [-]	$\ddot{x}_{Leer}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{x}_{Voll}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\dot{x}_{Leer}$ [m/s]	$\dot{x}_{Voll}$ [m/s]
Shuttle	1700	850	0,5	1,2	1,2	5,0	5,0
Satellite	1500	200	0,5	3,0	2,0	3,0	2,0

Tabelle 2 listet die resultierenden maximalen Kräfte auf, die durch die Regal-Fahrzeuge ins Regal eingeleitet werden. Im Gegensatz zur üblichen Vorgehensweise werden die Kräfte hier als zeitlich veränderlich betrachtet.

Tabelle 2. Maximale Kräfte, die durch die Fahrzeuge auf das Regal übertragen werden, unter Berücksichtigung der Antriebsparameter.

Fahrzeug	$F_{U\_Leer}$ [kN]	$F_{U\_Voll}$ [kN]	$F_{P\_Leer}$ [kN]	$F_{P\_Voll}$ [kN]
Shuttle	1,3	2,6	10,8	25,5
Satellite	0,6	3,4	2,0	16,7

#### 4.2 REFERENZREGAL – FEM MODELL

Um möglichst viele verschiedene Regalkonfigurationen abbilden zu können, wird bei der Modellierung ein modularer und parametrierbarer Ansatz angewendet. Strukturparameter wie Profile, Regalabmessungen sowie Anzahl der Regalfahrzeuge sind beliebig parametrierbar.

Eine der größten Herausforderung bei transienten Analysen stellt der rechnerbezogene Bedarf (u. a. Speicherplatz und Rechenzeit) dar. Um diese Herausforderung zu

adressieren, wird das Regal mit 1D-Balkenelementen modelliert. Dennoch weist das gesamte Referenzregal ca. 2 Millionen Freiheitsgrade auf, welches transient mit mehreren Sekunden Simulationszeit berechnet wird. Zudem wird – je nach Fall – die Symmetriebedingung um die X-Y-Ebene ausgenutzt. Damit wird es möglich, nur eine Hälfte des Regals zu modellieren, was für die Shuttle-Simulationen zulässig ist (siehe Abbildung 4).

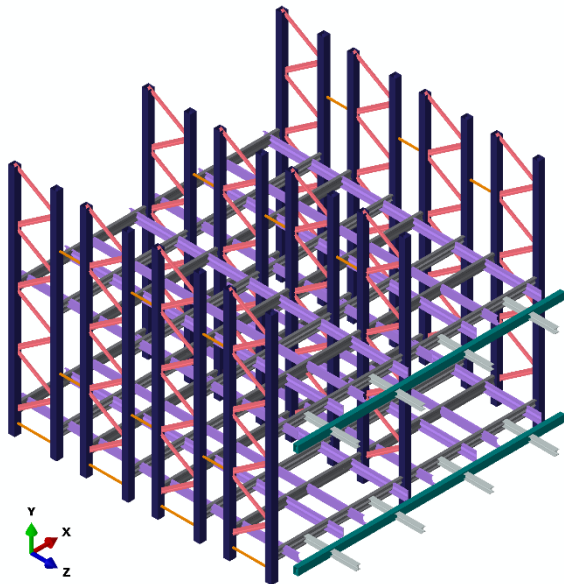


Abbildung 4. Ein Abschnitt des Parametrierbaren FEM-Modells. Lediglich eine Hälfte des Regals wird dargestellt.

## 5 EIGENFREQUENZSTUDIE

Erzwungene Schwingungen können in der Regel bei geringerer Dämpfung zu einer Resonanzkatastrophe führen, wenn die Erregerfrequenz (fast) gleich der Eigenfrequenz des Systems ist. Um solch einen Resonanzfall untersuchen zu können, ist die Kenntnis der Eigenfrequenzen notwendig. Zu diesem Zweck wird zunächst eine parametrisierte Modalanalyse des Referenzregalmodells durchgeführt. Als Parameter werden die Anzahl der Module  $n_x$  und  $n_y$  variiert. Da die Eigenfrequenz einer Struktur mit zunehmender Masse (Regallast) monoton abnimmt, werden als Extrema lediglich zwei Beladungszustände untersucht – leer  $(\cdot)^{\text{Leer}}$  und voll  $(\cdot)^{\text{Voll}}$ .

Abbildung 5 stellt den Verlauf der ersten Eigenfrequenz bei einer Variation der Höhe ( $n_y$ ) des Referenzregals ( $n_x = 18$ ) für diese beiden Zustände dar. Für das betrachtete Referenzregal beträgt die erste Eigenfrequenz  $f_1^{\text{Leer}} = 2,4$  Hz bzw.  $f_1^{\text{Voll}} = 0,514$  Hz. Aufgrund des makroskopischen Seitenverhältnisses der Regalgrundfläche stellt der erste Eigenmodus zugleich eine Eigenform in die Shuttle-Fahrt-Richtung dar.

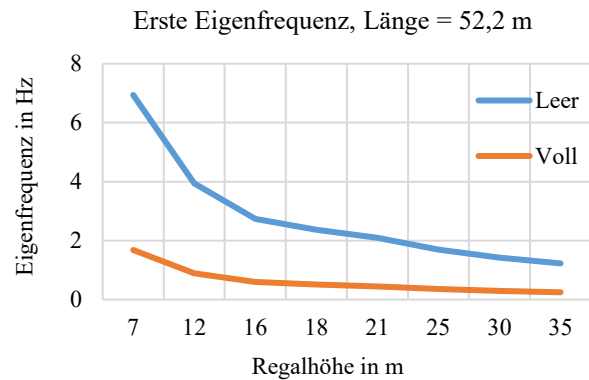


Abbildung 5. Verlauf der ersten Eigenfrequenz bei Variation der Höhe des Referenzregals.

Das Regalsystem beinhaltet zwei Arten von Fahrzeugen, die in der X-Z-Ebene orthogonal zueinander fahren. Dies wird in der Praxis dazu führen, dass Resonanzanregungen in Satelliten-Fahrtrichtung (z-Richtung) stattfinden. Um diese Art der Anregung zu untersuchen, werden weitere Eigenfrequenzen berechnet. Die ersten sechs Eigenfrequenzen sowie die zugehörigen Eigenmoden sind in Abbildung 6 dargestellt.

Da sich die erste Eigenform (a) in Fahrtrichtung des Shuttles (x-Richtung) ausprägt, ist die erste Eigenfrequenz für Shuttle-Fahrzeuge von hoher Relevanz. Die weiteren Eigenfrequenzen spielen dagegen für die Satelliten-Fahrzeug-Bewegung eine übergeordnete Rolle. Die Eigenfrequenzen des voll beladenen Regals (z.B. von 0,5 Hz bis 1,5 Hz) sind so niedrig, dass eine Betriebsweise mit mehrfachen / gestaffelten Bremsvorgängen durchaus eine Anregung im Resonanzbereich erzeugen kann. Deshalb ist es wichtig, die dynamische Wechselwirkung von den Fahrzeugen mit dem Regal näher zu untersuchen und auch die Folgen einer Resonanzanregung zu untersuchen.

## 6 SIMULATIONSERGEBNISSE

Im Rahmen der Shuttle-Untersuchung werden zunächst vier Arten der Betriebslastfälle betrachtet:

- Nothalt-Verhalten – Regal voll beladen und unbeladen
- Betriebsverhalten – Regal voll beladen und unbeladen

Abbildung 7 stellt den Schwingungsverlauf eines Regalpunktes sowie die Beschleunigung  $\ddot{x}$  für die o.g. Fälle dar. Der ausgewählte Regalpunkt (oberes Ende des mittleren Stehers) weist die höchste Schwingungsamplitude im Regal auf. Auf Basis dieser Ergebnisse wird



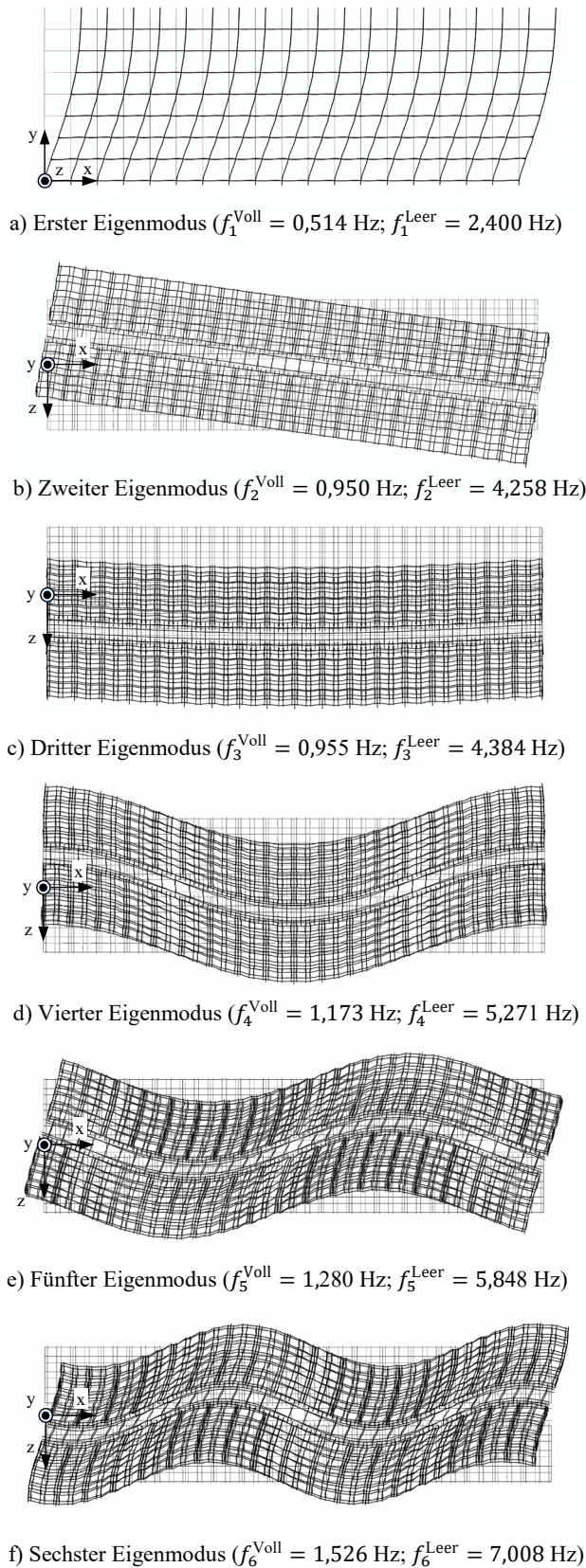


Abbildung 6. Die ersten sechs Eigenmoden mit ihren zugehörigen Eigenfrequenzen bei den voll beladenen und leeren Zuständen des Referenzregals.

ersichtlich, dass der voll beladene Zustand für die dynamische Wechselwirkung zwischen den Fahrzeugen und dem Regal den Worst-Case darstellt.

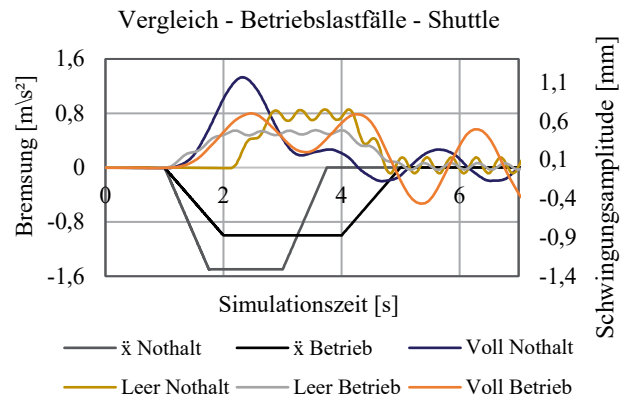


Abbildung 7. Schwingungsvergleich zwischen zwei Betriebslastfällen mit zwei Lagerzuständen des Regals (leer und voll).

Weitere Untersuchungen mit voll beladenem Regal haben zu dem Ergebnis geführt, dass ein gleichzeitiger Tippbetrieb von allen Shuttle-Fahrzeugen im voll beladenen Regal zu deutlich höheren Schwingungsamplituden des Regals führt, insbesondere wenn die Frequenz des Tippbetriebs mit der Eigenfrequenz des Regals übereinstimmt.

Bei der Shuttle-Simulation wird die Frequenz des Tippbetriebs an  $f_1^{Voll}$  angepasst. Alle Fahrzeuge bremsen mit voller Last aus der maximalen Geschwindigkeit bis zum Stillstand im Tippbetrieb (Bremspulse im zeitlichen Abstand der Eigenschwingungsdauer). Diese resonanzangeregte Schwingung weist sehr hohe Schwingungsamplitude auf, wie in Abbildung 8 dargestellt.

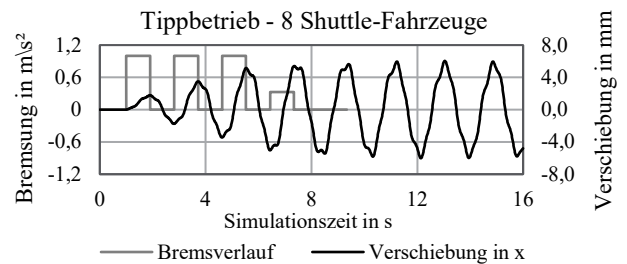


Abbildung 8. Schwingungsverlauf eines Punktes mit der größten Schwingungsamplitude im Fall eines Tippbetrieb aller acht Shuttle-Fahrzeuge im voll beladenen Zustand.

Bei der Satelliten-Simulation wird die Frequenz des Tippbetriebs an  $f_3^{Voll}$  angepasst. Wie im vorherigen Fall bremsen alle Satelliten-Fahrzeuge mit voller Last aus der maximalen Geschwindigkeit bis zum Stillstand im Tippbetrieb. Für diese Simulation fahren die Fahrzeuge in der Mitte des Regals in z-Richtung. Aus diesem Grund

wird das ganze Regal (ohne Symmetriebedingung) simuliert und hat somit einen sehr hohen Rechenbedarf.

Abbildung 9 stellt den Schwingungsverlauf eines mittleren Regalpunktes für die resonanzangeregte Satelliten-Fahrzeug-Bewegung dar. Da die Fahrzeuge in der Mitte des Regals fahren, werden Eigenschwingungen mit den dritten und vierten Eigenmoden (siehe Abbildung 6 (c) und (d)) angeregt. Dieses Phänomen führt zu einer überlagerten Schwingung im Regal. Die resultierende Schwingungsamplitude ist um einen Faktor 0,96 höher als die Amplitude während des Bremsvorgangs (siehe Abbildung 9,  $t = 1$  bis 3 s).

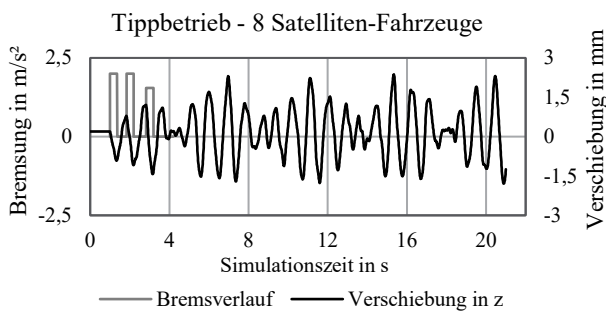


Abbildung 9. Schwingungsverlauf eines Punktes mit der größten Schwingungsamplitude im Fall eines Tippbetriebs aller acht Satelliten-Fahrzeuge im voll beladenen Zustand.

Die Spektralanalysen der Schwingungsverläufe (siehe Abbildung 8 sowie Abbildung 9) zeigen, dass die Restschwingungen nach den Bremsvorgängen die Eigenschwingungen mit der jeweiligen Eigenfrequenzen enthalten (Abbildung 10). Insbesondere im Falle der Satelliten-Bewegung sind zwei Schwingungsfrequenzen besonders ausgeprägt. Diese liegen unmittelbar in der Nähe von  $f_3^{Voll}$  sowie  $f_4^{Voll}$ . Eine überlagerte Schwingung mit  $f_2^{Voll}$  findet nicht statt, da sich die Satelliten-Fahrzeuge in der Mitte des Regals bewegen. An diesem Punkt befindet sich der Nulldurchgang des zweiten Eigenmodus (Abbildung 6 (b)).

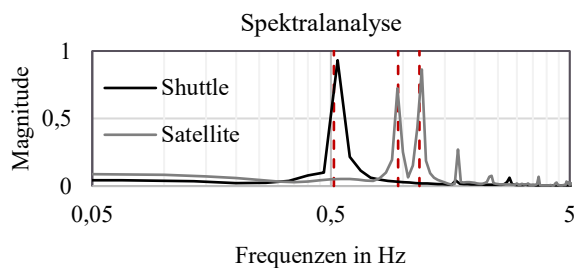


Abbildung 10. Frequenzen, die in den Schwingungen aus Abbildung 8 und Abbildung 9 enthalten sind. Zudem sind die Eigenfrequenzen  $f_1^{Voll}$ ,  $f_3^{Voll}$  und  $f_4^{Voll}$  des Regals in rot markiert.

## 6.1 STUDIE ZUR QUERSCHNITTSOPTIMIERUNG

Durch die dynamische Simulation des Shuttleregals bietet sich die Möglichkeit einer optimierten Dimensionierung des Regalbaus und damit der Material- und Kosteneinsparung an.

Um dieses Potenzial zu bestimmen, wird eine Parameterstudie durchgeführt, die die Geometrie der Regal-Steher genauer untersucht. Anhand dieser Studie kann bestimmt werden, ob durch die Wahl geeigneter Querschnitt und Querschnittabmessungen Materialeinsparungen möglich sind.

Dazu wird eine dynamische Simulation des voll beladenen Referenzregals mit einem Shuttle auf jeder Ebene durchgeführt. Die Shuttles führen dabei alle gleichzeitig eine Nothalt-Bremung aus. Die Shuttles werden so positioniert, dass die maximale Bremskraft auf der Höhe des zu untersuchenden Stehers auftritt. Damit soll – wie oben beschrieben – ein Worst-Case-Szenario abgebildet werden.

In der Studie werden zunächst Rechteckprofile, U-Profile und I-Profile betrachtet. Dabei werden Wandstärken sowie Seitenverhältnisse  $a/b$  der Profile variiert (siehe Abbildung 11). Die Querschnittsfläche aller Profile wird zunächst gleich gehalten.

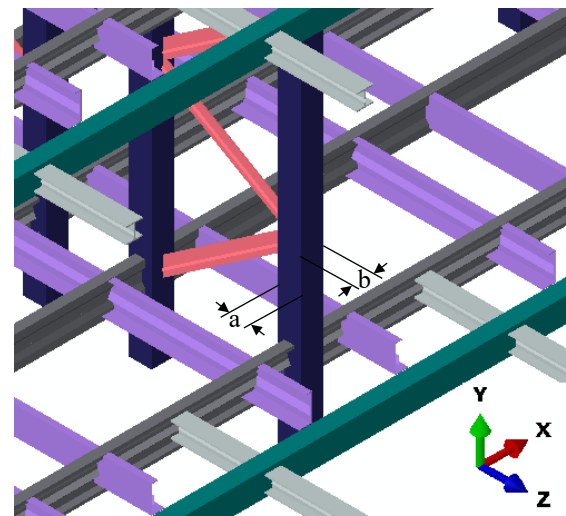


Abbildung 11. Rechteck Steher als ein Beispiel der Optimierungsstudie. Die Parameter  $a$  (Länge) und  $b$  (Breite) des Stehers werden variiert.

Als Vergleichsgröße wird die maximale während der Belastung auftretende von Mises Spannung verwendet. Mit einem einfachen Rechteckprofil lässt sich dabei die niedrigste Spannung erreichen. Daher wird im Weiteren nur ein Regalbau mit Rechteckprofil untersucht. Die Abhängigkeiten der Spannung von der Geometrie für ein Rechteckprofil sind in Abbildung 12 dargestellt.

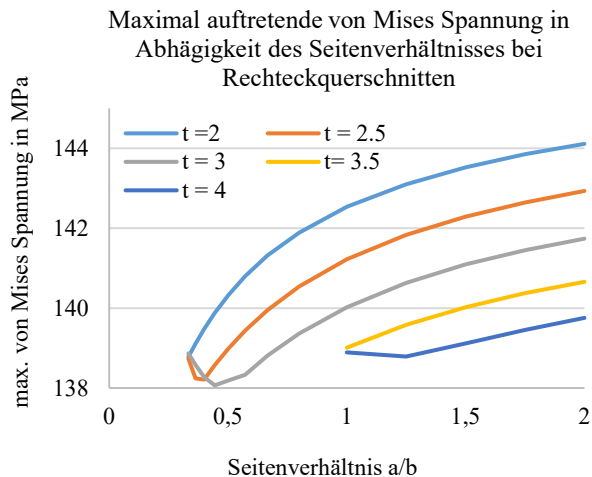


Abbildung 12. Von Mises Spannung im Rechteck-Steher in Abhängigkeit von Seitenverhältnis und Wandstärke.

Nachdem gezeigt wurde, welche Querschnittsform die niedrigste Spannung zur Folge hat, gilt es nun, die Fläche (des metallischen Querschnitts) zu reduzieren. Dabei wird angenommen, dass die optimalen Proportionen des Steherquerschnitts unabhängig von der Querschnittsfläche des Stehers sind. Folglich wird, ausgehend vom optimalen Rechteckprofil mit  $a/b = 0,532$  und  $t = 3$  mm (siehe Abbildung 12) die Querschnittsfläche, unter Beibehaltung aller Proportionen, reduziert.

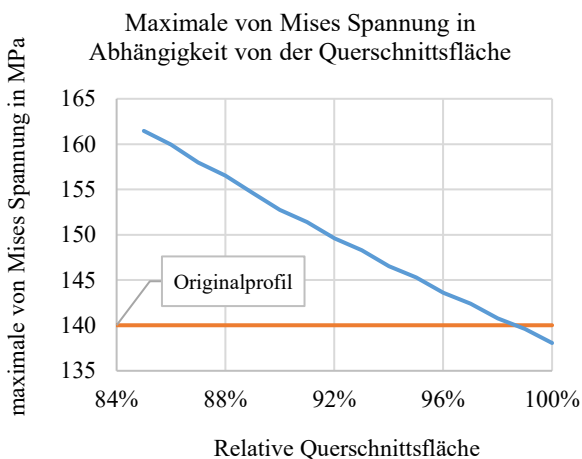


Abbildung 13. Von Mises Spannung in Abhängigkeit von der Querschnittsfläche.

Unter der starken Bedingung, dass die beim Originalprofil (quadratischer Querschnitt) auftretende maximale von Mises Spannung nicht überschritten werden darf, ist eine maximale Gewichtseinsparung von 1,5% möglich (siehe Abbildung 13).

Die Studie konnte außerdem einen Einfluss der Profilform auf die Eigenfrequenz des Regals feststellen. Dabei führt ein kleineres Seitenverhältnis bei konstanter

Fläche und Wandstärke zu einer höheren Eigenfrequenz bei Anregung in x-Richtung.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERE VORGEHENSWEISE

Aufbauend auf eine erste Veröffentlichung [AA21] werden in diesem Beitrag weitere Details zur Modellbildung sowie Simulationsergebnisse der einzelnen Lastfälle präsentiert und diskutiert. Die für die Simulation verwendeten Fahrzeug-Parameter und die Größe des Referenzregals wurden aufbauend auf einer Marktstudie so festgelegt, dass maximale Lasteinwirkungen in Worst-Case-Szenarien untersucht werden konnten.

Die parametrisierte Modalanalyse des Referenzregals hat u.a. gezeigt, dass die Eigenfrequenz des Regals mit zunehmender Regalbelastung abnimmt.

Erste dynamische Analysen zeigen jedoch auch, dass die Schwingung des Referenzregals aufgrund der Beschleunigung von Shuttle-Fahrzeugen im Falle eines Not-Halts offenbar keine hohe Amplitude aufweist. Allerdings ist eine Resonanzanregung beim Tippbetrieb (Bremspulse im zeitlichen Abstand der Eigenschwingungsdauer) eines Shuttle-Fahrzeugs speziell zu untersuchen. Solch ein Fall führte zu Schwingungsamplituden des Referenzregals im Bereich  $\pm 6$  mm.

Im Falle der Satelliten-Fahrzeuge ist eine – aufgrund der quaderförmigen Bauweise des Regals – überlagerte Schwingung zu beobachten. Die Überlagerungen führten zu Schwebungen, so dass die Restschwingungsamplituden des Regals i.d.R. höher sind als die, die während der erzwungenen Schwingungsphase (Beschleunigungsphase) vorkommen.

Es wurde zudem gezeigt, dass eine Gewichtsreduktion durch Optimierung der Steherquerschnitte grundsätzlich möglich ist. Aufbauend darauf können weiterführende Untersuchungen vorgenommen werden, die weitere Einsparungspotentiale erschließen könnten. Beispielsweise könnte ein Steher betrachtet werden, der so aus aufeinander stehenden Segmenten aufgebaut ist, dass er mit zunehmender variable (abnehmende) Querschnittsform und -fläche besitzt. Dabei könnte für jedes Segment die optimale Querschnittsform gefunden werden und somit zusätzlich Material eingespart werden. Darüber hinaus könnte die Querschnittsform der Steher zu einer gezielten Beeinflussung der Eigenfrequenz des Regals genutzt werden.

Im nächsten Schritt wird ergänzend noch das Verhalten des Regals beim Pufferstoß untersucht, wobei ein voll beladenes Regal-Fahrzeug am Ende des Referenzregals den Endanschlag anfährt. Als Parameter werden verschiedene Arten des Stoßes betrachtet, u.a. Stahl



auf Stahl oder Stahl auf Gummi-Puffer. Auch der Beladungszustand des Regals wird variiert.

Abschließend werden Handlungsempfehlungen für eine – auf die Dynamik der Regalfahrzeuge bezogene – optimale Regalbauweise abgeleitet.

## 8 FÖRDERHINWEIS

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projektes „Dynamreg, Dynamik und die Wechselwirkung auf den

Regalbau von Shuttlesystemen“. Das IGF-Vorhaben 21078 N der Forschungsgemeinschaft Intralogistik/ Förder-technik und Logistiksysteme e.V. (IFL) wird durch die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

### LITERATUR

- [AA21] Azka A, Fischer G, Milushev V, Mittwollen M, Padhy M. Shuttle-Systeme: Dynamik und Wechselwirkung auf den Regalbau. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2021.
- [FEM17] FEM European materials handling federation: FEM 9.860: Guideline Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems. 2017
- [ME18] Meyke, Marvin. „Trends – Flexibel und skalierbar“. Materialfluss 2018. Aufgerufen am 30.07.2022, <https://www.materialfluss.de/regalbediengerate/flexibel-und-skalierbar-862538.htm>

[VDI15] VDI-Fachbereich Technische Logistik. VDI-Richtlinie: VDI 2692 Blatt 1 Shuttle-Systeme für kleine Ladeeinheiten. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2015.

[WI98] Willumeit, H.P.: Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik. Teubner 1998. ISBN 978-3-663-12247-0

---

**Manmit Padhy, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.  
Tel.: +49 (0) 721 608 48680  
E-Mail: [manmit.padhy@kit.edu](mailto:manmit.padhy@kit.edu)

**Georg Fischer, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.  
Tel.: +49 (0) 721 608 48669  
E-Mail: [georg.fischer@kit.edu](mailto:georg.fischer@kit.edu)

**Martin Mittwollen, Dr.-Ing.**, Akademischer Direktor am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.  
Tel.: +49 (0) 721 608 48605  
E-Mail: [martin.mittwollen@kit.edu](mailto:martin.mittwollen@kit.edu)

**Simon Weber, B.Sc.**, Studentische Hilfskraft am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.  
E-Mail: [udvit@student.kit.edu](mailto:udvit@student.kit.edu)

**Viktor Milushev, M.Sc.**, Ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.  
E-Mail: [viktor.milushev@kit.edu](mailto:viktor.milushev@kit.edu)

---

**Adresse:**  
Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 8  
D - 76131 Karlsruhe