

Shuttle-Systeme: Dynamik und Wechselwirkung auf den Regalbau

Shuttle-Systems: Dynamics and interaction with the rack

Azman Azka
Georg Fischer
Viktor Milushev
Martin Mittwollen
Manmit Padhy

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

Innerhalb weniger Jahre hat sich eine wachsende Zahl von Herstellern mit verschiedenen Shuttle-Systemen in Hochregallagern auf dem Markt positioniert. Sowohl Hersteller als auch anwendende Unternehmen erkennen immer mehr den positiven Nutzen durch den Einsatz dieser Systeme. Neben den immer größer werdenden Lasten werden die Regale auch immer höher gebaut. In der Folge wachsen Belastungen und auf die Regale wirkende Kräfte. Daher muss dem Regalbau beim Einsatz von Shuttle-Systemen eine erhöhte Beachtung zukommen, um die Versagensgefahren durch Shuttle-induzierte dynamische Krafteinwirkungen bei gleichzeitiger wirtschaftlicher Optimalität minimieren zu können. In diesem Beitrag wird das betrachtete Shuttle-Lager und dessen Modellierung beschrieben. Zusätzlich wird mithilfe eines analytischen Modells des Shuttle-Fahrzeugs dessen dynamisches Verhalten und die dabei wirkenden, veränderlichen Kräfte während der Fahrt berechnet.

[Schlüsselwörter: Shuttle-System, SBS/RS, Regalbau, Schwingungen, Dynamik, Finite-Element-Analyse]

Within a few years, a growing number of manufacturers have positioned themselves on the market with various shuttle systems in high-bay warehouses. Both manufacturers and users are increasingly recognizing the positive benefits of using these systems. In addition to the ever-increasing loads, the racks are also being built higher and higher. As a result, the loads and forces acting on the racks are increasing. For this reason, increased attention must be paid to the rack construction when using shuttle systems in order to minimize the risks of failure due to shuttle-induced dynamic forces while at the same time keeping the system economically optimal. In this paper, the example shuttle and its modeling are described. In addition, an analytical model of the shuttle vehicle is used to calculate its dynamic behavior and the variable forces acting on it during travel.

[Keywords: SBS/RS, rack design, dynamic impact, shuttle, FEA]

1 EINLEITUNG

In der Lagerlogistik wird immer mehr Flexibilität und Skalierbarkeit gefordert. Shuttle-Systeme gewinnen daher zunehmend an Bedeutung und werden als Alternative zu herkömmlichen Hochregalanlagen mit automatischen Regalbediengeräten (RBG) eingesetzt, um Artikel zwischen dem Lagerregal und der Entnahmestation zu transportieren [ME18]. Aufgrund der Entkoppelung der horizontalen und vertikalen Bewegungen können bei diesem System gleichzeitig Lager- und Förderprozesse im Regal durchgeführt werden [VDI15]. Bei Shuttle-Systemen fahren die Shuttles typischerweise auf Fahrschienen, die fest mit dem Regal verbunden sind, während sich Regalbediengeräte typischerweise unabhängig vom Regal bewegen. Durch die gleichzeitige Bewegung mehrerer Shuttle-Fahrzeuge treten große dynamische Kräfte auf die Regalkonstruktion auf. Über die Fahrschienen werden die Massen von Shuttle und Ladung als zusätzliche Lasten in die Regale eingebracht. Beschleunigen, Bremsen und Fahren leiten weitere, horizontal und vertikal wirkende dynamische Kräfte in die Regale ein, was unerwünschte und gefährliche Lastwirkungen und Schwingungen der Regale verursachen kann. Aus diesem Grund muss der Regalbau für Shuttle-Systeme robuster als beim RBG-Betrieb ausgelegt werden, um die zusätzlichen statischen und dynamischen Krafteinwirkungen ertragen zu können.

Dem Regalbau bei Shuttle-Systemen muss daher eine verstärkte Beachtung zukommen, um die Versagensgefahren von durch Shuttle-Fahrzeuge induzierten Schwingungen bei gleichzeitiger wirtschaftlicher Optimalität, z.B. bei Materialeinsatz und Betriebsweise, minimieren zu können. Auslegungsnormen für den Regalbau wie bei RBG-Systemen existieren für Shuttle-Systeme jedoch noch nicht.

Außerdem werden Shuttle-Systeme bisher in den Auslegungsvorschriften hauptsächlich für leichte Güter oder

AKL-Systeme betrachtet. Der zunehmende Palettentransport durch Shuttle-Systeme war bisher noch nicht Gegenstand von Untersuchungen. Aufgrund der größeren Massen, die beim Palettentransport durch die schwereren Güter sowie die größer zu dimensionierenden Shuttle-Fahrzeuge entstehen, sind die zusätzlichen dynamischen Kräfte hier noch größer als bei Shuttle-Systemen mit leichten Gütern [PI12].

Das Projekt DynamReg hat sich daher zum Ziel gesetzt, einen Beitrag zur 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.

2 LITERATUR UND NORMEN

Shuttle-Systeme erfreuen sich wachsender Beliebtheit und sind aufgrund ihrer Vorteile – höhere und skalierbare Leistung, bessere Raumausnutzung – inzwischen zu einer attraktiven Alternative gegenüber Regalbediengeräte-basierten Hochregallager-Systemen geworden. Allerdings besitzen sie eine größere Komplexität infolge der Trennung in Komponenten (Fahrzeuge) für den Horizontal- und (Lift) für den Vertikaltransport. Die größere Flexibilität bedeutet jedoch auch eine höhere Komplexität dieser Systeme [TE20]. Je nach Anwendungsfall lassen sich verschiedene Lagergeometrien realisieren sowie die Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge oder auch der Vertikalförderer variieren.

Eine Marktrecherche hat ergeben, dass es aktuell mehr als 25 Hersteller von Shuttle-Systemen gibt, welche für unterschiedliche Anwendungsfälle verschiedene Systemkonfigurationen entwickelt haben. Diese Systemkonfigurationen wurden anschließend analysiert und klassifiziert und daraus eine detaillierte Beschreibung aller vorhandenen Systeme abgeleitet. Die folgende Abbildung zeigt einen sehr kleinen Ausschnitt der Klassifizierung der Shuttle-Systeme.

Systemkonfiguration						
Klassifikation	Horizontale Bewegung	Shuttle Fahrzeug	Shuttle Fahrzeug	Regalbediengerät	Shuttle Fahrzeug	Satellite Fahrzeug
	Vertikale Bewegung	Lift	Lift			Gabelstapler
	Lastaufnahme mittel	Teleskopgabel	Satelliten Fahrzeug	Satelliten Fahrzeug	Teleskopgabel	Satelliten Fahrzeug

Abbildung 1: Shuttle-Systemkonfigurationen

Eine systematische Literaturrecherche hat darüber hinaus ergeben, dass es ca. 200 Veröffentlichungen zu Shuttle-Systemen gibt. Diese befassen sich jedoch nur mit Leistungsberechnungen, Steuerungsstrategien oder Energiebedarfsrechnungen, Auswirkungen auf den Regalbau werden dabei nicht betrachtet.

Eine unabhängige und einheitliche Beschreibung von Shuttle-Systemen findet man in der vorhandenen Richtlinie VDI 2692 und in der FEM-Regel 9.860. Jedoch wird in keiner dieser Publikationen der Regalbau und dessen Auslegung näher betrachtet [VDI15] [FEM17].

Die Auslegung eines Regals für RBG - für leichte Fördergüter - wird in der FEM 9.832 behandelt [FEM01]. Dabei werden z. B. Verformungen des Auflageprofils bei einer doppeltiefen Einplatzlagerung verdeutlicht und unterstützende Anmerkungen geliefert. Die Regel bezieht sich jedoch nur auf „RBG-Lager“ und ist höchstens stark eingeschränkt auf Shuttle-Systeme übertragbar.

Grundlegende Arbeiten zu Schwingungen mechanischer Antriebssysteme findet man u. a. in [DF14], wo beispielsweise die Modellbildung und Berechnungsmöglichkeiten von Schwingungen mechanischer Antriebssysteme beschrieben werden.

Die Wirkung von statischen Kräften auf Regale wurde bereits untersucht und DIN EN 15512 gibt diese Kräfte und die daraus resultierenden Dimensionierungen der Regale wieder. DIN EN 15512 geht jedoch nicht auf dynamisch wirkende Kräfte durch Bewegungen von Shuttle-Fahrzeugen ein [DIN10]. Weitere Arbeiten über die Auswirkung von statischen Kräften auf den Regalbau wurden unter anderem in Kombination mit der Nutzung höherfester Stähle durchgeführt [TU14]. Weitere Forschungsvorhaben untersuchen beispielsweise die Schubsteifigkeit einzelner Regalkomponenten [TU18].

Allgemeine Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Regalen wurden bereits seit den 1970ern durchgeführt. Angefangen mit [BL73] wurden Regale manuell erzeugten Vibrationen ausgesetzt, um die Auswirkungen von dynamischen Kräften auf die Regale herauszufinden. Die Arbeit von Krawinkler, et al. beschäftigt sich mit den Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen von Regalen [KR73]. Das Ersetzen der manuell erzeugten Vibrationen durch Rütteltische ähnelt den Untersuchungen von Erdbebenverhalten und wurde unter anderem von [FI04] und [FI06] angewandt.

Von der EU geförderte Forschungen zum Verhalten von Regalen in Erdbebengebieten gibt es unter anderem von [CA09]. [DA16] untersucht sowohl die Isolation des Fundaments, auf welchem das Regal gebaut wird als auch eine nachrüstbare sog. Fundamentisolation innerhalb eines Regals, wobei ein im Erdreich versenkter Fundamentblock durch seine Trägheit den Erdbebenkräften entgegenwirkt; dieses Vorgehen wird auch in [SS17] bearbeitet. Bei der Nachrüstvariante kann die Eigensteifigkeit der Regale durch „spezielle Steckverbindungen verstärkt“ werden [DA16]. [ME17] setzt im Vergleich zur Nachrüstvariante deutlich früher an und beschäftigt sich sowohl mit den zum Regalbau genutzten Werkstoffen als auch mit verschiedenen Strukturen der Regale. Für Regale mit Palettenlagerung führten [AD14] und [CA16] Berechnungen für das

Verhalten unter Erdbebenbeanspruchung durch, woraus Verhaltensfaktoren unter Erdbebenbeanspruchung errechnet werden können. In Deutschland wird die Sicherheit von Bauten und auch des Regalbaus nach [DIN11] geregelt. Darin werden Mindestanforderungen an Regale in erdbebengefährdeten Gebieten formuliert – mit dem einzigen Ziel, Personenschäden zu vermeiden [TH13].

Neben durch Erdbeben erzeugten dynamischen Kräften wurde u.a. von [HU10] und [GU09] der Einfluss von Interaktionen zwischen Regalen und RBG untersucht, wobei hier dynamische Kräfte durch "Anfahren der Durchschubsicherung" und "Unsanftes Absetzen einer Ladeinheit" entstehen [HU10].

Weiterhin gibt es für Regale mit RBG eine Reihe von Ansätzen, um die Schwingungen der RBG zu reduzieren und somit nur relativ geringe dynamische Kräfte wirken zu lassen [KU01], [PS14] und [PS16]. Des Weiteren wurden Konzepte wie schwingungsoptimale Anfahrzeiten unter Nutzung der Eigenschwingungsdauer des RBG [SC94] sowie die nahezu vollständige Schwingungsvermeidung durch Zustandsregelung des Fahrwerks [DI99] untersucht.

In zwei Patenten [SI08] und [GE17] wurden Verfahren zur Dämpfung von RBG-Schwingungen entwickelt.

Es gibt auch Ansätze zur Modellbildung, um die dynamischen Kräfte, die von RBG ausgehen, abbilden zu können. So wurde in [KU10] das dynamische Verhalten von RBG-Systemen analysiert. Dazu wurde "eine umfangreiche experimentelle Schwingungsanalyse an einem bestehenden Regalbediengerät durchgeführt. Anschließend wurde ein Ersatzmodell als Mehrkörpersimulations-Modell von diesem System erstellt und damit Untersuchungen zur dynamischen Beurteilung durchgeführt" [KU10].

Für statische Betrachtungen am Regal und dynamische Einwirkungen auf das Regal durch Erdbeben gibt es also gute Grundlagen, auf denen aufgebaut werden kann. Weiterhin findet man für Schwingungen von RBG und auch für die Wechselwirkungen zwischen RBG und Regal bereits Forschungsarbeiten in der Literatur. Jedoch wurden diese Wechselwirkungen nicht für Shuttle-Systeme und die darin auftretenden dynamischen Kräfte betrachtet - weder für leichte Güter wie im AKL-Bereich noch für schwere Lagergüter wie beispielsweise im Paletten-Bereich.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass es weder Literatur noch Forschungsarbeiten zum dynamischen Verhalten der Regale bei Einsatz von Shuttle-Systemen gibt. Daher soll ein Gesamtmodell aller dynamisch wirkenden Kräfte entwickelt werden, mit dem die Wechselwirkungen zwischen Regal, Shuttle-Fahrzeug, Lift und Ladung abgebildet werden können. Mit diesem Gesamtmodell sollen in diesem Forschungsprojekt unter anderem folgende wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen beantwortet werden:

- 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 Regalstützen?
- Kann durch ein zeitlich gestaffeltes Abbremsen der Shuttle-Fahrzeuge der Regalbau zu einer Resonanzschwingung angeregt werden?
- Wie hängt das Schwingungsverhalten der Regale mit Beschleunigungen und Geschwindigkeiten der Shuttles zusammen?
- Welchen Einfluss hat die vertikale Bewegung der Liftplattform auf das Schwingungsverhalten des Regals?

3 REFERENZMODELL

Im Vergleich zu klassischen Hochregallagern mit RBG sind Shuttle-Systeme deutlich komplexer. Ursache dafür sind neben den unabhängig voneinander agierenden Systemkomponenten (Lifte, Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug) auch die zusätzlichen Funktionen wie der Ebenen- und Gassenwechsel der einzelnen Fahrzeuge. Darüber hinaus können bei einem klassischen Shuttle-System auch mehrere Shuttle-Fahrzeuge pro Lagergasse gleichzeitig auf mehreren Ebenen fahren.

Bei einem Paletten-Shuttlesystem mit Satelliten-Fahrzeug (siehe Abbildung 2) wird die Palette in der Vorzone vom Satelliten-Fahrzeug aufgenommen, indem dieses unter die Palette fährt und diese anhebt. Über den Lift wird das Satelliten-Fahrzeug zusammen mit der Palette in die entsprechende Lagerebene transportiert (vertikale Bewegung in y-Richtung). Dort wird das Satelliten-Fahrzeug vom Shuttle-Fahrzeug aufgenommen. Das Shuttle-Fahrzeug fährt zusammen mit dem Satelliten-Fahrzeug und der Palette in horizontaler Richtung (x-Richtung) zum vorgesehenen Lagerkanal. Dort verlässt das Satelliten-Fahrzeug mit Palette das Shuttle Fahrzeug, fährt in horizontaler Richtung (z-Richtung) in den Lagerkanal hinein und lädt die

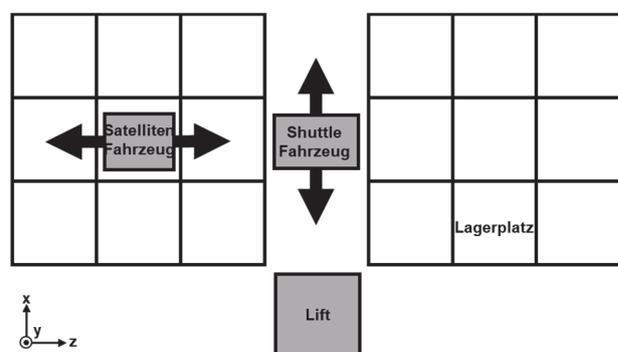


Abbildung 2: Draufsicht des betrachteten Shuttle-Systems

Ladeinheit dort am vorgesehenen Lagerplatz ab. Anschließend fährt das Satelliten-Fahrzeug zurück zum Shuttle-Fahrzeug. Bei einer Auslagerung erfolgt der gesamte Ablauf in umgekehrter Reihenfolge.

Da Shuttle-Systeme sehr flexibel sind, problemlos an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden können und je nach Kundenwunsch individuelle Lösungen umgesetzt werden, wurde als repräsentatives Modell eines Shuttle-Systems ein Referenzmodell eines Regalsystems definiert, das einen marktüblichen Aufbau aufweist.

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 2)
- Das Palettenlager ist freistehend (keine Silobauweise) und mit dem Boden verschraubt
- Pro Lagerkanal können 6 Paletten hintereinander gelagert werden (Lagerfachtiefe / Kanalfachtiefe sind 6 Paletten -> 6 Lagerplätze je Lagerkanal)
- In einem Fach können 2 Paletten nebeneinander gelagert werden. Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen zwei Regalstützen 2 Paletten beträgt.
- Alle Komponenten (u. a. Stützrahmen, Träger, Fahr-schiene, Verstrebungselemente) des Regals sind miteinander verschraubt.
- Länge der Lagergasse und Anzahl der Lagerebenen sind variabel

Mit den Angaben (Konstruktionsdaten) der Hersteller wird ein Referenzregal für die numerische Analyse modelliert, dessen reale Umsetzung dann als Vergleich für die Validierung des numerischen Modells verwendet wird.

In gleicher Weise wird nach den Angaben der Shuttle-Hersteller ein einfaches 4-Rad-Fahrzeug als Referenz-Modell für Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug erstellt. Zusätzlich werden nach den Angaben der Hersteller maximale Last, Geschwindigkeit und Beschleunigung als Worst-Case-Szenario angenommen, während für die Abmessungen ein Durchschnittswert aus alle Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug herangezogen wird.

4 MODELLBILDUNG

Aufbauend auf der Recherche und Beschreibung von Shuttle-Systemen erfolgt eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten eines Shuttle-Systems. Für die einzelnen Komponenten Shuttle-Fahrzeug, Lift, Lastaufnahmemittel (Satelliten-Fahrzeug) und Regalbau wurden

Parameterlisten erstellt, mit denen sich die einzelnen Teilsysteme beschreiben lassen und als Grundlage für die Modellbildung dienen.

Des Weiteren wurden mögliche Lastfälle definiert. Dazu wurden im ersten Schritt alle möglichen Einflussfaktoren auf den Regalbau ermittelt und daraus Wechselwirkungen und Wirkzusammenhänge abgeleitet. Da es nicht möglich ist, alle erarbeiteten Lastfälle und Einflussfaktoren zu analysieren und zu bewerten, werden nur die Worst-Case Szenarien betrachtet, womit der größte Teil aller im Normalbetrieb eintretenden Lastfälle abgedeckt ist.

4.1 REGALBAU – REFERENZMODELL

Das Referenzmodell des Regalbaus aus Kapitel 3 wird in eine FEA-Softwareumgebung implementiert. Damit wird ein repräsentatives FE-Regalbaumodell entwickelt, das die gewünschten statischen und dynamischen Lastfälle abbilden kann. Mit diesem parametrisierbaren Modell ist es möglich, den Einfluss von Lift, Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug, in Abhängigkeit von den wesentlichen Parametern wie Geschwindigkeit, Beladung und Anzahl der Fahrzeuge auf den Regalbau zu bestimmen. Eine erste Iteration des Modells ist in der Abbildung 3 dargestellt. [ANS20]

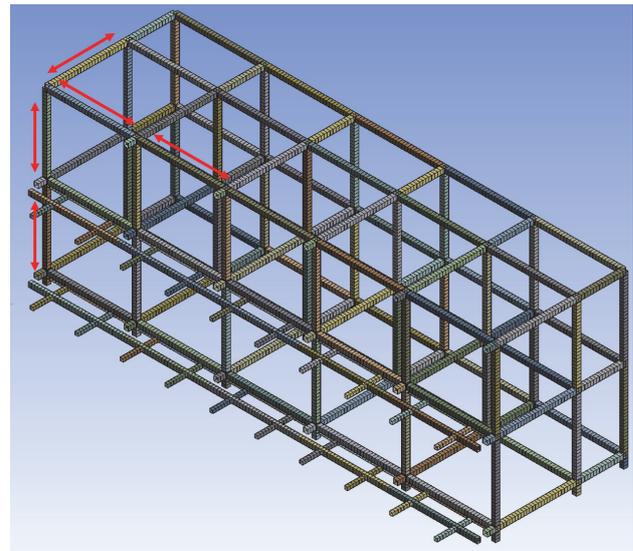


Abbildung 3: Skalierbares FE-Modell des Regalbaus.

Die Regaleinheiten, mit allen Stützen, Profilen und Fahr-schienen werden als Balkenelemente modelliert, was zwei Vorteile bietet:

- Der erste Vorteil besteht darin, dass der Rechenaufwand im FE-Modell für die Balkenelemente im Vergleich zu einem Volumenmodell geringer ist, so dass auch größere Systeme modelliert werden können, ohne dass die Rechenzeit übermäßig ansteigt.
- Der zweite Vorteil ist, dass die Modellierung der Regaleinheiten als Balken es ermöglicht, das gesamte

Modell als modulare Einheit zu gestalten, die parametrisch erweitert werden kann. So können Änderungen in den Abmessungen der Regaleinheiten sehr einfach umgesetzt werden.

Das Balkenmodell wird gegen das 3D-Volumenmodell in der kleinstmöglichen Modulgröße verifiziert, um die Unterschiede zwischen den beiden Modellen zu untersuchen und ggf. bei den weiteren Berechnungen entsprechend berücksichtigt zu können.

In den ersten Iterationen des Regalmodells wird davon ausgegangen, dass alle Elementverbindungen aus Schweiß-/Festverbindungen bestehen. Dies geschieht, um die Stabilität des Modells zu überprüfen. Falls das Modell ein unbefriedigendes Ergebnis liefert, werden die Verbindungsarten mitberücksichtigt und das Ergebnis kann mit den Modellen der ersten Iteration verglichen werden.

Für die Validierung des Modells müssen sowohl statische als auch dynamische Versuchsreihen durchgeführt werden. Die statischen Versuche beinhalten das Auslenken des Regalbaus an kritischen Stellen und die Erfassung der Systemantworten (z.B. Auslenkung, auftretende Kräfte und Momente, mechanische Spannungen). Somit wird das statische Verhalten des Modells validiert. Die dynamischen Versuche sollen das dynamische Verhalten des Regalbaus und den Einfluss der Shuttle- und Satelliten-Fahrzeuge sowie Lifte auf den Regalbau untersuchen. Das dynamische Verhalten des Regals kann mittels einer experimentellen Modalanalyse ermittelt werden. Der Einfluss von Shuttle- und Satelliten-Fahrzeugen sowie Liften auf den Regalbau wird experimentell durch Worst-Case-Szenarien erfasst. Anschließend erfolgt die Durchführung der Messungen an realen Regalen. Diese Messdaten werden abschließend ausgewertet, statistisch analysiert, sowie mit den Modell-daten evaluiert und abgeglichen. Ausgehend von den erzielten Ergebnissen werden die Modelle ggf. überarbeitet und angepasst.

4.2 SHUTTLE UND SATELLIT FAHRZEUG

Um das Verhalten des Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug, einschließlich der Wechselwirkungen mit dem Regal, richtig berechnen und modellieren zu können, ist es notwendig, das Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug als analytisches Modell abzubilden. Um den Umfang des Modells auf eine sinnvolle und aussagefähige Größe zu begrenzen, werden u.a. folgende Annahmen getroffen:

- Das Shuttle- bzw. Satelliten-Fahrzeug wird als vierrädriges Fahrzeug mit einem parametrischen veränderbaren Antriebssystem modelliert (siehe Abbildung 4)
- Aerodynamischen Effekte werden vernachlässigt
- Last und Schwerpunkt des Fahrzeugs befinden sich in Symmetrie bezüglich der z-x-Ebene

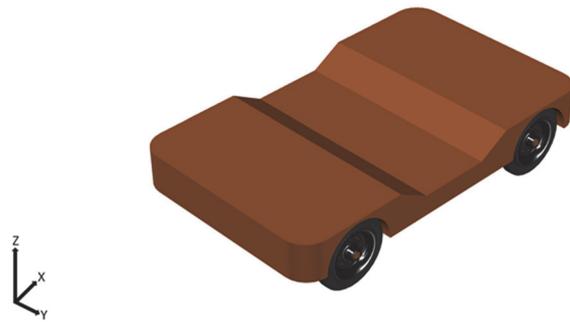


Abbildung 4: Generisches Modell von einem Shuttle- bzw. Satelliten-Fahrzeug.

Mit einem vereinfachten Modell des Fahrzeugs kann die Beziehung zwischen dem Shuttle- bzw. Satelliten-Fahrzeug und der Fahrschiene mit 4 charakteristischen Gleichungen dargestellt werden [Wi198]. Damit lassen sich die Umfangskräfte der einzelnen Räder (F_u) sowie die Lastkraft auf die Achse (F_p) von Vorderrad (v) und Hinterrad (h), in Abhängigkeit von der Fahrzeugdimension (a;b;l;h), Radgröße (s), Antriebsverteilung (i), Geschwindigkeit (\dot{x}), Beschleunigung (\ddot{x}), Radträgheit (θ), Reibung (f), und Last (m) berechnen:

$$F_{uv} = (1 - i) \left[\left(m + \frac{\theta_v + \theta_h}{r_{dgn} s} \right) \ddot{x} + f_R F_{pv} + f_R F_{ph} \right] - f_R F_{pv} - \frac{\theta_v \ddot{x}}{r_{dgn} s}$$

$$F_{uh} = (i) \left[\left(m + \frac{\theta_v + \theta_h}{r_{dgn} s} \right) \ddot{x} + f_R F_{pv} + f_R F_{ph} \right] - f_R F_{ph} - \frac{\theta_h \ddot{x}}{r_{dgn} s}$$

$$F_{pv} = mg \frac{b}{l} - \left[m \frac{h}{l} + \left(\frac{\theta_v + \theta_h}{r_{dgn} l} \right) \right] \ddot{x} - \frac{s}{l} (f_R F_{ph} + f_R F_{pv})$$

$$F_{ph} = mg \frac{a}{l} - \left[m \frac{h}{l} + \left(\frac{\theta_v + \theta_h}{r_{dgn} l} \right) \right] \ddot{x} + \frac{s}{l} (f_R F_{ph} + f_R F_{pv})$$

Mit den vier charakteristischen Gleichungen ist es möglich, ein dynamisches Modell für das Shuttle- bzw. Satelliten-Fahrzeug zu erstellen., mit dem das dynamische Verhalten und die dabei wirkenden Kräfte während der Fahrtzyklen berechnet werden können. Die dabei erzielten Ergebnisse werden als Eingangsgrößen (anregende Kräfte) für die FEM-Analysen des Regals genutzt.

Für Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug werden jeweils die gleichen Modelle verwendet, aber mit unterschiedlichen Inputparametern:

5 MODELLIERUNGSPROZESS DES SHUTTLE-FAHRZEUGS

Mit Hilfe der charakteristischen Gleichungen aus Kapitel 4.2 und Inputdaten von den Herstellern können die Umfangskräfte und die Achslasten des Shuttle-Fahrzeugs berechnet werden. Dazu wurde ein parametrisierbares Modell in Simulink erstellt (siehe Abbildung 5).

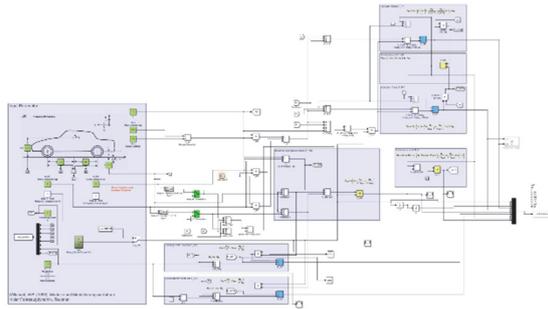


Abbildung 5: Simulink Modell der charakteristischen Gleichungen für Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug

Mithilfe des Simulink Modells können die Beschleunigungsprofile, Umfangskräfte und Achslasten als eine Funktion über der Zeit dargestellt werden.

Für die Fahrt eines Shuttle-Fahrzeugs mit einer Beschleunigung von 0.5 m/s^2 und einer Last von 1200 kg wurden die Achslasten und Umfangskräfte berechnet (siehe Abbildung 6).

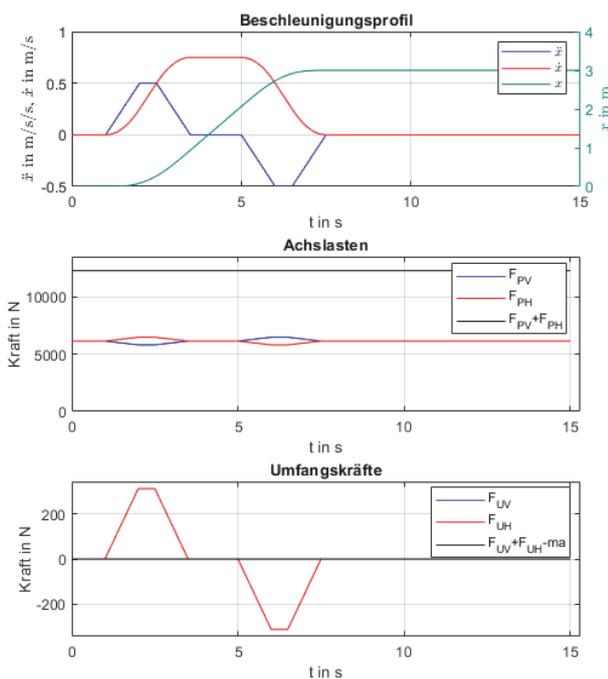


Abbildung 6: Ergebnis der Shuttlemodellierung einer Kurzfahrt von 7,5 Sekunden

Das Fahrzeug wird bis zu seiner Zielgeschwindigkeit von 0.75 m/s beschleunigt und nach 1 Sekunde Konstantfahrt wieder abgebremst. Während der Beschleunigungs- und Bremsphase werden Umfangskräfte von maximal 312.5 N erzeugt. Wegen der bewegten Last schwankt die Achslast um $\pm 165 \text{ N}$ (um die stetigen Achslasten von 6100 N) mit einer gesamten Achslastkraftdifferenz zwischen Vorderrad und Hinterrad von $\pm 330 \text{ N}$.

Die erzielten Ergebnisse aus den Berechnungen für Umfangskräfte und Achslasten werden dann als Eingabewerte für die FEA-Simulation des Regalbaus verwendet. Damit können dann die Kraft- und Spannungsverteilungen entlang des Regalbaus (z. B. resultierenden Kräfte auf die Fahrschienen, die Regalstützen) als eine Funktion über der Zeit ermittelt werden. Daraus lassen sich dann Aussagen über die Gestaltung und Dimensionierung der Regalsysteme ableiten.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERE VORGEHENSWEISE

In diesem Beitrag wird die Vorgehensweise zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens des Regalbaus bei Paletten-Shuttle-Systemen vorgestellt. Die erzielten Ergebnisse sollen in Zukunft als Grundlage für die Gestaltung, Auslegung und Dimensionierung des Regalbaus von Shuttle-System dienen. Es wurde die Grundlage der Modellbildung dargelegt und ein Ansatz beschrieben, wie die Modellbildung von Shuttle- und Satelliten-Fahrzeug und des Regals umgesetzt werden kann. Die Entwicklung und Aufbereitung der mathematischen und physikalischen Zusammenhänge und die anschließende Implementierung erfolgt im weiteren Verlauf der Arbeiten im Forschungsvorhaben, um im Ergebnis die eingangs erwähnten Handreichungen für eine zukünftig belastungsgerechtere Auslegung des Regalbaus formulieren zu können. Da Regalbau und Shuttle- bzw. Satelliten-Fahrzeuge dynamisch miteinander wechselwirken, können auch Hinweise für die Steuerungsstrategie der Shuttle- bzw. Satelliten-Fahrzeuge in Bezug auf Beschleunigungsvorgänge und deren Gleichzeitigkeit bzw. Staffelung Eingang in die Hinweise finden – im Sinne einer optimalen, ressourcenschonenden Auslegung des Stahlbaus der Regale.

7 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/ Fördertechnik 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

- [AD14] Adamakos, Kostas, und Ioannis Vayas. „Tragverhalten von Palettenregalsystemen unter Erdbebenbeanspruchung.“ *Stahlbau* 83. Heft 1, 2014: 35 - 46.
- [ANS20] ANSYS Fluent User's Guide, 2020R1
- [BL73] Blume, John A. *Seismic investigation of steel industrial storage racks*. San Francisco, CA: Report prepared for the Rack Manufacturer's Institute, 1973
- [DI99] Dietzel, Michael. „Beeinflussung des Schwingungsverhaltens von Regalbediengeräten durch Regelung des Fahrtriebs.“ *Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Förder-technik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH)*. 48. 1999.
- [CA09] Castiglioni, C A, P Carydis, P Negro, L Calado, H Degée, und I Rosin. „Seismic behaviour of steel storage racking systems.“ In *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas: STESSA 2009*, von Federico Mazzolani, James M Ricles und Richard Sause, 757 - 764. London: Taylor & Francis Group, 2009.
- [CA16] Castiglioni, Carlo Andrea. *Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems*. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2016.
- [DA16] Daifuku. „Regalsicherheit: Maßnahmen zum nachhaltigen Schutz von Hochregallagern.“ *Logistik Heute*, Januar 2016: 34 - 35.
- [DF14] Dresig, Hans, und Alexander Fidlin. *Schwingungen mechanischer Antriebssysteme - Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese*. Berlin: Springer Verlag, 2014.
- [DIN10] DIN EN 15512:2010-09. *Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl - Verstellbare Palettenregale - Grundlagen der statischen Bemessung*. Berlin: Beuth, 2010.
- [DIN11] DIN EN 1998-1/NA:2011-01. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau*. Berlin: Beuth, 2011.
- [FEM01] Federation Europeenne de la Manutention - Sektion IX - Serienhebezeuge. *FEM 9.832: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Toleranzen, Verformungen und Freimaße im automatischen Kleinteilelager (keine Silobauweise)*. Frankfurt: VDMA, 2001.
- [FEM17] FEM European materials handling federation: *FEM 9.860: Guideline Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems*. 2017
- [FI04] Filiatrault, A, und A Wanitkorkul. *Shake table testing of Frazier industrial storage pallet racks*. Buffalo, NY: University of Buffalo, State University of New York, 2004.
- [FI06] Filiatrault, A, R E Bachman, und M G Mahoney. „Performance-based seismic design of pallet-type steel storage racks.“ *Earthquake Spectra*, 22(1), 2006: 47 - 64.
- [GE17] Gebhardt, Marco, Jörg Eder, und Christian Schindler. *Deutschland Patent DE102015008506A1*. 2017.
- [GU09] Günther, W A, und K.-T. Hübner. „Untersuchung von dynamischen Regalbelastungen.“ *ANSYS Conference & 27. CADFEM Users' Meeting*. Leipzig, 2009.
- [HU10] Hübner, Karl-Thomas. *Tragsicherheit automatisierter Hochregallager unter stoßartigen Beschickungslasten durch Regalbediengeräte*. München: TU München, 2010.
- [KR73] Krawinkler, H, N G Cofie, M A Asitz, und C A Kircher. *Experimental study on the seismic behavior of industrial storage racks*. Stanford, CA: Stanford University, 1979.
- [KU01] Kühn, Ingo. „Untersuchung der Vertikalschwingungen von Regalbediengeräten.“ *Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie*; 53 . Karlsruhe, 2001.
- [KU10] Kuczera, Thomas, Iljo Nikic, und Christian Vorwerk. „Analyse des dynamischen Verhaltens von Schwerlast-Regalbediengeräten.“ *Logistics Journal: Proceedings*, Vol. 06, 2010.

- [ME17] MECALUX. Chile: Das Versuchslabor für das Verhalten von Regalsystemen bei Erdbeben. 14. August 2017. <https://www.mecalux.de/logistik-artikel/erdbebensichere-regalsystem-chile>.
- [ME18] Meyke, Marvin. „Trends – Flexibel und skalierbar“. Materialfluss 2018. Aufgerufen am 30.07.2021, <https://www.materialfluss.de/regalbediengerate/flexibel-und-skalierbar-862538.htm>
- [PI12] Piazza, Hans-Martin, und Ulrich Schiffler. „Lagertechnik setzt weiter auf Shuttles.“ FM - Das Logistik-Magazin, Juni 2012: 10 - 17.
- [PS14] PSI Technics. „Schwingungsarme Positionierung.“ DHF-Magazin, November 2014: 40 - 41.
- [PS16] PSI Technics. „Sichere und effiziente Regelung von Regalbediengeräten und anderer linear geführter Industriefahrzeugen.“ Urmitz, 2016.
- [SC94] Schumacher, Meinhard. „Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Einmast-Regalbediengeräten.“ Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik der Universität Karlsruhe ; 42. 1994.
- [SI08] Siemens AG, und Dematic GmbH. Europa Patent EP1754674A2. 2008.
- [SS17] SSI Schäfer GmbH. „Erdbebensichere Lagertechnik.“ dhf Intralogistik, Januar 2017.
- [TE20] Technische Logistik. „Größtmögliche Durchsatzleistung - Multiple Lösungen für zuverlässige Energieversorgung von Shuttle-Systemen“ Technische Logistik, September 2020: 48 - 49
- [TH13] Thomas, H. „Berücksichtigung von Erdbebenlasten bei Regalanlagen.“ Verband für Lagertechnik und Betriebseinrichtungen. 2013.
- [TU14] TU Dortmund - Fakultät Bauwesen - Fachgebiet Stahlbau. Chancen für den Stahlbau im Hochregallagerbau durch Optimierung der Konstruktion und den Einsatz höherfester Stähle. Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA, 2014.
- [TU18] TU Dortmund - Fakultät Bauwesen - Fachgebiet Stahlbau. Bestimmung der effektiven Schubsteifigkeit von Ständerrahmen zur Sicherung von Stabilität und Gebrauchstauglichkeit von Regalsystemen. Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA, 2018.
- [VDI15] VDI-Fachbereich Technische Logistik. VDI-Richtlinie: VDI 2692 Blatt 1 Shuttle-Systeme für kleine Ladeeinheiten. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2015.
- [Wil98] Willumeit, H.P.: Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik. Teubner 1998. ----- ISBN 978-3-663-12247-0
-
- Azman Azka, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.
Tel.: +49 (0)721 608 48631
E-Mail: azman.azka@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
- Viktor Milushev, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.
Tel.: +49 (0)721 608 48627
E-Mail: viktor.milushev@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
- Manmit Padhy, B.Sc.**, Studentische Hilfskraft am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT.
E-Mail: manmit.padhy@gmail.com
- Adresse:**
Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Str. 8
D - 76131 Karlsruhe