1.1 Der natürliche Polymerwerkstoff Holz als Alternative im modernen Kranbau

Referent: Eric Penno, M. Sc.,
Benjamin Kupey, M. Sc.,
Dr.-Ing. Sven Eichhorn,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Golder,
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Deutschland

1 Einleitung

Aus der Geschichte sind Krananlagen unter der Verwendung von Holzwerkstoffen bekannt. Zu deren tradierter Einsatzzeit waren die verwendeten Werkstoffe mit den aktuellen Holzwerkstoffen in den Dimensionen und Eigenschaften nicht zu vergleichen. Das Zeitalter von Stahl und Aluminium hat den natürlichen Polymerwerkstoff Holz [1] im Kranbau verdrängt. Durch Forschungstätigkeit, Technologie- und Eigenschaftsverbesserungen sowie durch die positive Wirkung auf die Umwelt rücken die Holzwerkstoffe in den Fokus. Von diesem Punkt aus wurde das Forschungsfeld „Holz im Kranbau“ eröffnet. Vorarbeiten existieren in der Skidfördertechnik [2] und bei Lastaufnahmemitteln [3].

2 Grundlagen

Ein Kran definiert sich nach der Norm DIN 15001 [4] als Unstetigförder mit welchem Lasten an einem Tragmittel hängen. Diese können gehoben, gesenkt und/ oder in eine oder mehrere Richtungen waagerecht verfahren werden. Die Position kann als ortsfest, frei verfahrbar oder auf Schienen sowie schwimmend beschrieben werden. Die spezifischen Bauarten sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

Für motorbetriebene Krane sollten Traglasten und Arbeitsgeschwindigkeiten nach der Normzahlenreihe ausgelegt werden. [5] Diese sind in den DIN 15021 [6] und 15022 [7] festgelegt. Die häufigsten Bauformen sind Brückenkrane, Portalkrane und Drehkrane.

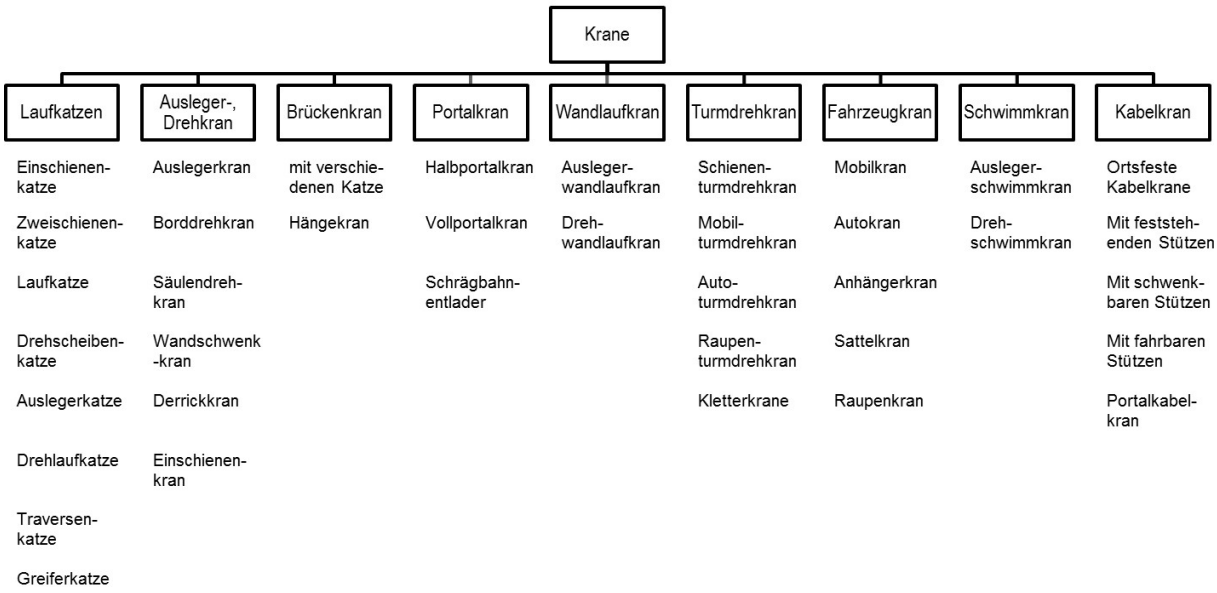


Abbildung 1: Kranarten nach Bauart entsprechend DIN 15001 [4]

2.1 Brückenkrane

Der Brückenkran ist die Bauart, welche am weitesten verbreitet ist. [8] Sie dienen zum Umschlagen von Stückgütern in Werkstätten, Hallen und Lagern und werden sowohl im Innen- wie auch im Außenbereich eingesetzt. Die grundlegende Bauform besteht aus den Kranträgern mit dem Kranfahrwerk.

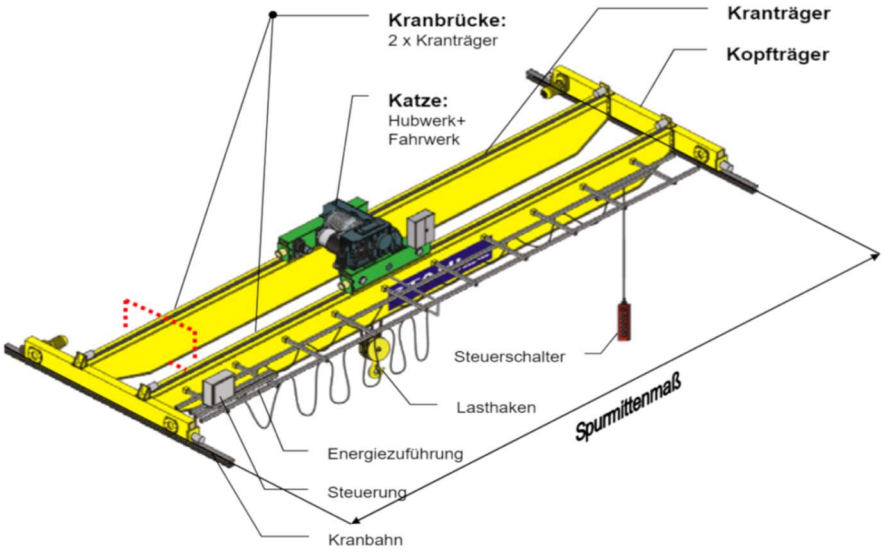


Abbildung 2: Aufbau eines Zweiträgerbrückenkrans [8]

Die Katze verfährt auf einem oder zwei Brückenträgern, welche auf den Kopfträgern aufliegen oder befestigt sind. (vgl. Abbildung 2) Die Arbeitsfläche unter dem Kran ist aufbaubedingt rechteckig und ist durch die Anfahrmaße der Katze meist kleiner als die Fläche unter der Kranbahn. Der wesentliche Vorteil eines Brückenkrans ist die Bodenfreiheit. Dem gegenüber stehen jedoch nach dem Stand der Technik die relativ großen Totlasten. Kranbrücken bis 12 m sind meist als Walzprofil mit I-Profil ausgeführt. Für größere Spannweiten werden Stegblechträger oder Kastenträger herangezogen. Kastenträger gewährleisten dabei die höchste Verwindungssteifigkeit. [5]

Spezielle Formen von Brückenkranen sind Hängekrane (vgl. Abbildung 3). Diese laufen auf Kopfträgern, welche an der Unterseite der von der Decke abgehängten Kranschienen laufen. Durch eine Mehrfachabhängung können größere Spannweiten und gute Führungseigenschaften erzielt werden. Jedoch ist die Belastbarkeit durch die zusätzliche Beanspruchung der Deckenkonstruktion limitiert. Vorteilhaft ist, dass leichte Krümmungen der Fahrwege möglich sind. [5]

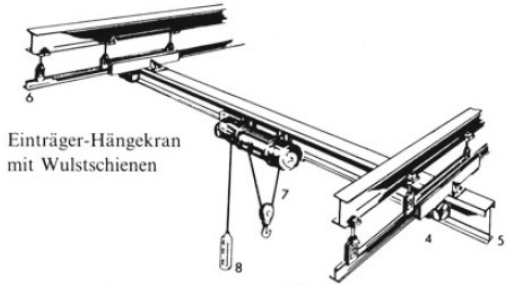
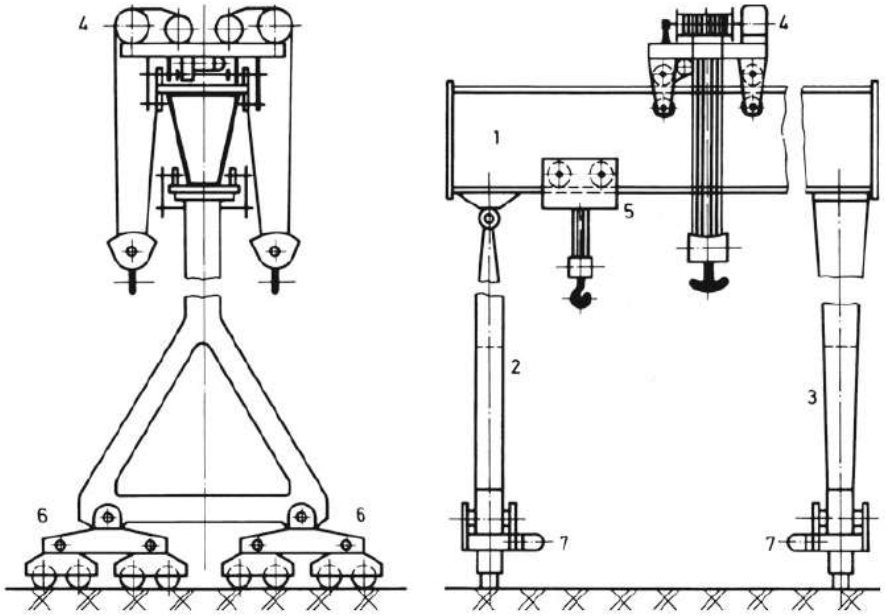


Abbildung 3: Beispiel Einträgerhängekran [5]

2.2 Portalkran

Der Portalkran (vgl. Abbildung 4) findet meist im Außenbereich für lange Fahrwege und wenige Brückenfahrten Verwendung. Die Kranschienen sind meist ebenerdig. Das Portal besteht aus zwei Portalstützen und der Brücke, welche als Konstrukt auf den Schienen läuft. Die wichtigsten Vertreter sind dabei die im Stückgutumschlag verwendeten Bockkrane, wie in Abbildung 4 dargestellt. Diese zeichnen sich meist mit großem Hub und großer Traglast aus. Wie auch Brückenkrane werden diese Bauarten für kleine Spannweiten und Traglasten aus Walzprofil hergestellt. Für große Spannweiten werden Stegblech- und Kastenprofilbauweisen umgesetzt. [5]



1 Einträgerbrücke (Trapezquerschnitt), 2 Pendelstütze, 3 Feste Stütze, 4 Hauptlaufkatze mit 2 Haupthubwerken und Katzfahrwerk, 5 Hilfslaufkatze mit Hilfshubwerk und Katzfahrwerk, 6 Fahrschemel, 7 Kranfahrwerk
Die Hubwerke können getrennt oder gemeinsam (bei sehr hohen Traglasten) arbeiten. Je Ecke sind 2 pendelnd abgestützte Fahrschemel mit je 2 Laufrädern vorgesehen: Insgesamt 8 Laufräder. Antrieb von 2 Laufrädern (1 Fahrschemel) je Ecke meist ausreichend.

Abbildung 4: Werftkran als Beispiel für einen Portalkran [5]

Verladebrücken haben im Vergleich zu Bockkranen mit bis zu 120 m Spannweite eine deutlich größere Dimension. Ihr Zweck entspricht in der Hauptanwendung dem Schüttguttransport. Jedoch werden diese auch im Stückguttransport für den Containerumschlag in Verbindung mit Containergeschirren (Spreader) eingesetzt. Durch die Größe wird meist eine Vollwand- oder eine Fachwerkbauweise angewendet. [5]

2.3 Kabelkran

Für Spannweiten ab 150 m bis 1000 m, z.B. für die Überwindung von unwegsamen Situationen wie Flüssen oder Schluchten, finden Kabelkrane Einsatz (vgl. Abbildung 5). Die Kranbrücke ist bei diesen durch ein verschlossenes und damit witterungsbeständiges Tragseil ersetzt. Um unnötiges Gewicht vom Tragseil zu nehmen werden Hub- und Fahrbewegung durch Seile bewegt, welche wiederum durch Winden angetrieben werden. Die Winden befinden sich wie in Abbildung 5 zu erkennen in einem der Türme. Die Türme können ortsfest oder verfahrbar gestaltet sein. Durch die Außenanwendung und das Einwirken von Winden sind die Türme meist als Fachwerkkonstruktion ausgeführt. [5]

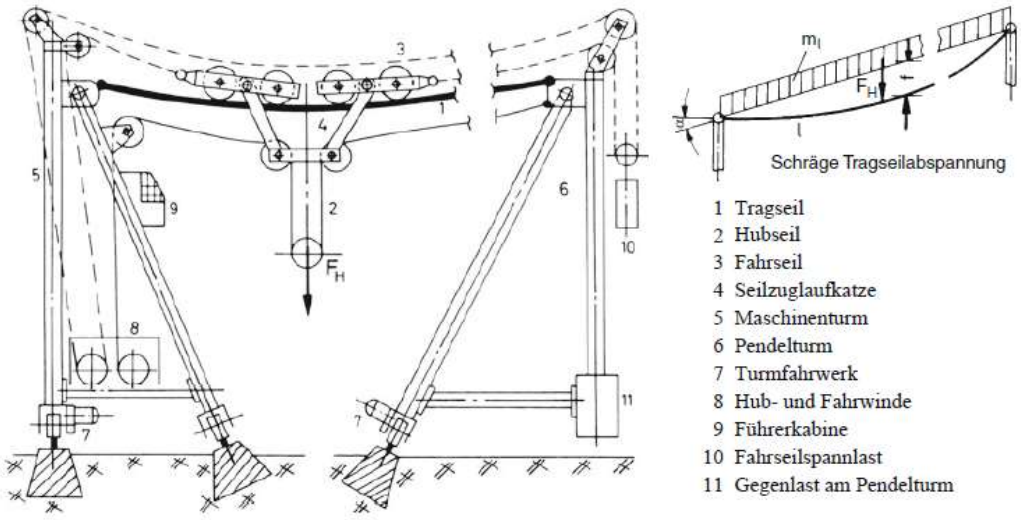


Abbildung 5: Kabelkran [5]

2.4 Drehkran

Drehkrane zählen durch die Bauartenvielfalt, der Verbreitung und ihrer prognostizierten Entwicklungstendenz zur wichtigsten Gruppe. Die Hauptvertreter sind Säulendrehkran, Wanddrehkran, Portaldrehkran, Derrickkran, Konsoldrehkran und Turmdrehkran. Der wesentliche Unterschied zu Portal- und Brückenkranen ist, dass die Last außerhalb der Unterstützungsfläche aufgenommen wird. Die aufgenommene Last wird über Schenk- und Drehbewegungen um eine Drehachse innerhalb des Radialweges transportiert. Der eigentliche Ausleger ist dabei als fester Ausleger, als Wippe oder als Teleskop ausgeführt. Die Dimensionierung des Auslegers erfolgt dabei unter der Annahme des konstanten Lastmomentes [5]

Neben den auf Säulen basierenden Konzepten existieren die Wippsysteme. Bei diesen wird der Ausleger unter Last möglichst auf einer Ebene ohne große Hubarbeit bewegt. In seltenen Fällen kann die Spannweite geändert werden. Dies ist doch nur im unbelasteten Zustand der Fall. Ein im Realeinsatz genutzter Einfachlenker unter der Verwendung von Holzwerkstoff ist in Abbildung 6 zu sehen. Die geläufigsten Wippsysteme sind der Einfach- und der Doppellenker.

Abbildung 6: Derrick Kran als Einfachlenker in einem Steinbruch bei Lindelbach [10]

3 Zielsetzung

Ziel ist es das Substitutionspotential für Holzwerkstoffe im Kranbau aufzuzeigen. Dabei stehen neben der technischen Sicherheit, der wirtschaftliche und ökologische Vorteil im Vergleich zu Metallbauweisen im Fokus. Des Weiteren ist die Gestaltung der Komponenten zum Erreichen dieses Ziels ein weiterer wesentlicher Punkt. Grundlegend sind relevante wissenschaftliche Fragestellungen aufzudecken, zu beschreiben und zu erläutern. Das Vorgehen und die entsprechenden Arbeiten sind anwendungstechnisch orientiert.

4 Stand der Technik

Abbildung 7: Kranbrücke in Metallbauweise mit einem Kranbahnlängsträger aus Holzwerkstoff [11]

Im Kranbau gibt es bereits einzelne Umsetzungen von Alternativen zum Metallwerkstoff. Der abgebildete Brückenkran in Abbildung 7 hat eine Nenntraglast von 3,2 t, wobei die Kranbrücke in Metallbauweise auf einem Kranbahnlängsträger in Holzbauweise bewegt wird. [11] Dessen Stützweite beträgt bis zu 12 m. [12]

Des Weiteren existiert ein Brückenkran, welcher Vollholzwerkstoff auf Basis von Fichte bei der Kranbrücke nutzt. (vgl. Abbildung 8) [13] [14] [15]

Abbildung 8: Kranbrücke in Vollholzwerkstoffbauweise [13]

5 Schnittstelle Normung

Im Bereich des Holzbaus im engeren Bezug zu Tragwerken und Brücken sind die EN 1990:2002, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung und die DIN EN 1991-1: Einwirkung auf Tragwerke relevant. Deren wesentliche Inhalte sind u.a. Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten, sowie der Betrachtung von Temperatur – und Brandeinwirkung auf Komponenten und Tragwerke. Bezüglich des Brandschutzes wird zusätzlich die DIN 18234 mit dem Fokus auf dem baulichen Brandschutz und der Brandbeanspruchung betrachtet.

Die EN 1995-2 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken behandelt die Grundsätze und Anforderungen an die Sicherheit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit von Holzbauwerken. Die EN 1995-2 sieht Spannungsnachweise und Ermüdungsnachweise mit beigefügten Teilsicherheitsbeiwerten vor. Des Weiteren ist die Grenze der Biegung bei charakteristischer Verkehrslast mit $L/400$ bis $L/500$ nicht zu überschreiten. Ebenso soll die Dauerhaftigkeit durch konstruktive Maßnahmen und bei guter Belüftung aller Bauteile, wie der Abdeckung des Haupttragwerkes erreicht werden. Sollte dies nicht möglich sein, so sind Maßnahmen wie geneigten Flächen, Kapillarverschlüssen und Vermeidung von Öffnungen vorzunehmen.

Für den Kranbau sind die europäischen Maschinenrichtlinien relevant. Die DIN 15018 beinhaltet die statische und dynamische Auslegung. Unterstützend wirken zusätzlich die DIN 18800-Teil 2 und Teil 3 für den Stabilitäts- und Beulsicherheitsnachweis des Trägers. [8]

Für die Krankonstruktion nach DIN 13001 und Auslegung allgemein sind zusammengeführt aus recherchierten Holzbau- und Kranbaunormen allgemein Spannungsnachweise, Stabilitätsnachweise und Betriebsfestigkeitsnachweise, bzw. der Lebensdauernachweis zu führen. Dabei wird zwischen der einfachen Beanspruchung als statische und dynamische Biegung und dem dynamischen Heben als Biegung und dem dynamischen Fahren unterschieden. Zusätzlich wird die Biegung bei statisch und dynamisch aufgebrachter Prüflast untersucht. Neben der einfachen Beanspruchung sollte die Kranbrücke nach der Dauerbeanspruchung und zusätzlich nach der Ermüdung (d. h. nach Lebensdauer) ausgelegt werden. Damit werden die Ansprüche aus dem Holz- und dem Kranbau mit Wissen aus dem Maschinenbau kombiniert. (vgl. Abbildung 9)

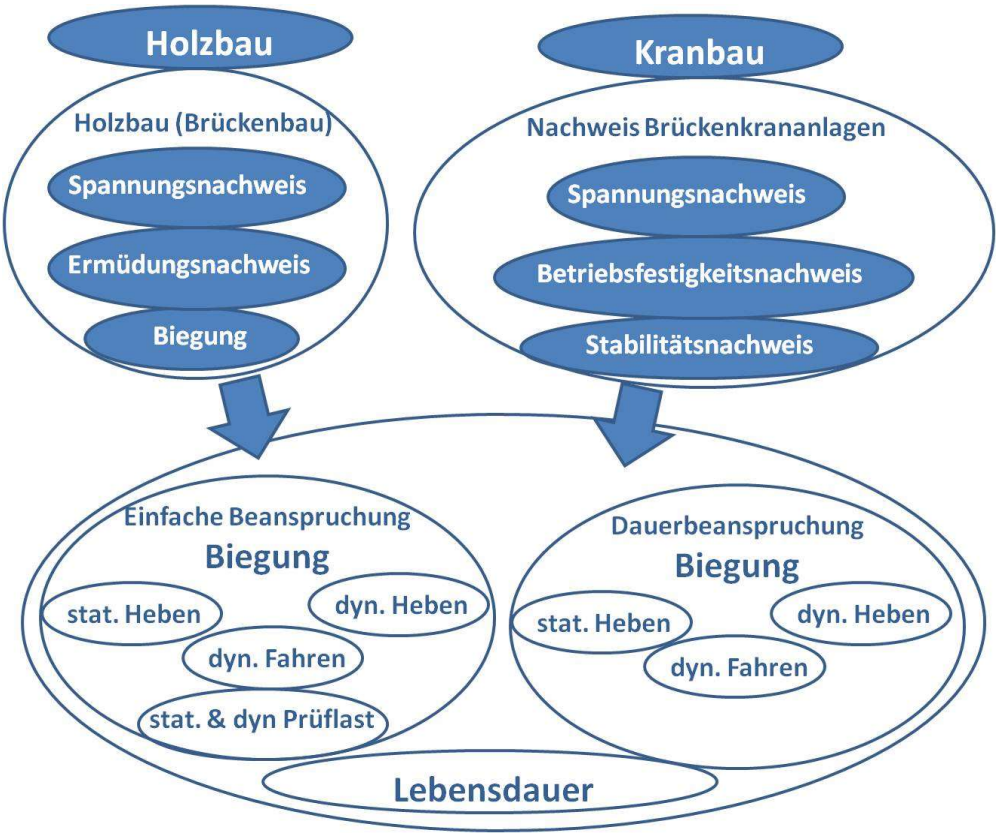


Abbildung 9: mögliche Nachweise aus der Kombination von Holz- und Kranbrückenanforderungen

Aus dem Praxisbezug sind Schweißnähte zusätzliche relevante Stellen, welche für die rechnerische, betriebssichere Dimensionierung für Krane herangezogen werden. Schweißstellen sind bei der Umsetzung mit Holzwerkstoffen weniger relevant. Dafür sind Klebeverbindungen im Fokus. Weiterhin sind durch die Lasteinleitung bei Zweiträgerbrückenkranen im Obergurt, durch auftretende Torsionsmomente und die Steghöhen die Euler-Knickfälle mit zu beachten.

6 Substitutionspotenzial

6.1 Allgemein

In einer konstruktiven Analyse wurden sowohl die vereinfachten, aber der Realität im Prinzip angelehnte Stab-und Seiltragwerke, sowie reale Umsetzungen analysiert.

Bezogen auf den Werkstoff wurde festgestellt, dass sich Vollholzwerkstoffe und Furnierwerkstoffe als Vertreter natürlicher Polymere, sowie modifizierte Varianten wie z.B. verdichtetes Buchensperrholz mit Kunstharzanteil (Kunstharzpressholz- KHP) für den Einsatz in der Umsetzung einer Krananlage grundlegend eignen. Die Kriterien der chemischen Beständigkeit, der Umweltverträglichkeit u.a. als CO2-Kompensation im Hinblick zur Dekarbonisierung der Gesellschaft, die Werkstoffkosten und die Verfügbarkeit werten die Holzwerkstoffe gegenüber metallischen Werkstoffen auf.

Das Substitutionspotenzial wird zur Übersicht in der Abbildung 10 von links nach rechts mit abnehmender Substituierbarkeit dargestellt.

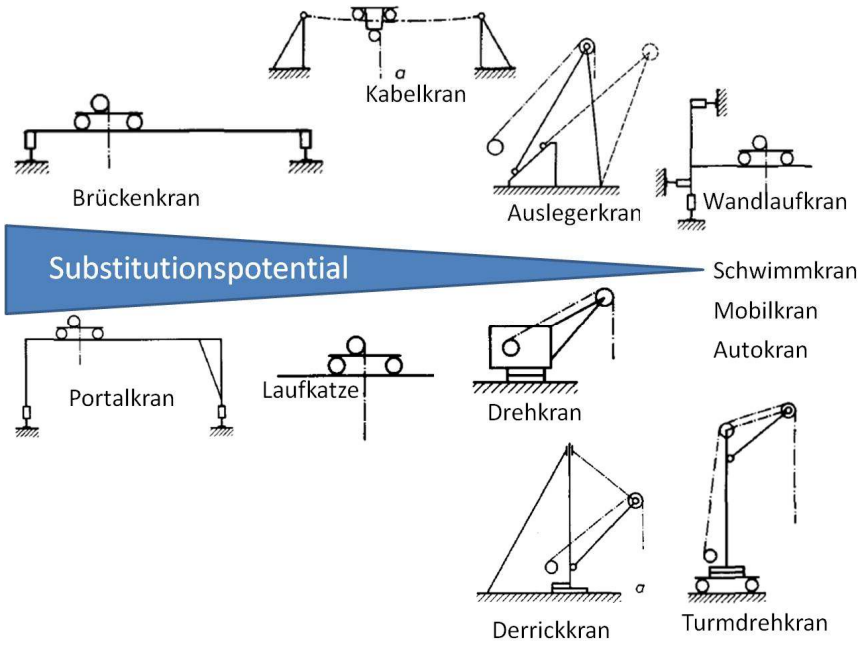


Abbildung 10: Substitutionspotential von Kranbauweisen (unter Verwendung [4])

6.2 Erkenntnisse zu den Kranarten

Brückenkrane und Portalkrane haben eine sehr hohe wirtschaftliche Bedeutung [8], ebenso ist die Leichtbaurelevanz gegeben, weil das Gewicht als bewegte Masse, sowie als Belastung für Hallenkonstruktionen aufzufassen ist. Vorteilhaft bei diesen Varianten sind die beidseitigen Auflager der Kranbrücke, sowie die Biege- und Druckbelastung. Diese Bauarten der Krane, ob als Brückenkran mit Laufkatze, Hängekran, Halb- oder Vollportalkran mit oder ohne Katzbahn eigenen sich sehr gut für eine Substitution.

Laufkatzen haben eine hohe wirtschaftliche Bedeutung, jedoch hat die Tragstruktur neben dem Aufbau mit den mechanischen Komponenten eine untergeordnete Rolle.

Kabelkrane haben ein gutes Belastungsverhältnis, jedoch ist deren wirtschaftliche Bedeutung sehr gering.

Auslegerkrane weisen eine geringe wirtschaftliche Bedeutung in kleinen Dimensionen auf. Drehkrane haben eine hohe wirtschaftliche Bedeutung, jedoch sind diese wie Auslegekrane, unabhängig von deren spezifischen Einsatz, sehr komplexe aufgebaut. Folglich ist die Realisierung z.B. im Bezug der Einspannung der Stützstrukturen schwierig.

Turmdrehkrane, sowohl auch diese mit Auslegern weisen im realen Bezug meist in ihrer Größe einen komplexen Aufbau mit Stabfachwerkstrukturen auf. Eine Realisierung dieser ist unter der Verwendung natürlicher Polymerwerkstoffe möglich. Die auftretenden Belastungen sind durch die Dimensionen realer Umsetzungen ebenfalls durch die Kombination von Zug- Druck- und Biegebelastungen hoch.

Derrickkrane, sind durch ihr Stabtragwerk und Dimensionen zur Substitution gut geeignet, jedoch zeichnet diese eine geringe Leichtbaurelevanz bei ortsfesten Varianten aus. Des Weiteren haben sie eine geringe wirtschaftliche Bedeutung, weil kaum noch Einsatzfälle zu finden sind.

Schwimmkrane sind in ihrem Aufbau abgeleitet von realen Umsetzungen ebenfalls durch ihr Druckstabwerk gut geeignet. Jedoch ist deren wirtschaftliche Bedeutung durch ihre Spezialisierung und geringe Stückzahlen als geringer einzustufen.

Auto- und Mobilkrane haben eine hohe Leichtbaurelevanz bezogen auf den Werkstoff, jedoch werden nach dem Stand der Technik bereits komplexe Trägerformen und Werkstofflegierungen für eine Performancesteigerung verwendet, sodass der Einsatz eines natürlichen Polymers ggf. schwer umzusetzen ist und damit nicht zielführend wäre. [16]

6.3 Zusammenhang: Eigengewicht – Traglast – Aspektverhältnis bei Brückenträgern

Die Abbildung 11 zeigt den Zusammenhang aus Berechnungen zu entsprechenden Seitenverhältnissen bei Brückenträgern. Abgetragen ist das Breite zur Höhe Verhältnis, kurz Seitenverhältnis, der Kranbrücke unter der Betrachtung verschiedener Werkstoffe (Baustahl: S235; Buchensperrholz normalverdichtet: BauBucheQ [12], Birkensperrholz normalverdichtet: Birke, Kunstharzpressholz B140 A840: KHP) und Aufbauten für die gleiche Belastung bei 1 t, 3,2 t und 5 t bei einer Spannweite von 10 m und einer maximalen zulässigen Durchbiegung von 20 mm (Spannweite/500).

Als Referenz sind Standardbrückenträger aus 15 mm Stahlblech als I-Träger dargestellt. Alle in der Grafik dargestellten Holzwerkstoffe sind als Kasten-Hohlprofil mit einer Wandstärke von 21 mm ausgeführt. Die Wandstärken sind in die marktüblichen Halbzeugplattendicken gestuft. Die Suffix 1, 2 und 3 nach der Bezeichnung sind mit den Traglasten in der gleichen Reihenfolge mit 1 t, 3,5 t und 5 t ausgeführt. So ergibt sich für einen Zweiträgerbrücke Birke3 für 5 t und 10 m Spannweite bei einem Profilseitenverhältnis von 1:1 (650 mm x 650 mm) eine Masse von 718 kg. Im Vergleich dazu ergibt das Verhältnis 1:3 (823 mm x 280 mm) bei einer Masse von 606 kg. Stahl im Vergleich weist einen deutlich geringeren Bauraum auf, jedoch ist die Masse mit 2 t deutlich größer. In der Abbildung 11 ist zu erkennen, dass die Varianten aus Holzwerkstoffen bei gleichen Bedingungen, wie Belastung

und Biegung eine geringere Masse aufweisen. Dies ist zum einen für den Betrieb im Hinblick der bewegten Masse und der Hallenbelastung, sowie bei der Montage und ggf. der Demontage wichtig. Es wird zudem deutlich, welchen zusätzlichen Bauraum eine Holzbauweise benötigt.

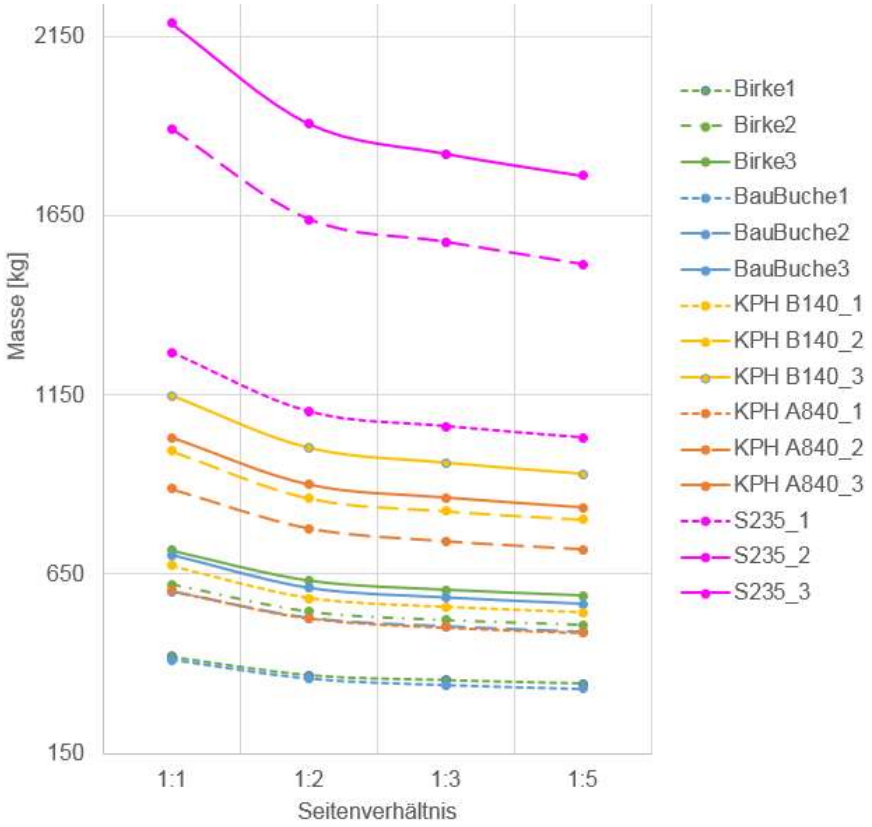


Abbildung 11: Kranträgermasse in Abhängigkeit der Geometrie als Seitenverhältnis

Ökologischer Vorteile resultieren aus dem Leichtbaupotential und der Verwendung von ausgewählten Holzwerkstoffen. Diese müssen aber für jeden Werkstoff gesondert analysiert werden. [17]

6.4 Wettbewerbsfaktor Preis

Seit Jahresbeginn 2021 ist der Markt sehr sprunghaft im Materialwert, jedoch sind die Tendenzen zwischen Holz und Stahl vergleichbar. [18] [19]

Recherchen mit dem Stand vom Herbst 2020 haben einen durchschnittlichen Holzpreis für WVC von 1,18 €/kg ergeben. Der Stahlpreis lag zu diesem Zeitpunkt bei 0,68 €/kg.

Im Frühjahr des Jahres 2021 lag der WVC-Holzpreis bereits durchschnittlich bei 1,5 €/kg und der Stahlpreis bei 1 €/kg.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Brückenträgereigenschaften sowie die Materialkosten für mögliche Kranbrücken mit gleicher Spannweite und ähnlicher Traglast. Die Tabelle zeigt, dass eine Holzbauweise in Bezug auf die Materialkosten nicht pauschal günstiger ist als eine Stahlbauweise.

Tabelle 1: Übersicht Stahl vs. Holzwerkstoffe mit 10m Spannweite

	Plattenstärke [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Gesamtmasse [kg]	ca. Traglast [t]	Materialpreis [€]	Bemerkung
Stahl	15	390	300	1710	5,00	1167	1-Träger, P32
Fichte Vollholz (Stand der Technik, NEQ)		800	400	2944	3,95	5299	2-Träger
Birke (WVC)	21	800	450	690	5,82	767	2-Träger
Birke (WVC)	40	680	350	1034	5,50	1148	2-Träger
KHP	21	570	320	997	5,84	2842	2-Träger

7 Zusammenfassung

Die Ausführungen zeigen, dass es prinzipiell möglich ist Holzwerkstoff im modernen Kranbau einzusetzen. Bei der Verwendung ausgewählter Holzwerkstoffe existiert ein Leichtbaupotential in Bezug auf Stahlbauweisen.

Die Umsetzung sicherer sowie technisch, wirtschaftlich und ökologisch vorteilhafter Kransysteme in Holzbauweise ist weiterer Forschungsgegenstand.

8 Förderhinweis

Die Erkenntnisse sind unter der Förderung durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) des Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft entstanden.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literatur

[1] E. Werner; E.Hornbogen; N. Jost; G. Eggeler: Fragen und Antworten zu Werkstoffen, 8.Auglage, Springer Vieweg, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2016

[2] Produktionsanlagen aus Holz in der Autofabrik, 13.11.2014: https://news.fnr.de/index.php?id=8145&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bnews%5D=6118&cHash=76ab6e9ca97452d4565a1f765418173f, 16.05.2021

[3] Kluge et. Al 2019: Statisch-dynamische Bauteilanalyse durch Laststeigerungsversuche am Beispiel von Lastaufnahmemitteln in Holzbauweise – Teil 1 und 2 in Holztechnologie, ISBN/ISSN:0018-3881

[4] DIN 15001 Blatt1 Krane: Begriffe, Einteilung nach Bauart

[5] P. Römisch, Materialflusstechnik, Vieweg+Teubner Verlag,Springer Fachmedien, Wiesbaden GmbH, 2011

[6] DIN 15021 Hebezeuge: Tragfähigkeiten

[7] DIN 15022 Krane: Hubhöhen Arbeitsgeschwindigkeiten

[8] Markus Golder: Ein Beitrag zur Kostenabschätzung für Brückenkranträger in Kastenbauweise auf Basis ihrer Bemessungsgrundlagen und Dimensionierungsnachweise, Dissertationsschrift, 2004

[9] Markus Golder: Anwendung der Technischen Logistik am Beispiel moderner Krananlagen: Vorlesungsüberblick und Verwendbarkeit der Inhalte. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Universität Karlsruhe, https://www.ifl.kit.edu/download/vorlesungen/technische_logistik/Gastvortrag_Krantechnik.pdf

[10] Holz-Derrickkran im Steinbruch bei Lindelbach, https://mapio.net/pic/p-59784070/, 18.05.2021

[11] Schaffitzel: Bauen mit Holz und Ideen; Internetauftritt; https://www.schaffitzel.de/hallenbau/produktionshallen/319-zimmerei-haensler, 18.05.2021

[12] Pollmeier; Internetauftritt und Datenblätter; Kranbahnträger aus BauBuche (pollmeier.com), 18.05.2021

[13] NEQ-Cranes Internetauftritt bei Youtube vom 25.05.2020; https://www.youtube.com/watch?v=948-WnvXk4A, 24.02.2021

[14] Gebrauchsmuster DE 20 2022 101 369 U1 2020.05.07

[15] NEQ-Cranes: Homepage, https://www.neq-cranes.at/, 25.10.2021

[16] Ingenieur: Technik-Carriere-News: Immer leichtere Kräne müssen immer größere Lasten bewegen (01.05.2013), 18.05.2021

[17] Eichhorn, Sven; Kluge, Patrick; Müller, Christoph; Penno, Eric; Eckardt, Ronny; Feig, Katrin; Alt, Christoph; Schubert, Christine: Substitution energieintensiver Stahl- und Aluminiumwerkstoffe durch nachwachsende Rohstoffe in der Fördertechnik (SubSTANCE), Schlussbericht zum Forschungsprojekt der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Chemnitz, 2017

[18] Wa.de: Immer teurer: Der Holzpreis steigt- warum?, https://www.wa.de/verbraucher/holz-preise-kauf-teuer-deutschland-bauholz-schnittholz-schadholz-kunden-handwerker-corona-90497405.html, 18.05.2021

[19] Handwer+Bau: Stahlpreis- Es brodelt am Markt; https://www.handwerkundbau.at/wirtschaft/corona-krise-laesst-stahlpreise-steigen-16197; 03.02.2021, (18.05.2021)