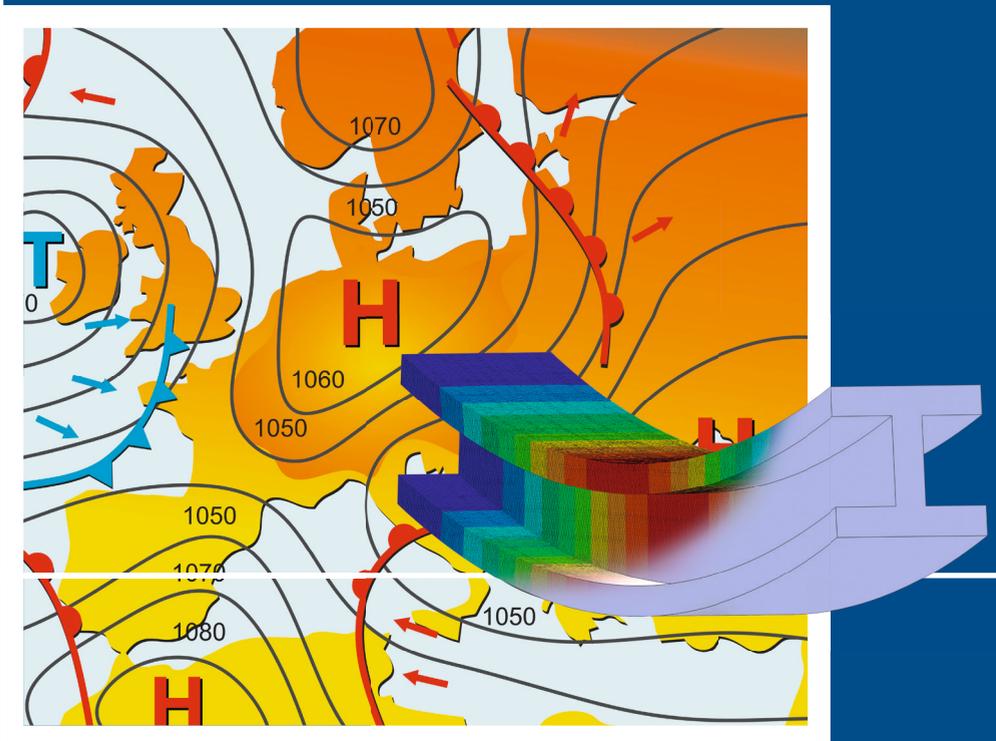


Nora Ludewig
Markus Völter

Modellkompetenz für Wissenschaft und Technik

Eine Einführung



HANSER

Ludewig/Völter

Modellkompetenz für Wissenschaft und Technik



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Nora Ludewig/Markus Völter

Modellkompetenz für Wissenschaft und Technik

Eine Einführung

HANSER

Die Autoren:

Nora Ludewig, Diplom-Ingenieurin, Software-Entwicklerin, Stuttgart

Markus Völter, Dr. der Informatik, freiberuflicher Berater für Software Engineering, Stuttgart



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © stock.adobe.com/Fiedels und Mathew

Satz: Nora Ludewig, Markus Völter

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46970-9

E-Book-ISBN 978-3-446-46971-6

Vorwort

Im Laufe unseres bisherigen Berufslebens sind wir immer wieder dem Begriff Modell begegnet. Wenn man als Ingenieurin und Softwareentwickler arbeitet, ist das nicht weiter verwunderlich. In technischen Disziplinen gehört Modellierung zum täglich Brot. Man erstellt Modelle oder passt bereits existierende an, man vergleicht Modelle und Modellierungsergebnisse, man erstellt Vorhersagen und Szenarien, man plant anhand von Modellen die nächsten Schritte eines Entwicklungsprojekts oder man nutzt Modelle, um technische Erzeugnisse automatisiert herzustellen, etwa bei der Generierung von Programmcode oder der Maschinensteuerung mit Hilfe von CAD-Modellen. Modellierung ist also ein universelles Werkzeug in unserem Metier.

Dem Drang, die Natur zu verstehen und Technik zu beherrschen, wurde schon immer mit Modellen begegnet. Dennoch, oder vielleicht gerade deshalb, gibt es auch in Naturwissenschaft und Technik keine klare, unwidersprüchliche Definition, was ein Modell eigentlich ist. Der Begriff wird unterschiedlich verwendet und interpretiert, und es kommt darüber zu Missverständnissen und Fehlern. Dieses Problem können wir mit diesem Buch nicht lösen, und wir wollen es auch gar nicht. Wir bringen zwar eine Definition, was wir unter einem Modell verstehen. Die Aussagen, die wir im weiteren Verlauf über Modelle machen, beziehen sich auf diese Definition. Das heißt aber nicht, dass die Definition die einzig wahre ist oder dass man Modelle nicht auch anders verwenden kann, als wir es hier aufzeigen. Im Gegenteil, wir stellen nur einen sehr kleinen Ausschnitt der Welt der Modelle dar. Außer in Naturwissenschaft und Technik gibt es Modelle auch in der Psychologie, der Soziologie, in der Arbeitsorganisation, den Wirtschaftswissenschaften und wahrscheinlich jeder anderen Wissenschaft. Das liegt daran, dass das Modellieren, hinter dem die Fähigkeit zur Abstraktion steckt, den Menschen im Grunde angeboren ist. Wir alle brauchen Modelle, um Zusammenhänge verstehen und die Zukunft gestalten zu können.

Die Wurzeln dieses Buchs liegen in unserem Podcast omega tau, für den wir in den vergangenen dreizehn Jahren über 750 Stunden Gespräche geführt haben. In vielen dieser Gespräche war auch Modellierung ein Thema. Unsere Gäste haben uns berichtet, wo und wie sie Modelle einsetzen, wo dabei Schwierigkeiten und Grenzen sind und was durch Modelle erst möglich wird. Egal in welchem Bereich, ob in der Physik der kleinsten Teilchen oder bei der Konstruktion riesiger Maschinen, Modelle sind oft die Basis für neue wissenschaftliche Erkenntnisse oder technischen Fortschritt.

Durch zwei Entwicklungen sind wissenschaftliche Modelle in den letzten Jahren stärker in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt als jemals zuvor: die Veränderung des Klimas und die COVID-19-Pandemie. Beides globale Entwicklungen mit dem Potential, große Teile der Menschheit in Gefahr zu bringen. Und beides hochkomplexe Vorgänge mit vielen Einflussfaktoren, mit Latenzzeiten zwischen Maßnahmen und Auswirkungen und mit einer Vielzahl an Szenarien, wie die Entwicklung weiter verlaufen könnte. Vermutlich haben diese beiden Eigenschaften, eine hohe Relevanz für die Menschheit und eine Komplexität, die sich mit einer einfachen Bierdeckel-Rechnung nicht mehr auch nur ansatzweise beherrschen lässt, dazu geführt, dass vielen Menschen bewusst wurde, welche essentielle Rolle Modelle hier spielen, und dass Modelle auch öffentlich thematisiert wurden.

Durch Medienkonsum und Diskussionen im persönlichen Umfeld ist uns klar geworden, wie wichtig eine gewisse Kompetenz ist, wenn man mit Modellen, ihren Ergebnissen und deren Interpretation konfrontiert ist. Es geht darum, Modelle als solche zu erkennen – und sie nicht mit der Wirklichkeit zu verwechseln –, ihre Qualität und ihre Gültigkeitsbereiche zumindest oberflächlich bewerten und die aus den Ergebnissen gefolgerten Aussagen einordnen zu können. Diese Fähigkeiten, die wir unter dem Begriff Modellkompetenz zusammenfassen, werden selten explizit gelehrt und finden auch in populärwissenschaftlichen Formaten oft nur am Rande Erwähnung. Dabei halten wir Modellkompetenz für eine Schlüsselqualifikation dieser Zeit.

Schließlich ist uns bewusst geworden, dass wir durch omega tau schon mit vielen Aspekten wissenschaftlicher und technischer Modelle in Berührung gekommen sind. Wir hatten bereits einen enormen Fundus an größeren und kleineren Bausteinen zum Thema, die zusammengesucht, sortiert, aufgearbeitet und ergänzt werden konnten.

Der unmittelbare Vorläufer dieses Buchs war ein Vortrag, den der Autor auf zwei Softwarekonferenzen Ende 2020 und Anfang 2021 gehalten hat [17]. Der Idee war, den Konferenzteilnehmerinnen und -teilnehmern, die das Thema bisher hauptsächlich im Kontext von Softwareentwicklung kannten, zu zeigen, wo es sonst noch überall Modelle gibt und welche faszinierende Welt auch dort dahinter steckt. Viele Inhalte und Beispiele des Vortrags entstammen omega tau-Episoden und sind in diesem Buch wieder zu finden. An den entsprechenden Stellen haben wir auf die Episoden referenziert. Wer also tiefer in die Details abtauchen will, kann dort hineinhören.

Es gibt bereits ein Buch, das Erkenntnisse aus dem Podcast behandelt: „Once You Start Asking“ von Markus Völter, erschienen im Jahr 2020. Jenes Buch betont stärker die einzelnen Themen und Geschichten aus dem Podcast und hat keine übergreifende Klammer wie dieses Buch. Dennoch kommen dort bereits Beispiele vor, die wir auch hier wieder aufgreifen, dieses mal im Kontext von Modellen.

Noch ein paar Anmerkungen zur Kapitelstruktur: Auch wenn dies kein klassisches Lehrbuch ist, so bauen viele Inhalte doch aufeinander auf. Spätere Inhalte nehmen Bezug auf Dinge, die weiter vorne schon erläutert wurden. Deshalb ist es sinnvoll, das Buch sequentiell zu lesen, anstatt einzelne Kapitel herauszupicken. Wir haben uns außerdem dazu entschieden, konzeptionelle Grundlagen und Beispiele nicht strikt zu trennen, Theorie und Praxis wechseln sich immer wieder ab und mal führen wir ein Thema anhand eines Beispiels ein, mal anhand formaler Aspekte. Eine strenge Form haben wir der Zugänglichkeit untergeordnet. Aus diesem Grund enthält das Buch auch nur wenige Definitionen.

Zu guter Letzt: Wir haben die Sachverhalte meist verbal oder durch Bilder beschrieben. An einigen Stellen sind Formeln jedoch hilfreich, um Zusammenhänge zu erklären oder zu verdeutlichen. Man muss sie jedoch nicht im Detail verstehen, auch an diesen Stellen beschreiben wir die relevanten Aspekte verbal.

Ohne den Einsatz von vielen hilfsbereiten und engagierten Menschen wäre dieses Projekt nicht möglich gewesen. Viele Hörer von omega tau haben durch ihre treue Unterstützung, ideell und durch Spenden, all die Interviews und Reportagen möglich gemacht, aus denen sich dieses Buch speist. Einige von ihnen haben uns nun auch als erste Leser mit ihrem Feedback und ihren Korrekturen unterstützt. Wir bedanken uns dafür bei Kai Brüning, Linda Goldschmidt, Alexander Grote, Heinz Häberle, Bastian Hundt, Maximilian Pfundstein, Peter von Niederhäusern und Florian Zahn. Mit Florian Glock hatten wir einen langen E-Mail-Austausch zur FEM. Und auch Uli Necker, Tobias Polzin und Mitchell Shuster sind mir ihrer Expertise eingesprungen, wo sie uns selber fehlte.

Ohne die vielen, vielen Gäste, die wir im Laufe der Zeit für unseren Podcast interviewt haben und deren Wissen wir hier „verarbeiten“, wäre nichts von all dem möglich gewesen. Fünf von ihnen haben uns auch jetzt konkret beim Schreiben mit zusätzlichen Informationen versorgt: Helge Gößling, Ralf Kleiber, Gudrun Thäter, Philipp Windischhofer und Nicolas Wöhr. Herzlichen Dank dafür!

Und nicht zuletzt geht unser Dank an all jene Menschen in unserem Umfeld, die in den letzten Monaten unsere ausgeschlagenen Treffen, nicht beantworteten Nachrichten, zerstreuten Aussagen und gestressten Mienen toleriert und uns immer wieder motiviert haben, aus dem Modell eines Buchs, das es nur in unserer Vorstellung gab, ein echtes werden zu lassen.

Trotz der großartigen Unterstützung sind sicher noch Fehler in diesem Buch, die erst nach Drucklegung auffallen werden. Diese sammeln und korrigieren wir auf modellebuch.de. Hinweise nehmen wir gerne per E-Mail an feedback@omegataupodcast.net entgegen.

Und nun: viel Spaß!

Stuttgart, im März 2022

Nora Ludewig, Markus Völter

Inhalt

1	Krane	1
1.1	Belastungsgrenzen	1
1.2	Modelle im Kran	5
1.2.1	Daten	5
1.2.2	Standfestigkeit	5
1.2.3	Biegebelastung des Auslegers	6
1.2.4	Das Kranupdate	8
1.3	Unfälle	9
2	Grundlagen	13
2.1	Terminologie	13
2.2	Modellentwicklung	15
2.2.1	Systemgrenze	15
2.2.2	Datenverfügbarkeit und Messwerte	16
2.2.3	Modellvalidierung	17
2.2.4	Grenzen von Modellen	17
2.2.5	Sprache	17
2.2.6	Implementierung	18
2.3	Andere Verwendungen des Begriffs Modell	19
2.3.1	Modell im Sinne von „klein“ oder „groß“	19
2.3.2	Modelle als Metaphern	20
2.4	Das Modell in unserem Kopf	21
3	Modellarten	23
3.1	Analytische Modelle	23
3.2	Numerische Modelle	25
3.2.1	Diskretisierung	26
3.2.2	Finite-Elemente-Methode	27
3.2.3	Wetter- und Klimamodelle	34
3.2.4	Numerische Verfahren	35
3.2.5	Plausibilisierung	37
3.2.6	Rechenaufwand und Genauigkeit	38
3.2.7	Implementierung auf Supercomputern	40

3.3	Parametrische Modelle	42
3.3.1	Eigenschaften	42
3.3.2	Wolkenbildung	44
3.3.3	Vorteile und Nachteile parametrischer Modelle	46
3.3.4	Kombination mit anderen Modellarten	49
3.4	Logische Modelle	50
3.5	Struktur-Modelle	54
4	Vereinfachungen, Gültigkeitsbereiche und Abstraktion	57
4.1	Vereinfachungen	57
4.2	Gravitationswellen	60
4.3	Meereis	63
4.4	Kernfusion	64
4.5	Abstraktion	67
5	Zweck von Modellen	71
5.1	Szenarienmodellierung	71
5.2	Modelle zur Optimierung	73
5.3	Erklärende Modelle	78
5.4	Welche Modellart für welchen Zweck?	80
5.4.1	Analytische und numerische Modelle	80
5.4.2	Parametrische Modelle	82
5.5	Weitere Zwecke von Modellen	87
5.5.1	Interpretation von Rohdaten	87
5.5.2	Steuern und Regeln	90
5.5.3	Design und Herstellung	92
6	Modellvalidierung	95
6.1	Experimente und Statistik	96
6.1.1	Die Entdeckung des Higgs-Bosons	97
6.1.2	Der Large Hadron Collider	98
6.1.3	Experimente am LHC	100
6.1.4	Rekonstruktion der Kollisionsprodukte	101
6.1.5	Modellierung von Kollision, Teilchenbewegung und Detektor	104
6.1.6	Massenbestimmung	106
6.1.7	Standardabweichung und Normalverteilung	108
6.2	Beobachtung	109
6.2.1	Lernen aus Statistik	111
6.2.2	Lernen aus Erfahrung	116
6.2.3	Lernen aus dem Rückblick	117
6.3	Modell- und Variabilitätsanalysen	118
6.3.1	Sensitivitätsanalyse	118
6.3.2	Monte-Carlo-Simulation	122
6.3.3	Ensemble-Forecasting	123
6.3.4	Emergent Constraints	124
6.3.5	Unsupervised Learning	125

6.4	Erklärung.....	126
6.4.1	Fitting und Overfitting.....	126
6.4.2	Das Bild vom schwarzen Loch.....	128
6.4.3	Atommüllendlager	134
6.5	Kombinationen verschiedener Validierungsmethoden	134
6.5.1	Modell und Empirie.....	134
6.5.2	Verschiedene Modelle des gleichen Systems	135
6.6	Wie weit kann man Modellen vertrauen?.....	136
7	Komplexität und die Grenzen von Modellen	141
7.1	Komplexität.....	141
7.1.1	Kompliziertheit und Komplexität	141
7.1.2	Komplexe Systeme	142
7.1.3	Versteckte Verknüpfungen	143
7.1.4	Verborgener Zustand	144
7.1.5	Hysterese	145
7.1.6	Rückkopplungen	145
7.1.7	Kippunkte	148
7.1.8	Pfadabhängigkeiten.....	150
7.1.9	Zufall	150
7.2	Chaos.....	151
7.2.1	Nichtlineare Systeme	151
7.2.2	Chaos in der Mathematik	153
7.2.3	Chaotische Systeme in der Praxis	156
7.2.4	Durchschnittliches Verhalten und Statistik.....	157
7.2.5	Charakterisierung der Chaotizität	158
7.2.6	Kommunikation der Unsicherheit	159
7.3	Emergenz	159
7.3.1	Emergenz in der Praxis	161
7.3.2	Emergenz in der Mathematik	161
7.3.3	Emergenz und Modellierung	162
7.4	Blinde Flecken.....	164
8	Modelle im Kontext.....	169
8.1	Die Rolle von Modellen in der Wissenschaft	169
8.1.1	Modelle als Basis weiterführender Forschung	169
8.1.2	Dokumentation des Status quo	171
8.1.3	Ein objektives Werkzeug der Wissenschaft?	171
8.2	Modelle und Gesellschaft	173
8.2.1	Fach- und Methodenwissen	173
8.2.2	Wahrheitserwartung	174
8.2.3	Langer Atem und schnelle Aussagen	174
8.2.4	Modelle in den Medien	174
8.2.5	Politik	175
8.3	Modellkompetenz	176
	Podcastepisoden	177
	Literatur	181

1

Krane

Aus einer Pressemitteilung eines Kranherstellers:



Der Mobilkran LTM 1750-9.1 kann jetzt noch schwerere Lasten heben. Betreiber haben die Möglichkeit, die Software mit den neuen Tabellen zu aktualisieren [37].

Mobilkrane kommen auf vielen Großbaustellen zum Einsatz, um Brücken einzuheben, Turmdrehkrane aufzustellen oder hunderte Tonnen schwere Reaktoren in Industrieanlagen auszutauschen. Bei besonders großen Aufgaben können auch zwei oder mehr Krane für das gemeinsame Heben einer Last eingesetzt werden [OT349].

Weltweit gibt es eine Handvoll Firmen, die diese Stahlkolosse herstellen; eine davon ist Liebherr aus dem schwäbischen Ehingen, von der obige Pressemitteilung stammt. Ihr zweitgrößter Mobilkran ist der LTM 1750-9.1, ein Neunachser mit einer nominellen Traglast von 750 Tonnen.

Wie kann es sein, dass dieser Kran durch eine Aktualisierung von Software in die Lage versetzt wird, jetzt bis zu 800 Tonnen Last zu heben? Müsste man dafür nicht stabilere Träger, dickere Stahlseile oder stärkere Motoren einbauen? Und was hat all das mit Modellen zu tun?

■ 1.1 Belastungsgrenzen

Die maximale Last, die ein Mobilkran sicher heben kann, ist hauptsächlich dadurch bestimmt, dass man zwei Unfallszenarien vermeiden möchte: Erstens kann der Ausleger, an dem die Last hängt, brechen. Zweitens kann der gesamte Kran umkippen.

Auch wenn der Ausleger aus zentimeterdicken Stahlprofilen besteht, biegt er sich nennenswert durch, wenn eine Last am Haken hängt. Bei großen Lasten kann man diese Durchbiegung sogar mit bloßem Auge erkennen! Wird das Gewicht zu groß, so knickt der Ausleger ab oder bricht.

Der LTM 1750 kann 750 Tonnen Last heben, allerdings nur nominell, das heißt bei vollständig eingefahrenem und maximal steil stehendem Ausleger. Beim Einsatz wird der Ausleger natürlich ausgefahren und geneigt, um Lasten zu bewegen. Daher werden in der Praxis nie die vollen 750 Tonnen am Haken hängen. Für den Vergleich verschiedener Krane ist die Angabe der nominellen Traglast dennoch hilfreich.

Mindestens genauso entscheidend ist, wie diese nominelle Traglast abnimmt, wenn man die Konfiguration des Krans verändert. Im Folgenden erläutern wir, welche Faktoren die maximale Last beeinflussen; sie sind in Bild 1.1 zusammengefasst.

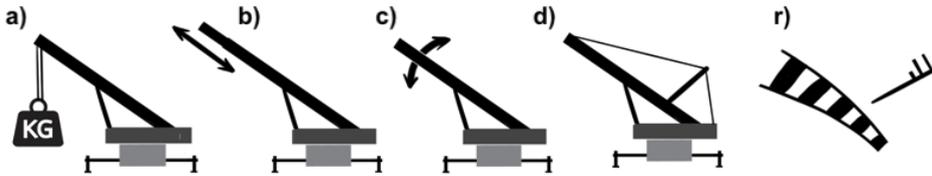


Bild 1.1 Faktoren, die die Biegebelastung des Auslegers beeinflussen: a) die Last am Haken, b) die Länge des Teleskopauslegers, c) die Neigung des Auslegers, d) ob eine Abspannung montiert ist, e) der Wind

Neben der Last spielt die Länge des Auslegers eine zentrale Rolle. Die meisten modernen Mobilkrane sind Teleskopkrane, das heißt, sie können die Länge des Auslegers mit Hydraulikzylindern oder Seilzügen verstellen. Beim LTM 1750 besteht der Ausleger aus vier ineinander geschachtelten Segmenten mit insgesamt 52 Metern Länge. Eine ganze Reihe verschiedener Gitterausleger können angebaut werden, um den Ausleger weiter zu verlängern (siehe Bild 1.2). Die Biegebelastung ist umso größer, je weiter der Ausleger ausgefahren ist. Bei voller Auslegerlänge kann der Kran nur noch etwa 100 Tonnen heben – und auch das nur, wenn der Ausleger fast senkrecht steht [37].

Denn auch der Winkel, den der Ausleger mit der Waagrechten bildet, beeinflusst die Biegebelastung. Ebenfalls mit Hydraulikzylindern (siehe Bild 1.3) kann dieser von fast horizontal bis etwa 85° , also fast senkrecht, aufgerichtet werden. Je flacher der Winkel, desto größer die Biegebelastung. Wenn man den voll ausgefahrenen Ausleger auf 67° neigt – wodurch man die Last um etwa 20 Meter versetzen kann – halbiert sich die maximal erlaubte Last auf ungefähr 50 Tonnen [37]. Die steigende Biegebelastung bei längerem und flacher geneigtem Ausleger können wir intuitiv nachvollziehen, wenn wir zum Beispiel eine Hantel erst am eingezogenen und dann am ausgestreckten Arm auf und ab bewegen.

Um die Durchbiegung bei gegebener Last zu verringern, kann der Ausleger durch Stahlseile verstärkt werden. Dazu werden auf der Oberseite des Auslegers Böcke aufgebaut, von denen vorgespante Stahlseile zur Spitze des Auslegers gespannt werden. Bild 1.4 zeigt eine solche Abspannung. Ein abgespannter Ausleger kann bei gegebener Länge größere Lasten tragen, denn die Stahlseile verringern seine Biegebelastung.

Auch der Wind spielt eine wichtige Rolle. Er lenkt die am Haken hängende Last zur Seite aus und verursacht dadurch eine seitliche Biegung, die auf das Material wirkt und damit die bisher betrachtete vertikale Biegebelastbarkeit verringert. Die Tragfähigkeit des Krans ist daher bei stärkerem Wind eingeschränkt. Übrigens: Diese seitliche Biegung ist der Grund,



Bild 1.2 Ein LTM 1750 mit angebautem Gitterausleger (in diesem Fall einer sogenannten Wippe) zur Verlängerung der Reichweite des Krans. Natürlich ist die maximal mögliche Last bei Verwendung von solchen Verlängerungen erheblich geringer als ohne.



Bild 1.3 Der Ausleger wird beim LTM 1750 von zwei massiven Hydraulikzylindern aufgerichtet. Diese sind hier in der Bildmitte erkennbar. X-förmig angeordnete Stützen und viele Tonnen Gegengewicht sorgen für Standfestigkeit.

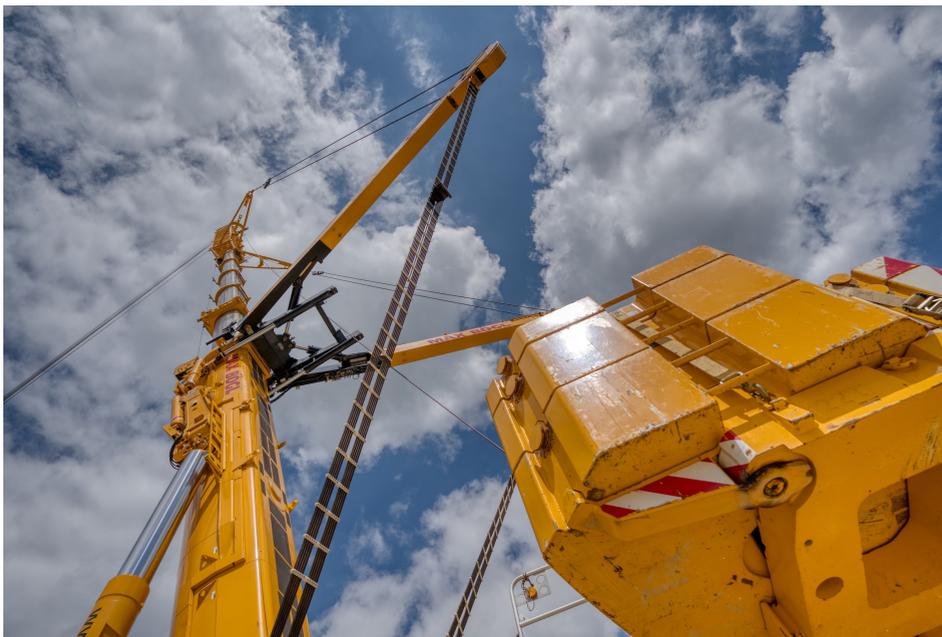


Bild 1.4 Die V-förmigen Masten auf der Oberseite des Auslegers, genannt Abspannung, dienen der Versteifung des Auslegers mittels Stahlseilen und damit zur Erhöhung seiner Biegesteifigkeit.

warum die Träger der Abspannung V-förmig nach außen geneigt sind (Bild 1.4). Dies bringt zusätzliche Steifigkeit in Querrichtung.

Genauso gefährlich wie ein Brechen des Auslegers ist ein Umkippen des Krans. Um dieses zu verhindern, setzt man ein Gegengewicht ein, beim LTM 1750 bis zu 204 Tonnen. Je schwerer das Gegengewicht ist, desto größer ist die Last, die man an den Haken hängen darf. Letztendlich kommt es aber auf das jeweilige Moment ($Kraft \cdot Hebelarm$) an. An vielen Kranen kann man daher auch die Position des Gegengewichts verstellen. Verschiebt man sie vom Kranmittelpunkt weg, erzeugt das gleiche Gegengewicht ein höheres Moment (Bild 1.5). Das ist wie bei der Wippe auf dem Kinderspielplatz: Die Wippe kippt auf die Seite, auf der das schwerere Kind sitzt – vorausgesetzt, beide Kinder sitzen gleich weit weg



Bild 1.5 Faktoren, die die Standfestigkeit eines Krans beeinflussen, sind das Gegengewicht als Hebelausgleich zur Last (linker Teil der Abbildung) sowie die Konfiguration der flexibel einstellbaren Stützen (Blick von oben auf den Kran im rechten Teil).

vom Drehpunkt in der Mitte der Wippe. Sind beide Kinder gleich schwer, so neigt sich die Wippe zu der Seite des Kindes, das weiter außen sitzt. Es gewinnt das Kind, das das größere Moment erzeugt.

Ein zweiter Faktor für die Standfestigkeit des Krans sind die Stützen. Je weiter sie hinausreichen, desto größer ist die Grundfläche, auf der der Kran steht. Der Kippunkt wandert nach außen. Dadurch wird der Hebel der Last kürzer und der des Ballasts länger (siehe auch Bild 1.5). Moderne Krane können jede ihrer vier Stützen unterschiedlich weit ausfahren, um auch in beengten Baustellen die maximale Standfestigkeit zu erreichen.

■ 1.2 Modelle im Kran

Während der Arbeit des Krans werden die Belastung des Auslegers sowie das Gleichgewicht und damit die Standfestigkeit kontinuierlich vom Rechner überwacht und sowohl dem Kranführer als auch den Kolleginnen, die außerhalb des Krans arbeiten, angezeigt. Letzteres geschieht typischerweise mit einer kleinen Ampel außen an der Fahrerkabine. Bei geringen und mittleren Belastungen des Krans zeigt sie grün. Wenn sich die Belastung des Krans dem maximal erlaubten Wert nähert, springt die Ampel auf gelb, und bei rot ist die Belastungsgrenze erreicht. Die Steuerungssoftware des Krans lässt dann nur noch belastungsverringernde Steuereingaben zu, beispielweise, um den Ausleger steiler zu stellen oder Seil abzulassen.

1.2.1 Daten

Damit der Rechner die Anzeigen für den Kranführer in der Kabine und die Ampel ansteuern kann, sind Informationen über die oben diskutierten Einflussgrößen notwendig. Der Winkel des Auslegers sowie seine Länge sind der Software bekannt, denn der Computer selbst steuert ja den Ausleger und gibt damit dessen Winkel und Länge vor. Auch die Konfiguration der Stützen und die Orientierung des Auslegers relativ zu den Stützen sind der Steuerungssoftware bekannt. Das Gewicht des Ballasts, der auf dem Kran installiert ist, gibt der Kranführer manuell ein. Auch der Wind wird meist vom Kranführer manuell erfasst; manche Krane haben zusätzlich einen Windgeschwindigkeitsmesser an der Auslegerspitze. Die Last am Haken ist die Größe, die sich am ehesten ändert. Auch wenn große Kranhübe ausführlich geplant werden und schon im Vorfeld bekannt ist, was die Last wiegen wird, wird das Gewicht am Haken kontinuierlich gemessen – es lässt sich aus den Drücken in den Hydraulikzylindern ableiten.

1.2.2 Standfestigkeit

Das Gleichgewicht als Maß für die Standfestigkeit des Krans lässt sich mit den Hebelgesetzen berechnen. Aus den Massen der Last und des Ballasts sowie deren Abständen vom

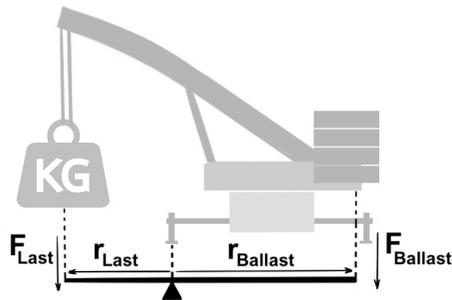


Bild 1.6 Der Kran steht sicher, wenn das Ballastmoment $F_{\text{Ballast}} \cdot r_{\text{Ballast}}$ größer ist als das Lastmoment $F_{\text{Last}} \cdot r_{\text{Last}}$. Dabei ist r der Abstand der Last beziehungsweise des Gegengewichts zum Kippunkt \blacktriangle , und F die Gewichtskraft jeweils von Last und Gegengewicht. Der Hebel der Last r_{Last} ergibt sich trigonometrisch aus der Länge und dem Winkel des Auslegers.

Kippunkt – der Spitze der Stützen – lässt sich errechnen, wann das Verhältnis der beiden Momente ein kritisches Maß erreicht. Bild 1.6 verdeutlicht diese Situation. Zusammen mit den Messdaten lässt sich damit nun ein Modell erstellen, das die Standfestigkeit des Krans beschreibt.

Ein solches Modell, das aus Formeln besteht, die den (hier physikalischen) Sachverhalt richtig repräsentieren, die man lösen und in die man konkrete Zahlenwerte einsetzen kann, nennt man ein analytisches Modell. Textaufgaben im Mathematikunterricht und viele Aufgaben in naturwissenschaftlichen Schulfächern führen Schülerinnen und Schüler an analytische Modelle heran, auch wenn dort der Begriff Modell nur selten fallen dürfte.

1.2.3 Biegebelastung des Auslegers

Die Biegebelastung eines Balkens mit rechteckigem Querschnitt, der auf einer Seite eingespannt ist, lässt sich über ein analytisches Modell berechnen. Maschinenbauer kennen diese Modelle unter dem Begriff Balkentheorie. Allerdings ist der Ausleger eines Mobilkrans eben kein einfacher Balken. Zum einen ist sein Querschnitt unten abgerundet und oben eher eckig. Zum anderen besteht ein Teleskopausleger aus ineinander geschobenen Segmenten, die zur Verlängerung des Auslegers herausgefahren werden. Da die inneren Segmente natürlich einen geringeren Querschnitt haben müssen als die äußeren, besteht der voll ausgefahrene Ausleger aus mehreren Teilen mit immer kleiner werdenden Querschnitten. Weiterhin haben die Segmente diverse andere Unförmigkeiten wie zum Beispiel Löcher für die Verbolzung der Segmente. Die Segmente werden zwar hydraulisch ein- und ausgefahren, dann aber in der gewünschten Position mechanisch mit Bolzen verriegelt. Die Hydraulik ist nur während des Ein- und Ausfahrens unter Last.

All diese Abweichungen vom einfachen Balken machen die Berechnung der Materialbelastung so kompliziert, dass man diese nicht mehr analytisch durchführen kann. Stattdessen verwendet man ein numerisches Modell. Dabei wird das reale System in kleine Teile zerlegt, deren Eigenschaften sich einfacher berechnen lassen. Mit speziellen Rechenverfahren werden dann die relevanten Eigenschaften des Gesamtsystems ermittelt.