

# HANSER



## Leseprobe

zu

# Modellkompetenz für Wissenschaft und Technik

von Nora Ludewig und Markus Völter

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446469709>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# 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](http://modellebuch.de). Hinweise nehmen wir gerne per E-Mail an [feedback@omegataupodcast.net](mailto:feedback@omegataupodcast.net) entgegen.

Und nun: viel Spaß!

Stuttgart, im März 2022

Nora Ludewig, Markus Völter



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Krane</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
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
<b>3</b>	<b>Modellarten</b> .....	<b>23</b>
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
<b>4</b>	<b>Vereinfachungen, Gültigkeitsbereiche und Abstraktion .....</b>	<b>57</b>
4.1	Vereinfachungen .....	57
4.2	Gravitationswellen .....	60
4.3	Meereis .....	63
4.4	Kernfusion .....	64
4.5	Abstraktion .....	67
<b>5</b>	<b>Zweck von Modellen .....</b>	<b>71</b>
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
<b>6</b>	<b>Modellvalidierung .....</b>	<b>95</b>
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
<b>7</b>	<b>Komplexität und die Grenzen von Modellen .....</b>	<b>141</b>
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
<b>8</b>	<b>Modelle im Kontext.....</b>	<b>169</b>
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
	<b>Podcastepisoden .....</b>	<b>177</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>181</b>





# 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?

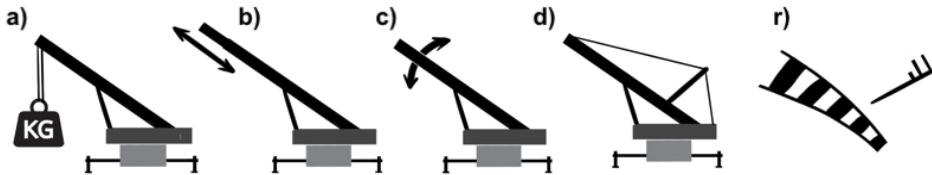
## ■ 1.1 Belastungsgrenzen

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  $85^\circ$ , also fast senkrecht, aufgerichtet werden. Je flacher der Winkel, desto größer die Biegebelastung. Wenn man den voll ausgefahrenen Ausleger auf  $67^\circ$  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.



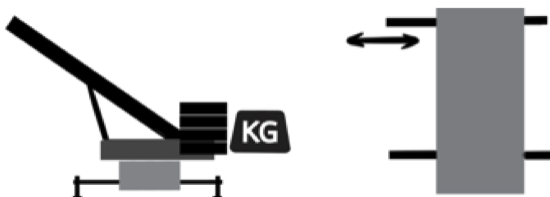
**Bild 1.3** Der Ausleger wird beim LTM 1750 von zwei massiven Hydraulikzylindern aufgerichtet. Diese sind hier in der Bildmitte erkennbar. X-förmig angeordnete Stützen und viele Tonnen Gegengewicht sorgen für Standfestigkeit.



**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 Kipppunkt 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

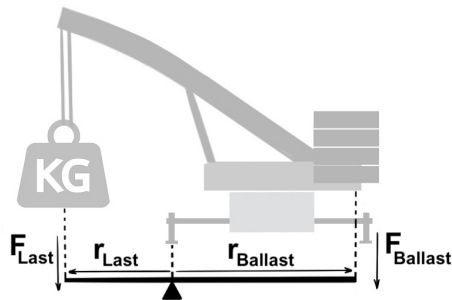
Während der Arbeit des Krans werden die Belastung des Auslegers sowie das Gleichgewicht und damit die Standfestigkeit kontinuierlich vom Rechner überwacht und sowohl dem Kranführer als auch den Kolleginnen, die außerhalb des Krans arbeiten, angezeigt. Letzteres geschieht typischerweise mit einer kleinen 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  $r_{\text{Last}}$  ergibt sich trigonometrisch aus der Länge und dem Winkel des Auslegers.

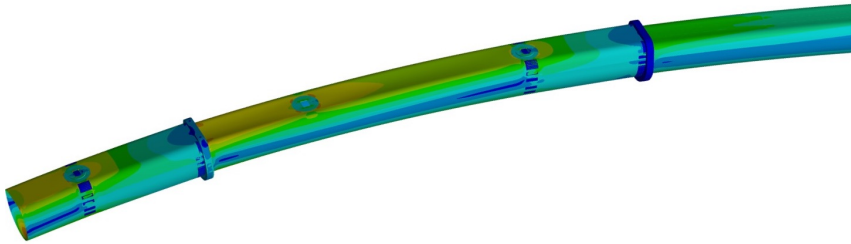
Kippunkt – der Spitze der Stützen – lässt sich errechnen, wann das Verhältnis der beiden Momente ein kritisches Maß erreicht. Bild 1.6 verdeutlicht diese Situation. Zusammen mit den Messdaten lässt sich damit nun ein Modell erstellen, das die Standfestigkeit des Krans beschreibt.

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.



**Bild 1.7** Ergebnis einer FEM-Berechnung eines Auslegers unter Biegebelastung. Die Farbco-dierung gibt die lokale Belastung des Materials wieder, als Prozentwert der Maximalbelastung. Blau und grün bedeuten geringe Belastung, gelb und rot entsprechend höhere. Das FEM-Modell dieses Stücks Ausleger umfasst ungefähr hunderttausend Elemente.

Für die Belastungsanalyse mechanischer Bauteile wird häufig die Finite-Elemente-Methode verwendet, abgekürzt FEM. Bei der FEM wird der Ausleger in kleinste Stahlquader unterteilt. Für jeden dieser Quader wird die Belastung berechnet, unter Berücksichtigung der durch die Last am Haken erzeugten Biegekraft. Außerdem wird berechnet, wie sich die Belastung eines Quaders zu seinen Nachbarn fortpflanzt. Für beide Aspekte werden relativ einfache Formeln verwendet. Die Belastungsgrenze des gesamten Objekts, hier unseres Auslegers, wird erreicht, wenn die Belastungsgrenze von irgendeinem der Quader erreicht ist. Ganz gemäß dem Sprichwort: „Eine Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied.“ Bild 1.7 zeigt ein Beispiel.

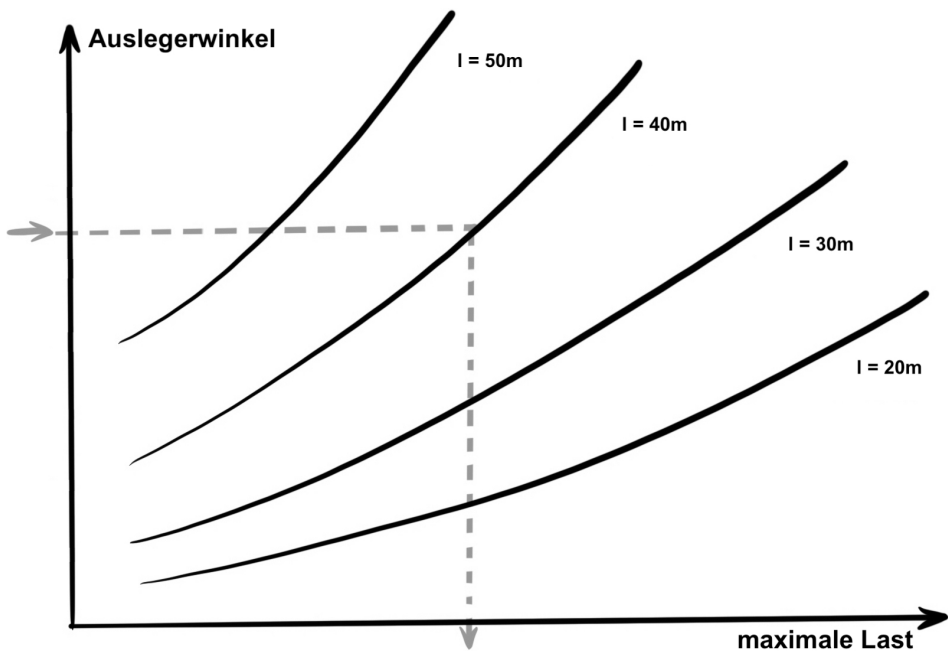
Die Unterteilung in kleinste Teilobjekte nennt man Diskretisierung. Sie ist das wesentliche Merkmal numerischer Modelle. Bei der FEM wird das mechanische Objekt diskretisiert, bei Wettermodellen beispielsweise die Atmosphäre.

Bei numerischen Modellen müssen die relevanten Eigenschaften separat für jedes diskrete Element berechnet werden. Statt eines einzigen Objekts hat man nun Tausende oder Millionen einzelner Elemente. Das heißt, das Problem wird nun zwar lösbar, aber die Lösung wird sehr aufwändig. In unserem Kran ist natürlich kein Großrechner installiert, der die FEM während des Betriebs durchführt. Stattdessen werden die Ergebnisse einer vorher durchgeführten FEM in ein parametrisches Modell überführt. Bei parametrischen Modellen werden die vom Modell beschriebenen Zusammenhänge als Tabellen oder sehr einfache Formeln abgelegt, aus denen man die Ergebnisse ablesen kann. Bild 1.8 zeigt ein vereinfachtes Beispiel des parametrischen Modells für die Biegebelastung eines Kranauslegers, auch Lasttabelle genannt.

Der Nachteil an parametrischen Modellen ist, dass man im Computer häufig viel Speicherplatz benötigt, um die Daten zu hinterlegen. Denn im ungünstigsten Fall müssen für jede mögliche Kombination von Eingangswerten alle dazugehörigen Ausgangswerte abgespeichert werden. Das ist bei Modellen, die auf PCs oder Großrechnern gerechnet werden, meist kein Problem. Bei Modellen, die als Teil von Steuerungen in technischen Geräten verwendet werden, und deshalb auf kleinen (und billigen) Rechnern laufen, kann dieser Speicherplatzbedarf aber durchaus Schwierigkeiten bereiten.

Wir haben jetzt drei Arten von Modellen kennengelernt. Analytische Modelle, numerische Modelle und parametrische Modelle. Alle haben Vor- und Nachteile, auf die wir in Kapitel 3 noch näher eingehen werden.





**Bild 1.8** Eine beispielhafte Lasttabelle, dargestellt als Diagramm. Auf der y-Achse ist der Winkel des Auslegers aufgetragen, auf der x-Achse die maximal erlaubte Last. Die einzelnen Kurven stellen den Zusammenhang zwischen Auslegerwinkel und Maximallast für die verschiedenen (auch in der Praxis endlich vielen) Auslegerlängen dar. Um auch noch Wind (beispielsweise für kleiner 5 km/h, bis 15 km/h und bis 30 km/h) und Abspannung (ja/nein) zu berücksichtigen, würde man weitere derartige Diagramme verwenden. Das ist praktikabel, weil die Anzahl der möglichen Konfigurationen begrenzt ist (3 Alternativen Wind  $\times$  2 Alternativen Abspannung = 6 Kombinationen).

## 1.2.4 Das Kranupdate

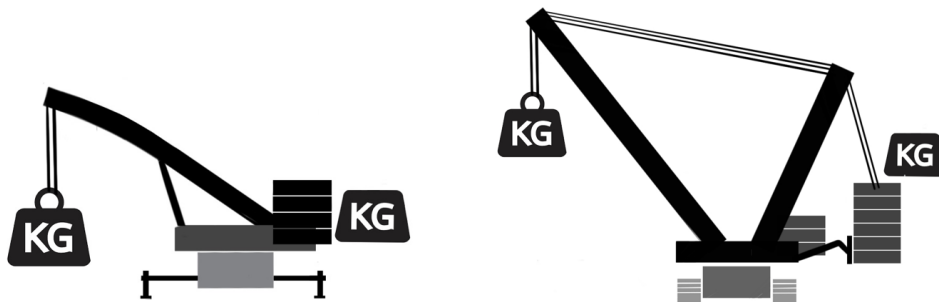
Was genau hat Liebherr denn nun gemacht, um den LTM 1750-9.1 für 800 Tonnen Last verwendbar zu machen? Hier ein weiterer Teil der vorher schon zitierten Pressemitteilung:



[...] konnten die gängigen Berechnungsmodelle und -ansätze der Finite-Elemente-Methode durch die [...] Konstrukteure und Statiker weiter verfeinert werden. Durch hochleistungsfähige Rechner wird die reale Tragstruktur des Krans immer besser im statischen Berechnungsmodell nachgebildet. So sind neue Erkenntnisse und Methoden möglich, die in die Entwicklung neuer Krane einfließen. [...] Diese neuen Erkenntnisse können aber auch auf bestehende Krane wie den LTM 1750-9.1 übertragen werden. Im Ergebnis fallen die Traglasten des 750-Tonnners in den meisten Arbeitsbereichen deutlich höher aus, als bei der Markteinführung [...] berechnet wurde [37].

Also: Das numerische FEM-Modell zur Berechnung der Biegebelastung des Auslegers wurde verfeinert. Durch die genauere Berechnung versteht man das Verhalten des Auslegers unter Last besser und kann daher weniger pessimistische Sicherheitsfaktoren annehmen – die erlaubte Last steigt. Mit den neuen Ergebnissen wurde das parametrische Modell, das der Kran zur Überwachung verwendet, angepasst. Das Software-Update hat dieses Modell im Rechner des Krans aktualisiert.

## ■ 1.3 Unfälle



**Bild 1.9** Beim (unabgespannten) Mobilkran (links) wird der Ausleger durch Hydraulikzylinder aufgestellt. Die Last wirkt als Biegebelastung auf den Ausleger. Bei Raupenkränen (rechts) wird der Hauptausleger (an dem die Last hängt) mittels Seilen von einem Gegenausleger gehalten. Am Gegenausleger hängen die Gegengewichte. Das Gewicht der Last wird über die Seile und den Gegenausleger direkt in das Gegengewicht geleitet; die Biegebelastung des Hauptauslegers ist sehr gering.

2014 stürzte in Rio de Janeiro ein Raupenkran um und fiel auf ein im Bau befindliches Fußballstadion. Zwei Menschen kamen bei dem Unfall ums Leben. Wie konnte das passieren? Gab es keine Modelle zur Überwachung?

Große Raupenkrane basieren auf einem anderen Prinzip als die oben besprochenen Mobilkrane: Mit Gegenauslegern und Stahlseilen wird dafür gesorgt, dass der Ausleger fast keine Biegebelastung erfährt; Bild 1.9 zeigt den Unterschied. Die maximal erlaubte Last nimmt mit Zunahme des Radius weniger schnell ab als bei Mobilkränen. Raupenkrane können daher größere Lasten auf größere Distanzen heben.

Es gibt einen zweiten offensichtlichen Unterschied: das Raupenfahrwerk. Raupenfahrwerke haben keine luftgefüllten Reifen und keine Federung und sind dadurch viel steifer. Deshalb benötigen Raupenkrane keine Stützen und können mit vielen hundert Tonnen Last auch fahren – wenngleich sehr, sehr langsam. Damit haben sie eine große horizontale Reichweite, ohne dass der Ausleger gesenkt werden und damit mehr Gegengewicht aufballastiert werden muss. Bild 1.10 zeigt einen LR 11000 von Liebherr, der nominell bis zu 1000 Tonnen Last heben kann.



**Bild 1.10** Ein Liebherr LR 11000 beim Einhub eines 200 Tonnen schweren Betonfundaments auf einer Bahnbaustelle bei Affalterbach 2020. Durch Gegenausleger und circa 300 Tonnen Gegengewicht kann der Ausleger diese Last auf bis zu 40 Meter Radius transportieren, ein Lastmoment, das mit einem Mobilkran undenkbar wäre. Man erkennt auch gut den Nachteil dieser Krankategorie: im Gegensatz zu Kranen mit Rädern sind Raupenkranen nicht sehr mobil; ein LR 11000 braucht je nach Konfiguration 40 bis 60 Schwertransporte und eine Woche Zeit zum Aufbau.

Sowohl bei Raupen- als auch bei Mobilkranen werden Modelle verwendet, um zu überwachen, dass der Kran nicht überlastet wird. Was also ist bei dem Unfall in Rio passiert? Es kursieren verschiedene Gerüchte, aber eines davon scheint besonders plausibel: instabiler Boden [35]. Voll zusammengebaute Raupenkranen können inklusive Last und Ballast bis zu 1500 Tonnen wiegen und erreichen damit Bodendrücke um 28 Tonnen pro Quadratmeter – ungefähr das Sechsfache von Raupenbaggern, wie man sie auf jeder Baustelle findet, und das Fünfzehnfache eines Menschen. Beim Aufrichten des Krans, wenn der Ausleger sein maximales Moment entwickelt, kann die dann einseitige Belastung nochmal um den Faktor drei auf bis zu 90 Tonnen pro Quadratmeter ansteigen.

Es gilt daher der Grundsatz, dass Kranplätze verdichtet sein müssen.<sup>1</sup> Die Tragfähigkeit des Bodens wird im Rahmen der Planung der Kranarbeiten geologisch überprüft und gegebenenfalls durch Präparation erhöht. Bei Mobilkranen werden Stahlplatten unter die Stützen gelegt, damit der spezifische Bodendruck reduziert wird, und Raupenkranen werden in der Regel auf Fahrbahnen aus Holz- oder Stahlbalken bewegt. Wenn ein Raupenkran allerdings über nicht (ausreichend) präparierten Boden fährt, besteht ein signifikantes Unfallrisiko.

<sup>1</sup> Dieser Spruch hat unter Kranführern inzwischen Kultstatus erreicht. Es gibt T-Shirts und Tassen mit diesem Spruch sowie ein sehr populäres Video und jede Menge Parodien darauf [10].