



# Die Skala der Kräfte

## Ein Streifzug durch das Reich der genauesten Kraftmesser Deutschlands

**S**turm ist der Normalfall in einem Offshore-Windpark. Auf die großen Rotorblätter der Windkraftanlagen wirken gewaltige Kräfte; mehrere Meganewton (Millionen Newton) können es werden, so viel, wie man es sonst eher aus der Raumfahrt kennt. Aber auch am anderen Ende der Kraftskala sind die Anforderungen groß. Wenn sich eine winzige Insulinpumpe, die ein Diabetiker unter der Haut trägt, dreht, dann wirken zwar nur Kräfte im Bereich von einigen Millinewton. Aber in beiden Fällen müssen die auftretenden Kräfte genau gemessen werden, andernfalls drohen folgenschwere Unfälle. Um die für solche Messungen eingesetzten Kraftmessgeräte zu kalibrieren, hält die PTB einen wahren Maschinenpark bereit.

Bei der Rotation von Windradflügeln oder der Anzugskraft einer Schraube müssen außerdem Drehmomente beachtet werden. Auch die haben die PTB-Wissenschaftler mit ihren Normalen im Griff. Die PTB-Skala reicht hier von einem tausendstel bis zu einer Million Newtonmeter. Und in Kürze werden zusätzlich die dynamischen, also etwa periodisch fluktuierenden Kräfte abgedeckt sein. „Unser Ziel ist es, noch in diesem Jahr dynamische Kalibrierungen anbieten zu können“, sagt Rolf Kumme, Leiter des PTB-Fachbereichs Festkörpermechanik.

Die *maßstäbe* begleiten Rolf Kumme durch das Reich der genauesten Kraftmesser Deutschlands. Der Streifzug umfasst die für jeden „greifbare“ Gewichtskraft von einem Newton – das entspricht etwa der Masse von 100 Gramm einer Tafel Schokolade. Er führt bis zu den tonnenschweren Kraftanlagen für Messungen von vielen Meganewton und in der anderen Richtung bis hin zu den schon fast unvorstellbare kleinen Kräften von wenigen Mikro- oder sogar nur Nanonewton. Der Bereich von 1 N bis 16,5 MN wird von der offiziellen Kraftskala der PTB abgedeckt; darüber und darunter arbeiten die Wissenschaftler noch mehr oder weniger im Forschungs-Neuland.



Sie ist der Koloss unter den PTB-Kraftmesseinrichtungen: Die 2-Meganewton-Kraft-Normalmesseinrichtung erstreckt sich über drei Stockwerke (hier grafisch zusammenmontiert). In ihr stecken noch wirkliche, tonnenschwere Gewichtsscheiben; daher die enormen Ausmaße. Ihre stärkere Schwester, die bis zu 16,5 Meganewton messen kann, macht äußerlich weit weniger her, denn in ihr wird die Kraft hydraulisch übertragen. Ansonsten hätte die PTB das Gebäude wohl erhöhen müssen ...

## Meganewton

Über mehrere Stockwerke dehnen sich die größten Kraft-Normalmesseinrichtungen aus. Je nach Messaufbau drückt oder zieht die Last von tonnenschweren Stahlscheiben auf und an kompakten, zylindrischen Blöcken, in denen sich ein metallischer Körper elastisch verformen kann. Diese Kraftaufnehmer sind für den Meganewton-Bereich die wichtigsten Sensoren, mit denen in Braunschweig tagtäglich gearbeitet wird. An den inneren Verformungskörpern haften Dehnungsmessstreifen. Sie liefern – elektrisch angeschlossen an einen ausgeklügelten Messkreis – Kraftdaten mit der Genauigkeit von hundertstel Promille. Das bedeutet, dass bei einer Gesamtkraft von zwei Millionen Newton noch auf wenige Newton genau gemessen werden kann. Mit dieser Präzision kalibrieren die Wissenschaftler um Rolf Kümme die Kraftmesser, die im Bergbau, beim Bau von Brücken, Windparks oder Ölplattformen, bei Werkstoffprüfungen und für die Raumfahrt zum Einsatz kommen. Mit einer massiven Anlage, die ihre Zug- und Druckkräfte mit einem Hydrauliksystem aufbauen kann, erreichen Kümme und Kollegen Kräfte von bis zu 16,5 Meganewton. Das entspricht in etwa der Last, die rund 1000 Mittelklasse-Limousinen auf die Waage bringen würden. Und der Messbereich ist nach oben offen. Die PTB begleitet mit ihrem messtechnischen Know-how die Entwicklung einer 30-MN-Anlage in der Materialprüfanstalt Braunschweig (siehe Artikel auf den Seiten 38/39).

## Kilonewton und Newton

Präzise Kraftmessungen im Bereich einiger tausend Newton gehören heute beispielsweise im Flugzeug- und Automobilbau zum Alltag. Welche Kräfte wirken bei einem Crashtest auf das Blechkleid oder auf Dummies? Wie gut halten Getriebe, Motoren und Turbinen der Dauerbelastung stand? Diese Fragen werden mithilfe von Kraft- und Drehmomentmessgeräten beantwortet, deren Genauigkeit prinzipiell immer auf Kalibrierungen im Braunschweiger Kraftlabor gründet. Für statische Kraftmessungen stehen ähnlich aufgebaute Anlagen wie im Meganewton-Bereich zur Verfügung, nur sind sie deutlich kleiner.

Anspruchsvoller gestaltet sich die exakte Analyse von Schwingungen, Vibrationen und Resonanzeffekten, die für die Sicherheit und Stabilität von Autos, Maschinen und Flugzeugen eine wichtige Rolle spielen. Um auch diese dynamischen Kräfte mit hoher Genauigkeit in Messdaten festhalten zu können, entwickelten Kümme und sein Team ein völlig neues System, mit dem sich die Wirkung schwingender Lasten bestimmen lässt. Wie bei einer Lautsprechermembran können Kräfte von bis zu 10 Kilonewton elektrodynamisch auf einen Kraftaufnehmer wirken. 20- bis 2000-mal pro Sekunde bewegt die dumpf wummernde Anlage ihre Masse hin und her. Da Dehnungsmessstreifen teils zu langsam reagieren, kommen daneben auch piezoelektrische Kraftaufnehmer ins Spiel.

Bis hinunter auf einige Newton lassen sich die Auswirkungen der periodisch beschleunigten Massen mit der neuen Messanlage analysieren. Viele Anwendungen aus dem Kilonewton-Bereich reichen in den Bereich von einigen Newton hinunter. Weitere gesellen sich dazu wie die Füge-technik, die Messtechnik in Labor und Medizin und die Analyse von Elektromotoren und Mechanik für Maschinen jeder Art. Zudem müssen zahlreiche Materialien, vom einfachen Garn über Kunststoffe bis hin zu metallischen Bauteilen, in diesem Lastbereich ihre Stabilität unter Beweis stellen.

## Millinewton und noch kleiner

Bisher reicht die Kraftskala der PTB von 16,5 Meganewton bis auf ein halbes Newton herunter. In wenigen Jahren soll die verlässliche Skala bis weit in den Bereich von wenigen tausendstel Newton erweitert werden. Weil sich selbst mit feinsten Gewichtslasten hier nicht mehr die erforderliche Genauigkeit erreichen lässt, wurden prinzipiell neue Normalmesseinrichtungen entwickelt. Ein Prototyp dieser Anlagen nutzt als Kraftgeber ein Piezoelement, das sich über eine elektrische Spannung gesteuert gleichmäßig nach oben und unten aufspreizt. Nach unten drückt es auf den Kraftaufnehmer, nach oben mit der identischen Kraft auf eine elektromagnetisch kompensierte Wägezelle. Durch Rückkopplung mit der Wägezelle lässt sich jede Kraft zwischen zwei Newton und einem zehntausendstel Newton exakt gesteuert einstellen. Damit lässt sich eine Auflösung von Bruchteilen eines millionstel Newton erzielen, die schon bald Anwendern in der Mikrosystemtechnik, den Materialwissenschaften und Entwicklern von hochempfindlichen Analysegeräten in der Medizin zugute kommen wird.

Kräfte bis in den Nanonewton-Bereich hinein wirken, wenn sich zwei elektrisch geladene oder magnetische Atome abstoßen oder ein Virus an eine Zellwand andockt. Diese Kräfte lassen sich mit winzigen Spitzen am Ende eines Nanohebels in Rasterkraftmikroskopen aufspüren. Ein solcher Cantilever hebt oder senkt sich und folgt damit genau der Anordnung der einzelnen Atome und Moleküle auf einer Oberfläche. Seine Auslenkung kann mit piezoelektrischen Modulen oder über Laufzeitmessungen von Laserstrahlen bestimmt werden. Eine spezielle Messeinrichtung für diese Nanokräfte entwickeln zurzeit Kollegen in einer anderen PTB-Abteilung (siehe Artikel Seite 48). Wenn sie fertig ist, dann wird der PTB-Maschinenpark einmal die gigantische Spannweite von wenigen milliardstel Newton (Nanonewton) bis zu vielen Millionen Newton (Meganewton) abdecken. Dazwischen liegen immerhin 15 Größenordnungen; kaum eine andere Größe können die Messexperten der PTB in dieser Breite abdecken. ■

Jan Oliver Löffken