



Zentrifugalbeschleunigung in der Drehmomentmessung - oft unterschätzt, aber von großer Wirkung

Was haben eine Achterbahn, eine Wäscheschleuder und eine Zentrifuge mit rotierender Drehmomentmesstechnik gemeinsam? Die Antwort ist verblüffend: Die Zentrifugalbeschleunigung. Durch die Kombination aus Rotation und Dimension entsteht Beschleunigung. Multipliziert man diese wiederum mit der vorhandenen Masse, entstehen große Kräfte, die entsprechend sichere Konstruktionen erfordern.

Bei einer Achterbahn dürfen auf der einen Seite die Beschleunigungen nicht zu groß werden, um keine Gesundheitsbeeinträchtigungen zu verursachen, auf der anderen Seite sollten sie aber groß genug sein, um über die Aufhebung der Schwerkraft ein Gefühl der Schwerelosigkeit zu erzeugen. Die Wirkung einer Wäscheschleuder, die ja eine Zentrifuge ist, ist jedem klar. Hier werden unterschiedliche Materialien voneinander getrennt.



Allerdings sind die im täglichen Leben auftretenden Zentrifugalbeschleunigungen vergleichsweise klein gegenüber denen, die bei der Drehmomentmessung auftreten.

- Bei einer Wäscheschleuder - je nach Trommeldurchmesser und Schleuderdrehzahl - beträgt die Zentrifugalbeschleunigung ca. $400\text{ g} \approx 4000\text{ m/s}^2$,
- bei einer Achterbahn ca. $5\text{ g} \approx 50\text{ m/s}^2$,
- bei rotierenden Drehmomentaufnehmern dagegen mehrere tausend g oder m/s^2 .

Erdbeschleunigung beeinflusst Kalibrierengenauigkeit

Die Erdbeschleunigung g gibt an, welche Beschleunigung ein Körper im Gravitationsfeld der Erde erfährt. An der Erdoberfläche beträgt sie im Mittel $\approx 9,81\text{ m/s}^2$, variiert aber infolge der Zentrifugalkraft des Erdmittelpunktes, der Erdabplattung und regionaler Gegebenheiten. Die Beschleunigung, die ein Mensch erträgt, ohne bleibende Schäden zu erleiden, ist so ohne Weiteres nicht zu bestimmen. Die Literatur spricht bei ausgebildeten Testpiloten mit Spezialkleidung von 9 g , in der DIN 4112 wurde die maximal zulässige Vertikalbeschleunigung mit 6 g festgelegt [1].

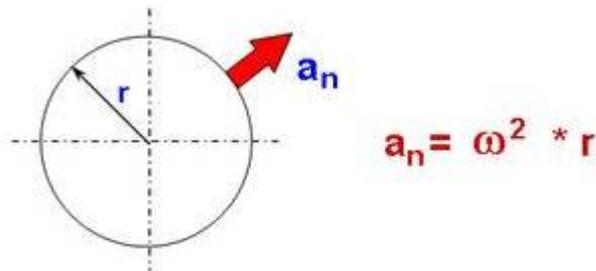
Die Kenntnis der Gravitationsbeschleunigung spielt auch bei der exakten Darstellung und Weitergabe der Messgröße Drehmoment eine entscheidende Rolle, da die genauesten Kalibriereinrichtungen aus Totgewichten (Massen) und Hebelarmen bestehen. Bei HBM wurde diese Beschleunigung im DKD-Kalibrierlabor exakt bestimmt und beträgt $9,810285\text{ m/s}^2$ mit einer Messunsicherheit von $0,000005\text{ m/s}^2$.

Zentrifugalbeschleunigung und Drehzahl

Ein Drehmoment-Messflansch in einem Prüfstand für Antriebsstränge stellt ein mit einer Winkelgeschwindigkeit rotierendes System dar. Hierdurch entsteht in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Drehzahl eine Zentrifugalbeschleunigung.

Multipliziert man diese mit einer Masse oder einem Massepunkt, entsteht eine Zentrifugalkraft, auch als Fliehkraft bezeichnet. Je nach Konstruktion sind diese Zentrifugalkräfte gegebenenfalls eine Begrenzung für die maximal zulässige Drehzahl. Andere Einflussgrößen, z. B. kritische Drehzahlen, sind unbedingt zu berücksichtigen [2].

Die Zentrifugalbeschleunigung ergibt sich aus dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit, multipliziert mit dem Radius r .



$$\omega = 2\pi f = 2\pi n/60$$

Damit ist

$$a_n = \frac{\pi^2}{900} \cdot r \cdot n^2$$

(Zahlenwertgleichung mit a_n in m/s^2 , r in m und n in min^{-1})

Die nachfolgende Tabelle zeigt, welche Zentrifugalbeschleunigungen bei unterschiedlichen Drehmoment-Messflanschen und ausgewähltem Durchmesser auftreten.

| Type | Ø [mm] | n [rpm] | a [m/s^2] | g |
|----------------|--------|---------|----------------------|-------|
| T10F/100N·m | 117 | 15000 | 144197 | 14699 |
| T10F /10kN·m | 254 | 8000 | 89043 | 9077 |
| T10FS /100N·m | 119 | 24000 | 375454 | 38273 |
| T10FS /10kN·m | 256 | 12000 | 201925 | 20584 |
| | | | 0 | |
| T40 /200N·m | 108 | 20000 | 236630 | 24121 |
| T40 /10kN·m | 239 | 10000 | 130914 | 13345 |
| | | | 0 | |
| T12 /100N·m | 116 | 18000 | 204981 | 20895 |
| T12 /10kN·m | 243 | 12000 | 191276 | 19498 |
| | | | 0 | |
| T10FM /15kN·m | 237 | 8000 | 83136 | 8475 |
| T10FM /80kN·m | 310 | 4500 | 34402 | 3507 |
| | | | 0 | |
| T10FH /100kN·m | 450 | 3000 | 22184 | 2261 |
| T10FH /300kN·m | 540 | 2000 | 11832 | 1206 |

Tabelle 1: Zentrifugalbeschleunigung resultierend aus Drehzahl und Bauform

Deutlich zu erkennen ist die Dominanz der Drehzahl gegenüber dem Durchmesser. Dies muss so sein, da die Drehzahl quadratisch in das Ergebnis eingeht und der Durchmesser nur linear.

Die Relevanz der einzelnen Nenndrehzahlen der Flansche ergibt sich aus den unterschiedlichen Zielanwendungen. Im Folgenden sind Beispiele für Drehzahlen in der Einheit min^{-1} für typische Anwendungen aufgeführt [3]:

- Erdkugel ca. 0,000694
- Schiffspropeller (großes, kommerzielles Seeschiff) 70 bis 150
- Hauptrotor eines Hubschraubers bis 400
- Propeller eines Sportflugzeuges 2.500
- Zweipoliger Drehstrom-Asynchronmotor an 50-Hz-Netzspannung ca. 3.000
- Zweipoliger Generator für 50-Hz-Netzspannung (z. B. Europa) 3.000
- Zweipoliger Generator für 60 Hz (z. B. USA) 3.600
- Höchstdrehzahl eines Diesel-Automotors ca. 5.500
- Höchstdrehzahl eines Benzin-Automotors ca. 9.000 bis 18.000
- Gasturbinen 3.000 bis 100.000
- Abgasturbolader für Verbrennungsmotoren 100.000 bis zu 300.000

Abhängigkeit von Drehzahl und Baugröße

Oft werden Drehmoment-Messflansche nicht bei ihrer Nenndrehzahl betrieben. Am Beispiel des Drehmoment-Messflansches T10FS zeigen sich die Auswirkungen unterschiedlicher Drehzahlen und Baugrößen.

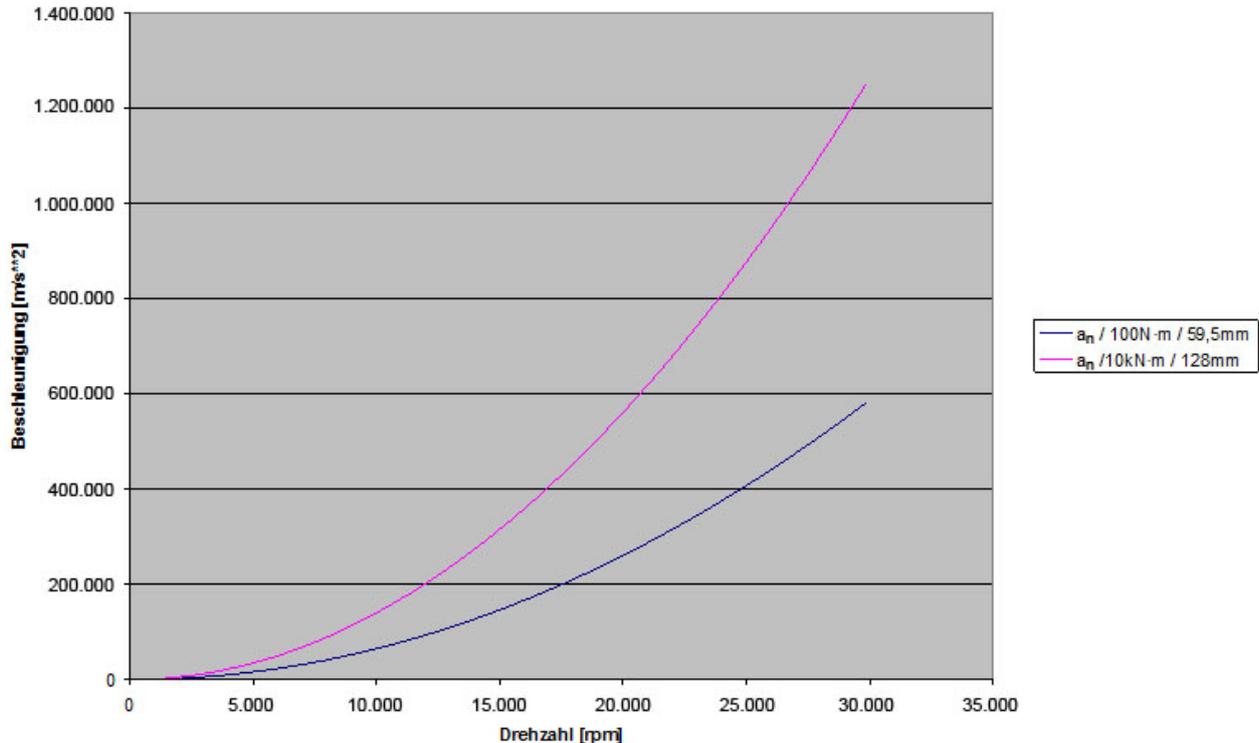


Bild 1: Zentrifugalbeschleunigung in Abhängigkeit von Drehzahl und Baugrößen

Trägt man die Kurven doppellogarithmisch auf, so ergibt sich folgende Kurvenschar [4], aus der für ausgewählte Radien die Zentrifugalbeschleunigung leicht erkennbar ist. Beispielswei-

se ergibt sich bei einer Drehzahl von $10\,000\text{ min}^{-1}$ und einem Radius von 250 mm eine Zentrifugalbeschleunigung von $273\,878\text{ m/s}^2 \approx 27918\text{ g}$, ca. 30 000 g.

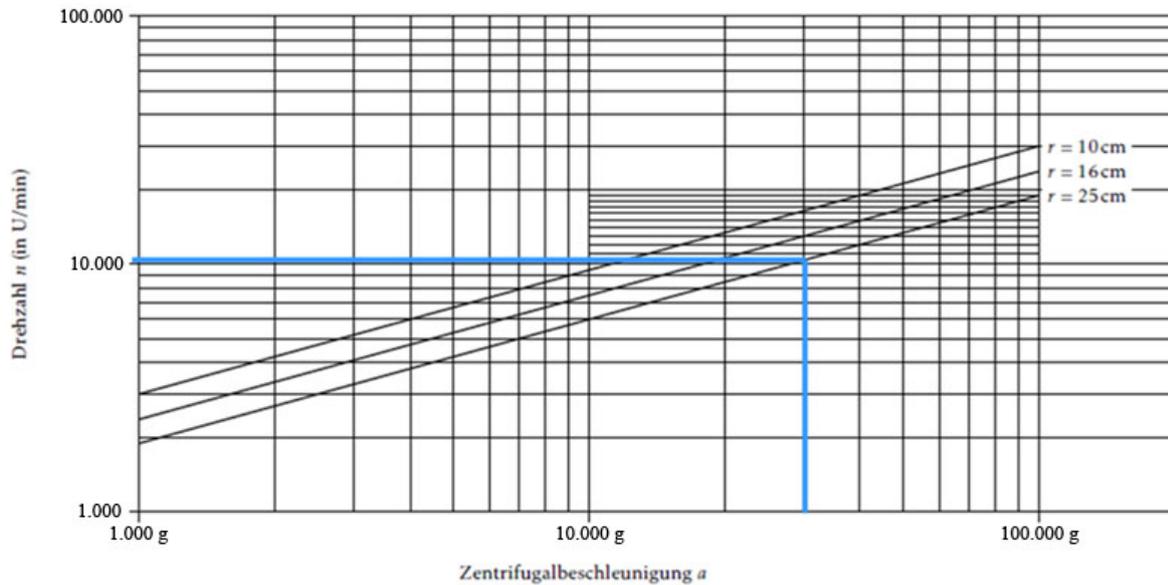


Bild 2: Scharparameter Radius r der Kreisbahn

Die Beschleunigung ist, solange sie nicht auf eine Masse wirkt, unkritisch. Da dies aber in der Realität nicht vorkommt, ist die Zentrifugalkraft von größter Bedeutung. Für Konstruktionen, die mit Winkelgeschwindigkeit / Drehzahl rotieren, sind somit nicht die Beschleunigungen, sondern die daraus resultierenden Kräfte zu beachten.

Die allseits bekannte Beziehung Kraft = Masse • Beschleunigung

$$F = m \cdot a$$

gilt für rotierende Körper entsprechend

$$F_z = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$f [\text{s}^{-1}] = n[\text{rpm}]/60$$

$$\omega [\text{s}^{-1}] = \pi \cdot n[\text{rpm}]/30$$

Damit ergibt sich für die Zentrifugalkraft F_z

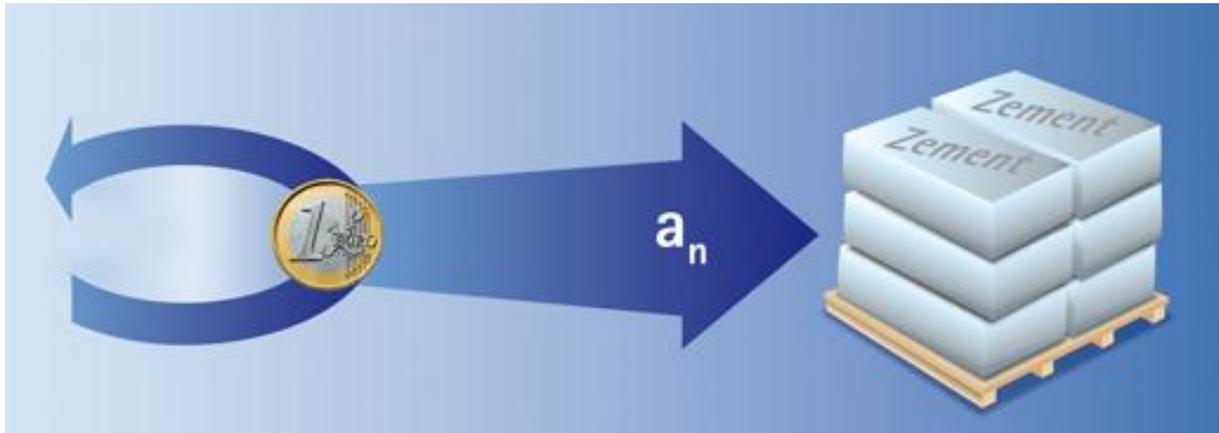
$$F_z = m \cdot \frac{\pi^2}{900} \cdot n^2 \cdot r$$

(Zahlenwertgleichung mit F_z in N, m in kg, r in m und n in min^{-1})

Die Auswirkung lässt sich anhand der 1-Euro-Münze, Münzgewicht $7,5 \cdot 10^{-3}\text{ kg}$, und der Maximaldrehzahl des Drehmoment-Messflansches T10FS/100 N•m, $n = 24000\text{ min}^{-1}$, $r = 59,5\text{ mm}$, eindrucksvoll darstellen.

$$F_z = 7,5/1000 \cdot \frac{9,8596}{900} \cdot 24000^2 \cdot 59,5/1000 = 2819,9\text{ N}$$

Im Erdschwerefeld entspräche dies ≈ 287 kg - ca. 6 Zementsäcke a 50 kg. Eine solche Münze wäre zu schwer um sie in der Geldbörse zu tragen.



Zusammenfassung

Beschleunigung ist nicht gleich Beschleunigung. Die durch Rotation erzeugten Zentrifugalbeschleunigungen sind um ein Vielfaches größer als die in unserer täglichen Umgebung auftretenden Beschleunigungen. Die bei der Rotation entstehenden Beschleunigungen, daraus resultierende Kräfte und somit Energien, sind nur sehr schwer vorstellbar und müssen von den einzelnen Konstruktionen sicher ertragen werden, um Schäden von Mensch und Material fernzuhalten. Dies ist Aufgabe von Herstellern und Anwendern zugleich.

Literatur:

[1] Gunter Gebauer: Kalkuliertes Risiko: Technik, Spiel und Sport an der Grenze, Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

[2] Rainer Schicker, Georg Wegener: Drehmoment richtig messen, ISBN 3-00-009015-0, Herausgeber Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, www.hbm.com

[3] de.wikipedia.org/wiki/Drehzahl

[4] www.siart.de/lehre/zentrifuge.pdf



Rainer Schicker

International Product Manager
Torque Applications

HBM Test and Measurement

E-Mail: rainer.schicker@hbm.com

HBM Test and Measurement

www.hbm.com
E-Mail: info@hbm.com

Tel. 06151 803-0
Fax 06151 803-9100

measure and predict with confidence

