

# Die tatsächlichen Kenndaten elektrischer Maschinen sichtbar machen mit einer genauen und dynamischen Drehmoment- messung

## **Autor**

Mitch Marks  
HBM Business Development Manager eDrive Testing



# Die tatsächlichen Kenndaten elektrischer Maschinen sichtbar machen – mit einer genauen und dynamischen Drehmomentmessung

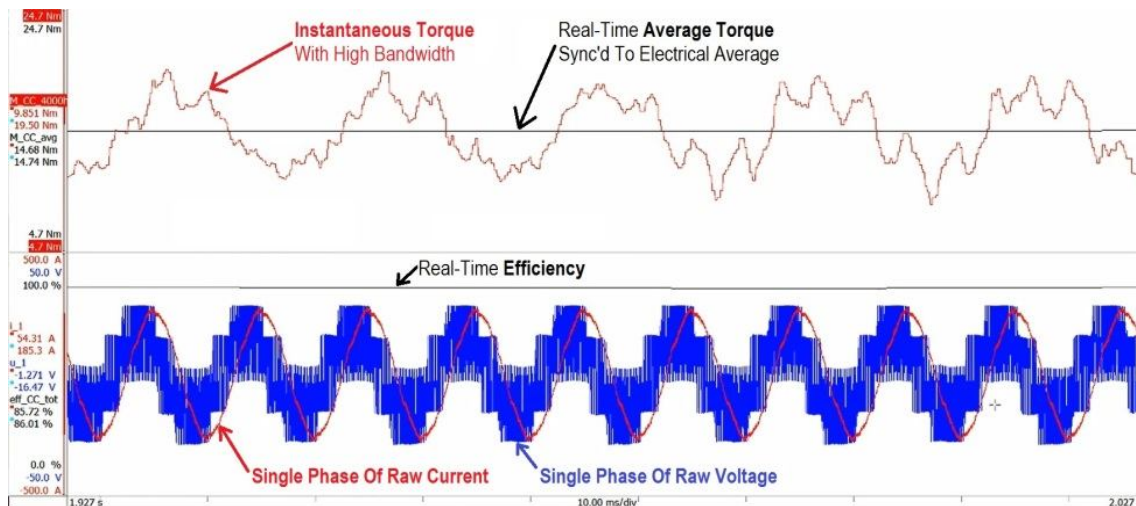
Mechanische Leistungsmessungen an einer elektrischen Maschine sind sehr wichtig für das Verständnis, was ein Motor zu einer bestimmten Zeit und an einem bestimmten Arbeitspunkt tut. Mithilfe mechanischer Messungen ist es möglich, die Kennlinie des Motors zu erstellen, Modelle der Maschine aufzubauen, dafür zu sorgen, dass Regler zuverlässig arbeiten, und die Grenzen des Systems zu verstehen. Um einen Regler zu entwickeln und eine Lösung für einen Elektromotor umzusetzen, ist es besonders wichtig, dass das Drehmoment mit hoher Genauigkeit, Bandbreite und Auflösung gemessen wird. Bei elektrischen Maschinen geht es oft darum, zwei Dinge zu verstehen: ihren Wirkungsgrad und ihre Dynamik. Da das Drehmoment kein statischer Wert ist, sollte die Messung vorzugsweise einen hochgenauen Mittelwert liefern, vergleichbar mit der Verwendung von Effektivwerten für den elektrischen Wirkungsgrad. Die Genauigkeit des Drehmoments ist sehr wichtig, denn elektrische Maschinen können mit Wirkungsgraden im hohen 90er-Prozentbereich arbeiten. Wenn die Wirkungsgradmessung für eine Maschine 98 % mit einem Fehler von  $\pm 3$  % ergibt, bedeutet dies, dass sie theoretisch einen Wirkungsgrad von 101 % haben könnte, was überhaupt nicht möglich ist. Deshalb wird eine hochgenaue Drehmomentmessung benötigt. Dies ist eine relativ neue Problemstellung, da der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors von 38 % mit gleichem Fehler bei 41 % liegen würde, was durchaus vernünftig wäre.

Eine Drehmomentmessung mit hoher Bandbreite wird auch benötigt, um zu verstehen, was in einem einzelnen Moment geschieht. Dies könnten sein:

- das Rastmoment für einen Betrieb im eingeschwungenen Zustand
- das Drehmomentverhalten während Belastungen
- das Drehmoment während Reglungsänderungen

## 1 Momentanwert und Mittelwert des Drehmoments

Abbildung 1 stellt das Drehmoment während einer Wirkungsgradmessung für einen PWM-Standardinverter in einem Szenario mit Drehmoment und Drehzahl im eingeschwungenen Zustand dar. Im unteren Bereich wird jeweils nur eine Spannung und ein Strom dargestellt, die zeigen, was an den Klemmen des Motors geschieht. Die rote Kurve oben stellt die Momentanwerte des Drehmoments dar, aus denen ein Leistungswert abgeleitet werden kann, aber eigentlich will man bei diesen Wirkungsgradmessungen einen guten Drehmoment-Mittelwert haben, der die gleiche Zeitbasis verwendet wie der für die elektrischen Größen verwendete Mittelwert. Vorzugsweise werden die Werte pro Zyklus angegeben, d. h. jeder vom Drehmomentaufnehmer gemessene Punkt wird summiert und über die Periodendauer einer Grundresonanzfrequenz des Stroms gemittelt. Dieser Wert wird mit der schwarzen Kurve dargestellt. Er liefert einen genauen, zeitausgerichteten Wirkungsgrad zwischen den elektrischen und mechanischen Werten, ohne dass Ungenauigkeiten durch die natürlichen Schwankungen des Systems oder durch von außen von einem Dynamometer verursachte Schwankungen eingeführt werden.

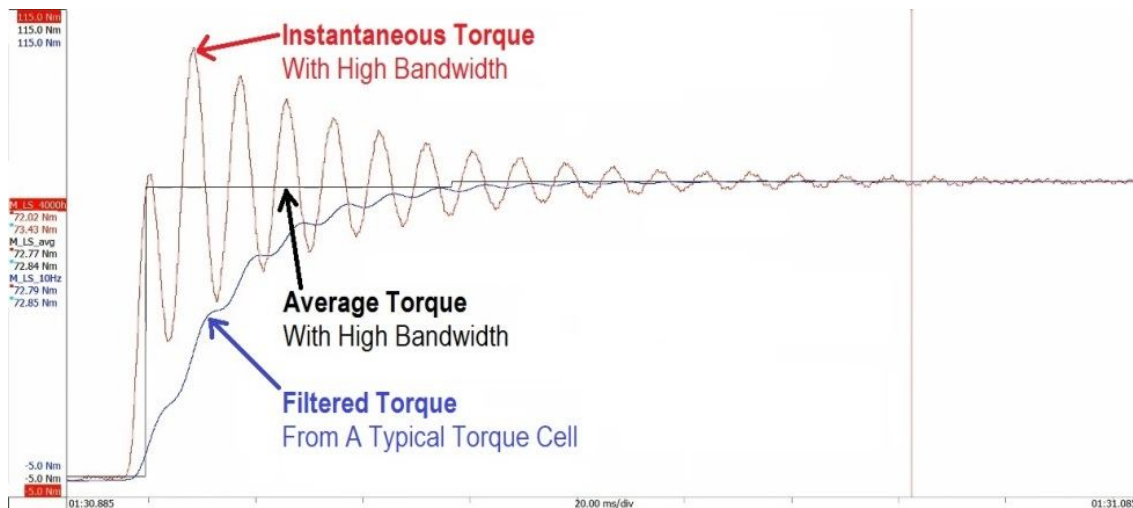


**Abbildung 1 – Momentanwert und Echtzeit-Mittelwert des Drehmoments bei einer Wirkungsgradmessung**

Durch eine Abtastung mit einer Rate über die gesamte 6-kHz-Bandbreite des Sensors lassen sich genaue Mittelwerte rasch und wesentlich schneller ermitteln als mit anderen Systemen, die langsam abtasten und eine lange Mittelung benötigen, bis ein guter Mittelwert erzielt wird. Bei einer langsameren Abtastung muss teilweise über Minuten oder bestenfalls in der Größenordnung von Zehntelsekunden gemittelt werden, bis sich ein brauchbarer Wert herausbildet. Dagegen ermöglicht ein Drehmomentaufnehmer mit hoher Bandbreite und Genauigkeit in Kombination mit einem Datenerfassungssystem (DAQ-System) mit hoher Messrate und Echtzeit-Zyklenzahlmittelung, sehr schnell sowohl dynamische als auch gemittelte genaue Drehmomentmessungen zu erzielen.

## 2 Prüfungen mit dynamischer Belastung

Abbildung 2 stellt das Drehmoment für eine hochdynamische Prüfung eines Motors mit 5.000 min<sup>-1</sup> dar, anfangs mit 0 Nm, gefolgt von einem Belastungsschritt auf 70 Nm. Die elektrischen Kenndaten reagieren sehr schnell. Das rote Signal ist ein Drehmoment mit hoher Bandbreite, das blaue Signal ist ein mit 10 Hz gefiltertes Drehmoment, wie es oft bei typischen Drehmoment-Messwellen anzutreffen ist, und das schwarze Signal ist ein auf Basis des Zyklus in Echtzeit gemitteltes Drehmoment mit hoher Bandbreite, das über die gleiche Periodendauer summiert und gemittelt wird wie die Grundresonanzfrequenz des Stroms. Das rot dargestellte dynamische Drehmoment zeigt deutlich eine dynamische Spitze bis 105 Nm, auf die ein Tal bis hinunter auf 35 Nm folgt. Für die Wahl des korrekten Nennbereichs des Drehmomentaufnehmers muss das dynamische Drehmoment berücksichtigt werden. Je nach Kennlinie der elektrischen Maschine kann das Spitzendrehmoment auf das 2- bis 3-Fache des Drehmoments bei Nenndrehzahl dieser Maschinen geschätzt werden. Der Motorregler reagiert auf den Belastungsschritt und benötigt einige Zeit für die mechanische Dämpfung und die Einschwingzeit der Regelung. Insgesamt dauert es etwa 1/10 Sekunde, bis sich das System eingeschwungen hat. Noch wichtiger ist, dass das Drehmoment dabei ca. 50 % höher als der Mittelwert ist. Das ist eine sehr wertvolle Information, wenn festgestellt werden soll, was im Motor tatsächlich vor sich geht. Um mit einem Drehmomentaufnehmer eine hohe Drehmomentgenauigkeit zu erzielen, muss das Gerät selbstverständlich sehr gute technische Daten für den gesamten Messbereich des Aufnehmers bieten, beispielsweise für Linearität einschließlich Hysterese und Temperaturkoeffizient des Nullsignals TK0. Im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen ist dies genau das, was der Fahrzeuginsasse während der Fahrt wahrnimmt. Wenn man weiß, wie sich das Drehmoment tatsächlich verhält, können Verbesserungen zur Optimierung seiner Regelung vorgenommen werden. Außerdem ist zu beobachten, dass das Drehmoment im späteren Bereich der Zeitachse eine Welligkeit zyklischer Art aufweist. Dies wird als Pendelmoment bezeichnet und kann mithilfe eines Drehmomentaufnehmers mit hoher Bandbreite und hoher Genauigkeit sichtbar gemacht werden.



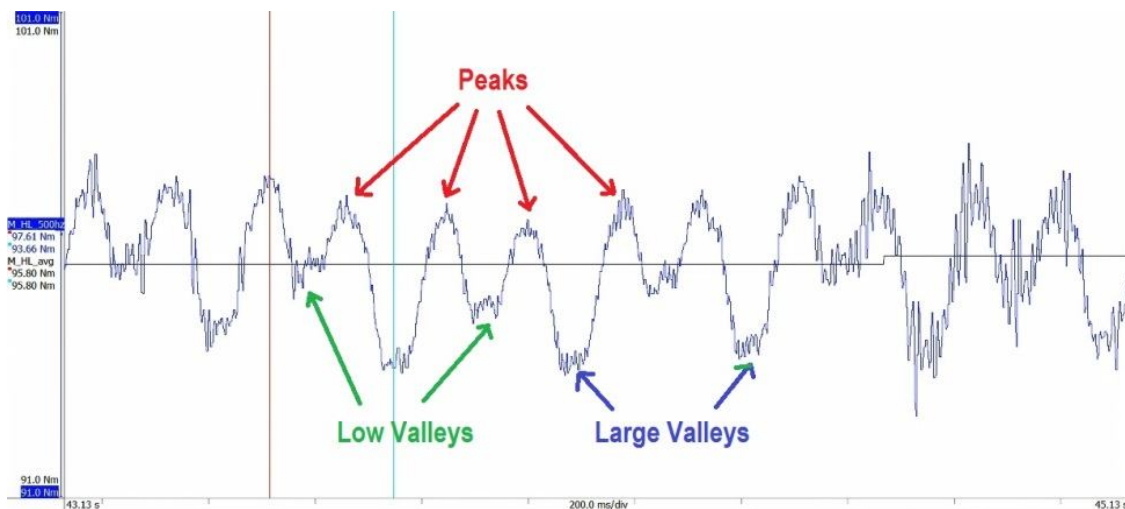
**Abbildung 2 – Drehmoment in einer hochdynamischen Motorprüfung von 0 Nm auf einen Belastungsschritt von 70 Nm**

Die Anzeige des dynamischen Drehmoments liefert entscheidende Informationen, wann genau das Drehmoment angreift. Mit Filtern ausgestattete Systeme haben eine Phasenlaufzeit, hier zu sehen an der Verzögerung zwischen dem roten Signal mit voller Bandbreite und dem blauen gefilterten Signal. Die Anstiegszeit wird durch den niedrigen Filterwert ebenfalls verzögert, und die gesamte Dynamik geht verloren. Letzten Endes kommt die Kurve auf den gleichen Wert wie der auf Basis des Zyklus bestimmte Drehmoment-Mittelwert, doch von der Dynamik des Pendelmoments ist nichts zu sehen. Dies ist ein viel langsames Signal, das die gesamte Dynamik verliert und bewirkt, dass zum Prüfen deutlich mehr Zeit benötigt wird.

Das auf Basis des Zyklus gemittelte Drehmomentsignal ist nahezu sofort auf dem vorgegebenen Wert. Möglich ist dies dank der Verwendung eines geeigneten zeitlichen Mittelwertes aller Punkte, die gleichermaßen höher und niedriger als der Mittelwert sind, und zwar auch während der Einschwingzeit. Damit erhält man einen zuverlässigen Zahlenwert für eine Wirkungsgradanzeige, bekommt aber keine Vorstellung von der Dynamik. Da der berechnete Mittelwert auf dem Zyklus basiert, ist dies selbst bei dynamischen Prüfungen eine sehr genaue Lösung, allerdings bleibt auch hier die Dynamik außer Acht. Die Verknüpfung von gemitteltem Wert und Momentanwert machen den Drehmomentaufnehmer mit hoher Bandbreite in Kombination mit einem DAQ-System mit Echtzeitmittelung über der Zyklenzahl zu einem äußerst leistungsfähigen Werkzeug, um sowohl die Dynamik als auch die Mittelwerte eines elektromechanischen Systems zu verstehen, insbesondere während Belastungsschritten.

### 3 Pendelmoment

Ein Pendelmoment tritt bei Synchronmotoren mit Permanentmagnet auf und entsteht durch die nicht sinusförmige Flussdichteverteilung um den Luftspalt und dessen durch die Verteilung der Ständermuten bedingten veränderlichen magnetischen Widerstand (Reluktanz). Die Einflüsse eines Pendelmoments sind unerwünscht und ändern sich periodisch mit der Läuferlage, denn sie führen zu Drehzahloszillationen, welche die Leistungsfähigkeit der Maschine verschlechtern. Darüber hinaus kann ein Pendelmoment den mechanischen Antriebsstrang anregen und dadurch unerwünschte akustische Geräusche und Schwingungen erzeugen.



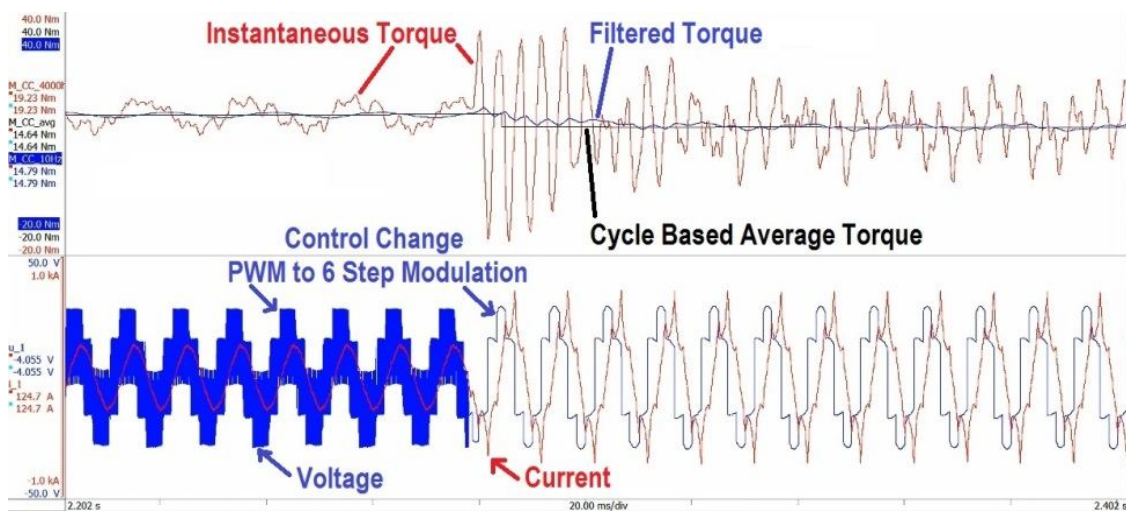
**Abbildung 3 – Der Geometrie der Maschinenmagnete entsprechende Rastmomentkurve**

Abbildung 3 zeigt das Rastmoment, das durch die Magnete einer Maschine verursacht wird. Bei dieser Prüfung wurde ein Motor mit niedriger Drehzahl betrieben und auf unterschiedlichen Stufen belastet. Bei dieser konkreten Prüfung waren die Beobachter ganz begeistert, dass bei einem Drehmoment von 100 Nm eine durch die Maschine verursachte Welligkeit von 2 Nm erkennbar war, was in diesem Fall 2 % des Nennmoments entspricht. Voraussetzung für eine erfolgreiche Drehmomentmessung ist ein Aufnehmer mit hoher Genauigkeit und Auflösung, insbesondere wenn auch konstruktive Faktoren im Zusammenhang mit dem Nenn- und dem maximalen Spitzenmoment der elektrischen Maschine berücksichtigt werden. Zu erkennen ist ein ausgeprägtes Muster aus Spitzen sowie flachen und tiefen Tälern. Wenn man die Kurve mit der Geometrie der Maschine vergleicht, fällt auf, dass das Muster im Grunde genommen gleich wie die Form der Magnete in der Maschine ist. Dies kann für die Festlegung der Arbeitsweise der Regelung hilfreich sein, oder um festzulegen, welche Betriebsbereiche je nach Anwendungsfall der Maschine zu vermeiden sind. Diese Welligkeit ist von Lastpunkt zu Lastpunkt unterschiedlich. Im Fall von Elektrofahrzeugen würde man ein Betrieb in einem Bereich mit hoher Welligkeit vermeiden, wenn der Fahrer dies auf der Ausgangsseite als unruhigen Lauf spürt.

### 4 Regelungsänderung

In Abbildung 4 schaltet das System von einer Pulsweitenmodulation (PWM) auf eine sechsstufige Modulation um, was im unteren Bereich sehr schön zu sehen ist. Die blaue PWM-Spannung hat einen ruckfreien, sinusförmigen Strom, dann erfolgt eine Regelungsänderung, und der Strom wird zackiger. Im oberen Bereich ist der Momentanwert des Drehmoments rot dargestellt, das mit 10 Hz gefilterte Drehmoment blau und der Mittelwert über den Zyklus schwarz. Vor der Änderung der Regelung weist der Momentanwert des Drehmoments (rot) ein signifikantes zyklisches Pendelmoment in der Größenordnung von 9 Nm von Spitze zu Spitze auf. Zu sehen ist auch, dass das Drehmoment mit dem Strom gleichphasig ist, das gefilterte Drehmoment (blau) weist jedoch sowohl eine verringerte Amplitude als auch eine Phasenlaufzeit von etwa 90 Grad auf. Die Amplitudendifferenz

macht nur noch eine Welligkeit von 1 Nm von Spitze zu Spitze aus. Dies entspricht ganz offensichtlich nicht dem, was tatsächlich in der Maschine vor sich geht. Nachdem die Änderung erfolgt ist, hat der Momentanwert des Drehmoments 20 ms lang eine Welligkeit von 50 Nm. Wenn man sich das gefilterte Drehmoment (blau) oder gar seinen auf dem Zyklus basierenden Mittelwert (schwarz) ansieht, dann vermitteln diese beiden Werte während der Änderung ein ziemlich statisches Bild. Bei den Momentanwerten treten allerdings Umkehrmomente und potenzielle Laststöße auf. Das macht sich sehr drastisch bemerkbar. Nachdem sich das Drehmoment in einen zyklischen Bereich eingeschwungen hat, liegt die Welligkeit immer noch in der Größenordnung von 25 Nm in der Spitze, während der Mittelwert irgendwo bei rund 11 Nm liegt. Wenn man sich den auf dem Zyklus basierenden Mittelwert des Drehmoments ansieht, stellt man fest, dass er sehr schnell reagiert. Das auf Basis des Zyklus gemittelte Drehmoment ist deutlich schneller als der gefilterte Wert. Im Gegensatz zum gefilterten Wert hat es keinen zyklischen Verlauf und benötigt daher für die Mittelung keine längere Zeitspanne, sondern nur eine Anzahl von Zyklen.



**Abbildung 4 – Drehmoment während einer Regelungsänderung von PWM- zu sechsstufiger Modulation**

## 5 Fazit

Konstruktionsbedingte Faktoren der elektrischen Maschine, die z. B. das Verhältnis vom maximalen Spitzendrehmoment zum Nennmoment betreffen, haben Auswirkungen auf die Wahl des Nennmoments eines Drehmomentaufnehmers, das 2- bis 3-mal höher sein kann. In Kombination mit dem unerwünschten Pendelmoment im Signal, das nur wenige Prozent des Nennmoments an einem bestimmten Lastpunkt ausmacht, ist offensichtlich, dass der verwendete Drehmomentaufnehmer über eine sehr gute Genauigkeit und Auflösung verfügen muss, um die für eine Untersuchung benötigten Informationen zu liefern.

Für dynamische Prüfungen muss das Drehmoment als Momentanwert mit einer hohen Messbandbreite des Signals gemessen werden, um die vom System bereitgestellten Informationen in vollem Umfang zu gewinnen. Das System eDrive von HBM, das aus den HBM-Drehmomentaufnehmern T40B oder T12HP und dem DAQ-System Genesis HighSpeed besteht, versetzt Anwender in die Lage, sowohl mechanische als auch elektrische Signale auf einer gemeinsamen Zeitbasis zu erfassen.

Damit ist es möglich, zu verstehen, wie sich die PWM-Signale des Inverters als Eingangswerte der elektrischen Maschine auf den Ausgangswert des mechanischen Drehmoments und zugehörige Schwingungen auswirken. Die Abtastung mit eDrive erfolgt mit einer ausreichend hohen Messrate, die die volle Bandbreite des Sensors erfasst. Wenn die volle Bandbreite zur Verfügung steht, wird nicht nur sehr schnell ein Mittelwert der Drehmomentmessung geliefert, sondern dies ermöglicht auch die Betrachtung von Transienten und Pendelmomenten.