

WHITE PAPER

Herausforderungen beim Testen der Triebwerke und Inverter von Elektroflugzeugen und stärker elektrifizierten Flugzeugen

EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren hat das Interesse an Elektroflugzeugen und stärker elektrifizierten Flugzeugen zugenommen; dazu zählen sowohl neuartige vollelektrische Flugzeuge, Drohnen, Starrluftschiffe als auch traditionelle Flugzeuge mit effizienteren und stärker elektrifizierten Komponenten. Die Validierung dieser Systeme und Komponenten ist aufgrund der Art der Luft- und Raumfahrttests sowie der hohen Raffinesse der Systeme mit Herausforderungen verbunden. Tests in der Luft- und Raumfahrt erfordern strenge Zuverlässigkeitstests und die Validierung aller elektrischen und mechanischen Systeme, bevor Flugzeuge und Komponenten für den Luftverkehr freigegeben werden. Viele der Technologien, die dieses hohe Maß an Zuverlässigkeit ermöglichen, schaffen auch neue technische Herausforderungen sowohl hinsichtlich der Konstruktion als auch der Messung. Die Verwendung vieler Triebwerke oder von Triebwerken mit höherer Phasenzahl führt zu einer höheren Komplexität als bei Anwendungen am Boden. In diesem Artikel werden einige der Herausforderungen bei Tests von Elektroflugzeugen erläutert und es wird erklärt, wie das eDrive-System von HKB zur Bewältigung dieser Herausforderungen beiträgt; dazu zählen Prüfstands Aufbau, Tests mit hoher Komplexität, Messung von Hochfrequenzleistung, elektromechanische Tests und Hochvolttests.

Der eDrive-Leistungsanalysator von HKB bietet einzigartige Funktionen, die ihn zu einem idealen Messsystem für die Entwicklung und Validierung des Antriebsstrangs von Elektroflugzeugen machen. Die eDrive-Lösung reduziert die Testkomplexität, ermöglicht Benutzern schnelleres Testen und bietet ein hohes Maß an Rückführbarkeit der Tests. Dazu werden kontinuierliche Daten für eine große Anzahl elektrischer und mechanischer Kanäle aufgezeichnet und die Daten dann in Echtzeit verarbeitet, um Leistungs- und Wirkungsgradberechnungen durchzuführen.

FÜR DIE BEWERTUNG EINES ELEKTRISCH BETRIEBENEN PROPELLERS ERFORDERLICHE MESSUNGEN

Viele frühe Beispiele für vollelektrische Antriebe verwenden einen oder mehrere Elektropropeller als Hauptantriebsquelle. Während viele den elektrischen Antrieb als neuartige Transportmethode betrachten, möchten andere den Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren analysieren. Dazu müssen Unternehmen einen sehr hohen Wirkungsgrad für den gesamten Antriebsstrang ihres Flugzeugs ausweisen. Der maximale Wirkungsgrad wird darüber hinaus auch angestrebt, um die vermarktete Reichweite des Fahrzeugs zu erhöhen. Das Ausweisen eines Gesamtwirkungsgrads und das Vertrauen in diese Zahl für einen Flug über eine bestimmte Strecke erfordert umfassende Tests an allen Komponenten im Antriebsstrang. Bei einem Elektropropeller umfasst dies einen oder mehrere Inverter, Motoren und Propeller.

Der elektrische Antriebsstrang für diese Antriebsart ist in Abbildung 1 zu sehen. Es gibt eine elektrische Energiequelle, die einen Wechselrichter mit Spannung und Strom versorgt. Der Wechselrichter nimmt Wechselstrom oder Gleichstrom auf und wandelt ihn in Wechselspannung und -strom mit variabler Frequenz um. Während Wechselstrom für Automobil- und Industrieanwendungen häufig 3 Phasen aufweist, ist es in der Luft- und Raumfahrt zunehmend üblich, dass dies aus Gründen der Redundanz 6, 9 oder mehr Phasen sind. Dieser n-Phasenstrom versorgt eine elektrische Maschine, die Drehmoment und Drehzahl erzeugt, um einen Propeller zu drehen. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems sowie jeder der Einzelkomponenten erfordert die Messung aller oben aufgeführten Parameter.

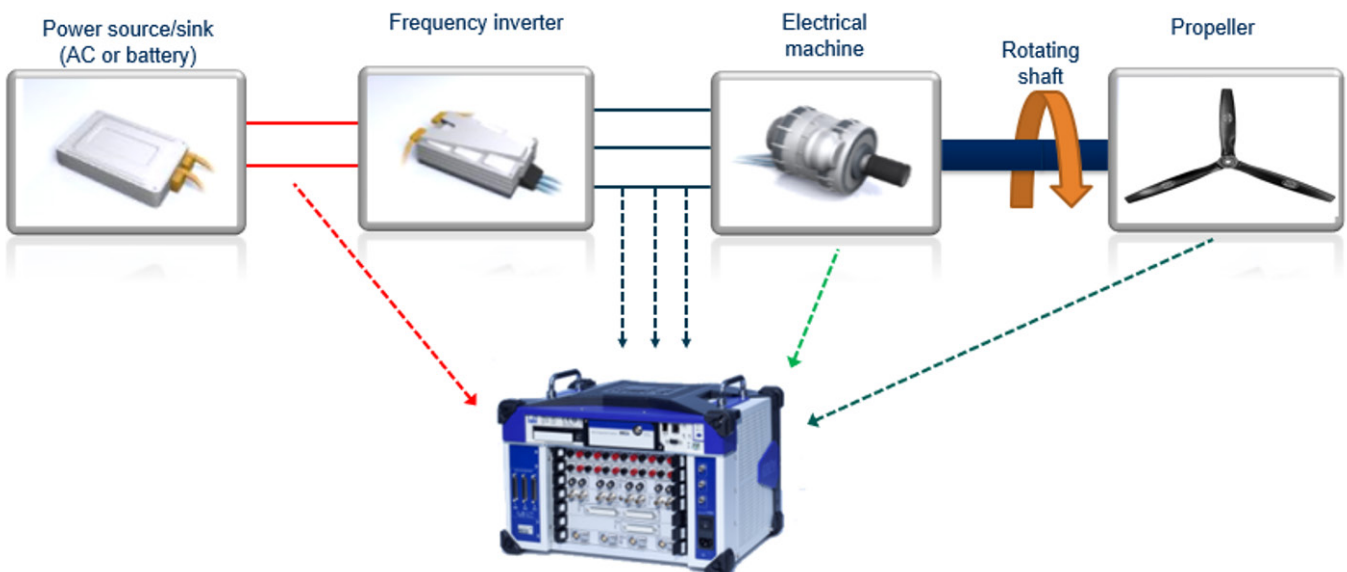


Abbildung 1: Komponenten in einem Prüfstand für Elektropropeller

Der Wirkungsgrad des Propellers erfordert eine Messung von Schub (Kraft) und Luftbewegung zur Berechnung der Propellerleistung. Diese Messungen erfolgen zusätzlich zu den in einem Standard-Elektromotortest durchgeführten Messungen von Drehmoment, Drehzahl, Spannungen und Strömen, was ein Messsystem vor Herausforderungen stellt, da viele Systeme für die genaue Messung von elektrischer oder rotatorischer Leistung die zusätzlichen, für Berechnungen des Propellerwirkungsgrads erforderlichen Signale nicht erfassen können. Dies in einer durchgängigen Messkette mit einem einzigen Gerät zu messen, liefert aufgrund der Laufzeitkorrektur aller Signale die genauesten Ergebnisse.

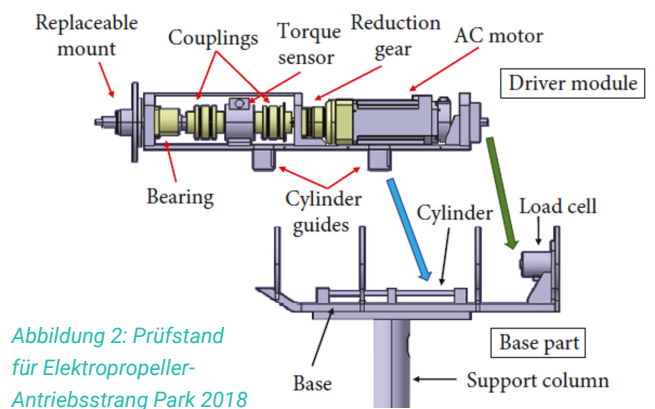


Abbildung 2: Prüfstand für Elektropropeller-Antriebsstrang Park 2018

Flexibilität und die Fähigkeit, eine Vielzahl von Tests durchzuführen, werden bei der Planung eines Prüfstands bevorzugt. Eine vollständige Validierung des elektrischen Antriebsstrangs wird wahrscheinlich eine herkömmliche Motorvalidierung umfassen, die aus einem Prüfstandtest besteht, aber auch die Validierung des Gesamtwirkungsgrads des Propellers, d.h. des Propellers und anderer mechanischer Komponenten. Der vorgeschlagene Prüfstand in Abbildung 2 soll einen vollständigen Propellerwirkungsgradtest durchführen; es wäre jedoch auch eine Kopplung mit einer herkömmlichen Belastungsmaschine für eine eingehende Motor-/Wechselrichteranalyse möglich. Der Prüfstand besteht aus einer starren Tragkonstruktion zur Montage des Antriebssystems, einer Wägezelle zur Messung des Schubs, dem Motorsystem, einem Drehmomentsensor, Kupplungen und Montagewinkeln und einer Befestigung für entweder einen Propeller oder eine Belastungsmaschine. Dieser Prüfstand hätte externe Sensoren für n-Phasen-Ströme, die direkte Messung von Spannungen und einen externen Sensor für die Luftbewegung. Er könnte leicht um zusätzliche Sensoren für Temperatur, Schall oder Schwingungen erweitert werden. Wie in Abbildung 1 gezeigt, würden diese Sensoren für einfache und gut organisierte Tests direkt in ein einziges eDrive-System integriert.

TESTVERFAHREN FÜR ELEKTROPROPELLER

Tests von Elektropropellern umfassen die Charakterisierung des gesamten Betriebsbereichs des Antriebsstrangs zur angemessenen Charakterisierung des Wirkungsgrads, was bedeutet, dass der gesamte Flugzyklus eines Propellers korrekt charakterisiert werden muss, um eine genaue Zahl für den Bereich zu erhalten. Das Flugzeug muss zudem mit möglicherweise während des Flugs auftretenden Störungen und Ausfällen umgehen können. Zur Charakterisierung dieser unterschiedlichen Wirkungsgrade und Bedingungen umfassen die Tests Ereignisse wie Starten der Triebwerke, Abheben, stabiler Zustand und mögliche Störungen. Jeder dieser Zustände betrachtet unterschiedliche Werte. Beim Triebwerksstart wird die Dynamik der Maschine einschließlich Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme untersucht. Für den stabilen Zustand wird der Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Luftdichten bewertet, wobei Störungen bewältigt werden können. Bei Ausfalltests wird untersucht, was genau passiert ist, ob und warum das System während des Ausfalls funktioniert hat.

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für einen Test, bei dem alle diese Zustände in einem Elektropropellertest berücksichtigt wurden. Der Propeller beginnt sehr nichtlinear, wie die nichtlineare Leistung zu Beginn des Tests zeigt. Dann arbeitet er eine Zeit lang in einem stabilen Zustand, bevor er eine Störung bewältigen muss. Die Störung wird durch das Abfallen aller drei Kräfte angezeigt. Der Test endet mit einem Ausfall, der zu einer Abschaltung des Propellers führt.

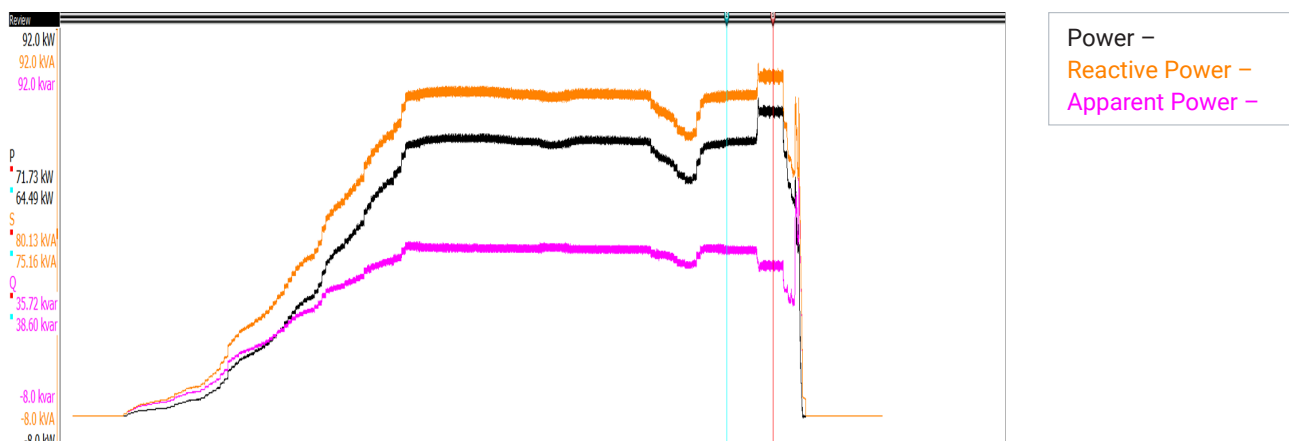


Abbildung 3: Dynamischer Propellertest mit Triebwerksstart, stabilem Zustand, Störung und Ausfall

Dies ist ein wertvoller Test für Ingenieure, da er eine kontinuierliche Messung sowohl der Rohsignale als auch der Leistungspegel über mehrere Minuten zeigt. Ingenieure erhalten die genauen Leistungswerte für Steuerungsereignisse wie Triebwerksstart und Störung und können so ihr System mit einer realen Last kalibrieren und abstimmen. Dynamische Leistungsdaten ermöglichen es Ingenieuren, den Wirkungsgrad während eines Fluges zu verstehen. Schließlich können Ingenieure anhand der Daten für einen Ausfall sowie des Zeitraums bis zu seinem Eintreten, Probleme diagnostizieren und beheben.

Die Möglichkeit, all diese Tests mit einem System durchzuführen, das simultan alle Daten für elektrische und mechanische Signale exakt aufzeichnet, wird das Testverfahren erheblich vereinfachen. Die Charakterisierung des Gesamtsystems und der dynamischen Leistung ist aufgrund der Art der Leistungsmessungen nicht so einfach wie zunächst gedacht. Leistungsmessungen, insbesondere für den Wirkungsgrad, müssen Mittelwerte sein, die im gleichen Zeitrahmen wie die Wechselstromwellen vom Wechselrichter vorgenommen werden. Um dies zu erreichen, müssen alle mechanischen und elektrischen Daten auf einem Zeitstempel erfasst und über denselben Zeitraum gemittelt werden. Dies wird später näher besprochen.

Diese Arten von Tests auf Systemebene ermöglichen das Verständnis des Zusammenspiels auf Systemebene und liefern die richtigen Informationen für Optimierungen und Designänderungen auf Komponentenebene.

Zusätzliche Herausforderungen bei Tests auf Systemebene sind der Wirkungsgrad mehrerer Maschinen, die Steuerung mehrerer Maschinen und die Charakterisierung von Temperaturen und Schwingungen, wodurch sich die Testanforderungen um eine Vielzahl von Eingaben und Berechnungen erhöhen. Das eDrive-System ermöglicht es Benutzern, all diese Signale über einen längeren Zeitraum kontinuierlich zu messen, was die Entwicklung beschleunigt und die Testeinrichtung vereinfacht.

EINFACHE SOFTWARE-EINRICHTUNG UND -KONFIGURATION FÜR SYSTEMTESTS

Neben einer Vielzahl von Signalen zur Messung des Antriebs von Elektroflugzeugen gibt es auch Szenarien mit einer Vielzahl von Maschinen oder Maschinen mit höherer Komplexität wie Getriebestufen oder redundante Wechselrichter. Die Einrichtung eines Tests mit einem höheren Grad an Komplexität kann einen großen Integrationsaufwand erfordern, sowohl für Hardware als auch für Software, im Fall herkömmlicher Systeme. Neben der Messung großer Kanalzahlen und verschiedener Signale verfügt das eDrive-System über eine ausgefeilte Software zur Vereinfachung der Einrichtung und Visualisierung.

Eine Drohne ist ein Beispiel für ein komplexes System mit vier oder mehr Motoren und Wechselrichtern mit jeweils einer Reihe von Spannungen und Strömen, die unabhängig voneinander arbeiten. Jeder Motor/Wechselrichter hat seinen eigenen Wirkungsgrad, trägt jedoch auch zum Wirkungsgrad eines Teilsystems sowie zum Gesamtsystem-Wirkungsgrad bei. Dies bringt Herausforderungen mit sich, da es sich um einen einzigartigen, nicht für den universellen Einsatz gedachten Antriebsstrang handelt. Über die reine Messung hinaus möchten Benutzer möglicherweise eine grafische Darstellung des Antriebsstrangs, die sie Managern oder Kunden zeigen können.

Das eDrive-System geht diese Probleme an, indem es große Kanalzahlen auf eine einzelne Datenerfassungseinheit überträgt, und verfügt über die Software-Oberfläche „eDrive Creator“, mit der Benutzer eine einzigartige Antriebsstrangkonfiguration erstellen können. Dazu gehören Drag & Drop-Blöcke, die die Antriebsstrangkomponente, Ein- und Ausgänge sowie die zu berechnenden Wirkungsgrade definieren. Dies vereinfacht die Analyse komplexer Setups mit vielen Leistungsstufen oder Leistungsgeräten. Der eDrive Creator erstellt automatisch die Leistungs- und Wirkungsgradgleichungen für die Berechnung in Echtzeit. In Systemen mit vielen Kanälen wird dies den Aufwand für die Hardware- und Softwarekonfiguration verringern und die Nachbearbeitungszeit verkürzen.

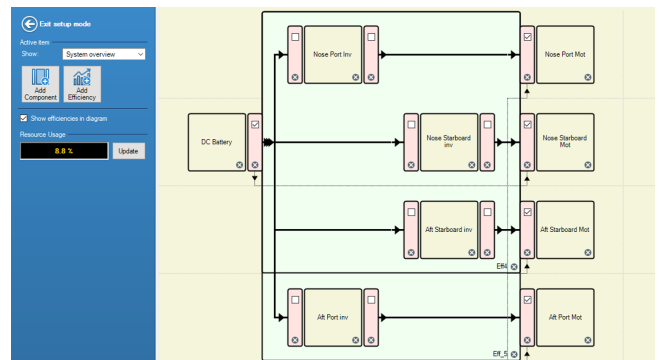


Abbildung 4: Grafische Darstellung eines großen Testaufbaus für eine 4-motorige Drohne im eDrive Creator

Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für einen Testaufbau für eine batteriebetriebene Drohne mit vier Elektropropellern, die zur Untersuchung von Reglerfunktion und -wirkungsgrad instrumentiert wurde. Die Batterieleistung der Drohne wird an vier Wechselrichter gesendet und wandelt die Gleichspannung in Wechselstrom für vier Motoren um. In diesem Test wollten die Ingenieure Leistung und Wirkungsgrad während einer Drohnenstartsequenz charakterisieren. Dazu mussten sie die Leistung und den Wirkungsgrad jedes Wechselrichter-/Motorpaars sowie den Gesamtsystem-Wirkungsgrad messen. Das eDrive Creator-Fenster zeigt jede Antriebsstrangkomponente, ihren Namen und den Gesamtsystem-Wirkungsgrad an, was dem Benutzer ein einfaches Feedback bietet. Wenn ein Benutzer auf einen oder mehrere der Blöcke klickt, sieht er einen Anzeigebereich, in dem er die einzelnen Signale für diese Komponente anzeigen kann.

Abbildung 5 ist ein Beispiel für den Start eines Quadcopters, bei dem ein Motor nicht funktioniert. Wir sehen, dass die Effektivspannung und der Strom für 3 der Kanäle ansteigen. Zwei der Propeller sind mit einer gewissen Dynamik stabil und der dritte ist sehr dynamisch, um den ausgefallenen Motor auszugleichen. Tests wie diese geben Aufschluss darüber, wie eine Systemsteuerung während des normalen Betriebs oder eines Ausfalls funktioniert.

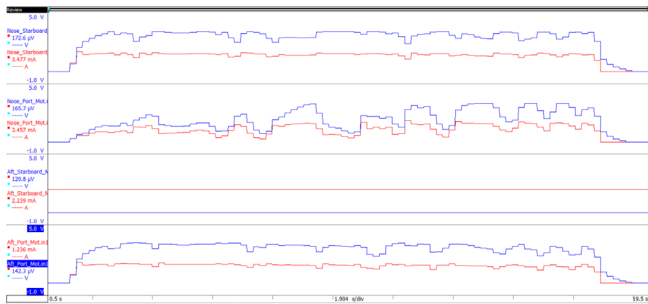


Abbildung 5: Grafische Anzeige von Effektivspannungen und -strömen für vier Drohnen-Propellermotoren während eines Tests

Komplexe Tests wie der Quadcopter erfordern wie jeder andere Test Visualisierungen und Aufzeichnungen. Sobald eine Konfiguration festgelegt wurde, werden die Gleichungen im System konfiguriert und während des nächsten Tests ausgeführt. Alle aufgezeichneten Daten und berechneten Echtzeitdaten werden gespeichert, solange Festplattenspeicher vorhanden ist. Damit können Nutzer vollständige Tests beispielsweise für die Systemdynamik ausführen und anzeigen, ganz ohne Datenverluste oder Trigger-Ereignisse.

Diese Displays geben dem Benutzer in Echtzeit Feedback zu den Geschehnissen in seinem Test und die Möglichkeit, nach Abschluss des Tests diesen zu überprüfen und zu validieren. Diese Funktion ist in der eDrive-Software enthalten und ermöglicht es Benutzern, Testkonfigurationen häufig zu ändern, ohne großen Aufwand in die Neukonfiguration von Testcomputern stecken zu müssen.

VISUALISIERUNG UND RÜCKMELDUNG VON DATEN IN ECHTZEIT

Die Visualisierung und Speicherung berechneter Daten in Echtzeit ist für zeitgemäße Tests eine Notwendigkeit. Aus diesem Grund verwendet das eDrive-System eine Echtzeit-Formeldatenbank (RTFDB), die alle Gleichungen in diskreter Zeit auf einem DSP ausführt. Nach Ausführung der Berechnungen für Leistung, Wirkungsgrad, Regelung und anderer Berechnungen in Echtzeit, werden diese gespeichert und stehen zur Visualisierung und Rückmeldung zur Verfügung. Somit wird die Analysezeit nach dem Prozess minimiert, Anzeigeverzögerungen vermieden und eine Rückmeldung an Automatisierungssysteme für vollautomatische Tests oder HIL-Simulationen ermöglicht.

Im obigen Beispiel kann der Wirkungsgrad des Propellers direkt aus Messungen oder aus einer Kombination von Berechnungen und Messungen entnommen werden. Die Echtzeit-Formeldatenbank verwendet Sensoreingänge, Konstanten und Gleichungen, um beliebige Werte anzuzeigen und aufzuzeichnen. Der Nutzer kann auf den DSP zugreifen, um seine eigenen benutzerdefinierten Echtzeit-Berechnungen zu definieren. Dies ermöglicht zusätzlich die Übertragung der Testdaten über den EtherCAT- oder CAN-Bus für eine Echtzeit-Rückmeldung an ein Automatisierungssystem. Das Echtzeit-Feedback in einem Teststand ermöglicht es dem Nutzer, die Vielzahl der oben aufgeführten Tests sowie HIL zu demonstrieren und durchzuführen.

In Kombination mit der gemessenen rotatorischen Leistung, der elektrischen Wechselstromleistung und der elektrischen Gleichstromleistung kann ein Techniker den Wirkungsgrad eines Gesamtsystems oder der einzelnen Komponenten mit einem Test und einem System untersuchen.

LEISTUNGSTESTS MIT HOHER RESONANZFREQUENZ

In der Elektrifizierung gibt es einen Trend zu höheren Polzahlen und höheren Resonanzfrequenzen, die eine Herausforderung für Leistungsmessungen darstellen, da bisherige Messgeräte auf 50-60 Hz abgestimmt und ausgelegt wurden. Dies reicht für viele Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt mit Hunderten von Hz oder kHz nicht aus. Das eDrive-System löst dieses Problem der Messung hoher Resonanzfrequenzen mit dem Zykluserkennungs-Algorithmus, der Grundfrequenzen im Bereich von 10 kHz verarbeiten kann. Die zyklusweise Erfassung der Messungen ermöglicht auch genaue Leistungsberechnungen, selbst wenn sich die Frequenz ändert. Dies ist besonders wichtig für Test von Lüftern, da es in diesem Fall keine Belastungsmaschine gibt, die für gleichbleibende Drehzahl sorgt. Ein Beispiel für einen Test mit höherer Frequenz mit einer variierenden Grundfrequenz ist in Abbildung 6 dargestellt, bei dem sich die Grundfrequenz des Motors zwischen 345 und 350 Hz bewegt.

Der Zykluserkennungs-Algorithmus filtert den Strom im DSP und bestimmt die Nulldurchgangspunkte. Mit diesen Nulldurchgängen wird die Zeit pro Halbwelle bestimmt, die für die Leistungs- und Wirkungsgradberechnungen verwendet wird. Dies erfolgt in Echtzeit auf dem DSP mit der halben Grundfrequenz. Halbwellen-Berechnungen ermöglichen genaue dynamische Tests oder Mittelwerte für sehr hochauflösende stationäre Wirkungsgradmessungen, auch wenn die Grundfrequenz nicht statisch ist.

Das eDrive-System bietet außerdem den zusätzlichen Vorteil, dass alle Momentanwert-Daten aufgezeichnet werden, damit Benutzer sich auf ihre Ergebnisse verlassen und sie bei Bedarf replizieren können. Wenn es Probleme mit dem Test gibt, werden aufgezeichneten Daten als Mittel

zur Fehlerbehebung genutzt und ermöglichen es Benutzern, die Tests in der Software erneut laufen zu lassen, anstatt nochmals Zeit und Ressourcen aufwenden zu müssen, um einen Test zu wiederholen.

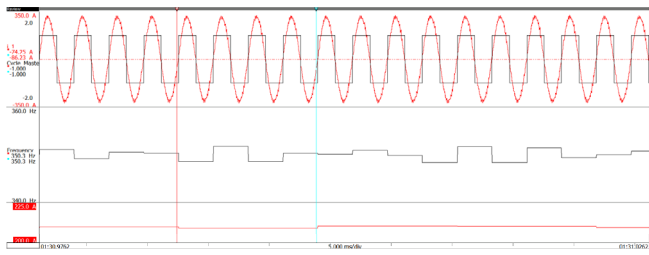


Abbildung 6: Hochfrequente Resonanzfrequenz- und Wirkungsgradmessungen

ELEKTROMECHANISCHE FLUGZEUGTESTS

Die mechanische Leistung kann bei der Prüfung elektrischer Antriebe viele Formen annehmen. Dies können die Schub- und Luftbewegung eines Propellers, die Geräuschemissionen der Maschine oder das Schwingungsmuster des Flugzeugs sein. Zu wissen, wie elektrische Phänomene mit mechanischen Leistungen interagieren, ist von großem Wert für die Entwicklung im Bereich Antriebsstrang, NVH, Zuverlässigkeit und Betriebsfestigkeit. Schwingungen sind eine wichtige Messgröße in Prüfständen für Flugzeugantriebe. Unterschiedliche Drehzahlen und Belastungen führen zu unterschiedlichen Schwingungsanteilen. Die Schalt- und Regelungsstrategie des Wechselrichters beeinflusst zudem die Motorschwingungen, was die Korrelation von Schwingungs-, Drehmoment- und PWM-Signalen umso notwendiger macht.

Beschleunigungssensoren können auch dazu beitragen, festzustellen, welchen Einfluss Ausfälle oder Änderungen der Wechselrichterregelung auf die Struktur des Systems haben werden. Das eDrive-System kann alle Beschleunigungssensoren und andere mechanische Signale aufzeichnen und gleichzeitig eine sehr genaue Leistungsmessung liefern. Aus diesem Grund ist das eDrive-System die richtige Lösung zur gleichzeitigen Durchführung mehrerer Tests.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für einen zu testenden Lüftermotor, das Spannung, Strom, Kraft und Schwingung in einer gemeinsamen Grafik enthält. Dies veranschaulicht gleichzeitig laufende NVH- und Antriebsstrangtests, korreliert für einen Flugzeugtyp-Test. Sowohl NVH- als auch Antriebsstranggruppen haben Zugriff auf vollständige Datensätze, um zu verstehen, warum Probleme auftreten und welche Bedingungen während ihrer Tests bestehen.

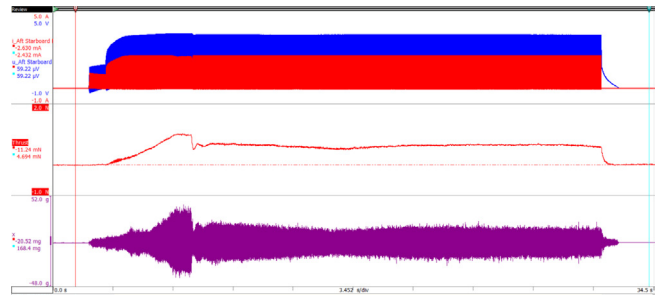


Abbildung 7: Elektrischer Lüftertest mit Messung von Spannung, Strom, Schub und Schwingung

HOHE SPANNUNG

Den Spannungspegel von Systemen zu erhöhen ist aufgrund der Verringerung der Ströme und der damit verbundenen geringeren Verluste attraktiv. Der Nachteil höherer Spannungen ist, dass es Höheneffekte sowie eine Vielzahl von Sicherheitsbedenken gibt. HBK verfügt über langjährige Erfahrung mit der Messung von hoher Spannung und Hochvolt-Transientensignalen im Rahmen großer Projekte im Bereich Schaltgeräte und Blitzstoßversuche. Bedenken hinsichtlich der Sicherheit des Personals, der Gerätesicherheit, der Genauigkeit und von Geräuschemissionen machen diese Tests zu einer großen Herausforderung. Mit verschiedenen, auf dem Spannungspegel basierenden Techniken kann ein eDrive-System diese Messungen sicher und genau durchführen, die wie zuvor diskutiert für Leistungsberechnungen oder die Analyse von Transienten wie Blitzstößen oder Koronaentladungen verwendet werden können. Eins der besonderen Features für hohe Spannung besteht in einer Glasfaserlösung, bei der die Messwerte digitalisiert über Glasfaserkabel an das Datenerfassungssystem übertragen werden. Dies macht das System sicher für den Bediener, die Ausrüstung und bietet eine hohe Störfestigkeit.

FAZIT

Das Testen von Elektroflugzeugen birgt einzigartige Herausforderungen, darunter die Komplexität, die Anzahl der Messungen und die Vielfalt der Signale. Elektroflugzeuge reizen die technologischen Möglichkeiten nicht nur hinsichtlich der Anzahl der Signale aus, sondern auch hinsichtlich der immer höheren Spannungen und Frequenzen. Mit HBK-eDrive können Messungen einfach, schnell und genau durchgeführt werden.

QUELLEN

Park, D., Lee, Y., Cho, T., & Kim, C. (2018). Design and Performance Evaluation of Propeller for Solar-Powered High-Altitude Long-Endurance Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 1–24.