

MODELLBASIERTE ENTWICKLUNG, TEST UND BEWERTUNG VON LAST-MANAGEMENT-ALGORITHMEN FÜR DEN BETRIEB EINER ENERGIEAUTARKEN FLUGZEUG-BORDKÜCHE

R. Doering, F. Thielecke
Technische Universität Hamburg, Institut für Flugzeug-Systemtechnik
Neßpiel 5, 21129 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Viele Systeme an Bord von Verkehrsflugzeugen werden heutzutage elektrisch betrieben. Dies gilt insbesondere für viele nicht-essentielle Systeme im Kabinenbereich, deren Variantenreichtum selbst innerhalb einer Fluggesellschaft erheblich ist. Durch die vollständige oder teilweise Entkopplung dieser Systeme vom elektrischen Bordnetz, kann dieses für kleinere Lasten und somit leichter ausgelegt werden. Die Versorgung der entkoppelten Systeme kann dann durch lokale, für den spezifischen Anwendungsfall ausgelegte Energiesysteme erfolgen. Um deren Potential möglichst optimal nutzen zu können, sollen im Rahmen dieser Veröffentlichung Last-Management-Konzepte modellbasiert entwickelt, getestet und bewertet werden. Als Anwendungsfall dient eine neuartige energieautarke Flugzeug-Bordküche.

1. EINLEITUNG

Eine Vielzahl der Systeme an Bord moderner Verkehrsflugzeuge wird heutzutage mit Hilfe elektrischer Energie betrieben, welche in Triebwerksgeneratoren erzeugt und über das Bordnetz verteilt wird. Neben sicherheitskritischen Verbrauchern wie der Avionik, gilt dies insbesondere für nicht-essentielle Systeme wie das In-Flight-Entertainment System oder die Flugzeug-Bordküchen [1, 2]. Letztere stellen dabei mit beispielsweise 30 kVA Leistungsbedarf die größten elektrischen Einzelverbraucher eines modernen Kurz- und Mittelstreckenflugzeuges dar. Entsprechend groß ist ihr Einfluss auf die Dimensionierung der Triebwerksgeneratoren und des elektrischen Bordnetzes.

Eine Analyse der Betriebsszenarien von Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen zeigt, dass die tatsächlich von den Flugzeugbordküchen benötigte Leistung, je nach Fluggesellschaft und deren Geschäftsmodell, großen Schwankungen unterliegt. Während Netzwerkfluggesellschaften häufig die komplette installierte Leistung nutzen, verzichten Billigfluggesellschaften mitunter gänzlich auf den Betrieb einer Flugzeugbordküche. Ein für solche Anwendungsfälle stark überdimensioniertes elektrisches System ist die Folge.

Die Entkopplung der Flugzeug-Bordküchen vom elektrischen System des Flugzeuges würde es erlauben, dieses für geringere Lasten und somit leichter zu dimensionieren. Zum Betrieb der Flugzeug-Bordküche wäre dann ein lokales, dem jeweiligen Betriebsszenario angepasstes, Energieversorgungssystem erfor-

derlich. Realisiert werden könnte ein solches lokal-elektrisches Energieversorgungssystem unter anderem durch innovative und umweltfreundliche Lösungen, wie z.B. einem hybriden Brennstoffzellensystem. Solche Systeme nutzen zur Leistungserzeugung Brennstoffzellen, in denen durch eine elektrochemischen Reaktion aus Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie erzeugt wird. Zur temporären Energiespeicherung verfügen sie darüber hinaus über eine Batterie [3].

Da es sich bei der zu versorgenden Flugzeug-Bordküche und ihren Verbrauchern um ein nicht-essentielles System handelt, ist es nicht erforderlich, einen solchen System hinsichtlich einer theoretisch möglichen Maximalbelastung auszulegen. Vielmehr kann durch den Einsatz von Last-Management-Algorithmen eine Reduktion der maximalen Lastanforderung erreicht und somit eine kleinere und leichtere Systemlösung realisiert werden.

Die vorliegende Veröffentlichung befasst sich mit der modellbasierten Entwicklung, dem Test und der Bewertung solcher Algorithmen. In Kapitel 2 sollen daher Grundlagen und Konzepte für ein Flugzeugbordküchen-Last-Management erläutert und zwei mögliche Last-Management-Algorithmen (kurz: LM-Algorithmen) vorgestellt werden. Kapitel 3 befasst sich mit der Modellierung und der Systemautomation eines hybriden Brennstoffzellensystems sowie der einzelnen Verbraucher der Flugzeug-Bordküche. Abschließend werden in Kapitel 4 die LM-Algorithmen mit Hilfe der Modelle simulationsbasiert getestet und die Ergebnisse diskutiert.

2. LAST-MANAGEMENT

Der zunehmende Anteil elektrischer Verbraucher am Sekundärenergieverbrauch moderner Flugzeuge hat in der Vergangenheit zu einem deutlichen Anstieg der installierten elektrischen Leistung geführt [2]. Die zur Versorgung der Verbraucher erforderlichen Generatoren und Leitungen tragen somit neben den Verbrauchern selbst zu einem signifikanten Anteil zum Gewicht der Systeme eines Flugzeuges bei. Da ihre traditionelle Auslegung auf der Summation der zu erwartenden maximalen Leistungsanforderungen pro Flugphase basiert, sind sie darüber hinaus häufig gänzlich oder zumindest für den Großteil einer Flugmission überdimensioniert. Aus dem beschriebenen Grund gibt es bereits seit einiger Zeit Überlegungen, temporäre Lastspitzen im elektrischen Netz durch LM-Algorithmen abzumildern. Durch die so ermöglichte Reduktion der maximalen Generator- und Verteilerleistung kann das Gesamtgewicht des elektrischen Systems gesenkt werden [4]. Auf Bordküchenebene sind solche Verfahren bereits heute im Einsatz [5].

Je nach flugzeugseitigen Anforderungen sowie technischen und legislativen Voraussetzung können LM-Algorithmen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. SCHROETER unterscheidet dabei drei Arten von LM-Algorithmen:

- reaktive Algorithmen,
- verhandelnde Algorithmen,
- vorhersagende Algorithmen.

Reaktive Algorithmen reagieren lediglich durch Deaktivierung einzelner Verbraucher auf Überlastzustände. Im Falle einer Unterlast erfolgt die erneute Aktivierung von Verbrauchern unter Berücksichtigung der maximal zu erwartenden Last und auf Basis festgelegter Verbraucherprioritäten. *Reaktive* LM-Algorithmen sind vergleichsweise simpel, benötigen lediglich wenige Informationen über Systemgrößen (Last- und Quellströme) und erfordern keine Kommunikation mit den Verbrauchern. Dies macht sie relativ einfach zertifizierbar und setzt verbraucherseitig keine zusätzlichen Funktionalitäten voraus, wodurch Retrofit-Anwendungen ermöglicht werden [4].

Verhandelnde LM-Algorithmen erfordern insbesondere für die Aktivierungsfunktionalität eine bidirektionale Kommunikation zwischen LM-Algorithmus und Verbrauchern. Soll ein Verbraucher aktiviert werden, wird der entsprechende Leistungsbedarf beim LM-Algorithmus angefragt und von diesem, je nach verfügbarer Leistung, ganz oder teilweise bewilligt. Bei hybriden Systemen, wie dem hier betrachteten, kann es darüber hinaus sinnvoll sein, den prognostizierten Energiebedarf des Verbrauchers zu kommunizieren, um die Auswirkung auf den Energiespeicher des

Systems abschätzen zu können. So kann verhindert werden, dass in Folge einer Entladung des Energiespeichers ein Verbraucher kurz nach seiner Aktivierung wieder deaktiviert werden muss. *Verhandelnde* LM-Algorithmen erfordern somit neben entsprechenden Kommunikationsschnittstellen eine Steuerungsfunktionalität und Intelligenz der Verbraucher, welche heutzutage in der Regel nicht vorliegt. Eine Retrofit-Fähigkeit ist somit nicht gegeben. Weiterhin ist für solche LM-Algorithmen im Allgemeinen ein anspruchsvollerer Zertifizierungsprozess zu erwarten, da der Nachweis erbracht werden muss, dass fehlerhafte Verbrauchersignale die Netzstabilität nicht negativ beeinflussen [4].

Vorhersagende LM-Algorithmen nutzen Techniken wie *fuzzy-logic* oder *neuronale Netzwerke*, um Lastentwicklungen vorherzusagen und auf dieser Basis Verbraucher zu de- bzw. aktivieren. Zwar sind sie nicht notwendigerweise auf eine bidirektionale Kommunikation mit den Verbrauchern angewiesen, was prinzipiell eine Retrofit-Fähigkeit ermöglicht, jedoch sind die zugrundeliegenden Algorithmen vergleichsweise komplex, nicht-linear und nicht deterministisch. Eine Zertifizierung solcher LM-Algorithmen erscheint daher schwierig [6].

Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen zwei Arten von LM-Algorithmen entwickelt, implementiert und am Beispiel einer energieautarken Flugzeug-Bordküche getestet werden. Im Hinblick auf einen möglichen Einbau einer energieautarken Bordküche in ein bestehendes Flugzeugmuster, soll dies zum einen ein reaktiver bzw. unidirektionaler Algorithmus sein. Für eine mögliche Flugzeug-Neuentwicklung soll zum anderen ein verhandelnder bzw. bidirektionaler Algorithmus in Betracht gezogen werden, da von diesem eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Leistung des hybriden Brennstoffzellensystems zu erwarten ist. Da es sich bei einer energieautarken Bordküche um ein Inselsystem ohne Schnittstellen zum übrigen elektrischen System des Flugzeuges und darüber hinaus um ein nicht sicherheitskritisches System handelt, können die diskutierten Herausforderungen hinsichtlich einer möglichen Zertifizierung als vernachlässigbar betrachtet werden.

2.1. Unidirektionales Last-Management

Grundprinzip des Last-Managements ist es den Energieerzeuger zum einen vor Überlast zu schützen und zum anderen so viele Verbraucher wie möglich mit elektrischer Energie zu versorgen. Gemäß BILD 1 kennt das hier betrachtete unidirektionale Last-Management die vier Zustände: *kritische Überlast*, *Überlast*, *OK* und *Unterlast*. Durch Messung der Verbraucherströme und Vergleich mit dem verfügbaren Versorgungsstrom des hybriden Brennstoffzellensystems kann der aktuelle Zustand des Last-

Managements bestimmt werden.

Befindet es sich für einen definierten Zeitraum in dem Zustand *Überlast*, werden einzelne Verbraucher von der Versorgung getrennt. Da das betrachtete hybride Brennstoffzellensystem kurzzeitige Überlastzustände tolerieren kann, ist das Verweilen in diesem Zustand für eine kurze Zeitspanne $\Delta t_{\bar{u}}$ zulässig. Dies kann z.B. sinnvoll sein, damit kurzfristig auftretende Lastspitzen in Folge von Einschaltvorgängen einzelner Verbraucher nicht unmittelbar zu einer erneuten Deaktivierung des selbigen führen.

Um das hybride Brennstoffzellensystem vor einer zerstörerischen Überlast zu schützen, existiert zusätzlich der Zustand *kritische Überlast*, dessen Erreichen eine unmittelbare Deaktivierung von Lasten zur Folge hat.

Im Zustand *Unterlast* liegt eine Leistungsreserve des hybriden Brennstoffzellensystems vor, welche zur Verbraucherversorgung genutzt werden kann. Es erfolgt also die Aktivierung von Verbrauchern.

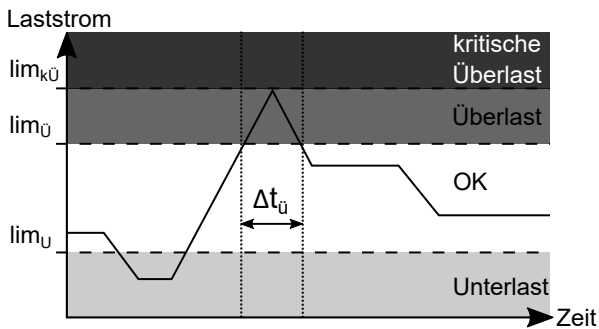


BILD 1. Zustände des unidirektionalen Last-Managements

Im Wesentlichen besteht das unidirektionale Last-Management also aus drei Unterfunktionen:

- Detektion des Lastzustandes,
- Aktivierung von Verbrauchern,
- Deaktivierung von Verbrauchern.

Detektion des Lastzustandes

Die Detektion des Lastzustandes erscheint zunächst trivial. Durch geeignetes Messequipment (BILD 2) kann der Gesamtlaststrom bestimmt werden und mit dem verfügbaren Versorgungsstrom des hybriden Brennstoffzellensystems verglichen werden. Da die Bereitstellung von Energie sowohl durch das Brennstoffzellensystem, als auch durch die verwendete Batterie erfolgen kann, ist die Höhe des verfügbaren Versorgungsstroms in einem hohen Maße von deren Ladezustand (engl.: *state-of-charge*, *SOC*) abhängig.

Sie kann somit nicht als unveränderliche Information im Last-Management hinterlegt werden. Es gilt also:

$$[lim_{k\bar{u}}, lim_{\bar{u}}, lim_U] = f(SOC_{BAT})$$

Befindet sich die Batterie in einem kritischen Ladezustand, so kann diese nicht mehr für die Versorgung der Verbraucher genutzt werden. Ist ihr Ladezustand hoch, kann sie hingegen, je nach Dimensionierung, eine große Anzahl an Verbrauchern mit Energie versorgen. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen den Ladezustand der Batterie unter Berücksichtigung ihrer physikalischen Leistungseigenschaften in vier Intervalle (SOC_{high} , SOC_{med} , SOC_{low} und SOC_{crit}) einzuteilen und diesen entsprechende maximale Versorgungsströme des hybriden Brennstoffzellensystems zuzuordnen.

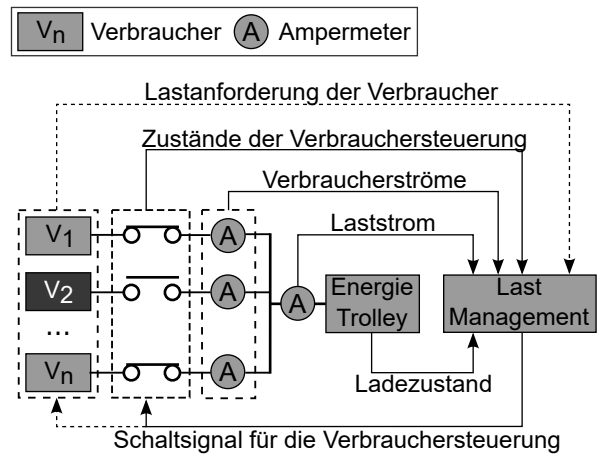


BILD 2. Kommunikationschnittstellen im unidirektionalen (durchgehende Linien) und bidirektionalen Last-Management (durchgehende und gestrichelte Linien)

Deaktivierung von Verbrauchern

Die Deaktivierung von Verbrauchern erfolgt auf Basis zu definierender Prioritäten und unter Berücksichtigung des aktuellen Laststroms. Dies soll verhindern, dass aufgrund der hohen Priorität eines einzelnen Verbrauchers eine Vielzahl kleiner Verbraucher, anstelle weniger großer Verbraucher, deaktiviert wird. Zu diesem Zweck ist eine diagonale Verbraucher-Prioritätsmatrix $P_{Verbraucher}$ zu definieren, in welcher hohe Prioritäten durch niedrige numerische Werte auf der Hauptdiagonalen abgebildet werden. Durch Multiplikation dieser Matrix mit einem Laststromvektor $I_{Verbraucher}$ und Sortierung nach Betrag, können die zu deaktivierenden Verbraucher identifiziert werden. Es gilt:

$$Verbraucher_{deaktivieren} = \max(P_{Verbraucher} \cdot I_{Verbraucher})$$

mit

$$P_{\text{Verbraucher}} = \begin{pmatrix} PV_1 & & & 0 \\ & PV_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & PV_n \end{pmatrix},$$

$$I_{\text{Verbraucher}} = \begin{pmatrix} IV_1 \\ IV_2 \\ \vdots \\ IV_n \end{pmatrix}$$

Aktivierung von Verbrauchern

Die Aktivierung von Verbrauchern im unidirektionalen Last-Management erfolgt ebenfalls auf Basis der definierten Verbraucher-Prioritäten. Bevor es allerdings zur Aktivierung eines Verbrauchers kommt wird geprüft, ob die Summe aus aktuellem Gesamtlaststrom und des maximal zu erwartenden Laststrom des entsprechenden Verbrauchers unterhalb der aktuellen Überlastschwelle liegt. Die entsprechenden Informationen müssen ebenfalls im Last-Management hinterlegt werden.

BILD 2 zeigt alle beschriebenen Kommunikationsschnittstellen des unidirektionalen Last-Managements (durchgezogene Linien). Als Eingang dienen der Gesamtlaststrom, die Lastströme der Verbraucher, die Zustände der Verbrauchersteuerung sowie der Ladezustand der Batterie des hybriden Brennstoffzellensystems. Den einzigen Ausgang stellen die Schaltsignale für die Verbrauchersteuerung dar. Die Implementierung ist in Kapitel 3 beschrieben.

2.2. Bidirektionales Last-Management

Das hier umgesetzte verhandelnde bzw. bidirektionale Last-Management stellt eine Erweiterung des zuvor vorgestellten unidirektionalen Last-Managements dar. Die Kommunikationsschnittstellen aus BILD 2 werden lediglich um eine direkte Ansteuerung der Verbraucher und einen Kommunikationskanal zwischen Verbrauchern und Last-Management erweitert (gestrichelte Linie). Über diesen sollen sowohl die angeforderte Leistung, als auch die für den Betrieb erforderliche Energiemenge kommuniziert werden. Letztere lässt sich im Falle der hier als Verbraucher fungierenden GAINs (engl.: *Galley Inserts*) relativ genau abschätzen, da die Lastzyklen der einzelnen GAINs deterministisch und bekannt sind.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für das bidirektionale Last-Management stellt die direkte Steuerbarkeit der Verbraucher durch das Last-Management dar. Dies ermöglicht es, den Laststrom je nach Verbraucher kontinuierlich oder zumindest diskret zu

regeln. So besitzt z.B. ein Ofen mehrere diskrete Lastzustände (*Aufheizen, Pulsheizen, Warmhalten, Standby*) die bei klassischen GAINs entsprechend eines definierten Programms durchlaufen werden. Können diese Zustände vom Last-Management gezielt angesteuert werden, ermöglicht dies die verfügbare Leistung möglichst optimal auszunutzen.

Aktivierung von Verbrauchern

Prinzipiell erfolgt auch beim bidirektionalen Last-Management die Aktivierung von Verbrauchern auf Basis der definierten Verbraucher-Prioritäten und den zu erwartenden Lasten. Anders als beim unidirektionalen Last-Management werden die Verbraucher allerdings nicht einfach nur aktiviert, sondern fordern eine bestimmte Leistungsstufe an. Kann diese oder eine niedrigere Leistungsstufe vom hybriden Brennstoffzellensystem bereitgestellt werden ohne, dass dieser in einen Überlastzustand gerät, kann diese an den Verbraucher kommandiert werden. Dies geschieht allerdings nur dann, wenn sichergestellt werden kann, dass der Lastzyklus des Verbrauchers auch beendet werden kann. Zu diesem Zweck kommuniziert der Verbraucher die zum Durchlaufen seines Lastzyklus erforderliche Energie an das Last-Management. Muss diese ganz oder teilweise aus der Batterie des hybriden Brennstoffzellensystems bezogen werden, wird auf Basis des Ladezustandes der Batterie berechnet, ob diese dazu in der Lage ist. Dabei wird weiterhin berücksichtigt, ob im Verlauf des Lastzyklus Leistungskapazitäten durch die Beendigung von Lastzyklen dritter Verbraucher frei werden und das hybride Brennstoffzellensystem, und damit auch die Batterie, hierdurch entlastet wird. Erst wenn eine ausreichende Energiereise sichergestellt ist, erfolgt die Aktivierung des Verbrauchers.

Deaktivierung von Verbrauchern

Die Deaktivierung von Verbrauchern im bidirektionalen Power-Management erfolgt analog zum Vorgehen im unidirektionalen. Einziger Unterschied ist, dass die Deaktivierung schrittweise erfolgt, der betroffene Verbraucher also sukzessive in einen niedrigeren Lastzustand geschaltet wird.

3. MODELLIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG

Für den simulationsbasierten Test und die Bewertung der beschriebenen LM-Konzepte ist es zum einen erforderlich die beschriebenen LM-Algorithmen zu implementieren und zum anderen das hybride Brennstoffzellensystem, die Verbraucher und das Bordkü-

chennetz zu modellieren. Das entsprechende Vorgehen ist im Folgenden beschrieben.

3.1. Implementierung der LM-Algorithmen

Die Implementierung der beschriebenen LM-Algorithmen wird in Form von Zustandsautomaten (Detektion des Lastzustandes) und mathematischen Funktionen (Aktivierung und Deaktivierung von Verbrauchern) in MATLAB STATEFLOW[®] bzw. der MATLAB Programmiersprache realisiert.

Die Detektion des Lastzustandes erfolgt dabei zweistufig. Zunächst werden anhand des Ladezustandes der Batterie des hybriden Brennstoffzellensystems die Grenzen der Lastzustände $[lim_{kÜ}, lim_{Ü}, lim_U]$ bestimmt (BILD 3). Dabei ist es im Falle des unidirektionalen Last-Managements für die Performanz des Algorithmus entscheidend, die Inkremente Δmax , Δmin und $\Delta crit$ sinnvoll zu wählen. Diese Inkremente dienen dazu, eine Hysterese zwischen den Zuständen SOC_{high} , SOC_{med} , SOC_{low} und SOC_{crit} einzubringen, die es verhindert dass das Last-Management in kurzer zeitlicher Abfolge zwischen zwei Zuständen wechselt und dabei unter Umständen Verbraucher fortlaufend aktiviert bzw. deaktiviert.

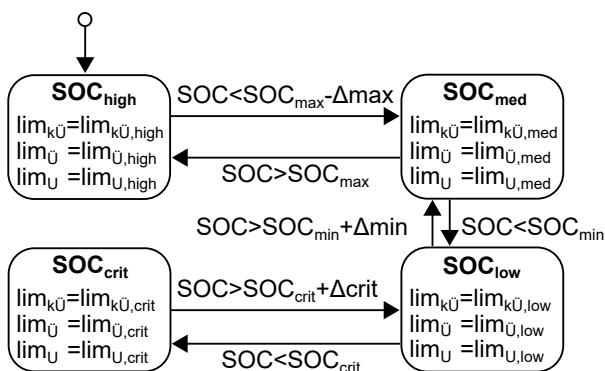


BILD 3. Festlegung der Grenzen der System-Lastzustände

Wechselt der Batteriezustand z.B. in Folge eines Aufladevorgangs vom Zustand SOC_{low} in den Zustand SOC_{med} erhöhen sich die Grenzen für die Lastzustände des Systems. Eine Aktivierung von Verbrauchern und somit ggf. eine erneute Entladung der Batterie kann die Folge sein. Wird das Inkrement Δmin zu klein gewählt, wechselt der Ladezustand der Batterie bereits nach kurzer Zeit wieder in den Zustand SOC_{low} und die zuvor aktivierten Verbraucher müssen deaktiviert werden. Wird das Inkrement zu groß gewählt, wechselt der Lastzustand erst spät und es kann sein, dass Verbraucher unnötig lange auf ihre Aktivierung warten müssen.

Im bidirektionalen Last-Management tritt ein solches Verhalten nicht auf, da, wie in Kapitel 2 beschrieben,

die Aktivierung eines Verbrauchers nur dann erfolgt, wenn genügend Energie für seinen vollständigen Betrieb vorhanden ist.

Im zweiten Schritt wird die Aktivierung und Deaktivierung von Verbrauchern ausgelöst. Das Vorgehen ist in BILD 4 dargestellt. Die Transition zwischen den Zuständen *kritische Überlast*, *Überlast*, *OK* und *Unterlast* erfolgt unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Grenzen der Lastzustände und unter Messung des aktuellen Laststroms des hybriden Brennstoffzellensystems. Befindet sich das Last-Management in den Zuständen *kritische Überlast*, wird direkt die LM-Funktion zur Deaktivierung von Verbrauchern aufgerufen. Im Zustand *Überlast* geschieht dies erst nach Ablauf der Zeit $\Delta t_{ü}$. Um eine Summation von Anlaufströmen zu vermeiden, erfolgt die Aktivierung von Verbrauchern im Zustand *Unterlast* schrittweise, was durch eine weitere Haltefunktion mit $t = \Delta t_{akt}$ realisiert wird.

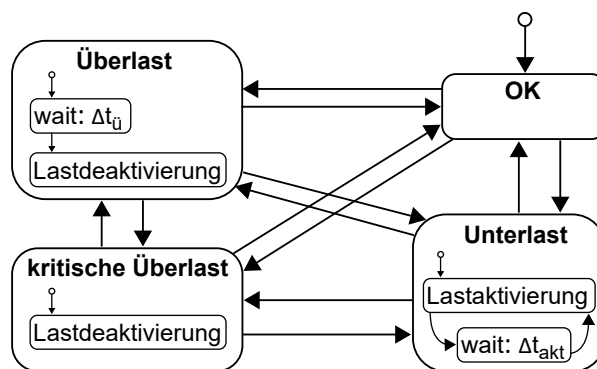


BILD 4. Identifizierung des Lastzustands

3.2. System- und Komponentenmodellierung

Für die Modellierung des hybriden Brennstoffzellensystems wird die am INSTITUT FÜR FLUGZEUGSYSTEMTECHNIK entwickelte Modellbibliothek [7, 8] für die dynamische Simulation von Brennstoffzellensystemen verwendet und um neue Komponenten ergänzt. Die Implementierung der Modelle erfolgt, wie auch die Modelle der betrachteten Verbraucher, auf Basis der akasualen Modellierungssprache MATLAB SIMSCAPE[®] [9] sowie MATLAB STATEFLOW[®] und MATLAB SIMULINK[®].

Hybrides Brennstoffzellensystem

Im hybriden Brennstoffzellensystem wird mit Hilfe eines Brennstoffzellensystems (engl.: *fuel cell system, FCS*) elektrische Energie erzeugt und in einer Batterie zwischengespeichert. Da für die vorliegende Problemstellung vorrangig das elektrische Subsystem des hybriden Brennstoffzellensystems von Interesse ist, wird auf die detaillierte Modellierung

der für den Betrieb der Brennstoffzelle erforderlichen Edukt-Versorgungssysteme (Sauerstoff und Wasserstoff) genauso verzichtet, wie auf eine detaillierte Abbildung des Kühlsystems.

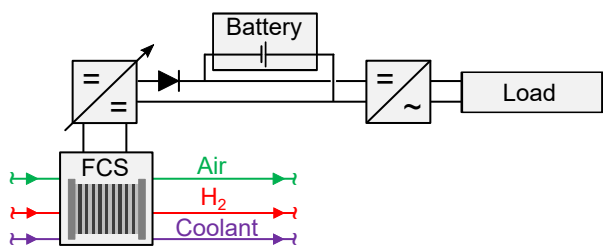


BILD 5. Vereinfachte Systemarchitektur des hybriden Brennstoffzellensystems

Das elektrische Subsystem ist in BILD 5 dargestellt. Mittels eines Ladereglers (linker DC-DC-Wandler) kann die Ausgangsspannung des Brennstoffzellensystems geregelt und so der Leistungsfluss innerhalb des gesamten Systems kontrolliert werden. Um das Brennstoffzellensystem vor Lastschwankungen zu schützen, wird dieses lediglich in einem der fünf Betriebspunkten *min*, *low*, *optimal*, *high* oder *max* betrieben. Je nach anliegender Last führt dies dazu, dass das Brennstoffzellensystem die Batterie entweder lädt oder zusammen mit dieser im Verbund die Verbraucher versorgt. Um die Verbraucher unabhängig vom Spannungslevel der Batterie mit einer konstanten Spannung zu versorgen, besitzt das hybride Brennstoffzellensystem einen zweiten DC-DC-Wandler (rechts), der diese einstellt.

Verbraucher

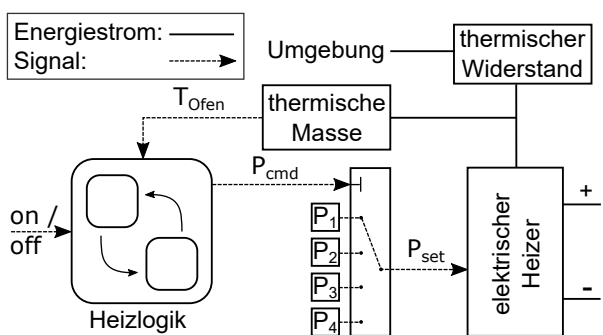


BILD 6. Modellstruktur: Nicht-kommunizierender Ofen

Neben dem elektrischen ist insbesondere das thermische Verhalten der Verbraucher von Interesse, damit das Aufheizverhalten und die Wärmeverluste der zu versorgenden GAINS in Richtung Umgebung abgebildet werden können. BILD 6 zeigt den Modellaufbau eines einfachen, nicht kommunizierenden Ofens.

Dieser besitzt neben seinem Stand-by Verbrauch (P_1) drei verschiedene Heizleistungsstufen zum Aufheizen (P_4), Pulsheizen (P_3) und Halten (P_2). Sobald das externe Signal zum Einschalten des Ofens anliegt, wird unter Berücksichtigung der Ofentemperatur und eines in der *Heizlogik* definierten Heizprogramms, im *elektrischen Heizer* thermische Energie erzeugt, welche die *thermische Masse* des Ofens erwärmt. Zeitgleich kommt es über den *thermischen Widerstand* zu temperaturabhängigen Wärmeverlusten in Richtung Umgebung.

Auch das Modell des in BILD 7 dargestellten, kommunizierenden Ofens verfügt über eine *Heizlogik*. Diese steuert allerdings nicht direkt die Heizleistungsstufen des Ofens, sondern verfügt lediglich über eine Schnittstelle zum Last-Management, an welche die gewünschte Stufe gemeinsam mit dem erwarteten Energieverbrauch kommuniziert wird. Die Steuerung der Heizleistung erfolgt direkt über eine Schnittstelle zum Last-Management.

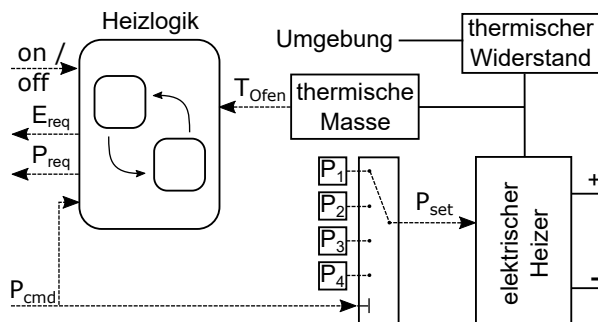


BILD 7. Modellstruktur: Kommunizierender Ofen

Neben Öfen werden im Rahmen dieser Veröffentlichung noch Wasserkocher, Kaffeemaschine und Luftkühler betrachtet. Ihre Parametrisierung erfolgt in Anlehnung an [10]. Ihre maximalen Dauerlasten sind in Tabelle 1 aufgezeigt.

| GAIN | P_{max} in W |
|----------------|--------------------------------|
| Ofen | 3200 |
| Wasserkocher | 4200 |
| Kaffeemaschine | 2600 |
| Luftkühler | 500 (pro zu kühlenden Trolley) |

TAB 1. Maximale Dauerlasten der betrachteten GAINS

4. MODELLBASIERTER TEST & BEWERTUNG

Um die vorgestellten LM-Konzepte hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Betrieb und die Effizienz eines hybriden Brennstoffzellensystems sowie auf die Verfügbarkeit der Verbraucher einer energieautarken

Bordküche bewerten zu können, soll im Folgenden eine repräsentative Flugmission mit einer beispielhaft konfigurierten Flugzeug-Bordküche betrachtet werden. Das hybride Brennstoffzellensystem ist hierfür gewichtsoptimiert dimensioniert, was dazu führt dass nicht alle Verbraucher zeitgleich mit Energie versorgt werden können und die implementierten LM-Algorithmen somit ihr volles Potential aufzeigen können.

4.1. Testszenario

Im Testszenario dieser Veröffentlichung soll ein hybrides Brennstoffzellensystems die hintere Bordküche eines A320 versorgen. Die Konfiguration der Bordküche ist dabei an die der Lufthansa angelehnt [11]. Es ergibt sich die in Tabelle 2 dargestellte Anzahl von Verbrauchern mit den zugehörigen Prioritätswerten.

| GAIN | Anzahl | Prioritätswert |
|----------------------|--------|----------------|
| Ofen | 3 | 10 |
| Wasserkocher | 1 | 20 |
| Kaffeemaschine | 2 | 30 |
| Zu kühlende Trolleys | 2 + 1 | 1 |

TAB 2. Konfiguration der untersuchten Flugzeug-Bordküche

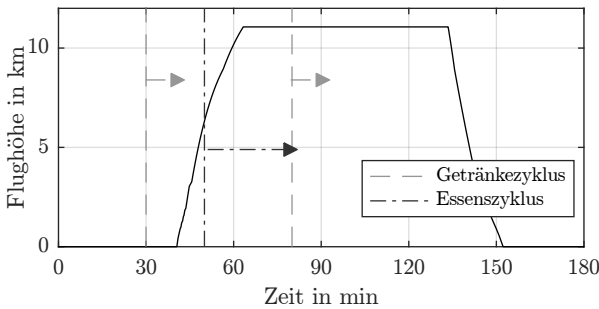


BILD 8. Flugmission mit Getränke- und Essenszyklen

Im Verlauf einer 180-minütigen Flugmission (BILD 8) sollen zwei *Getränkezyklen* (nach 30 und nach 80 Minuten) und ein *Essenszyklus* (nach 50 Minuten) durchlaufen werden. Während des ersten Getränkezyklus werden beide Kaffeemaschinen betrieben, während des Zweiten zusätzlich ein Wasserkocher. Der Inhalt der drei zu kühlenden Trolleys wird direkt zu Beginn der Mission herunter gekühlt und die Temperatur anschließend unter einer reduzierten Leistungsaufnahme bis zum Ende der Flugmission (1 Trolley) bzw. bis zum Beginn des *Essenszyklus* (2 Trolleys) konstant gehalten.

4.2. Testkriterien

Zur Bewertung der beiden LM-Konzepte sollen neben der qualitativen Beschreibung der Verbraucher-Lastverläufe auch drei quantitative Kriterien genutzt werden: Die *kumulierte Verbraucher-Wartezeit* $t_{wait,kum}$ aus Gleichung 1 summiert die Wartezeiten aller Verbraucher auf, während derer die Verbraucher durch einen Eingriff des Last-Managements nicht in dem von ihnen gewünschten Zustand betrieben werden können ($t_{mismatch}$). Sie kann somit als Indikator für die operationellen Auswirkungen des jeweiligen LM-Algorithmus verstanden werden.

$$(1) t_{wait,kum} = \sum_{i=1}^{n_{GAINs}} t_{mismatch,i}$$

Da sich die Verbraucher-Lastzyklen in Folge von durch das Last-Management provozierte Unterbrechungen oder geänderten Betriebszyklen verlängern können, kommt es durch zusätzliche Wärmeverluste in die Umgebung zu einem erhöhten Energiebedarf. Aus energetischer Sicht ist es daher sinnvoll, den *kumulierten zusätzlichen Wärmeverlust* $Q_{loss,kum}$ als weiteres Kriterium zu definieren:

$$(2) Q_{loss,kum} = \left(\sum_{i=1}^{n_{GAINs}} Q_{loss,i} \right) - Q_{loss,0}$$

$Q_{loss,0}$ beschreibt dabei den Referenzwärmeverlust, welcher im idealen Betrieb auftritt.

Wie zuvor beschrieben wird das Brennstoffzellensystem des hybriden Brennstoffzellensystems in mehreren Arbeitspunkten betrieben. Diese Arbeitspunkte unterscheiden sich neben ihrem elektrischen Wirkungsgrad auch in ihrer Belastung für die Brennstoffzelle. Eine permanent im Arbeitspunkt *high* oder höher betriebene Brennstoffzelle wird eine kürzere Lebensdauer haben als eine die vorrangig im Arbeitspunkt *opt* betrieben wird [12]. Vor diesem Hintergrund sollen auch die Zeitanteile $frac_{t,AP}$ der einzelnen Arbeitspunkte zur Bewertung herangezogen werden:

$$(3) frac_{t,AP} = \frac{t_{AP}}{t_{total}}, \text{ mit } AP \in \{min, low, opt, high, max\}$$

4.3. Auswertung

Die Auswertung der Simulationsstudien soll im Folgenden anhand charakteristischer Last- und Temperaturverläufe der Verbraucher und des Brennstoffzellensystems, des Batterieladezustandes und der vorgestellten numerischen Kennzahlen erfolgen.

Analyse des unidirektionalen Last-Managements

BILD 9 zeigt die Temperatur und Lastverläufe der einzelnen Verbraucher. Es fällt auf, dass die initiale Abkühlung der Trolleys (konstant hohe Leistungsaufnahme) und der erste Getränkezyklus (hohe Leistungsaufnahme über eine kurze Zeitspanne) wie erwünscht durchgeführt werden können. Auch die Öfen 1 und 2 zeigen nahezu das erwünschte Verhalten (initiale Aufheizphase gefolgt von einer Pulsheiz-Phase).

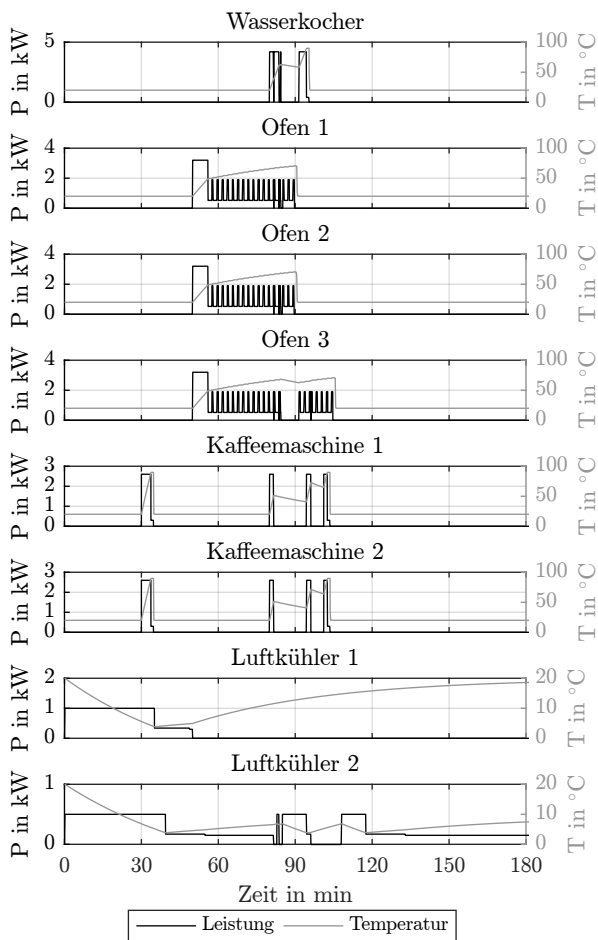


BILD 9. Verbraucher-Betrieb unter Verwendung des unidirektionalen Last-Managements

Der Betrieb von Ofen 3 muss, genauso wie der zweite Getränkezyklus, mehrfach unterbrochen werden, wodurch sich die Betriebszeiten der betroffenen Verbraucher signifikant erhöht.

Grund hierfür ist der in BILD 10 sichtbare kritische Ladezustand der Batterie des hybriden Brennstoffzellensystems. Ebenfalls zu sehen ist, dass sich das Brennstoffzellensystem des hybriden Systems über längere Zeit in dem unerwünschten Arbeitspunkt maximaler Leistung befindet.

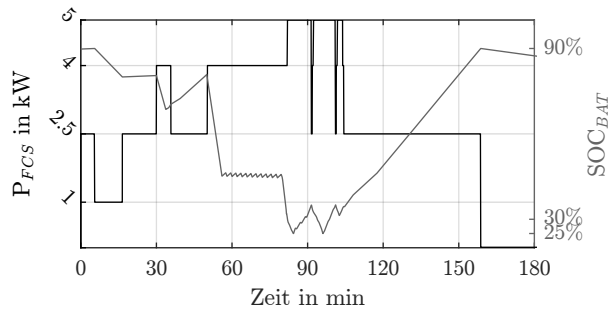


BILD 10. Betriebszustand des Brennstoffzellensystems und Ladezustand der Batterie des hybriden Systems

| $t_{wait,kum}$ in min | $Q_{loss,kum}$ in MJ | $frac_{t,AP}$ min | low | opt | high | max |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|------|------|------|------|
| 52 | 1.81 | 0.13 | 0.06 | 0.49 | 0.21 | 0.11 |

TAB 3. Kennzahlen für das unidirektionale Last-Management

Dieser qualitative Eindruck wird durch die in Tabelle 3 aufgeführten Kennzahlen quantifiziert. Die *kumulierte Verbraucher-Wartezeit* beträgt 52 Minuten, die *kumulierte zusätzliche Verlustleistung* 1.81 MJ und die Brennstoffzelle wird zu 11% der Zeit im Arbeitspunkt maximaler Leistung betrieben.

Analyse des bidirektionalen Last-Managements

Anders als im Falle des unidirektionalen Last-Managements zeigen die Verbraucher-Zyklen im bidirektionalen Last-Managements in BILD 11 von ihrer Form her durchgehend das erwünschte Verhalten. Es kommt zu keiner Unterbrechung der einzelnen Verbraucher-Zyklen. Es fällt jedoch auf, dass es auch in diesem Fall im Essenszyklus (Ofen 3) und im zweiten Getränkezyklus (beide Kaffeemaschinen) zu Verzögerungen kommt. Vor dem Hintergrund einer sequentiellen Essens- bzw. Getränkeausgabe, können die operativen Auswirkungen dieser Verzögerungen allerdings vernachlässigt werden. Der Catering-Betrieb wird somit nicht negativ beeinflusst.

BILD 12 macht weiterhin deutlich, dass der Ladezustand der Batterie des Systems sich nur kurz einem kritischen Wert nähert und die Brennstoffzelle zum einen nur einmal im Arbeitspunkt maximaler Leistung arbeiten und sie ihren Arbeitspunkt zum anderen deutlich seltener wechseln muss. Letzteres wirkt sich ebenfalls positiv auf die Lebenszeit von Brennstoffzellensystemen aus [12].

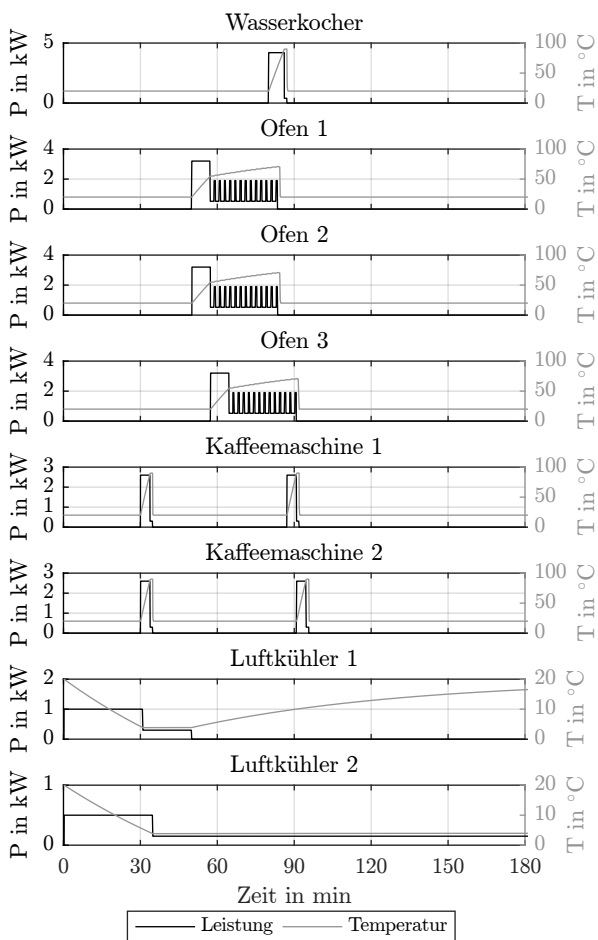


BILD 11. Verbraucherbetrieb unter Verwendung des bidirektionalen Last-Managements

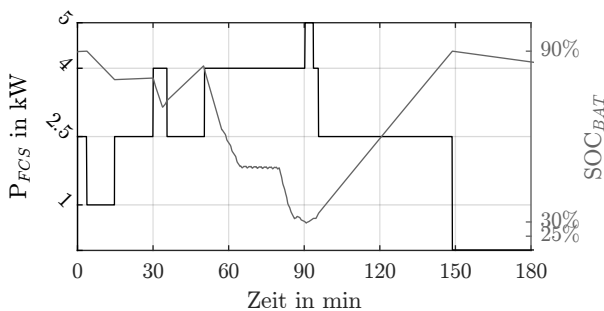


BILD 12. Betriebszustand des Brennstoffzellensystems und Ladezustand der Batterie des hybriden Systems

Tabelle 4 quantifiziert diesen qualitativen Eindruck wiederum. Die *kumulierte Verbraucher-Wartezeit* kann durch den Einsatz des bidirektionalen Last-Managements auf 30 Minuten reduziert werden. Durch die Tatsache, dass Verbraucher nur dann aktiviert werden, wenn deren erfolgreicher Betrieb gewährleistet ist, entsteht kein zusätzlicher Abwärmeverlust und die *kumulierte zusätzliche Verlustleistung*

beträgt 0. Die Zeitanteile der einzelnen Arbeitspunkte verschieben sich in Richtung der Arbeitspunkte *high* und *low*.

| $t_{wait,kum}$ in min | $Q_{loss,kum}$ in MJ | $frac_{t,AP}$ | | | | |
|--------------------------|-------------------------|---------------|------|------|------|------|
| | | min | low | opt | high | max |
| 30 | 0 | 0.18 | 0.06 | 0.48 | 0.26 | 0.02 |

TAB 4. Kennzahlen für das bidirektionale Last-Management

Bewertung

Mit Hilfe der durchgeführten Simulationsstudien konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz eines geeigneten Last-Managements ein regulärer Catering-Ablauf, auch bei Verwendung eines gewichtsoptimierten, hybriden Brennstoffzellensystems, realisiert werden kann. Es zeigt sich dabei, dass die Art des gewählten Last-Managements großen Einfluss auf den Betrieb der Verbraucher hat. Das bidirektionale Last-Management ermöglicht nicht nur einen effizienteren Betrieb, es erlaubt auch einen unterbrechungsfreien und nur geringfügig verzögerten Betrieb der Verbraucher. Insbesondere im Falle der betrachteten Öfen kann dies ein wichtiges operationelles Kriterium sein, da ihre Heizprogramme mitunter speziell auf das zu erwärmende Essen abgestimmt sind und somit eine Abweichung von diesen unter Umständen unerwünscht ist. Um ein ähnliches Verhalten auch für das unidirektionale Last-Management zu erreichen, müsste eine entsprechende Vergrößerung der Inkremente Δ_{max} , Δ_{min} und Δ_{crit} vorgenommen werden. Dies würde allerdings gleichzeitig zu einer unerwünschten Erhöhung der *kumulierten Verbraucher-Wartezeit* führen. Das bidirektionale Last-Management zeigt sich demnach dem unidirektionalen überlegen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurden unterschiedliche Konzepte für Last-Management-Algorithmen vorgestellt und diskutiert. Für die anschließende Implementierung in MATLAB und MATLAB STATEFLOW® wurden ein unidirektionales und ein bidirektionales Last-Management-Konzept ausgewählt. Während ersteres auch für Retrofit-Anwendungen geeignet ist, ist dies bei letzterem nicht der Fall, da eine, in heutigen Flugzeugen nur eingeschränkt verfügbare, Kommunikationsfähigkeit zwischen Verbrauchern und Last-Management erforderlich ist.

Beide Last-Management-Konzepte basieren auf der Detektion von Unter- und Überlastzuständen, auf

welche mit der Aktivierung bzw. Deaktivierung von Verbrauchern reagiert wird. Aktivierungs- und Deaktivierungsfunktionen nutzen dabei Informationen über aktuelle oder zu erwartende Verbraucherlastströme sowie Verbraucher-Prioritätsmatrizen, um zu entscheiden, welche Verbraucher zu aktivieren bzw. deaktivieren sind. Im Falle des bidirektionalen Last-Managements wird für die Aktivierungsentscheidung zusätzlich der zu erwartende Energiebedarf des Verbrauchers mit einbezogen, welcher durch diesen an das Last-Management kommuniziert werden muss. Werden, wie im Rahmen dieser Veröffentlichung, hybride Energieversorgungssysteme zur Verbraucher-versorgung eingesetzt, bietet diese Funktionalität die Möglichkeit, die Auswirkungen auf den Ladezustand der genutzten Batterie zu prognostizieren und so die Verbraucheraktivierung zu verzögern, um letztere vor kritischen Ladezuständen zu schützen.

Die implementierten Last-Management-Konzepte wurden am Beispiel einer energieautarken Flugzeug-Bordküche modellbasiert getestet und bewertet. Die energieautarke Flugzeug-Bordküche wurde dabei von einem hybriden Brennstoffzellensystem mit elektrischer Leistung versorgt und war in Anlehnung an eine hintere Bordküche eines Lufthansa A320 konfiguriert. Im Rahmen einer 180-minütigen Flugmission wurden die Auswirkungen der beiden Last-Management-Konzepte auf den Betrieb der Flugzeug-Bordküche und das hybride Brennstoffzellensystem sowohl qualitativ als auch quantitativ analysiert. Dabei zeigt sich, dass der bidirektionale Ansatz dem unidirektionalen überlegen ist. Während die Verwendung des unidirektionalen Last-Managements im gewählten Testszenario zu häufigen Deaktivierungen der Verbraucher führt, kann dies bei Anwendung des bidirektionalen Last-Management vermieden werden. Auf diese Weise kann nicht nur der Normbetrieb der Verbraucher sichergestellt, sondern darüber hinaus auch Energie eingespart werden. Weiterhin wurde das Brennstoffzellensystem des hybriden Systems seltener in belastenden Betriebspunkten betrieben und seine Batterie erfolgreich vor kritischen Ladezuständen geschützt. Beiden Konzepten gemein ist, dass aufgrund der bewusst gewählten, gewichtsoptimierten Dimensionierung des hybriden Brennstoffzellensystems nicht alle Verbraucher zum gewünschten Zeitpunkt betrieben werden konnten. Durch Einsatz des bidirektionalen Last-Managements kann die Wartezeiten der Verbraucher allerdings gegenüber denen des unidirektionalen signifikant gesenkt werden. Operationelle Einschränkungen im Catering-Zyklus können so vermieden werden.

LITERATUR

- [1] R. A. Knepple. „The Energy-Autonomous Cabin - The End of Classical On-Board Power Supply?“ In: *4th International Workshop on Aircraft System Technologies* (2013).
- [2] V. Madonna, P. Giangrande und M. Galea. „Electrical Power Generation in Aircraft: review, challenges and opportunities“. In: *IEEE Transactions on Transportation Electrification* (2018).
- [3] R. A. Knepple. „Die energie-autarke Kabine - das Ende der klassischen Bordnetze“. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Berlin 10–12 Sept* (2012).
- [4] T. Schroeter, B. H. Nya und D. Schulz. „Potential analysis for the optimization of the electrical network of large modern civil and future single aisle aircraft and examples of the network capacity utilisation“. In: *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010*. IEEE. 2010, S. 1–7.
- [5] Diehl Aerosystems. *Smart Galley - A modular galley concept for maximum flexibility*. Techn. Ber. 2018.
- [6] V. Cortellessa, B. Cukic, D. Del Gobbo, A. Mili, M. Napolitano, M. Shereshevsky und H. Sandhu. „Certifying adaptive flight control software“. In: *Proceedings, ISACC 2000: The Software Risk Management Conference*. 2000.
- [7] J. Grymlas, H. Lüdders, H. Strummel und F. Thielecke. „Modellbasierter Entwurfsprozess für Brennstoffzellensysteme unter Verwendung eines mehrstufigen Bibliothekskonzepts“. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. 2012.
- [8] J. Grymlas. „Systemautomatisierung für den multifunktionalen Betrieb von Brennstoffzellen in Verkehrsflugzeugen“. Diss. TU Hamburg, 2017.
- [9] SIMSCAPE™ *Language Guide*. R2016a. The MathWorks, Inc.
- [10] Zodiac Aerospace. *Electrical Inserts*. 2018. URL: <https://www.zodiac aerospace.com/en/products-services/cabin/cabin-equipment/electrical-inserts>.
- [11] Lufthansa Magazin. *Panoramafoto: Blick in die Kabine (A320-200)*. 2018. URL: <https://magazin.lufthansa.com/xx/de/flotte/airbus-a320-200/panoramafoto-blick-in-die-kabine-a320-200/>.
- [12] R. O'hayre, S.-W. Cha, F. B. Prinz und W. Colella. *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons, 2016.