

# KLASSIFIKATION VON EINFLUSSFAKTOREN AUF DAS ALTERUNGSVERHALTEN VON SERIENTRIEBWERKEN UNTER VERWENDUNG VON FLUGDATEN

H. Vogel, A. Kando, H. Schulte  
MTU Aero Engines AG  
Dachauer Straße 665  
80995 München, Deutschland  
Helena.Vogel@mtu.de

S. Staudacher  
Institut für Luftfahrtantriebe  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 6  
70569 Stuttgart, Deutschland

## Zusammenfassung

Das Verständnis des Alterungsverhaltens von Serientriebwerken ist für Fluggesellschaften und Instandhaltungsbetriebe von Bedeutung, um die Zuverlässigkeit von Serientriebwerken im Einsatz und die Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen zu gewährleisten. Bei der Analyse des Alterungsverhaltens sind sowohl Unterschiede von Flotte zu Flotte als auch Unterschiede zwischen den individuellen Triebwerken einer Flotte zu berücksichtigen. Diese Arbeit befasst sich mit der Identifikation und Klassifikation von Einflussfaktoren auf Alterungsmechanismen, die sich auf das Leistungsverhalten von Serientriebwerken auswirken. Die Alterungsmechanismen sind voneinander abhängig, nichtlinear und nicht stetig. Sie werden durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren beeinflusst. Zur Reduzierung der Komplexität erfolgt eine Klassifikation. Aus der Literatur bekannte Einflussfaktoren werden zunächst identifiziert. Nach Untersuchung der Anwendbarkeit existierender Klassifikationen auf Flugdaten wird eine neue Methode zur Klassifikation vorgestellt. Mit dieser Methode werden Flughafensignaturen erstellt, die den Start- und Landeflug charakterisieren.

## NOMENKLATUR

$\beta$	[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Massenkonzentration
$\varphi$	[%]	relative Luftfeuchtigkeit
d	[d]	Tage mit Niederschlag
h	[m]	Druckhöhe
N	[mm]	Niederschlagsmenge
T	[°C]	Umgebungstemperatur

Indizes:

NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
p	Partikel
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid

## 1. EINLEITUNG

Instandhaltungskosten von Serientriebwerken sind von erheblicher Bedeutung für die direkten Betriebskosten einer Fluggesellschaft. Sie betragen ca. 30% der direkten Betriebskosten von Triebwerken [1]. Triebwerke machen ca. 25% der direkten Betriebskosten eines Flugzeugs aus. Moderne Triebwerke werden mit hohen Temperaturen im Gaspfad betrieben [2]. Zusätzlich wird ein wachsender Anteil der Flotten unter schwierigen Umgebungsbedingungen, wie hohe

Umgebungstemperaturen, hohe Partikelkonzentrationen oder hohe Schadstoffkonzentrationen, eingesetzt [3]. Dadurch steigt die Gefahr von erhöhtem Verschleiß und somit zunehmender Alterung [4]. Die Zuverlässigkeit von Serientriebwerken im Einsatz und die Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen sind für Fluggesellschaften und Instandhaltungsbetriebe wichtig. Um beides unter den beschriebenen Voraussetzungen zu gewährleisten, sind die Analyse und das Verständnis des Alterungsverhaltens von Serientriebwerken von Bedeutung.

Zustandsüberwachungssysteme bieten die Möglichkeit den aktuellen Zustand von Serientriebwerken während des Betriebs zu analysieren. Durch den begrenzten Instrumentierungsumfang können auf Basis von im Flug aufgenommenen Messwerten nur Aussagen über den Zustand beobachtbarer Leistungsparameter von Triebwerkskomponenten getroffen werden. Ein System wird als beobachtbar bezeichnet, wenn sich dessen Zustand vollständig aus den Messwerten bestimmen lässt. Durch Hinzunahme geeigneter Nebenbedingungen wie Ober- und Untergrenzen für die Triebwerkskomponenten beschreibende Leistungsparameter kann gegebenenfalls der Zustand nicht beobachtbarer Leistungsparameter näherungsweise bestimmt werden [5].

Um das Alterungsverhalten von Serientriebwerken detailliert nach Alterungsmechanismen auflösen zu können, sind aktuell verfügbare Informationen aus Zustandsüberwachungssystemen nicht ausreichend. Durch den Anstieg der Rechenleistung, Speicherkapazität und Übertragungsbandbreite von Computern in den letzten Jahren besteht die Möglichkeit zur um Größenordnungen umfangreicheren Datenerfassung. Auch im Bereich der Triebwerksüberwachung ist eine Tendenz der zunehmenden Datenerfassung zu beobachten [6].

Alterungsmechanismen werden durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren beeinflusst [4, 7]. Um die Komplexität – insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Datenerfassung – zu reduzieren, werden in dieser Arbeit Möglichkeiten zur Klassifikation der Einflussfaktoren untersucht.

## 2. ALTERUNGSVERHALTEN VON SERIENTRIEBWERKEN

Im Serieneinsatz führt die Alterung der Triebwerke zu einer kontinuierlichen Leistungsverschlechterung [4, 5]. Die Leistungsverschlechterung variiert mit den auftretenden Alterungsmechanismen und den von ihnen hervorgerufenen Alterungseffekten.

### 2.1. Alterungsmechanismen mit Auswirkungen auf die Triebwerksleistung

Alterungsmechanismen, die zu einer Reduktion der Triebwerksleistung führen, sind Erosion, Abrasion, Ablagerungen und Korrosion [8, 9].

#### 2.1.1. Erosion

Mit Erosion wird der abrasive Materialabtrag durch das Auftreffen harter Partikel auf Bauteiloberflächen bezeichnet. Dieser Materialabtrag wird von Partikeln mit einem Mindestdurchmesser von 20µm hervorgerufen [9]. Trägheitskräfte führen dazu, dass Partikel in dieser Größenordnung nicht dem Gasstrom folgen und auf den Bauteiloberflächen aufprallen [10].

Erosion führt zu Geometrieänderungen der Bauteile im Gaspfad und einem Anstieg der Oberflächenrauigkeit [8]. Dies hat eine nachteilige Auswirkung auf die Triebwerksleistung. Durch Umgebungseinflüsse sind der Fan und die Verdichter am stärksten von Erosion betroffen. Im Turbinenbereich können durch eingesaugte Partikel und von diesen abgetragenes Material Kühlluftkanäle verstopfen [11]. Die Kühlung der Turbinenschaufeln wird reduziert oder verhindert. Es kommt zu Überhitzungen und Beschädigungen der Bauteile.

#### 2.1.2. Abrasion

Bei Abrasion tritt Materialabrieb durch Reibung zwischen rotierenden und statischen Bauteilen auf [12]. Abrasion wird durch Einlauffeffekte, Flugmanöver und transiente Triebwerksbelastungen hervorgerufen. Bei transienten Triebwerksbelastungen ergeben sich Unterschiede in der

thermischen Ausdehnung von Rotoren und Gehäuse. Dadurch kann es zum Anstreifen der Schaufeln kommen.

#### 2.1.3. Ablagerungen

Partikel mit einem Durchmesser von bis zu 10µm können beim Auftreffen auf Schaufel- oder Ringraumoberflächen anhaften [13]. Durch die Wirkung von Trägheitskräften folgen die Partikel gekrümmten Stromlinien, die von den Stromlinien der Gasströmung abweichen. Es können sich sowohl trockene Partikel als auch ölige Stoffe und klebrige Materialien ablagern. Die Bildung von Ablagerungen wird als Fouling bezeichnet [9, 14].

Ablagerungen führen zu Geometrieänderungen der Schaufeln und einem Anstieg der Oberflächenrauigkeit [9]. Im Turbinenbereich können Ablagerungen auf Bauteiloberflächen die Verstopfung von Kühlluftkanälen verursachen [11, 13]. Wie in Unterabschnitt 2.1.1. beschrieben können daraus Überhitzungen und Bauteilbeschädigungen resultieren.

#### 2.1.4. Korrosion

Die Korrosionsformen Nasskorrosion, Heißgaskorrosion und Hochtemperaturoxidation haben Auswirkungen auf die Triebwerksleistung [9]. Nasskorrosion ist eine elektrochemische Reaktion. Die Metalloberfläche oxidiert durch im Strömungsmedium enthaltenes Wasser [8]. Nasskorrosion wird durch in der Luft enthaltene Schadstoffe und das Ablagern korrosiver Substanzen auf Bauteiloberflächen verstärkt. Bei Heißgaskorrosion entsteht Materialverlust durch die Reaktion chemisch aktiver Elemente des Arbeitsgases wie Salze oder mineralische Säuren mit den Bauteiloberflächen im Heißgasbereich des Triebwerks [9]. Die Reaktionsprodukte können sich auf den Bauteiloberflächen ablagern. Hochtemperaturoxidation bezeichnet die Werkstoffschädigung durch die chemische Reaktion zwischen metallischen Atomen der Bauteile und im Arbeitsgas enthaltenen Sauerstoff [9]. Korrosion führt zu einem Anstieg der Oberflächenrauigkeit und Änderungen der Bauteilgeometrien.

## 2.2. Identifikation von Einflussfaktoren

Einflussfaktoren auf die zuvor beschriebenen Alterungsmechanismen sind

- flugzeugspezifische Einflussfaktoren,
- Auslegungsfaktoren,
- Instandhaltung im Instandhaltungsbetrieb,
- Instandhaltung am Flügel,
- die Alterungshistorie,
- Betriebsbedingungen und
- Umgebungsbedingungen.

Flugzeugspezifische Einflussfaktoren hängen mit der Position des Triebwerks am Flugzeug zusammen. Zum Beispiel verschmutzen und altern bei vierstrahligen Flugzeugen die Triebwerke an den Außenpositionen stärker als die Triebwerke an den Innenpositionen [15].

Durch Auslegungsfaktoren wird die inhärente Anfälligkeit einer Triebwerkskomponente und einer Triebwerkskonfiguration gegenüber

Alterungsmechanismen festgelegt. Zu den Auslegungsfaktoren gehören zum Beispiel Materialeigenschaften der verwendeten Werkstoffe sowie geometrische und aerodynamische Charakteristika der Triebwerkskomponenten [11, 16].

Instandhaltungsmaßnahmen im Instandhaltungsbetrieb oder am Flügel reduzieren die durch Alterungsmechanismen hervorgerufene Leistungsverschlechterung der Serientriebwerke [17]. Je nach Instandhaltungsmaßnahme beeinflussen Umfang und Häufigkeit der Durchführung wie viel Leistung zurückgewonnen werden kann.

Die Alterungsmechanismen sind voneinander abhängig, nichtlinear und nicht stetig. Durch die komplexe Wechselwirkung zwischen den Alterungsmechanismen wird das Alterungsverhalten von Serientriebwerken von der Alterungshistorie beeinflusst [4]. Mit Alterungshistorie wird die pro Alterungsmechanismus akkumulierte Leistungsverschlechterung bis zum aktuellen Zeitpunkt bezeichnet. Für die Alterungshistorie ist sowohl die quantitative Erfassung der Leistungsverschlechterung pro Alterungsmechanismus als auch der zeitliche Ablauf wichtig.

Die Betriebsbedingungen hängen zum Beispiel von der Flugdauer und dem benötigten Startschub ab [4, 12]. Der Anteil an Starts mit reduziertem Schub wird durch Vorgaben der Fluggesellschaft, der Leasinggesellschaft oder bei Flight-Hour-Agreements durch vertragliche Vereinbarungen geregelt. Die thermische und mechanische Belastung im Triebwerk sind beim Start mit reduziertem Schub im Vergleich zum Start mit Maximalschub reduziert.

Umgebungsbedingungen können in Abhängigkeit des Einsatzgebietes variieren [18]. Zu den Umgebungsbedingungen mit Einfluss auf die Leistungsverschlechterung von Serientriebwerken gehören die Umgebungsparameter

- Partikelkonzentration,
- Umgebungstemperatur,
- relative Luftfeuchtigkeit,
- Druckhöhe,
- Niederschlag und
- Umweltbelastung.

In der Luft enthaltene Partikel wie Meersalz, Wüsten- und Mineralstaub werden während des Betriebs in Triebwerke eingesaugt und führen dort zu Erosion, Fouling und Korrosion. Die Partikelkonzentration nimmt mit der Höhe ab [19]. Der Start- und Landflug werden deswegen am stärksten von der Partikelkonzentration beeinflusst [20]. Die Umgebungstemperatur beim Start wirkt sich auf die thermische und mechanische Belastung im Triebwerk aus [4]. Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit verstärkt zusammen mit einer hohen Partikelkonzentration die Bildung von Ablagerungen [8]. Die Druckhöhe beim Start beeinflusst den Eintrittsdruck in das Triebwerk und damit das Triebwerksdruckverhältnis [4]. Um bei zunehmender Höhe mit gleichbleibendem Schub zu starten, steigt die thermische und mechanische Belastung im Triebwerk an. Durch Niederschlag gelangt flüssiges Wasser in das Triebwerk. In Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge können Ablagerungen gelöst oder verstärkt werden [21].

Verkehrsemissionen in großen Städten und Industrieemissionen können Erosion, Fouling und Korrosion im Triebwerk verstärken [4, 22].

### 3. KLASSIFIKATION VON EINFLUSSFAKTOREN

In dieser Arbeit wird die Klassifikation der Umgebungsbedingungen untersucht. Da die in Abschnitt 2.2 genannten Umgebungsparameter während des Start- und Landflugs den größten Einfluss auf die Leistungsverschlechterung von Serientriebwerken haben, werden Umgebungsdaten der angeflogenen Flughäfen für die Klassifikation verwendet.

#### 3.1. Existierende Klassifikationen

In [23] werden verschiedene Klimaklassifikationen wie genetische, deskriptive oder effektive Klimaklassifikationen unterschieden. Zusätzlich existieren Mischformen der Klimaklassifikationen.

Genetische Klimaklassifikationen beziehen sich auf den Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erdoberfläche. Aufgrund jahreszeitlicher Schwankungen sind kartografische Abgrenzungen schwierig. Diese Klimaklassifikation verwendet als Hauptklassifikationskriterium die globalen Windzirkulationssysteme. Da die Windzirkulation nicht zu den in Abschnitt 2.2 identifizierten Umgebungsparametern mit Einfluss auf die Leistungsverschlechterung gehört, ist die Verwendung der genetischen Klimaklassifikation in dieser Arbeit ungeeignet.

Deskriptive Klimaklassifikationen basieren auf Temperatur- und Niederschlagscharakteristiken. Die Abgrenzung von Temperatur- und Niederschlagsregionen erfolgt beliebig, weswegen diese Klimaklassifikation selten Anwendung in der Praxis findet.

Effektive Klimaklassifikationen berücksichtigen die Auswirkungen des Klimas. Als Einteilungskriterium werden die natürliche Vegetation oder Charakteristika des Erdbodens verwendet. Nachteilig ist, dass die Vegetation beziehungsweise der Erdboden durch menschliche Eingriffe häufig nur noch modifiziert vorzufinden ist.

Mischformen deskriptiv-effektiver Klimaklassifikationen werden am häufigsten verwendet. Zu dieser Gruppe gehört zum Beispiel die Klimaklassifikation nach Köppen-Geiger [23]. Basis ist die natürliche Vegetation. Innerhalb eines Vegetationsbereiches werden Klimaklassen für Temperatur- und Niederschlagsregionen gebildet.

Die beschriebenen Klimaklassifikationen eignen sich nicht zur Klassifikation der in Abschnitt 2.2 genannten Umgebungsparameter für die Untersuchungen in dieser Arbeit. Parameter wie die Partikelkonzentration werden bei Klimaklassifikationen nur indirekt über die Vegetation berücksichtigt. Um alle Umgebungsparameter mit Einfluss auf die Leistungsverschlechterung von Serientriebwerken für die Klassifikation berücksichtigen zu können, wird eine neue Methode zur Klassifikation angewandt.

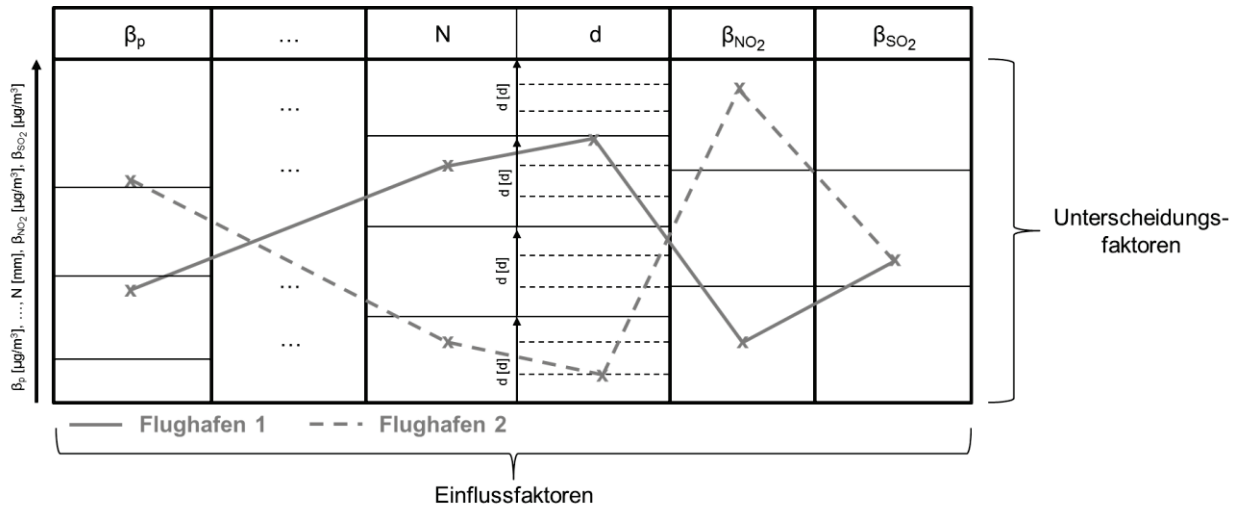


BILD 1: schematische Vorgehensweise bei der Erstellung von Flughafensignaturen

### 3.2. Flughafensignaturen

Zur Klassifikation der Umgebungsbedingungen werden Flughafensignaturen eingeführt. Das schematische Vorgehen zur Erstellung von Flughafensignaturen ist in BILD 1 dargestellt. Jedem Einflussfaktor wird eine Spalte zugeordnet. Als Einflussfaktoren werden die Umgebungsparameter Partikelkonzentration  $\beta_p$ , Umgebungstemperatur  $T$ , relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi$ , Druckhöhe  $h$ , Niederschlagsmenge  $N$ , Tage mit Niederschlag  $d$ , Stickstoffdioxidkonzentration  $\beta_{NO_2}$  und Schwefeldioxidkonzentration  $\beta_{SO_2}$  berücksichtigt. Der Einfluss von Niederschlag auf die Alterung von Serientriebwerken ist von der Niederschlagsmenge und der Niederschlagsdauer abhängig. Deswegen werden sowohl die Niederschlagsmenge als auch die Anzahl an Tagen mit Niederschlag berücksichtigt. Die Umwelt wird durch Luftschadstoffe wie Ammoniak, Feinstaub, Schwefeldioxid und Stickstoffoxide belastet [24]. Als Indikator für die Umweltbelastung werden in dieser Arbeit die Schwefeldioxid- und die Stickstoffdioxidkonzentration verwendet. Durch Industrieemissionen wird Schwefeldioxid ausgestoßen. Schwefelige Säuren, die zum Beispiel durch gelöstes Schwefeldioxid entstehen, verursachen Korrosion [22]. In großen Städten und Ballungsräumen kommt es zu hohen Emissionen [25]. Diese verstärken Fouling und können zum Beispiel über die Stickstoffdioxidkonzentration identifiziert werden [18].

Die Wertebereiche der Umgebungsparameter (mit Ausnahme der Tage mit Niederschlag) sind in BILD 1 durch einen Pfeil am linken Rand gekennzeichnet. Sie werden für jeden Umgebungsparameter individuell bestimmt. Für die Festlegung der Wertebereiche werden Flughäfen mit ausreichenden Varianzen in den Umgebungsdaten betrachtet, um eine zu feine Auflösung der Wertebereiche zu vermeiden. Ausreichende Varianzen in den Umgebungsdaten ergeben sich durch die Berücksichtigung von Flughäfen, die in unterschiedlichen Regionen wie zum Beispiel Wüsten, tropischen Gebieten und großen Städten liegen. Mit Varianz werden in diesem Kontext für jeden Umgebungsparameter die Unterschiede zwischen den Umgebungsdaten verschiedener Flughäfen bezeichnet.

Zur besseren Übersichtlichkeit wird jeder Wertebereich in Unterbereiche eingeteilt. In BILD 1 werden zum Beispiel für den Wertebereich der Partikelkonzentration vier Unterbereiche unterschieden. Die Angabe von Unterbereichen erleichtert die Beurteilung der Varianz von Umgebungsdaten verschiedener Flughäfen. Die Unterbereiche werden über die Varianzen der Umgebungsdaten von den Flughäfen abgeleitet, die zur Bestimmung der Wertebereiche berücksichtigt werden. Die Niederschlagsmenge und die Anzahl an Tagen mit Niederschlag hängen zusammen. Beide Umgebungsparameter werden wie in BILD 1 abgebildet gruppiert. Dazu werden zunächst Unterbereiche für den Wertebereich der Niederschlagsmenge gebildet. Jedem dieser Unterbereiche wird der Wertebereich für die Tage mit Niederschlag zugeordnet. Dies ist in BILD 1 durch Pfeile an jedem Unterbereich der Niederschlagsmenge dargestellt. Für jeden Unterbereich der Niederschlagsmenge wird der Wertebereich der Tage mit Niederschlag in Unterbereiche eingeteilt. Die Einteilung ist für jeden Unterbereich der Niederschlagsmenge gleich.

Für jeden Umgebungsparameter werden Jahresmittelwerte der angeflogenen Flughäfen in den Wertebereich der Flughafensignaturen eingetragen. Dies ist in BILD 1 für zwei Flughäfen exemplarisch durchgeführt. Durch Verbindung der Umgebungsdaten eines Flughafens ergibt sich dessen Signatur. Umgebungsbedingungen an Flughäfen werden somit durch die Erstellung von Flughafensignaturen vergleichbar.

Die Klassifikation der Umgebungsbedingungen erfolgt über die Varianz der Umgebungsdaten, die für die angeflogenen Flughäfen einer Flotte ermittelt werden. Für eine vorgegebene Flugroute können Umgebungsparameter mit Einfluss auf die Leistungsverlechterung von Serientriebwerken nicht beeinflusst werden. Sind Umgebungsdaten verschiedener Flughäfen für einen Umgebungsparameter ähnlich, weisen diese keine oder nur eine geringe Varianz auf. In BILD 1 ist dies exemplarisch für die Schwefeldioxidkonzentration dargestellt. Sind Umgebungsdaten von allen angeflogenen Flughäfen für Umgebungsparameter ähnlich, können diese

Umgebungsparameter aufgrund fehlender Varianz als Unterscheidungsfaktoren vernachlässigt werden. Alle Umgebungsparameter, die für angeflogene Flughäfen unterschieden werden können, sind Unterscheidungsfaktoren. Sie müssen bei der Analyse des Alterungsverhaltens berücksichtigt werden. Die Anzahl an Unterscheidungsfaktoren entspricht maximal der Anzahl an Einflussfaktoren. Durch die Reduzierung der zu berücksichtigenden Umgebungsparameter erfolgt eine Reduzierung der Komplexität.

#### 4. ANWENDUNG DER FLUGHAFENSIGNATUREN

##### 4.1. Ergebnisse

Die Flughafensignaturen werden auf die Flugdaten verschiedener Flotten des jeweils gleichen Triebwerkstyps angewandt. Die Ergebnisse sind in BILD 2 bis BILD 4 dargestellt. Für jede Flotte wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur eine Auswahl der angeflogenen Flughäfen gezeigt. Die Werte für unterschiedliche Flughäfen sind horizontal versetzt in jeder Spalte aufgetragen. Es werden Jahresmittelwerte für die Partikelkonzentration [26, 27], die Umgebungstemperatur [28, 29], die relative Luftfeuchtigkeit [29], die Druckhöhe [30], die Niederschlagsmenge [28, 29], die Tage mit Niederschlag [28, 29], die Stickstoffdioxidkonzentration [31] und die Schwefeldioxidkonzentration [31] für jeden Flughafen betrachtet (Datenbasis deutscher Wetterdienst [29]: Werte bearbeitet). Die Partikelkonzentration setzt sich aus der Staub- und Meersalzkonzentration zusammen. Die Niederschlagsmenge entspricht zahlenmäßig der Niederschlagshöhe.

Die Wertebereiche und die Einteilung in Unterbereiche stimmen in BILD 2 bis BILD 4 überein. Die Wertebereiche sind so gewählt, dass die Umgebungsdaten für alle betrachteten Flughäfen abgebildet werden können. Die Wertebereiche beginnen für die Partikelkonzentration bei  $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ , für die Umgebungstemperatur bei  $-20^\circ\text{C}$ , für die relative Luftfeuchtigkeit bei  $0\%$ , für die Druckhöhe bei  $-70\text{m}$ , für die Niederschlagsmenge bei  $0\text{mm}$ , für die Tage mit Niederschlag bei  $0$  Tagen und für die Stickstoffdioxid- und Schwefeldioxidkonzentration jeweils bei  $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Eine Übersicht der Einteilung der Wertebereiche in Unterbereiche ist in TAB 1 gegeben. Die pro Umgebungsparameter angegebenen Werte entsprechen der Breite eines Unterbereichs. Die Unterbereiche werden wie in Abschnitt 3.2 beschrieben festgelegt. Für die Stickstoffdioxidkonzentration wird eine Breite von  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$  für jeden Unterbereich gewählt. Dieser Wert entspricht dem Jahreshgrenzwert für die Bundesrepublik Deutschland [32]. Für Schwefeldioxid wird der kritische Jahreswert verwendet, da in der Bundesrepublik Deutschland für die Schwefeldioxidkonzentration kein Jahreshgrenzwert festgelegt wurde [33]. Mit Ausnahme der Partikelkonzentration wird jeder Wertebereich in gleich große Unterbereiche eingeteilt. Die Partikelkonzentration variiert weltweit zwischen unter  $0,05\mu\text{g}/\text{m}^3$  in arktischen Regionen und über  $500\mu\text{g}/\text{m}^3$  in Gebieten der Sahara [26, 27]. Für die betrachteten Flughäfen sind große Varianzen in den Partikelkonzentrationen vorhanden. Ca. 90% dieser Partikelkonzentrationen liegen in der ersten Hälfte des Wertebereichs (unter  $85\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Deswegen wird für diesen Umgebungsparameter keine lineare Einteilung in

Unterbereiche vorgenommen. Der erste Unterbereich der Partikelkonzentration beginnt bei  $0\mu\text{g}/\text{m}^3$  und endet bei  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ , der zweite Unterbereich endet bei  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  und der dritte Unterbereich bei  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Umgebungsparameter	Einteilung in Unterbereiche
$\beta_p [\mu\text{g}/\text{m}^3]$	10; 40; 50; 70
T [°C]	20
$\varphi$ [%]	20
h [m]	250
N [mm]	50
d [d]	5
$\beta_{\text{NO}_2} [\mu\text{g}/\text{m}^3]$	40
$\beta_{\text{SO}_2} [\mu\text{g}/\text{m}^3]$	20

TAB 1: Übersicht zur Einteilung der Wertebereiche in Unterbereiche für die betrachteten Umgebungsparameter

In BILD 2 sind exemplarisch zwei Flughafensignaturen zu sehen, die von einer Flotte angeflogen werden. Beide Flughäfen liegen in Asien.

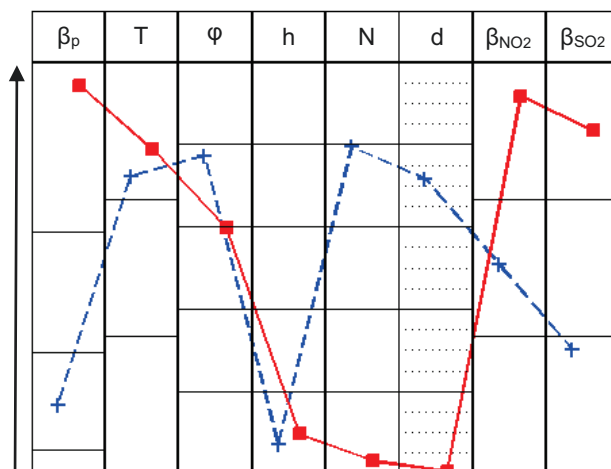


BILD 2: Anwendung der Flughafensignaturen auf zwei Flughäfen (Flughafen 1: +; Flughafen 2: ■)

Die Umgebungstemperatur und die Druckhöhe beider Flughäfen sind ähnlich. Sie unterscheiden sich um  $4^\circ\text{C}$  bzw.  $32\text{m}$ . Diese beiden Umgebungsparameter können für diese Flughäfen als Unterscheidungsfaktoren vernachlässigt werden. Für alle weiteren Umgebungsparameter sind in BILD 2 deutliche Abweichungen zwischen den Flughäfen zu erkennen. Die Partikelkonzentration an Flughafen 2 beträgt das Sechsfache der Partikelkonzentration an Flughafen 1. Flughafen 2 liegt in der Wüste. Die hohe Partikelkonzentration an Wüstenflughäfen führt zu verstärkter Erosion [4]. Die relative Luftfeuchtigkeit

unterscheidet sich für die Flughäfen um 18%. Die hohe relative Luftfeuchtigkeit an Flughafen 1 kann die verstärkte Bildung von Ablagerungen begünstigen. Die Niederschlagsmenge an Flughafen 1 beträgt das 25fache von Flughafen 2. Im Jahresmittel ist an Flughafen 1 mit 11 Niederschlagstagen mehr pro Monat als an Flughafen 2 zu rechnen. Aufgrund der geringen Niederschlagsmengen an Flughafen 2 ist zu erwarten, dass die Bildung von Ablagerungen bei Niederschlag verstärkt wird. Durch die großen Niederschlagsmengen von etwa 200mm pro Monat an Flughafen 1 können Ablagerungen teilweise gelöst werden. Die Stickstoffdioxidkonzentration ist an Flughafen 2 ca. doppelt so hoch wie an Flughafen 1. Für die Schwefeldioxidkonzentration beträgt der Unterschied etwa das Dreifache. Es ist zu erwarten, dass die Umweltbelastung an Flughafen 2 zu verstärkter Erosion, Korrosion und Fouling führt. Die Umgebungsparameter mit Varianzen in den Umgebungsdaten von beiden Flughäfen müssen als wesentliche Einflussfaktoren auf die Alterungsmechanismen bei der Analyse des Alterungsverhaltens berücksichtigt werden.

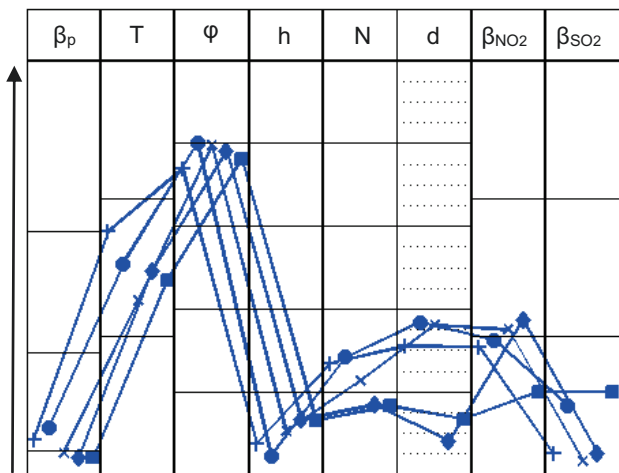


BILD 3: Anwendung der Flughafensignaturen auf fünf Flughäfen (Flughafen 3: +; Flughafen 4: ●; Flughafen 5: x; Flughafen 6: ◆; Flughafen 7: ■)

BILD 3 zeigt die Flughafensignaturen von fünf europäischen Flughäfen. Es sind Flughäfen aus Nord-, West-, Ost- und Südeuropa abgebildet. Im Vergleich zu BILD 2 fällt die Ähnlichkeit der Flughafensignaturen auf. Die Partikelkonzentration der Flughäfen unterscheidet sich um maximal  $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dieser Unterschied ist im Vergleich zu einer Partikelkonzentration von über  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$  an Flughafen 2 in BILD 2 vernachlässigbar. Die Umgebungstemperatur der Flughäfen unterscheidet sich um maximal  $10^\circ\text{C}$ . Alle Umgebungstemperaturen liegen zwischen  $5^\circ\text{C}$  und  $20^\circ\text{C}$ . In diesem Temperaturbereich können Unterschiede im Alterungsverhalten auftreten. Es ist jedoch zu erwarten, dass diese Unterschiede gering sind. Die relative Luftfeuchtigkeit unterscheidet sich maximal um 6% und die Druckhöhe um 110m. Bezüglich dieser Umgebungsparameter sind die Flughäfen ähnlich. Die Niederschlagsmenge variiert um weniger als das Doppelte und die Tage mit Niederschlag in einem Monat um weniger als 9 Tage. Die Grenzwerte für die jährliche Stickstoffdioxidkonzentration werden bei zwei Flughäfen um maximal  $5\mu\text{g}/\text{m}^3$  überschritten, bei Schwefeldioxid bleiben die Werte aller Flughäfen unter dem kritischen

Jahresmittelwert. Für die in BILD 3 gezeigten Flughafensignaturen sind somit Umgebungstemperatur, Niederschlagsmenge und Tage mit Niederschlag die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Alterungsmechanismen. Die Varianz dieser Umgebungsdaten ist im Vergleich zu der Varianz für die in BILD 2 gezeigten Flughäfen gering.

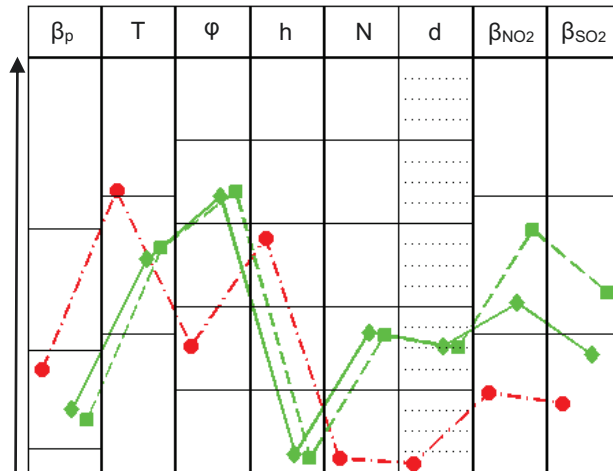


BILD 4: Anwendung der Flughafensignaturen auf drei Flughäfen (Flughafen 8: ●; Flughafen 9: ◆; Flughafen 10: ■)

In BILD 4 sind für eine weitere Flotte die Flughafensignaturen für drei der angeflogenen Flughäfen abgebildet. Die Flotte operiert vorwiegend in Nord- und Mittelamerika. Die Umgebungsdaten von Flughafen 9 und 10 sind mit Ausnahme der Umgebungsdaten für die Umweltbelastung ähnlich. Für diese Flughäfen können als Einflussfaktoren auf die Alterungsmechanismen nur die Stickstoffdioxid- und Schwefeldioxidkonzentration unterschieden werden. Alle weiteren Umgebungsparameter sollten aufgrund der ähnlichen Umgebungsdaten zu ähnlichen Alterungseffekten führen. Die Umgebungsdaten von Flughafen 8 weichen für alle Umgebungsparameter von Flughafen 9 und 10 ab. Dies wird durch die Flughafensignatur grafisch verdeutlicht.

Für eine Flotte, die wie in BILD 4 Flughäfen mit ähnlichen und unterschiedlichen Flughafensignaturen anfliegt, können die Flughäfen mit ähnlichen Flughafensignaturen gruppiert werden. Dies trifft in BILD 4 für Flughafen 8 und 9 zu. Umgebungsparameter mit ähnlichen Umgebungsdaten müssen für die Flughäfen einer Flughafengruppierung nicht unterschieden werden. Sind die Umgebungsdaten aller Umgebungsparameter einer Flughafengruppierung ähnlich, kann eine Flughafensignatur für die Flughafengruppierung verwendet werden. Diese Flughafensignatur ergibt sich durch Mittelung der einzelnen Flughafensignaturen. Über die Flughafensignaturen können Flughafengruppierungen und Umgebungsparameter mit ähnlichen Umgebungsdaten pro Flughafengruppe ermittelt werden.

Sind die Signaturen aller von einer Flotte angeflogenen Flughäfen ähnlich, ist eine reine Flugzyklenzählung zur Analyse des Alterungsverhaltens von Serientriebwerken ausreichend. Aufgrund fehlender Varianz in den

Umgebungsdaten der angeflogenen Flughäfen ist zu erwarten, dass alle Triebwerke durch die Umgebungseinflüsse ähnlich altern. Dies kann zum Beispiel für regional operierende Flotten der Fall sein.

Werden Flughäfen mit großer Varianz in den Umgebungsdaten angeflogen, kann über die Flughafensignaturen ermittelt werden, welche Umgebungsparameter als Unterscheidungsfaktoren zusätzlich zur Flugzyklenzählung berücksichtigt werden sollten. Die Reihenfolge und die Häufigkeit, mit der die Flughäfen angeflogen werden, müssen in diesen Fällen beachtet werden.

#### 4.2. Berücksichtigung der Flugzeugrotation in einer Flotte

Die Häufigkeit, mit der Flughäfen angeflogen werden, kann für die Flugzeuge einer Flotte variieren. Die Flugzeugrotation in einer Flotte ist von Bedeutung, wenn die angeflogenen Flughäfen große Varianzen in den Umgebungsdaten, wie zum Beispiel für die Flughafensignaturen in BILD 2, aufweisen.

In BILD 5 und BILD 6 sind für zwei unterschiedliche Flotten des gleichen Triebwerkstyps die Häufigkeiten, mit der fünf Flughäfen angeflogen werden, für jeweils drei Flugzeuge dargestellt. Die Häufigkeiten werden durch die Auswertung von Flugdaten ermittelt [30] und auf die Gesamtzahl an Flügen des jeweiligen Flugzeugs normiert. Die in BILD 5 und BILD 6 gezeigten Flughäfen stimmen nicht überein. Die beiden Flotten werden im Folgenden mit Flotte 1 (BILD 5) und Flotte 2 (BILD 6) bezeichnet.

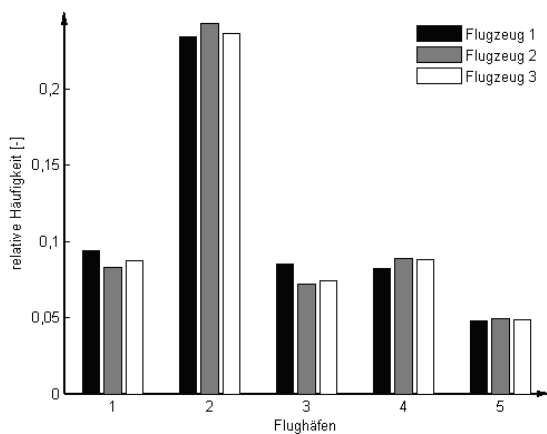


BILD 5: Häufigkeit, mit der drei Flugzeuge von Flotte 1 unterschiedliche Flughäfen anfliegen

Die Flughäfen in BILD 5 werden von den drei Flugzeugen in etwa gleich häufig angeflogen. Der maximale Unterschied tritt bei Flughafen 3 auf. Er beträgt 1,3% zwischen Flugzeug 1 und Flugzeug 2. Für die restlichen Flughäfen, die von Flotte 1 angeflogen werden, ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Flugzeuge von Flotte 1 werden somit alle gleichmäßig rotiert. Aufgrund der gleichmäßigen Rotation ist zu erwarten, dass auch Umgebungseinflüsse von Flughäfen mit großer Varianz in den Umgebungsdaten zu einem ähnlichen Alterungsverhalten der Triebwerke führen.

Von Flotte 1 werden Flughäfen angeflogen, die in mehrere Flughafengruppen mit jeweils ähnlichen Flughafensignaturen gruppiert werden können. Flughafen 1 und Flughafen 2 in BILD 5 gehören zum Beispiel zu einer Flughafengruppe. Die Flughäfen in einer Flughafengruppe müssen bezüglich Reihenfolge und Häufigkeit, mit der sie von den Flugzeugen einer Flotte angeflogen werden, nicht unterschieden werden.

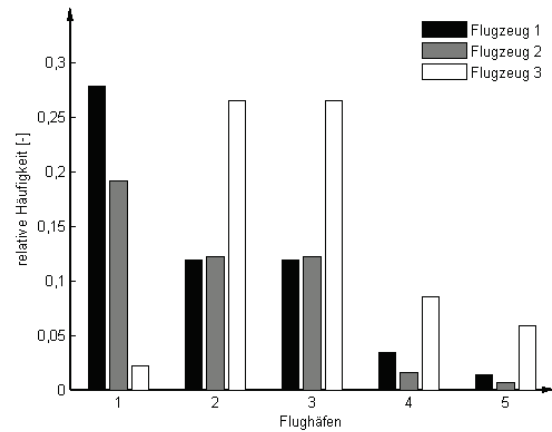


BILD 6: Häufigkeit mit der drei Flugzeuge von Flotte 2 unterschiedliche Flughäfen anfliegen

Wie in BILD 6 zu erkennen ist, findet bei Flotte 2 keine gleichmäßige Rotation der Flugzeuge statt. Bei großer Varianz in den Umgebungsdaten der angeflogenen Flughäfen ist eine unterschiedliche Alterung der Triebwerke dieser Flotte zu erwarten. Für die in BILD 2 dargestellten Flughafensignaturen bedeutet dies zum Beispiel, dass bei fehlender Flugzeugrotation die Alterung von den Triebwerken einer Flotte, die Flughafen 1 häufiger anfliegen, durch Fouling dominiert sein kann, wohingegen Triebwerke, die Flughafen 2 häufiger anfliegen, vorwiegend durch Erosion altern sollten. Über Flughafensignaturen kann somit bei fehlender Flugzeugrotation herausgefunden werden, ob Flughäfen mit unterschiedlichen Signaturen angeflogen werden und deswegen Unterschiede im Alterungsverhalten der Triebwerke einer Flotte auftreten können.

#### 4.3. Erweiterung der Flughafensignaturen

Für die Erstellung der Flughafensignaturen wurden in Abschnitt 4.1. Jahresmittelwerte verwendet. Die Umgebungsbedingungen schwanken durch zum Beispiel saisonale Einflüsse um die Jahresmittelwerte. Untersuchungen dieser Schwankungen [28, 29, 30, 34, 35] zeigen Unterschiede für verschiedene Flughäfen (Datenbasis deutscher Wetterdienst [29]: Werte bearbeitet). Die Umgebungstemperatur eines Flughafens in tropischen Gebieten schwankt zum Beispiel weniger als die Umgebungstemperatur eines Flughafens mit kontinentalem Klimaeinfluss. In BILD 7 ist exemplarisch die Schwankung der Umgebungstemperatur für zwei Flughäfen abgebildet [28]. Die Balken geben an, mit welcher relativen Häufigkeit die Umgebungstemperatur in einem jeweils 5°C großen Temperaturbereich liegt. Während die Umgebungstemperatur von Flughafen 1 sehr breit von -5°C bis 25°C streut, hat die Verteilung von Flughafen 2 eine deutlich geringere Varianz. Die

Umgebungstemperatur dieses Flughafens streut zwischen 20°C und 30°C.

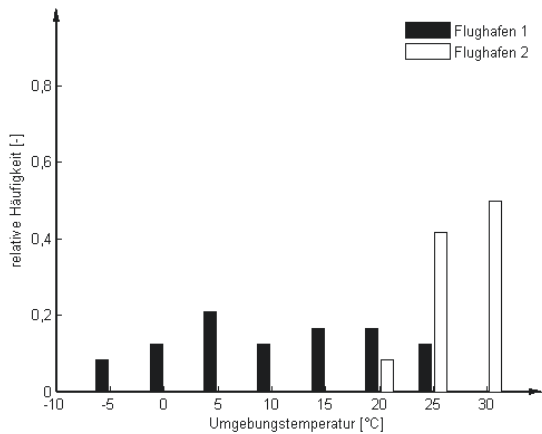


BILD 7: Schwankungen der Umgebungstemperatur für zwei Flughäfen

Die Flughafensignaturen können erweitert werden, indem zusätzlich zu den Jahresmittelwerten die Schwankungen der Umgebungsparameter berücksichtigt werden. In BILD 8 ist dies für die Flughafensignaturen aus BILD 4 durchgeführt. Die maximale und minimale Schwankung für jeden Umgebungsparameter werden aus monatlichen Mittelwerten für die Partikelkonzentration [35], die Umgebungstemperatur [28, 29], die relative Luftfeuchtigkeit [29], die Druckhöhe [30], die Niederschlagsmenge [28, 29], die Tage mit Niederschlag [28, 29], die Stickstoffdioxidkonzentration [34] und die Schwefeldioxidkonzentration [34] bestimmt (Datenbasis deutscher Wetterdienst [29]: Werte bearbeitet). Sind Stickstoffdioxid- oder Schwefeldioxidkonzentrationen in ppm oder ppb gegeben, werden diese in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  umgerechnet [31]. Für die Umgebungstemperatur werden monatliche Mittelwerte für Maximal- und Minimaltemperatur berücksichtigt. Alternativ kann die Schwankungsbreite aus zum Beispiel Tagesmittelwerten oder stündlichen Mittelwerten für die Umgebungsparameter ermittelt werden. In diesen Fällen ist mit einer größeren Schwankung der Umgebungsparameter zu rechnen, da Extremwerte stärker Tagesmittelwerte oder stündliche Mittelwerte beeinflussen. Für die Partikelkonzentration ist es schwierig deren Schwankungen zu ermitteln, da weltweit nur wenige Messstationen existieren. Für die in BILD 4 gezeigten Jahresmittelwerte aus Modellsimulationen [26, 27] stehen keine ausreichenden Angaben zu Schwankungen der Partikelkonzentration zur Verfügung. Die in BILD 8 dargestellten Schwankungen der Partikelkonzentrationen werden deswegen aus Schwankungen der zu den Flughäfen nächstgelegenen Messstation ermittelt [35]. Dazu wird angenommen, dass die prozentualen Abweichungen vom Mittelwert für die in BILD 8 gezeigten Flughäfen und die nächstgelegene Messstation gleich sind. Diese Schwankungen sind nur Schätzwerte. Es können lokale Abweichungen auftreten.

Die Schwankungen der Umgebungsparameter sind in BILD 8 durch Fehlerbalken gekennzeichnet. Durch Verbindung von jeweils Schwankungsminima und Schwankungsmaxima für einen Flughafen ergibt sich eine

dazwischenliegende Fläche, in denen die Umgebungsdaten des Flughafens liegen. Die Flughafensignaturen aus BILD 4 weiten sich somit bei Berücksichtigung der Schwankung zu Korridoren auf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in BILD 8 die Umgebungsdaten für die Flughäfen nicht verbunden.

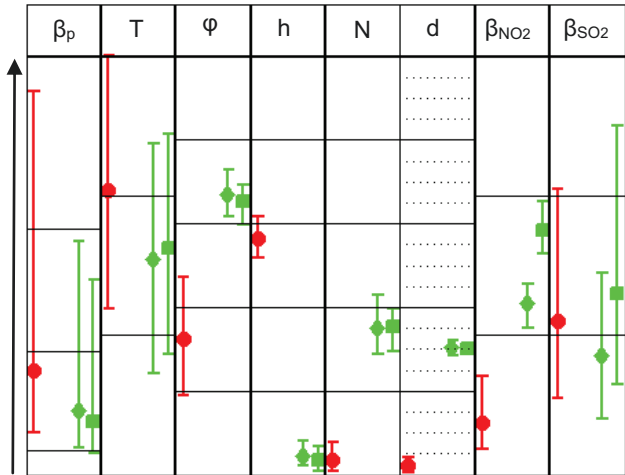


BILD 8: Flughafensignaturen mit Berücksichtigung der Umgebungsparameterschwankung (Flughafen 8: ●; Flughafen 9: ◆; Flughafen 10: ■)

In BILD 8 schwankt die Umgebungstemperatur für alle drei Flughäfen um über 20°C. Für Umgebungsparameter mit Schwankungen in dieser Größenordnung muss auch für Flughäfen mit ähnlichen Flughafensignaturen ein die Schwankung charakterisierender Parameter mitberücksichtigt werden. Aufgrund der Betrachtung von Schwankungen, die auf monatlichen Mittelwerten basieren, bietet sich die Berücksichtigung des Monats an, in dem die Flughäfen angefliegen werden. Durch große Schwankungen der Umgebungsparameter können trotz gleichmäßiger Flugzeugrotation Unterschiede im Alterungsverhalten der Flugzeuge einer Flotte entstehen.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für die Klassifikation von Umgebungsbedingungen mit Einfluss auf das Alterungsverhalten von Serientriebwerken wurden Flughafensignaturen verwendet. Dazu wurden pro Flughafen Jahresmittelwerte für zuvor identifizierte Umgebungsparameter ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass Umgebungsbedingungen an Flughäfen durch die Anwendung von Flughafensignaturen vergleichbar werden. Anhand der Ergebnisse von Beispielfällen ist zu erkennen, dass durch die Unterscheidung zwischen Einflussfaktoren und Unterscheidungsfaktoren die wesentlichen Umgebungsparameter mit Einfluss auf Alterungsmechanismen ermittelt werden können.

Die Flughafensignaturen konnten durch Berücksichtigung der Schwankungen von Umgebungsparametern erweitert werden. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Flughafensignaturen zu Korridoren aufweiten und für Umgebungsparameter mit großen Schwankungen ein die Schwankung charakterisierender Parameter berücksichtigt werden muss.



Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Verwendung von Flughafensignaturen die Komplexität der Einflussfaktoren auf Alterungsmechanismen und den Alterungsprozess von Serientriebwerken reduziert werden konnte. In weiterführenden Untersuchungen kann durch den Abgleich mit Daten aus Zustandsüberwachungssystemen nachgewiesen werden, dass über Flughafensignaturen Unterschiede im Alterungsverhalten klassifiziert werden können. Eine Übertragung der beschriebenen Methode auf weitere von den Flughäfen unabhängige Einflussfaktoren ist möglich.

## DANKSAGUNG

Diese Untersuchungen, die zu diesen Ergebnissen geführt haben, wurden durch das 7. EU-Rahmenprogramm mit der Fördernummer 314366 gefördert, Projekt E-BREAK ([www.e-break.eu](http://www.e-break.eu)). Die Autorin dankt dem Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt für die zur Verfügung gestellten Informationen zu weltweiten Partikelkonzentrationen.

## LITERATUR

- [1] Rupp, O.: Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken. DGLR Kongress 2001, DGLR 2001-008, Hamburg, 2001.
- [2] Simon, B.: Umweltinformationen, Maßnahmen zur Minderung des Schadstoffausstoßes von Flugzeugtriebwerken. <http://www.munich-airport.de/media/download/bereiche/umw/schadstoff.pdf>, Abruf: 27.08.2015
- [3] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) - Penner, J. E., Lister, D. H., Griggs, D. J., et al. (Hrsg.): Aviation and the Global Atmosphere. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [4] Schirmeister, F.: Untersuchungen zum Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Leistungsver schlechterung von Turboluftstrahltriebwerken. Dissertation, Universität Stuttgart, 2013.
- [5] Lipowsky, H.: Entwicklung und Demonstration eines integrierten Systems zur Zustandsüberwachung von Gasturbinen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2010.
- [6] Volponi, A. J.: Gas Turbine Engine Health Management Past, Present and Future Trends. ASME Turbo Expo 2013, GT2013-96026, San Antonio, Texas, 2013.
- [7] Eichler, C.: Instandhaltungstechnik. 2. Aufl. VEB Verlag Technik, Berlin, 1979.
- [8] Diakunchak, I. S.: Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 114(2), S. 161-168, 1992.
- [9] Kurz, R., Brun, K.: Degradation in Gas Turbine Systems. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 123(1), S. 70-77, 2001.
- [10] Tabakoff, W.: Compressor Erosion and Performance Deterioration. Journal of Fluids Engineering, 109(3), S. 297-306, 1987.
- [11] Batcho, P. F., Moller, J. C., Padova, C., Dunn, M. G.: Interpretation of Gas Turbine Response Due to Dust Ingestion. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 109(3), S. 344-352, 1987.
- [12] Zaita, A. V., Buley, G., Karlsons, G.: Performance Deterioration Modeling in Aircraft Gas Turbine Engines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 120(2), S. 344-349, 1998.
- [13] Kurz, R., Brun, K.: Gas Turbine Tutorial – Maintenance and Operating Practices Effects on Degradation and Life. Proceedings of the Thirty-Sixth Turbomachinery Symposium, 2007.
- [14] Syverud, E., Brekke, O. und Bakken, L.E.: Axial Compressor Deterioration Caused by Saltwater Ingestion. ASME Turbo Expo 2005, GT2005-68701, Reno-Tahoe, Nevada, 2005.
- [15] Ebmeyer, C., Wensky, T., Friedrichs, J., Zachau, U.: Evaluation of Total Engine Performance Degradation Based on Modular Efficiencies. ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45839, Vancouver, 2011.
- [16] Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, T. S., Kim, J. H., Ro, S. T.: An Improved Analytic Model to Predict Fouling Phenomena in the Axial Compressor of Gas Turbine Engines. Proceedings of the International Gas Turbine Congress, Tokyo, 2003.
- [17] Müller, M. H.: Untersuchungen zum Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Schädigung und Instandhaltung von Turboluftstrahltriebwerken. Dissertation, Universität Stuttgart, 2013.
- [18] Wensky, T., Winkler, L., Friedrichs, J.: Environmental Influences on Engine Performance Degradation. ASME Turbo Expo 2010, GT2010-22748, Glasgow, 2010.
- [19] Lauer, A., Hendricks, J., Ackermann, I., Schell, B., Hass, H., Metzger, S.: Simulating Aerosol Microphysics with the ECHAM/MADE GCM Part I: Model Description and Comparison with Observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 5, S. 3251-3276, 2005.
- [20] Spieler, S., Staudacher, S., Fiola, R., Sahm, P., Weißschuh, M.: Probabilistic Engine Performance Scatter and Deterioration Modeling. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 130(4), 042507, 2008.
- [21] Stalder, J.-P.: Gas Turbine Compressor Washing State of the Art: Field Experiences. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 123(2), S. 363-370, 2001.
- [22] Rossmann, A.: Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken. Band 1. Einführung, Schadensanalyse, Fremdkörper,

- Umgebungseinflüsse. 1. Aufl. Turbo Consult, Karlsfeld, 2000.
- [23] Schönwiese, C. D.: Klimatologie. 3. Aufl. UTB, Stuttgart, 2008.
- [24] Umweltbundesamt: Luftschadstoffe im Überblick.  
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaadstoffe-im-ueberblick>, Abruf: 10.08.2015
- [25] Umweltbundesamt: Stickstoffdioxid-Belastung.  
<http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/stickstoffdioxid-belastung>, Abruf: 10.08.2015
- [26] Lauer, A., Eyring, V., Hendricks, J., Jöckel, P., Lohmann, U.: Global Model Simulations of the Impact of Ocean-Going Ships on Aerosols, Clouds, and the Radiation Budget. Atmospheric Chemistry and Physics, 7, S. 5061-5079, 2007.
- [27] Righi, M., Hendricks, J., Sausen, R.: The Global Impact of the Transport Sectors on Atmospheric Aerosol: Simulations for Year 2000 Emissions. Atmospheric Chemistry and Physics, 13, S. 9939-9970, 2013.
- [28] National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und Weltorganisation für Meteorologie (WMO): Weltweite Wetterinformationen.  
<http://www.wwis.dwd.de/de/country.html?countryCode=93>, Abruf: 15.04.2015
- [29] Deutscher Wetterdienst: Klimadaten weltweit – online - frei. Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Werte bearbeitet.  
[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwww.Desktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimadaten%2FKlIdaten\\_\\_kostenfrei%2FKlIdat\\_welt\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwww.Desktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2FKlIdaten__kostenfrei%2FKlIdat_welt_node.html%3F__nnn%3Dtrue), Abruf: 02.03.2015
- [30] MTU Aero Engines AG: ETM Daten, 2014.  
<http://www.mtu.de/de/maintenance/zivile-maintenance/flottenmanagement-und-beratung/mtuplus-engine-trend-monitoring/>
- [31] Baldasano, J. M., Valera, E., Jiménez, P.: Air Quality Data from Large Cities. The Science of the Total Environment, 307, S. 141-165, 2003.
- [32] Umweltbundesamt: Stickstoffoxide.  
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaadstoffe/stickstoffoxide>, Abruf: 13.04.2015
- [33] Umweltbundesamt: Schwefeldioxid.  
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaadstoffe/schwefeldioxid>, Abruf: 13.04.2015
- [34] EPA (United States Environmental Protection Agency): AirData.  
<http://www.epa.gov/airquality/airdata/>, Abruf: 06.08.2015
- [35] Huneus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, J., et al.: Global Dust Model Intercomparison in AeroCom Phase I. Atmospheric Chemistry and Physics, 11, S. 7781-7816, 2011.