

Aerodynamische und aeroakustische Vermessung eines Axialventilators unter Verwendung statistischer Methoden

Nina Maimuna Balde^{1*}, Till M. Biedermann¹, Frank Kameier¹ und C.O. Paschereit²

¹ Hochschule Düsseldorf, Institute of Sound and Vibration Engineering ISAVE, 40476 Düsseldorf

*E-Mail: nina.balde@study.hs-duesseldorf.de

² TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik ISTA, 10623 Berlin

Einleitung

Zur Charakterisierung der aerodynamischen und aeroakustischen Eigenschaften eines Axialventilators unter hochturbulenten Zuströmbedingungen wird im Regelfall das gesamte arbeitsspezifische Kennfeld mit Messpunkten äquidistanter Schrittweite untersucht. Mit der Frage, inwiefern man mit Hilfe statistischer Methoden einen gleichwertigen Erkenntnisgewinn bei einem deutlich geringeren Versuchsaufwand erhält [1], wurde ein Niederdruck-Axialventilator untersucht. Unter Variation des Drosselzustands, der Drehzahl sowie des Turbulenzgrades der Zuströmung wurden Zielgrößen aerodynamischer und aeroakustischer Natur ausgewertet.

Dabei wurden drei verschiedene Ansätze zur Modellbildung verwendet und anschließend miteinander verglichen: Das Box-Behnken Design und das Zentral-Zusammengesetzte Design (statistische Modellbildung) sowie das Latin-Hypercube Design in Verbindung mit neuronalen Netzen.

Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments DoE) findet immer häufiger Gebrauch im Bereich der Industrie, Besonders dann, wenn Produktionsprozesse optimiert werden sollen [2]. Dieses Werkzeug wird auch eingesetzt, wenn es darum geht, die optimalen Einstellungen für unterschiedliche Parameter und Faktoren, die den Produktionsprozess beeinflussen, zu ermitteln. So lassen sich Aussagen über die Abhängigkeiten innerhalb des Systems und deren Einfluss- und Zielparameter untereinander treffen.

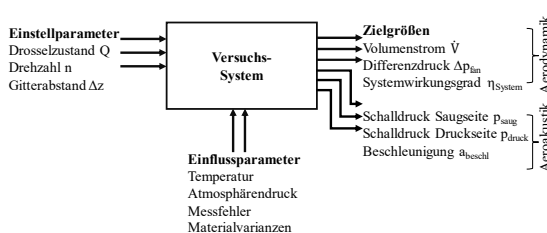


Abbildung 1: Versuchssystem (schematisch)

Eines der wichtigsten Ziele der statistischen Versuchsplanung ist es, den Versuchsaufwand so gering wie möglich zu halten, ohne dabei an Erkenntnisgewinn zu verlieren. So erlaubt der statistische Ansatz mit zuvor definierten Versuchsplänen eine minimale Anzahl von Versuchen auszuführen, bei denen systematisch bestimmte Versuchs-Einstellparameter variiert werden. Aus den so gewonnenen Daten kann mit Hilfe von Regressionsanalysen eine Modellbildung realisiert werden. Die Stabilität und Aussagekraft bzw. Präzision werden durch die additive Messung von unabhängigen Testpunkten im Versuchsraum validiert.

Wie Abbildung 1 zeigt, besteht das Versuchssystem aus Einstellparametern, welche den n-dimensionalen Raum aufspannen und Einflussparametern (Randbedingungen), welche auf das System einwirken. Die aus der Systemanregung resultierenden Antworten sind die Zielgrößen, welche die spezifischen Systemeigenschaften charakterisieren. Die Zielgrößen sind sowohl aerodynamischer (Volumenstrom, statische Druckdifferenz, Systemwirkungsgrad) als auch aeroakustischer (Schalldruck saugseitig und druckseitig) und vibroakustischer (Beschleunigung) Natur.

Tabelle 1: Systemgrenzen

Systemgrenze	Gitterabst. [mm]	Drosselzust. [%]	Drehzahl [1/min]
Min	100	0	1000
Max	500	100	2000

Die Systemgrenzen, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind, gelten für alle drei verwendeten Modell-Ansätze. Die Einstellparameter sind alle stufenlos einstellbar, damit die Versuchspläne mit maximaler Einstellgenauigkeit abgefahren werden können.

Das Box-Behnken Design (BBD, Abbildung 2, links) ist ein dreistufiger Versuchsplan, bei dem sich die Versuchspunkte in der Mitte der Kanten des Modellraumes befinden, d.h., dass die zwei verbleibenden Einstellparameter auf mittlerem Level verbleiben, während der Dritte das Minimum oder Maximum anfährt. Im Gegensatz dazu befinden sich im zentral zusammengesetzten Design (ZZD, Abbildung 2, rechts) alle Faktorstufen für den vollfaktoriellen Kern auf lokalen Maxima/Minima, während zusätzliche Sternpunkte existieren, welche die Systemgrenzen abdecken. In diesem Fall handelt es sich um einen fünfstufigen Versuchsplan, welcher orthogonale und drehbare Eigenschaften aufweist. Beide Designs erlauben eine Modellbildung mit Funktionen erster und zweiter Ordnung.

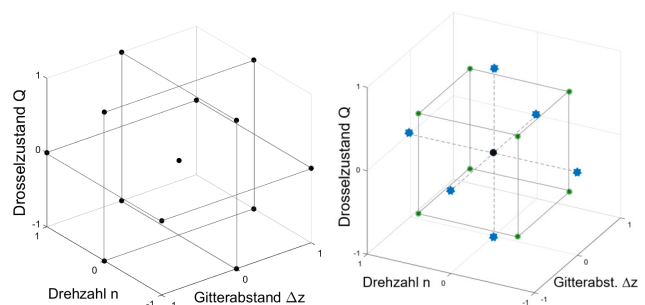


Abbildung 2: Schematische Darstellung der normierten Versuchspläne: Box-Behnken Design BBD (links) und Zentral-Zusammengesetztes Design ZZD (rechts)

Mit dem Ziel den Versuchsraum mit Hilfe neuronaler Netze zu approximieren um auch Zusammenhänge darstellen zu können, welche in ihrer Komplexität über eine quadratische Abhängigkeit hinausgehen, wurde sich des n-stufigen Latin-Hypercube Designs (LHD) bedient (Abbildung 3, links). Dieses entstammt ursprünglich dem „Machine-Learning“ [3] und findet dort hauptsächlich im Bereich der numerischen Simulationen Verwendung. Dieser Versuchsplan vermeidet explizit jede Form der (pseudo)Faktorwiederholungen. Die auf Basis eines zufällig generierten Erzeugungsvektors erstellten Versuchspläne wurden über das MiniMax Kriterium hinsichtlich der Gleichverteilung der Versuchspunkte im Versuchsraum bewertet. Anschließend wurde ein optimales Design für die in diesem Rahmen durchgeführten Studie gewählt.

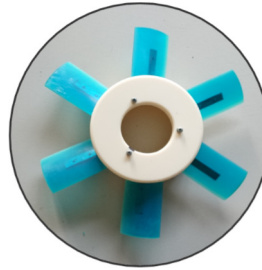


Abbildung 5: Axialventilator mit NACA 65(12)-10 Profilen

Zur Aufnahme der aeroakustischen Kenngrößen wurden saug- und druckseitig jeweils drei äquidistant über den Umfang verteilte und wandbündig montierte $\frac{1}{4}$ " Kondensatormikrofone verwendet. Die statische Druckdifferenz wird über einen saug- und einen druckseitigen Messring mit jeweils sechs Druckmessstellen realisiert, wohingegen der Lastzustand über eine stufenlos einstellbare Drossel auf der Druckseite eingestellt werden kann. Die Drehzahl des pulsweitenmodulierten Antriebsmotors wird mittels eines Beschleunigungsaufnehmers auf der Nabenhalterung des Rotors überwacht.

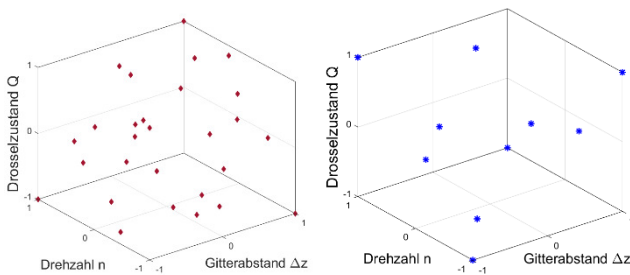


Abbildung 3: Schematische Darstellung der normierten Versuchspläne, Latin-Hypercube Design LHD (links) und Testpunkte (rechts) [4]

Um die Genauigkeit und somit die Effizienz der drei Modellansätze zu validieren, wurden zusätzlich zehn Testpunkte vermessen, welche in Abbildung 3 (rechts) zu sehen sind. Diese Testpunkte sind unabhängig von den statistischen Ansätzen und beinhalten auch Versuchspunkte gemäß eines „Worst-Case-Szenarios“, d.h., dass auch Testpunkte in die äußeren Ecken des Versuchsraumes gelegt wurden, welche ansatzbedingt schwer zu approximieren sind.

Versuchsaufbau

Das in Abbildung 1 dargestellte Versuchssystem wurde mit einem Rohrprüfstand (angelehnt an die DIN EN ISO 5136 und 5801) umgesetzt (Abbildung 4). Dieser Prüfstand erlaubt die simultane Aufnahme aerodynamischer und aeroakustischer Zielgrößen.

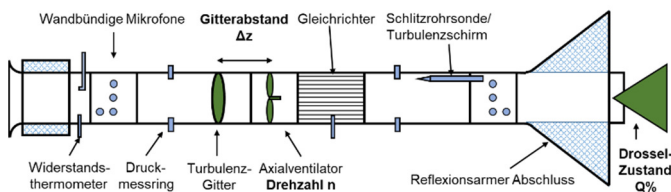


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Rohrprüfstandes

Der eigens nach dem Tragflügelverfahren ausgelegte Axialventilator (Abbildung 5) mit einem Durchmesser von 396 mm besteht aus sechs identischen Schaufelprofilen des Typs NACA 65(12)-10.

Voruntersuchungen

Um die Zuströmbedingungen innerhalb der Rohrstecke zu quantifizieren, wurden bei konstanter Drehzahl des Ventilators in einem rotierenden Kanal (Drehkanal) mit Hilfe der Hitzdrahtanemometrie das Strömungs- und Turbulenzgradprofil unter Einfluss des verwendeten Turbulenzgitters bei einem axialen Abstand von 300 mm zwischen Gitter und Rotor aufgenommen. (Abbildung 6).

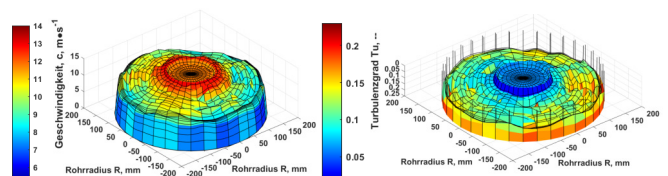


Abbildung 6: Turbulentes Geschwindigkeitsprofil (links) und das dazugehörige Turbulenzgradprofil (rechts)

Das zur Generierung von Turbulenzen in der Zuströmung verwendete Gitter hat eine Maschenweite von 60 mm und eine Stabbreite von 12 mm, womit das Verhältnis H/d bei 5 liegt.

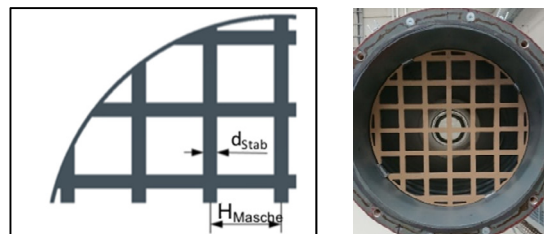


Abbildung 7: Verwendetes Turbulenzgitter Schematisch (links), eingebaut (rechts)

Untersuchung der Drehzahl

Um zu überprüfen, ob die Drehzahl bei sich änderndem Drosselzustand konstant bleibt, wurde während eines Zeitraums von 120 Sekunden der Drosselzustand Q

kontinuierlich von 100% (geöffnet) zu 0% (geschlossen) verringert. Dabei wurde keine Differenz der Drehfrequenz festgestellt.

Untersuchung des Drosselzustandes

Abbildung 8 (links) zeigt die dimensionslose Lieferzahl ϕ (Formel 1) über den Volumenstrom. Dort ist anhand der drei unterschiedlichen Geraden deutlich erkennbar, dass der Volumenstrom eine Funktion der Drehzahl ist.

$$\phi = \frac{\Delta p / \rho}{U F / 2} \quad [--] \quad (1)$$

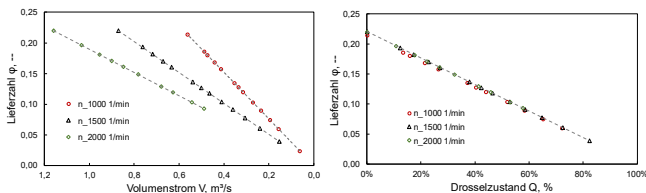


Abbildung 8: Lieferzahl über den Volumenstrom (links), Lieferzahl über den Drosselzustand (rechts)

Da alle Einstellparameter unabhängig von den Zielgrößen sein müssen, wurde der Volumenstrom in den Drosselzustand Q (Formel 2) überführt. Eine Darstellung der Lieferzahl ϕ über den Drosselzustand Q zeigt, dass die zuvor drehzahlabhängigen Linien sich auf eine spezifische Kennlinie reduzieren (Abbildung 8, rechts).

$$Q_{Drosselzustand} = 1 - \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}} \quad [\%] \quad (2)$$

Ergebnisse

Die in Abbildung 9-10 dargestellten Paretodiagramme veranschaulichen die Wirkung (linear oder quadratisch) der einzelnen Einflussgrößen auf die jeweilige Zielgröße. Parameter unterhalb der Signifikanzgrenze von 5 % (rote Linie) liegen unterhalb des statistischen Rauschens und können dem Fehlerterm zugeordnet bzw. vernachlässigt werden. Verstärkende Einflussgrößen sind positiv dargestellt und hemmende Einflussgrößen mit einem negativen Vorzeichen versehen. Abbildung 9 veranschaulicht somit, dass der Gitterabstand sowie der Drosselzustand (linear) einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf den saugseitigen Schalldruck haben. Die Haupteinflussfaktoren stellen die Drehzahl (linear) und der Drosselzustand (quadratisch) dar.

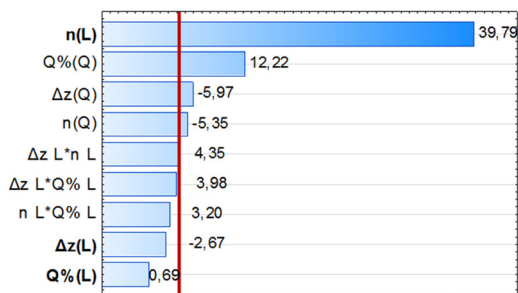


Abbildung 9: Paretodiagramm zur Bestimmung der Einflussparameter auf den saugseitigen Schalldruck - BBD

In Abbildung 10 ist das Paretodiagramm des druckseitigen Schalldrucks für das zentral zusammengesetzte Design (ZZD)

dargestellt. Auch dort ist der Haupteinflussfaktor die Drehzahl (linear). Der Abstand des Turbulenzgitters zum Ventilator beeinflusst die Akustik druckseitig jedoch nicht signifikant ($\leq 5\%$). Dieser Einflussfaktor kann folglich vernachlässigt werden.

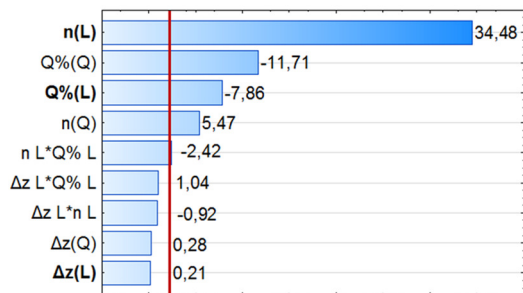


Abbildung 10: Paretodiagramm zur Bestimmung der Einflussparameter auf den Schalldruck druckseitig - ZZD

Die Konturplots in Abbildung 11 stellen den Einfluss zweier Einflussparameter auf eine Zielgröße dar. Mit Hilfe dieser Plots können kritische Parametereinstellungen sowie Wechselwirkungseffekte zwischen den Einflussfaktoren identifiziert werden.

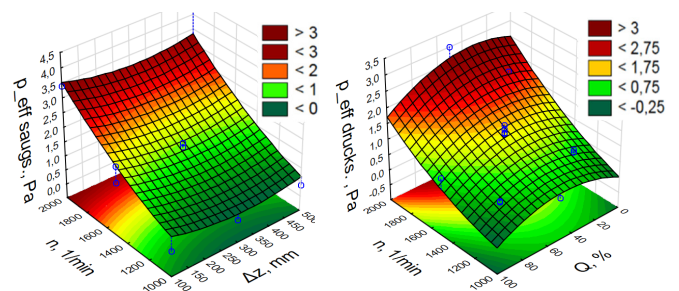


Abbildung 11: Konturplot BBD \tilde{p} -saugseitig (links), Konturplot ZZD \tilde{p} -druckseitig (rechts)

In Abbildung 11 sind die Zielgrößen (z-Achse) über jeweils zwei Einflussparameter aufgetragen (x/y-Ebene). Somit kann veranschaulicht werden, wie diese Parameter die Zielgröße beeinflussen. Beide Diagramme zeigen einen primär linearen Einfluss der Drehzahl auf die Akustik. Auf den Schalldruck saugseitig (Abbildung 11, links) wirkt sich der Gitterabstand quadratisch aus. Einen ebenfalls quadratischen Effekt zeigt der Drosselzustand auf den druckseitigen Schalldruck (Abbildung 11, rechts).

Prognose-Beobachtungsplots

Mit Hilfe von Regressionsfunktionen können für das Box-Behnken Design und das Zentral-Zusammengesetzte Design die Zielgrößen mathematisch prognostiziert werden. Das Latin-Hypercube Design (LHD) dient als Input für neuronale Netze, welche über die Methode der Fehlerrückführung trainiert werden. Die Komplexität ist im vorliegenden Fall auf 27 Gewichte beschränkt um einer Überanpassung an die Modelldaten vorzubeugen. In den Prognose-Beobachtungsplots (Abbildung 12) werden die prognostizierten Zielgrößen über die gemessenen Zielgrößen aufgetragen. Im idealen Fall würden sich bei perfekter Anpassung der Modelle alle Werte auf der Diagonalen

befinden. Zusätzlich zu den Versuchsdaten wurden die Testdaten zur Validierung in die Diagramme aufgenommen.

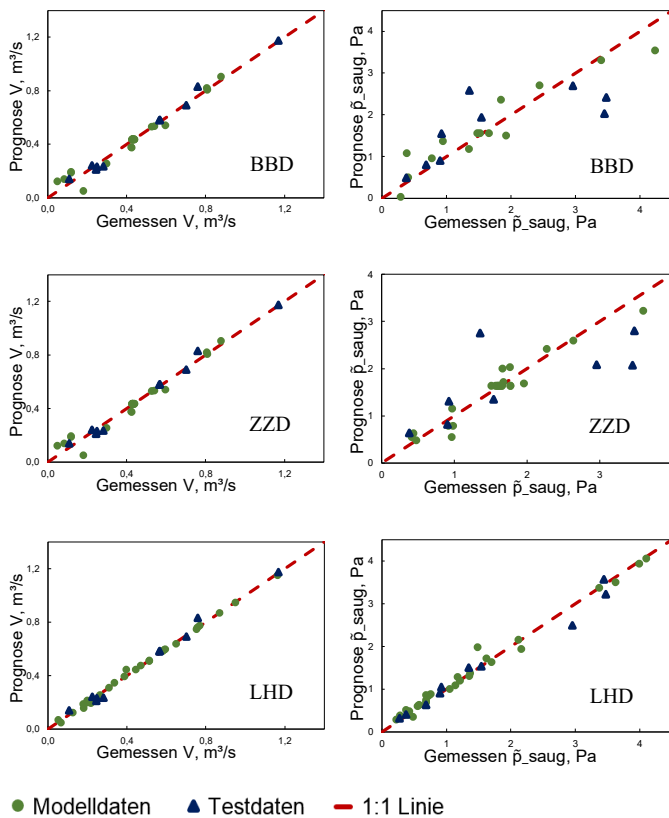


Abbildung 12: Prognose-Beobachtungsplots der Modelldaten inklusive Testdaten

In Abbildung 12 wird deutlich, dass der Volumenstrom für alle drei Modelle sehr gut approximiert wurde, da die Modelldaten sowie die Testpunkte alle nah an der Diagonalen liegen. Beim Vergleich des Box-Behnken Designs und des zentral zusammengesetzten Designs fällt auf, dass vor allem die Testdaten beim saugseitigen Schalldruck eine höhere Streuung aufweisen. Die prognostizierten Werte weichen teilweise stark von den gemessenen Werten ab. Eine deutlich verbesserte Anpassung zeigt hingegen das neuronale Netz, basierend auf dem Latin-Hypercube Design. Nicht nur die Daten für die Prognose des Volumenstroms wurden gut prognostiziert, sondern auch die Daten für die saugseitige Akustik.

Bestimmtheitsmaße

In Tabelle 2 – 3 sind die Bestimmtheitsmaße R^2 nach Pearson für die aerodynamischen und die aeroakustischen Zielgrößen aufgetragen.

Tabelle 2: Bestimmtheitsmaß R^2 aerodyn. Zielgrößen

Modell	Δp_{fan}	V_{pkt}	η_{sys}	Daten
BB	0,999	0,995	0,998	Modell
ZZ	0,973	0,957	0,764	
LHD	0,996	0,998	0,939	
BB	0,993	0,991	0,831	Test
ZZ	0,993	0,991	0,918	
LHD	0,993	0,991	0,918	

Bei den aerodynamischen Zielgrößen (Tabelle 2) werden für alle drei Ansätze hohe Bestimmtheitsmaße erzielt. Im Gegensatz dazu sind die Bestimmtheitsmaße der Akustik saugseitig und druckseitig (Tabelle 3) beim Box-Behnken Design und beim zentral zusammengesetzten Design bei den Testdaten niedrig und somit für eine akkurate Prognose nicht verwendbar.

Tabelle 3: Bestimmtheitsmaß R^2 aeroakustischer Zielgrößen

Modell	\tilde{p}_{saug}	\tilde{p}_{druck}	a_{beschl}	Daten
BB	0,887	0,889	1,000	Modell
ZZ	0,930	0,913	0,731	
LHD	0,991	0,985	0,981	
BB	0,614	0,555	0,648	Test
ZZ	0,608	0,557	0,963	
LHD	0,980	0,994	0,963	

Zusammenfassung

Insgesamt wurden beim Box-Behnken Design die Versuchspunkte von 27 (3^3) auf 13 nahezu halbiert. Aerodynamische Zielgrößen konnten gut approximiert werden. Zudem wurde festgestellt, dass das BBD von allen drei Modell-Ansätzen das höchste Bestimmtheitsmaß für die Prognose der Beschleunigung besitzt. Für das zentral zusammengesetzte Design wurden die Versuchspunkte von 125 (5^3) auf 15 reduziert. Auch hier wurden hohe Bestimmtheitsmaße im Bereich der Aerodynamik erreicht.

Beide Modelle weisen eine nicht akzeptable Performance bei der Approximation aeroakustischer Zielgrößen auf, da sowohl das Box-Behnken Design als auch das ZZ-Design nur lineare und quadratische Wirkzusammenhänge abbilden können. Für die Abbildung von Systemen höherer Ordnung muss hier zu den neuronalen Netzen übergegangen werden.

Die auf dem Latin-Hypercube Design beruhenden neuronalen Netze bieten im Vergleich zum BBD und ZZD insgesamt die beste Performance. Es wurden durchweg sehr hohe Bestimmtheitsmaße für versuchsabhängige und unabhängige Testdaten erzielt. Verglichen mit dem Box-Behnken Design konnte die Performance im Sinne des Bestimmtheitsmaßes um 33 % gesteigert werden.

Literatur

[1] Statistica Homepage, URL: <http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Experimental/Doe/Overview/ExperimentalDesignSummary>

[2] Adam, M.: Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments). Skript Vorlesung, Hochschule Düsseldorf, Düsseldorf, 2017

[3] Ertel W., Grundkurs Künstliche Intelligenz. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

[4] Biedermann, T. M., Reich, M., Kameier, F., Adam, M., Paschereit, C.O.: Assessment of Statistical Sampling Methods and Approximation Models Applied to Aeroacoustic and Vibroacoustic Problems. Noise and Vibration Emerging Methods NOVEM 2018, Ibiza, Spanien, 2018