

## DoE basierte Sensitivitätsanalyse konstruktiver Lagerparameter eines gleitgelagerten Abgasturboladers

**Stefan Göbel<sup>1</sup>, Christian Daniel<sup>1</sup>, Elmar Woschke<sup>1</sup>, Jens Strackeljan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke Universität, 39106, Magdeburg, Deutschland,  
stefan.goebel@ovgu.de, christian.daniel@ovgu.de, elmar.woschke@ovgu.de, jens.strackeljan@ovgu.de

### Kurzfassung

In dem Beitrag wird die systematische Sensitivitätsanalyse eines Abgasturboladers bezüglich der maximalen Rotorschwingungsamplitude als repräsentatives Qualitätsmerkmal durchgeführt. Dabei wird der Einfluss von fünf konstruktiven Lagerparametern mit Methoden der statistischen Versuchsplanung untersucht. Die ausgewerteten Ergebnisdaten stammen aus numerischen Simulationen unter Berücksichtigung der Kopplung von elastischem Rotor und hydrodynamischer Gleitlagerung. Es werden wichtige Parameter und Kopplungen herausgestellt. Die Zuverlässigkeit der getroffenen Aussagen wird anhand von Kontrollrechnungen überprüft. Im zweiten Schritt wird die Methodik mit einem deutlich reduzierten Versuchsplan wiederholt.

### 1 Einleitung

Gleitgelagerte Rotorsysteme allgemein, und Abgasturbolader (ATL) für Verbrennungsmotoren konkret, zeigen ein nichtlineares Bewegungsverhalten. Von besonderer Bedeutung für das Betriebsverhalten sind subsynchrone Whirlschwingungen, siehe dazu [7, 9]. Die Beeinflussung dieser, unter anderem durch konstruktive Parameter, thermische Randbedingungen oder Fertigungstoleranzen ist analytisch nicht beschreibbar und im konkreten Fall schwer vorherzusagen. Insbesondere fehlt die systematische Zuordnung, welche Änderung einer Ausgangskonfiguration im Ergebnis zu welcher Änderung des Bewegungsverhaltens führt. Die numerische Simulation unter Berücksichtigung der Kopplung von elastischem Rotor und hydrodynamischer Gleitlagerung ist hier ein geeignetes, da schnelles und flexibles Werkzeug zur eingehenden Untersuchung dieser gekoppelten Abhängigkeiten. Die Strategie und Umsetzung solcher Simulationen wurde von der Forschungsgruppe am Lehrstuhl Technische Dynamik in den letzten Jahren sukzessive vorgestellt [4, 1, 5, 12]. Eine Validierung der Methode ist in [3] dargelegt.

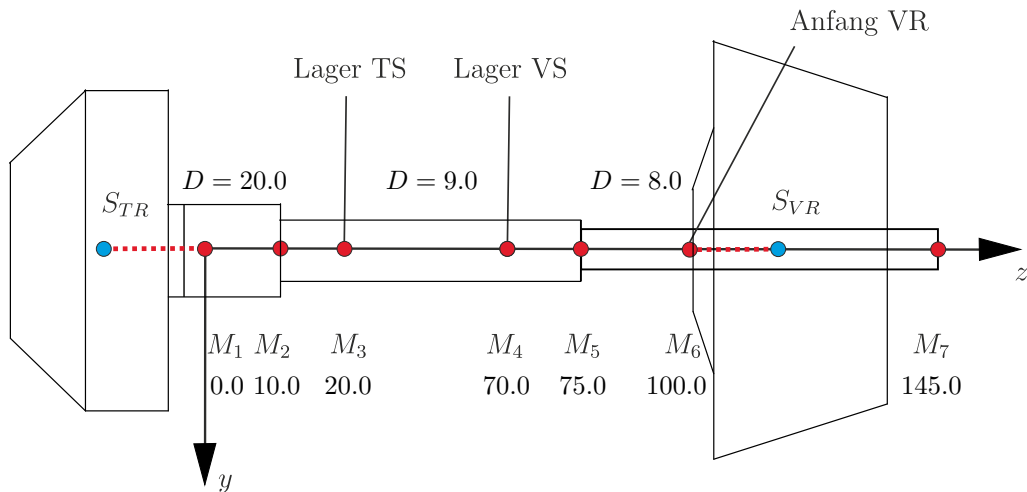
Um aus den Ergebnisdaten einer Simulation mit zahlreichen Parametervariationen valide Aussagen zu gewinnen, ist eine Strategie nötig, die über die bloße vergleichende Betrachtung zweier Varianten hinausgeht. Hierfür bieten sich Methoden aus der statistischen Versuchsplanung an. Mithilfe dieser können günstige Parameterkombinationen für die Durchführung eines Computereperiments ermittelt werden, welche trotz weniger Simulationen Auskunft über Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen geben. Die Auswertung erfolgt durch multidimensionale Regressionsanalysen, die neben einer übersichtlichen Darstellung der Stärke auch eine Einschätzung der Relevanz einzelner Effekte ermöglichen.

In diesem Beitrag wird das Vorgehen exemplarisch an einem mittelgroßen Turbolader mit full-floating Schwimmbuchsenlagerung für Motoren leichter Nutzfahrzeuge dargelegt. Ziel ist, die Wirkung, inklusive Kreuzkorrelationen erster Stufe, von fünf konstruktiven Faktoren auf die Amplitude der Wellenschwingung zu identifizieren. Die gewonnenen Aussagen sowie die Grenzen der Methode werden kritisch kommentiert.

### 2 Modellbeschreibung

Die Struktur des Mehrkörpermodells kann detailliert dem Beitrag „Validierung der Hochlaufsimulation für automotiv Abgasturbolader“ [3] entnommen werden. An dieser Stelle werden daher nur wesentliche Eigenschaften und genaue Dimensionen aufgeführt: Das Gehäuse wird starr modelliert und am Inertialsystem gefesselt. Resultierend aus der geringen Lagerbelastung genügt es, die Schwimmbuchsen ebenfalls als starr anzunehmen. Deren Bewegungsverhalten ist durch die drei Freiheitsgrade senkrecht zur und die Rotation um die Wellenachsen geprägt.

Durch die im Betriebsdrehzahlbereich liegende erste Eigenfrequenz des Läufers ist eine elastische Abbildung notwendig, wobei Turbinen- und Verdichterrad als starr angenommen werden können, da die Elastizität maßgeblich durch die Welle determiniert ist. Eine Übersicht der geometrischen Dimensionen zeigt Abb. (1). Alle in den folgenden Tabellen angegebenen Größen beziehen sich auf das Ausgangsmodell. Die Werte der Variationen im Rahmen der DoE sind in Abschnitt 3 Tab. (5) aufgeführt.



**Abbildung 1:** Einteilung der Welle in Finite Elemente und zugehörige Abmessungen

Die Schwerpunktslage der Laufräder  $S_{TR}$  und  $S_{VR}$  bzgl. Marker  $M_1$  und  $M_6$  sowie die Trägheitseigenschaften bzgl. der Schwerpunkte sind zusammen mit den Trägheitseigenschaften der Schwimmbuchsen in Tab. (1) dokumentiert. Die Positionen der Lager sind durch deren Mittelpunkte an den Markern  $M_3$  turbinenseitig und  $M_4$

**Tabelle 1:** Trägheitseigenschaften

	Verdichterlaufrad	Turbinenlaufrad	Schwimmbuchsen	
$m$	85	340	9	[g]
$J_{pS}$	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-7}$	[kg · m <sup>2</sup> ]
$J_{aS}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$7.5 \cdot 10^{-5}$	$2.8 \cdot 10^{-7}$	[kg · m <sup>2</sup> ]
$z_S$	1.0 zu $M_6$	-15.0 zu $M_1$	0	[mm]

verdichterseitig bestimmt. Die übrigen Marker der Welle sind für die Abbildung der Geometrie und damit der Steifigkeits- und Masseverteilung notwendig.

Die Bewegung der Welle in axialer Richtung wird durch eine, das Axiallager abstrahierende, lineare Feder-Dämpfer Kombination eingeschränkt. Die Vorgabe des Rotationsfreiheitsgrades der Welle erfolgt durch ein Drehfeder-Drehdämpfer Element mit einer Winkelbeschleunigung von  $3850 \frac{rad}{s^2}$ . Die Belastung des Turboladers ist durch Eigengewicht und durch definierte Unwuchten entsprechend Tab. (2) bestimmt.

**Tabelle 2:** Unwuchten

	Verdichterlaufrad	Turbinenlaufrad	
$U$	$0.4 \cdot 10^{-6}$	$0.6 \cdot 10^{-6}$	[kg · m]
$\varphi_U$	0	0	[°]

Im Rahmen der Simulation kommt der Definition der Lager und ihrer Eigenschaften eine besondere Bedeutung zu. Sowohl turbinenseitig als auch verdichterseitig sind diese als Schwimmbuchsenlager mit rotierender Buchse

ausgeführt (full-floating-ring). Die Versorgung des inneren Lagers wird über fünf Bohrungen in der Buchse gewährleistet, deren Berücksichtigung durch numerische Kopplung des Drucks im äußeren und inneren Schmierfilm erfolgt. Die Geometrieparameter für die Innen- und Außenlager sind in Tab. (3) aufgelistet. Die Ölzuführung erfolgt durch eine Sichelnut mittig von oben. Die Temperaturen der Lagerpartner und des Öls betragen konstant  $90^{\circ}C$ .

**Tabelle 3:** Lagerparameter

Lagerkennwerte	innen		außen	
Breite $b$	7	[mm]	10	[mm]
Durchmesser $d$	9	[mm]	16	[mm]
Kaltlagerspiel $C$	45	[ $\mu m$ ]	192	[ $\mu m$ ]
Ölzufuhr				
$d_{zu}$ aus Kopplung	1.8	[mm]	Sichelnut von oben	$20 \times 3$ [mm]
Anzahl der Bohrungen	5	[–]	$p_{zu}$ Zuführdruck außen	$0.35 \cdot 10^6$ [Pa]

**Tabelle 4:** Materialparameter

Welle				
E-Modul	$E$	$2.0 \cdot 10^{11}$		[N/m <sup>2</sup> ]
Dichte	$\rho$	7400		[kg/m <sup>3</sup> ]
Wärmeausdehnungskoeff.	$\alpha$	$1.0 \cdot 10^{-5}$		[1/K]
Schwimmbuchse				
Wärmeausdehnungskoeff.	$\alpha$	$2.0 \cdot 10^{-5}$		[1/K]
Gehäuse				
Wärmeausdehnungskoeff.	$\alpha$	$1.05 \cdot 10^{-5}$		[1/K]
Öl				
Viskosität bei $90^{\circ}C$	$\nu$	$1.153 \cdot 10^{-2}$		[m <sup>2</sup> /s]

### 3 Design-of-Experiment Methodik

Die Design-of-Experiment (DoE) Methodik besteht aus zwei eng verknüpften Teilen: Zum einen gibt es Auswahlkriterien für Versuchspläne, um aus einer gegebenen Anzahl von Experimenten möglichst viel Informationen über ein System zu erlangen, was in der deutschen Bezeichnung der statistischen Versuchsplanung deutlich wird. Zum anderen werden Regressionsmodelle und Strategien zur Auswertung und Identifikation charakteristischen Systemverhaltens beschrieben. Einen leichten Einstieg in die Thematik ermöglicht [10]. Historisch geht die Methode auf R. A. Fisher 1935 [6] und die Auswertung landwirtschaftlicher Versuche zurück. Diese sind aufwendig und langwierig, was die Zahl der kontrolliert einzustellenden Parameter klein hält. Außerdem müssen aus den durch zufällige Messabweichung überlagerten Ergebnissen reale und scheinbare Effekte getrennt werden. Bei der Verwendung der DoE für die Auswertung von Computerexperimenten hingegen entfällt die Messabweichung und eine Variation der Parameter ist im Prinzip leicht möglich. Im speziellen Fall der Hochlaufsimulation eines ATLS begrenzt allerdings die Rechenzeit die Zahl der Experimente. Das übliche Vorgehen, so auch für diesen Beitrag, gliedert sich wie folgt:

1. Festlegung einer Anfangsvermutung des funktionalen Zusammenhangs zwischen den zu variierenden Parametern, welche als *Faktoren* bezeichnet werden, und dem Ergebnis, welches als *Qualitätsmerkmal* bezeichnet

wird. In der Regel ist die Funktion ein Polynom niedriger Ordnung mit gemischten Gliedern, beispielsweise

$$QM = c_0 + c_1 \cdot f_1 + c_2 \cdot f_2 + c_3 \cdot f_1 \cdot f_2 + c_4 \cdot f_3 + \dots \quad (1)$$

2. Wahl geeigneter Faktorenkombinationen für das Experiment, gewissermaßen als Stützstellen für die Bestimmung der Polynomkoeffizienten  $c$ . Entspricht deren Zahl jener der Stützstellen, so ist ein vollständiges Anpassen der Funktion möglich. Werden alle  $n$  Potenz- und gemischten Terme bis zu einem bestimmten Grad verwendet und  $n$  Qualitätsmerkmale an linear unabhängigen Stützstellen ermittelt, so liegt ein Vollfaktorplan vor. Wird dagegen nur ein Bruchteil der möglichen Stützstellen untersucht, so handelt es sich um einen Screening-Plan. Es liegt auf der Hand, dass sofern der aufzudeckende Einfluss der Faktoren überhaupt als Polynom beschrieben werden kann, mit einem Screening-Plan nicht alle Abhängigkeiten erfasst werden. Die Ingenieur Erfahrung belegt jedoch, dass grundsätzliche Abhängigkeiten und tendenzielle Zusammenhänge bereits an linearen und gemischten Termen niedriger Ordnung sichtbar werden.
3. Auswertung der Experimente durch Regression der anfänglich vermuteten Funktion auf die gemessenen Qualitätsmerkmale. Übersteigt die Zahl der Stützstellen die Zahl der Polynomglieder, so ist eine Beurteilung der Güte des Modells möglich. Das Stichwort ist hier Varianzanalyse (ANOVA), nachzulesen beispielsweise in [8]. Für ein Computerexperiment gelten dabei Einschränkungen. Da dieses keine zufälligen Messfehler enthält, können auch keine scheinbaren Effekte auftreten. Jeder im Modell enthaltene Effekt ist ein echter Effekt. Der Wahrscheinlichkeit des  $\alpha$ -Fehlers (auch p-Value), einen scheinbaren Effekt irrtümlich für echt zu halten, hat also keine Aussagekraft. Ein valides Kriterium ist hingegen der Anteil erklärter Variabilität durch das Modell an der Gesamtvariabilität aller Messwerte [11]. Dieses Bestimmtheitsmaß wird mit  $R^2$  bezeichnet

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (QM_{i\text{Modell}} - \overline{QM})^2}{\sum_{i=1}^n (QM_i - \overline{QM})^2} \quad (2)$$

4. Überarbeitung des Modells nach Gütekriterien, in dem konkreten Anwendungsfall  $R^2$ . Beginnend mit den gemischten Termen werden iterativ einzelne Terme aus dem Modell entfernt und nur solche behalten, die die Erklärungskraft des Modells mindestens um 3% verbessern.
5. Die Aussagen des so gewonnenen Metamodells können durch die Darstellung der Effektstärke für jeden Term visualisiert werden.

Für diesen Beitrag wird der Einfluss fünf konstruktiver Parameter untersucht. Vorarbeiten [2] haben gezeigt, dass die Anwendung eines quadratischen Metamodells auf ein integrales Qualitätsmerkmal (Bewegungsamplitude und deren Tendenz bei Maximaldrehzahl) zu einer unzureichenden Vorhersagegenauigkeit führt. Dies hängt mit dem stark nichtlinearen Verhalten zusammen, weshalb die Anfangsvermutung schwer zu schätzen ist. Daher wird nur das dezidierte Qualitätsmerkmal Amplitude der Wellenschwingung am verdichterseitigen Rotorende herangezogen. Die Parameter bzw. Faktoren werden um  $\pm 20\%$  vom Ausgangswert variiert, das Modell ist multidimensional linear. Entsprechend besteht der Vollfaktorplan aus allen möglichen 32 Minimal-/Maximalwertkombinationen nach Tab. (5). Für die Untersuchung in Abschnitt 4.2 wird ein Teilfaktorplan mit 16 Versuchen betrachtet.

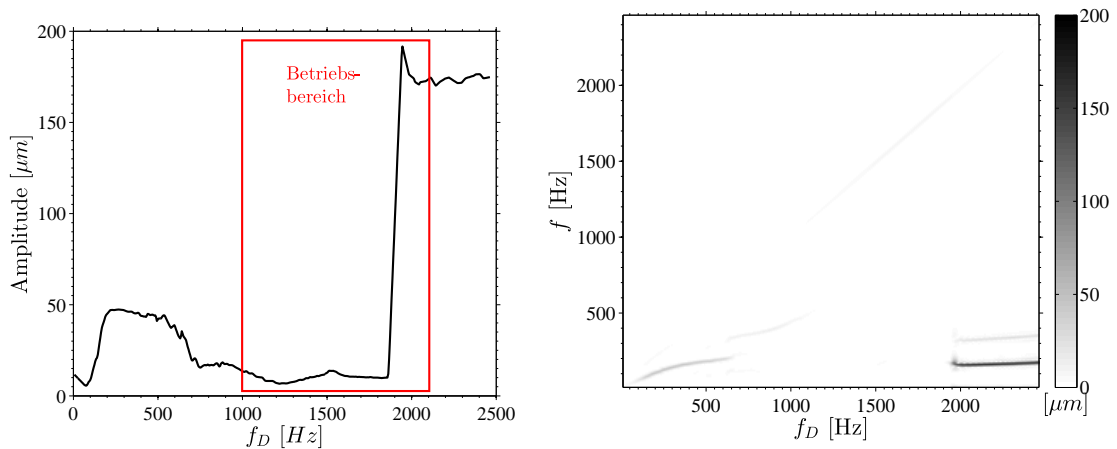
#### 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der systematischen Parametervariation werden für das Qualitätsmerkmal der Schwingungsamplitude am verdichterseitigen Wellenende, also Marker  $M_7$  in Abb. (1), vorgestellt. Dieses ist stellvertretend für andere stark korrelierte Entwurfskriterien, wie die Lagerkräfte auf das Gehäuse. Ausgewertet wird die Amplitude im Betriebsdrehzahlbereich  $f_d = 1000 \dots 2100$  Hz. Für das Ausgangsmodell mit mittleren Faktorstellungen ist der Verlauf der Amplitude exemplarisch in Abb. (2)(a) dargestellt. Die Schwingungskomponenten, aus denen sich die Gesamtbewegung zusammensetzt, können im Spektrogramm (b) abgelesen werden. Charakteristisch ist die sprunghafte Vergrößerung der Schwingungsamplitude bei einer Drehfrequenz von 1900 Hz und somit im Betriebsbereich. Diese ist ausschließlich durch eine subsynchrone Erregung der konischen Schwingform mit etwa 200 Hz

**Tabelle 5:** Variierte Faktoren

Faktor	Kürzel	Ausgangswert	Minimalwert	Maximalwert	
Kaltlagerspiel turbinenseitig innen	f1	45	36	54	$[\mu m]$
Kaltlagerspiel verdichterseitig innen	f2	45	36	54	$[\mu m]$
Kaltlagerspiel turbinenseitig außen	f3	192	154	230	$[\mu m]$
Kaltlagerspiel verdichterseitig außen	f4	192	154	230	$[\mu m]$
Lagerbreite außen	f5	10.0	8.0	12.0	$[mm]$

ausgelöst. Ursächlich für die Erregung ist ein Whirl im turbinenseitigen äußeren Schmierpalt. Die bei Turboladern im Allgemeinen häufige subsynchrone Schwingung in der zylindrischen Form tritt durch die geschickte Auslegung des hier untersuchten Modells nicht auf.

**Abbildung 2:** Qualitätsmerkmal Amplitude der Wellenschwingung: (a) Hüllkurve, (b) Spektrogramm

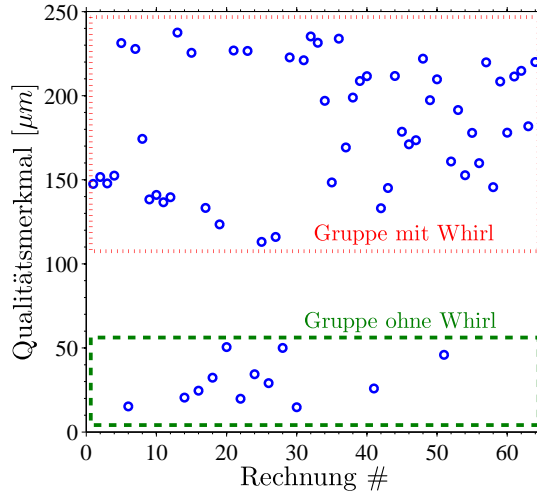
Da das Qualitätsmerkmal also wesentlich vom Auftreten des Whirls bestimmt wird, haben Faktorkombinationen, bei denen dieser ausbleibt deutlich kleinere Amplituden. Als notwendige Bedingung kann somit formuliert werden: Nur ohne Aufklängen einer Subsynchronen im Betriebsbereich sind kleine Qualitätsmerkmale möglich.

Eine Übersicht aller Variationen, die für diesen Beitrag simuliert wurden, siehe Abb. (3), untermauert die Feststellung der Teilung in zwei Gruppen. Innerhalb der Gruppe der schlechten Varianten (Rahmen mit Punktlinie) zeigen die Varianten, ausschließlich mit Whirl, große Streuungen von  $130 \mu m$ . Innerhalb der Gruppe der besseren Varianten (Rahmen mit Strichlinie) zeigen die Varianten, allesamt ohne Whirl, eine geringere Streuung bei generell niedrigerem Niveau des Qualitätsmerkmals. Ideal wäre es, mit der DoE sowohl die Unterschiede innerhalb der Gruppen, als auch die Unterschiede zwischen den Gruppen auf die Änderung der Faktoren zurückführen zu können.

#### 4.1 Vollfaktorplan

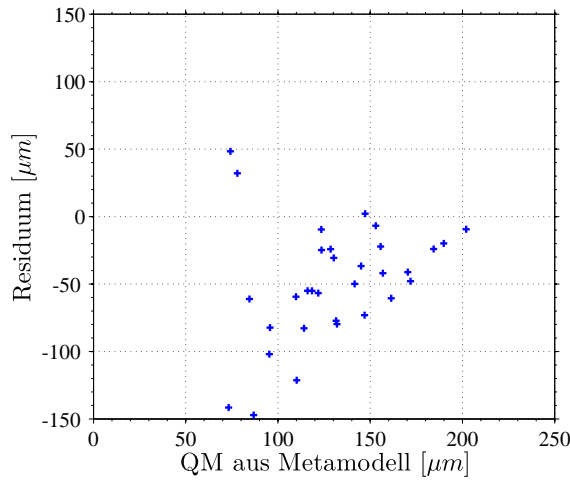
Wie in Kapitel 3 dargelegt, soll die Anzahl der zeitaufwendigen Rechnungen gering sein, woraus folgt, dass das Polynom für das Metamodell auf lineare Terme mit Koppeltermen erster Stufe begrenzt bleibt. In einem iterativen Prozess werden dann alle Faktoren, welche die Qualität des Modells nicht wesentlich verbessern, entfernt. Kriterium hierfür ist die Vergrößerung des erklärten Anteils der Variabilität an der Gesamtvariabilität der Qualitätsmerkmale  $R^2$  um mindestens 3%. Als Stützstellen dienen im ersten Schritt alle  $2^5 = 32$  Kombinationen eines Vollfaktorplans, welche sich aus Minimal- und Maximalwerten für fünf Faktoren bilden lassen. Zusätzlich werden 32 homogen im aufgespannten Parameterraum verteilte Kontrollrechnungen durchgeführt, um die Qualität des Metamodell bewerten zu können.

Durch lineare Ansatzfunktionen lässt sich der Sprung des Qualitätsmerkmals zwischen den Gruppen mit und ohne Subsynchrone offenkundig nicht beschreiben. Entsprechend schlecht fällt der Vergleich der aus dem Me-



**Abbildung 3:** Übersicht Qualitätsmerkmal aller Rechnungen  
 Rahmen mit Punktklinie: Subsynchroner tritt auf; Rahmen mit Strichlinie: Subsynchroner tritt nicht auf

tamodell gewonnenen Vorhersage mit den tatsächlichen Werten der Validierungsrechnungen aus, wie Abb. (4) zeigt. Die Abweichungen sind nicht normalverteilt und betragen erhebliche Teile der jeweiligen Nennwerte des Qualitätsmerkmals.



**Abbildung 4:** Residuen zwischen Vorhersage des Metamodells und tatsächlichem Wert der Kontrollrechnung über der Vorhersage für QM

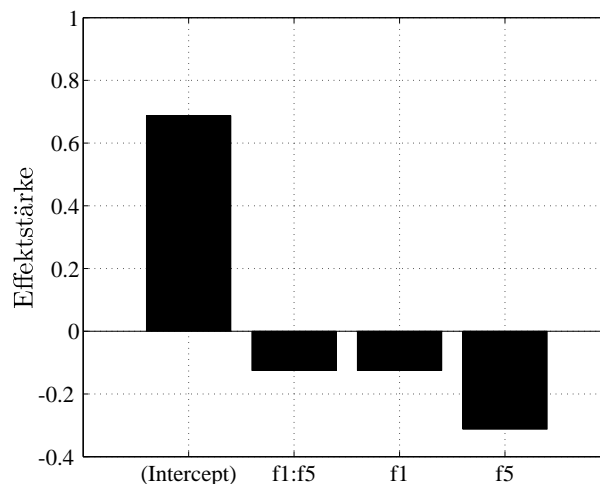
Daher müssen die Erwartungen an die Modellvorhersage reduziert werden: Entscheidend ist nicht den Wert des Qualitätsmerkmals genau vorherzusagen, sondern beschreiben zu können, bei welchen Faktorenkombination keine subsynchrone Erregung erfolgt. Die so garantiert erzielte Verringerung des Qualitätsmerkmals – die Unterschiede der beiden Gruppen betragen mindestens  $120 \mu m$  – gegenüber der Ausgangskonfiguration ist größer, als die dann noch mögliche Verbesserung innerhalb der Gruppe ohne Whirl mit niedrigem Niveau. Es wird daher vorgeschlagen, ein abgeleitetes, digitales Qualitätsmerkmal zu verwenden

$$\begin{aligned}
 QM' &= 0 & , \text{ wenn } QM < 100 \mu m \\
 QM' &= 1 & , \text{ wenn } QM \geq 100 \mu m \quad .
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Selbstverständlich bleibt auch mit diesem erhalten, dass im Modell zwischen den diskreten Zuständen linear interpoliert wird. Um zwischen den guten und schlechten Varianten zu unterscheiden, muss also ein Schwellwert definiert werden, wobei die triviale Wahl hier 0,5 lautet.

Die Regression und iterative Termselektion nach dem  $R^2$ -Kriterium für das modifizierte Qualitätsmerkmal QM' führt zu einem Metamodell mit nur vier Termen. Dazu gehören der Mittelwert sowie die Faktoren Lagerspiel turbinenseitig innen (f1), Lagerbreite außen (f5) und der Koppelterm beider (f1:f5). Die Effektstärken aller Faktoren auf das Qualitätsmerkmal können in Abb. (5) abgelesen werden. Die nicht aufgeführten Faktoren Kaltlagerspiel verdichterseitig innen (f2), Kaltlagerspiel turbinenseitig außen (f3) und Kaltlagerspiel verdichterseitig außen (f4), entfielen bei der Bildung des Metamodells, weil sie keinen signifikanten Einfluss haben. Der Wert der Effektstärke entspricht der Änderung des Qualitätsmerkmals bei Modifikation des Faktors vom Ausgangs- auf den Maximalwert. Für die Variation eines Faktors auf den Minimalwert ändert sich das Qualitätsmerkmal entsprechend invers in gleicher Höhe. Für den Fall, dass alle Faktoren den Ausgangswert haben, entspricht das Qualitätsmerkmal dem Mittelwert (Intercept) von 0,69. f5 hat einen gleichgerichteten, aber stärkeren Effekt als f1. Werden beide Faktoren gleichsinnig verändert, so wird deren Kopplung (f1:f5) relevant: Wie die Vorzeichengleichheit zeigt, kommt es zu einer Verstärkung der Einzeleffekte.

Mit dem Ziel ein möglichst kleines Qualitätsmerkmal der Rotorschwingung zu erzielen, sollten bei dem untersuchten ATL also die Faktoren Lagerspiel turbinenseitig innen und Lagerbreite außen vergrößert werden.

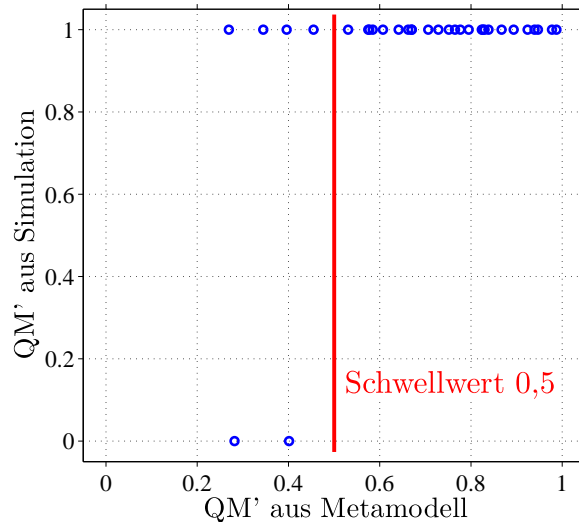


**Abbildung 5:** Effektstärke für die vier Terme des Metamodells: Mittelwert (Intercept); Lagerspiel turbinenseitig innen (f1); Lagerbreite außen (f5) und Koppelterm (f1:f5)

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Simulationen von 32 Kontrollvariationen und den Ergebnissen des Metamodells ist Abb. (6) zu entnehmen. Demnach liegen 26 Punkte über dem Schwellwert, werden also als schlechte Kombinationen vorhergesagt, und sind dies auch tatsächlich. Sechs Punkte liegen unterhalb des Schwellwertes, wovon vier fälschlicherweise als gut prognostiziert werden. Da die Kontrollpunkte im Parameterraum äquidistant verteilt sind, lassen sich die Ergebnisse der DoE wie folgt allgemein interpretieren:

1. Von 30 ungeeigneten Faktorkombinationen werden 26 (= 87%) identifiziert.
2. Von 32 Faktorkombinationen können sechs als potentiell geeignet identifiziert werden. Der genauer zu untersuchende Faktorraum kann also um 81% verkleinert werden.
3. Eine Aussage, welche Kombinationen garantiert gut sind, ist nicht möglich.

Aus der Verwendung linearer Approximationsfunktionen zur Bildung des Metamodells folgt unmittelbar, dass die vermeintlich beste Faktorkombination am Rand des Faktorraums vorliegen muss. Auf der Suche nach einem weiter verbesserten Qualitätsmerkmal wären für das hier untersuchte Beispiel die Faktoren f1 und f5 über den untersuchten Bereich hinaus zu extrapolieren, wovon, bei dem bekannt un stetigen Systemverhalten, abzuraten ist. Die Autoren empfehlen vielmehr, eine zweite DoE mit verschobenen Bereichsgrenzen zu starten und dabei die im ersten Schritt gewonnen Erkenntnisse einfließen zu lassen. Ist nach dieser erneuten DoE, oder gegebenenfalls weiteren Wiederholungen, der Bereich derart verschoben, dass ein lokales Minimum des Qualitätsmerkmals bei mittleren Faktorstellungen erreicht wird, so nimmt jenes folglich zu den Rändern hin wieder zu. Das heißt, die



**Abbildung 6:** Gegenüberstellung  $QM'$  von 32 Kontrollrechnungen gegen Vorhersage aus Metamodell mit vier Termen

Gradienten zwischen den Minimal-/Maximalkombinationen als Stützpunkte des Metamodells werden kleiner. Im Ergebnis werden die Effekte schwächer oder bestehen den  $R^2$ -Signifikanztest nicht und fallen aus dem Metamodell. Ein schwacher Effekt lässt demnach folgende *zwei* Aussagen zu:

1. Der Faktor hat tatsächlich keinen Einfluss auf das Qualitätsmerkmal, oder
2. ein zumindest lokaler Extremwert innerhalb des Faktorraums liegt vor.
  - (a) Minimalwert  $\Rightarrow$  Überschreitet das  $QM$  auch an den Rändern ein akzeptables Niveau nicht, so besteht kein Verbesserungsbedarf.
  - (b) Maximalwert  $\Rightarrow$  Die Anfangsannahme linearer Approximierbarkeit wird unzulässig verletzt. Aus dem Metamodell werden falsche Schlüsse gezogen!

Die Informationen bezüglich Faktorrelevanz und Effektstärke gelten generell nur innerhalb der für die DoE variierten Grenzen, die Extrapolation ist nicht empfehlenswert, die Übertragung auf gänzlich andere Ausgangswerte ist nicht zu schlussfolgern. Zur Sicherung der aus der DoE gezogene Schlüsse sollte diese, insbesondere wegen Punkt 2(b), mit einem kleineren Faktorraum wiederholt werden. Der nötige zeitliche Aufwand einer solchen Konvergenzstudie soll nach Möglichkeit in der praktischen Anwendung vermieden werden. Die Autoren selbst bauen derzeit noch Erfahrungen für die zulässige Größe des Faktorraums für die Untersuchung von ATLS auf.

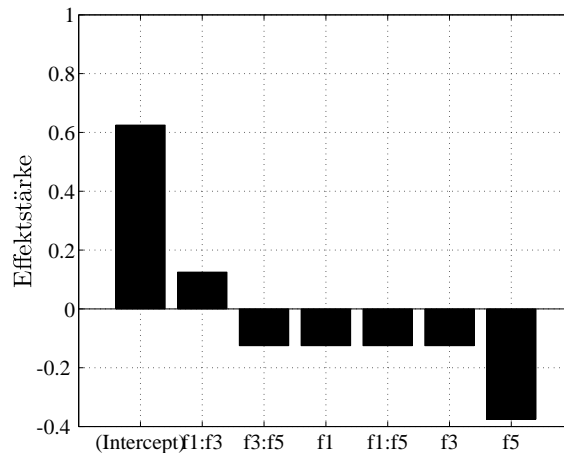
## 4.2 Teilfaktorplan

Nachdem im ersten Abschnitt ein Metamodell zur Beschreibung des untersuchten Abgasturboladers bezüglich des Qualitätsmerkmals der maximalen Schwingungsamplitude erarbeitet und interpretiert wurde, soll in diesem Abschnitt geklärt werden, ob die Informationen auch mit weniger Simulationen gewonnen werden können. Dazu wird ein teilfaktorieller Versuchsplan mit 16 Versuchen bei fünf Faktoren auf zwei Stufen nach den Kriterien der D-Optimalität aufgestellt.

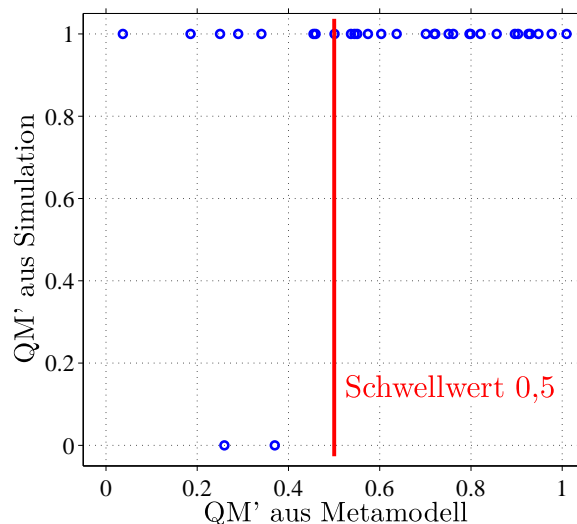
Das Metamodell umfasst durch Anwendung des  $R^2$ -Kriteriums nun sieben Terme nach Abb. (7). Neben den zuvor festgestellten  $f_1$ ,  $f_5$  und  $f_1:f_5$  sind dies das Lagerspiel turbinenseitig außen  $f_3$ , dessen Kopplung mit dem Lagerspiel innen  $f_1:f_3$  und die Kopplung des Lagerspiels außen mit der Lagerbreite  $f_3:f_5$ . Den Vergleich mit den 32 Kontrollrechnungen zeigt Abb. (8). Neun Varianten liegen unterhalb des Schwellwertes 0,5 und erfüllen so die notwendige Bedingung für gutes Verhalten, wobei dieses nur zwei wirklich aufweisen. Für die 23 Varianten denen schlechtes Verhalten prognostiziert wird, trifft dies bei allen zu.

Die Sensitivitätsanalyse mit nur 16 Simulationen ist demnach geeignet dieselben Aussagen herauszuarbeiten, wie jene des Vollfaktorplans mit 32 Simulationen. Allerdings kann der Bereich, in denen gutes Verhalten zu erwarten ist nicht so stark eingegrenzt werden. Die Aussagen zu den Abhängigkeiten des Qualitätsmerkmals sind weniger prägnant, da vermeintlich mehr Faktoren Einfluss haben. Die Sortierung und Größe der Effektstärken bleibt erhalten.





**Abbildung 7:** Effektstärke für die sieben Terme des Metamodells: Mittelwert (Intercept); Lagerspiel turbinenseitig innen (f1); Lagerspiel turbinenseitig außen (f3); Lagerbreite außen (f5) und Koppelterme (f1:f5)



**Abbildung 8:** Gegenüberstellung QM' von 32 Kontrollrechnungen gegen Vorhersage aus Metamodell mit sieben Termen (teilmultifaktorieller Versuchsplan)

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die systematische Sensitivitätsanalyse nach der DoE Methodik für einen Abgasturbinolader bezüglich der maximalen Rotorschwingungsamplitude als repräsentatives Qualitätsmerkmal durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss von fünf konstruktiven Lagerparametern untersucht.

Zunächst wurde belegt, dass das Bewegungsverhalten des Rotors maßgeblich von subsynchronen Schwingungen geprägt wird. Deshalb wurde ein modifiziertes diskretes Qualitätsmerkmal vorgeschlagen, welches das Auftreten oder Ausbleiben dieser erfasst. Mittels eines einfachen, multidimensional linearen Modells konnten als wesentliche Parameter das Lagerspiel turbinenseitig innen und die Lagerbreite außen herausgearbeitet werden. Zusätzlich wurde die gekoppelte Verstärkung beider untereinander festgestellt, wie sie durch eine „one factor at one time“ Analyse nicht zu erkennen ist. Die Abhängigkeiten sind plausibel, da die für den betrachteten ATL relevante subsynchrone Schwingung durch einen Whirl im turbinenseitig äußeren Schmierspalt erregt wird.

Anhand von gleichmäßig im Parameterraum verteilten Kontrollrechnungen wurden die Aussagen des Regressionsmodells geprüft. Der induktive Test zeigt, dass als ungeeignet vorhergesagte Parameterkombinationen richtig erkannt und im Designprozess verworfen werden können. Der für erwartungsgemäß gutes Verhalten näher zu betrachtende Raum, kann so erheblich eingeschränkt werden. Mit dem Vorschlag, das sprunghafte Systemverhalten durch ein lineares Modell und einen Schwellwert als Entscheidungskriterium abzubilden, wurde demnach

ein geeigneter und rechenzeiteffektiver Ansatz präsentiert. Der Vorteil gegenüber der Verwendung eines höherdimensionalen Modells ist die geringe Zahl der nötigen Simulationen. So bedingen kubische Ansatzfunktionen zum Beispiel 243 statt 32 Variationen. Ein Sprung könnte aber auch dann noch nicht abgebildet werden. Die Autoren empfehlen vielmehr einen kleinen Bereich mit linearem Ansatz zu untersuchen, den Bereich mit den so gewonnen Erkenntnissen gerichtet zu verschieben und erneut zu starten. Da ein Teilfaktorplan mit 16 Simulationen vergleichbare Informationen wie der Vollfaktorplan mit 32 liefert, können einige Simulationen eingespart werden. Die einzelnen Rechnungen sind vollkommen unabhängig und können problemlos parallel ausgeführt werden.

## Literatur

- [1] DANIEL, C. ; NITZSCHKE, S. ; WOSCHKE, E. ; STRACKELJAN, J.: Numerische Simulation des instationären Verhaltens der Schwimmbuchsenlagerung in Turboladern. In: *9. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen*. Wien, 2011
- [2] DANIEL, C. ; NITZSCHKE, S. ; WOSCHKE, E. ; STRACKELJAN, J.: Identifikation des Einfluss konstruktiver Lagerparameter eines in Schwimmbuchsen gelagerten Rotorsystems. In: *10. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen*. Berlin, 2013
- [3] DANIEL, C. ; NITZSCHKE, S. ; WOSCHKE, E. ; STRACKELJAN, J.: Validierung der Hochlaufsimulation für automotiv Abgasturbolader. In: *11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen*. Magdeburg, 2015
- [4] DANIEL, C. ; STRACKELJAN, J. ; WOSCHKE, E.: Enhanced Fluid bearing Simulation with standard MBS Systems. In: *GAMM Proceedings*, 2008
- [5] DANIEL, Christian: *Simulation von gleit- und wälzgelagerten Systemen auf Basis eines Mehrkörpersystems für rotordynamische Anwendungen*, Univ. Magdeburg, Fak. für Maschinenbau, Diss., 2013
- [6] FISHER, R.A.: *The Design of Experiments*. Second. Oliver and Boyd, 1937
- [7] MUSZYNSKA, A.: whirl and whip-rotor/bearing stability problems. In: *Journal of Sound and Vibration* 110 (1986), S. 443–462
- [8] POKROPP, Fritz: *Lineare Regression und Varianzanalyse*. München [u.a.] : Oldenbourg, 1994
- [9] SCHWEIZER, Bernhard: Oil whirl, oil whip and whirl/whip synchronization occurring in rotor systems with full-floating ring bearings. In: *Nonlinear Dynamics* 57 (2009), Nr. 4, S. 509–532
- [10] SIEBERTZ, Karl ; BEBBER, David ; HOCHKIRCHEN, Thomas: *Statistische Versuchsplanung*. Heidelberg : Springer, 2010 (VDI-Buch)
- [11] SIMPSON, Timothy W. ; PEPLINSKI, Jesse ; KOCH, Patrick N. ; ALLEN, Janet K.: On the use of statistics in design and the implications for deterministic computer experiments. In: *Design Theory and Methodology* (1997), S. 14–17
- [12] WOSCHKE, Elmar: *Simulation gleitgelagerter Systeme in Mehrkörperprogrammen unter Berücksichtigung mechanischer und thermischer Deformationen*, Univ. Magdeburg, Fak. für Maschinenbau, Diss., 2013