

# Multivariate Datenanalyse zur objektiven Beschreibung von Kavitationsanwendungen

Christian Koch, Matthias Jüscke

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, E-Mail: christian.koch@ptb.de

## Einleitung

Ultraschall hat vielfältige Anwendungen in Medizin und Technik. In flüssigen Medien beruhen die erzielten Wirkungen sehr häufig auf Kavitation, die jedoch von vielen äußeren Faktoren und Parametern abhängt und darüber hinaus von stochastischer Natur ist. Dieser Umstand erschwert die Kontrolle, Steuerung und Optimierung aller Anwendungsprozesse außerordentlich. Eine objektive Beschreibung fehlt ebenso wie die Möglichkeit, Prozesse miteinander vergleichen zu können. Insbesondere mit Blick auf heute so wichtige Fragen wie die Sicherung der Qualität bzw. das Qualitätsmanagement oder auch die notwendige Optimierung der Prozesse, um dem großen Kostendruck zu begegnen, ist dieser Zustand sehr unbefriedigend.

Deshalb wurde versucht, die Kavitationsprozesse mit Hilfe von repräsentativen Indikatoren zu beschreiben, die mit neu erarbeiteten Mess- und Auswertverfahren erhalten wurden. Bei der Analyse der Ergebnisse, die in einer parallelen Veröffentlichung [1] dargestellt werden, zeigte sich, dass alle Ergebnisse stark stochastische Abhängigkeiten aufwiesen und systematische Untersuchungen mit deterministischen Methoden nicht immer befriedigende Ergebnisse lieferten. Es lag deshalb nahe, für eine Auswertung statistische Verfahren zu nutzen. Es wurde deshalb als ein Verfahren der multivariaten Datenanalyse die Faktorenanalyse angewandt, die dann auch für eine allgemeine Prozessbeschreibung verwendet werden konnte.

## Grundzüge der Faktorenanalyse

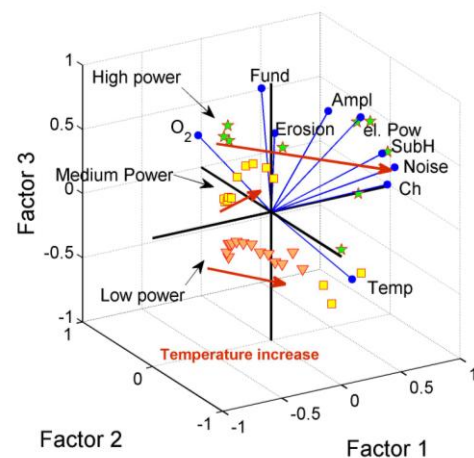
Mit der Faktorenanalyse wurde ein struktursuchendes Verfahren angewandt, mit dem verborgene Zusammenhänge der Daten aufgedeckt und gemeinsame Eigenschaften und Beschreibungsvariablen gefunden werden können [Buch]. Es werden gemeinsame Faktoren gesucht, die gemeinsame Eigenschaften der Daten repräsentieren und die ein neues Koordinatensystem (Faktorraum) aufspannen, in dem alle Variablen dargestellt werden. Dabei sind sowohl die Indikatoren, andere Messgrößen wie die elektrische Leistung, als auch Parameter, die eingestellt werden wie Temperatur oder der O<sub>2</sub>-Gehalt als Variablen gesetzt. Insbesondere lassen sich Zusammenhänge zwischen den Variablen aber auch fehlende Korrelation leicht erkennen, was auch quantitativ ausgewertet werden kann. Den Faktoren können verallgemeinerte Eigenschaften zugewiesen werden, die grundlegende Tendenzen aufzeigen. Im Faktorraum werden aber auch die Messdaten wieder dargestellt und es können generelle Tendenzen der Messdaten aufgezeigt werden.

Die Faktoren können allerdings nicht selbst gemessen werden. Deshalb muss man sie durch (möglichst leicht

erreichbare) Messgrößen darstellen. Variablen, die im Faktorraum möglichst nah an den Faktoren liegen sind dafür geeignet. Mit Hilfe einer neuentwickelten Wichtungsmethode ist es möglich, daraus einen verallgemeinerten Parameter zu ermitteln, der als beschreibende Variable für Kavitationswirkungen eingesetzt werden kann. Mit Hilfe von Fitprozeduren können Zusammenhänge hergestellt werden, die zur Prozessbeschreibung dienen.

## Ergebnisse

In Abbildung 1 ist ein typisches Analyseergebnis gezeigt. Die blauen Linien mit rundem Punkt am Ende stellen die Variablen dar. Liegen die Punkte nah beieinander, besteht ein hoher Überlapp zwischen den Variablen und sie sagen Ähnliches aus, sind sie nahezu orthogonal zu einander, gibt es keine große Ähnlichkeit. Im Beispiel zeigt sich, dass der chemische Indikator, die Subharmonische und das Kavitationsrauschen sehr nah beieinander liegen, also ähnliche Eigenschaften darstellen. Dagegen sind Temperatur, O<sub>2</sub>-Konzentration und Erosion nahezu orthogonal und stellen andere / eigene Dateneigenschaften dar.



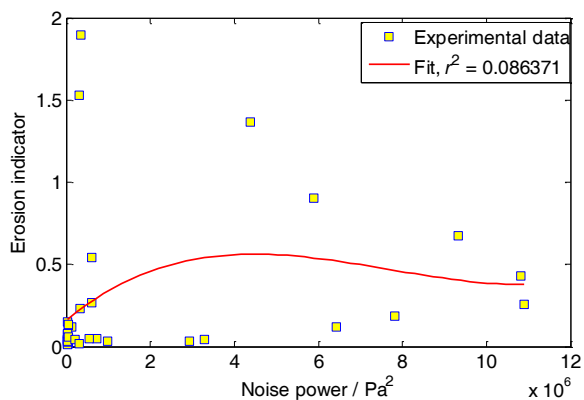
**Abbildung 1:** Beispiel einer Faktorenanalyse für die Untersuchung der Abhängigkeit verschiedener Indikatoren von der Temperatur, blaue Punkte: Variablen, Dreiecke: Messdaten bei niedriger elektrischer Leistung, Quadrate: Messdaten bei mittlerer elektrischer Leistung, Fünfecke: Messdaten bei hoher elektrischer Leistung, O<sub>2</sub>: O<sub>2</sub> Konzentration im Wasser, Fund: Amplitude der Fundamentalen, Erosion: Erosionsindikator, Ampl: Amplitude der Treiberspannung, el. Pow: elektrische Eingangsleistung, SubH: Amplitude der Subharmonischen, Noise: Rauschleistung, Ch: chemischer Indikator, Temp: Wassertemperatur.

Ebenfalls dargestellt werden die Messdaten selbst. Auf diese Weise kann man die Daten analysieren und Trends feststellen. Im Beispiel wurden drei Datensätze verwendet,

die bei niedriger, mittlerer und hoher elektrischer Eingangsleistung die Messdaten in Abhängigkeit von der Temperatur ermitteln. Im Faktorraum bilden sich entsprechende Cluster, die „wandern“, was die Pfeile, die jeweils Temperaturerhöhung andeuten, zeigen. Gleichzeitig liegt der Cluster mit niedriger Leistung im unteren Bereich, die mittlere darüber und für hohe Leistungen im oberen Bereich und folgen Faktor 3, der durch die Fundamentale maßgeblich beschrieben wird. Damit können den verschiedenen Einsatzparametern die Faktoren zugeordnet werden, die jeweils wesentlich für eine Beschreibung sind.

### Einsatz zur Prozessbeschreibung

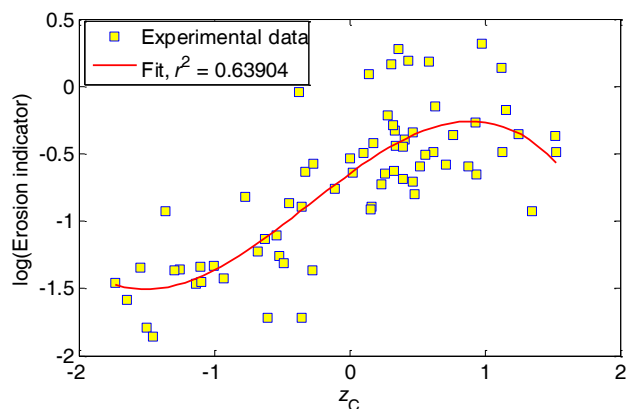
Eine wesentliche Anforderung der Praxis ist es, eine Beschreibung der Prozesse zu ermöglichen. Ziel ist es, quantitative Ausgangsgrößen wie z. B. die Reinigungsqualität mit einfach zugänglichen Größen wie der elektrische Eingangsleistung, der Temperatur oder dem Kavitationsrauschen zu beschreiben. Dazu werden Zusammenhänge zwischen den Größen hergestellt. Versucht man nun, die Erosion mit Hilfe des Rauschens zu beschreiben, erhält man keinen klaren quantitativen Zusammenhang. Abbildung 2 zeigt eine Darstellung der beiden Größen und den Versuch, eine Fitfunktion zu erstellen, was nur mit sehr schlechtem  $r^2$ -Faktor gelingt. Für die Subharmonische lässt sich ein solcher Zusammenhang jedoch leicht herstellen und es zeigt sich, dass die Faktorenanalyse hilft, für die zu untersuchenden Variablen entsprechende darstellende Größen zu ermitteln.



**Abbildung 2:** Darstellung des Erosionsindikators für das obige Beispiel in Abhängigkeit von der Kavitationsrauschleistung

Nun gelingt es in der Praxis oft nicht, für jede Größe direkt eine einzelne beschreibende Variable zu finden. Für die Bildung einer verallgemeinerten beschreibenden Variablen können nun die Faktoren genutzt werden. In der praktischen Anwendung sind die Faktoren jedoch selbst nicht direkt messbar. Aus der Faktorenanalyse erkennt man allerdings, welche Variablen zur Beschreibung bzw. Repräsentation der Faktoren genutzt werden können: sie sollten möglichst nahe an den jeweiligen Faktoren liegen. Im Beispiel sind das die Fundamentale, das Kavitationsrauschen und die Temperatur. Da die Faktoren einen Raum aufspannen und damit jeden

Messpunkt darstellen können, wird dieses auch für die repräsentierenden Variablen gelten.



**Abbildung 3:** Darstellung des Erosionsindikators für das obige Beispiel in Abhängigkeit von der verallgemeinerten Größe  $z_C$

Für eine praktische Beschreibung benötigt man eine einzelne skalare Größe, die für einen Fitprozess eingesetzt werden kann. Dazu wurde ein neues Verfahren entwickelt, das dies ermöglicht [Koch 2011]. Ergebnis ist eine verallgemeinerte Größe  $z_C$ , die jede ausgewählte Variable einbeziehen kann. In einem Beispiel in Abbildung 3 wurden dieselben Erosionsdaten wie oben in Abhängigkeit der neuen verallgemeinerten Größe dargestellt und wieder eine Fitfunktion angepasst. Das gelingt nun mit deutlich verbesserter Güte und die Fitfunktion ließe sich sehr gut für eine generelle Beschreibung einsetzen.

### Schlussfolgerung

Mit Hilfe einer Faktorenanalyse können Kavitationsmessdaten sinnvoll ausgewertet werden. Zusammenhänge zwischen den Variablen werden erkannt und eine allgemeine Prozessbeschreibung ist möglich.

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des IGF-Vorhabens 15068 N der DECHEMA, das über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde.

### Literatur

- [1] M. Jüschke, Ch. Koch, Messung und Vergleich verschiedener Effekte von Kavitation für eine quantitative Beurteilung von Anwendungsprozessen, DAGA 2011, Düsseldorf
- [2] K. Backhaus, B. Erichson, W. Plinke, R. Weiber, Multivariate Analysemethoden, Springer, 2008
- [3] Koch, Ch., Jüschke, M.: Multivariate analysis of cavitation indicators and parameters for quantitative description of cavitation applications, eingereicht bei Ultrasonics Sonochemistry