

**Vorträge**

**Berstschtzberechnungen mit  
ANSYS-LSDYNA**

R. Schlegel, T. Dannenberg, Th. Seider

# Berstschtzberechnungen mit ANSYS-LSDYNA

Roger Schlegel, Tino Dannenberg, Thomas Seider

Dynardo GmbH, Weimar, Deutschland

## Summary

Berschutzeinrichtungen werden u.a. bei Prüfeinrichtungen von rotierenden Strukturen wie z.B. Turbinen und Fluzeugtriebwerken erforderlich. Der Beitrag stellt Impaktberechnungen zur Auslegung von Berstschtzwänden (Stahlbeton) für Turbomaschinen-Prüfstände mit ANSYS-LSDYNA vor. Dabei werden das Vorgehen, Modellierungsgrundsätze sowie die Besonderheiten der Lastannahmen diskutiert.

## Keywords

Berstschtz, Rotations-Prüfstände, Impaktanalyse, ANSYS-LSDYNA, optiSLang

## 1. Motivation und Aufgabenstellung

Rotierende Maschinen, wie Turbinen, Generatoren und Fluzeugtriebwerke werden (im realen Einsatz, wie auch auf Rotationsprüfständen) oft bei hohen Drehzahlen betrieben. Im Falle eines Bauteilversagens (Havariefall) müssen Personen und Material in der direkten Umgebung durch geeignete Berstschatzeinrichtungen vor den Wirkungen eines unkontrollierten Austritts von Trümmern geschützt werden [1]. Für den Berstschatz von Prüfständen werden dabei einerseits die unmittelbare Kapselung an der rotierenden Maschine selbst sowie die Auslegung von Trennwänden, die sich z.B. zwischen der Prüfstandskabine und der Messkabine befinden, unterschieden.

Für den Havariefall wird angenommen, dass nach dem Bersten Bruchstücke der rotierenden Maschine mit hoher Geschwindigkeit auf die Berstschatzwände prallen. Die Wanddicken sind so zu bemessen, dass die Bruchstücke die Berstschatzwand nicht durchdringen bzw. keine Absplitterungen auf der lastabgewandten Seite entstehen können.

Der vorliegende Beitrag zeigt das Vorgehen zur Auslegung von Berstschatzwänden aus Stahlbeton im Rahmen von Neubauten für Rotationsprüfstände mittels nichtlinearer, transient dynamischer Analysen in ANSYS-LSDYNA und darauf aufbauende Sensitivitätsuntersuchungen für verschiedene Lastszenarien mit ANSYS-optiSLang.

## 2. Simulationslösung

### 2.1 Annahmen zur Beschreibung der Einwirkungen

Bei Anpralllasten auf Berstschatzeinrichtungen handelt es sich um außergewöhnliche Einwirkungen nach DIN EN 1991 [2]. Die Lastvorgaben (z.B. Bruch und Wegfliegen einzelner Turbinenschaufeln oder Bruchstücke von Rotationsscheiben) müssen entsprechend verfügbarer Annahmen in Normen (z.B. [1], Schutzklasse D) und durch ingenieurmäßige Annahmen sowie Erfahrungswerte durch den Anlagenbetreiber definiert werden. Sehr hilfreich sind hierbei die durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen mit ANSYS-optiSLang, welche den Einfluss und die Auswirkungen der einzelnen Einwirkungsannahmen auf die Berstschatzmaßnahmen offenlegen (s. Kap. 3).

In den hier beschriebenen Fällen wurde ein Last-Bruchstück als Dreittelscheibe (s. Abb. 1) als Grundlage der Definition von Einwirkungen verwendet. Dabei soll die volle Rotationsenergie der Dreittelscheibe in translatorische Energie umgesetzt werden, aus der eine entsprechende translatorische Anfangsgeschwindigkeit für die Bruchstücke beim Aufprall auf die Wand abzuleiten ist. Die größte Rotationsenergie der unterschiedlichen Versuchsapparaturen soll diesbezüglich den schlimmsten Fall (worst case) bestimmen. Die Steifigkeit des Bruchstücks sind mit dem E-Modul von Stahl (210000 MPa) anzunehmen. Von einer plastischen Energiedissipation des Bruchstücks ist kein Kredit zu nehmen.

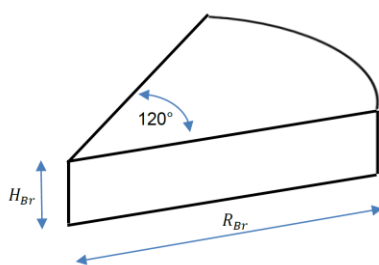
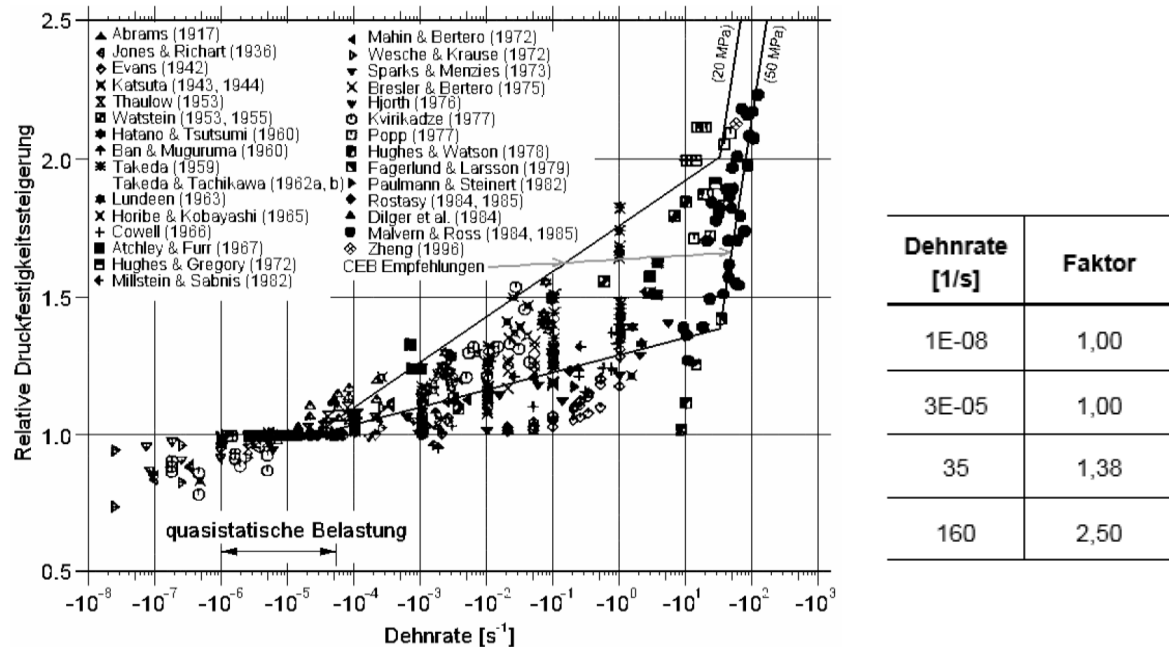


Abb. 1 Geometrie der Bruchstücke (schematische Darstellung)

### 2.2 Nichtlinearer Widerstand von Stahlbeton unter Impaktbeanspruchung

Die Beschreibung des nichtlinearen Widerstands von Stahlbeton erfolgt in Anlehnung an die normativen Vorgaben im DIN EN 1992 [3] mit Berücksichtigung von [4] für nichtlineare Verfahren (dort Abschnitt 5.7). Dabei werden für die jeweilige Beton- bzw. Betonstahlklasse die Materialkennwerte des Betons und Betonstahls nach [3] verwendet und der für außergewöhnliche Bemessungssituationen geforderte Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand  $\gamma_R=1,1$  berücksichtigt.

Für die hier zu untersuchende, kurzzeitdynamische Impaktbeanspruchung müssen jedoch die normativen Vorgaben noch erweitert werden. Bei Beton und Betonstahl ist unter Impaktbeanspruchung insbesondere eine dehnratenabhängige Festigkeitssteigerung zu beobachten. Unter anderem wird dieser Effekt für Beton in [5] untersucht. Um den Effekt in den FE-Analysen zu berücksichtigen, wird die dehnratenabhängige Steigerung der Betondruckfestigkeit entsprechend der in [5] ausgewiesenen CEB-Empfehlung für einen Beton mit der Druckfestigkeit von 50 MPa angesetzt. Der berücksichtigte Zusammenhang kann *Abb. 2* entnommen werden.



*Abb. 2* Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Dehnrate nach [5] (*Abb. 2.18*)

Für den Beton wird das elasto-plastische LS-DYNA-Materialmodell \*MAT\_PSEUDO\_TENSOR mit Mode II.C. („Tensile failure plus damage scaling“) [6] verwendet. Darin wird das Schubversagen des Betons durch eine elliptische Fließbedingung und die Entfestigung mittels einer Schädigungsfunktion gesteuert.

Das nichtlineare Materialverhalten des Stahls wird durch das LS-DYNA-Materialmodell \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY [6] abgebildet. Die Dehnratenabhängigkeit wird nach [7] mit einem Festigkeitserhöhungsfaktor für die Spannungen von ca. 1,15 bei einer Dehnrate von 10 s<sup>-1</sup> abgeleitet. Dabei wird eine multilineare Spannungs-Dehnungs-Kurve mit Berücksichtigung einer Entfestigung zur Abbildung des Effektes der Stabeinschnürung des Betonstahls definiert.

Ab dem Erreichen der Bruchdehnung von 6% werden die Elemente aus dem System gelöscht (Eroding).

### 2.3 Finite-Elemente-Simulationsmodell

Die Berstschtzwände aus dem Verbundwerkstoff Stahlbeton werden durch eine diskrete, räumliche Modellierung von Beton und Betonstahl abgebildet. Als Bewehrung für die Berstschtzwände wurde Stabstahl gewählt. Der Beton wird mittels Volumenelementen diskretisiert, die einzelnen Bewehrungsstäbe mittels Balkenelementen. Es wird ein voller Verbund zwischen Betonstahl und Beton unterstellt, was im FE-Modell durch die Verwendung gleicher Knoten der Volumenelemente des Betons und der Balkenelemente des Betonstahls modelliert wird.

Das Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) ist in *Abb. 3* dargestellt. Zur Auslegung der Berstschtzwände wird das FE-Modell parametrisch erstellt, so dass die Wanddicke, der Bewehrungsgrad, die Betonsorte, der Aufprallort sowie die Lastparameter des Bruchstücks variiert werden können.

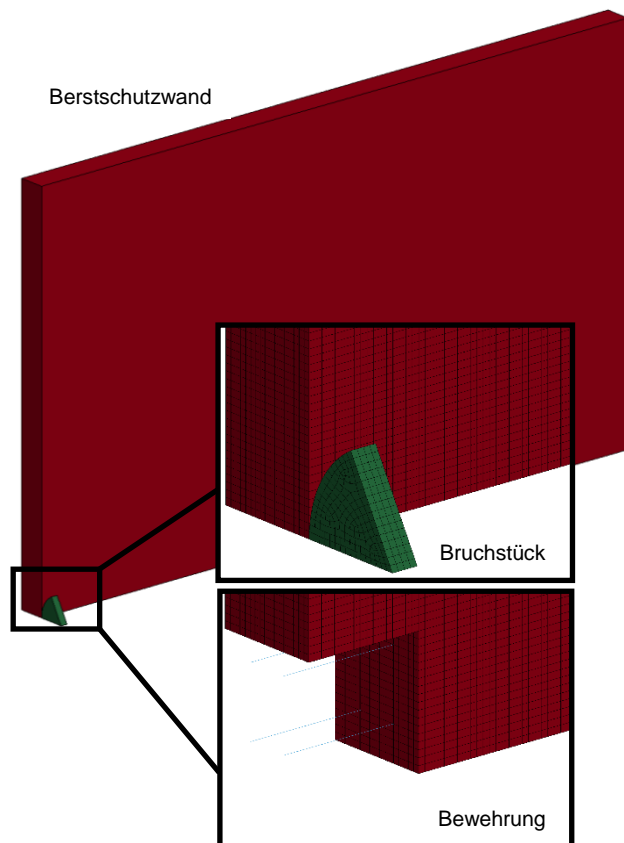


Abb. 3 Doppelsymmetrisches FE-Modell

### 2.3 Beschreibung der Randbedingungen

Die horizontale Lastabtragung der Berstschutzwände erfolgt über Fußboden und Querwände sowie über Deckel (beim Prüfstand 1) bzw. über eine Decke (im Prüfstand 2).

Das Wirken der Deckel der Prüfstandszellen im Prüfstand 1 wird im FE-Modell durch zwei Grenzbetrachtungen (zwei Analysen) idealisiert. In einer ersten Analyse wird angenommen, dass die Berstschutzwand senkrecht zur Wandoberfläche von dem Deckel gestützt wird. Im Finite-Elemente-Modell wird somit eine 4-seitig gestützte Wand angesetzt. Die Aufprallposition des Bruchstücks wird vertikal und horizontal in der Mitte der Berstschutzwand angesetzt, da angenommen wird, dass dies die ungünstigste Aufprallposition für eine vierseitig gestützte Wand ist.

In einer zweiten Analyse wird auf die Tragwirkung der Deckel verzichtet, was durch eine 3-seitig gestützte Wand im FE-Modell abgebildet wird. Die Aufprallposition des Bruchstücks wird dabei vertikal am oberen Rand (nicht gestützter Rand) und horizontal in der Mitte der Berstschutzwand angesetzt, da angenommen wird, dass dies die ungünstigste Aufprallposition für eine dreiseitig gestützte Wand ist.

In den Prüfzellen im Prüfstand 2, in dem stets eine Decke vorhanden ist, wird im FE-Modell eine 4-seitig gestützte Wand angesetzt. Die Aufprallposition des Bruchstücks wird analog zur ersten Analyse zum Prüfstand 1 vertikal und horizontal in der Mitte der Berstschutzwand angesetzt.

Es werden entsprechende Symmetriebedingungen je nach doppelsymmetrischen Modell oder Halbmodell verwendet.

Die Belastung auf die Berstschutzwände resultiert aus der Masse  $m_{Br}$  und der Anfangsgeschwindigkeit  $V_{0,Br}$  der Bruchstücke. Die Anfangsgeschwindigkeit wird dabei aus einer translatorische Energie, welche aus der vollen Rotationsenergie des Bruchstücks umgesetzt wird, abgeleitet.

## 2.4 Auslegungssimulationen

In einer ersten Variantenstudie werden die Wanddicken von 150 mm bis zu 500 mm sowie der Bewehrungsgrad der Wand inkrementell erhöht, um die kleinstmöglichen erforderlichen Wanddicken zu bestimmen, bei denen kein Durchdringen durch die Bruchstücke festgestellt werden kann. Für diese Analysen werden zudem konstruktive Randbedingungen (Stabdurchmesser, Stababstand, Betondeckung) beachtet.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Aufprallposition des Bruchstücks keinen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dies erklärt sich aus dem Impulserhaltungssatz und der im Vergleich zur Bruchstückmasse wesentlich höheren Masse der Berstschutzwand.

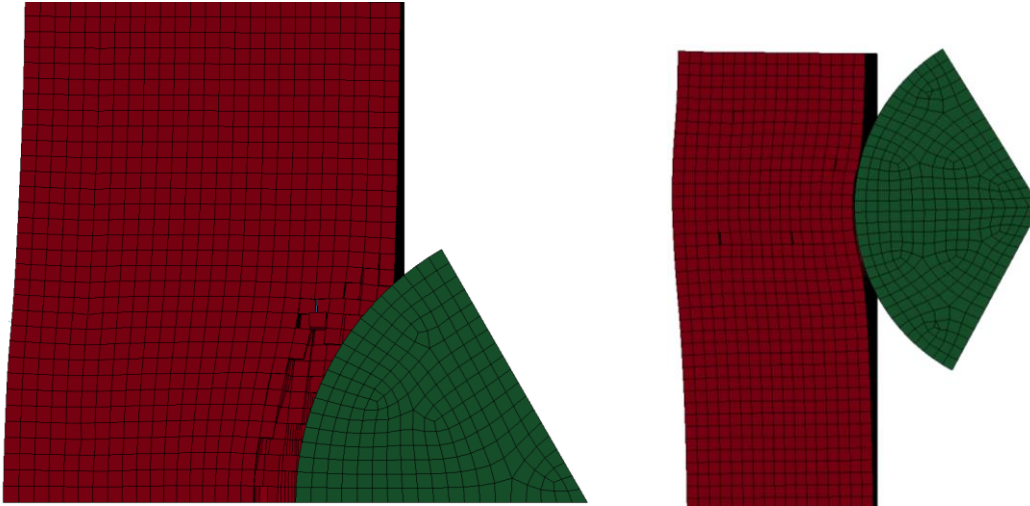


Abb. 4 Beispielplots für den Endverformungszustand für einen Aufprallbereich in der Mitte und am oberen Rand

## 3. Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden vier Parameter variiert, welche die Form sowie die kinetische Energie des Bruchstücks beschreiben:

- die Drehzahl des Rotors und damit die translatorische Geschwindigkeit
- der Radius des Bruchstücks
- die Höhe des Bruchstücks
- die Masse des Bruchstücks

Die Stichprobenauswahl erfolgte in ANSYS-optiSLang® über das Latin-Hypercube-Sampling, welche über die vorgegebenen Variationsbereiche unkorrelierte, gleichmäßig verteilte Eingangsgrößen erzeugt.

Ziel der Sensitivitätsanalysen beider Prüfstände ist die Bestimmung der initialen kinetischen Energien der Bruchstücke, bei denen die Berstschutzwände der Prüfstandszellen gerade nicht durchbrochen werden bzw. bei der keine Absplitterungen auf der lastabgewandten Seite entstehen können. Dazu werden die Antwortgrößen Eindringtiefe des Bruchstücks und maximale kinetische Energie ermittelt. Zusätzlich erfolgt eine visuelle Bestimmung der Schadenswirkung durch Auswertung der Plots von der Rückseite der Wand. Die Wand wird als unzulässig beansprucht angenommen, wenn eine Beschädigung an der Rückseite der Wand (ablösende, beschleunigte Bruchstücke) ersichtlich sind.

In Abb. 5 und Abb. 6 sind exemplarisch einige Ergebnisse dargestellt. Die Variation der maximalen Eindringtiefe (Parameter maxU) wird durch die Variation der drei Eingangsgrößen Masse, Höhe und Geschwindigkeit beeinflusst. Die Masse hat entspr. Abb. 5-Links mit 53,5% den größten Einfluss, gefolgt von der Geschwindigkeit (33,1%) und der Höhe (19,8%). Die Variation des Radius hat dagegen keinen relevanten Einfluss auf die Variation der Eindringtiefe. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Beanspruchung der Wand nicht von der Steifigkeit des Bruchstücks, sondern dessen Aufprallfläche abhängt. Das in der Sensitivitätsanalyse für die maximale Eindringtiefe ermittelte Metamodell der optimalen Prognosefähigkeit MoP ist in Abb. 5-Rechts dargestellt. Die Eindringtiefe (maxU) nimmt tendenziell ab, je größer die Aufprallfläche (Höhe des Bruchstücks) ist. Für geringere

Bruchstückmassen ist der Einfluss der Höhe nahezu linear. Für höhere Bruchstückmassen (ca. > 3 kg) nimmt der Einfluss der Höhe einen exponentiellen Verlauf an.

In Abb. 6 ist der ermittelte Zusammenhang zwischen Eindringtiefe und kinetischer Energie dargestellt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse ist der Anlagenbetreiber sehr einfach in der Lage auch künftige Proben und Lastgrößen hinsichtlich ihrer Zulässigkeit in Bezug auf den Berstschutz einzuordnen.

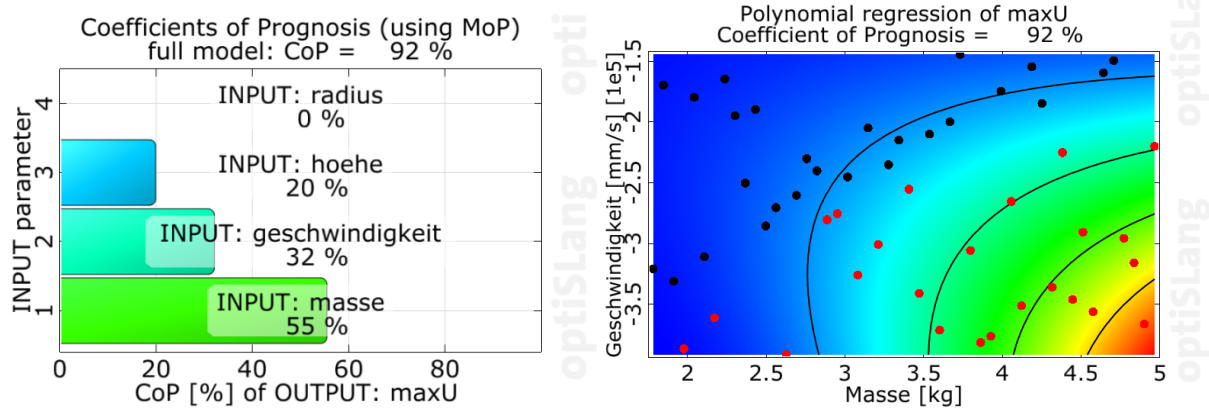


Abb. 5 Links: Prognosemaße CoP der Eindringtiefe (maxU) gegenüber den Eingangsparametern; Rechts: Metamodell of optimal Prognosis (MoP) zur Visualisierung der Abhängigkeit der Eindringtiefe des Bruchstücks in Abhängigkeit der Lastparameter  $v$  und  $m$

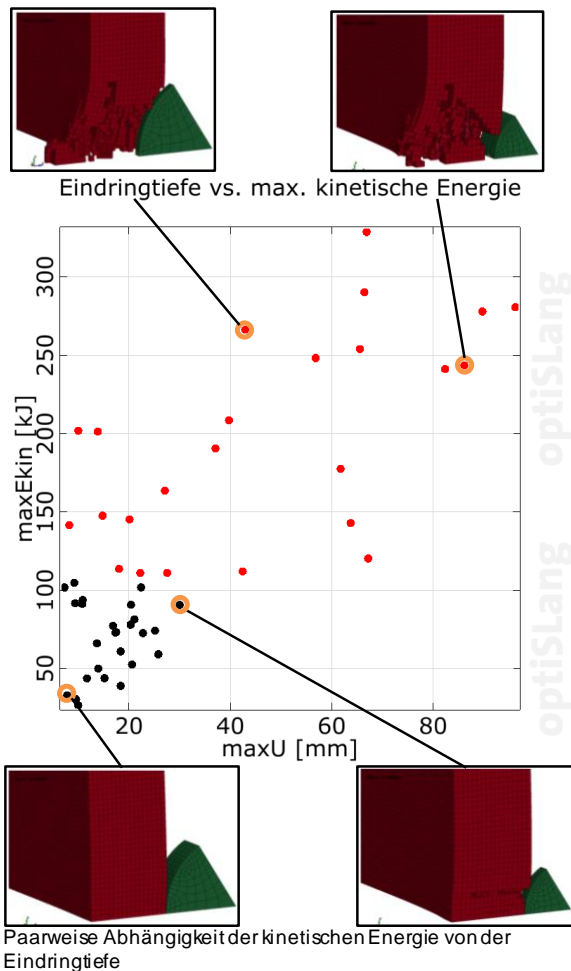


Abb. 6 Paarweise Abhängigkeit der kinetischen Energie von der Eindringtiefe

#### 4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit Hilfe der vorgestellten Vorgehensweise können durch Simulationen die Stahlbeton-Berstschtzwände nach den Anforderungen des Betreibers sicher ausgelegt werden.

In Analogie zum Tragsicherheitsnachweis aus DIN EN 1992-1-1:2011-01 (Eurocode 2) kann eine Sicherheit bezogen auf die Einwirkung ermittelt werden.

Von entscheidender Bedeutung für derartige Aufgaben ist neben der konservativen Beschreibung der Einwirkungen und insbesondere die realitätsnahe Simulation des nichtlinearen Material- und Bruchverhaltens des Stahlbetons.

Sensitivitätsuntersuchungen zeigen auf, in welchem Streubereich der Lastparameter der Berstschtz ausreichend ist. Mit Hilfe diese Ergebnisse kann der Betreiber der Prüfeinrichtungen schnell einschätzen, in welchem Bereich die Lastgrößen künftiger Prüfungen auftreten dürfen.

#### 5. Referenzen

- [1] DIN ISO 7475:2004-04, Mechanische Schwingungen – Auswuchten von Rotoren – Teil 23: Verkleidungen und andere Schutzmaßnahmen für die Messstation von Auswuchtmaschinen (ISO 21940-23:2012)
- [2] DIN EN 1991, Einwirkungen auf Tragwerke. 2010-12, Beuth Verlag
- [3] Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau DIN EN 1992-1-1:2011-01
- [4] Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau DIN EN 1992-1-1:2011-01
- [5] Fuchs, M.: Stahlbetonbauteile nach außergewöhnlicher Einwirkung – Schadensquantifizierung und Instandsetzung. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, März/April 2009
- [6] LS-DYNA® Keyword User's Manual, VOLUME II Material Models, LS-DYNA R7.1, May 2014
- [7] Greulich, S.: Zur numerischen Simulation von Stahlbeton- und Faserbetonstrukturen unter Detonationsbeanspruchung. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Februar 2004