



Auslegung, Bewertung und Simulation des statischen und dynamischen Verhaltens von Strukturbauteilen mit mineralischen Füllstoffen

INHALT

1 Vorwort	S.1
2 Statisches und dynamisches Verhalten von Strukturbauteilen	S.2
3 Simulation von Strukturbauteilen	S.8
4 Praktische Beispiele	S.12

1 Vorwort

In dieser Richtlinie werden verschiedene Werkstoff- und Verbundkonstruktionsvarianten für ruhende (ortsfeste) Strukturbauteile hinsichtlich ihres statischen und dynamischen Verhaltens vergleichend bewertet und Empfehlungen abgeleitet. Herstellern und Anwendern steht dadurch eine Bewertungsgrundlage für die Auswahl einer geeigneten Konstruktionsvariante zur Verfügung.

Die Varianten umfassen dabei:

1. GJL-(Gusseisen mit Lamellengraphit), Stahl- und Mineralgusskonstruktionen
2. Gegossene bzw. geschweißte Konstruktionen mit
 - Mineralgussfüllung
 - Zementbetonfüllung
 - Sandfüllung
 - innenbelassenen Sandkernen auf Furanharzbasis
 - innenbelassenen Sandkernen auf Wasserglasbasis

Im Fachausschuss „Konstruieren in Guss“ erstellt

Um das dynamische Verhalten von Strukturbauteilen mit Kernen im Entwicklungsstadium bewerten zu können, werden Empfehlungen zu Modellierungsmethoden für Strukturbauteile mit Kernen vorgestellt.

Die Erstellung dieser Empfehlungen basiert auf Erkenntnissen aus dem AiF-Forschungsprojekt „Innovative Nutzung von mineralischen Füllstoffen in gegossenen Maschinenbaukomponenten“, welches durch das vom BMWi initiierte ZUTECH-Programm gefördert wurde.

2 Statisches und dynamisches Verhalten von Strukturbauteilen

Strukturbauteile müssen ausreichend ausgelegt werden, so dass sie eine hohe statische und dynamische Steifigkeit aufweisen, um möglichst geringe Deformationen unter statischen und dynamischen Kräften zu gewährleisten.

Das statische und dynamische Verhalten von Bauteilen lässt sich vorwiegend von der Bauteilgeometrie und den Eigenschaften der verwendeten Werk- und Füllstoffe sowie der Werkstoffpaarung beeinflussen.

2.1 Verbesserung des statischen Verhaltens von Strukturbauteilen

Konstruktionen aus Stahl, Gusseisen mit Lamellengraphit und Mineralguss: Um die höchste statische Steifigkeit, unter Annahme gleicher Bauteilgeometrie, zu erreichen, muss der Werkstoff mit dem höchsten Elastizitätsmodul verwendet werden.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist der anforderungsgerechten Bauteilgestaltung besondere Beachtung zu schenken. Funktionsoptimale Gestaltungsvorschläge lassen sich per Topologieoptimierung erzeugen. Durch Zunutzemachen der Gestaltungsfreiheit des Fertigungsverfahrens Gießen kann in vielen Fällen bereits mit GJL-Konstruktionen die Steifigkeit gleich schwerer Stahlkonstruktionen erreicht werden.

Eine einfache Möglichkeit zur Steifigkeitserhöhung besteht in der Vergrößerung von Bauteilabmessungen und Wandstärken. Im Extremfall führt dieses zu massiven Körpern, wie sie aus Mineralguss hergestellt werden. Bei gleichen Außenabmessungen weist ein beanspruchungsgerecht gestaltetes Gussteil aus GJL eine höhere statische Steifigkeit auf als eine Mineralgusskonstruktion.

Verbundkonstruktionen: Bei Verbundkonstruktionen unterscheidet man zwischen Stahlschweiß- oder GJL-Konstruktionen, die zwecks Erhöhung der statischen bzw. dynamischen Steifigkeit mit Mineralguss, Zementbeton oder Sand ausgefüllt werden oder in denen Sandkerne auf Furanharz- oder Wasserglasbasis oder andere Kernformstoffe nach dem Abguss verbleiben.

Die **statische** Steifigkeit einer Verbundkonstruktion setzt sich aus der Steifigkeit der leeren Konstruktion und dem Steifigkeitsanteil zusammen, der durch den Kern bzw. die Füllung verursacht wird.

Bei der Auswahl des Füll- bzw. Kernformstoffs zur Steifigkeitssteigerung ist es nicht ausreichend, nur Materialkennwerte (Elastizitätsmodul) zu beurteilen. Damit der Füll- bzw. Kernformstoff zur Steifigkeitserhöhung beitragen kann, muss ein ausreichendes Anhaften an der Bauteilwand gewährleistet sein.

2.1.1 Vergleich der Konstruktionsvarianten

Der Einfluss von Werkstoffen und Werkstoffpaarungen auf die Steigerung der statischen Steifigkeiten der verschiedenen Konstruktionsvarianten wird hier am Beispiel eines balkenförmigen Bauteils gezeigt. Die Referenzgeometrie aus Gusseisen mit Lamellengraphit ist in **Bild 1** dargestellt. Die Bewertung des statischen Verhaltens erfolgt über den Vergleich der Biegesteifigkeiten der Konstruktionsvarianten (**Bild 2**).

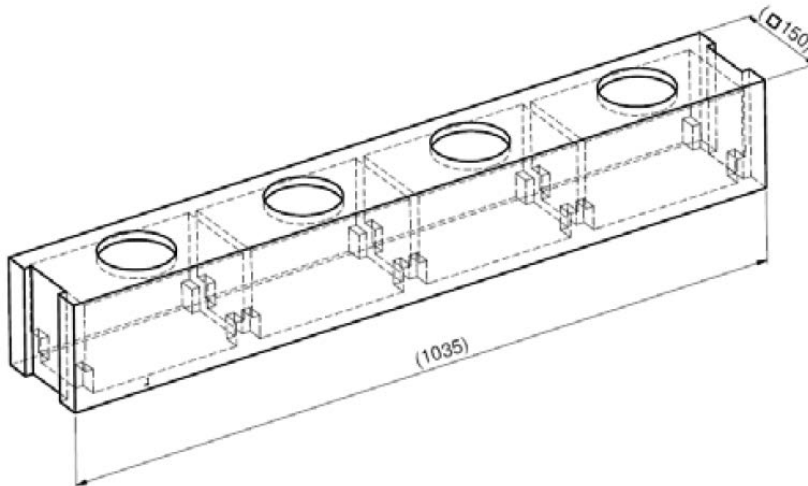


Bild 1: Referenzgeometrie

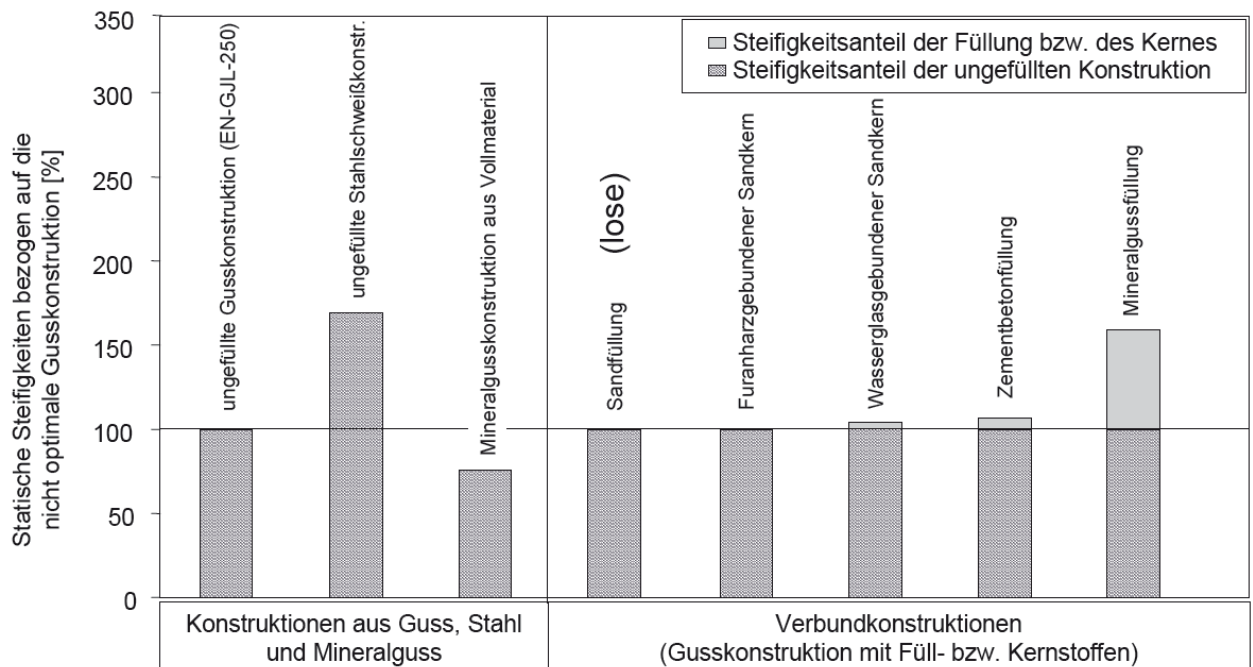


Bild 2: Statische Steifigkeiten der verschiedenen Konstruktionsvarianten

Die Stahlschweißkonstruktion weist bei annähernd identischer Geometrie*) durch den höheren Elastizitätsmodul die höchste statische Steifigkeit auf. Die Mineralgusskonstruktion aus Vollmaterial zeigt bei gleichen Außenabmessungen aufgrund des deutlich niedrigeren Elastizitätsmoduls eine geringere Steifigkeit im Vergleich zu der Referenzvariante aus GJL (**Bild 3**).

Werkstoffbezeichnung	Elastizitätsmodul E	Einheit
EN-GJL-150	78 bis 103	kN/mm ²
EN-GJL-200	88 bis 113	kN/mm ²
EN-GJL-250	103 bis 118	kN/mm ²
EN-GJL-300	108 bis 137	kN/mm ²
EN-GJL-350	123 bis 143	kN/mm ²

Bild 3: Elastizitätsmodule von GJL-Werkstoffen (aus DIN EN 1561)

Bei den Füllungen führt einzig die Mineralgussfüllung zu einer deutlichen Erhöhung der statischen Steifigkeit.

Sowohl loser Sand als auch furanharz- und wasserglasgebundene Sandkerne besitzen keine oder nur eine sehr geringe versteifende Wirkung. Während dieser Zusammenhang aus dem geringen Elastizitätsmodul von Sand und Sandkernen erklärbar wird, ist es zunächst erstaunlich, dass auch ein fester Kern wie die Zementbetonfüllung nur eine sehr geringfügige Erhöhung der Steifigkeit verursachen kann. Die Ursache hierfür liegt in der Schwindung des Betons während des Aushärtvorgangs und damit in einer Ablösung des Betonkernes von den Wänden des Prüfkörpers. Je größer der Spalt zwischen den Wänden und dem Zementbetonkern wird, desto weniger trägt die Zementbetonfüllung zur Versteifung der Gesamtkonstruktion bei.

2.2 Verbesserung des dynamischen Verhaltens von Strukturbauteilen

Um hohe dynamische Steifigkeiten von Bauteilen zu erreichen, sind sowohl die Bauteilgeometrie, die Werkstoffeigenschaften als auch die Dämpfungseffekte von maßgeblicher Bedeutung. Durch die Dämpfungseffekte werden Resonanzstellen, die sich bei Eigenfrequenzen des Bauteils abhängig von der Bauteilgeometrie, Massenverteilung und Elastizität herausbilden, bedämpft. Durch die Bedämpfung steigt die dynamische Steifigkeit und so können die Auswirkungen der dynamischen Schwachstellen reduziert werden.

*) Aus den ermittelten Gewichten und der spez. Dichte ergibt sich ein um 10% höheres Volumen auf der Stahlschweißkonstruktion gegenüber dem Gussteil aus GJL.



Zu den wesentlichen Dämpfungseffekten in Werkstoff- und Verbundkonstruktionen gehören:

- *Materialdämpfung*: Durch die Verformung entsteht eine Energiedissipation im Werkstoff.
- *Innere Reibung im Füllstoff*: Diese zeigt sich z. B. in losem Sand und resultiert hauptsächlich aus der Reibung der einzelnen Sandkörner untereinander.
- *Kontaktflächenreibung*: Hierbei kommt es zu einer Reibung zwischen einem abgelösten oder losen Kern und den Bauteilinnenwänden.

Die Wirksamkeit der Dämpfungseffekte im Bezug auf die Bedämpfung von Resonanzstellen lässt sich folgendermaßen darstellen:

Materialdämpfung << *Kontaktflächenreibung* < *Innere Reibung im Sand*

Konstruktionen aus Stahl, Guss und Mineralguss: Resonanzüberhöhungen werden „nur“ durch reine Materialdämpfung bedämpft. Wie dargestellt, ist die reine Materialdämpfung im Vergleich zur Kontaktflächendämpfung und der inneren Reibung im Sand sehr niedrig und erhöht dadurch nur geringfügig die dynamische Steifigkeit.

Verbundkonstruktionen: Je nach dem verwendeten Füll- bzw. Kernformstoff kommen die o. g. Dämpfungseffekte zum Tragen. Resonanzüberhöhungen von Verbundkonstruktionen mit festen Kernen, die eine gute Haftfähigkeit aufweisen und bei denen kein Ablösen des Kerns vorliegt, werden „nur“ durch die Werkstoffdämpfung der hohlen Konstruktion und des Füll- bzw. Kernstoffs bedämpft. Im dynamischen Bereich müssen die verwendeten Werk- bzw. Füllstoffe eine hohe Materialdämpfung aufweisen, um die Resonanzstellen zu bedämpfen. Füll- und Kernstoffe mit geringer Materialdämpfung verursachen nur eine Verlagerung von Resonanzstellen auf Grund der Masse ohne sie zu bedämpfen.

Resonanzüberhöhungen von Verbundkonstruktionen mit abgelösten oder losen Kernen werden nicht nur durch reine Materialdämpfung der hohlen Konstruktion sondern auch durch die Kontaktflächendämpfung bzw. die innere Reibung bedämpft. Diese Kerne tragen zwar nicht zur Verbesserung des statischen Verhaltens bei, das dynamische Verhalten wird aber deutlich im Vergleich zu ungefüllten Varianten verbessert.

2.2.1 Vergleich der Konstruktionsvarianten

Der Einfluss der Dämpfungseffekte auf die Steigerung der dynamischen Steifigkeiten von Werkstoff und Verbundkonstruktionen wird im Folgenden für die o. g. Werk- und Füllstoffe am Beispiel des balkenförmigen Bauteils gezeigt.

Die Bewertung des dynamischen Verhaltens erfolgt über den Vergleich der experimentell ermittelten dynamischen Steifigkeiten für die Biege- und die Torsionsschwingung bei gefüllten und ungefüllten Konstruktionsvarianten (**Bild 4**).

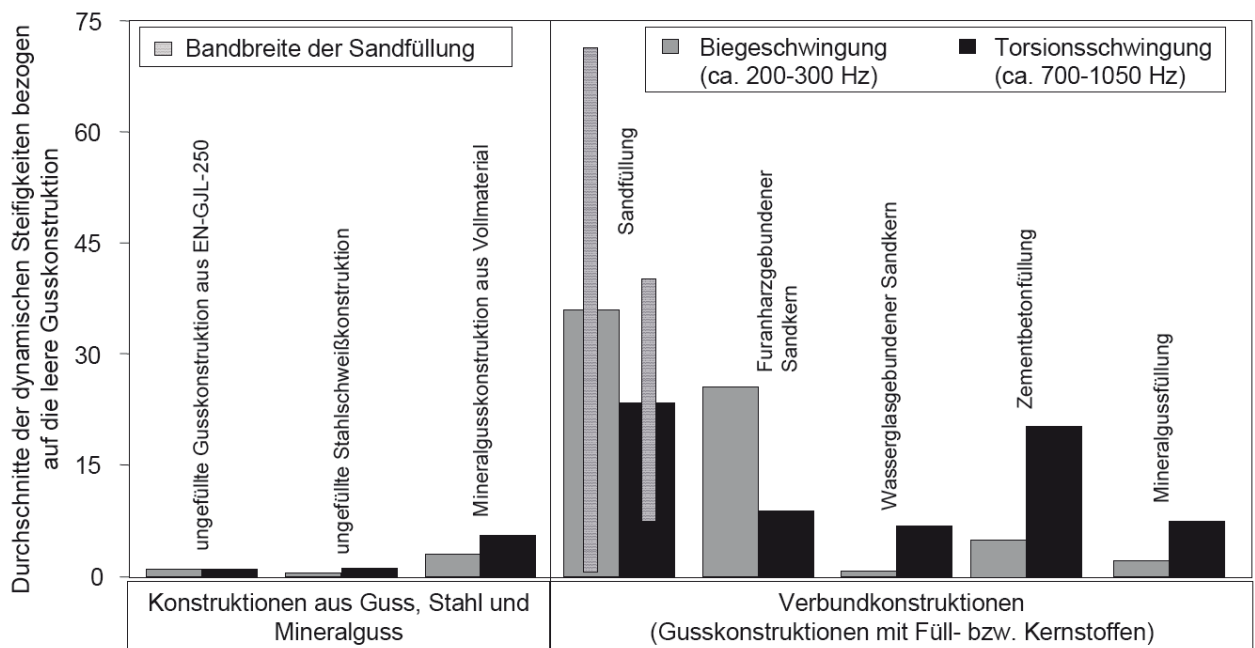


Bild 4: Dynamische Steifigkeiten der verschiedenen Konstruktionsvarianten

Die dynamischen Steifigkeiten der ungefüllten GJL-Konstruktion liegen etwas über denen der ungefüllten Stahlschweißkonstruktion. Hinsichtlich der dynamischen Steifigkeit werden beide Werkstoffe von Mineralguss übertroffen.

Innenbelassene Sandkerne auf Wasserglasbasis und Mineralgussfüllungen tragen nur geringfügig zur Bedämpfung von Strukturbauteilen im Vergleich zu losen Sandfüllungen, Zementbetonfüllungen und innenbelassenen Sandkernen auf Furanharzbasis bei.



Verbundkonstruktionen mit loser Sandfüllung, innenbelassenem Sandkern auf Furanharzbasis und die Zementbetonfüllung zeigen das höchste Potenzial zur Schwingungsbedämpfung und werden im Folgenden näher erläutert:

Sandfüllung: Die beste dämpfende Wirkung hat die Sandfüllung. Die Verwendung des Sandes als Füllung zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens von Strukturbauteilen führt allerdings nicht immer zu dem hohen und erwünschten Dämpfungseffekt, da eine Vielzahl verschiedener Faktoren die dämpfende Wirkung beeinflusst:

- Mit steigendem Füllungsgrad werden Resonanzüberhöhungen durch den Sand besser bedämpft, was auf eine höhere Energiedissipation zurückzuführen ist.
- Die Größe der Anregungskräfte und die Lage der Eigenfrequenzen wirken sich auf das Dämpfungsverhalten aus. Im Allgemeinen werden Schwingungen bei höheren Frequenzen besser bedämpft als bei niedrigen Frequenzen. Bei niedrigeren Eigenfrequenzen und niedrigeren Anregungskräften trägt die Sandfüllung nur wenig zur Bedämpfung bei, sie wirkt dann nur als Zusatzmasse.
- Die Verdichtung des Sandes unter dynamischer Belastung verursacht mit der Zeit eine deutliche Änderung des dynamischen Verhaltens der Füllung. Durch die zunehmende Verdichtung wird besonders die Bedämpfung bei höheren Frequenzen verbessert. Dagegen wird die Bedämpfung von Schwingungen bei niedrigeren Frequenzen schlechter.

Wenn das Dämpfungspotenzial effektiv genutzt werden soll, müssen die o. g. Einflussfaktoren bei der Auslegung von sandgefüllten Strukturbauteilen berücksichtigt werden.

Sandkerne auf Furanharzbasis: Der Kern aus furanharzgebundenem Formstoff zeichnet sich ebenfalls durch ein sehr hohes Bedämpfungspotenzial aus.

Der Grund für die hohe Bedämpfung ist der gewollte Zerfall des Bindemittels bei hoher thermischer Belastung. Dadurch bildet sich zwischen dem festen Sandkern und der Gusswand eine Übergangszone aus losem Sand. Im Vergleich zur Sandfüllung war bei dem furanharzgebundenen Sandkern auch bei kleinen Schwingungsamplituden eine hohe Dämpfung der Struktur nachweisbar. Einflussfaktoren, die bei der Sandfüllung die dämpfende Wirkung senken, sind bei innenbelassenen abgelösten Sandkernen vernachlässigbar und somit kann mit einem stabileren Verhalten bezüglich der dynamischen Eigenschaften gerechnet werden.

Zementbetonfüllung: Die Aushärtung des Zementbetons erfolgt immer in Verbindung mit einer Schwindung des Materials, so dass es zu einer Ablösung des Betonkerns kommen kann. Die hohe dämpfende Wirkung einer Zementbetonfüllung ist somit auf die Reibung zwischen dem Kern und den Innenwänden zurückzuführen.

2.3 Starrkörperschwingungen

Einfluss der Aufstellung und des Füll- bzw. Kernstoffs auf das dynamische Verhalten von Strukturbauteilen: Eigenschaften der Aufstellung von Strukturbauteilen haben einen erheblichen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Gesamtsystems. Durch nachgiebige Aufstellelemente oder deren ungeeignete Verteilung können Strukturbauteile zu Starrkörperschwingungen neigen. Das heißt, dass das Bauteil schwingt, ohne sich zu verformen. Eine Bedämpfung von Starrkörperschwingungen kann nur durch eine lose Sandfüllung und innenbelassene zerfallene Sandkerne auf Furanharzbasis erreicht werden. Andere Füllstoffe können diese Art von Schwingungen nicht bedämpfen und wirken sich nur als Zusatzmasse im Gesamtsystem aus, die zur Senkung der dynamischen Steifigkeiten sowie der Resonanzfrequenzen führt.

2.4 Zusammenfassung

Um eine hohe statische Steifigkeit von reinen Werkstoffkonstruktionen zu erzielen, sind Werkstoffe mit höherem Elastizitätsmodul zu bevorzugen. Aufgrund der Gestaltungsfreiheit des Fertigungsverfahrens Gießen kann ein niedrigerer Elastizitätsmodul in vielen Fällen durch eine kraftflussgerechte Formgebung kompensiert werden.

Um eine hohe dynamische Steifigkeit zu erreichen, können Konstruktionen mit Füllstoffen bzw. Kernen befüllt oder abgegossen werden.

Zur Erhöhung der dynamischen Steifigkeit von hohlen Guss- und Stahlkonstruktionen durch das Befüllen tragen am besten Sandfüllungen, innenbelassene Sandkerne auf Furanharzbasis und abgelöste Zementbetonfüllungen bei. Hierbei müssen die o.g. Effekte bei der Auslegung der Bauteile berücksichtigt werden.

Nur durch eine Sandfüllung oder innenbelassene Kerne können sowohl Strukturschwingungen als auch Starrkörperschwingungen bedämpft werden.

3 Simulation von Strukturbauteilen

Um das dynamische Verhalten von Strukturbauteilen mit Sandfüllungen und innenbelassenen Sandkernen bereits im Rahmen der Produktentwicklung bewerten zu können, werden Modellierungsmethoden für die Finite-Elemente-Berechnung vorgestellt. Auf die Verwendung von nicht-linearen Materialgesetzen für die Füllwerkstoffe wird zugunsten einfacher und handhabbarer Berechnungsmodelle verzichtet.

Materialkennwerte der Sandfüllung und der Kontaktzone des Sandkerns wurden mit Hilfe des Verfahrens der Parameteridentifikation bestimmt und an Prüfkörpern verifiziert. Es wurde eine hohe Simulationsgenauigkeit erreicht.

3.1 Berücksichtigung von Sandfüllungen

Strukturkomponenten mit Sandfüllung können folgendermaßen abgebildet werden: Dünnwandige Konstruktionen können mit Hilfe von finiten Schalenelementen abgebildet werden. Die Sandfüllung wird durch Volumenelemente mit angepassten linear-elastischen Materialeigenschaften abgebildet, wobei die Schalen- und die Volumenelemente an den Knoten fest miteinander verbunden sind.

Die Steifigkeit bzw. der Elastizitätsmodul und die Dämpfung der Sandfüllung sind keine Konstanten, sondern sie hängen wesentlich vom Spannungszustand des Sandes ab.

Der Spannungszustand steigt durch das Eigengewicht des Sandes mit der Sandtiefe an, d.h. die oberen Schichten weisen ein elastischeres Verhalten auf. Die sich mit der Sandtiefe kontinuierlich verändernden Materialkennwerte können durch diskrete Werte (Schichten, **Bild 5** und **6**) abgebildet werden.

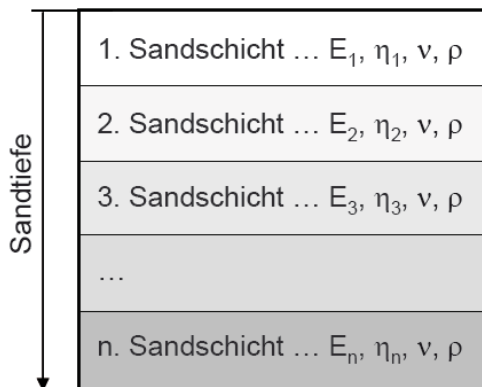


Bild 5: Modellbildung von Strukturbauteilen mit Sandfüllung

Darüber hinaus verändert sich der Spannungszustand abhängig von der Bauteilverformung. Bei größeren Schwingungsamplituden bzw. Anregungskräften sinkt der Spannungszustand der Sandfüllung. Das heißt, dass die Steifigkeit bzw. der Elastizitätsmodul und die Dämpfung (Verlustfaktor η) dadurch beeinflusst werden (**Bild 6**).

Auf Grund des nicht-linearen Verhaltens von Sandfüllungen existieren keine eindeutigen Kennwerte. Die Zusammenstellung nach **Bild 6** kann lediglich einen Wertebereich aufzeigen. Bei der Auslegung von Strukturkomponenten mit Sandfüllungen kann mit Hilfe von Variantenrechnungen für Schwingungsamplituden von ca. 1 und 6 μm und für die Sandtiefe bis 150 mm der Einfluss der Füllung auf das dynamische Verhalten abgeschätzt werden (**Bild 6**).

Werkstoffkennwerte des losen Quarzsands				
	Dichte ρ [kg/dm ³]	E- Modul [N/mm ²]	Kontraktionszahl ν [-]	Verlustfaktor η [-]
Schwingungsamplituden ca. 1 μm	1,4	6 - 14	0,26	0,05 - 0,5
Schwingungsamplituden ca. 6 μm	1,4	1 - 11	0,26	0,6

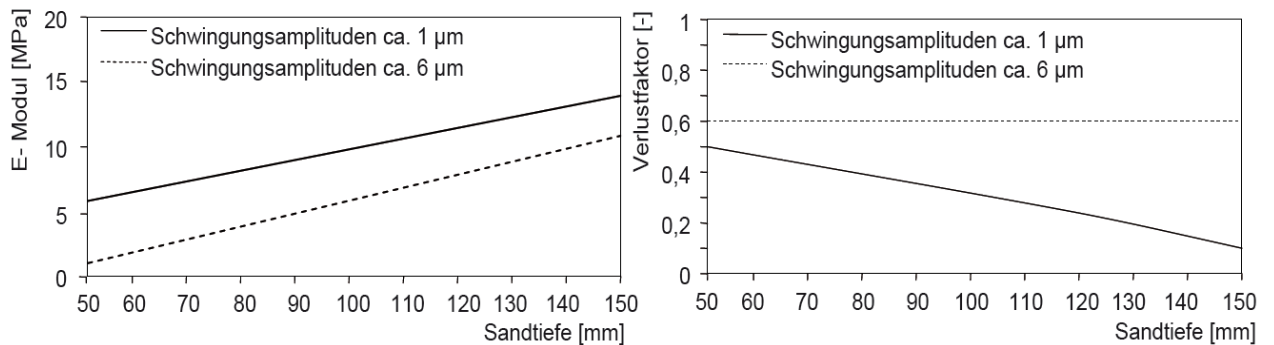


Bild 6: Werkstoffkennwerte zur FE-Simulation der Sandfüllung

3.2 Berücksichtigung von innenbelassenen Sandkernen

Bei Sandkernen auf Furanharzbasis zerfällt das organische Bindemittel im Bereich der Gusswände aufgrund der thermischen Belastung. Die Stärke der losen Sandschicht entspricht in etwa der Stärke der Gusswand. Anders als bei der losen Sandfüllung, deren Eigenschaften sich während der Betriebszeit durch Verdichtungsprozesse verändern, stellt sich aufgrund der Vorverdichtung des Sandkerns schnell ein stationärer Zustand ein.

Da die Nichtlinearitäten des losen Sandes im Spalt in Finite-Elemente-Modellen nur schwer exakt abgebildet werden können, werden für die betrachtete Referenzgeometrie folgende Vereinfachungen vorausgesetzt:

- Der Spalt ist mit losem Sand befüllt. Er ist gleichmäßig (ca. 10 mm) breit, um die Anzahl der benötigten Elemente in einem vertretbaren Rahmen zu halten.
- Die Kontaktzone ist sowohl mit der Gusswand als auch mit dem Kern verbunden. Das heißt, dass die Reibungskräfte zwischen Gusswand und Sandfüllung im Modell nicht berücksichtigt werden können.
- Die in der Realität stark nichtlineare Kontaktzone wird im FE-Modell als elastisches homogenes Material betrachtet und kann auch Zugkräfte übertragen.

Der Spalt lässt sich im Modell mit Hilfe von Volumenelementen mit angepassten linear-elastischen Materialeigenschaften des losen Sandes abbilden (Bild 7 und 8).

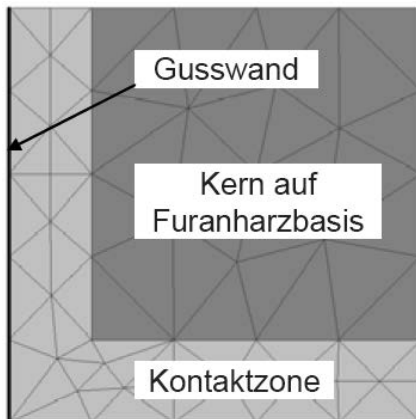


Bild 7: Modellbildung von Strukturbauteilen mit innenbelassenen Sandkernen

Die Gusswand kann mit Schalenelementen mit Werkstoffeigenschaften des Gusses modelliert werden. Der Sandkern wird durch Volumenelemente mit den angenommenen Werkstoffeigenschaften abgebildet (**Bild 8**).

Werkstoffkennwerte des Sandkerns auf Furanharzbasis				
Werkstoffkennwerte der Kontaktzone (Loser Quarzsand)	Dichte ρ [kg/dm ³]	E- Modul [N/mm ²]	Kontraktionszahl ν [-]	Verlustfaktor η [-]
	1,4	0,35	0,26	0,6
Angenommene Werkstoffkennwerte des Sandkerns auf Furanharzbasis	Dichte ρ [kg/dm ³]	E- Modul [N/mm ²]	Kontraktionszahl ν [-]	Verlustfaktor η [-]
	1,4	1000	0,26	0

Bild 8: Werkstoffkennwerte zur FE-Simulation der innenbelassenen Sandkerne

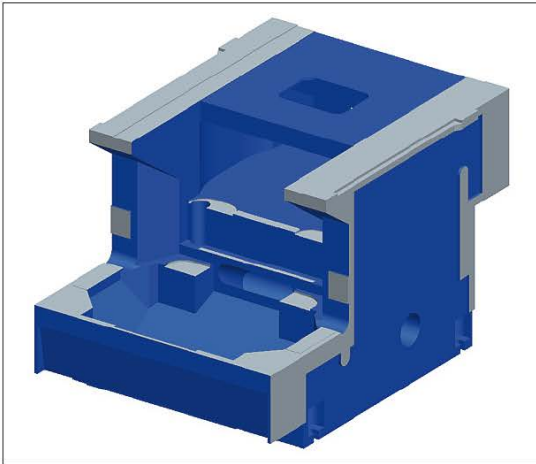
3.2 Zusammenfassung

Die Berücksichtigung von Füllungen mit losem Sand und mit furanharzgebundenen Sandkernen ist bei Verwendung der ermittelten Materialkennwerte und der vorgeschlagenen Modellbildung in Finite-Elemente-Simulationen möglich. Die dargestellten Kennwerte für die lose Sandfüllung (Bilder 5 und 6) können nur einen Wertebereich aufzeigen, da das Verhalten des Sandes stark nicht-linear ist und sich einer exakten Beschreibung entzieht.

Allgemeiner Hinweis: Ähnliche Eigenschaften wie innenbelassene Kerne auf Furanharzbasis werden auch Kerne auf Phenolharzbasis aufweisen, da diese ebenfalls bei thermischer Belastung im Randbereich zerfallen.



4 Praktische Beispiele



(Quelle: Werkbild Heidenreich & Harbeck AG, OPS-ingersoll Funkenerosion GmbH)

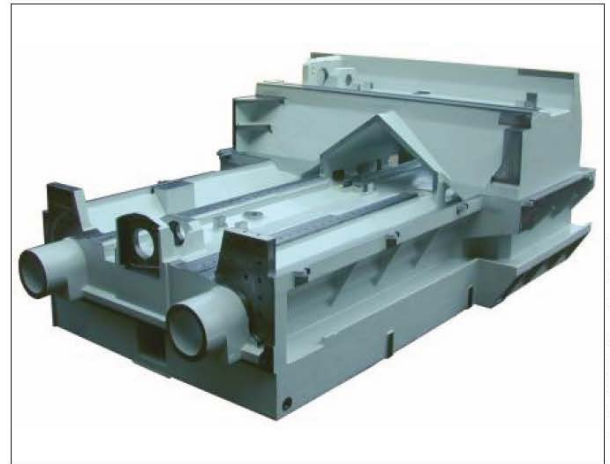
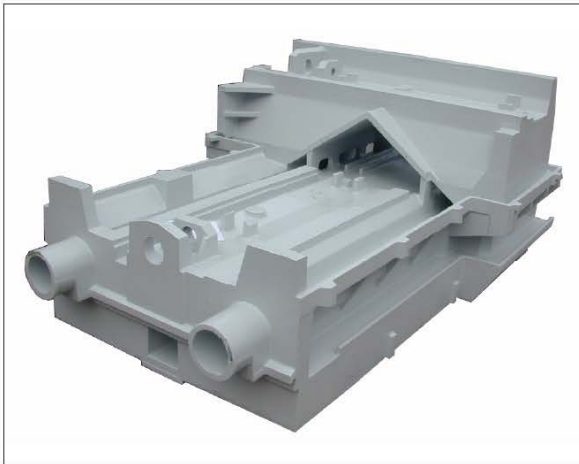
Maschinenbett mit innenbelassenem Kernsand für HSC-Fräsmaschinen (CAD-Modell)



(Quelle: Werkbilder Heidenreich & Harbeck, MAG Hessepp GmbH)

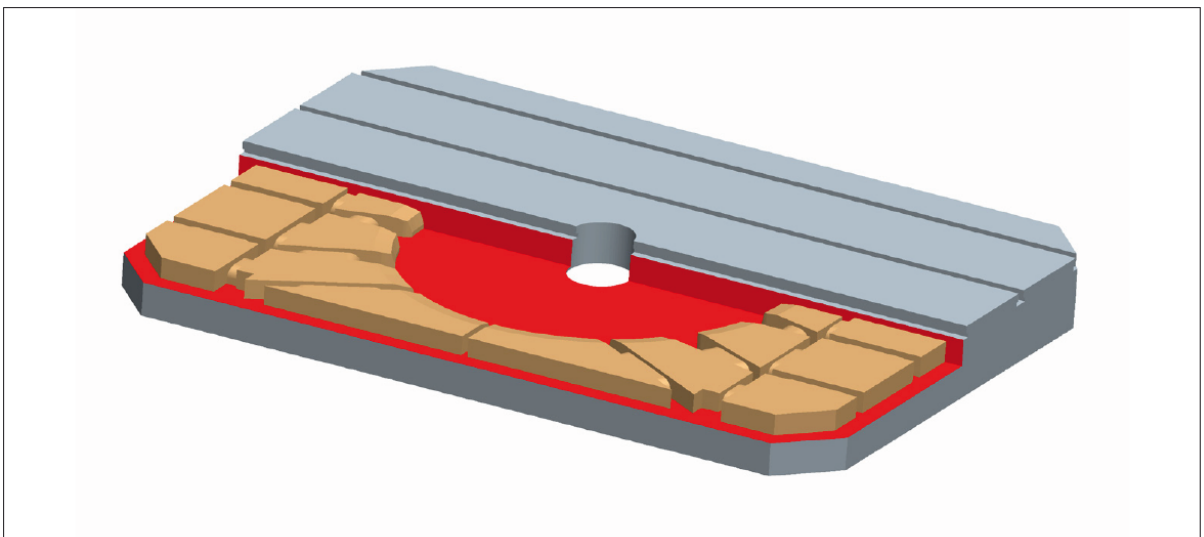
Gestell für Vertikaldrehmaschine

(links: Schnitt durch CAD-Modell des mit Kernsand gefüllten Unterteils, rechts: einbaufertig bearbeitete Fügegruppe)



(Quelle: Werkbild Heidenreich & Harbeck,
MAG Hüller-Hille)

Maschinenbett für Horizontalfräsmaschine, Kernsand innenbelassen
(links: Rohteil, rechts: einbaufertig bearbeitetes Fertigteil)



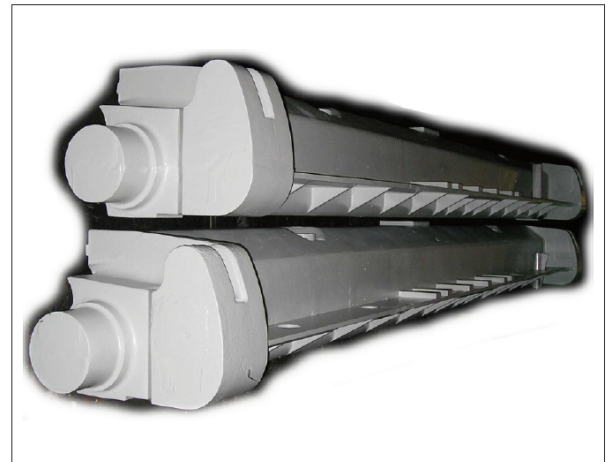
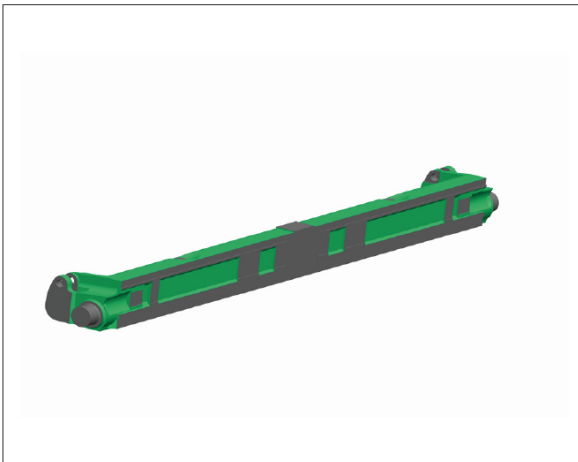
(Quelle: Werkbild Heidenreich & Harbeck,
IXION GmbH & Co. KG)

Schnitt durch steifigkeits-optimierte Tischplatte für Tiefbohrmaschine mit innenbelassenem Kernsand



(Quelle: Werkbild Heidenreich & Harbeck,
J. G. Wessner Söhne GmbH & Co. KG)

Maschinenständer mit innenbelassenem Kernsand für Vertikaldrehmaschine



(Quelle: Werkbilder Heidenreich & Harbeck AG,
bielomatik Leuze GmbH & Co. KG)

Schwenkachse für Papierabrollung, mit Kernsand gefüllt (links: CAD-Modell, rechts: Rohteile)