

Industrieverband Massivumformung e. V.  
in Kooperation mit  
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung  
Fraenthal Powertrain Plettenberg GmbH  
KMS Gesenkschmiede GmbH  
LASCO Umformtechnik GmbH  
QASS GmbH  
PCB Synotech GmbH

**Entwicklung einer innovativen Regelung von Hammeranlagen in der  
Massivumformung zwecks Steigerung der Energie- und  
Ressourceneffizienz**

Abschlussbericht,  
gefördert unter dem Az: 33408/01  
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

	von
Prof. Dr.-Ing. Michael Marré	Labor für Massivumformung
Dipl.-Ing. Harald Hermanns	Labor für Massivumformung
M. Eng. Tobias Bender	Fraenthal Powertrain Plettenberg GmbH

Hagen,  
Dez. 2022

Der Abschlussbericht kann angefordert werden beim  
Industrieverband Massivumformung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen



Industrieverband Massivumformung e. V.  
in Kooperation mit  
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung  
Frauenthal Powertrain Plettenberg GmbH  
KMS Gesenkschmiede GmbH  
LASCO Umformtechnik GmbH  
QASS GmbH  
PCB Synotech GmbH

## **Entwicklung einer innovativen Regelung von Hammeranlagen in der Massivumformung zwecks Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz**

Abschlussbericht,  
gefördert unter dem Az: 33408/01  
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von  
Prof. Dr.-Ing. Michael Marré      Labor für Massivumformung  
Dipl.-Ing. Harald Hermanns      Labor für Massivumformung  
M. Eng. Tobias Bender              Frauenthal Powertrain Plettenberg GmbH

Hagen,  
Dez. 2022

# Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

0	Zusammenfassung .....	1
1	Einleitung .....	3
2	Vorhabensdurchführung .....	5
2.1	Theoretische Vorarbeiten .....	5
2.2	Umsetzung auf Laborebene .....	5
2.3	Umsetzung auf Betriebsebene .....	6
2.4	Technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung .....	6
2.5	Verallgemeinerung und Übertragung .....	6
3	Vorhabensergebnisse .....	8
3.1	Theoretische Vorarbeiten .....	8
3.2	Umsetzung auf Laborebene .....	16
3.3	Umsetzung auf Betriebsebene .....	25
3.4	Technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung .....	42
3.5	Verallgemeinerung und Übertragung .....	44
4	Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....	44
5	Fazit .....	45
6	Literatur-/Quellenverzeichnis .....	46

## Verzeichnis der Bilder

<b>Bild 1:</b>	Zu erwartende Primärenergieeinsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie für eine Referenzanlage (Basis: 3-Schichtsystem, automatische Anlage, 2 Umform-stufen, 2 Prellschläge je Schlagfolge) .....	4
<b>Bild 2:</b>	Zu erwartende gesamte Primärenergie und CO <sub>2</sub> -Einsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie .....	4
<b>Bild 3:</b>	Berechnungsrelevante Komponenten des Hammers .....	9
<b>Bild 4:</b>	Systemanalyse in unterschiedlichen Detaillierungsstufen [1] .....	9
<b>Bild 5:</b>	Grafische Benutzeroberfläche SimulationX [1].....	10
<b>Bild 6:</b>	Beispiel eines simulierten Windrades mit Simulink (und MATLAB).....	11
<b>Bild 7:</b>	Beispiele für simulierte Systeme mit ADAMS [3].....	12
<b>Bild 8:</b>	Ersatzsystem für den LFM-Riemenfallhammer.....	14
<b>Bild 9:</b>	Simulation der Umformung.....	15
<b>Bild 10:</b>	Ergebnis-Beispiel der Mehrkörpersimulation: Beschleunigung im Untergesenk. ....	15
<b>Bild 11:</b>	Gegenüberstellung der Ergebnisse von Simulation und Real-Versuch .....	15
<b>Bild 12:</b>	Versuchsgesenk (Ober- und Unterhälfte).....	16
<b>Bild 13:</b>	Varianten des Einsatzmaterials .....	17
<b>Bild 14:</b>	Auswahl der Beschleunigungssensoren .....	18
<b>Bild 15:</b>	Gegenüberstellung von Beschleunigungs-/Zeitverläufen verschiedener Sensoren bei unterschiedlicher Belastung.....	18
<b>Bild 16:</b>	Positionen der Sensoren .....	19
<b>Bild 17:</b>	Befestigungsvarianten der Sensoren.....	19
<b>Bild 18:</b>	Beispiel Beschleunigungsmessung für 1 Umformschlag (mit Prellschlag) .....	20
<b>Bild 19:</b>	Anteil der Prellschlagenergie.....	21
<b>Bild 20:</b>	Normierte Darstellung der Beschleunigungsmessung.....	21
<b>Bild 21:</b>	Körperschallmesssystem und -sensor .....	22
<b>Bild 22:</b>	Gegenüberstellung der zwei- und dreidimensionalen Darstellung.....	22
<b>Bild 23:</b>	Ergebnisse der Körperschallmessung in Abhängigkeit der Prellschlag-Intensität .....	23
<b>Bild 24:</b>	Ergebnisse der Körperschallmessung .....	24
<b>Bild 25:</b>	Übersicht der Ergebnisse.....	24
<b>Bild 26:</b>	Position der Temperatur-Sensoren .....	25
<b>Bild 27:</b>	Temperaturverlauf .....	25
<b>Bild 28:</b>	Position der Sensoren und Versuchsaufbau .....	26
<b>Bild 29:</b>	Weg und Geschwindigkeit des Bären (5. Schlag).....	27
<b>Bild 30:</b>	Prellschlag-Kriterium Weg.....	29
<b>Bild 31:</b>	Prellschlag-Kriterium Rückfederung .....	30
<b>Bild 32:</b>	Messergebnisse Weg- und Geschwindigkeit (12-fach Belegung) .....	31
<b>Bild 33:</b>	Messergebnisse Rückfeder- und Prellgeschwindigkeit.....	31
<b>Bild 34:</b>	Geschwindigkeitsverlauf für alle Schläge einer Schlagfolge .....	32
<b>Bild 35:</b>	Aufteilung der Energie für alle Schläge einer Schlagfolge .....	32
<b>Bild 36:</b>	Messergebnisse Beschleunigung.....	33
<b>Bild 37:</b>	Messergebnisse Beschleunigung.....	34
<b>Bild 38:</b>	Messergebnisse Beschleunigung.....	35
<b>Bild 39:</b>	Messergebnisse Beschleunigung.....	36
<b>Bild 40:</b>	Messergebnisse Beschleunigung.....	36
<b>Bild 41:</b>	Messergebnisse Körperschall (jeweils für eine Schlagfolge) .....	37
<b>Bild 42:</b>	Signalenergie für eine Schlagfolge.....	38
<b>Bild 43:</b>	Ergebnisse Körperschallmessung (10-fach Belegung) .....	38

<b>Bild 44:</b>	Übersicht der Ergebnisse zur Problematik „Prellschlag erkennen“ .....	39
<b>Bild 45:</b>	Übersicht der Ergebnisse zur Problematik „Prellschlag erkennen“ .....	39
<b>Bild 46:</b>	Gegenüberstellung der Ergebnisse für „leichtes Bauteil“ und „schweres Bauteil“ 41	
<b>Bild 47:</b>	Ergebnisse „schweres Bauteil“ bei Variation der Bargeschwindigkeit/-Energie im 5. Schlag	42
<b>Bild 48:</b>	Zu erwartende Primärenergieeinsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie für eine Referenzanlage (Basis: 3-Schichtsystem, automatische Anlage, 2 Umform-stufen, 2 Prellschläge je Schlagfolge) .....	43
<b>Bild 49:</b>	Zu erwartende gesamte Primärenergie und CO <sub>2</sub> -Einsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie .....	44

## Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
s-Kontakt	1. Kontakt zwischen Obergesenk und Bauteil	mm	
s-Prellen	Kontakt der Prellschlagflächen, Beginn Prellen	mm	
s-UT	Unterer Totpunkt	mm	
Weg s = 0	Ober-/Untergesenk liegen im Ruhezustand aufeinander (Prellschlagflächen)	mm	
v-Bär	Geschwindigkeit des Bären	mm/s	
v-max	Maximale Geschwindigkeit des Bären	mm/s	
v-Kontakt	Auftreffgeschwindigkeit (Obergesenk/Bauteil)	mm/s	
v-Prellen	Auftreffgeschwindigkeit (Prellschlagflächen Ober-/Untergesenk)	mm/s	
v-UT	Geschwindigkeit in UT (= 0)	mm/s	
v-Rück	maximale Rücksprunggeschwindigkeit	mm/s	
v-min	maximale Aufwärtsgeschwindigkeit (Vorzeichen geändert)	mm/s	
a	Beschleunigung	mm/s <sup>2</sup>	
V-Sx	Sensorposition: Schabotte		x: Belegungsnummer
V-GSx	Sensorposition: Gestell neben Schabotte		x: Belegungsnummer
V-Gox	Sensorposition: Gestell oben		x: Belegungsnummer
V-Gux	Sensorposition: Gestell unten		x: Belegungsnummer

## 0 Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung und modellhafte Validierung eines Steuerungskonzeptes für Hammeranlagen, mit dem durch Messung, Auswertung und Musterinterpretation der Signale für Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall des Maschinen- und Werkzeugsystems auf die aktuell benötigte Umformenergie eines jeweiligen Umformteils zurückgeschlossen und die Anlage damit so ausgeregelt wird, dass der Prellschlag deutlich reduziert, im Grenzfall gänzlich vermieden wird. Durch die damit erreichbare Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung wird ein erheblicher Beitrag zur Umweltentlastung geleistet.

Das auf Basis der Mehrkörpersimulation erstellte rechnerinterne Ersatzsystem weist Potentiale zur Lösung der beschriebenen Problemstellungen auf. Die Komplexität des Gesamtsystems erfordert jedoch noch umfangreiche, weiterführende Untersuchungen und software-technische Anpassungen/Erweiterungen des Ersatzsystems. Der hierzu notwendige Aufwand würde nach derzeitigem Erkenntnisstand ein eigenständiges Projekt erfordern und ist im Rahmen dieses Vorhabens als einzelner Arbeitspunkt nicht zu leisten.

Die Erstellung eines rechnerinternen Ersatzsystems, das zur Lösungsfindung der Zielstellungen des Projektes eingesetzt werden kann, konnte nicht realisiert werden.

In praxisrelevanten Laboruntersuchungen und Betriebsanwendungen wurden für die Identifikation von Prellschlägen 3 geeignete Verfahren und die dazu erforderlichen Sensoren ermittelt. Die Identifikation der Prellschläge ist über eine Auswertung der Weg-/Geschwindigkeitssignale des Bären und/oder über Messwerte aus Beschleunigungs- oder Körperschallsensoren möglich. Die Empfindlichkeit der Beschleunigungs- und Körperschallmessung ist hierbei wesentlich von der Position der Sensoren an den verschiedenen Elementen des Hammeraggregats abhängig.

Die für eine Regelung des Hammersystems notwendige Erfassung der Intensität der Prellschläge werden von dem Messverfahren Beschleunigung (einaxial) mit der Sensorposition „Schabotte“ am besten erfasst. Die beiden anderen Messverfahren sind für die Erfassung der Prellschlagintensität nach bisherigem Untersuchungsstand weniger geeignet.

Die Untersuchung einer zweiten Bauteilgruppe mit deutlich schwererem Bauteil führte zu deutlich abweichenden Ergebnissen. Die Höhe der Beschleunigungswerte ist eventuell kein zuverlässiges Erkennungsmerkmal für Prellschläge! Damit würde das Messverfahren entfallen, welches nach bisherigem Erkenntnisstand die besten Ergebnisse für die Messung der Prellschlagintensität darstellt. Ohne zuverlässige und genaue Messung der Prellschlagintensität ist keine Regelung des Umformprozesses bezüglich Prellschlagenergie möglich! Im weiteren Vorgehen des Vorhabens war geplant ergänzende Untersuchungen mit schweren Bauteilen durchzuführen. Diese Untersuchungen konnten aus verschiedenen Gründen (COVID-19-Pandemie, Bauteilabrufe, Produktionsplanung, Laufzeitende des Vorhabens) nicht durchgeführt werden.

Die offenen Fragestellungen konnten daher im Rahmen dieses Vorhabens nicht geklärt werden.

### Kooperationspartner

- Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
- QASS GmbH
- PCB Synotech GmbH

- Frauenthal Powertrain Plettenberg GmbH
- KMS Gesenkschmiede GmbH
- LASCO Umformtechnik GmbH

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 33408/01-24), wofür an dieser Stelle im Namen aller Beteiligten gedankt sei.

## 1 Einleitung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung und modellhafte Validierung eines neuen Steuerungskonzeptes für Hammeranlagen, womit der Prellschlag deutlich reduziert, im Grenzfall gänzlich vermieden wird. Durch die damit erreichbare Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung wird ein erheblicher Beitrag zur Umweltentlastung geleistet.

Die Innovation des Projektes ist, dass erstmals aus den momentanen Antwortgrößen eines Gesenkschmiedehammers auf die aktuell erforderliche Umformenergie eines individuellen Umformteils geschlossen wird, und die Anlage darüber für jedes einzelne Umformteil individuell so ausgeregelt wird, dass die heute zum Ausgleich von Prozessschwankungen erforderliche Prellschlagenergie weitgehend vermieden wird. Dieser Innovation liegt die Arbeitshypothese zugrunde, dass in den momentanen Signalen für Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall des Maschinen- und Werkzeugsystems alle für den Energiehaushalt bedeutsamen Prozessparameter eines Umformprozesses einschließlich deren Streuungen als implizites Muster enthalten sind. Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall sind sozusagen die Antwort auf die gerade vorherrschenden Prozessbedingungen, und jede energieverzehrende Änderung der Prozessparameter (z.B. Streuung von Bauteiltemperatur, Vormaterial, Transportzeit, Werkzeugverschleiß, ...) finden sich in den Mustern dieser Signale direkt oder indirekt wieder. Damit kann durch Messung und Auswertung dieser Signale und deren Musterstruktur auf die aktuelle Prozesssituation und die gerade benötigte Umformenergie in Echtzeit geschlossen und darüber die Anlage für jedes Umformteil individuell so ausgeregelt werden, dass die heute prozessbedingt erforderliche Überenergie (Prellschlagenergie) nahezu gänzlich vermieden wird.

Zielgruppe der Vorhabensergebnisse sind in erster Linie die KMU's der Branche Massivumformung sowie die Hersteller von Umformanlagen. Durch das Vorhaben wird den Unternehmen aufgezeigt, in welchem Umfang und mit welchen Maßnahmen die Prellschlagenergie und dadurch der Energieeinsatz sowie der CO<sub>2</sub> Ausstoß deutlich reduziert werden kann.

Die Umweltrelevanz der Problemstellung kommt in dem zu erwartenden Einsparpotential an Primärenergie als Folge verminderter Prellschlagenergie beim Gesenkschmieden auf Hämmern besonders gut zum Ausdruck, was in **(Bild 1)** für eine Referenzanlage zusammengefasst ist. Bei dieser Abschätzung wurde von folgenden, mit dem Anlagenbetreiber besprochenen realitätsnahen Annahmen ausgegangen:

- Reduzierung der Schlagenergie bei Prellschlägen um 25%, infolge der Regelung der Prellschlagintensität.
- Steigerung der Werkzeugstandmenge um 10%, infolge geringerer Werkzeugbelastung.
- Reduzierung des Ausschusses um 0,2%, infolge verminderter Dickentoleranzstreuung.

	Einsparpotential an Primärenergie [kWh/a]	Bemerkungen
25% Prellschlagenergie	76.308	
10% Steigerung der Werkzeugstandmenge	9.624	
0,2% Ausschussreduzierung	28.800	für Materialherstellung und Erwärmung auf Schmiedetemperatur
<b>Gesamt</b>	<b>114.733</b>	

**Bild 1:** Zu erwartende Primärenergieeinsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie für eine Referenzanlage (Basis: 3-Schichtsystem, automatische Anlage, 2 Umform-stufen, 2 Prellschläge je Schlagfolge)

In Deutschland sind ca. 185 hydraulische Oberdruckhämmer installiert (Abschätzung der Fa. Lasco Umformtechnik, 2013). Unter der Voraussetzung, dass bei 1/3 dieser Anlagen und Produkte die Annahmen der Referenzanlage zutreffen, ergibt sich ein theoretisches Gesamtpotential für die Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung entsprechend (**Bild 2**):

	Einsparpotential an Primärenergie [kWh/a]	CO <sub>2</sub> Einsparung [to/a]	Bemerkungen
25% Prellschlagenergie	4.705.669	935	
10% Steigerung der Werkzeugstandmenge	593.502	118	
0,2% Ausschussreduzierung	1.776.000	353	für Materialherstellung und Erwärmung auf Schmiedetemperatur
<b>Gesamt</b>	<b>7.075.171</b>	<b>1.406</b>	

**Bild 2:** Zu erwartende gesamte Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie

Gegenschlaghämmer wurden bei dieser Betrachtung noch nicht berücksichtigt. Die Anzahl dieser Aggregate ist zwar deutlich niedriger, aber das Einsparpotential ist aufgrund des deutlich höheren Arbeitsvermögens ebenfalls deutlich höher als im Beispiel der Oberdruckhämmer aufgezeigt wurde.

## **2 Vorhabensdurchführung**

### **2.1 Theoretische Vorarbeiten**

Durch theoretische Vorarbeiten sollen wesentliche Grundlagen geschaffen werden, damit eine spätere Umsetzung auf Labor- und Betriebsebene zielgerichtet möglich wird. Hierzu gehören im Einzelnen:

- Zusammenstellung eines repräsentativen Artikelspektrums aus dem aktuellen Produktionsumfeld, zusammen mit den industriellen Partnern. Auf Basis dieses Artikelspektrums werden alle Entwicklungspunkte durchgeführt und evaluiert.
- Unter Einbindung der Projektpartner werden die den Energieverbrauch maßgeblich beeinflussenden Einflussparameter zusammengestellt.
- Entwicklung und Test eines rechnerinternen Ersatzsystems für den Umformprozess und die Maschinendynamik.
- Sensitivitätsanalyse für die den Energieverbrauch beeinflussenden Einflussparameter auf Basis von Simulationsrechnungen.
- Identifikation und Sensitivitätsanalyse für Störgrößen/-signale auf Basis von Simulationsrechnungen.
- Erarbeitung einer Strategie zur Ermittlung produktspezifischer SOLL-Muster. Dies erfolgt auf Basis von Simulationsrechnungen, durch die zunächst die Wirkungen und Wechselwirkungen der signifikanten Einflussparameter auf den Energieverzehr ermittelt werden und sich als Muster in den Antwortgrößen für Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall widerspiegeln. Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Struktur eines „Korrelationsmuster“ entwickelt, mit dem aus den Größen Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall auf den aktuellen Energieverzehr zurückgeschlossen werden kann.
- Entwicklung geeigneter Regelmodelle, die auf Basis von Simulationsrechnungen evaluiert werden.
- Erarbeitung eines Umsetzungskonzeptes für die Labor- und die Betriebsebene.

### **2.2 Umsetzung auf Laborebene**

Die Ergebnisse aus den theoretischen Vorarbeiten und das daraus erarbeitete Umsetzungskonzept werden für erste praktische Untersuchungen und Bewertungen auf Laborebene umgesetzt und bewertet. Im Einzelnen:

- Auswahl, Installation und Test geeigneter käuflicher Sensoren
- Auswahl, Installation und Test der Mess-/Auswertetechnik
- Auswahl, Test und Bewertung geeigneter Analysemethoden und Signalfilter
- An welchem Ort (Schabotte, Ständer, Ober-/Unterwerkzeug, ....) erfolgt welche Messung (Beschleunigung, Körperschall)
- Experimente mit gezielten Prozessstörungen; Überprüfung und Feinkorrektur der Strategie zur Bestimmung produktspezifischer SOLL-Muster
- Regelmodelle testen und anpassen

### **2.3 Umsetzung auf Betriebsebene**

Auf Grundlage der Ergebnisse der theoretischen Vorarbeiten und den Laboruntersuchungen erfolgt die Umsetzung und Validierung auf Betriebsebene unter Serienbedingungen. Im Einzelnen:

- Alternative Applikationskonzepte für Sensoren für die rauen Umgebungsbedingungen entwickeln und testen
- Installation und Test der Sensoren unter den gegebenen Umfeldbedingungen; ggf. Anpassungen zusammen mit den Sensorherstellern.
- Installation der Mess-/Auswertetechnik
- Experimente mit gezielten Prozessstörungen
- Einbindung des Regelmodells in die Anlagensteuerung
- Regelmodelle unter Produktionsbedingungen testen und anpassen

### **2.4 Technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung**

Auf Grundlage der Projektergebnisse erfolgt eine technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung der Energieeffizienz und Ressourcenschonung in der Massivumformung durch eine implizite Anlagenregelung unter industriellen Bedingungen.

Die technische Bewertung erfolgt unter den Gesichtspunkten erreichbarer Regelerfolge, Langzeitstabilität von Sensoren und Auswertehardware unter den rauen Bedingungen eines Umformbetriebes, Übertragbarkeit des Konzeptes auf beliebige Produktgruppen und auf andere Aggregategruppen.

Bei der wirtschaftlichen Bewertung werden die erreichbaren Energieeinsparungen den zu erwartenden fixen und variablen Kosten unter Berücksichtigung zu erwartender Änderungen bei Taktzeit und Anlagenverfügbarkeit gegenübergestellt.

Bei der ökologischen Bewertung wird die tatsächlich zu erwartende nachhaltige Energie- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung unter Serienbedingungen aufgezeigt. Hierbei werden neben dem direkten Einfluss der Prellschlagenergie auch die indirekten Einflüsse durch Steigerung der Werkzeugstandzeit und der Ausschussreduzierung aufgezeigt und bewertet.

### **2.5 Verallgemeinerung und Übertragung**

Die Entwicklungen und Evaluationen im Rahmen des Vorhabens erfolgen modellhaft für hydraulische Oberdruckhämmer. Um eine größtmögliche Verbreitung und Anwendung der Ergebnisse zu erreichen, wird im Rahmen des Vorhabens untersucht,

- inwieweit und unter welchen Voraussetzungen sich die Ergebnisse im Sinne einer Verallgemeinerung auf beliebige Produktgruppen (adaptive Prozessmodelle) übertragen lassen,
- inwieweit und unter welchen Voraussetzungen sich die Ergebnisse im Sinne einer Verallgemeinerung auf andere Aggregategruppen übertragen lassen, und

- wie bestehende Anlagen so nachgerüstet werden können, dass die Vorhabensergebnisse auch dafür zur Anwendung kommen können (Stichwort: Nachrüstkonzepte).

## 3 Vorhabensergebnisse

### 3.1 Theoretische Vorarbeiten

Ein wesentlicher Baustein für das Vorhaben ist die Entwicklung und Test eines rechnerinternen Ersatzsystems für den Umformprozess und die Maschinendynamik. Dieses Ersatzsystem soll folgende Analysen/Untersuchungen ermöglichen bzw. unterstützen:

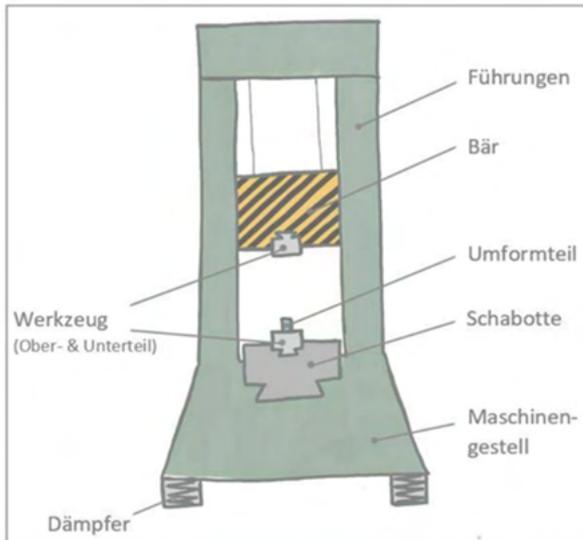
- Sensitivitätsanalyse für die den Energieverbrauch beeinflussenden Einflussparameter auf Basis von Simulationsrechnungen.
- Identifikation und Sensitivitätsanalyse für Störgrößen/-signale auf Basis von Simulationsrechnungen.
- Erarbeitung einer Strategie zur Ermittlung produktspezifischer SOLL-Muster. Dies erfolgt auf Basis von Simulationsrechnungen, durch die zunächst die Wirkungen und Wechselwirkungen der signifikanten Einflussparameter auf den Energieverzehr ermittelt werden, und sich als Muster in den Antwortgrößen für Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall widerspiegeln. Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Struktur eines „Korrelationsmuster“ entwickelt, mit dem aus den Größen Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall auf den aktuellen Energieverzehr zurückgeschlossen werden kann.

In Vorbereitung des Vorhabens war geplant, das Ersatzsystem mit der Software Siemens NX zu erstellen. Nach intensiver Einarbeitung und zeitaufwändiger Untersuchung mehrerer Lösungsansätze konnte kein Ersatzsystem erstellt werden, welches eine zufriedenstellende Abbildung und Genauigkeit des realen Umformprozesses darstellten. Daraufhin wurde für den Arbeitspunkt ein Lastenheft erstellt, eine Marktrecherche und Gegenüberstellung prinzipiell geeigneter Softwarelösungen durchgeführt.

#### Lastenheft (Auszug)

Als Ergebnis muss die Simulation (bei parametrierbaren Eingangsgrößen) sowohl die aktuell auftretenden Beschleunigungen als auch den Körperschall in folgenden Komponenten ausgeben:

- Bär
- Werkzeug (Ober-/Unterteil)
- Schabotte
- Maschinengestell



**Bild 3:** Berechnungsrelevante Komponenten des Hammers

Der grundlegende Aufbau, die Funktionalitäten und eine Kostenbetrachtung der aus der umfassenden Marktrecherche als prinzipiell geeignet betrachteten Softwarelösungen ist nachfolgend dargestellt.

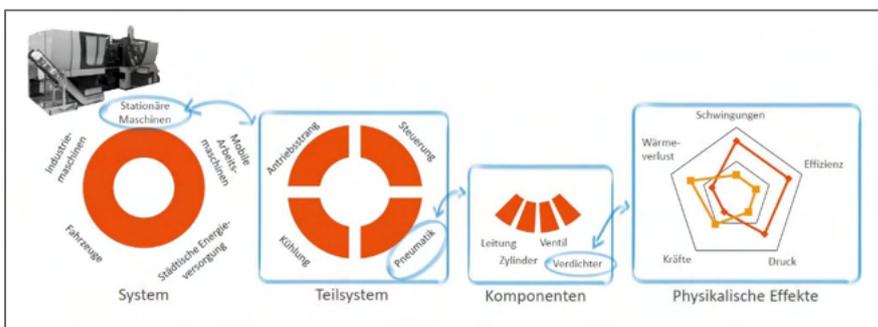
### SimulationX

#### Überblick

SimulationX ist eine CAE Software für die Simulation physikalisch-technischer Systeme und Anlagen.

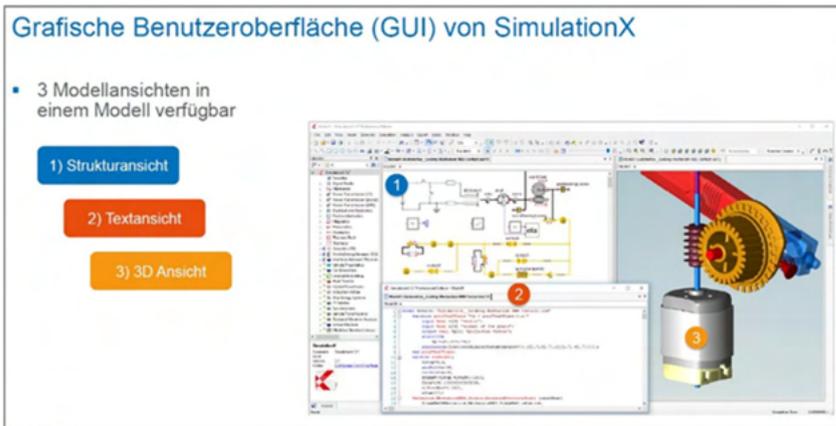
Für den Bereich „Maschinenbau“ bietet die Software folgende Funktionen:

- Analyse und Bewertung des dynamischen Maschinenverhaltens unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen aller Teilsysteme
- Ganzheitliche Betrachtung der Wirkungsgradkette zur Identifizierung des energetischen Optimierungspotenzials
- Reduzierung von Schwingungen im Antriebssystem von Maschinen
- Simulation von Maschinen in Extremsituationen und Szenarien, die in der Realität nicht abbildbar sind
- Frühzeitige Optimierung von Regelungen und Steuerungen anhand physikalischer Streckenmodelle



**Bild 4:** Systemanalyse in unterschiedlichen Detaillierungsstufen /Hep19/

In der Software können Maschinen und Anlagen in Teilsysteme und einzelne Komponenten unterteilt und differenziert auf ihre physikalischen Effekte geprüft werden.



**Bild 5:** Grafische Benutzeroberfläche SimulationX /Hep19/

Die grafische Benutzeroberfläche bietet die Möglichkeit für eine anschauliche Visualisierung des betrachteten Systems.

## **Technische Bewertung**

### Aufbau der Software

Die Software SimulationX arbeitet mit Funktionsbausteinen und mathematischen Funktionen, durch die das System beschrieben wird.

### Input

Die Software benötigt als Input mathematischen Funktionen, durch die die einzelnen Systemkomponenten beschrieben werden können.

### Visualisierung

SimulationX bietet die Möglichkeit der dreidimensionalen Darstellung, allerdings ist dies ein extra Arbeitsbereich. Aus der reinen Simulation durch Funktionsbausteine kann keine dreidimensionale Darstellung berechnet werden.

### Sprache

Deutsch (teilweise noch Englisch)

### Hilfe / Tutorials

Es gibt einige Videos und Anleitungen zu verschiedenen Aufgaben, diese sind jedoch nicht ganz so umfangreich wie die Anleitungen zu der Software MATLAB. Die Softwareanbieter von SimulationX bieten Schulungen und Onlinekurse an, diese sind jedoch kostenpflichtig.

### Bewertung

Da die Softwarelizenz bereits an der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn vorhanden ist muss keine neue Lizenz gekauft oder gemietet werden.

Die Software SimulationX bietet viele Möglichkeiten zur Simulation von Systemen. Hier wird jedoch grundsätzlich mit Funktionsbausteinen gearbeitet, was bedeutet, dass das betrachtete System vor der Simulation mathematisch beschrieben werden muss. Das System muss in seine einzelnen Systemkomponenten zerlegt, und durch Funktionen definiert werden. Eine anschauliche Visualisierung des simulierten Systems ist hier zunächst nicht möglich. Des Weiteren sind Anleitungen schwer zu finden, zur Einarbeitung müsste bei dieser Software auf die Schulungen zurückgegriffen werden, die durch den Softwareanbieter kostenpflichtig durchgeführt werden.

## MATLAB [Simulink]

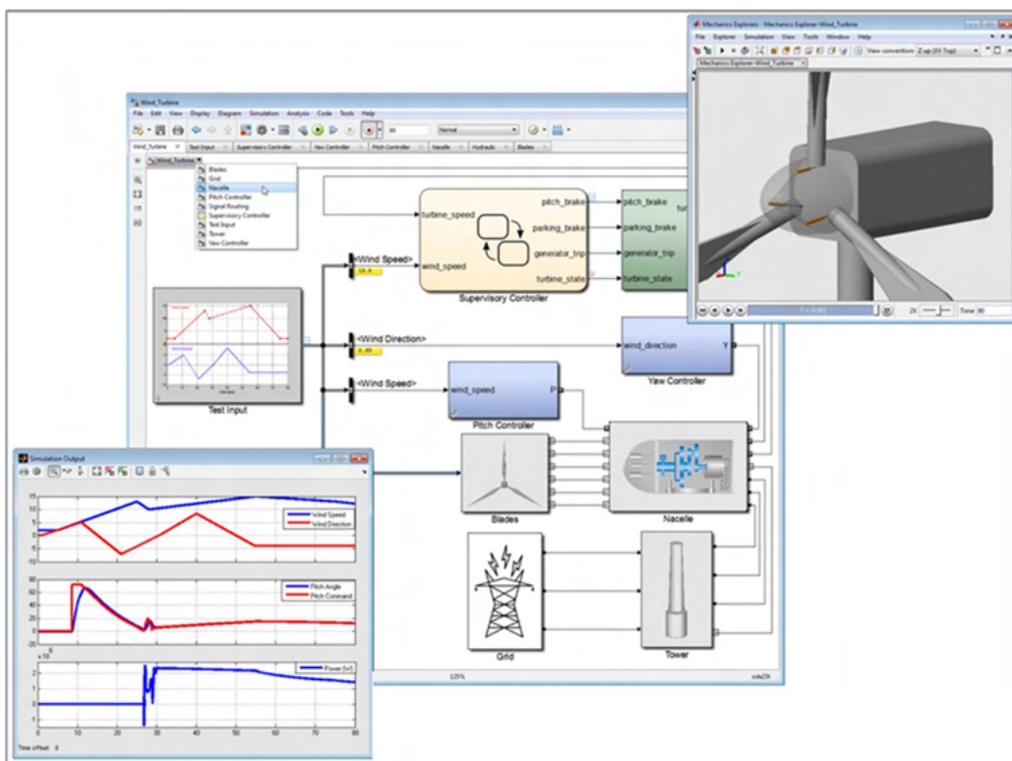
### Überblick

Simulink ist eine Erweiterung des Programmes MATLAB, mit der sich Modelle erstellen, modellieren und simulieren lassen. Über Funktionsblöcke werden die Systeme zusammengestellt. Die einzelnen Funktionsblöcke und Verbindungen werden dann durch Gleichungen beschrieben.

Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig, grundsätzlich lässt sich jedes System simulieren, das mathematisch beschreibbar ist. Häufige Einsatzgebiete sind /big19/:

- Steuerungs- und Regelungstechnik
- Robotik
- Signalverarbeitung
- Rapid Prototyping
- Loop Testing

Sowohl SimulationX als auch MATLAB (Simulink) funktionieren sehr ähnlich.



**Bild 6:** Beispiel eines simulierten Windrades mit Simulink (und MATLAB)

### Technische Bewertung

#### Aufbau der Software

Simulink als Erweiterung von MATLAB arbeitet, genau wie SimulationX, mit einzelnen Funktionsbausteinen. Diese werden aneinandergereiht und ergeben so ein komplexes System. Das System muss vor der Simulation mathematisch beschrieben werden, damit den einzelnen Funktionsbausteinen mathematische Funktionen zugeordnet werden können.

#### Input

Die Software benötigt mathematische Funktionen der einzelnen Systemkomponenten, damit diese als zusammenhängendes System simuliert werden können.

#### Visualisierung

Dargestellt wird das System durch Funktionsbausteine. Teilweise können die Systeme auch an CAD Modellen dargestellt werden.

### Sprache

Englisch

### Hilfe / Tutorials

Zu MATLAB und Simulink gibt es eine Vielzahl an Fachbüchern, Tutorials, Videoanleitungen und Beispielaufgaben, die den richtigen Umgang mit der Software erklären.

### Bewertung

Da die Softwarelizenz bereits an der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn vorhanden ist muss keine neue Lizenz gekauft oder gemietet werden.

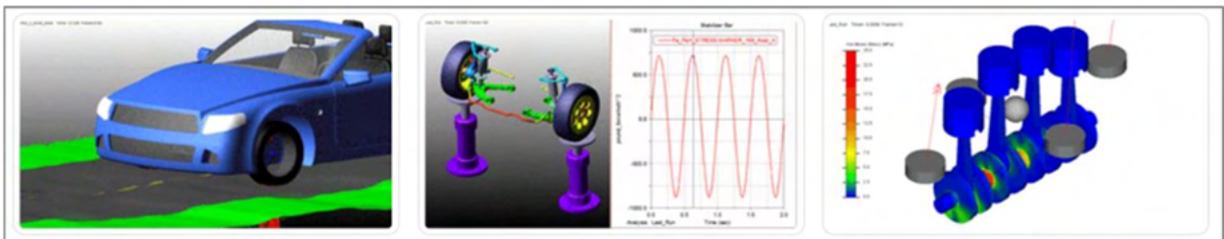
Die Software MATLAB mit der Erweiterung Simulink ist eine sehr komplexe Software. Durch die Arbeitsweise muss bereits im Vorfeld das zu simulierende System in seine mathematischen Funktionen aufgeschlüsselt werden, was eine vereinfachte Simulation des Systems erschwert. Hier müsste eventuell auf Externe Fachkräfte zurückgegriffen werden, da eine Einarbeitung in diese Software und eine vollständige mathematische Beschreibung eines Oberdruckhammers sehr zeitintensiv wäre.

Auch die Darstellung ist bei dieser Software nicht sehr anschaulich, da das System durch einzelne Funktionsbausteine, und nur im Ausnahmefall durch 3D-Modelle, beschrieben wird.

## **MSC Adams**

### Überblick

ADAMS „Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems“ ist eine Software zur Simulation mechanischer Systeme. Unter Berücksichtigung der physischen Interaktionen wird das Bewegungsverhalten im dreidimensionalen Raum analysiert. Die Simulationsergebnisse beinhalten Kräfte, Positionen, Geschwindigkeit und Beschleunigung aller Systemkomponenten /msc19/.



**Bild 7:** Beispiele für simulierte Systeme mit ADAMS /msc19/

## **Technische Bewertung**

### Aufbau der Software

MSC ADAMS bietet die Möglichkeit das System in der Software durch Grundkörper zu konstruieren, welche beliebig miteinander verbunden oder kombiniert werden können. Es ist ebenfalls möglich bereits konstruierte CAD Modelle in die Software einzulesen. Durch MSC ADAMS werden diesen Grundkörpern Verbindungen, Kräfte, Positionen, Werkstoffeigenschaften etc. zugeordnet, entweder durch standardisierte Parameter oder manuell durch den Benutzer. Dieses System kann dann anschaulich simuliert und getestet werden. Während dieser Simulation können viele verschiedene Parameter „gemessen“ werden. Die Ergebnisse können gespeichert und verglichen, sowie nachträglich verändert oder begutachtet werden.

In dieser Software gibt es viele Einstellmöglichkeiten, die es dem Bediener erlauben das System sehr komplex zu gestalten.

#### Input

Die Software arbeitet entweder mit eigenen Grundkörpern, durch die das System konstruiert wird, oder mit bereits konstruierten CAD Modellen.

#### Visualisierung

Durch die Darstellung am CAD Modell ist die Simulation sehr anschaulich. Bewegungsabläufe werden realistisch dargestellt, Fehler sind so leichter zu erkennen und zu korrigieren.

#### Sprache

Englisch

#### Hilfe / Tutorials

Die Software bietet eine interne Hilfe-Funktion sowie ein Handbuch zur Bedienung. Es gibt ebenfalls zahlreiche Online-Webinars und Tutorials, zusätzlich Foren, Blogs und YouTube-Kanäle.

#### Bewertung

Die Firma MSC bietet für die Software verschiedene Lizenzpakete (Kauf oder Miete) an.

Die Software MCS ADAMS arbeitet grundsätzlich anders als die zuvor betrachteten Software MATLAB (Simulink) und SimulationX. Bei MCS ADAMS wird das zu simulierende System in der Softwareoberfläche durch einzelne Bausteine konstruiert. Diesen Bausteinen können dann beliebige Eigenschaften zugeordnet werden und Parameter wie Masse, Schwerpunkt, Werkstoff, Reibungskoeffizient etc. können hier beliebig spezifiziert werden. Der Benutzer hat jedoch ebenfalls die Möglichkeit voreingestellte Standardeinstellungen zu nutzen, was die Bedienung sehr intuitiv und eine vereinfachte Simulation möglich macht. Zusätzlich können jeder Komponente Verbindungen, Kräfte und Kontakteigenschaften zugeordnet werden, wodurch die Simulation sehr realitätsnah ist. Auch Reibung, Dämpfungseigenschaften etc. können hier ausgewählt werden. Im Großen und Ganzen ist die Simulation sehr anschaulich da direkt am Modell simuliert wird.

#### **Fazit**

Alle drei der zuvor dargestellten Software-Lösungen bieten die Möglichkeit zur Mehrkörpersimulation. Zwei der Software-Lösungen, SimulationX und MATLAB (Simulink) arbeiten mit sogenannten Funktionsbausteinen, die durch mathematische Funktionen das Verhalten der einzelnen Systemkomponenten beschreiben. Die Software MSC ADAMS arbeitet an einem drei-dimensionalen Modell, bei dem den einzelnen Komponenten spezifische Eigenschaften und Parametern zugewiesen werden können.

Die meisten kostenlosen Hilfen und Anleitungen gibt es zu der Software MATLAB, da diese schon lange in vielen industriellen Unternehmen und in der Forschung genutzt wird. Die Software SimulationX ist ähnlich aufgebaut, hier gibt es jedoch bis auf die kostenpflichtigen Schulungen des Softwareanbieters nicht viele Möglichkeiten zur selbstständigen Einarbeitung in die Software. MSC ADAMS bietet ein Einsteiger-handbuch in dem anhand Beispielaufgaben die Grundlagen erlernt werden können. Des Weiteren gibt es weitere Anleitungen und Tutorials, auf die frei zugegriffen werden kann. Zusätzlich bietet MSC auch Schulungen und Webinare an.

Sowohl für die Software SimulationX als auch MATLAB (Simulink) sind an der FH Südwestfalen Iserlohn bereits Softwarelizenzen vorhanden. Für die Software MSC ADAMS müsste eine Lizenz erworben werden.

Da jedoch die Arbeit mit der Software MSC ADAMS am intuitivsten ist, und nach einer vergleichsweise geringen Einarbeitungszeit bereits einfache Systeme simuliert werden können, ist diese Software für das Vorhaben der Oberdruckhammersimulation am besten geeignet. Sowohl bei SimulationX als auch bei MATLAB müssten zuvor die komplexen Grundlagen der Maschinendynamik erlernt werden, um das System mathematisch beschreiben zu müssen. MSC ADAMS bietet durch die standardisierten Einstellungen die Möglichkeit einer „vereinfachten“ Simulation, die bezüglich ihrer Komplexität und Genauigkeit immer weiter optimiert werden kann.

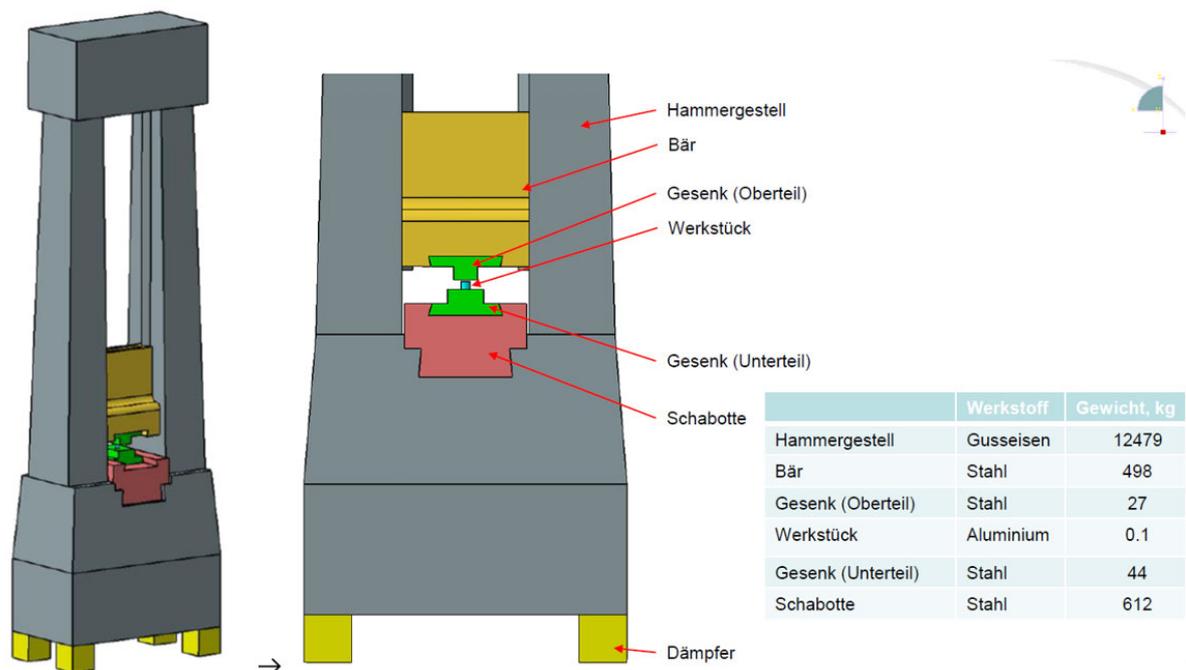
Des Weiteren kann die Simulation durch die visuelle Darstellung am 3D-Modell auch für zukünftige Präsentationszwecke genutzt werden.

Auf Grundlage dieser Bewertungen wurde ein Softwarepaket, bestehend aus 5 Modulen, des Anbieters MSC ausgewählt.

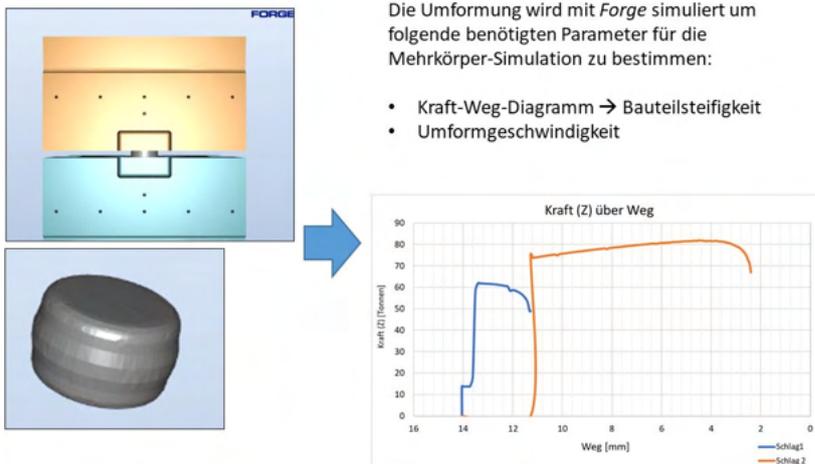
Das Ersatzsystem basiert auf einer Mehrkörpersimulation (MSC Adams) welche die Dynamik beweglicher Teile sowie die Verteilung von Lasten und Kräften in dreidimensionalen mechanischen Systemen unter Berücksichtigung der physischen Interaktionen analysiert. Über flexible Körper werden elastische Komponenten eingebunden und Reibungen sowie komplexe Kontaktzustände berücksichtigt. Für die Mehrkörpersimulation notwendige Randbedingungen der Bauteilumformung werden mit der Simulationssoftware FORGE (Transvalor) ermittelt. Die Ergebnisse der Mehrkörpersimulation beinhalten Kräfte, Positionen, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Systemkomponenten.

Für die ersten Untersuchungen wurde der LFM-Riemenfallhammer als Ersatzsystem aufgebaut (**Bild 8**). Für die Umformung wurde ein kalt umgeformtes Aluminiumbauteil ausgewählt. Die Umformung wurde mit Forge (**Bild 9**) simuliert und im LFM-Labor als Realversuch ausgeführt.

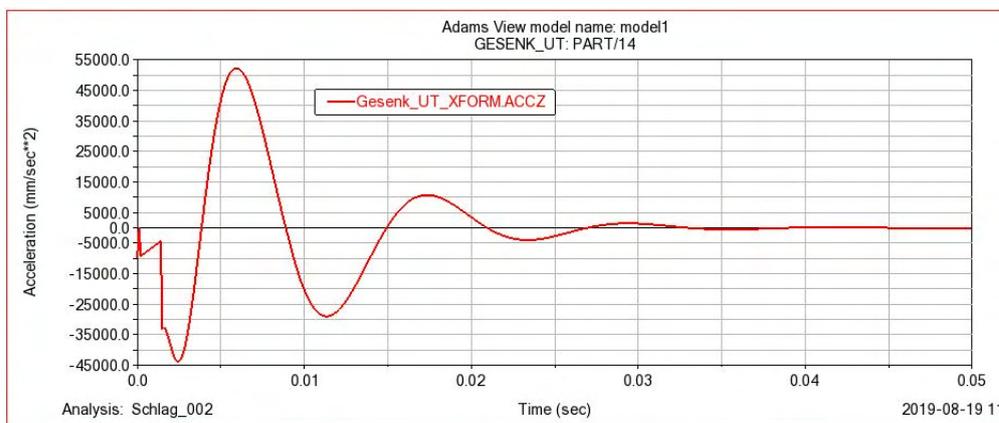
Die Ergebnisse der Mehrkörpersimulation können für jedes Element des Ersatzsystems dargestellt. In **Bild 10** ist beispielsweise die Beschleunigung im Untergesenk ersichtlich.



**Bild 8:** Ersatzsystem für den LFM-Riemenfallhammer



**Bild 9:** Simulation der Umformung



**Bild 10:** Ergebnis-Beispiel der Mehrkörpersimulation: Beschleunigung im Untergesenk

Die ersten Ergebnisse der Mehrkörpersimulation zeigten in der Gegenüberstellung zu den Realversuchen eine deutliche Abweichung der Beschleunigungswerte. Durch Variation von Simulationsparametern kann die Mehrkörpersimulation mit den Ergebnissen des realen Versuchs zwar kalibriert werden. In umfangreichen Untersuchungen konnten aber keine Kalibrierungsfaktoren ermittelt werden, die für unterschiedliche Umformsituationen einsetzbar waren.

**Das Verhältnis der Ergebnisse zwischen Real-Versuch und Mehrkörper-Simulation weist in Abhängigkeit der Versuchseinstellungen und des Ortes (Gesenk vorne, Schabotte, ...) erhebliche Unterschiede auf (Bild 11, „Faktor Beschleunigung“). Eine einheitliche Kalibrierung des Mehrkörper-Modells konnte auch nach umfangreichen Optimierungsversuchen nicht erreicht werden.**

Vers.	Bauteil		Umform-schläge	Bärgeschw. $v_{max}$	Steifigkeit (max) Forge Gesenk oben in Z-Richtung	Beschleunigung (max) Real-Versuch			Beschleunigung (max) Mehrkörper-Simulation			Faktor Beschleunigung Versuch/Simulation		
	$H_0$	$H_1$				Gesenk vorne	Schabotte vorne	Gestell mitte	Gesenk vorne	Schabotte unten	Gestell unten	Gesenk vorne	Schabotte unten	Gestell unten
	[mm]	[mm]	[Anzahl]	[mm/s]	[N/mm]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[]	[]	[]
1	54,8	36,8	1	4.700	7758	355	38	53	21	21	11	16,9	1,81	4,82
2	43,6	30,5	1	4.700	10897	815	1.267	130	30	30	15	27,17	42,23	8,67
3	41,7	30,1	1	4.700	930577	4.918	1.662	75	2.650	2.650	1.427	1,86	0,63	0,05

**Bild 11:** Gegenüberstellung der Ergebnisse von Simulation und Real-Versuch

Bauteil:

- D0: 40,0
- Legierung: EN AW-6082 (AlMgSi1)
- Umformtemperatur: RT (20°C)

Das auf Basis der Mehrkörpersimulation erstellte Ersatzsystem weist durchaus Potentiale zur Lösung der beschriebenen Problemstellungen auf. Die Komplexität des Gesamtsystems erfordert jedoch noch umfangreiche, weiterführende Untersuchungen und softwaretechnische Anpassungen/Erweiterungen des Ersatzsystems. Der hierzu notwendige Aufwand würde nach derzeitigem Erkenntnisstand ein eigenständiges Projekt erfordern und ist im Rahmen dieses Vorhabens als einzelner Arbeitspunkt nicht zu leisten.

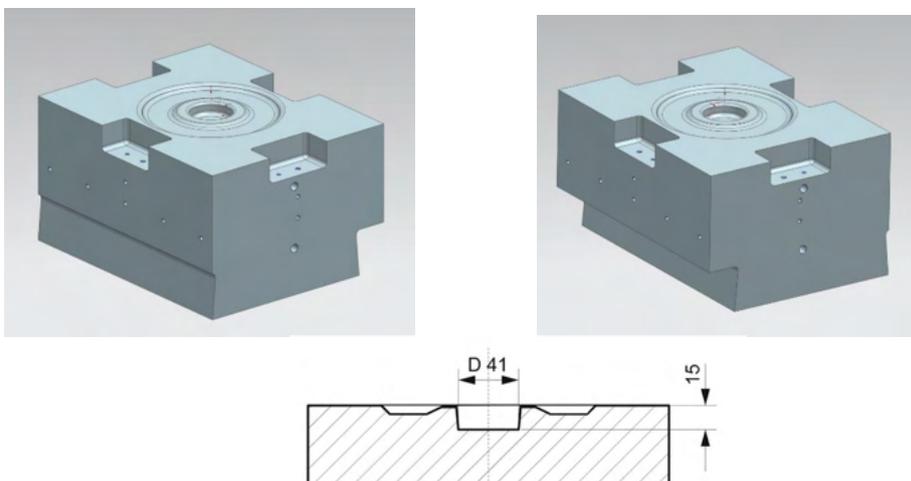
Dieser Arbeitspunkt, die Erstellung eines rechnerinternen Ersatzsystems, konnte daher nicht weiterbearbeitet werden.

### 3.2 Umsetzung auf Laborebene

Grundlegende Untersuchungen und Bewertungen werden auf Laborebene umgesetzt und bewertet:

- Auswahl, Installation und Test geeigneter käuflicher Sensoren
- Auswahl, Installation und Test der Mess-/Auswertetechnik
- An welchem Ort (Schabotte, Ständer, Ober-/Unterwerkzeug, ....) erfolgt welche Messung (Beschleunigung, Körperschall)
- Auswahl, Test und Bewertung geeigneter Analysemethoden und Signalfilter
- Experimente mit gezielten Prozessstörungen; Überprüfung und Feinkorrektur der Strategie zur Bestimmung produktspezifischer SOLL-Muster

Für die Untersuchungen auf Laborebene wurde ein geeignetes Schmiedewerkzeug entwickelt, konstruiert und gefertigt (**Bild 12**). Die Gravur bildet ein rotationssymmetrisches Bauteil ab, an allen 4 Ecken des Gesenkes befinden sich Prellschlagflächen. Gewindebohrungen zur Befestigung von Beschleunigungs- und/oder Körperschallsensoren wurden an allen 4 Seiten des Gesenkes (parallel und senkrecht zur Umformrichtung) angebracht.



**Bild 12:** Versuchsgesenk (Ober- und Unterhälfte)

Ober- und Untergravur identisch

Erste Messungen mit einem am Gesenk befestigten Beschleunigungssensor zeigten die Grenzen eines bis dato genutzten Messsystems auf. Bei einem neu angeschafften Messsystem wurde daraufhin ein spezieller Messverstärker für die hochdynamische Erfassung und Analyse mechanischer Messgrößen integriert und Messungen mit Weg- und Beschleunigungssensoren durchgeführt. Hierbei wurden auch geeignete Signalfilter für die hohen Messraten von bis zu 100kHz ermittelt.

Die Untersuchungen auf Laborebene werden ausschließlich im Labor für Massivumformung durchgeführt. Hierzu steht ein Riemenfallhammer mit einer Nennenergie von 8,8 kJ und einer maximalen Bargeschwindigkeit von ca. 4,8 m/s zur Verfügung. Die gewünschte Energie beziehungsweise Bargeschwindigkeit wird durch Variation der Fallhöhe des Bären eingestellt.

Die Versuche werden mit dem Bauteilwerkstoff Aluminium, EN AW-6082 (AlMgSi1) bei Raumtemperatur durchgeführt. Da der Riemenfallhammer nur eine sehr begrenzte Wiederholgenauigkeit der Fallhöhe ermöglicht (Ausnahme: maximale Fallhöhe) wird die Beeinflussung der Prellschlagstärke durch Variation der Ausgangshöhe des Einsatzmaterials erzielt.



Einsatzmaterial ( $\varnothing$  40,0)

Ausgangshöhe  $H_0$ :

- 41,5 +/- 0,2
- 43,4 +/- 0,2
- 54,6 +/- 0,2

Endgeometrie

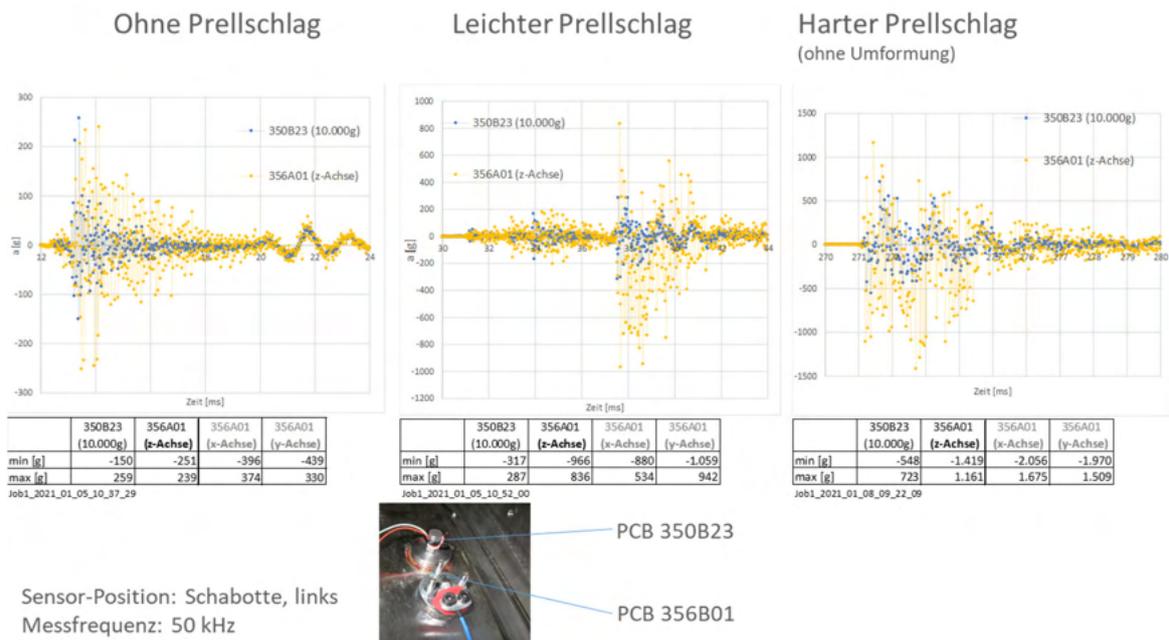
- 1 Umformschlag
- Max. Fallhöhe
  - $v_{\max}$ : 4,8 m/s
  - E: 6,9 kJ

### **Bild 13:** Varianten des Einsatzmaterials

Zur Ermittlung eines geeigneten Beschleunigungssensors wurden von dem Projektpartner PCB Synotech 5 verschiedene Sensoren (**Bild 14**) zur Verfügung gestellt. Auf Basis unterschiedlicher Belastungsfälle und Gegenüberstellung der Beschleunigungs-/Zeitverläufe (**Bild 15**) der unterschiedlichen Sensoren wurde in Zusammenarbeit mit PCB Synotech der Sensortyp M350B23 als vorrangig zu nutzendem Sensor ausgewählt. Dieser Sensor ist speziell für die beim Prellschlag auftretende Schockbelastung ausgelegt, und hat als Einschränkung aber eine maximale Einsatztemperatur von 80°C, was bei den Betriebsuntersuchungen zu beachten ist. Alternativ soll der triaxiale Sensor PCB 356A01 eingesetzt werden, da er aufgrund seiner 3-Achsen lageunabhängig verwendet werden kann, während die einaxialen Sensoren in Belastungsrichtung eingesetzt werden sollen.

Bezeichnung	Typ	Messbereich	Max. Einsatz-Temperatur	Bemerkung
		[g]	[°C]	
PCB M350B21	ICP®-Schock-Beschleunigungssensor (Einaxial)	+/- 100.000	93°C	Messbereich nicht notwendig
PCB M350B23	ICP®-Schock-Beschleunigungssensor (Einaxial)	+/- 10.000	66°C (Betrieb) 93°C (Lagerung)	Kann nach Aussage von PCB auch bis max. 80°C eingesetzt werden.
PCB 320C53	ICP®-Hochtemperatur-Vibrationssensor (Einaxial)	+/- 5.000	163°C	
PCB 3501A1220KG	MEMS-Hochschock-sensor (Einaxial)	+/- 20.000	121°C	
PCB 356A01	Vibrationssensor (Triaxial)	+/- 1.000	121°C	

**Bild 14:** Auswahl der Beschleunigungssensoren



**Bild 15:** Gegenüberstellung von Beschleunigungs-/Zeitverläufen verschiedener Sensoren bei unterschiedlicher Belastung

In ersten Untersuchungen erfolgte die Ermittlung der notwendigen Messrate für die Erfassung von Prellschlägen und die Ermittlung des Einflusses verschiedener Positionen (Gesenk, Schabotte) des Beschleunigungssensors.

Der Einfluss der Position/Lage der Beschleunigungs- und Körperschallsensoren am Umformaggregat beziehungsweise Werkzeug wird bei 3 Belastungsfällen untersucht:

- Ohne Prellschlag
- Leichter Prellschlag

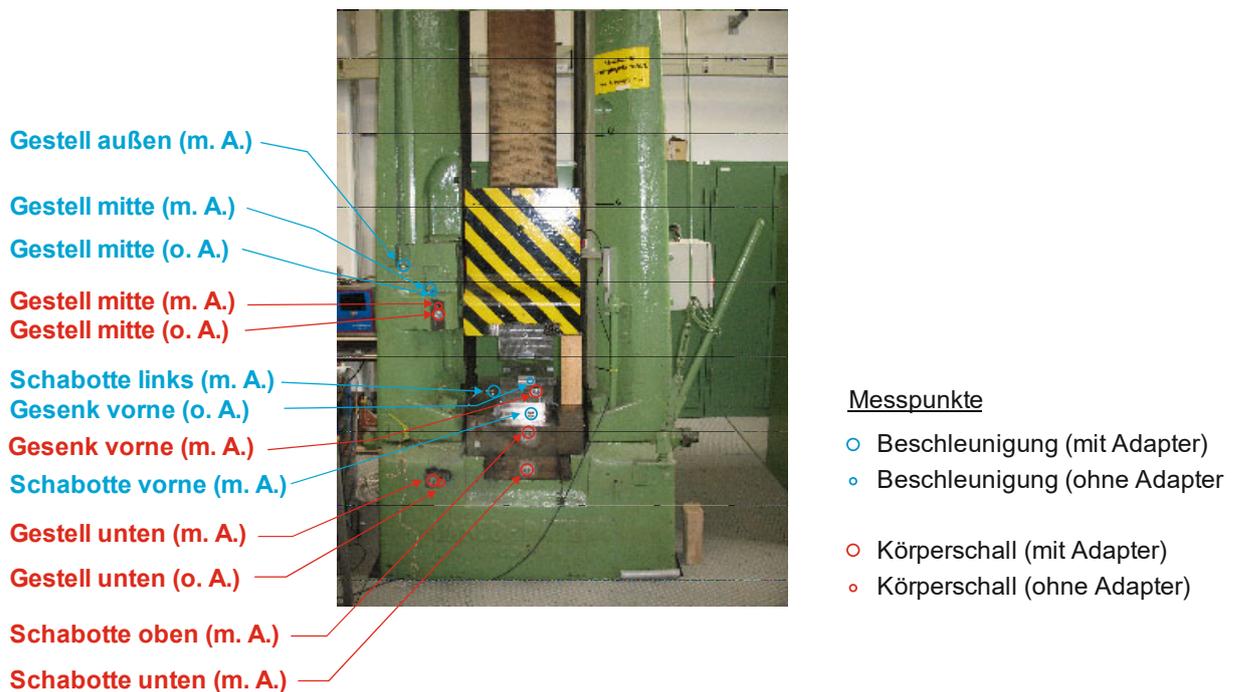
- Harter Prellschlag

Alle Versuche werden mit maximaler Fallhöhe des Bären durchgeführt, die unterschiedlichen Belastungsfälle werden durch Variation der Ausgangshöhe des Einsatzmaterials realisiert.

Die untersuchten Positionen der Sensoren sind in **Bild 16** dargestellt.

Die Montage der Sensoren erfolgt über ein am Sensor befindliches Gewinde, Klebeflächen oder bei ringförmigen Sensoren durch eine mittige Schraube. Da das Einbringen eines Gewindes an den Maschinenelementen bzw. den Werkzeugen nicht immer möglich ist, wurde als Alternative die Befestigung mittels aufgeklebter Adapterplatten untersucht (**Bild 17**).

Die Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Befestigungsvarianten mit/ohne Adapterplatte.



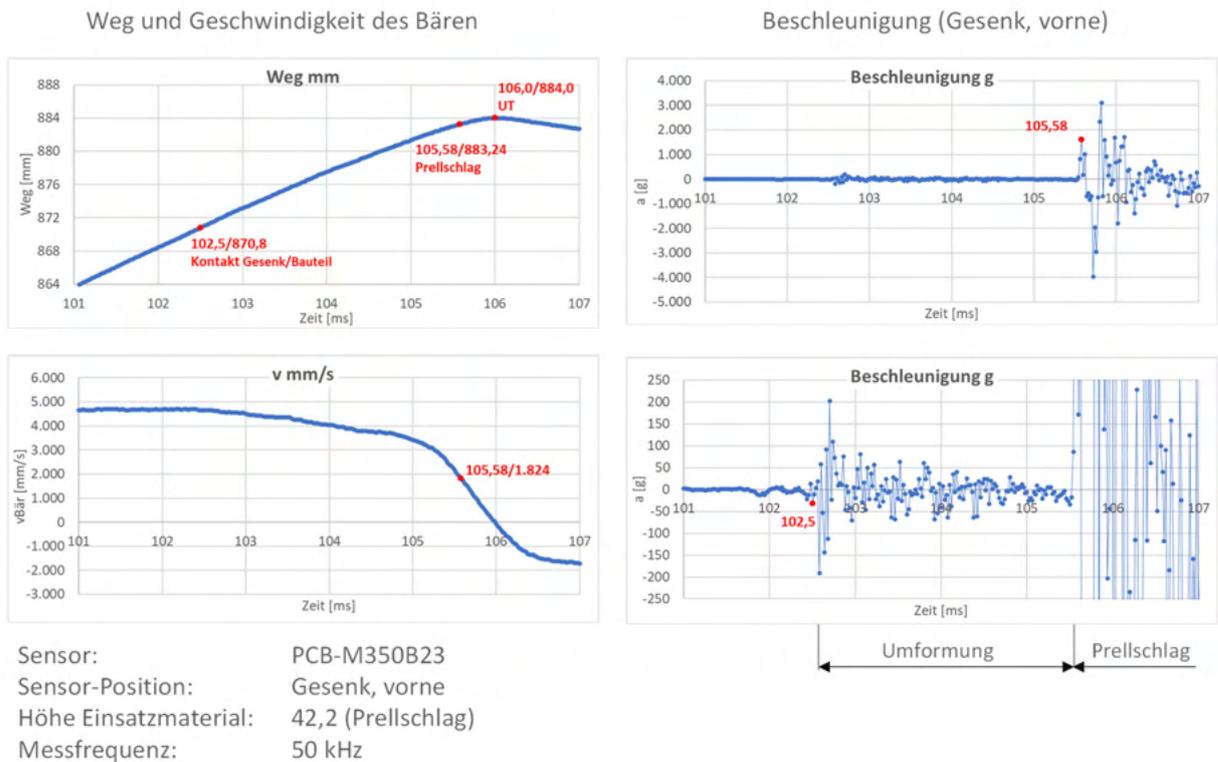
**Bild 16:** Positionen der Sensoren

<b>Direkte Befestigung</b> Sensor: PCB M350B23 Position: Gestell Mitte	<b>Befestigung mit Adapterplatte</b> Sensor: PCB M350B23 Position: Gestell Mitte	<b>Geklebte Befestigung (auf Adapterplatte)</b> Sensor: PCB 356A01 Position: Gestell Mitte

**Bild 17:** Befestigungsvarianten der Sensoren

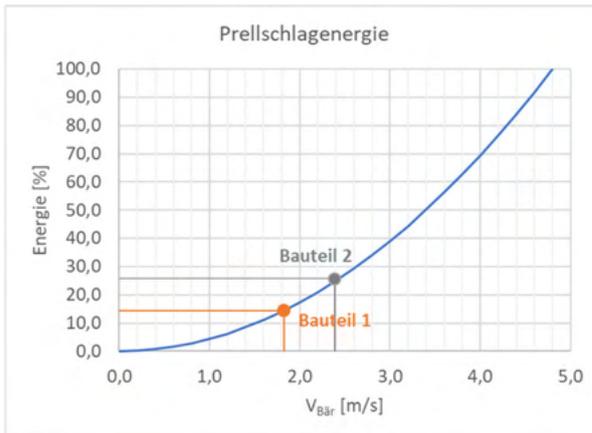
In **Bild 18** ist beispielhaft der Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf für einen Umformschlag in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Die Zeitpunkte für den Erstkontakt

zwischen Gesenk und Bauteil und den Beginn des Prellschlags wurden in den Beschleunigungsdiagrammen ermittelt und dann in die Weg-/Geschwindigkeitsdiagramme übertragen. Der durch die Beschleunigungswerte ermittelte Erstkontakt zwischen Gesenk und Bauteil konnte durch die bekannte Anfangs- und Endhöhe des Bauteils überprüft und bestätigt werden. Die im Laborversuch maximal ermittelten Beschleunigungswerte bei Prellschlägen betragen bis zu 8.000g.



**Bild 18:** Beispiel Beschleunigungsmessung für 1 Umformschlag (mit Prellschlag)

Auf Basis, der in **Bild 19** dargestellten Auswertung, kann der Anteil der Prellschlagenergie bezogen auf die gesamte kinetische Energie ermittelt werden. Die Gesamtenergie (100%) wird hierbei durch die Auftreffgeschwindigkeit Obergesenk/Bauteil bestimmt und entspricht bei dem verwendeten Riemenfallhammer der maximalen Bargeschwindigkeit. Das dargestellte Beispiel zeigt die hohe Sensibilität der Prellschlagenergie auf Prozessstreuungen. Eine Reduzierung der Höhe des Einsatzmaterials um 0,6mm führt zu einer relativen Erhöhung der Prellschlagenergie von mehr als 50%.



**Bauteil 1:**

$v_{\text{Prellschlag}}$ : 1,8 m/s  
 Prellschlagenergie: 14,4 %

**Bauteil 2:**

$v_{\text{Prellschlag}}$ : 2,4 m/s  
 Prellschlagenergie: 25,7 %

Höhe Einsatzmaterial:

- Bauteil 1: 42,2
- Bauteil 2: 41,6

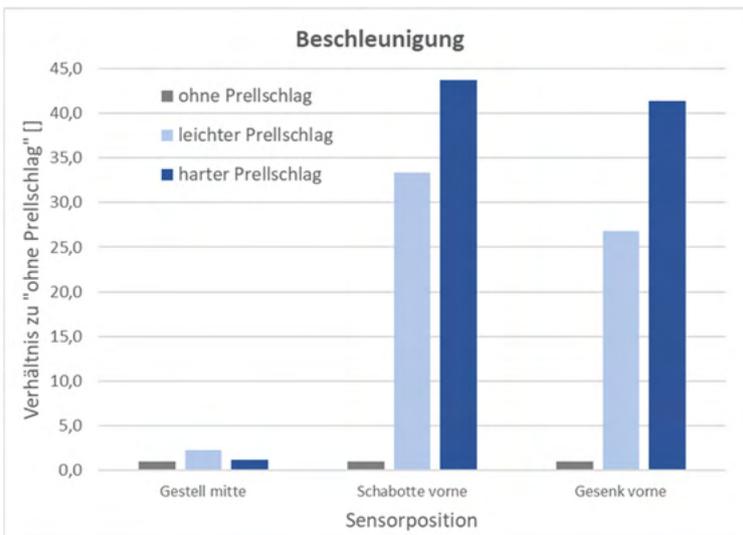
Sensor: PCB-M350B23

Sensor-Position: Gesenk, vorne

Messfrequenz: 50 kHz

**Bild 19:** Anteil der Prellschlagenergie

Damit die Empfindlichkeit der Beschleunigungsmessungen hinsichtlich der Intensität der Prellschläge und hinsichtlich der Position der Sensoren verglichen und bewertet werden können, werden die Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen auf den Fall „ohne Prellschlag“ normiert. Aus **Bild 20** wird so zum Beispiel ersichtlich, dass bei der Sensorposition „Gestell mitte“ nur ein geringer Unterschied des Beschleunigungsverhaltens in Abhängigkeit der Prellschlag-Intensität vorliegt. Im Vergleich dazu ist bei den Sensorpositionen „Schabotte vorne“ und „Gesenk vorne“ ein Prellschlag, unabhängig von der Intensität, sicher identifizierbar.



**Bild 20:** Normierte Darstellung der Beschleunigungsmessung

Die Messungen der Körperschallsignale wurden durch den Projektpartner Fa. QASS parallel zu den Beschleunigungsmessungen durchgeführt. Hierbei wurde das Messsystem Optimizer 4D und der Sensor O-WT 19 eingesetzt. Die Befestigung der Körperschallsensoren entsprach der Befestigung der Beschleunigungssensoren (**Bild 21**)



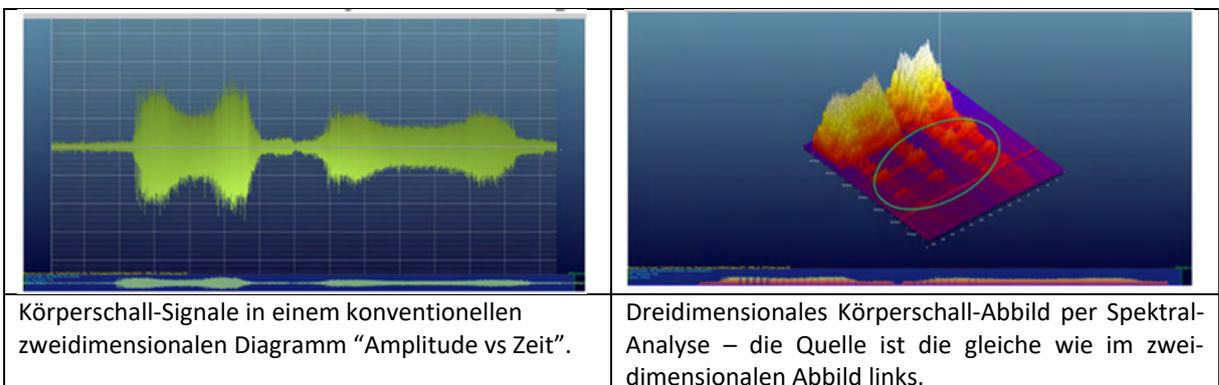
QASS Optimizer4D

**Bild 21:** Körperschallmesssystem und -sensor

Maschinen und Produkte emittieren Körperschallsignale während der Bearbeitung. Bei der Körperschallanalyse von QASS werden diese Signale durch eine Hoch-Frequenz-Impuls-Messung (HFIM) erfasst und per Fourier-Transformation in ein dreidimensionales Abbild des Prozesses umgewandelt. Die grafische Darstellung erfolgt auf den Achsen Zeit, Frequenz und Amplitude.

Der Vorteil dieser dreidimensionalen Analyse ist der deutlich gesteigerte Informationsgehalt der Ergebnisse.

Die beiden Diagramme in **Bild 22** zeigen dasselbe Körperschall-Signal, einmal in einer konventionellen zweidimensionalen Darstellung, einmal in der dreidimensionalen Prozesslandschaft, erzeugt durch die Spektral-Analyse. Deutlich wird das verbesserte Signal-Rausch-Verhältnis bei den hier auftretenden Signalen (grün markiert) hinter dem niederfrequenten Wellenberg. Die markierten Signale treten nur im dreidimensionalen Abbild zutage. In der zweidimensionalen Ansicht bleiben diese Signale versteckt. /QASS/

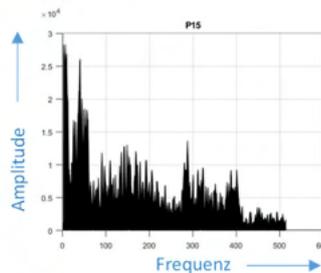
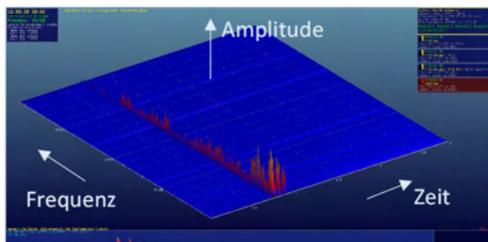


**Bild 22:** Gegenüberstellung der zwei- und dreidimensionalen Darstellung

Die grafische Darstellung der Ergebnisse der Körperschallmessung zeigt in Abhängigkeit der Prellschlag-Intensität eine deutlich unterschiedliche Ausprägung der Amplitudenwerte (**Bild 23**). Diese grafische 3D Darstellung ist sehr informativ, ermöglicht aber nicht, oder nur mit sehr großem Aufwand, den quantitativen Vergleich von Ergebnissen beziehungsweise kann

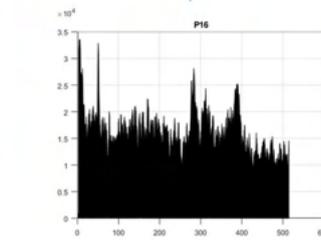
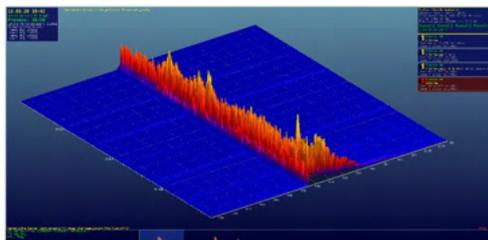
nicht als Regelgröße für eine Prozesssteuerung benutzt werden. Aus diesem Grund wurde als quantitativer Messwert das „Schallvolumen“ eingeführt. Das Schallvolumen wird aus dem Produkt von Amplitude (Mittelwert), Zeit und einem definierten Frequenzbereich gebildet. Somit steht als Ergebnis für die Intensität eines Prellschlags ein Messwert zur Verfügung.

Sensor: QASS O-WT-19, Sensor-Position: Gesenk, vorne



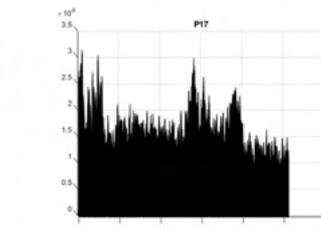
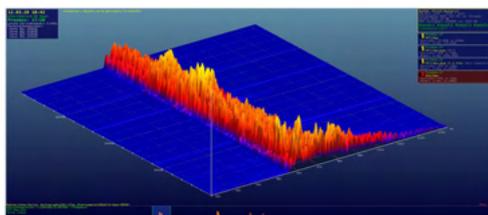
Höhe Einsatzmaterial:

- 54,7 („ohne“ Prellschlag)



Höhe Einsatzmaterial:

- 43,3 (Prellschlag „leicht“)

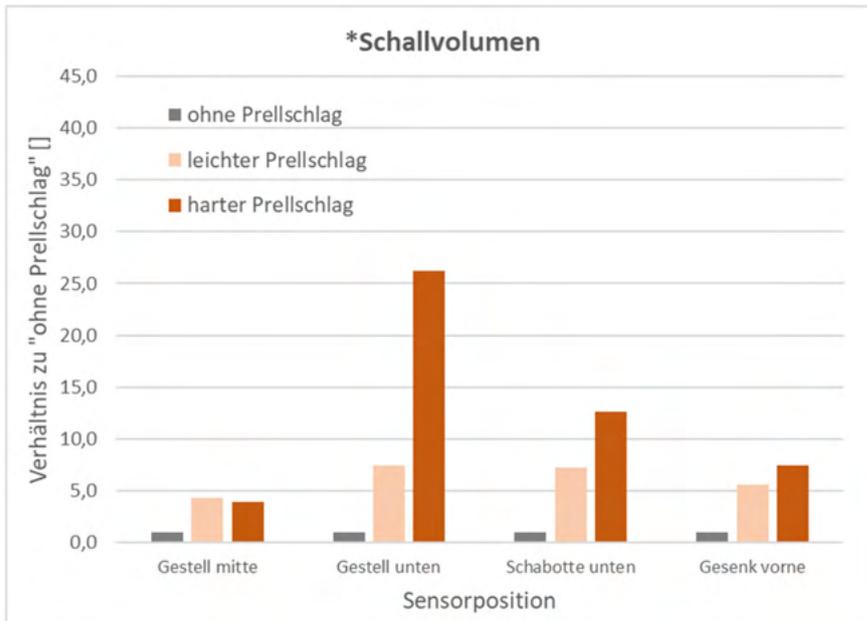


Höhe Einsatzmaterial:

- 41,7 (Prellschlag „hart“)

**Bild 23:** Ergebnisse der Körperschallmessung in Abhängigkeit der Prellschlag-Intensität

Damit die Empfindlichkeit der Körperschallmessungen hinsichtlich der Intensität der Prellschläge und hinsichtlich der Position der Sensoren verglichen und bewertet werden können, werden die Ergebnisse der Körperschallmessungen analog zu den Beschleunigungsmessungen auf den Fall „ohne Prellschlag“ normiert. Aus **Bild 24** wird so zum Beispiel ersichtlich, dass bei der Sensorposition „Gestell mitte“ nur ein geringer Unterschied des Schallvolumens in Abhängigkeit der Prellschlag-Intensität vorliegt. Die größten Unterschiede werden bei der Sensorposition „Gestell unten“ erzielt, gefolgt von den Sensorpositionen „Schabotte unten“ und „Gesenk vorne“.



\*Das Schallvolumen wird aus dem Produkt von Amplitude (Mittelwert), Zeit und einem definiertem Frequenzbereich gebildet.

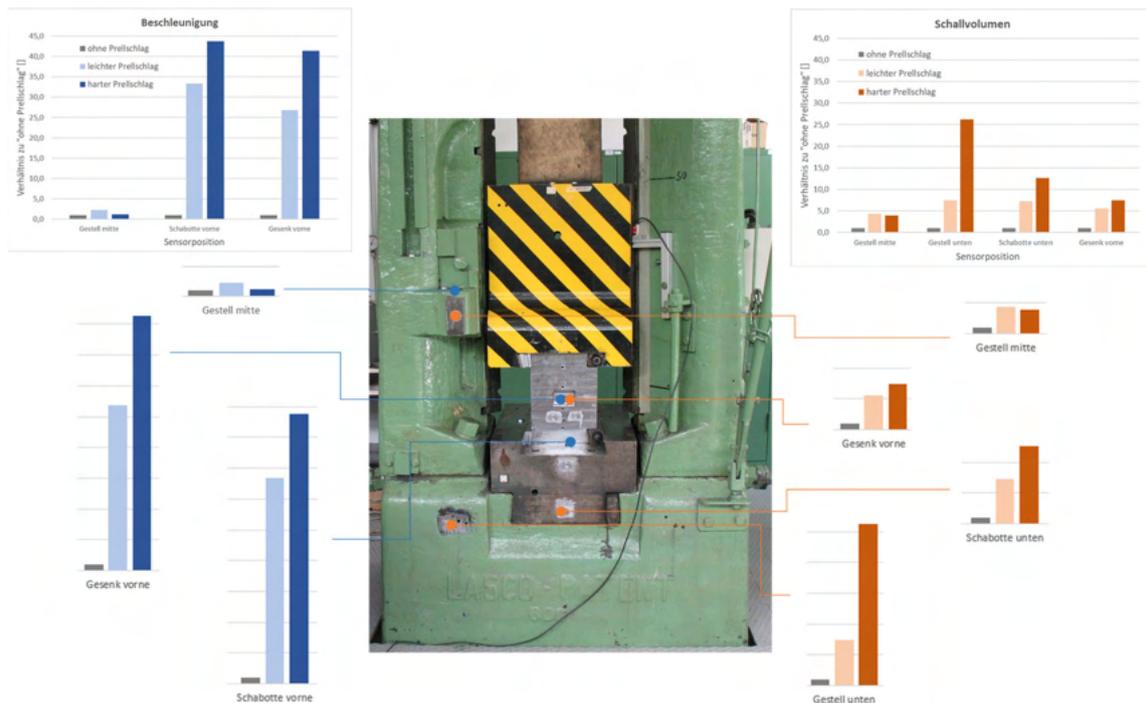
**Bild 24:** Ergebnisse der Körperschallmessung

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind in **Bild 25** zusammengefasst.

Beide Messverfahren ermöglichen eine eindeutige Identifikation von Prellschlägen und bei beiden Verfahren sind die Ergebnisse signifikant von der Position des Sensors abhängig.

Die Intensitätsunterschiede zwischen „leichten“ und „harten“ Prellschlägen werden ebenfalls von beiden Verfahren erfasst, wobei auch hier die Ergebnisse signifikant von der Position des Sensors abhängig sind.

**Zusammenfassend bleibt aus den Laboruntersuchungen festzuhalten, dass sowohl die Beschleunigungsmessung als auch die Körperschallmessung für die Aufgabenstellung des Vorhabens geeignet erscheinen.**



**Bild 25:** Übersicht der Ergebnisse

### 3.3 Umsetzung auf Betriebsebene

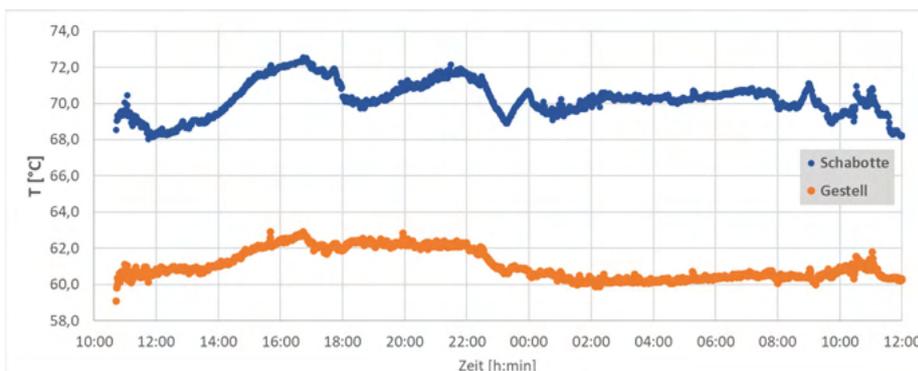
Die Untersuchungen auf Betriebsebene unter Serienbedingungen wurden unter folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- Schmiedebauteil: Pleuelstange (Doppelstück)
- Erwärmungstemperatur: > 1.200°C
- Schlagfolge: 5 Schläge (Plätten, 3x Vorformen, 1x Fertigformen)
- Umformaggregat: Oberdruckhammer, Lasco HO-U 630, vollautomatisiert

Zur Abschätzung der voraussichtlichen Wärmebelastung der Sensoren wurde der Temperaturverlauf an den wärmekritischen Anlagebereichen (Schabotte und Gestell neben Schabotte) im Produktionsbetrieb über einen Zeitraum von mehr als 24h kontinuierlich ermittelt (**Bild 26** - **Bild 27**).



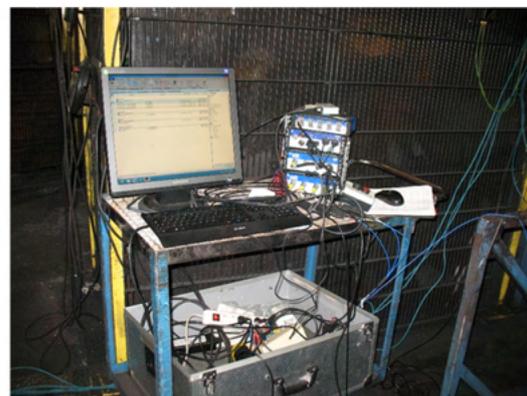
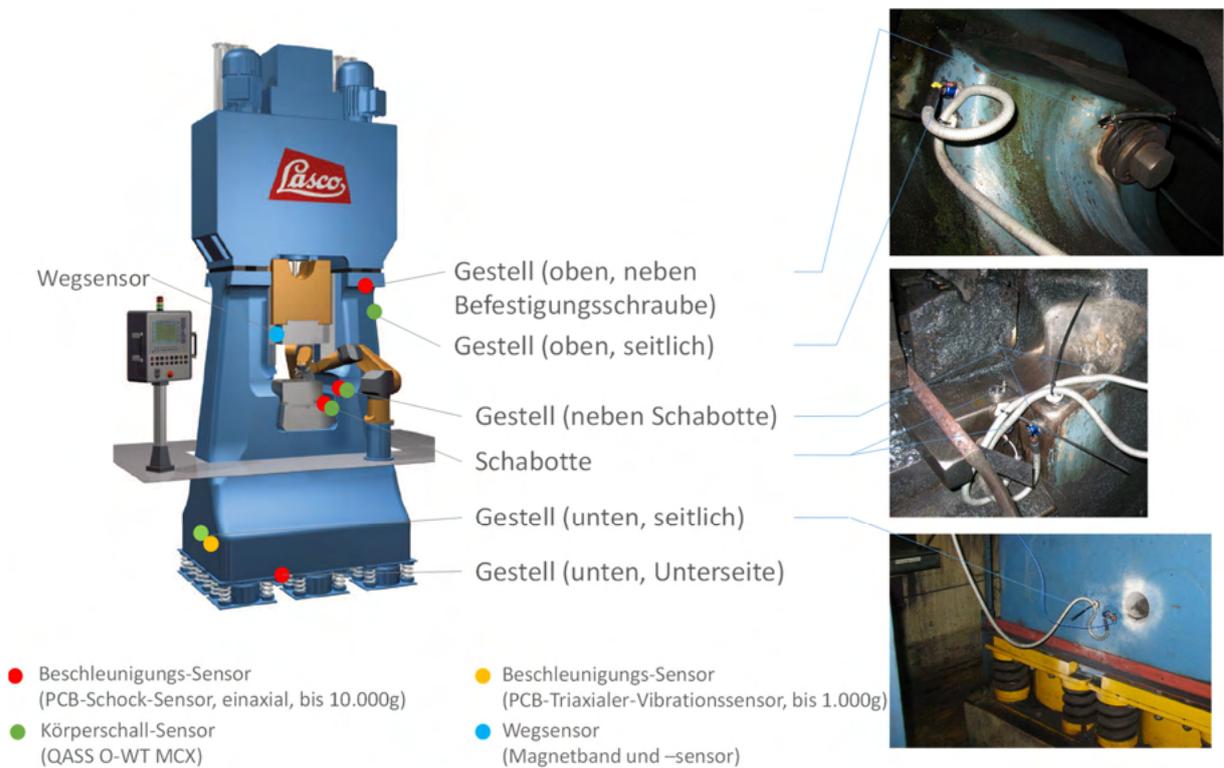
**Bild 26:** Position der Temperatur-Sensoren



**Bild 27:** Temperaturverlauf

Die Ergebnisse zeigen, dass die Grenztemperatur von 80°C des für den Einsatz vorgesehen Beschleunigungssensors nicht überschritten wird. Bei der Langzeitmessung konnte die im Laborbetrieb ermittelte Applikation der Sensoren durch aufgeklebte Adapterplatten erfolgreich getestet werden. Auch nach mehr als 24h Einsatzzeit ließen sich die Adapterplatten nur mit Gewalt (Hammer und Meißel) von den Maschinenelementen trennen.

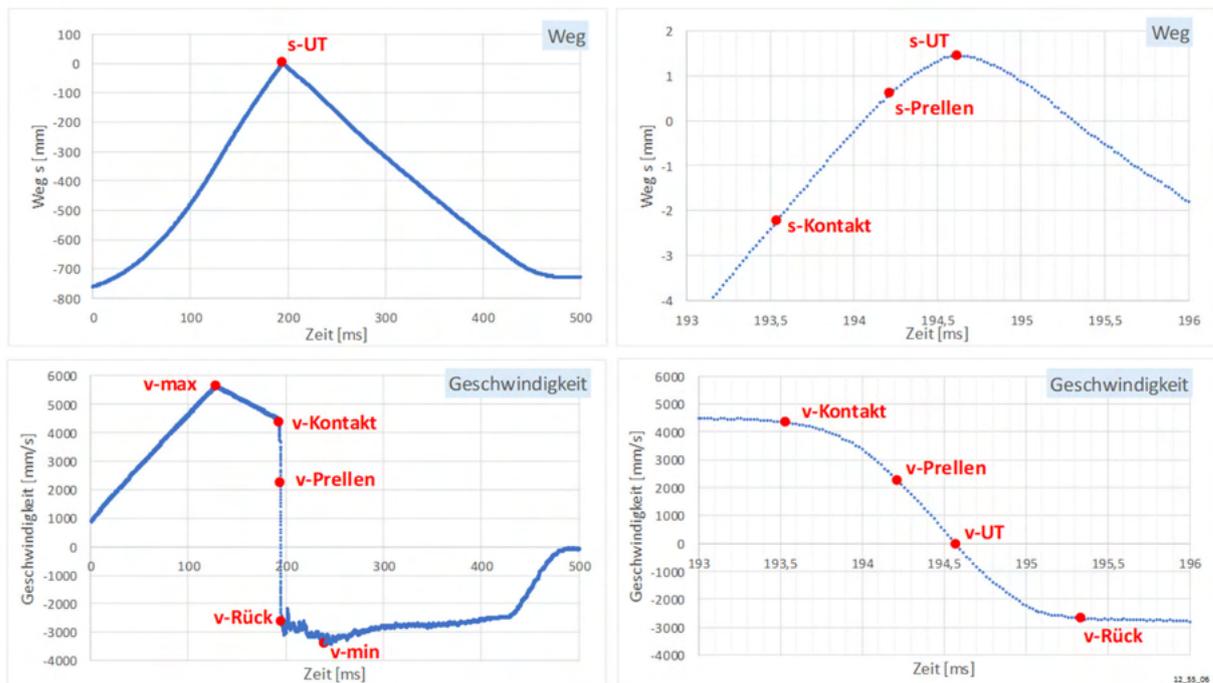
Für die erste Betriebsuntersuchung wurden Beschleunigungs- und Körperschallsensoren an unterschiedlichen Positionen des Oberdruckhammers appliziert (**Bild 28**). Zur Erfassung der Wege und Geschwindigkeiten des Bären wurde zusätzlich ein Wegsensor eingesetzt.



**Bild 28:** Position der Sensoren und Versuchsaufbau

Der prinzipielle Weg und Geschwindigkeit des Bären während eines Umformhubs sind am Beispiel des 5. Schlags einer Umformung in **Bild 29** aufgeführt.

Die Diagramme zeigen unter anderem, dass in diesem Beispiel die Umformzeit (Zeit zwischen s-Kontakt und s-UT) ca. 1ms beträgt, und dass die Beschleunigung des Bären beim Rückhub ungefähr der negativen Beschleunigung beim Umformen entspricht (die Steigung der Geschwindigkeitskurve bleibt unmittelbar vor und nach UT nahezu identisch).



**Bild 29:** Weg und Geschwindigkeit des Bären (5. Schlag)

Definitionen:

- Weg
  - s-Kontakt: 1. Kontakt zwischen Obergesenk und Bauteil
  - s-Prellen: Kontakt der Prellschlagflächen, Beginn Prellen
  - s-UT: Unterer Totpunkt
  - Weg  $s = 0$ : Ober-/Untergesenk liegen im Ruhezustand aufeinander (Prellschlagflächen)
- Geschwindigkeit
  - v-max: Maximale Geschwindigkeit des Bären
  - v-Kontakt: Auftreffgeschwindigkeit (Obergesenk/Bauteil)
  - v-Prellen: Auftreffgeschwindigkeit (Prellschlagflächen Ober-/Untergesenk)
  - v-UT: Geschwindigkeit in UT (= 0)
  - v-Rück: maximale Rücksprunggeschwindigkeit
  - v-min: maximale Aufwärtsgeschwindigkeit (Vorzeichen geändert)

Bezogen auf die kinetische Energie werden folgende Definitionen abgeleitet, wobei  $m$  für die Gesamtmasse von Bär und Obergesenk steht:

- Max. Energie (100%):  $\frac{1}{2} m * v_{\max}^2$
- Bremsenergie:  $\frac{1}{2} m * (v_{\max}^2 - v_{\text{Kontakt}}^2)$
- Umformenergie:  $\frac{1}{2} m * (v_{\text{Kontakt}}^2 - v_{\text{Prellen}}^2)$
- Prellschlagenergie:  $\frac{1}{2} m * v_{\text{Prellen}}^2$

Anmerkung: Ein Teil der Prellschlagenergie trägt auch noch zur Umformung bei.

Der Begriff „Prellschlag“ bezeichnet allgemein das Aufeinandertreffen von Ober- und Untergesenk mit den dafür vorgesehen Werkzeugflächen (Prellschlag- oder Kontaktflächen).

Zur Definition und eindeutigen Erkennung des Prellschlags wurde eine Kombination aus den Kriterien Weg und Rückfederung des Bären erarbeitet und getestet.

Für einen Prellschlag müssen die beiden folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Weg:  **$s-UT > 0$**

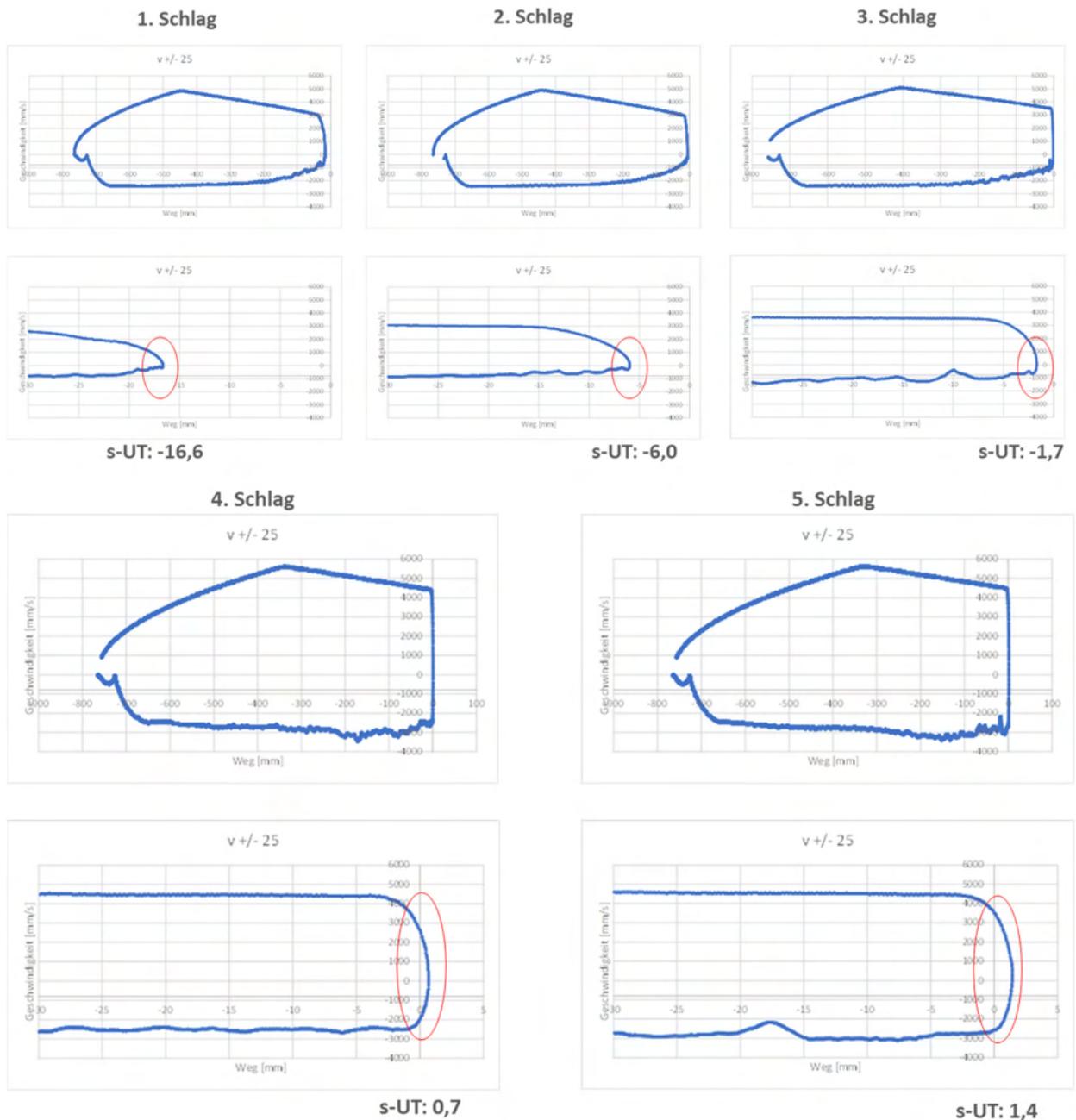
Beim Weg des Bären muss der untere Totpunkt (UT) unterschritten werden, das heißt, die Gesenke werden geringfügig elastisch verformt.

- Rückfederung:  **$v\text{-Kontakt}/v\text{-Rück} > -2,5$**

Das Verhältnis der Auftreffgeschwindigkeit  **$v\text{-Kontakt}$**  (Obergesenk/Bauteil) zur maximalen Rücksprunggeschwindigkeit  **$v\text{-Rück}$**  muss größer -2,5 betragen.

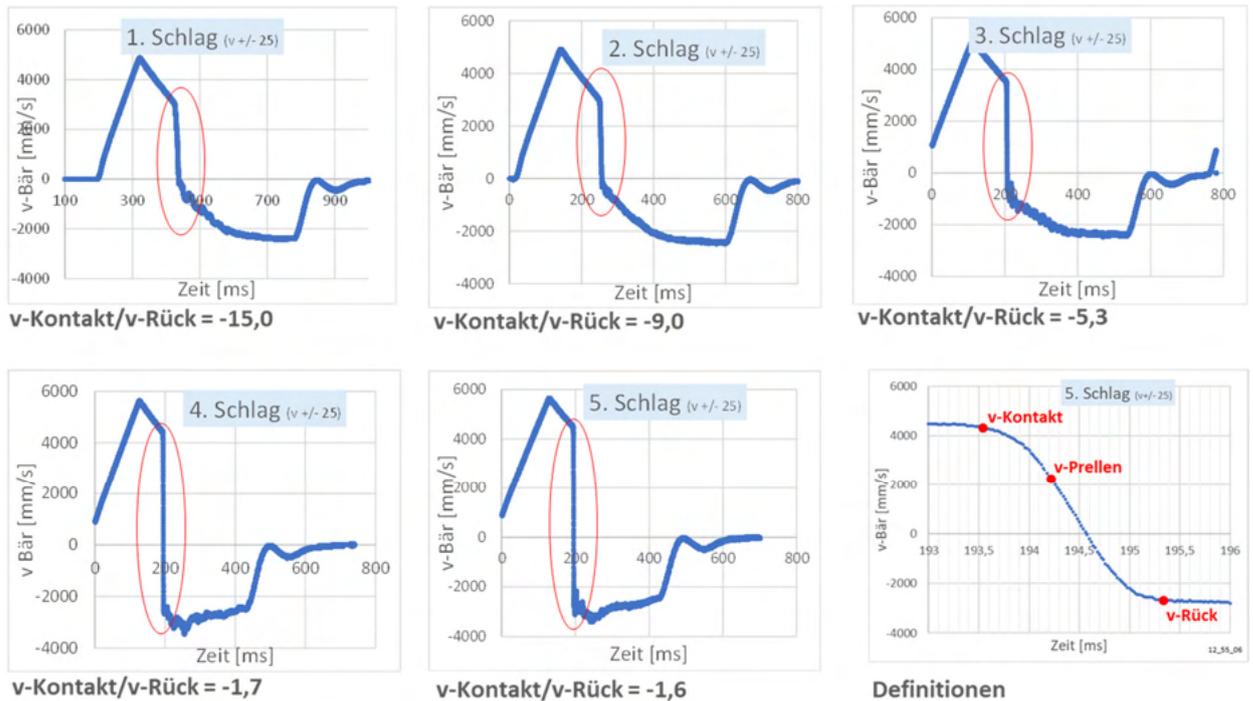
Hinweis: Die Definitionen für < oder > beziehen sich auf die Vorzeichen bei der Wegmessung. Aus messtechnischen Gründen war in der vorliegenden Darstellung der **Weg unterhalb von UT positiv** und der **Weg oberhalb von UT negativ**.

Für das erste Kriterium,  **$s-UT > 0$**  sind in **Bild 30** für alle 5 Schläge einer Schlagfolge die Wege des Bären aufgeführt. Hier wird ersichtlich, dass für den 4. und 5. Schlag das Kriterium  **$s-UT > 0$**  erfüllt wird.



**Bild 30:** Prellschlag-Kriterium Weg

Für das zweite Kriterium, **v-Kontakt/v-Rück > -2,5** sind in **Bild 31** für alle 5 Schläge einer Schlagfolge die Geschwindigkeiten des Bären und die Verhältnisse von v-Kontakt zu v-Rück aufgeführt. Auch hier wird ersichtlich, dass für den 4. und 5. Schlag das Kriterium **v-Kontakt/v-Rück > -2,5** erfüllt wird.



**Bild 31:** Prellschlag-Kriterium Rückfederung

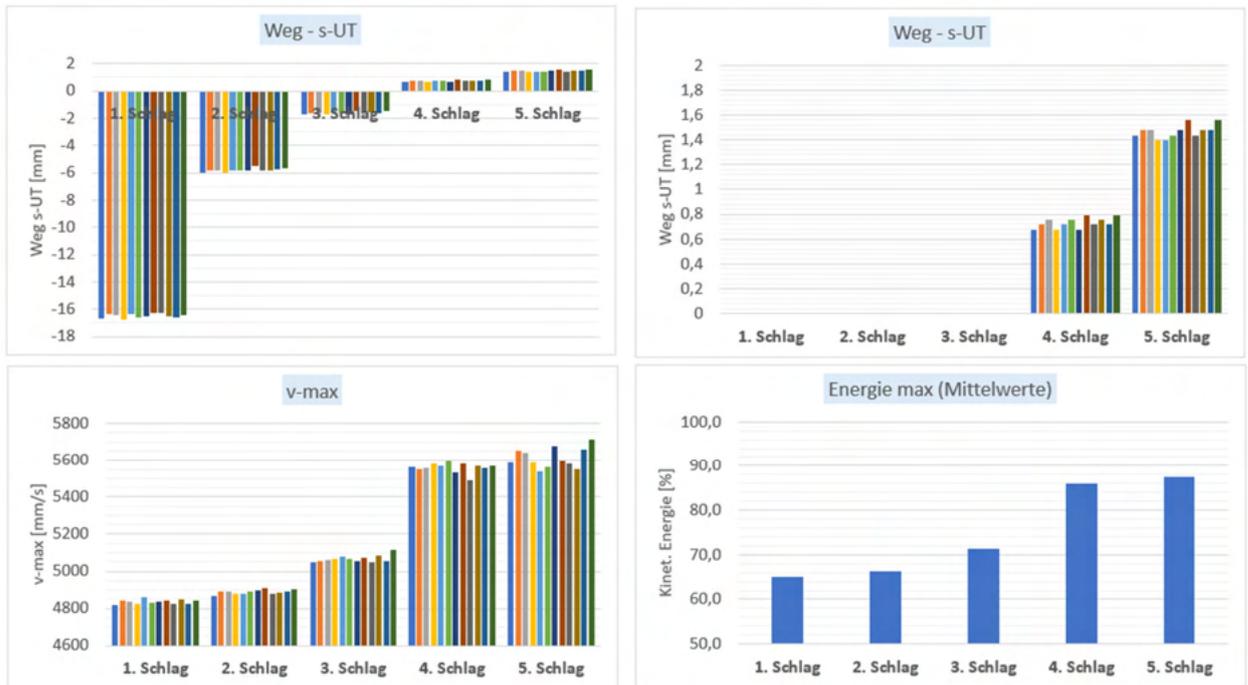
Auf Basis der Definition für Prellschläge bleibt für den untersuchten Umformprozess festzuhalten:

- **Der 4. und 5. Schlag der Schlagfolge sind Prellschläge**

Die Messergebnisse der ersten Betriebsuntersuchung sind für die Weg-, Geschwindigkeit-, Beschleunigung- und Körperschallmessung im folgendem aufgeführt.

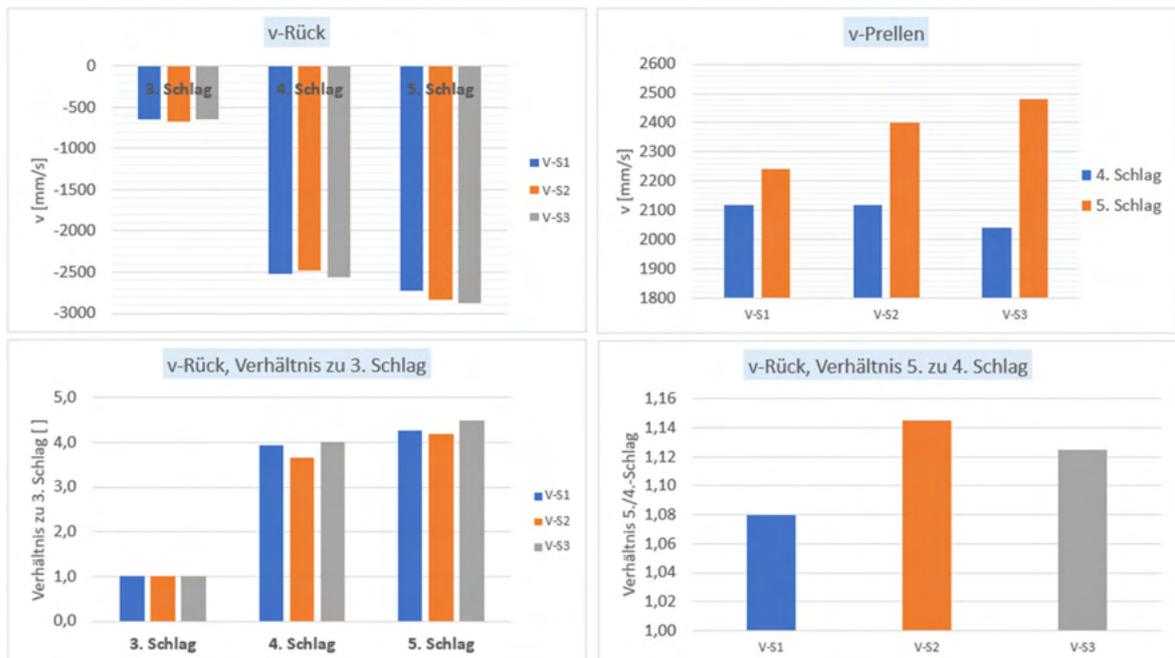
**Bild 32** zeigt im Diagramm unten links für eine Mehrfachbelegung (12-fach) die maximalen Bargeschwindigkeiten für jeden Schlag, welche direkt proportional zur maximalen kinetischen Energie sind (Diagramm unten rechts). Das Diagramm zeigt, dass die Energie bei den ersten 3 Schlägen von Schlag zu Schlag relativ gering ansteigt und dann für die Prellschläge im 4. und 5. Schlag deutlich höhere Werte erreicht.

In den oberen Diagrammen ist der erreichte untere Totpunkt je Schlag aufgeführt. Aus dem Diagramm oben rechts ist eine Wiederholgenauigkeit für den 4. und 5. Schlag von +/- 0,1mm ersichtlich.



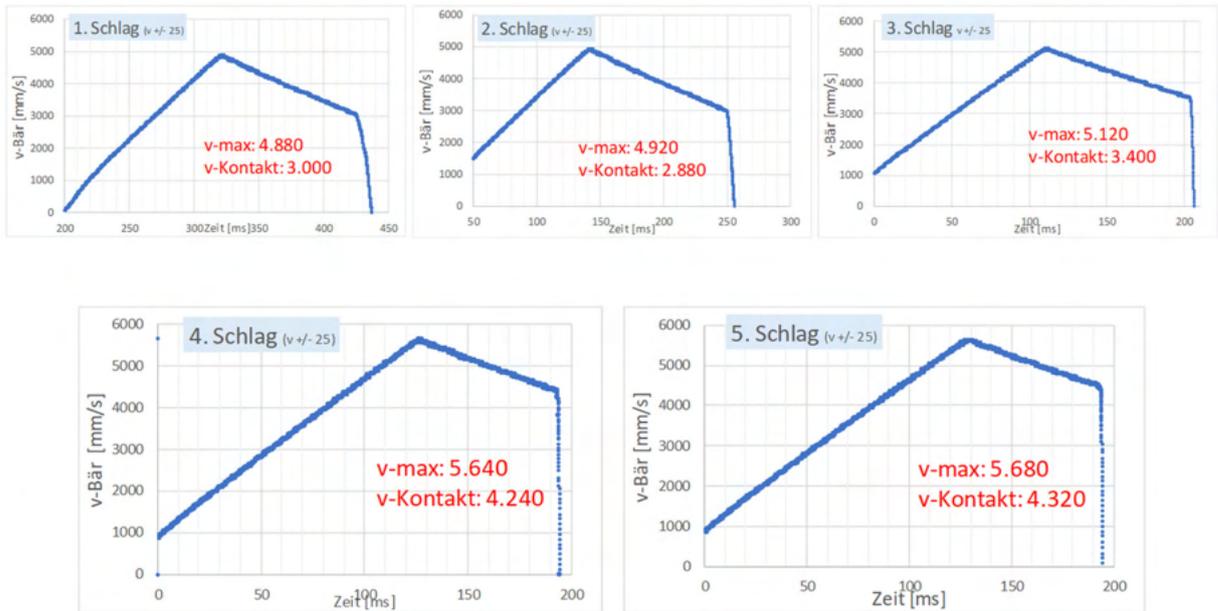
**Bild 32:** Messergebnisse Weg- und Geschwindigkeit (12-fach Belegung)

Die Prellgeschwindigkeit (Auftreffgeschwindigkeit der Prellschlagflächen von Ober-/Untergesenk) und die Rücksprunggeschwindigkeit sind ein Merkmal für die Identifikation von Prellschlägen. Zur Bewertung und Vergleichbarkeit der Intensität der Prellschläge wird die Rücksprunggeschwindigkeit des 4. und 5. Schlags auf den 3. Schlag (kein Prellschlag) normiert beziehungsweise das Verhältnis der Geschwindigkeit von 4. und 5. Schlag zueinander bestimmt. Aus den unteren Diagrammen in **Bild 33** wird so zum Beispiel ersichtlich, dass die Rücksprunggeschwindigkeit des 4. und 5. Schlags ungefähr um den Faktor 4 größer sind als beim 3. Schlag, ein deutlicher Intensitätsunterschied zwischen 4. und 5. Schlag ist jedoch nicht erkennbar.

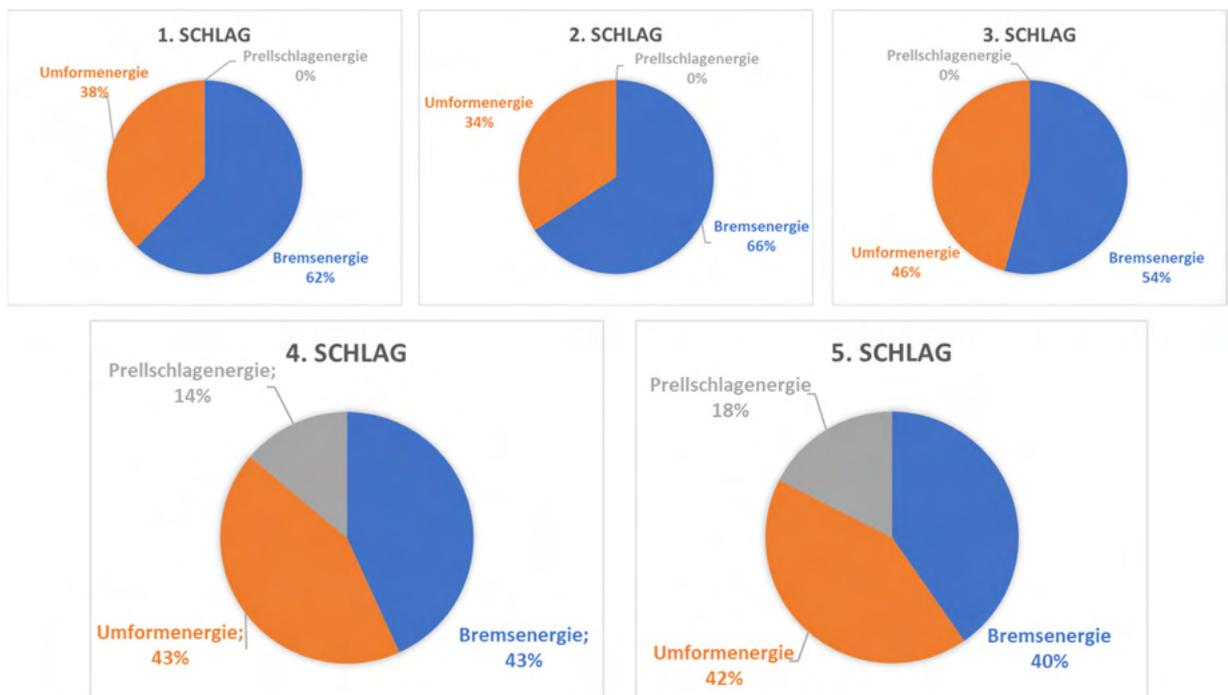


**Bild 33:** Messergebnisse Rückfeder- und Prellgeschwindigkeit

Auf Basis der Geschwindigkeitsmessung und der Möglichkeit den ersten Kontaktpunkt zwischen Obergesenk und Bauteil zu bestimmen (**Bild 34**) können die Energieanteile für jeden Einzelschlag berechnet werden (**Bild 35**). Die maximale kinetische Energie des Bären wird hierbei in die Bestandteile Bremsenergie, Umformenergie und Prellschlagenergie aufgeteilt. In der Darstellung ist nicht berücksichtigt, dass in der Prellschlagenergie noch ein Anteil Umformenergie enthalten ist.



**Bild 34:** Geschwindigkeitsverlauf für alle Schläge einer Schlagfolge



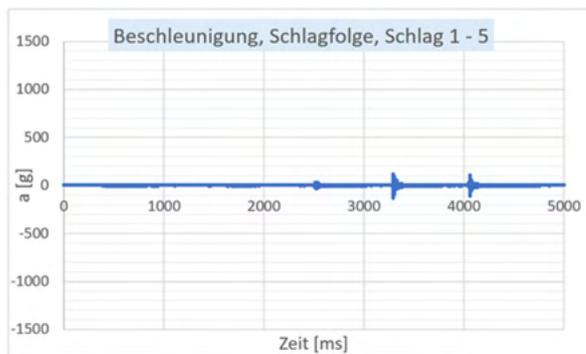
**Bild 35:** Aufteilung der Energie für alle Schläge einer Schlagfolge

Die **Beschleunigungen** während der Umformung wurden mit 2 unterschiedlichen Sensoren erfasst, dem einaxialen Beschleunigungssensor PCB M350B23 und dem triaxialen Sensor PCB 356A01.

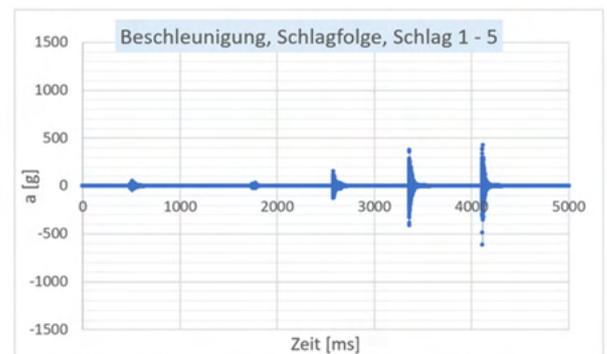
Der einaxiale Beschleunigungssensor wurde an 4 verschiedenen Positionen eingesetzt, der triaxiale Sensor, aufgrund seines begrenzten Messbereichs von +/- 1.000g, ausschließlich in der Position „Gestell unten“. Beide Sensoren wurden parallel eingesetzt und Beschleunigungswerte erfasst.

Die folgenden Messergebnisse und Auswertungen wurden mit dem einaxialen Beschleunigungssensor erzielt.

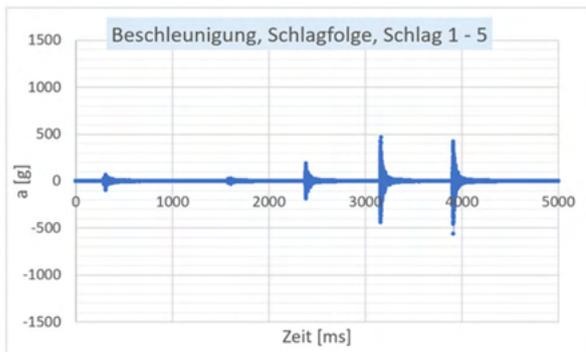
In Abhängigkeit der Sensorposition sind eindeutige Unterschiede bei den Messwerten einer Schlagfolge festzustellen (**Bild 36**). Die geringsten Werte werden bei der Position „Gestell unten“ erzielt. Hier ist für den 1. und 2. Schlag fast keine Reaktion messbar. Die Ursache wird in der großen, kompakten Masse des Hammergestells begründet sein, welche einen starken Dämpfungseffekt auf die Beschleunigung hat. Die mit Abstand größten Beschleunigungswerte werden an der Position „Schabotte“ gemessen. Die Ergebnisse dieser Sensorposition sind in **Bild 37** detailliert aufgeführt. Hier sind nicht nur die deutlichen Unterschiede in den Beschleunigungswerten in Abhängig der Schlagfolge erkennbar, sondern auch, am Beispiel des fünften Schlags, der Zeitbereich der Umformung und der Beginn des Prellschlags.



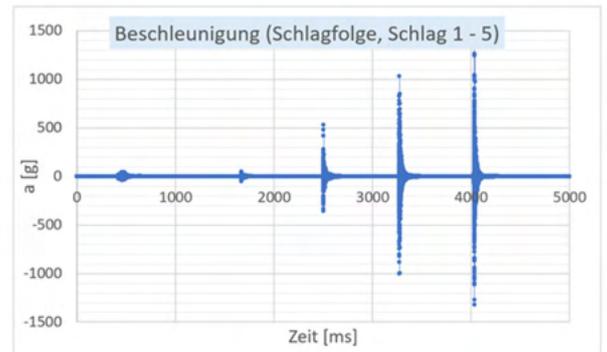
Sensorposition 1: Gestell unten (Keller)



Sensorposition 2: Gestell neben Schabotte

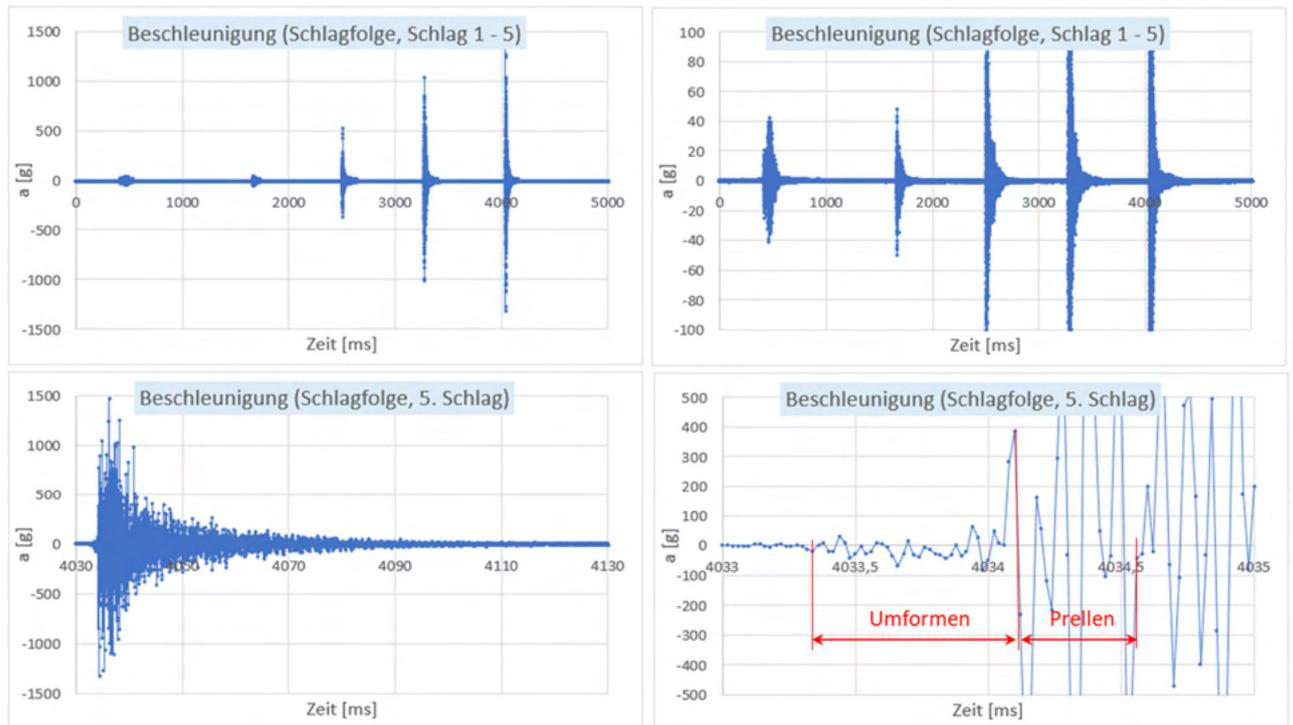


Sensorposition 3: Gestell oben



Sensorposition 4: Schabotte

**Bild 36:** Messergebnisse Beschleunigung  
Beschleunigungssensor: PCB M350B23



**Bild 37:** Messergebnisse Beschleunigung  
 Beschleunigungssensor: PCB M350B23, Position: Schabotte

Eine Übersicht der minimalen und maximalen Beschleunigungswerte in Abhängigkeit der Schlagfolge und der Sensorposition ist in **Bild 38** aufgeführt. Zur Bewertung und Vergleichbarkeit der Intensität der Prellschläge werden auch hier die Ergebnisse des 4. und 5. Schlags auf den 3. Schlag (kein Prellschlag) normiert beziehungsweise das Verhältnis der Beschleunigung von 4. und 5. Schlag zueinander bestimmt. In der normierten Darstellung zeigt sich, dass auch eine Sensorposition mit geringen Absolutwerten der Beschleunigung, wie z. B. die Position „Gestell unten“ ein Erkennen der Prellschläge (Schlag 4 und 5) ermöglicht. Bei dem Verhältnis der Beschleunigung 5. zu 4. Schlag sind in Abhängigkeit der Sensorposition gegensprüchliche Ergebnisse sichtbar. Bei den gesenknahe Positionen (Schabotte, Gestell neben Schabotte) werden Verhältnisse auch deutlich größer 1,0 erzielt, was bedeutet, dass der 5. Schlag höhere Beschleunigungen aufweist als der 4. Schlag. Bei den gesenkfernen Positionen (Gestell oben/unten) liegen die meisten Verhältniswerte unterhalb 1,0 beziehungsweise weichen nur geringfügig von 1,0 ab. Hier ist die Aussage zur Intensität der Prellschläge fragwürdig.



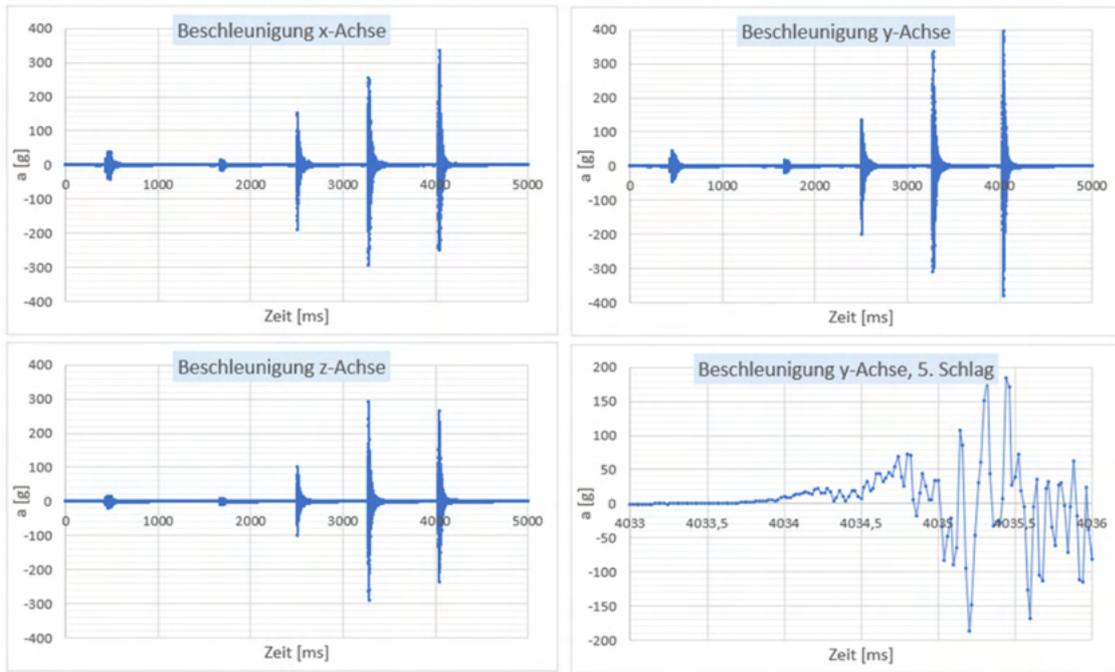
**Bild 38:** Messergebnisse Beschleunigung

Position Beschleunigungssensor: V-Sx: Schabotte; V-GSx: Gestell neben Schabotte;

V-Gox: Gestell oben; V-Gux: Gestell unten

Beschleunigungssensor: PCB M350B23

Die Messergebnisse mit dem triaxialen Sensor PCB 356A01 (**Bild 39**) zeigen die erhöhte Empfindlichkeit des Sensors gegenüber dem einaxialen Sensor PCB M350B23. Obwohl der Sensor gesenkfern am „Gestell, unten, seitlich“ appliziert war sind alle Schläge einer Schlagfolge sichtbar und die Prellschläge identifizierbar. Diese Ergebnisse werden durch weitere Auswertung und Normierung der Messwerte (entsprechend der Auswertung mit dem einaxialen Sensor) bestätigt (**Bild 40**). Die Ergebnisse zur Intensität der Prellschläge durch das Verhältnis der Messwerte von Schlag 5 und 4 sind in Abhängigkeit der 3 Messachsen uneinheitlich und fragwürdig.



**Bild 39:** Messergebnisse Beschleunigung  
Beschleunigungssensor: Triaxialen Sensor PCB 356A01, Position: Gestell unten, seitlich

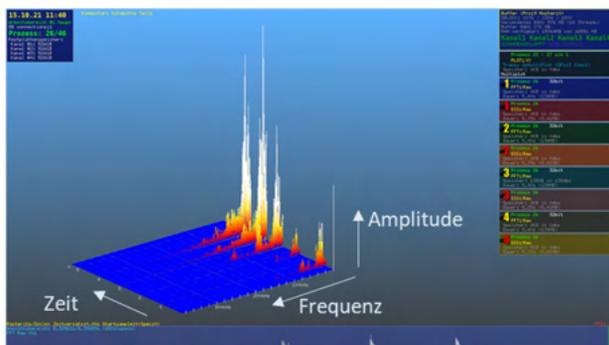


**Bild 40:** Messergebnisse Beschleunigung  
Beschleunigungssensor: Triaxialen Sensor PCB 356A01, Position: Gestell unten, seitlich

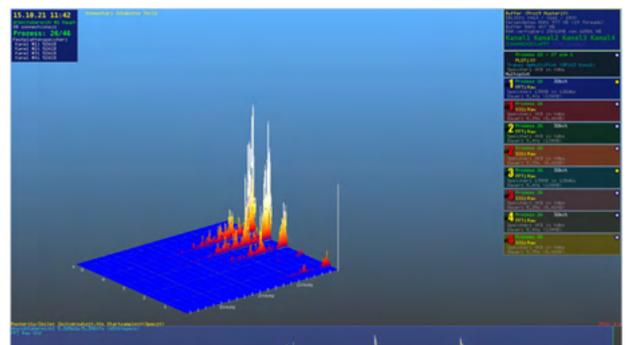
Die **Körperschallmessungen** während der Umformung wurden parallel zu den Beschleunigungsmessungen mit dem einaxialen Sensor an 4 unterschiedlichen Positionen der Umformanlage durchgeführt. Der Einsatz von gleichzeitig 4 Körperschallsensoren ermöglichte eine parallele Messung an den 4 Positionen. Die Messergebnisse (**Bild 41**) ermöglichen, unabhängig von der Sensorposition, die Identifizierung der 5 Schläge einer Schlagfolge.

In Abänderung zu den Laboruntersuchungen konnte die Auswertung der Körperschallsignale durch ein Auswerteprogramm der Fa. QASS optimiert werden. Der quantitative Vergleich der Messergebnisse wird durch die „**Signalenergie**“ ermöglicht (**Bild 42**). Die Signalenergie ist die Energie innerhalb eines Rechteckfensters (in Zeit und Frequenz), das sukzessive in der Zeit weiterverschoben wird. Hierbei kann der betrachtete Zeit- und Frequenzbereich in Abhängigkeit der Anforderungen gewählt werden. Die Signalenergie entspricht prinzipiell dem in den Laborversuchen eingeführten „Schallvolumen“.

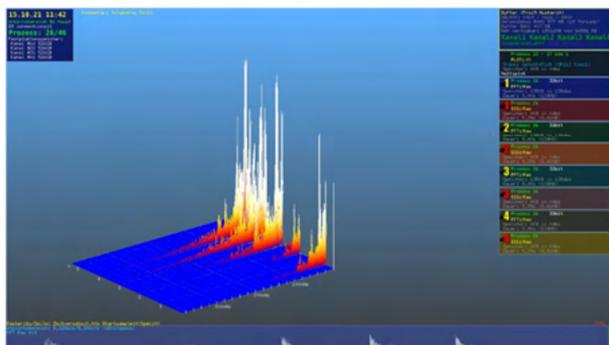
Durch die Signalenergie steht als Ergebnis für die Intensität eines Prellschlags ein Messwert zur Verfügung, der den quantitativen Vergleich von Ergebnissen ermöglicht, beziehungsweise als Regelgröße für eine Prozesssteuerung genutzt werden könnte.



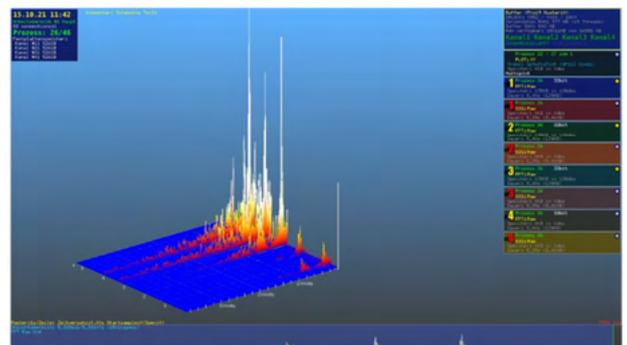
Sensorposition 1: Gestell unten (Keller)



Sensorposition 2: Gestell neben Schabotte

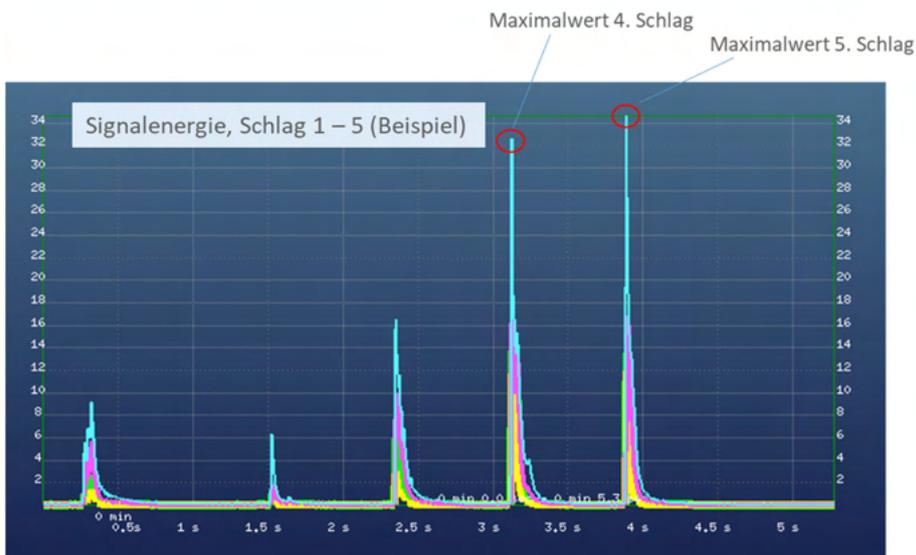


Sensorposition 3: Gestell oben



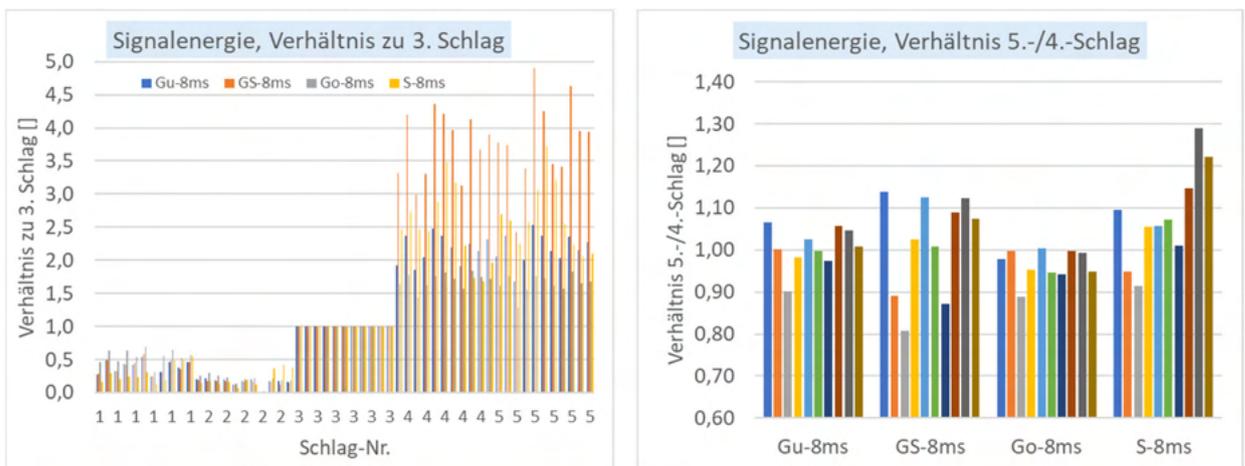
Sensorposition 4: Schabotte

**Bild 41:** Messergebnisse Körperschall (jeweils für eine Schlagfolge)



**Bild 42:** Signalenergie für eine Schlagfolge

Die auf den 3. Schlag normierten Ergebnisse der Signalenergie (**Bild 43**) zeigen, dass die Prellschläge an allen Sensorpositionen identifizierbar sind, die besten Resultate werden mit der Position „Gestell neben Schabotte“ erzielt, die schlechtesten mit der Position „Gestell oben“. Die Ergebnisse zur Intensität der Prellschläge durch das Verhältnis der Messwerte von Schlag 5 und 4 werden bei keiner Sensorposition eindeutig dargestellt.



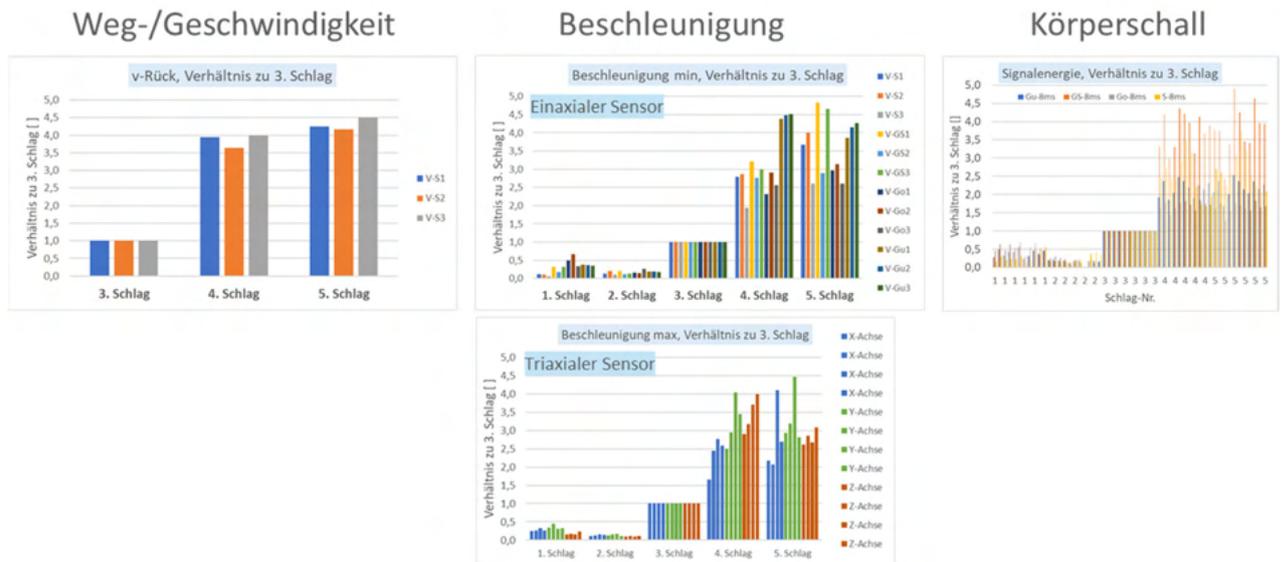
**Bild 43:** Ergebnisse Körperschallmessung (10-fach Belegung)

Position Körperschallsensor: S: Schabotte; GS: Gestell neben Schabotte; Go: Gestell oben; Gu: Gestell unten  
 Parameter der Signalenergie: Zeit: 8ms, Frequenz: Alle

## Zusammenfassung – Prellschlag erkennen

Alle 3 Messverfahren ermöglichen eine eindeutige Identifikation von Prellschlägen (**Bild 44**). Bei den Beschleunigungs- und Körperschallmesswerten sind die Ergebnisse signifikant von der Position des Sensors abhängig.

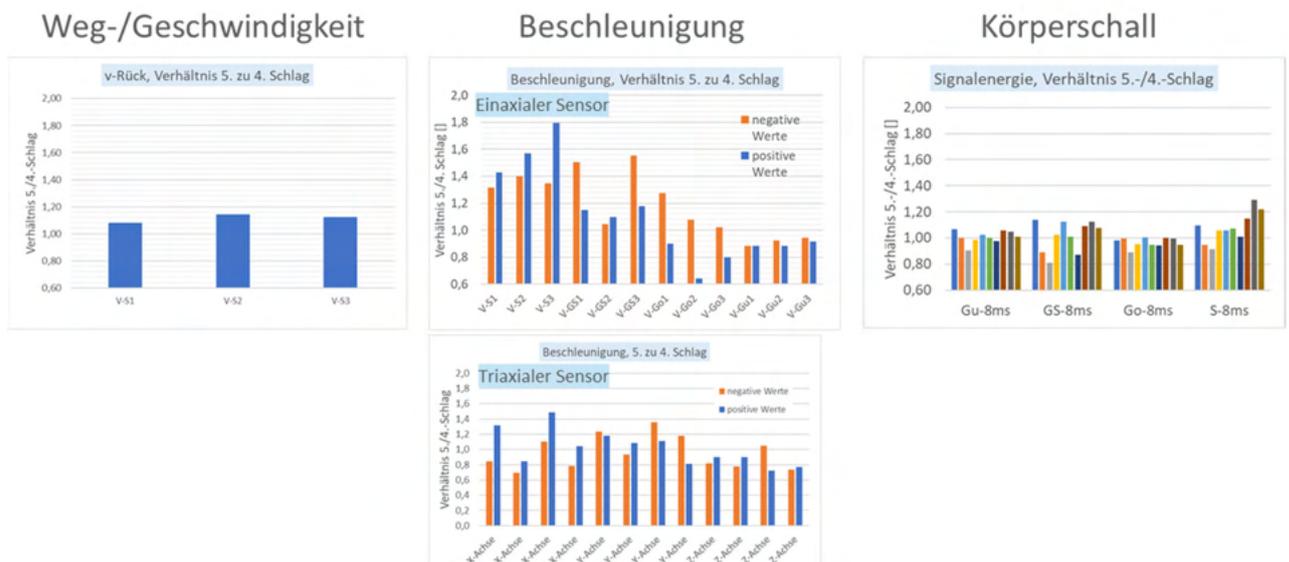
Die Aussagekraft der 3 Messverfahren ist sehr ähnlich, wenn nur die jeweils „besten“ Sensorpositionen betrachtet werden.



**Bild 44:** Übersicht der Ergebnisse zur Problematik „Prellschlag erkennen“

## Zusammenfassung – Intensität von Prellschlägen erkennen

Der 5. Schlag weist eine höhere Prellschlaggeschwindigkeit/-energie auf als der 4. Schlag. Die Intensitätsunterschiede zwischen dem 5. und dem 4. Schlag werden von dem Messverfahren Beschleunigung (einaxial) mit der Sensorposition „Schabotte“ am besten erfasst (**Bild 45**). Die beiden anderen Messverfahren sind für die Erfassung der Prellschlagintensität nach bisherigem Untersuchungsstand weniger geeignet.



**Bild 45:** Übersicht der Ergebnisse zur Problematik „Prellschlag erkennen“

**Die bisher dargestellten Ergebnisse beruhen auf den ersten Messungen im Serienbetrieb und wurden durch eine zweite Untersuchung bestätigt. Bei einer dritten Untersuchung, die an der gleichen Fertigungsanlage aber mit einem deutlich schwereren Bauteil durchgeführt wurde, wurden deutlich abweichende Ergebnisse festgestellt.**

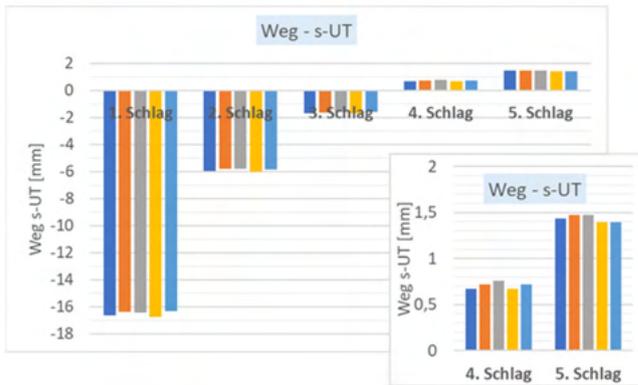
Bei der Untersuchung des „schweren Bauteils“ ( $m = 2.150\text{g}$ ) wurden gegenüber den Ergebnissen mit dem „leichten Bauteil“ ( $m = 1.514\text{g}$ ) folgende signifikante Unterschiede im 4. und 5. Schlag festgestellt (**Bild 46**):

- 4. Schlag
  - Der erreichte untere Totpunkt (Weg – s-UT) liegt bei dem „schweren Bauteil“ bei ca.  $-1,2\text{mm}$ . Damit würden die Prellschlagflächen von Ober- und Untergesenk nicht aufeinandertreffen.
  - Die maximalen Beschleunigungswerte bei dem „schweren Bauteil“ betragen an der Sensorposition „Schabotte“  $2.500 - 3.000\text{g}$  und sind damit um den Faktor 3 (ca.) größer als bei dem „leichten Bauteil“
  - Die Rücksprunggeschwindigkeit ist bei dem „schweren Bauteil“ geringer als bei dem „leichten Bauteil“. Dies ist ein Hinweis darauf, dass weniger Energie in der elastischen Verformung des Gesenkes gespeichert wurde.
- 5. Schlag
  - Die Messwerte für den unteren Totpunkt (Weg – s-UT), die Beschleunigung und die Rücksprunggeschwindigkeit sind bei dem „schweren Bauteil“ alle geringer als bei dem „leichten Bauteil“. Diese Kombination der Messwerte ist durch einen relativ leichten Prellschlag erklärbar.

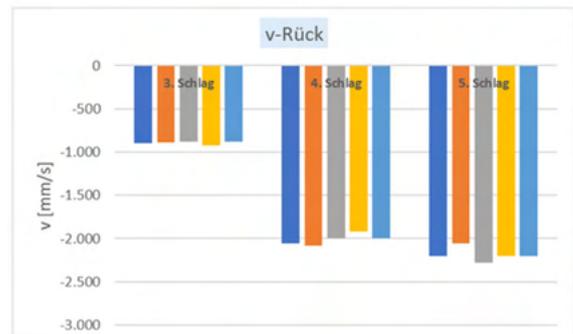
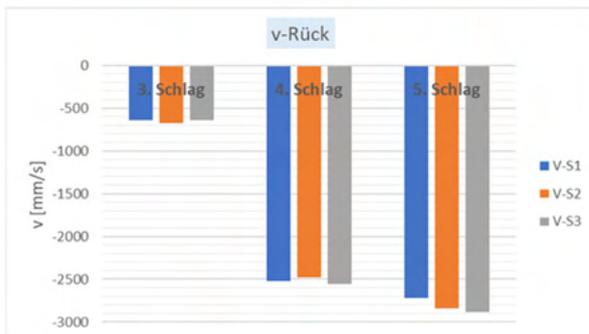
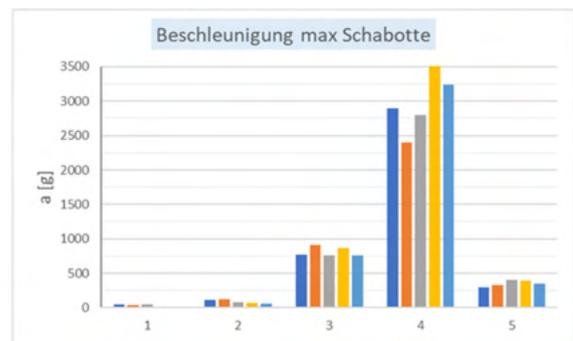
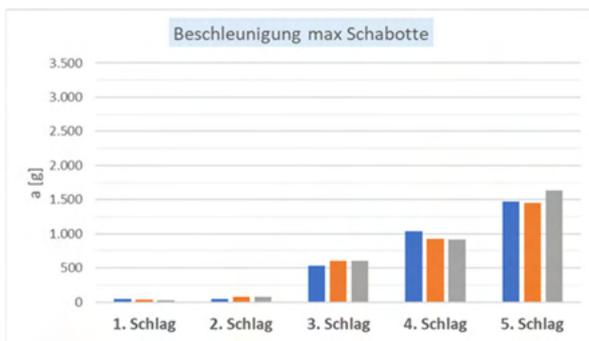
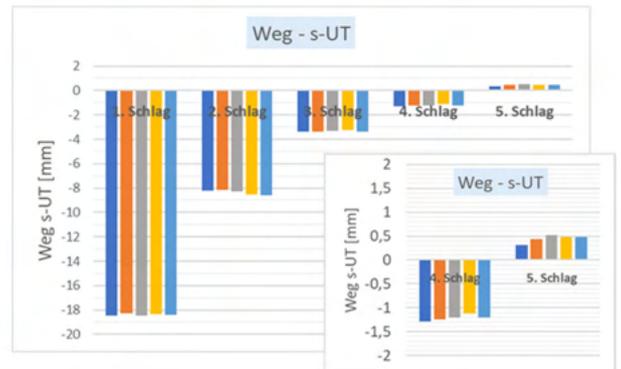
Aus diesen Ergebnissen stellt sich folgende, elementare Frage:

- **Ist der 4. Schlag ein Prellschlag?**
  - Argumente die für einen Prellschlag sprechen:
    - Sehr hohe Beschleunigungswerte (Schabotte)
  - Argumente die gegen einen Prellschlag sprechen:
    - Weg s-UT  $< 0$
    - v-Rück relativ gering
    - (Beschleunigungswerte des 3. Schlags sind auch relativ hoch)
  - Mögliche Ursachen für die Messergebnisse im 4. Schlag:
    - Aufschlagen der Gesenke durch Kippen des Bärs?  
Kann auf Grundlage des jetzigen Kenntnisstands nicht ausgeschlossen werden.
    - Messfehler?  
Messfehler sind aufgrund der Vielfachbelegung der Untersuchungen und der Ergebnisse von Schlag 1., 2., 3., und 5. unwahrscheinlich. Weiterhin sind die Ergebnisse mit definierter Variation der Energie-/Bärgeschwindigkeit (siehe unten) des 5. Schlags plausibel und deuten nicht auf Messungenauigkeiten oder -fehler hin.
    - Umformkraft extrem hoch?  
Diese Ursache scheint zur Zeit am plausibelsten, da zum Beispiel auch der 3. Schlag relativ hohe Beschleunigungswerte aufweist.

### „leichtes Bauteil“



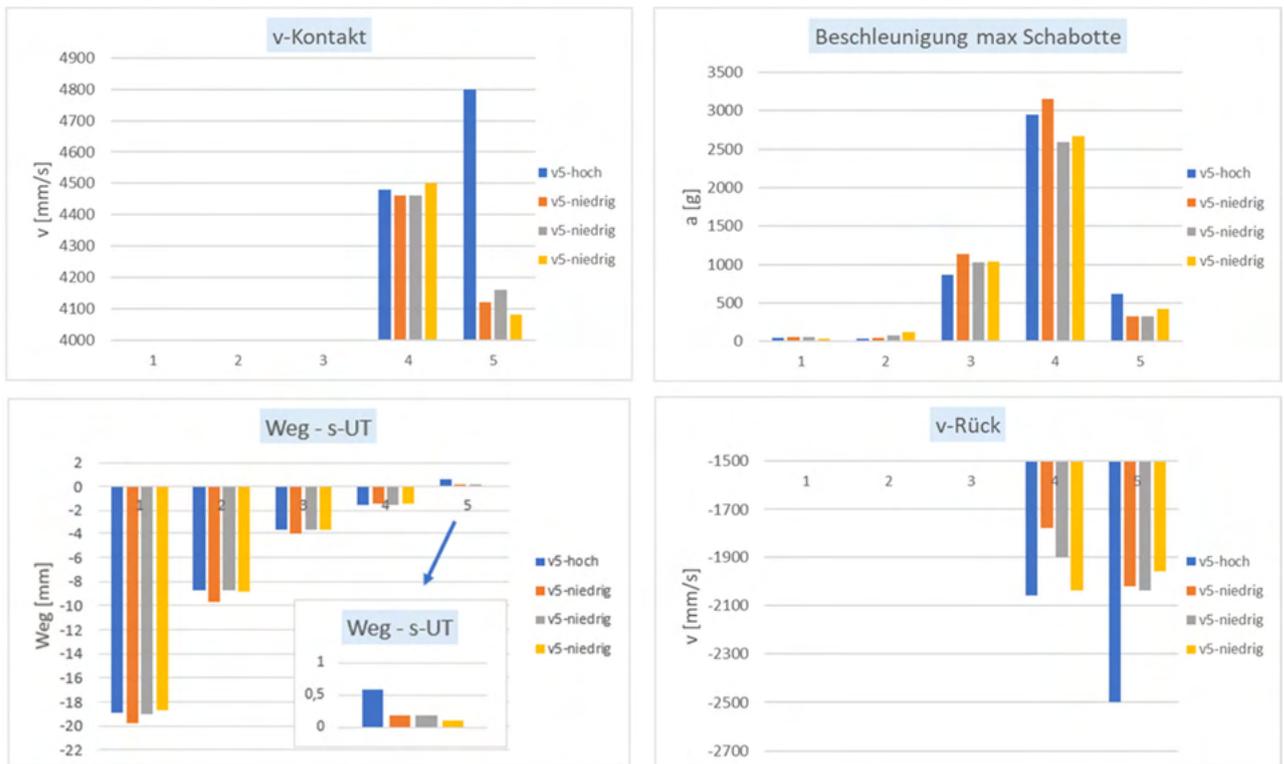
### „schweres Bauteil“



**Bild 46:** Gegenüberstellung der Ergebnisse für „leichtes Bauteil“ und „schweres Bauteil“

Im Rahmen der Untersuchung mit dem schweren Bauteil wurde die Bärsgeschwindigkeit im 5. Schlag definiert variiert. Hierbei werden die Erkenntnisse aus den ersten beiden Untersuchungen bestätigt (**Bild 47**):

Mit steigender Bärsgeschwindigkeit steigen die Messwerte für Beschleunigung, unteren Totpunkt (Weg – s-UT) und die Rücksprunggeschwindigkeit, das bedeutet, dass die höhere Geschwindigkeit einen „stärkeren“ Prellschlag zur Folge hat.



**Bild 47:** Ergebnisse „schweres Bauteil“ bei Variation der Bärge­schwindigkeit/-Energie im 5. Schlag

**Wesentliche Erkenntnis aus der Untersuchung mit dem „schweren Bauteil“:**

**Die Höhe der Beschleunigungswerte ist eventuell kein zuverlässiges Erkennungsmerkmal für Prellschläge!**

Damit würde das Messverfahren entfallen, welches nach bisherigem Erkenntnisstand die besten Ergebnisse für die Messung der Prellschlagintensität darstellt. **Ohne zuverlässige und genaue Messung der Prellschlagintensität ist keine Regelung des Umformprozesses bezüglich Prellschlagenergie möglich!**

Im weiteren Vorgehen des Vorhabens war geplant ergänzende Untersuchungen mit schweren Bauteilen durchzuführen. Diese Untersuchungen konnten aus verschiedenen Gründen (COVID-19-Pandemie, Bauteilabrufe, Produktionsplanung, Laufzeitende des Vorhabens) **nicht durchgeführt werden.**

**Die offenen Fragestellungen können daher im Rahmen dieses Projektes nicht geklärt werden.**

### 3.4 Technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung

**Technische Bewertung**

Die eingesetzten Sensoren für alle Messgrößen (Weg, Beschleunigung, Körperschall) zeigten über den gesamten Einsatzzeitraum, sowohl im Labor- als auch in den Betriebsuntersuchungen keine Ausfallerscheinungen. Aussagen zur Langzeitstabilität können nur für die Wegmessung getroffen werden, da das eingesetzte System auch im Betriebsbereich seit vielen Jahren dauerhaft in Verwendung ist.

Das Messsystem für die hochdynamische Erfassung und Analyse der Messgrößen erwies sich auch im rauen Umfeld der Betriebsuntersuchungen als geeignet.

Die Übertragbarkeit, der in den ersten Betriebsuntersuchungen ermittelten Ergebnisse, auf andere Produktgruppen konnte, wie unter AP 3.3 beschrieben, nicht untersucht werden. Die Umsetzung der erzielten Erkenntnisse auf andere Aggregattypen, wie Gegenschlaghammer und Spindelpresse erscheint realistisch.

#### Wirtschaftliche und ökologische Bewertung

Eine wirtschaftliche Bewertung ist zum Abschluss des Vorhabens nicht möglich, da die hierzu notwendigen Untersuchungen nicht fertiggestellt werden konnten. So ist zum Beispiel noch nicht endgültig geklärt, welche Sensoren zwingend notwendig sind. Die Art der Sensoren und die hierzu jeweils notwendige Hard- und Software für die Messdatenerfassung und -auswertung haben nicht nur einen erheblichen Einfluss auf die notwendigen Investitionskosten, sondern auch in Abhängigkeit der Sensorapplikation auf die laufenden Betriebskosten (z. B. Zusatzaufwand beim Rüsten der Werkzeuge). Eine aus den Ergebnissen der Betriebsuntersuchungen neue Erkenntnis ist die Aussagekraft der Rücksprunggeschwindigkeit. Die Rücksprunggeschwindigkeit ermöglichte bei der ersten Bauteilgruppe die eindeutige Identifizierung von Prellschlägen und kann mit der an der Anlage befindlichen Sensorik für die Wegmessung gemessen werden.

Die ökologische Bewertung erfolgt durch die Abschätzung des zu erwartenden Einsparpotentials an Primärenergie als Folge verminderter Prellschlagenergie am Beispiel einer Referenzanlage eines Projektpartners.

Bei dieser Abschätzung (**Bild 48**) wurde von folgenden, mit dem Anlagenbetreiber besprochenen realitätsnahen Annahmen ausgegangen:

- Reduzierung der Schlagenergie bei Prellschlägen um 25%, infolge der Regelung der Prellschlagintensität.
- Steigerung der Werkzeugstandmenge um 10%, infolge geringerer Werkzeugbelastung.
- Reduzierung des Ausschusses um 0,2%, infolge verminderter Dickentoleranzstreuung.

	Einsparpotential an Primärenergie [kWh/a]	Bemerkungen
25% Reduzierung der Prellschlagenergie	76.308	
10% Steigerung der Werkzeugstandmenge	9.624	
1% Ausschussreduzierung	28.800	für Materialherstellung und Erwärmung auf Schmiedetemperatur
<b>Gesamt</b>	<b>114.733</b>	

**Bild 48:** Zu erwartende Primärenergieeinsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie für eine Referenzanlage (Basis: 3-Schichtsystem, automatische Anlage, 2 Umformstufen, 2 Prellschläge je Schlagfolge)

In Deutschland sind ca. 185 hydraulische Oberdruckhämmer installiert (Abschätzung der Fa. Lasco Umformtechnik, 2013). Unter der Voraussetzung, dass bei 1/3 dieser Anlagen und Produkte die Annahmen der Referenzanlage zutreffen, ergibt sich ein theoretisches Gesamtpotential für die Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung entsprechend **Bild 49:**

	Einsparpotential an Primärenergie [kWh/a]	CO2 Einsparung [to/a]	Bemerkungen
25% Prellschlagenergie	4.705.669	935	
10% Steigerung der Werkzeugstandmenge	593.502	118	
1% Ausschussreduzierung	1.776.000	353	für Materialherstellung und Erwärmung auf Schmiedetemperatur
<b>Gesamt</b>	<b>7.075.171</b>	<b>1.406</b>	

**Bild 49:** Zu erwartende gesamte Primärenergie und CO2--Einsparung durch Reduzierung der Prellschlagenergie

Gegenschlaghämmer wurden bei dieser Betrachtung noch nicht berücksichtigt. Die Menge dieser Aggregate ist zwar deutlich niedriger, aber das Einsparpotential ist aufgrund des deutlich höheren Arbeitsvermögens nicht vernachlässigbar.

### 3.5 Verallgemeinerung und Übertragung

Die Entwicklungen im Rahmen des Vorhabens erfolgten, mit Ausnahme der Laboruntersuchungen, an einem hydraulische Oberdruckhammer und vorwiegend an einer Produktgruppe. Eine Verallgemeinerung und Übertragung auf andere Produktgruppen konnte nicht abschließend durchgeführt werden.

Die Umsetzung der erzielten Erkenntnisse auf andere Aggregattypen, wie Gegenschlaghammer und Spindelpresse erscheint realistisch. Alle im Betriebsversuch eingesetzten Sensoren erwiesen sich im Rahmen der Untersuchungen als sehr robust und konnten ohne großen maschinellen Aufwand appliziert werden. Ein Nachrüsten anderer Anlagen erscheint daher mit vertretbarem Aufwand realistisch. Eine Ausnahme bildet die Wegmessung, da hierzu normalerweise eine definierte Nut im Bären für die Befestigung des Magnetstreifens notwendig ist.

## 4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Bereits während der Projektlaufzeit erfolgte die Verbreitung von Zwischenergebnissen in nachfolgender Weise:

- Präsentation der Ergebnisse in der IMU-Faktendatenbank, wo sich die Unternehmen der Branche via Internet informieren können
- Jahrestagung „Massivumformung“ des IMU, Juni/2019

In 2023 ist die Verbreitung der Vorhabensergebnisse in nachfolgender Weise vorgesehen:

- Fachaufsatz in der Zeitschrift massivUMFORMUNG

## 5 Fazit

Ziel des Projektes ist die Entwicklung und modellhafte Validierung eines Steuerungskonzeptes für Hammeranlagen, mit dem durch Messung, Auswertung und Musterinterpretation der Signale für Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Körperschall des Maschinen- und Werkzeugsystems auf die aktuell benötigte Umformenergie eines jeweiligen Umformteils zurückgeschlossen und die Anlage damit so ausgeregelt wird, dass der Prellschlag deutlich reduziert, im Grenzfall gänzlich vermieden wird. Durch die damit erreichbare Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung wird ein erheblicher Beitrag zur Umweltentlastung geleistet.

Das auf Basis der Mehrkörpersimulation erstellte rechnerinterne Ersatzsystem weist Potentiale zur Lösung der beschriebenen Problemstellungen auf. Die Komplexität des Gesamtsystems erfordert jedoch noch umfangreiche, weiterführende Untersuchungen und software-technische Anpassungen/Erweiterungen des Ersatzsystems. Der hierzu notwendige Aufwand würde nach derzeitigem Erkenntnisstand ein eigenständiges Projekt erfordern und ist im Rahmen dieses Vorhabens als einzelner Arbeitspunkt nicht zu leisten.

Die Erstellung eines rechnerinternen Ersatzsystems, das zur Lösungsfindung der Zielstellungen des Projektes eingesetzt werden kann, konnte nicht realisiert werden.

In praxisrelevanten Laboruntersuchungen und Betriebsanwendungen wurden für die Identifikation von Prellschlägen 3 geeignete Verfahren und die dazu erforderlichen Sensoren ermittelt. Die Identifikation der Prellschläge ist über eine Auswertung der Weg-/Geschwindigkeitssignale des Bären und/oder über Messwerte aus Beschleunigungs- oder Körperschallsensoren möglich. Die Empfindlichkeit der Beschleunigungs- und Körperschallmessung ist hierbei wesentlich von der Position der Sensoren an den verschiedenen Elementen des Hammeraggregats abhängig.

Die für eine Regelung des Hammersystems notwendige Erfassung der Intensität der Prellschläge werden von dem Messverfahren Beschleunigung (einaxial) mit der Sensorposition „Schabotte“ am besten erfasst. Die beiden anderen Messverfahren sind für die Erfassung der Prellschlagintensität nach bisherigem Untersuchungsstand weniger geeignet.

Die Untersuchung einer zweiten Bauteilgruppe mit deutlich schwererem Bauteil führte zu deutlich abweichenden Ergebnissen. Die Höhe der Beschleunigungswerte ist eventuell kein zuverlässiges Erkennungsmerkmal für Prellschläge! Damit würde das Messverfahren entfallen, welches nach bisherigem Erkenntnisstand die besten Ergebnisse für die Messung der Prellschlagintensität darstellt. Ohne zuverlässige und genaue Messung der Prellschlagintensität ist keine Regelung des Umformprozesses bezüglich Prellschlagenergie möglich! Im weiteren Vorgehen des Vorhabens war geplant ergänzende Untersuchungen mit schweren Bauteilen durchzuführen. Diese Untersuchungen konnten aus verschiedenen Gründen (COVID-19-Pandemie, Bauteilabrufe, Produktionsplanung, Laufzeitende des Vorhabens) nicht durchgeführt werden.

Die offenen Fragestellungen konnten daher im Rahmen dieses Vorhabens nicht geklärt werden.

### Wissenszuwachs:

Durch den Einsatz modernster Messtechnik und Sensorik konnte der hochdynamische Vorgang des Prellschlags im Detail dargestellt und untersucht werden. Hierbei wurde zum Beispiel deutlich, dass die Zeitdauer des Prellschlags ca. 0,5 Millisekunden dauert. Diese kurzen Zeiträume erfordern eine hochfrequente Erfassung der Messsignale.

Eine intelligente Auswertung der Weg-/Geschwindigkeitsmessung des Bären ermöglicht Rückschlüsse auf das Prellschlag- und Prozessverhalten. Die Ausnutzung dieser Informationen hat den Vorteil, dass die Wegmessung an modernen Hammeranlagen bereits installiert und seit vielen Jahren erprobt ist.

Weiterführende Untersuchungen:

Der Aufbau eines rechnerinternen Ersatzsystems konnte nicht erfolgreich realisiert werden. Hier sind weiterführende Entwicklungsarbeiten notwendig.

Die Untersuchungen zur Prellschlagintensität und der Einfluss unterschiedlicher Bauteilgruppen konnten nicht abschließend durchgeführt werden. Auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse sind weitere Untersuchungen notwendig, welche dann die Grundlage für eine Regelung des Umformprozesses bilden.

## **6 Literatur-/Quellenverzeichnis**

- /Hep19/ Präsentation „Anwendung von SimulationX im Bereich der Umformtechnik“  
Jan Hepke, 15.03.2019
- /big19/ Website: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-simulink-a-790857/>  
Stand: 20.03.2019
- /msc19/ Website: <https://www.mscsoftware.com/de/product/adams>  
Stand: 20.03.2019