



© Putzmeister Engineering

Konstantflusspumpe für Frischbeton

Heutzutage sind auf nahezu jeder Baustelle mobile Frischbetonpumpen anzutreffen. Sie weisen alle eine charakteristische Gemeinsamkeit auf: eine Förderlücke. Der diskontinuierliche Förderstrom der Frischbetonpumpen wirkt sich negativ auf verschiedene Aspekte des Einsatzes aus. Zur Lösung dieses Problems hat das Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie in Kooperation mit Putzmeister Engineering ein neuartiges Konzept einer mobilen Frischbetonpumpe mit konstantem Förderverhalten entwickelt.

MOTIVATION

Bei mobilen Betonpumpen werden mit verschiedenen Bauarten Förderhöhen von bis zu 606 m Höhe [1], Förderdrücke von 220 bar [2] und Förderströme von 200 m³/h [3] erreicht. Die auf dem Markt

seit Jahrzehnten etablierten Betonpumpen arbeiten alle mit ähnlichen Prinzipien und weisen charakteristische Vor- und Nachteile auf. Ein Nachteil, den alle gemeinsam haben, ist eine prinzipbedingte Förderlücke, die sich negativ auf Bedienqualität, Maschinen-

AUTOREN



Felix Weber, M. Sc.

ist im Bereich Advance Development bei der Putzmeister Engineering GmbH in Aichtal tätig sowie externer Doktorand am Teilinstitut für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Karlsruhe.



Tobias Panitz, M. Sc.

ist ehemaliger Masterand am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und hat seine Arbeit mit Unterstützung der Putzmeister Engineering GmbH in Aichtal durchgeführt.



Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

ist Institutsleiter des Teilinstituts für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Karlsruhe.

belastung und Maschinenwirkungsgrad auswirkt. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass es im Bereich der Konstantflusspumpen für partikelbeladene Dickstoffe eine Vielzahl an Forschungsprojekten und Patenten gibt. Allerdings hat aus verschiedenen Gründen keine dieser Pumpen bisher die Marktreife erreicht.

STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG

Die am Markt vorherrschenden Pumpentypen sind Rotor- und Kolbenpumpen. Kolbenpumpen besitzen zwei Förderkolben, mit denen periodisch Frischbeton gefördert wird. Mithilfe eines Frischbetonventils werden zyklisch wechselnd der ausstoßende Zylinder mit der Förderleitung und der ansaugende mit einem Reservoir verbunden. Rotorpumpen arbeiten nach einem der Peristaltik nachempfundenen Prinzip. Ein Pumpenschlauch, der mit Frischbeton gefüllt ist, wird an einer Stelle durch eine Rolle zusammengedrückt und die Abquetschstelle fortbewegt.

Beide Förderprinzipien haben gemein, dass sie prinzipbedingt eine Förderlücke aufweisen. Bei der Kolbenpumpe kann während der Umschaltphase des Frischbetonventils kein Frischbeton in die Förderleitung ausgeschoben werden, was zu einer Förderlücke und somit zu einem Förderdruckeinbruch führt, **BILD 1**.

Die Volumenstromschwankungen und die daraus resultierenden Druckeinbrüche der Rotorpumpe sind auf zwei konstruktive Besonderheiten zurückzuführen. Zum einen wird durch das Ausheben der Abdrückrolle am Ende des Pumpenschlauchs ein Volumen im Pumpenschlauch freigegeben, das erst gefüllt werden muss und somit zu einer Volumenstromschwankung führt. Zum anderen verfügen die Rotorpumpen über einen Umschlingungswinkel von $< 180^\circ$, um Druckspitzen in dem sonst abgeschlossenen Schlauchsegment zu vermeiden. Dies führt dazu, dass es eine Rotorstellung gibt, in der Material zurückströmen kann, **BILD 1**. Das Ausmaß der Schwankungen des Förderdrucks wird als Fördergüte bezeichnet und durch zwei Kennzahlen dargestellt. Hierbei ist α_{max} als Verhältnis von maximalem zu eingeschwungenem und α_{min} als Verhältnis von minimalem zu eingeschwungenem Förderdruck definiert. Bei einer konventionellen Kolbenpumpe sowie einer Rotorpumpe ergeben sich Fördergüten, die stark von eins abweichen und im Extremfall Werte von $\alpha_{max} = 1,5$ und $\alpha_{min} = 0$ annehmen können.

Zu den genannten Forschungsprojekten zählt beispielsweise eine Konstantflusspumpe mit Kolbenpumpen, die nach dem Förder-Überbrücker-Prinzip arbeitet [4, 5]. Die Pumpe besitzt zwei Förderzylinder, mit denen sie einen pulsieren-

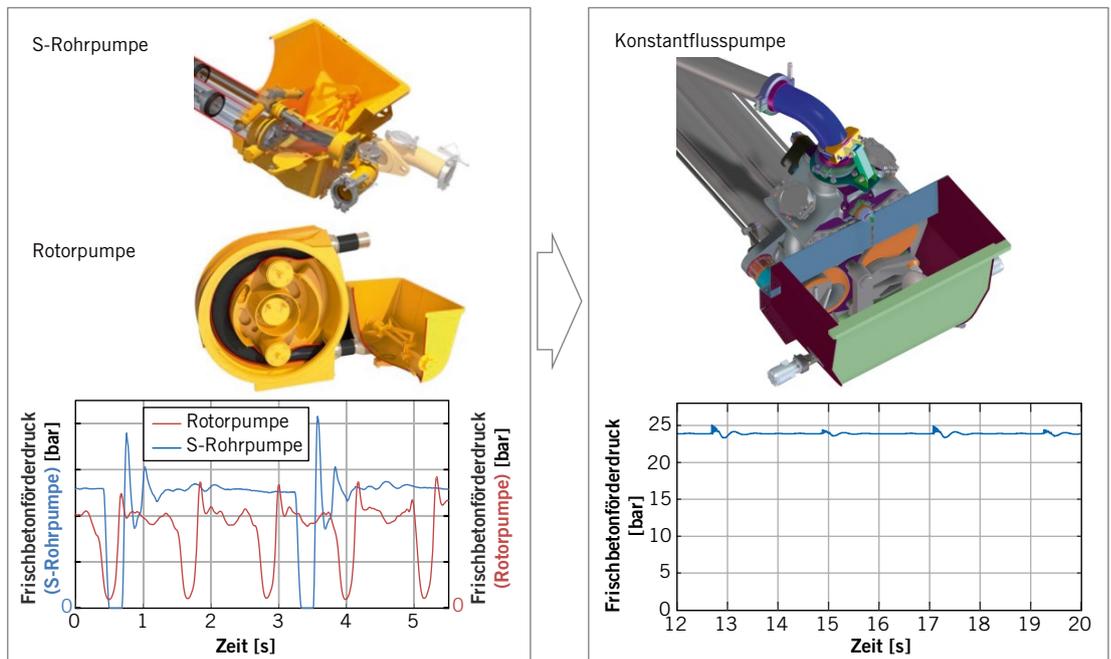


BILD 1 Verlauf des Frischbetonförderdrucks einer S-Rohrpumpe (links), einer Rotorpumpe (links) und der Konstantflusspumpe (rechts) (© Mobima | Putzmeister Engineering)

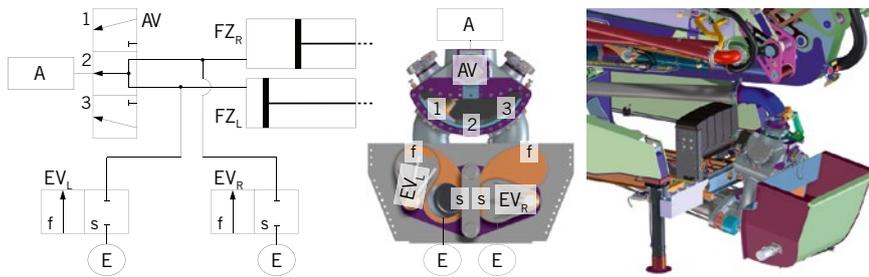


BILD 2 Darstellung des Pumpensystems einer Konstantflusspumpe für Frischbeton in hydraulischer Schreibweise (links); CAD-Konstruktion der Konstantflusspumpe ohne Trichter (Mitte); CAD-Konstruktion der Konstantflusspumpe und einer herkömmlichen Autobetonpumpe (rechts) © Mobima | Putzmeister Engineering

geschwindigkeit wirkt sich außer auf den Maschinenwirkungsgrad auch noch auf die Maschinenbelastung aus. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der höheren maximalen Strömungsgeschwindigkeit und der daraus folgenden höheren Randschichtgeschwindigkeiten der abrasive Verschleiß der Förderrohre und besonders der Rohrbögen zunimmt. Darüber hinaus führt die Druckpulsation zu einer Schwellbeanspruchung diverser Bauteile, wodurch diese stärker belastet werden. Diese Belastung wird weiter verstärkt, wenn Eigenfrequenzen etwa des Verteilermastes angeregt werden.

Neben der Maschinenbelastung hat das pulsierende Förderverhalten auch Auswirkungen auf die Bedienqualität. Durch die diskontinuierliche Förderung wird sowohl bei Spritz- als auch bei Ortbetonanwendungen (Ortbeton ist Beton, der auf der Baustelle mithilfe von Schalungen an dessen endgültigem Einsatzort im Bauwerk eingebracht wird [6]) die Verarbeitung erschwert. Bei Spritzbetonanwendungen müsste chemischer Beschleuniger dem Frischbetonstrom so zudosiert werden, damit sich trotz des pulsierenden Stroms ein konstantes Mischungsverhältnis ergibt. Das diskontinuierliche Förderverhalten führt des Weiteren bei Ortbetonanwendungen zu einem Schwingen des Endschlauchs, was dessen Führung erschwert. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch einen kontinuierlichen Förderstrom die Maschinenbelastung verringert, die Bedienqualität verbessert und der Maschinenwirkungsgrad erhöht werden kann.

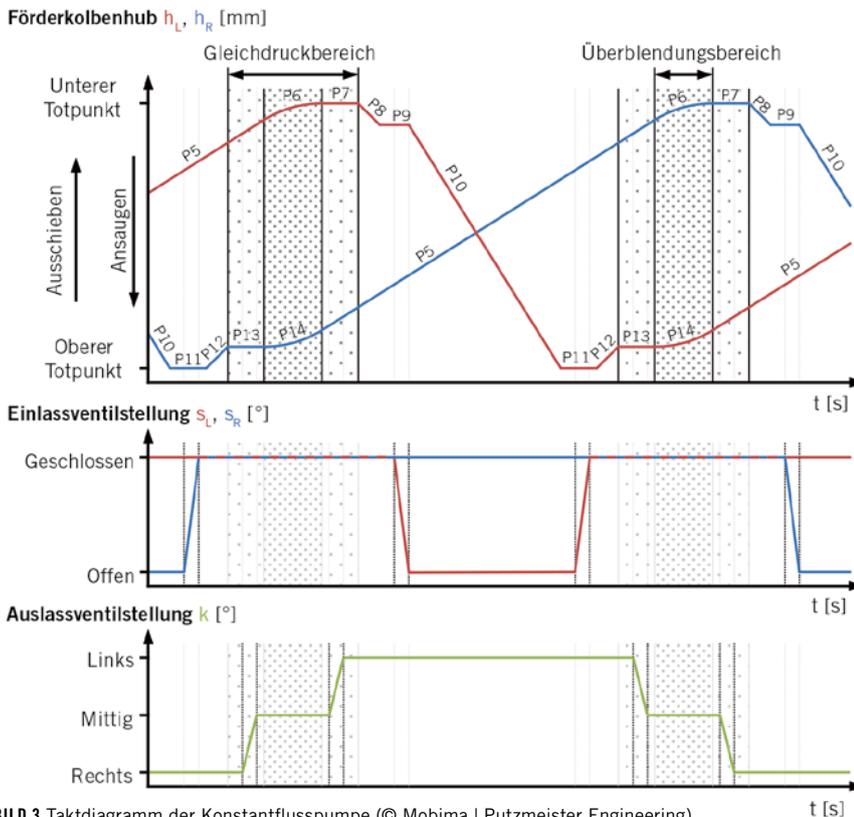


BILD 3 Taktdiagramm der Konstantflusspumpe © Mobima | Putzmeister Engineering

den Mediumstrom fördert. Mit einem weiteren Förderzylinder (beziehungsweise Überbrückerzylinder) wird die Förderlücke überbrückt. Der Überbrückerzylinder nimmt zyklisch Material vom Förderstrom der Förderzylinder auf und gibt dieses zu einem späteren Zeitpunkt wieder ab, sodass sich ein kontinuierlicher Förderstrom ergibt. Problematisch bei diesem Ansatz ist der technische Aufwand in Form eines weiteren Zylinders sowie dessen Hydraulik und ein schwer zu dichtendes Drehklappenventil. Aus Kosten-, Gewichts- und Bauraumgründen wird für dieses

Projekt eine Lösung mit nur zwei Förderzylindern angestrebt.

NACHTEILE EINER PULSIERENDEN FÖRDERUNG

Die Schwankungen des Volumensstroms beziehungsweise des Förderdrucks wirken sich negativ auf die Bereiche Bedienqualität, Maschinenbelastung und Maschinenwirkungsgrad des Systems Mensch-Maschine-Fördermedium aus. Die durch die Förderlücke hervorgerufene zeitweise Überhöhung der maximalen Strömungs-

KONSTANTFLUSSPUMPE FÜR FRISCHBETON

Am Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie wird in Kooperation mit Putzmeister Engineering eine Konstantflusspumpe entwickelt, die auf einem Lkw-Chassis montiert wird. Die Konstantflusspumpe besitzt zwei Förderzylinder, zwei Einlassventile und ein Auslassventil. Mithilfe dieses Aufbaus wird das Überblendungs-Prinzip realisiert, bei dem es eine Phase (Überblendungsphase) gibt, während der beide Förderzylinder fördern. Die Frischbetonventile werden nur betätigt, wenn über diesen keine Druckdifferenz anliegt. Hierdurch werden die Betätigungskräfte und der Verschleiß

verringert und die Fördergüte verbessert. Im Folgenden wird das mechanische System der Konstantflusspumpe, dessen Hydraulik und die Steuerung erläutert.

MECHANIK

Das Pumpensystem der Konstantflusspumpe ist in **BILD 2** (links) dargestellt. Die zwei Einlassventile (EV_L , EV_R) verfügen jeweils über zwei Anschlüsse sowie zwei Schaltstellungen (2/2-Wegeventil), die den Ventildurchfluss entweder sperren (s) oder freigeben (f) können. Die Einlassventile regeln den Fluss zwischen dem Frischbetonreservoir und dem jeweiligen Förderzylinder. Durch die zwei Förderzylinder (FZ_L , FZ_R) mit den darin gleitenden Förderkolben wird Frischbeton angesaugt und ausgestoßen. Das zentrale Auslassventil (AV) verfügt über drei Anschlüsse und drei Schaltstellungen. Je nach Ventilstellung werden der eine, der andere oder beide Förderzylinder mit dem Auslass verbunden (AV-Stellungen 1/2/3) [9].

In **BILD 2** (Mitte und rechts) ist die Realisierung des Pumpensystems als CAD-Bild illustriert. Die Frischbetonpumpe verfügt über zwei parallel zueinander angeordnete Förderzylinder mit Förderkolben, die unabhängig voneinander verfahren werden können. Innerhalb des Trichters, der als Vorratsbehälter für den Frischbeton dient, sind die Einlassventile angeordnet. Als Einlassventile werden zwei Einklapp-Scheibenventile eingesetzt, die sich unter Druckdifferenz an einer Leiste abstützen. Als zentrales Auslassventil dient ein Zylindersegmentventil, das die Funktionalität eines 3/3-Wegeventils aufweist, **BILD 2** [7, 8].

BEWEGUNGSABLAUF UND DESSEN STEUERUNG

Die Bewegungen der Förderkolben, der Einlassventile und des Auslassventils sind in **BILD 3** über der Zeit dargestellt. Jeder der Förderkolben durchläuft die Phasen: Vorkompression, Überblendung, Fördern, Überblendung und Dekompression. Der Zyklus beginnt mit dem Ansaugen des Frischbetons durch den zurückfahrenden rechten Förderkolben. Das rechte Einlassventil ist hierfür geöffnet. Währenddessen fördert der linke Förderkolben. Wenn der rechte Förderzylinder komplett gefüllt ist, wird das Einlassventil geschlossen und der Frischbeton mit-

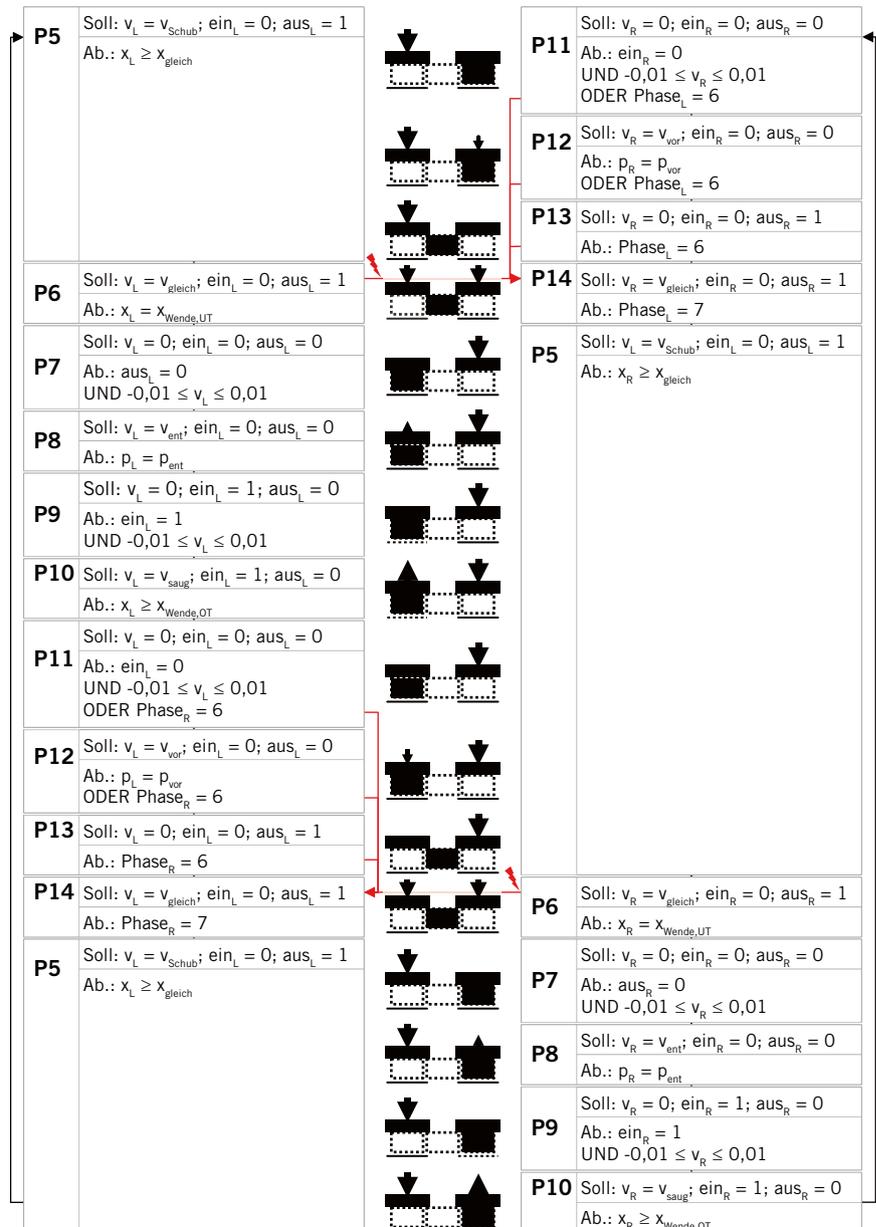


BILD 4 Steuerungsablauf (© Mobima | Putzmeister Engineering)

hilfe des Förderkolbens vorkomprimiert. Somit herrscht in beiden Förderzylindern und dem Druckgehäuse nahezu der gleiche Druck. Dies ist die Gleichdruckphase. Da über das Auslassventil (Zylindersegmentventil) kein Differenzdruck mehr ansteht, kann es mit niedrigen Betätigungskräften und ohne das Risiko von Strahlverschleiß in die Mittelstellung gebracht werden. In dieser Stellung kann durch beide Förderkolben Frischbeton in den Auslass ausgeschoben werden. Wenn der fördernde linke Zylinder fast ganz leer ist, beginnt die Überblendungsphase. Während dieser wird der

fördernde Kolben in dem Maße verlangsamt, wie der andere Kolben beschleunigt wird. Der Frischbetonfluss bleibt in Summe konstant. Wenn der rechte Kolben die Förderung komplett übernommen hat und der linke Kolben steht, wird die Auslassöffnung des linken durch ein Verdrehen des Auslassventils verschlossen. Durch ein Zurückfahren des linken Förderkolbens wird das in dem Zylinder befindliche Fördergut dekomprimiert und somit auch bei dem Einlassventil eine Betätigung unter Druckdifferenz vermieden. Nachdem das linke Einlassventil geöffnet wurde, wird mit dem

linken Kolben Frischbeton angesaugt, während der rechte Kolben für die konstante Frischbetonförderung sorgt. Im Folgenden wiederholt sich dieser Ablauf mit wechselnder Förderung durch den linken oder den rechten Kolben.

Mithilfe des in **BILD 4** dargestellten Steuerungsablaufs wird die beschriebene Bewegung der Aktoren durch einen sich zyklisch wiederholenden Ablauf umgesetzt. Zu diesem Zweck werden die Stellungen der Frischbetonventile in Abhängigkeit der Positionen, Geschwindigkeiten und Drücke der hydraulischen Antriebskolben vorgegeben. Der komplette Durchlauf eines Kolbens durch jeden Betriebszustand wird als Lastspiel bezeichnet. In der Steuerung wird ein Lastspiel in die zehn Phasen P5 bis P14 unterteilt. In der linken Spalte von **BILD 4** ist die Steuerungslogik des linken Förderkolbens dargestellt und in der rechten Spalte analog die des rechten Förderkolbens. Zwischen den zwei Spalten des Flussdiagramms sind die Ventilstellung und Förderkolbenbewegungen der entsprechenden Phasen in Form von Skizzen dargestellt. Beide Förderkolben durchlaufen zeitlich versetzt die gleichen Phasen. In jeder dieser Phasen gibt es Soll-Werte für die Geschwindigkeiten der Förderkolben und die Positionen der Betonventile. Außerdem hat jede Phase eine Abbruchbedingung (Ab.), die erfüllt sein muss, damit mit der darauffolgenden Phase fortgefahren werden kann.

HYDRAULIK

Da für die kontinuierliche Förderung und somit für die Simulation der Pumpe das Hydrauliksystem zum Antrieb der Förderkolben entscheidend ist, wird dieses im Folgenden erläutert. **BILD 5** zeigt das Hydrauliksystem zum Antrieb der Förderkolben. Dieses besteht aus zwei Antriebspumpen (1, I), zwei Antriebszylindern (2, II) und mehreren Hydraulikkomponenten zur Realisierung von Nebenfunktionen. Die Antriebspumpen sind mit dem Motor des Lkws verbunden. Eine Antriebspumpe (1, I) bildet jeweils mit einem Antriebszylinder (2, II) eine Fördereinheit. Die Komponenten der einen Fördereinheit sind arabisch, die der anderen römisch nummeriert. Die Nummern der Komponenten, die für beide Fördereinheiten im gleichen Maße relevant sind, sind unterstrichen. Im Folgenden wird das Hydrauliksystem beispielhaft an

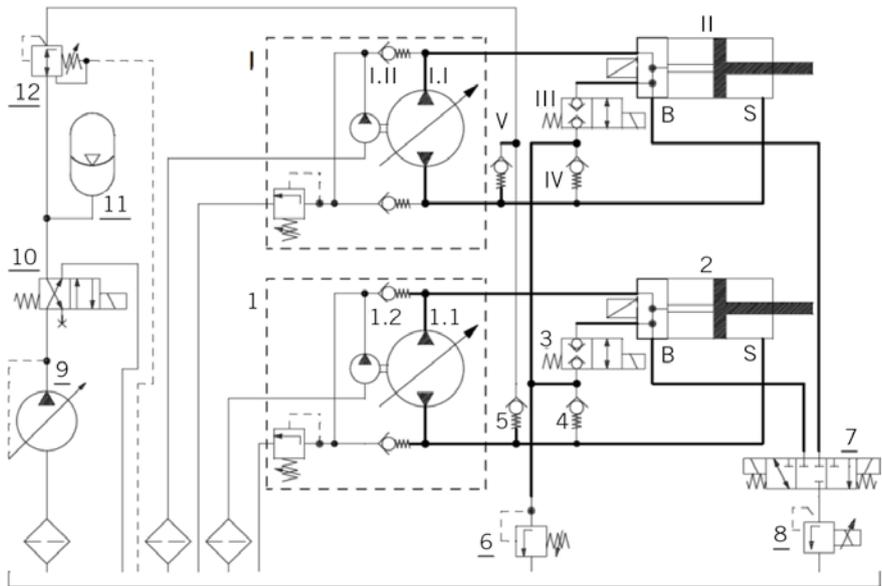
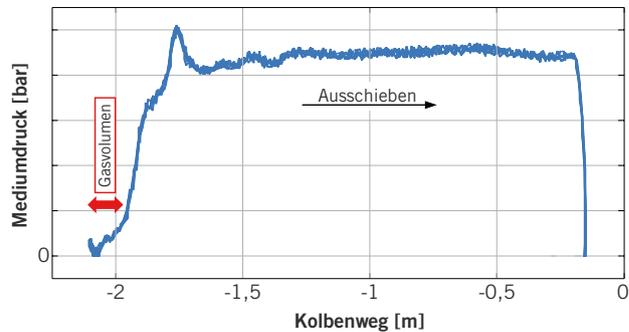


BILD 5 Plan der Hydraulik zum Antrieb der Förderkolben (© Mobima | Putzmeister Engineering)

BILD 6 Förderzylinder aus Glas, der mit Frischbeton und einer Gasblase gefüllt ist (oben); Messung des Mediumdrucks eines aus-schiebenden Kolbens über dem Kolbenweg (unten) (© Putzmeister Engineering)



der Antriebspumpe 1, die den Antriebszylinder 2 versorgt, erläutert.

Während der Förderphase wird von der Hauptpumpe, **BILD 5** (1.1), Öl auf die Bodenseite des Antriebszylinders (2.B) gefördert. Die Kolbenstange wird dabei ausgefahren und Öl aus der Stangenseite des Antriebzylinders verdrängt (2.S). Zum Ansaugen von Frischbeton wird die Förderrichtung der Antriebspumpe umgekehrt, woraufhin die Kolbenstange eingezogen wird. Hierbei ist zu beachten, dass die freie stangenseitige Kolbenfläche kleiner als die bodenseitige ist und somit

die Volumenströme, die in und aus den Antriebszylindern fließen, unterschiedlich groß sind. Aus diesem Grund würde die Antriebspumpe während der Förderphase unterversorgt und während der Saugphase würde sich bodenseitig überschüssiges Öl anstauen. Um dies zu verhindern, wird während der Saugphase der arabisch nummerierten Fördereinheit (1+2) das überschüssige Öl auf der Bodenseite über das geöffnete 2/2-Wegeventil 3 in einen Schaukel- und Spülkreis geleitet. Von diesem aus kann das Öl über das Rückschlagventil IV

chassis.tech^{plus}

9. Internationales Münchner Fahrwerk-Symposium
12. und 13. Juni 2018 | München

NEUE FAHRWERKE

Im Zeichen von Elektrifizierung
und Leichtbau

AUTONOMES FAHREN

Herausforderungen
für Level 4 und 5

FAHRWERKSREGELUNG

Dynamik und Komfort
im Fokus

/// KEYNOTE-VORTRÄGE

**AUDI | ZF Friedrichshafen | Atreus |
Robert Bosch Automotive Steering |
Hochschule Kempten |
Lexus | Continental | Hyundai**

/// EINE FÜR ALLE

**Vier Kongresse
in einer Veranstaltung**

/// PARTNER



/// SPONSOREN



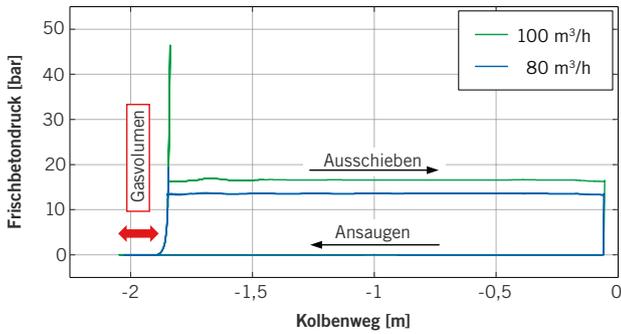


BILD 7 Simulation des Mediumdrucks über den Hub des Förderkolbens für Soll-Förderströme von 80 und 100 m³/h und 90 % Füllgrad mit VK-DBV (© Mobima | Putzmeister Engineering)

der stangenseitigen Leitung des Antriebszylinders II (II.S) zugeführt werden. Der zweite Antriebszylinder (II) befindet sich zu diesem Zeitpunkt in der Schubphase. Durch diesen zusätzlichen Ölfluss aus der Bodenseite des Antriebszylinders 2 (2.B) auf die Stangenseite des Antriebszylinders II (II.S) beziehungsweise die Niederdruckseite der Antriebspumpe I wird diese vor einer Unterversorgung geschützt. Neben dem Schaukelöl sorgen die Speisepumpen (1.2, I.II) für eine zusätzliche Versorgung der Niederdruckseiten. Wenn dem Schaukel- und Spülkreis von dem einen Antriebszylinder mehr Öl zugeführt als durch den anderen benötigt wird und sich infolgedessen der Druck erhöht, öffnet das Druckbegrenzungs- beziehungsweise Spülventil (6).

Ein für die Hauptpumpen kritischer Zustand entsteht, wenn einer der Förderkolben fördert und der Andere sich zeitgleich in der Vorkompressionsphase befindet. In diesem Betriebszustand werden beide Kolbenstangen ausgefahren, weshalb der wechselseitige Ölausgleich über den Schaukel- und Spülkreis nicht funktioniert. Hierdurch würden die niederdruckseitigen Öldrücke abfallen und die Hauptpumpen, **BILD 5** (1.1, I.I), Schaden nehmen. Um dies zu verhindern, wird Öl aus dem Speicher (11) über ein Druckbegrenzungsventil (12) und Rückschlagventile (5, V) im Bedarfsfall den Niederdruckseiten zugeführt.

Bei der Vorkompression wird der angesaugte Frischbeton auf den Förderdruck komprimiert. Eine Möglichkeit besteht darin, die Vorkompression druckgeregelt mithilfe der Hauptpumpe, **BILD 5** (1.1, I.I), umzusetzen. Nachteil dieses druckgeregelten Ansatzes ist, dass es ein vergleichsweise langsames Verfahren ist und nur unzureichend auf einen schwankenden Füllgrad reagiert werden kann. Umso

länger die Vorkompressionsphase wird, desto kürzer wird die Ansaugphase und infolgedessen steigt die Ansaugeschwindigkeit. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass ein Zusammenhang zwischen Ansaugeschwindigkeit und Füllgrad besteht. Des Weiteren wird angenommen, dass nach Überschreiten einer optimalen Ansaugeschwindigkeit der Füllgrad bei weiter steigender Geschwindigkeit abfällt. Um eine langsame Ansaugeschwindigkeit zu ermöglichen, muss eine möglichst kurze Vorkompressionsphase angestrebt werden, da die Summe der Zeiten durch den ausschließenden Förderkolben fest vorgeschrieben wird. Eine andere als die druckgeregelte Vorgehensweise bei der Vorkompression liegt darin, die Hauptpumpe komplett auszuschwenken und

den geförderten Ölstrom ab einem gewissen Öl- beziehungsweise Mediumdruck über ein 3/3-Wegeventil und ein Vorkompressions-Druckbegrenzungsventil, **BILD 5** (VK-DBV, 8), abzuführen. Durch dieses Vorgehen wird das Überschwingen des Mediumdrucks aufgrund des trägen Ansprechverhaltens der Hauptpumpen vermindert und die Vorkompressionsphase kann verkürzt werden. Neben diesen Vorteilen bringt das VK-DBV auch einige Nachteile, wie einen gestiegenen technischen Aufwand, mit sich. Außerdem führt der Rückstaudruck des VK-DBV bei hohen Ölströmen zu einem Überschwingen des Förderdrucks und somit zu einer zusätzlichen Belastung des Auslassventils. Neben dem technisch höheren Aufwand und der höheren Belastung einer Komponente besteht ein weiterer Nachteil darin, dass die hydraulischen Speicher mehr Öl und einen größeren Ölstrom liefern müssen. Das kann dadurch erklärt werden, dass durch das schnelle Vorkomprimieren auf der Niederdruckseite der Pumpe mehr Öl benötigt wird. Außerdem muss auch das Öl, das über das VK-DBV abgeführt wird, durch die Speicher kompensiert werden. Mithilfe einer Simulation soll zum einen die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems und zum anderen die Wirksamkeit des VK-DBV ermittelt werden.

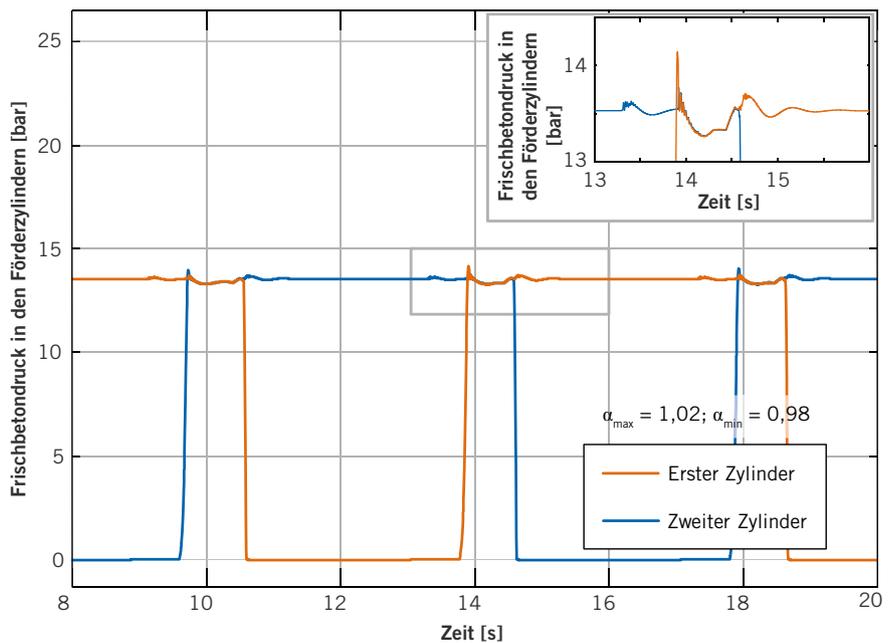


BILD 8 Frischbetondruck in den Förderzylindern über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von 80 m³/h bei einem Füllgrad von 90 % ohne VK-DBV (© Mobima | Putzmeister Engineering)



J A H R E

**SEIT 1898 DER ANTRIEB VON
AUTOMOBIL- UND FAHRZEUGTECHNIK**



**JETZT UNVERBINDLICH TESTEN
UND JUBILÄUMSGESCHENK SICHERN**

www.meinfachwissen.de/atz/probe



MODELLBILDUNG UND SIMULATION

Zur Simulation der Konstantflusspumpe werden Matlab/Simulink/Simscape R2016a verwendet. Die komplette Simulation der Pumpe unter Berücksichtigung des Fördermediums lässt sich in die vier Bereiche: Mechanik, Hydraulik, Steuerung und Frischbeton unterteilen. Im Folgenden wird ausschließlich auf die Modellbildung der Frischbetoneigenschaften eingegangen. Die Belastung des Systems resultiert aus dem Fördern des Frischbetons. Zur Modellierung des Frischbetons wird ein vereinfachtes Modell des Mediums erstellt, das die für die Belastung der Pumpe wichtigsten Medieumigenschaften abbildet. Diese relevanten Frischbetoneigenschaften sind dessen Verhalten im Förderzylinder und in der Rohrleitung.

In Versuchen wurde beobachtet, dass sich im Laufe des Ansaughubs die Frischbetonfront von der Oberfläche des Förderkolbens ablöst und sich ein Gasvolumen bildet, das unter Unterdruck (1 bis 0,3 bar absolut) steht, **BILD 6**. Zu Beginn der Kompression wird das Gasvolumen komprimiert, wobei sich der Medium- beziehungsweise Hydraulikdruck nur unmerklich erhöht. Wenn das Gas komprimiert wurde und der Förderkolben auf den Frischbeton trifft, steigt der Druck schlagartig an, **BILD 6** (unten). Das Verhältnis zwischen angesaugtem Mediumvolumen und gesamtem Zylindervolumen wird als Füllgrad bezeichnet. Durch einen Vergleich von theoretisch und real gepumpter Frischbetonmenge wurde gezeigt, dass der Füllgrad zwar Schwankungen unterworfen ist, sich aber meistens im Bereich von 85 bis 90 % bewegt. Eine schnelle und präzise Vorkompression wird hierdurch erschwert.

Bei der Simulation der Hubkolbeneinheiten werden die Kompressibilität des Frischbetons sowie das gelöste Gas berücksichtigt. Um in der Simulation der Hubkolbeneinheiten den Füllgrad abzubilden, wird ab einem bestimmten Kolbenweg kein weiteres Medium mehr in den translatorisch, hydromechanischen Wandler eingesaugt. Dies führt zu dem in **BILD 7** dargestellten validen Verhalten der Simulation. In der Realität ist der Druckanstieg beim Auschieben langsamer, **BILD 6**. Dies kann durch eine Kompression der auch fein verteilten Gasblasen im Frischbeton über einen längeren Weg hinweg erklärt werden.

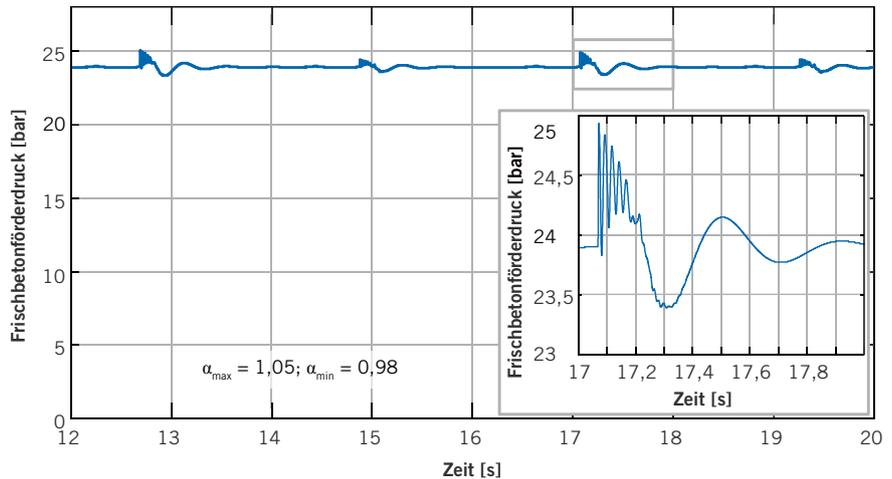


BILD 9 Frischbetonförderdruck über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von 150 m³/h beziehungsweise einen praktischen Förderstrom von 144 m³/h bei einem Füllgrad 90 % mit VK-DBV und verkürzter Gleichhubphase (© Mobima | Putzmeister Engineering)

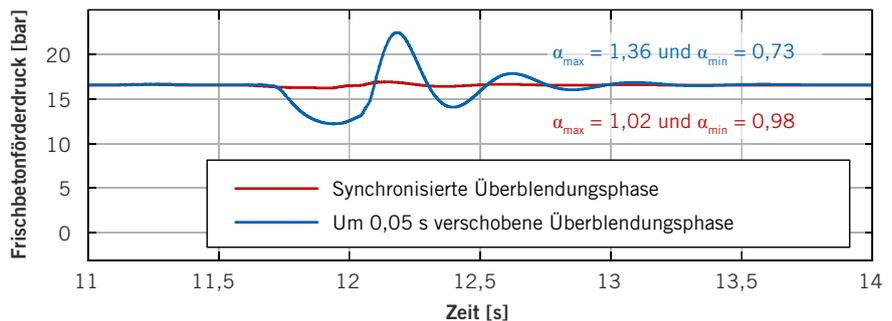


BILD 10 Frischbetonförderdruck bei synchronisierter und bei um 0,05 s verschobener Überblendungsphase über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von 100 m³/h bei einem Füllgrad von 90 % mit VK-DBV (© Mobima | Putzmeister Engineering)

Zur Modellierung des Frischbetons in den Rohrleitungen der Pumpe werden zum einen der Strömungswiderstand und zum anderen die Massenträgheit des Mediums abgebildet. Der Strömungswiderstand ist abhängig von Eigenschaften des Betons und von geometrischen Parametern der Rohrleitung [9].

ERGEBNISSE UND DEREN ANALYSE

Im Folgenden werden die simulierten Fördergüten für die Volumenströme von 80, 100 sowie den maximal möglichen von 150 m³/h vorgestellt. Des Weiteren wird der Einfluss der Vorkompressions- und Überblendungsphase auf die Fördergüte analysiert. **BILD 8** zeigt den Frischbetondruck in den Förderzylindern über der Zeit. Das Auslassventil wird derart betätigt, dass die Förderzylinder nur bei hohem Druck mit dem Auslass verbunden sind. Somit entspricht die Einhüllende

dem Förderdruck. Der Soll-Förderstrom beträgt 80 m³/h und liegt somit im mittleren Förderspektrum einer konventionellen Frischbetonpumpe. Die Phase, in der in beiden Förderzylindern Förderdruck herrscht, ist die Gleichdruckphase. In dieser findet auch die Überblendung der Förderung statt, **BILD 3**. Durch Schwankungen im Förderdruck ergibt sich eine Fördergüte von $\alpha_{max} = 1,02$ und $\alpha_{min} = 0,98$. Dies stellt eine deutliche Verbesserung der Fördergüte gegenüber den bekannten Frischbetonpumpen dar.

In dieser Untersuchung entspricht schon wegen der unvermeidbaren Leckage der Hauptpumpe der praktisch geförderte nicht dem vorgegebenen Soll-Frischbetonstrom. Durch die simulierte Konstantflusspumpe kann maximal ein Soll-Frischbetonstrom von 150 m³/h beziehungsweise ein praktischer Frischbetonstrom von 144 m³/h gefördert werden. Der durch die beiden Förderzylindern

der erzeugte Frischbetonförderdruck über der Zeit für den maximalen Förderstrom ist in **BILD 9** dargestellt. Bei diesem stellt sich aufgrund des höheren Förderstroms, im Vergleich zu dem Förderstrom von 80 m³/h, ein höherer Förderdruck ein. Laut Simulation ergibt sich eine Fördergüte von $\alpha_{\max} = 1,05$ und $\alpha_{\min} = 0,98$. Mithilfe der Simulation wird demzufolge die Tauglichkeit des Systems der Frischbetonpumpe zur Förderung eines konstanten Volumensstroms nachgewiesen.

Ein sowohl steuerungstechnisch als auch hydraulisch kritischer Betriebszustand ist die Vorkompression. Wenn der Frischbeton des vollen Förderzylinders zu dem Zeitpunkt, in dem das Auslassventil in Mittelstellung geschaltet wird, nicht auf den Druck des fördernden Zylinders vorkomprimiert ist, kommt es zu einem Druck- und Förderstromeinbruch. Die Fördergüte fällt ab. Die Simulation zeigte, dass je nach Betriebszustand die Vorkompressionsphase mit dem VK-DBV deutlich kürzer ist. Infolgedessen wird die angestrebte langsame Sauggeschwindigkeit ermöglicht, wodurch von einem höheren Füllgrad ausgegangen werden kann. Die Sauggeschwindigkeit kann beispielsweise bei einem Förderstrom von 80 m³/h durch das VK-DBV bei vergleichbarer Fördergüte um 13 % abgesenkt werden. Bei hohen Förderströmen gibt es zu wenig Zeit für den Druckabbau durch das VK-DBV, weshalb der Vorteil der Absenkung der Sauggeschwindigkeit in diesem Fall nicht realisiert werden kann.

Ein weiterer Betriebszustand, der steuerungstechnisch kritisch ist und einen großen Einfluss auf die Fördergüte hat, ist die Überblendungsphase. Wenn die Überblendungsphase verlängert wird, muss die Sauggeschwindigkeit erhöht werden, was gegebenenfalls zu einer schlechteren Füllung des Förderzylinders führt. Ist für die Überblendungsphase hingegen zu wenig Zeit veranschlagt, können die Geschwindigkeiten nicht genau abgefahren werden, was zu einem schwankenden Förderstrom führt. Neben der Länge der Überblendungsphase ist die Synchronität der beiden Förderkolben während der Überblendungsphase entscheidend. Beginnt beispielsweise der rechte Förderzylinder 0,05 s zu spät mit seiner Überblendungsphase (ÜP) kommt es zu erheblichen Druckschwankungen, **BILD 10**.

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mithilfe des vorliegenden virtuellen Prototypen beziehungsweise der Mehrdomänensimulation die Tauglichkeit des gesamten Pumpensystems zur quasi konstanten Förderung von Frischbeton nachgewiesen wurde. Des Weiteren wurde identifiziert, dass die Qualität der Vorkompressionsphase und der Überblendungsphasen großen Einfluss auf die erreichbare Fördergüte haben.

LITERATURHINWEISE

- [1] N. N.: Die Putzmeister-Story. In: Putzmeister Post 74, (2008), Nr. 3, S. 57
- [2] N. N. Autobetonpumpen. In: Betontechnik, Maschinen zum Fördern und Pumpen von Beton (2017), S. 7
- [3] N. N.: Technische Daten – Pumpen. In: Autobetonpumpen, Die intelligenten Kraftpakete (2017), S. 12

- [4] Hudelmaier, G.: Betonpumpen mit 50 % Energieeinsparung. In: ATZoffhighway 4 (2008), Nr. 2, S. 74–83
- [5] Völker, L.; Hudelmaier, G.: Optimierung einer Betonpumpe. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, 2009
- [6] Hirschi, T.; Knauber, H.; Lanz, M.: Construction: Sika Betonhandbuch. Zürich: Sika Schweiz AG, 2004, S. 32
- [7] Weber, F.; Geimer, M.; Reck, C.: Zylindersegmentventil – entwickelt für partikelbeladene Dickstoffe. In: Industriearmaturen & Dichtungstechnik (2017), Nr. 2, S. 56–61
- [8] Kasten, K.: Gleitrohr-Rheometer – Ein Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen. Dresden, Technische Universität, Dissertation, 2010, S. 86
- [9] N. N.: Dickstoffpumpe. EP16183666.3



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.emag.springerprofessional.de/atz-offhighway-worldwide



Partner der Besten.

Unsere Nockenwellen drehen sich nicht nur in On-Highway-Motoren, sondern auch in Schiffen, Stationärmotoren, Pistenraupen und Traktoren. Innovative Lösungskonzepte, individuelle Entwicklungsberatung und Fertigung vom Prototyp bis zur Großserie machen uns im Ventiltrieb seit über 70 Jahren zum kompetenten Partner in der Motorenherstellung. Profitieren Sie von unserer Erfahrung!

Nockenwellen sind unser Geschäft.

SCHLEICHER FAHRZEUGTEILE
 GmbH & Co. KG



München/Penzberg Germany
 Phone: +4989/785007-0
www.schleicher-fahrzeugteile.de

