

# Hybride Simulationstechnik – Prototypenerkenntnisse in den Produktneuentwicklungsprozess einbinden

Dennis Kaczmarek, Armin Lohrengel

*Es wird gezeigt, wie Erkenntnisse eines Prototyps in den weiteren Entwicklungsprozess eines Produktes Anwendung finden können. Dazu wird ein entwickelter Rechenkern genutzt, welcher einen hybriden Ansatz aus Numerik und einem neuronalen Netz beinhaltet. Zusätzlich soll dieser Rechenkern den gesamten Produktentwicklungsprozess unterstützen und Produktvorschläge generieren, welche unter Restriktionen und einem globalen Optimierer ermittelt werden. Durch den Ansatz der Optimierung wurde Wert auf einen Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Genauigkeit in der Rechenroutine gelegt. In diesem Artikel wird diese Vorgehensweise vorgestellt.*

*Keywords: Hybride Simulation, neuronale Netze, Optimierung, Produktentwicklung*

## Problemstellung

---

Zur Wassergewinnung aus der Umgebungsluft wurde eine neue verfahrenstechnische Anlage entwickelt. Für dieses Verfahren wird ein neuartiger Drehschieberverdichter benötigt, welcher den Betriebsanforderungen gerecht wird. Ein Drehschieberverdichter wird für niedrige Drücke mit mäßigen Fördervolumen genutzt und soll in dem genannten Verfahren zur Verdampfung einer hygroskopischen Sole genutzt werden. Hygroskopische Solen besitzen eine starke Wasserbindungskraft und können dadurch Luftfeuchtigkeit aufnehmen. Damit das Wasser aus der Luft gewonnen werden kann, muss die Sole zum einen mit einem Unterdruck beaufschlagt und zum anderen mit zusätzlicher Wärme versorgt werden. Dies soll aus einer Kombination von einem Verdichter und einen Wärmetauscher realisiert werden. Damit der Funktionsablauf des Verdichters verständlich ist, wird im Folgenden auf den Verdichter eingegangen. Der Drehschieberverdichter besteht grundlegend aus:

- Rotor
- Schieber
- Hohlzylinder

Der Rotor des Drehschieberverdichters ist exzentrisch gelagert und von einem Hohlzylinder umgeben, welcher den Verdrängerraum begrenzt. Dieser Rotor besitzt Schieber, die vom Rotor bis an den Hohlzylinder reichen und durch die Fliehkräfte sowie Druckkräfte des Verdichtungsmediums gegen den Hohlzylinder gedrückt werden. Durch die Rotation des exzentrisch gelagerten Rotors wird zwischen Rotor, Schiebern und Hohlzylinder ein konvergenter Spalt nach der 6 Uhr Stellung erzeugt. Dieser Spalt führt dazu, dass durch die Drehung das Volumen einer Kammer verkleinert und das Medium verdichtet wird. Diese Art der Verdichtung wird auch als Verdrängerprinzip bezeichnet. Dieses Verdichtungsprinzip besitzt ausschließlich einen Druckeinfluss in Abhängigkeit der Geometrie.

Konventionelle Drehschieberverdichter sind ölgeschmiert, somit konnte der klassische Verdichtertyp aufgrund der Ölverunreinigung für die Wassergewinnung nicht verwendet werden. In der Abbildung 1 sind alle relevanten Größen des Verdichters dargestellt und in der Tabelle 1 festgehalten.

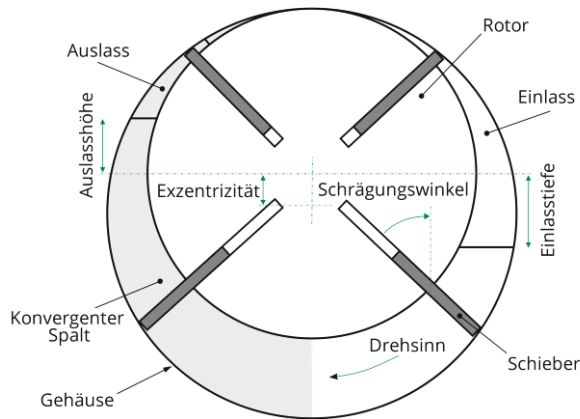


Abbildung 1: Grundgrößen des abstrakten Modells

Tabelle 1: Geometrische Einflüsse am Drehschieberverdichter

Gehäuseradius	Rotorradius
Schieberlänge	Schieberanzahl
Schrägungswinkel Schieber	Einlassgeometrie
Auslassgeometrie	Exzentrizität

## Ausgangssituation

Damit physikalische Zusammenhänge, Normtabellen, Auslegungsformeln sowie Auslegungsrichtlinien in einem Berechnungsvorgang angewendet werden können, wurde von Beginn an auf die parallele Erarbeitung eines eigenständigen Rechenkerns gesetzt. Dieser Rechenkern soll ein Expertentool für den Entwicklungsbereich darstellen und diverse Entwicklungsprozesse wie beispielsweise die Dokumentation, Erstellung und Dimensionierung von neuen Baugruppen beschleunigen.

Während einer Parameterstudie mit Hilfe des Rechenkerns wurden ideale Verhältnisse zwischen Geometrie Größen ermittelt. Es wurde ein optimaler Zusammenhang für die Einlassgeometrie in Abhängigkeit der Schieberanzahl sowie des Rotorradius gefunden. Eine ideale Schrägstellung konnte ermittelt werden. Weiterhin können die Exzentrizität sowie die Schieberlänge aus dem Gehäuseradius und Rotorradius ermittelt werden. Dies ermöglicht eine Reduktion der Parametervielfalt. Neben diesen Geometrieparametern existieren jedoch weitere Modellgrößen z.B. die Drehzahl  $f$ , der Anfangsdruck  $p_1$ , die Temperatur  $T_1$ , welche für das Verhalten des Gesamtsystems verantwortlich sind. Aus diesem Grund soll neben dem Rechenkern ein *Optimierungsalgorithmus* genutzt werden, um die einflussnehmenden Parameter optimal zu dimensionieren. Ein ähnlicher Ansatz wurde auch in (Timár, I. 2004) verfolgt, wo verschiedenste Einflussgrößen zur *Optimierung* eines Tragwerkes genutzt worden sind.

## Berechnungen in der Konstruktion

Im Rahmen der VDI 2211 (VDI 2211 2003) werden verschiedene Verfahren zur kosten-, termin- und qualitätsgerechten Entwicklung technischer Produkte vorgestellt. Zu den häufig priorisierten Verfahren gehören die Entwicklung von Berechnungsprogrammen mithilfe von Mehrkörpersimulation, Spannungsberechnung nach FEM-Analysen, Optimierung mithilfe von FEM-Modellen. Neben diesen numerisch sehr aufwendigen Berechnungen werden auch rudimentäre Rechnungen innerhalb der Excel Umgebung oder auch analytische Funktionsstrukturen als Hilfsmittel zur erfolgreichen Produktauslegung aufgeführt. Die Berechnungsansätze werden mithilfe einer ABC-Zuordnung in Aussagegüte und Zeitaufwand eingeordnet, die nachfolgende Abbildung 2 wurde aus der VDI 2211 entnommen und zeigt die Einordnung.

Die Berechnungsmethoden sind in *Kategorien A* (langsame Berechnung | hohe Aussagegüte), B und C (schnelle Berechnung | wenig Aussagegüte) eingeordnet, dabei wird von physikalisch korrekter Wiedergabe des Systemmodells oder auch insbesondere der FEM, korrekte Randbedingungen zur Ermittlung der Nutzdaten ausgegangen.

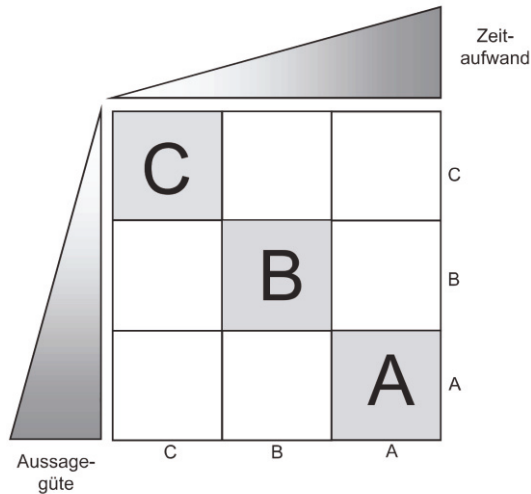


Abbildung 2: ABC-Zuordnung der Aussagegüte und Zeitaufwand für Berechnungsmethoden (VDI 2211 2003: S. 23)

Speziell für die Prototypenentwicklung wird unterschlagen, dass gerade dort bei gewissen Randbedingungen und Festlegungen keine konkreten Erfahrungen bestehen und somit insbesondere die sehr rechenaufwendigen Berechnungsmethoden aus der *Kategorie A* in eine Aussagegüte der *Kategorie C* transportiert werden könnten und entsprechend falsche Ergebnisse liefern.

Neben den Berechnungsansätzen wurde in der VDI 2211 der Begriff der „*knowledge-based structural optimization*“ (VDI 2211 2003: S. 34) vorgestellt. Dieser Begriff soll die experimentell ermittelten Daten sowie das gesammelte Fachwissen mit der Berechnungsumgebung kombinieren und eine gesamtheitliche Optimierung erlauben.

Hinsichtlich der *ABC-Zuordnung* wird eine Berechnungsmethode vorgestellt, welche einen Kompromiss aus Schnelligkeit und Aussagegüte bereithält. Zudem wird unter dem Begriff der „*knowledge-based structural optimization*“ ein hybrider Berechnungsansatz zur Gesamtstrukturoptimierung vorgestellt werden.

## Realer Versuchsbetrieb des Prototyps

Messungen an dem Prototyp des Drehschieberverdichters haben Differenzen bezüglich des berechneten Drucksprunges und den realen Messdaten ergeben. Diese messbare Diskrepanz wurde mithilfe von einem Systemabbild erfolgreich reduziert (Kaczmarek/Lohrengel 2020: S. 49–62). Das erzeugte Systemabbild wurde mithilfe eines

neuronalen Netzes entwickelt, speziell das mehrlagigen Perzeptron (*MLP*) als Regressionsmodell wurde hier verwendet. Die ersten Grundbausteine für die *MLP*-Modelle wurden bereits im Jahr 1958 von Rosenblatt entwickelt (Rosenblatt, F. (1958): S. 386-408).

Die Hintergründe der festgestellten Diskrepanz sind in dem Verdichtungsprozess selbst zu suchen. Es handelt sich dabei um ein Mehrphasengemisch, welches aus Heißdampf, Nassdampf und Wasser besteht. Die prozentuale Zusammensetzung ist über den Verdichtungsprozess nicht bestimmbar und hängt von verschiedenen Prozessgrößen ab. Zusätzlich findet die Bewegung des Gases auf einer sich verjüngenden Teilkreisbahn statt. Neben diesen Anforderungen wird dem Prozess Wasser bei Raumtemperatur dauerhaft hinzugeführt. Eine realitätsnahe Beschreibung dieses Systemverhaltens ist entsprechend aufwändig zu modellieren. Daher wurde aus den bereits erwähnten Gründen eine komplexe numerische Beschreibung nach *Kategorie A* verworfen und mit einem isentropen idealen Systemverhalten gerechnet. Dieses so erzeugte Modell befindet sich entsprechend der Einordnung der VDI 2211 in der *Kategorie C* bis *Kategorie B*.

## Hybrider Simulationsansatz

---

Mit einem *Designpoint* sind die geometrischen Grundgrößen des Drehschieberverdichters zusammengefasst, welche bereits mit der Abbildung 1 eingeführt worden sind. Das erstellte *MLP* enthält das Systemabbild des Drehschieberverdichters in einem einzigen *Designpoint* und kann dadurch nicht auf das Verhalten anderen *Designpoints* des Drehschieberverdichters schließen. So muss eine Übertragbarkeit der Ergebnisse des *MLP* ermöglicht werden.

Die Aussage des *MLP* muss bezüglich des Drucksprunges modifiziert werden. Dazu wird ein *Hybrid-Modell* verwendet, welches den existierenden Rechenkern als Stütze zur Berechnung weiterer *Designpoints* nutzt. Der Ansatz wurde über den idealisierten Drucksprung beschrieben.

$$\Delta p = p_{end} - p_{start} = \frac{n \cdot R \cdot T_{end}}{V_{end}} - \frac{n \cdot R \cdot T_{start}}{V_{start}} = \left( \frac{T_{end}}{V_{end}} - \frac{T_{start}}{V_{start}} \right) \cdot n \cdot R \quad (1)$$

Dabei entspricht  $n$  der Stoffmenge,  $R$  der idealen Gaskonstante,  $T_{start/end}$  der Anfangs- sowie Endtemperatur,  $V_{start/end}$  dem Start- sowie Endvolumen und  $p$  dem aktuellen Druck. Für diesen Zusammenhang soll auf eine Übertragungsfunktion für andere Geometrien geschlossen werden, dazu folgende Umformulierung.

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{\left(\frac{T_{end,1}}{V_{end,1}} \frac{T_{start,1}}{V_{start,1}}\right) \cdot n_1 \cdot R}{\left(\frac{T_{end,2}}{V_{end,2}} \frac{T_{start,2}}{V_{start,2}}\right) \cdot n_2 \cdot R} \quad (2)$$

Innerhalb dieser Formel sind die zwei unterschiedlichen Geometrien 1 und 2 hinterlegt, welche in den Indizes zu sehen sind. Dabei sind die Werte der Geometrie 1 durch den Prototyp festgelegt. Dieser Prototyp wurde messtechnisch erfasst und es wurde das *MLP* erstellt. Die Parameter  $T_{start/end,1}$  sowie  $V_{start/end,1}$  der Geometrie 1 können aus dem Rechenkern und den Versuchen bestimmt werden. Der Drucksprung  $\Delta p_1$  entspricht  $\Delta p_{1,net}$ , dem Systemabbild (*MLP*) des Prototyps. Die Stoffmenge ist ein weiterer freier Parameter, welcher idealisiert angenommen wird. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Füllverhalten einer Kammer nicht ändert. Ein Term, welcher der Volumenänderung entspricht, wird eingeführt. Es ergibt sich durch Umformulierung.

$$\Delta p_2 = \frac{\left(\frac{T_{end,2}}{V_{end,2}} \frac{T_{start,2}}{V_{start,2}}\right) V_{start,2} \cdot R}{\left(\frac{T_{end,1}}{V_{end,1}} \frac{T_{start,1}}{V_{start,1}}\right) V_{start,1} \cdot R} \cdot \Delta p_{1,net} \quad (3)$$

Ein konstanter Wert der Geometrie 1 (Prototyp) wird als  $k_{net}$  eingesetzt und Werte gekürzt.

$$\Delta p_2 = \frac{\left(\frac{T_{end,2}}{V_{end,2}} \frac{T_{start,2}}{V_{start,2}}\right) V_{start,2}}{k_{net}} \cdot \Delta p_{1,net} \quad (4)$$

Mithilfe der Formel 4 wurden die geometrische Systemveränderung des Verdichters approximiert. Die Konstante  $k_{net}$  ist ein konstanter Beiwert, welcher für den Prototyp ermittelt worden ist. Die Variablen des Volumens sowie der Temperatur werden von dem Rechenkern geliefert, währenddessen  $\Delta p_{1,net}$  die versuchsbasierten Ergebnisse in kurzer Rechenzeit einbringt. Es konnte eine Verbindung zwischen dem erstellten Rechenkern und dem *MLP* geschaffen werden. Zudem ist ein Übertragungskonzept für andere Geometrien entstanden und der Berechnungsansatz benötigt kaum zusätzliche Rechenzeit.

## **Optimierung der Größen und Ergebnisse – Praxisanwendung**

### **Vorgang bei der globalen Optimierung**

Die vorgestellte Systematik der Baugruppenoptimierung ist in Abbildung 3 dargestellt. Es werden innerhalb festgelegter *Restriktionen* zufällige Geometrien des Drehschieber-

verdichters erzeugt. Diese erzeugte Geometrie wird dann zu dem *Optimierer* übergeben. Dort wird mithilfe des *Rechenkerns* die *Zielfunktion* der aktuellen Geometrie berechnet. Die Abstiegsrichtung der *Zielfunktion* wird dann mit dem *Gradientenverfahren* ermittelt und entsprechend eine *Geometriemodifikation* durchgeführt. Dabei kann der Rechenkern hier als *Hybrid*- oder als *Standard-Modell* aufgerufen werden, entsprechend verändert sich die Werteeingabe bei der *Zielfunktion*. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis das *lokale Optimum* erreicht worden ist ( $Gradient \leq Grenzwert$ ).

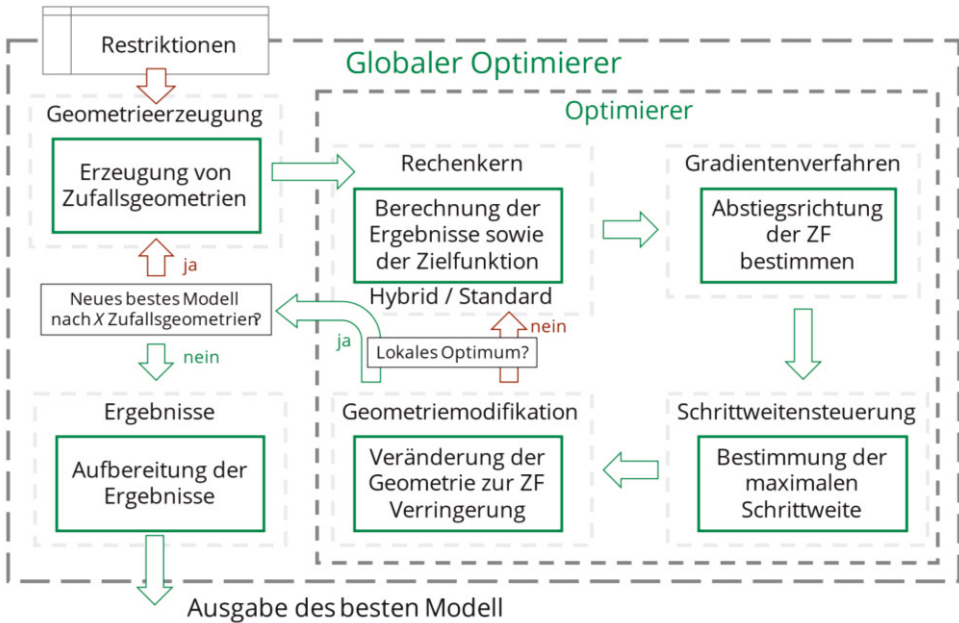


Abbildung 3: Systematisches Vorgehen bei der globalen Optimierung

Das so gefundene Modell wird abgespeichert und in eine Rankingliste von einer vordefinierten Anzahl an Verdichtern gestellt. Es werden so lange Verdichter erzeugt und optimiert, bis kein besserer Verdichter nach  $X$  optimierten Verdichtern als der beste Verdichter in der Rankingliste gefunden wird. Der Parameter  $X$  ist dabei ein frei zu wählender Optimierungsparameter. Zum Schluss werden die *Ergebnisse* zusammengefasst und ausgegeben.

## Zielfunktion

Die verwendete *Zielfunktion* orientiert sich an den Kundenanforderungen. Hinsichtlich der Prototypenentwicklung wurden die Mindestanforderungen des Massenstroms und des Drucksprunges über den Verdichter wie folgt festgesetzt:

- $\dot{m}_W = 50 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
- $\Delta p = 1.5 \text{ bar}$

Diese zwei Systemanforderungen sind *Restriktionen*, welche der Verdichter erfüllen muss. Es wurde folgende Zielfunktion formuliert.

$$Z_w = \alpha \cdot \frac{W_{reib,i}}{W_{reib,i,ref}} + \beta \cdot \left( \frac{\Delta p_{soll} - \Delta p_{ist}}{\Delta p_{soll}} \right)^2 + \gamma \cdot \left( \frac{\dot{m}_{soll} - \dot{m}_{ist}}{\dot{m}_{soll}} \right)^2 \quad (6)$$

Mit dem Term  $W_{reib,i}$  wurde die *Nebenrestriktion* der Reibarbeit gesetzt, dabei wurde sich an das *Penalty-Verfahren*, dem *Static-Penalty-Verfahren*, (Yeniay, Ö. 2005: S. 45-56) angelehnt. Durch die Vorfaktoren  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  sind die *Wertigkeiten* der jeweiligen Einträge bestimmt. Der Druck sowie Massenstromausdruck bietet durch die Quadrierung und dem ermittelten *Abweichungsfehler* einen positiven Ausdruck, welcher große Fehler quadratisch wachsen lässt und kleinere Abweichungen toleriert. Neben diesen Formulierungen existiert eine *Normierung*, um eine natürliche Gewichtung aufgrund unterschiedlicher *Skalierungen* innerhalb der Ausdrücke zu verhindern.  $W_{reib,i,ref}$  entspricht der Reibarbeit des aktuell besten Modells (*geringster Zielfunktionswert*). Immer wenn ein neues und „besseres“ Modell gefunden wird, wird diese Größe neu referenziert.

## Referenzgröße

Die verwendete *Zielfunktion* zur *Optimierung* aller nachfolgenden Schritte lautet:

$$Z_w = \frac{W_r}{2 \cdot W_{r,ref}} + 100 \cdot \left( \frac{1,5 \cdot \text{bar} - \Delta p_{ist}}{1,5 \cdot \text{bar}} \right)^2 + 100 \cdot \left( \frac{50 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \dot{m}_{ist}}{50 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} \right)^2 \quad (7)$$

Mit der *Nebenrestriktion*  $W_r$  wird die Reibarbeit minimiert. Die globale Optimierung wurde mit dem *Optimierungsparameter*  $X$  auf 60 gesetzt. Wenn 60 Verdichter berechnet worden sind und kein neues „bestes“ Modell gefunden wurde, wird die Rechnung beendet, im anderen Fall fortgeführt. Die geometrischen Randbedingungen wurden auf einen maximalen Radius von *300 mm* und die Breite des Verdichters auf *190 mm* festgesetzt.



Die Messergebnisse wurden an den in Abbildung 4 zu sehenden Verdichter ermittelt. In Tabelle 2 sind die quantitativen Werte festgehalten. Dabei ist in der letzten Spalte der *Zielfunktionswert* enthalten, mit den im Nachgang vorgestellten Ergebnissen aus dem *Hybrid-Modell* sowie *Standard-Modell* (Referenzgrößen).

Tabelle 2: Geometrie und Berechnungsergebnisse des Prototyps 1.0 mit dem Hybrid-Modell (oben/zweite Zeile) und dem Standard-Modell (unten/dritte Zeile)

$r_g$ [mm]	$r_r$ [mm]	$a$ [mm]	$N$ [l]	$e$ [mm]	U [U/min]	$\Delta p$ [bar]	$\dot{m}$ [kg/h]	$Z_w$ [l]
90	74,5	10	4	-20	780	0,28	7,64	138
90	74,5	10	4	-20	780	0,61	78,9	85

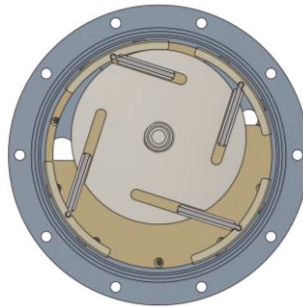


Abbildung 4: Geometrie des Drehschieberverdichters

Der hier gezeigte Prototyp besitzt ein berechnetes Verdichtungsverhältnis von  $\frac{V_{start}}{V_{end}} = 1,3$ . Die messtechnischen Ergebnisse stimmen mit der *Approximation* des *Hybrid-Modells* fast überein. Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass sich in den konstanten Betriebsbereichen eine mittlere Druckdifferenz von circa *0,25 bar* einstellt. Es soll nun auf zwei typische *Optimierungsverläufe* eingegangen werden, welche in Abbildung zu sehen sind. Die Ordinate besitzt den aktuellen *Zielfunktionswert*, auf der Abszisse befindet sich die Durchlaufnummer des *Gradientenabstiegsverfahrens*. In jedem Durchlauf  $i$  wird die aktuelle Geometrie in Richtung des kleineren *Zielfunktionswertes* verändert. Dabei werden die Werte so lange in Richtung des Abstieges verändert, bis keine *Zielfunktionswertverringering* ermöglicht wird. Diesen Teil nennt man *Schrittweitensteuerung*.

ung, hier wurde das Verfahren *Line Search* oder auch *Backtracking Line Search* verwendet (Rüdiger Reinhardt 2013: S. 99 ff.). Die gezeigten Zielfunktionswertverläufe sollen verdeutlichen, dass das genutzte Verfahren für den *hybriden Ansatz* verwendbar ist. Während der linke Verlauf der Abbildung bereits nach  $i=49$  abbricht, ist der rechte Verlauf nicht zum Abbruch aufgrund des *Gradientenbetrages* gekommen, daher ist dieser in die maximale *Iterationsgrenze* von 350 gefahren.

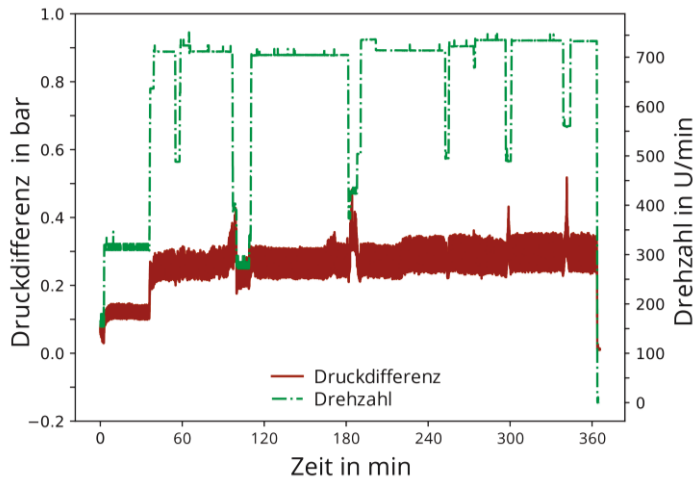


Abbildung 5: Druckdifferenz mit Drehzahlverlauf des Prototyps

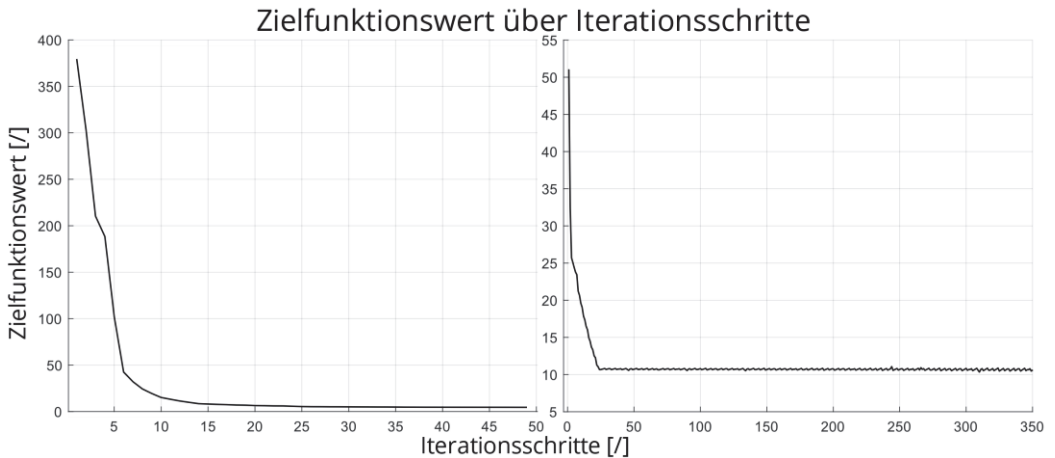


Abbildung 6: Exemplarische Optimierungsverläufe verschiedener Geometrien

## Ergebnisse Standard-Modell

Das *Standard-Modell* besitzt im Vergleich zu dem *Hybrid-Modell* einen als ideal angenommenen Verdichtungsprozess. Die ermittelten Geometrie Größen nach der globalen *Optimierung* sind in Tabelle 3 abgebildet. Die Zielfunktionswerte besitzen immer individuelle Referenzierungsgrößen und können nicht 1:1 zwischen *Hybrid-* und *Standard-Modell* verglichen werden. Neben dem quantitativen Vergleich sind ebenso in Abbildung die unterschiedlichen visuellen Entwicklungen abgebildet, diese entsprechen untereinander einem Maßstab von 1:1.

Tabelle 3: Lokale Optima der ermittelten Geometrien mit Hilfe des Standard-Modell

Nr.	$r_g$ [mm]	$r_r$ [mm]	$a$ [mm]	$N$ [l]	$U$ [U/min]	$\Delta p$ [bar]	$\dot{m}$ [kg/h]	$Z_w$ [l]
1	136	130	49,9	8	738	1,52	49,36	1,03
2	160	155	63,9	7	612	1,44	49,30	1,24
3	81	73	23,9	8	858	1,49	49,67	2,25

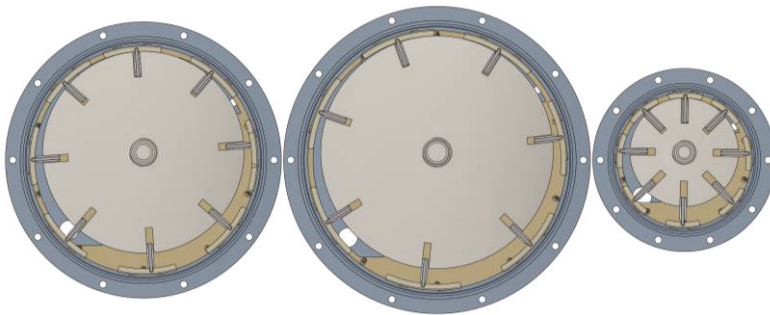


Abbildung 7: Standard-Modell - Links: Nr. 1 / Mitte: Nr. 2 / Rechts: Nr. 3

Durch das ideale Füll- und Verdichtungsverhalten wurden Geometrien ermittelt, welche in Bezug zur Exzentrizität klein sind. Es wurde zudem eine tendenziell kleinere Lösung als Nr. 2 vorgeschlagen. Hier wurde eine Verschlechterung des Modells in Bezug zur Effizienz um etwa 24% ermittelt. Die Lösung Nr. 3 führte zu wesentlich schlechteren Ergebnissen. Somit existiert wohl bezüglich der Prozessparameter und der Größe ein idealer Zusammenhang. Damit der kleinere Verdichter Nr. 3 die gleichen Nutzparameter erreicht wie die Nr. 1 wird eine 16% höhere Betriebsdrehzahl genutzt. Ebenso wurde die Exzentrizität um 33% erhöht, welches in Kombination mit dem Druck zu

einer erhöhten Beanspruchung der Schieber und entsprechend zu höheren Reibbeanspruchungen führt (die Verdichterbreite wurde hier als konstanter Parameter gesetzt). Aus diesem Grund wurde die kleinere Variante schlechter bewertet.

## Ergebnisse Hybrid-Modell

Für die Berechnungen des *Hybrid-Modells* wurden die *Restriktionen* aus dem *Standard-Modell* übernommen. Der Unterschied zum *Standard-Modell* ist die Berücksichtigung von Messdaten im *Optimierungsprozess*. Demnach wurden die realen Umstände wie beispielsweise das Füllvermögen sowie die Druckentwicklung approximiert.

Tabelle 4: Lokale Optima der ermittelten Geometrien mit Hilfe des hybriden Ansatzes

Nr.	$r_g$ [mm]	$r_r$ [mm]	$a$ [mm]	$N$ [l]	$U$ [U/min]	$\Delta p$ [bar]	$\dot{m}$ [kg/h]	$Z_w$ [l]
1	162	115	56,2	8	777	1,43	49,8	1,23
2	161	112	63,2	7	744	1,50	49,3	1,25
3	143	89	36,1	9	738	1,48	48,9	1,32

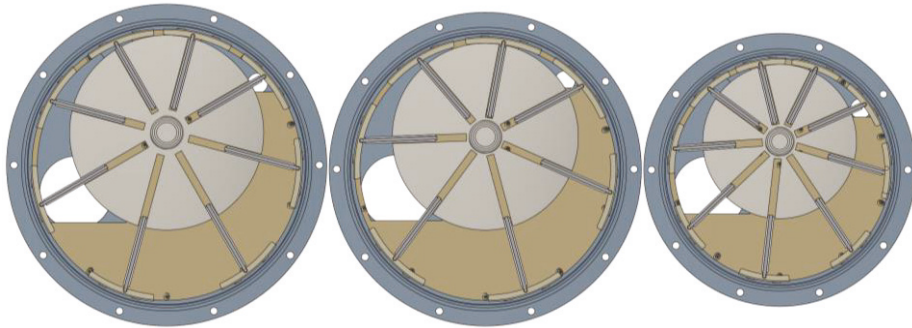


Abbildung 8: Hybrid-Modell - Links: Nr. 1 / Mitte: Nr. 2 / Rechts: Nr. 3

Die gezeigten drei Modelle besitzen alle ähnliche Zielfunktionswerte, zudem schneidet die kleine Version Nr. 3 nicht sehr viel schlechter als die Nr. 1 ab. Im Vergleich zu dem *Standard-Modell* sind sowohl die Exzentrizität als auch die geometrischen Abmaße größer als die Nr. 1 des *Standard-Modells*.

## Analyse der Optimierung

Die geometrischen Abmaße des Verdichters fallen bei dem hybriden Ansatz deutlich größer als bei den bisherigen Berechnungen aus. Diese Maßnahme kann auf das

erhöhte Verdichtungsverhältnis der hybriden Optimierung zurückgeführt werden, hier wurden für das *Hybrid-Modell* ein Verdichtungsverhältnis von  $\frac{V_{start}}{V_{end}} = 2,75$  berechnet, dieses liegt 36% über dem Verdichtungsverhältnis des *Standard-Modells*  $\frac{V_{start}}{V_{end}} = 2,02$ . Die Exzentrizität setzt maßgeblich das Fördervolumen bei festgelegter Gehäusegröße fest, der Gehäuseradius ist hauptsächlich für das maximale Fördervolumen des Verdichters verantwortlich. Beides in Kombination kann zu einem größeren Verdichtungsverhältnis genutzt werden.

Parallelen können hinsichtlich der Schieberanzahl gesehen werden. Beide Modelle schlagen eine weitaus höhere Schieberanzahl als der aktuelle Prototyp vor. Dieser Vorschlag ist als realistisch einzuschätzen. Durch die erhöhte Schieberanzahl lässt sich zwischen Einlass und Auslass zum einen die Abdichtwirkung aufgrund mehrerer Dichtungsstellen erhöhen und zum anderen durch geeignete Kombination mit der Einlassöffnung ein erhöhtes Verdichtungsverhältnis erreichen. Die maximale Schieberanzahl wurde aufgrund der Reibarbeit auf ein nötiges Minimum reduziert, die Restriktion wurde hier auf eine maximale Schieberanzahl von 10 gesetzt, die gewählte Schieberanzahl liegt bei acht Schiebern.

Derzeit ist ein weiterer Prototyp im Bau. Die Aussagegüte des erstellten *Hybrid-Modells* wird dann in direkten Zusammenhang mit den gemessenen Daten am Prüfstand gegenübergestellt.

## Ausblick

---

Im Bereich der technischen *Regressionsmodellierung* mit neuronalen Netzen wurden diverse Einflüsse bezüglich der Aussagegüte synthetisiert. Insbesondere wird im Bereich der Aktivierungsfunktion großes Potenzial zur Genauigkeitsoptimierung der technischen Systembildung gesehen. Hier können im Rahmen von Grey-Box Modellen und dem Wissen des physikalischen Hintergrundes wohl bessere Regressionsmodelle geschaffen werden, insbesondere für die Extrapolationsproblematiken.

Dynamische Systeme lassen sich ebenso mit Hilfe neuronaler Netze abbilden. Dabei können „long short-term memory“ *LSTM* im Bereich der *rekurrenten neuronalen Netze* (*RNN*) zu einer Abbildung von dynamischen Zeitverhalten genutzt werden (Hochreiter, S.; Schmidhuber, J. 1996: 473-479). Insbesondere können so dynamikabhängige Verhaltensweisen wie beispielsweise der Verschleiß, Trägheitssysteme oder Ähnliches abbildbar gemacht werden. Hierzu sollen noch weitere Untersuchungen stattfinden.

## Danksagung

---

In diesem Zuge möchten wir uns für die Zusammenarbeit mit der *DEWA GmbH* und dem *Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand* bedanken!

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Literaturverzeichnis

---

- Hochreiter, S.; Schmidhuber, J. (1996): LSTM can solve hard long time lag problems, *Advances in Neural Information Processing Systems* 9, 473-479
- Kaczmarek, D.; Lohrengel, A. (2019): Automatisierte Baugruppenoptimierung hinsichtlich Produktanforderungen am Beispiel eines Drehschieberverdichters, 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Seite 162 – 173
- Kaczmarek, D.; Lohrengel, A. (2020): Schnelle Produktevolution mit Hilfe hybrider Simulationstechniken - Produktneuentwicklung, *Institutsmittteilung Nr. 45*, Seite 49 – 62, IMW Clausthal, ISSN 0947-2274
- Rosenblatt, F. (1958): The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain, *Psychological Review* Bd. 65, Nr.6, S.386-408
- Rüdiger Reinhardt, Armin Hoffmann, Tobias Gerlach (2013): *Nichtlineare Optimierung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, doi:10.1007/978-3-8274-2949-0
- Timár, I. Optimierung ebener Fachwerke mit mehreren Zielfunktionen. *Forsch Ingenieurwes* 68, 121–125 (2004). <https://doi.org/10.1007/s10010-003-0116-5>
- VDI 2211 (2003): *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Berechnung in der Konstruktion*, VDI-Richtlinie
- Yeniay, Ö. (2005): Penalty Function Methods for Constrained Optimization with Genetic Algorithms. *Math. Comput. Appl.*, 10, 45-56. <https://doi.org/10.3390/mca10010045>

## Kontakt

---

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel  
Telefon: +49 5323 / 72 - 2270  
Dennis Kaczmarek M.Sc.  
Telefon: +49 5323 / 72 - 2147

Institut für Maschinenwesen  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Straße 32  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
[www.imw.tu-clausthal.de](http://www.imw.tu-clausthal.de)