

BETRACHTUNGEN ZU EINSPARMÖGLICHKEITEN BEI DER BESCHAFFUNG VON CHEMIEAPPARATEN AM BEISPIEL DER GRUNDWERKSTOFFE

Anregungen zur Werkstoffauswahl

Dr. Ulrich Killing, Nerdlen

In einer früheren Arbeit wurde gezeigt, wie beim Bau von Druckgeräten durch eine systematische Betrachtung von Fertigungsprozessen eine transparente und kostengünstige Qualitätssicherung (Abnahmeaktivität) gewährleistet werden kann [1]. Allerdings ist dies nur ein Beitrag, den die Technikabteilungen zur Kostensenkung im Investitionsgütergeschäft leisten können. Im Folgenden sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie durch das Verlassen etablierter Vorgehensweisen frei nach dem Motto „haben wir immer so gemacht“ entweder Herstellkosten von Investitionsgütern oder aber Produktionskosten beim späteren Betrieb der Komponenten eingespart werden können. Dabei sollen sowohl sofort umsetzbare Veränderungen aufgezeigt werden, aber auch zunächst noch utopisch klingende Betrachtungsweisen, die bisher im Druckgerätebau nicht allgemein bekannt sind, aufgezeigt und diskutiert werden.

Mögliche Einsparpotenziale können zum Beispiel durch die Verbesserung interner Abläufe bei der Beschaffung von Druckgeräten oder aber durch ein Optimieren des Projektmanagements erzielt werden. Hinzu kommen Einsparungen, die sich durch Änderungen von technischen Spezifikationen beim Bau von Druckgeräten generieren lassen (Bild 1).

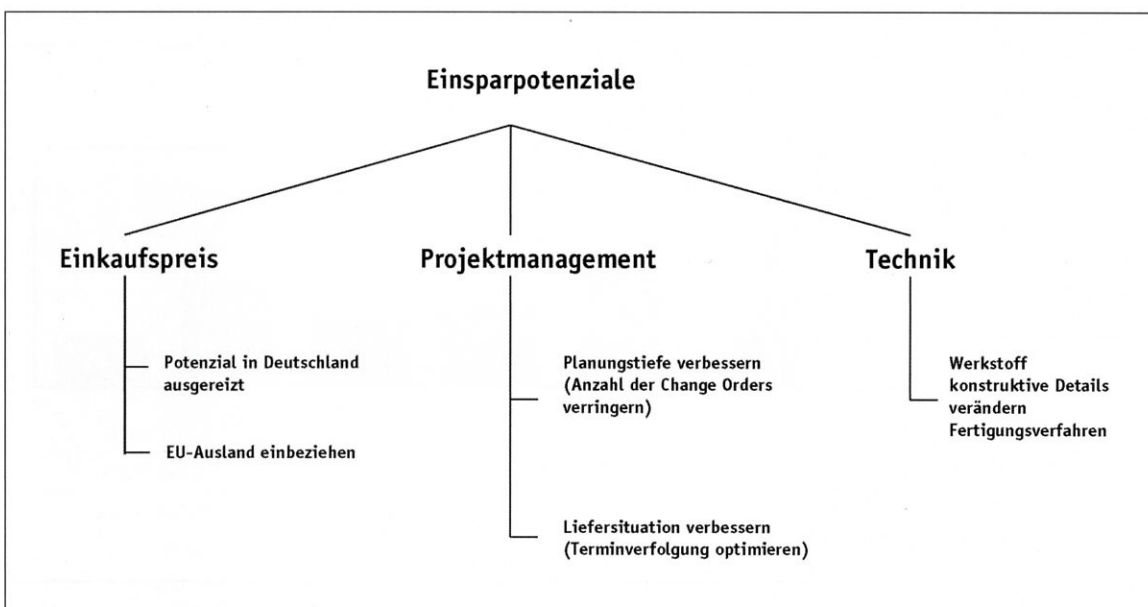
Der Einkauf von Apparaten im Ausland wurde durch die Vereinheitlichung von technischen Standards, wie EN- und EN-ISO-Normen, erheblich vereinfacht. Während vor nicht allzu langer Zeit die Beschaffung von Druckgeräten im Ausland aufgrund fehlender Kenntnisse des deutschen AD-Regelwerks (AD = Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter) mit Schwierigkeiten

verbunden war, vereinfachte sich der Prozess nach Inkrafttreten der europäischen Druckgeräterichtlinie sowie zahlreicher Bauvorschriften, zum Beispiel der EN 13445 für Druckbehälter und der EN 13480 für Rohrleitungen, erheblich. Dies führte dazu, dass einige Unternehmen der Chemie und Petrochemie ihre Bestellspezifikationen von AD- auf EN-Standard umgestellt haben. Dadurch gelang es, die Beschaffungskosten aufgrund des niedrigeren Lohnniveaus sowie der geringeren Werkstoffkosten in vielen europäischen Ländern erheblich zu senken. Allerdings muss eine entsprechende Qualitätssicherung durch eigene Fachleute gewährleistet sein. Im Folgenden soll

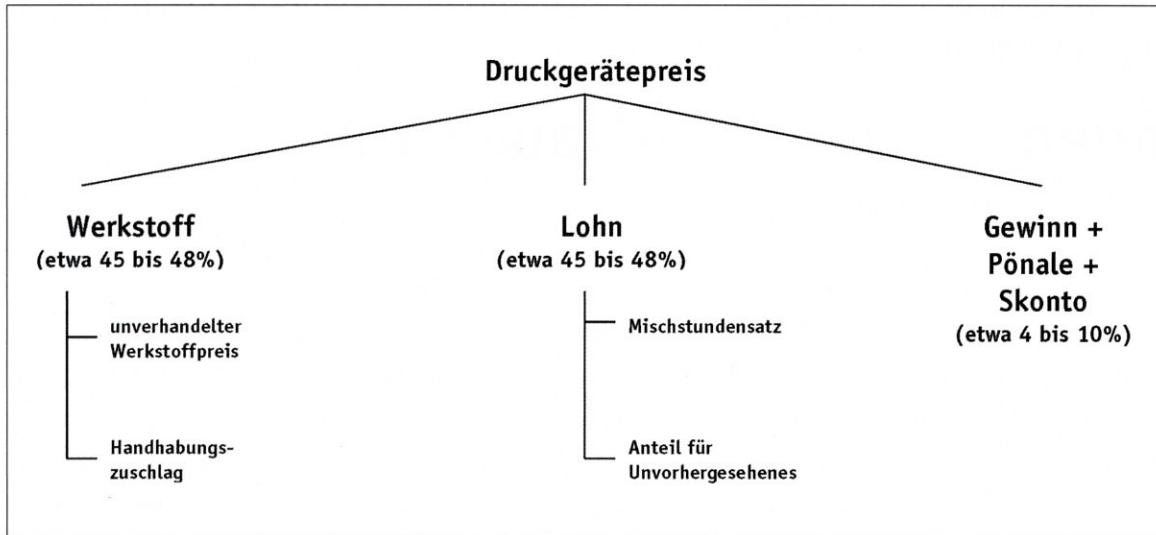
allerdings ausschließlich auf technische Einsparpotenziale näher eingegangen werden.

Einsparpotenziale beim Bau von Druckgeräten

Bild 2 ist zu entnehmen, dass der Preis eines Druckgeräts im Wesentlichen von drei Parametern, nämlich den Werkstoff- und Personalkosten sowie dem eingerechneten Gewinn des Herstellers, abhängig ist. Dabei können Kunden zum Beispiel über die Werkstoffauswahl die Werkstoffkosten bzw. durch die Spezifizierung von wirtschaftlicheren Fertigungsverfahren die Anzahl der benötigten Fertigungsstunden und somit auch die Lohnkosten beeinflussen. Im Folgenden werden



◀ Bild 1. Beispiele für mögliche Einsparpotenziale bei der Beschaffung von Druckgeräten



◀ Bild 2. Einflussfaktoren für den Preis eines Druckgeräts

zunächst Einsparpotenziale bei der Verwendung hochlegierter Stähle aufgezeigt, wobei diese Beispiele keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben können. Vielmehr hängen die Werkstoffkosten von zahlreichen anderen Faktoren ab. Beispielsweise können der Nachweis besonderer Werkstoffeigenschaften sowie von Sonderspezifikationen des Kunden im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung der Grund- oder Schweißzusatzwerkstoffe oder aber spezielle Toleranzanforderungen für die Wanddicke oder der Oberflächenbeschaffenheit die Werkstoffkosten beeinflussen.

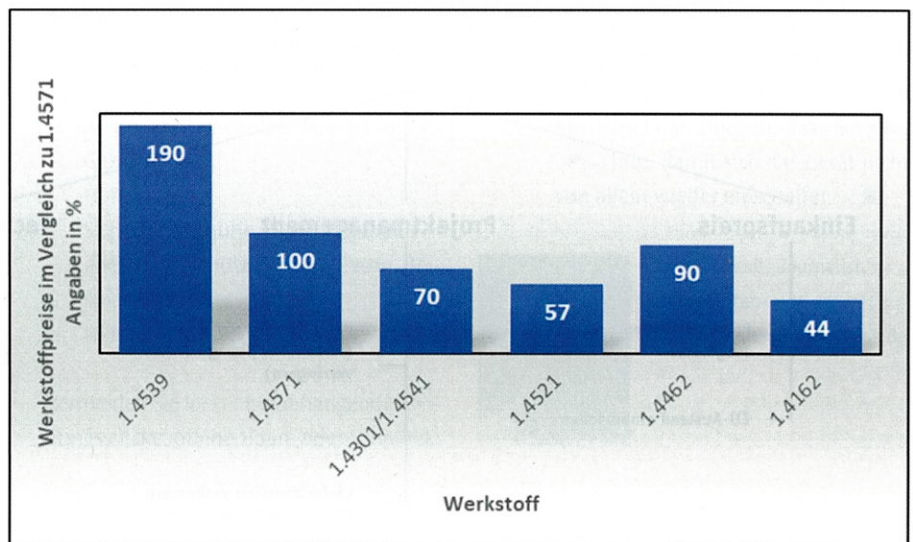
Die im Folgenden dargestellten Vorschläge für mögliche Einsparungen basieren lediglich auf Einzelfallbetrachtungen. So wurden lediglich die Werkstoffpreise für 10 mm dicke Bleche recherchiert und andere zum Bau benötigte Halbzeuge, wie Böden, Rohre, Flansche oder Verbindungselemente, nicht untersucht (Bild 3). Eine Untersuchung der Marktverfügbarkeit der einzelnen Werkstoffe bzw. Halbzeuge wurde ebenfalls nicht vorgenommen. Zur weiteren Vereinfachung der Thematik wurden die durch einen Wechsel des Grundwerkstoffs verursachten Änderungen der Wanddicken lediglich für einen Druck von 10 bar und eine Temperatur von 250°C ermittelt, wobei zur Berechnung der Einfachheit halber die Kesselformel benutzt wurde. Die daraus resultierenden Dickenänderungen wurden mit der Dicke von Blechen aus 1.4571 in Bezug gesetzt (Bild 4). Daher können die folgenden Ausführungen lediglich Tendenzen aufzeigen und die in diesem Beitrag prognostizierten Einsparungen in Wirklichkeit höher oder niedriger ausfallen.

Einsparpotenziale bei der Auswahl des Grundwerkstoffs

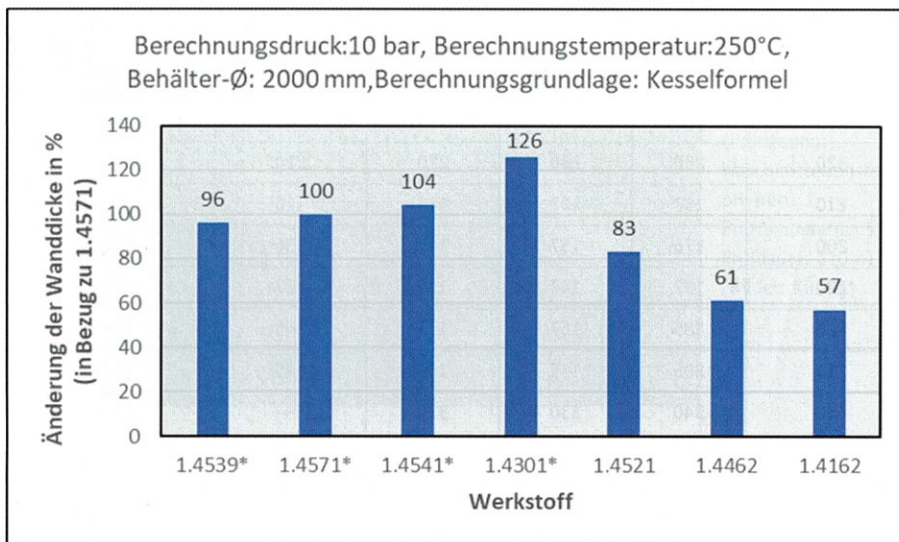
Molybdänfreie versus molybdänlegierte CrNi-Stähle

In vielen Bereichen der chemischen und petrochemischen Industrie werden als Standardwerkstoffe die mit 2 bis 2,5% Mo legierten CrNi-Stähle (zum Beispiel 1.4401, 1.4404, 1.4571) eingesetzt. Diese Werkstoffwahl ist vielfach nur dann sinnvoll, wenn die in der Anlage zur Verarbeitung kommenden Stoffe Halogenverbindungen, wie Chloride, Jodide oder Bromide, enthalten. Ist dies nicht der Fall bzw. sind die Gehalte der genannten Stoffe niedrig, können durchaus auch molybdänfreie, meist kostengünstigere CrNi-Stahlqualitäten, zum Beispiel 1.4301, 1.4541, als Konstruktionswerkstoff verwendet werden, da diese Werkstoffe vielfach ein ähnliches Korrosionsverhalten

gegen flächenhaften Werkstoffabtrag aufweisen wie die mit 2 bis 2,5% Mo legierten Stähle. Durch den Einsatz der molybdänfreien CrNi-Stähle lassen sich je nach Größe und Wanddicke des Druckgeräts Einsparungen bei den Werkstoffkosten von bis zu 30% realisieren. Verglichen mit 1.4571 wird jedoch die Werkstoffkosteneinsparung durch die erforderlichen, größeren Wanddicken wieder aufgehoben. Dies gilt insbesondere für die Verwendung von 1.4301 als Konstruktionswerkstoff. Bei Einsatz von 1.4541 werden nur geringfügig höhere Wanddicken erforderlich. Allerdings darf nicht unerwähnt bleiben, dass gegebenenfalls beim späteren Betrieb der Anlage Einschränkungen bei der Flexibilität im Hinblick auf die Verwendung bestimmter halogenionhaltiger Einsatzstoffe in Kauf genommen werden müssen.



▲ Bild 3. Preisvergleich für chemisch beständige Stähle (Basis: Blech, Dicke 10 mm)



▲ Bild 4. Veränderung der Dicke im Vergleich zu Blechen aus 1.4571 (*Berechnung erfolgte mit $R_{p1,0}$)

Ferritische Cr-Stähle versus CrNi-Stähle

Eine im Druckgerätebau wenig beachtete Werkstoffgruppe stellen die korrosionsbeständigen ferritischen Cr-Stähle dar. Während Cr-Stähle mit Cr-Gehalten von etwa 12% für den Einsatz in chemischen Prozessanlagen weniger geeignet erscheinen, können ferritische Cr-Stähle mit Cr-Gehalten von 16 bis 18%, zum Beispiel X2CrTi 17, 1.4520, durchaus als Ersatz für CrNi-Stähle, wie 1.4301 oder 1.4541, angesehen werden. Besonders interessant erscheint in diesem Zusammenhang der Einsatz des molybdänlegierten Cr-Stahls X2CrMoTi18-2 (1.4521), der aus Sicht des Korrosionsverhaltens ähnliche Eigenschaften wie die im Chemieanlagenbau häufig verwendeten CrNi-Stähle 1.4401/1.4571 aufweisen sollte. Legt man für die Beurteilung des Lochkorrosionsverhaltens von chemisch beständigen Stählen den sogenannten Pitting-Index $PI = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$ zugrunde, so ergibt

der Vergleich von 1.4520 mit 1.4301/1.4541 sowie 1.4521 mit 1.4401/1.4571 ähnliche PI-Werte (Tabelle 1). Somit ist von einem vergleichbaren Verhalten der ferritischen Cr-Stähle in Bezug auf Lochkorrosion wie bei den betrachteten CrNi-Stählen auszugehen.

Im Vergleich zu den austenitischen CrNi-Stählen weisen die ferritischen Cr-Stähle eine deutlich höhere Festigkeit, insbesondere bei höheren Temperaturen, auf (Tabelle 2). Daraus ergibt sich bei Einsatz von ferritischen Cr-Stählen die Möglichkeit, die drucktragenden Bauteile mit geringerer Wanddicke als bei Verwendung von CrNi-Stählen auszuführen. Somit können Druckgeräte mit geringeren Gewichten realisiert werden, wodurch zusätzlich Einsparungen bei etwaig notwendigen Apparategerüsten erzielt werden können.

Ein weiterer Vorteil von ferritischen Cr-Stählen liegt in der höheren Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe begründet

(Tabelle 2), die im Vergleich zu CrNi-Stählen etwa doppelt so hoch ist. Bedingt durch diese Tatsache lassen sich vielfach im Chemiebetrieb Produktionskosten senken, wenn es zum Beispiel um den Zeitgewinn beim Aufheizen und/oder Abkühlen von Medien durch außen angebrachte Heizsysteme, zum Beispiel Rohrschlangen, geht. In Verbindung mit einer im Vergleich zu CrNi-Stählen geringeren Behälterwanddicke sollten diese Prozessschritte deutlich schneller vonstattengehen als bei Verwendung von CrNi-Stählen mit größerer Wanddicke und deutlich geringerer Wärmeleitfähigkeit (Tabelle 2). Allerdings darf nicht unerwähnt bleiben, dass die Verarbeitbarkeit der ferritischen Cr-Stähle, insbesondere das Schweißen dieser Werkstoffe, ungleich schwieriger ist, als dies bei den austenitischen CrNi-Stählen der Fall ist. Insbesondere die Neigung der Cr-Stähle zur Grobkornbildung beim Schweißen sowie das Ausscheiden von intermetallischen Phasen machen das Fügen von ferritischen Cr-Stählen komplizierter, als dies beim Schweißen von CrNi-Stählen der Fall ist.

Je nach Wanddicke kann ein Vorwärmen der Bauteile sowie eine anschließende Glühung erforderlich sein. Artgleiche Schweißzusätze für das Lichtbogenhand-, Wolfram-Inertgas(WIG)- und Metall-Aktivgas(MAG)-Schweißen sind auf dem Markt erhältlich. Vielfach wird jedoch empfohlen, diese Werkstoffe mit CrNi-Stahlzusätzen zu schweißen, was jedoch die Wanddicke der Druckgeräte im Vergleich zum artgleichen Fügen erhöhen dürfte. Hier sollte über den Einsatz von Schweißzusätzen nachgedacht werden, wie sie für das Fügen von Duplex-Stählen üblich sind, wobei die Betriebstemperatur des Druckgeräts dann auf maximal 250°C begrenzt wird. Die Bandbreite der auf

▼ Tabelle 1. Chemische Zusammensetzungen und Pitting-Indizes chemisch beständiger Stähle

Werkstoff	Werkstoff-Nr.	Legierungsgehalte (Massenanteil in %) nach DIN EN 10028-7				Pitting-Index	
		Cr	Ni	Mo	N	PI (max.)	PI (min.)
X2CrTi17	1.4520	16–18	–	–	<0,015	18,5	16,0
X2CrMoTi18-2	1.4521	17–20	–	1,8–2,5	–	28,3	22,9
X5CrNi18-10	1.4301	17,5–19,5	8,0–10,5	–	<0,10	21,1	17,5
X6CrNiTi18-10	1.4541	17–19	9,0–12,0	–	–	19,0	17,0
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	16,5–18,5	10,0–13,0	2,0–2,5	<0,10	28,3	23,1
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	16,5–18,5	10,5–13,5	2,0–2,5	–	26,8	23,1
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	19,0–21,0	24,0–26,0	4,0–5,0	<0,15	39,9	32,2
X2CrMnNiN22-5-2	1.4162	21,0–22,0	1,35–1,7	0,1–0,8	0,20–0,25	28,6	24,5
X2CrNiMoN22-5	1.4462	21,0–23,0	4,5–6,5	2,5–3,5	0,10–0,22	38,1	30,9

▼ Tabelle 2. Vergleich der Festigkeiten sowie der Wärmeleitfähigkeiten chemisch beständiger Stähle

Werkstoff	Werkstoff-Nr.	Warmstreckgrenze $R_{p0,2}$ nach DIN EN 10028-7					Wärmeleitfähigkeit in W/mK
		20°C	100°C	200°C	250°C	300°C	
X2CrTi17	1.4520	200	195	170	160	155	25–30
X2CrMoTi18-2	1.4521	320	250	230	220	210	25–30
X5CrNi18-10	1.4301	210	157	127	118	110	13–15
X6CrNiTi18-10	1.4541	200	176	157	147	136	13–15
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	220	177	147	137	127	13–15
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	220	185	167	157	145	13–15
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	214	205	175	160	145	11–13
X2CrMnNiN22-5-2	1.4162	450	340	330	320	–	13–15
X2CrNiMoN22-5	1.4462	460	360	315	300	–	13–15

dem Markt verfügbaren Wanddicken von Blechen aus ferritischen Cr-Stählen dürfte im Vergleich zu CrNi-Stählen ebenfalls eingeschränkt sein. Blechwanddicken von <15 mm sind jedoch im Handel erhältlich. Größere Wanddicken bedürfen der Absprache mit dem jeweiligen Stahlhersteller. Allerdings sind ferritische Cr-Stähle in Form von Bandmaterial mit unterschiedlichen Breiten und Dicken marktgängig. Somit erscheint die Verwendung dieser Werkstoffe zum Auftragschweißen mit Bandedelektroden, sei es mithilfe des Bandplattierens durch Unterpulverschweißen (UP) oder des Bandplattierens durch Elektroschlackeschweißen (RES), eine Alternative, die jedoch in Laborversuchen noch näher untersucht werden muss. Im Vergleich zum Plattieren mit CrNi-Stahl-Bändern sollte sich dabei ein Preisvorteil beim Kauf der Zusatzwerkstoffe ergeben. Darüber hinaus ist der bessere Wärmedurchgang bei Prozessen mit äußeren Heizsystemen zu nennen. Während austenitische Plattierungen aufgrund ihrer geringen Wärmeleitung als „Wärmebremse“ wirken, erreicht die von außen zugeführte Wärme den chemischen Prozess aufgrund der besseren Wärmeleitfähigkeit von ferritischem Cr-Stahl schneller, wodurch Aufheiz- und/oder Abkühlzeiten gegebenenfalls reduziert werden können.

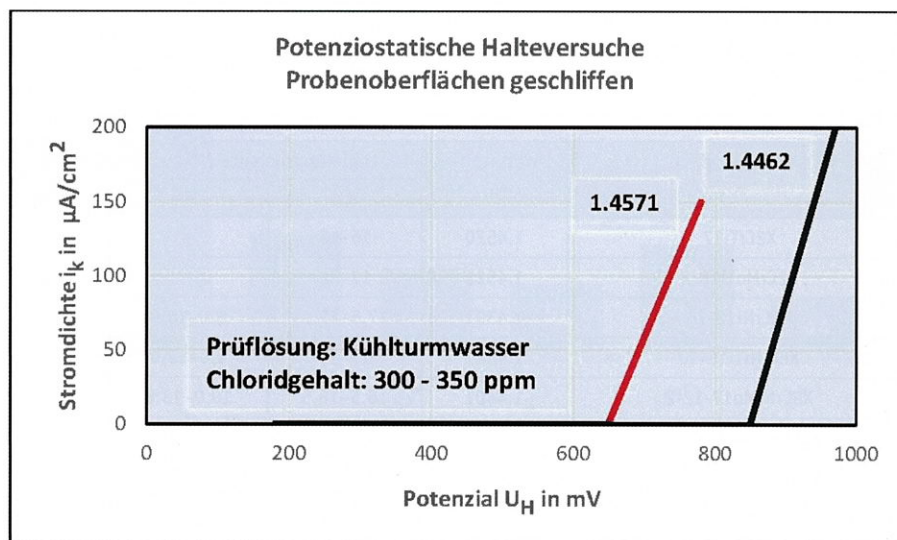
Würde man den Behälterwerkstoff 1.4571 durch den ferritischen Cr-Stahl 1.4521 ersetzen, dürften je nach Wanddicke und Durchmesser des Druckgeräts Einsparungen bei den Werkstoffkosten von 30 bis 40% realistisch sein. Selbst wenn ein Teil der Werkstoffkostensparnis durch den höheren Fertigungsaufwand beim Schweißen aufgezehrt wird, sollte in der Gesamtkostenbetrachtung immer noch eine deutliche Einsparung realistisch sein. Bei

dieser Betrachtung bleiben etwaige Senkungen der Herstellkosten im späteren Produktionsprozess unberücksichtigt.

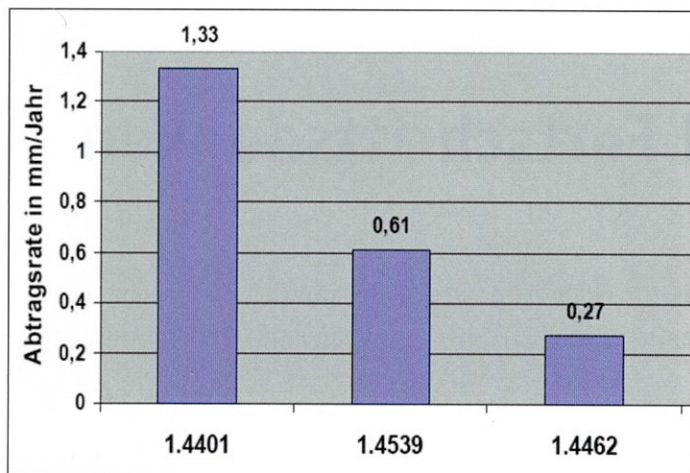
Duplexstähle versus CrNi-Stähle

Duplexstahl X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) versus austenitische CrNi-Stähle mit <2,5% Mo. Durch das Verwenden von 1.4462 können lediglich geringe Werkstoffkosteneinsparungen erzielt werden, da der Preis von 1.4462 im Vergleich zu den Kosten von 1.4571, 1.4401 usw. in etwa gleich hoch ist. Allerdings können Werkstoffkosten eingespart werden, wenn aufgrund hoher Drücke eine große Behälterwanddicke erforderlich wird. Bedingt durch die höheren Festigkeiten von 1.4462 errechnen sich bei Verwendung dieses Stahltyps geringere Wanddicken als beispielsweise bei Einsatz von 1.4571, sodass aufgrund des geringeren Werkstoffbedarfs doch wieder eine Einsparung erreicht werden kann.

Betrachtet man die Korrosionseigenschaften von 1.4462, so ist die Gefahr des Auftretens von Loch- und Spannungsrisskorrosion im Vergleich zu 1.4571/1.4401 geringer. Während der Pitting-Index von 1.4462 je nach chemischer Zusammensetzung Werte von 30,9 bis 38,1 annehmen kann, liegt dieser Index im Fall von 1.4571 zwischen 23,1 und 26,8 (Tabelle 1). Dadurch erklärt sich das höhere Lochkorrosionspotenzial von etwa 850 mV des Stahls 1.4462 im Vergleich zu 1.4571, der einen Wert von rund 650 mV erreicht (Bild 5). Ferner ist die Neigung von 1.4462 zur Bildung von Spannungsrisskorrosion aufgrund der zweiphasigen Gefügestruktur weniger ausgeprägt, als dies zum Beispiel bei 1.4571/1.4401 der Fall ist. Darüber hinaus weist 1.4462 in vielen Medien eine bessere Beständigkeit gegen flächenhaften Werkstoffabtrag auf als die CrNi-Stähle mit 2 bis 2,5% Mo, zum Beispiel 1.4401 (Bild 6). Allerdings muss darauf hingewiesen



▲ Bild 5. Vergleich der Lochkorrosionsbeständigkeit von 1.4571 und 1.4462 in Kühlturmwasser (T = 90°C)



◀ Bild 6. Ergebnisse von Auslagerungsversuchen mit chemisch beständigen Stählen (Prüflösung: Waschmittelrohstoff, pH-Wert: 1, Prüftemperatur: 55°C, Prüfdauer: 610 h) (Bilder: Killing)

werden, dass der Stahl 1.4462 bedingt durch Ausscheidungen von intermetallischen Phasen verspröden kann (475°C-Versprödung), sodass der Einsatzbereich für den Grundwerkstoff in Druckgeräteregelwerken auf maximal 280°C begrenzt wird. Bei einer artgleichen Schweißung sinkt die Zulassungsgrenze auf Temperaturen $\leq 250^\circ\text{C}$.

Duplexstahl X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) versus austenitischer CrNi-Stahl X1NiCrMoCu25-20-5 (1.4539). Eine Entscheidung für die Verwendung des Duplexstahls anstelle des höher legierten CrNi-Stahls 1.4539 ist sicherlich nur in Einzelfällen und nach ausführlicher Überprüfung der Korrosionsbeständigkeit in den zu erwartenden Produktionsmedien möglich. Hierzu sind meistens umfangreiche Labor- und/oder Betriebsversuche erforderlich. Sollte sich jedoch aus diesen Tests eine ausreichende Praxiseignung von 1.4462 ergeben, sind im Vergleich zu 1.4539 erhebliche Kosteneinsparungen beim Bau eines Druckgeräts zu erwarten. Der Preis für den Werkstoff 1.4539 kann verglichen mit 1.4462 durch aus doppelt so hoch sein. Hinzu kommen die Einsparungen aufgrund der geringeren Wanddicke des Duplexstahlbehälters bedingt durch die höhere Festigkeit von 1.4462 (Tabelle 2).

Duplexstahl X2CrMnNiN22-5-2 (1.4162) versus austenitische CrNi-Stähle mit $< 2,5\%$ Mo. Der Werkstoff 1.4162, auch bekannt als „Lean-Duplex“, stellt eine sehr interessante Alternative zu den üblicherweise im Apparatebau verwendeten austenitischen CrNi-Stählen, zum Beispiel 1.4571 oder 1.4401, dar. Insbesondere das Verhalten von 1.4162 im Hinblick auf das Auftreten von Loch- und

Spannungsrissskorrosion dürfte vergleichbar, wenn nicht sogar besser sein als bei den im Apparatebau bekannten CrNi-Stählen mit 2 bis 2,5% Mo (Tabelle 1). Die gleiche Aussage gilt im Übrigen auch für das Verhindern von flächenhaftem Werkstoffabtrag. Für den Fall, dass die Werkstoffauswahl für eine Neuanlage durch Korrosionsversuche überprüft werden soll, ist das Einbeziehen dieses Duplexstahls in das Versuchsprogramm zu empfehlen. Als weiterer Vorteil dieses Werkstoffs sind die höheren Festigkeitswerte im Vergleich zu austenitischen CrNi-Stählen zu nennen (Tabelle 2). Ferner sind die Werkstoffkosten, zum Beispiel für Bleche aus 1.4162, um bis zu 50% niedriger als für 1.4571. Nachteilig ist unter Umständen die Einschränkung des Einsatzbereichs von 1.4162 auf Temperaturen $\leq 250^\circ\text{C}$ zu bewerten.

Duplexstähle kostengünstige Alternative

Die Ausführungen in diesem Beitrag sollen den Anwendern, aber auch den Herstellern von Chemieapparaten Anregungen vermitteln, wie man durch eine gezielte Auswahl von Werkstoffen Einsparungen erzielen kann. Die vorgestellten Beispiele erheben natürlich keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Vielmehr muss im Einzelfall entschieden werden, ob genügend Daten, zum Beispiel im Hinblick auf die zu erwartende Betriebsweise des Geräts und die damit verbundene Korrosionsbelastung, vorliegen, sodass ein gefahrloser Einsatz eines neuen Werkstoffs verantwortet werden kann. Ferner muss darauf hingewiesen werden, dass die prognostizierten Einsparpotenziale lediglich auf Einzelfallbetrachtungen basieren, tendenziell jedoch zutreffen.

Fasst man die vorgestellten Ausführungen zusammen, stellen Duplexstähle eine kostengünstige Alternative zu den vielfach im Druckgeräteeinsatz verwendeten CrNi-Stählen mit 2 bis 2,5% Mo dar. Insbesondere bei Verwendung des Werkstoffs 1.4162 lassen sich im Vergleich zu 1.4571 deutliche Kostenvorteile erzielen. Voraussetzung sind allerdings Betriebstemperaturen $\leq 250^\circ\text{C}$ und möglichst hohe Betriebsdrücke. Darüber hinaus soll nicht unerwähnt bleiben, dass auch eine Substitution der CrNi-Stähle 1.4301/1.4541 durch den Duplexwerkstoff 1.4162, sowohl was die Werkstoffkosten als auch was den Zugewinn an Korrosionsbeständigkeit angeht, durchaus eine sinnvolle Alternative darstellen kann.

Für den Bau von Druckgeräten, die mit außen liegenden Heiz- und Kühlsystemen ausgestattet werden müssen, sollte bei der Werkstoffauswahl für den Druckmantel der ferritische Cr-Stahl 1.4521 in Betracht gezogen werden. Im Vergleich zu CrNi-Stählen (zum Beispiel 1.4571, 1.4541, 1.4301) errechnen sich geringere Behälterwanddicken. Ferner weist dieser Werkstoff eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als die genannten CrNi-Stähle auf, sodass betriebliche Aufheiz- und Abkühlvorgänge beschleunigt stattfinden können und gegebenenfalls Produktionskosten eingespart werden.

Letztlich bleibt anzumerken, dass durch eine Reduzierung der drucktragenden Wanddicken sowohl die Werkstoffkosten als auch die Fertigungskosten, zum Beispiel für Schweißvorgängen und Schweißarbeiten, reduziert werden. Da außerdem geringere Wanddicken zu einem verminderten Apparategewicht führen, sind Einsparungen beim Bau von Apparaterüsten (Stahlbaukonstruktionen) wahrscheinlich. ■



Dr.-Ing. Ulrich Killing, Beratungsbüro für Schweiß- und Werkstofftechnik, Nerdlen, beratungsbuero-killing@t-online.de

Literatur

- [1] Killing, U.; Lemke, R.: Systematik für Lieferantenauswahl und Qualitätssicherung. Der Praktiker 73 (2021), Nr. 1-2, S. 30-33.