
1. Einführung

Lesern, die zunächst einen kurzen Einblick über die neuartigen, nanoporösen Nickelbasis-Membranen erlangen möchten, sei dieses Kapitel sowie Abschnitt 3.1 *Übersicht: Fertigung poröser Strukturen auf Nickelbasis* und Kapitel 6 *Zusammenfassung und Ausblick* empfohlen. Weitere Details zu den Eigenschaften und zum Anwendungspotenzial des Funktionswerkstoffes werden in den Kapiteln 4 *Untersuchung der Eigenschaften* und 5 *Untersuchung des Anwendungspotenzials* aufgeführt, wobei jeweils am Ende eines jeden Kapitels, Abschnittes und Unterabschnittes eine Diskussion bzw. Zusammenfassung der behandelten Themen erfolgt. Kapitel 2 *Nickelbasis-Legierungen bei erhöhten Temperaturen* und Kapitel 3 *Untersuchung des Herstellungsprozesses* umfassen die theoretischen Grundlagen und detaillierte Untersuchungen zur Optimierung des Herstellungsprozesses und sollen, ebenso wie das Eigenschafts- und Anwendungskapitel, Grundlage für weiterführende Forschungen darstellen. Auch hier befinden sich am Ende jedes Themenbereiches die entsprechenden Diskussionen und spezifischen Zusammenfassungen. Die verwendeten Verfahren, beginnend mit der Bereitstellung des Ausgangsmaterials bis zur digitalen Bildanalyse, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anhang näher beschrieben.

1.1. Nanoporöse Strukturen

Nanoporöse Strukturen¹ zeigen ein weit reichendes Anwendungspotenzial und sind bereits in einigen Bereichen fest etabliert. So erfolgt z. B. die Proteinabtrennung des menschlichen Blutes in einer künstlichen Niere mit Hilfe nanoporöser Polymermembranen [242]. Neben dem Gebiet der Medizintechnik bieten die feinpörosen Materialien jedoch auch zahlrei-

¹„Nanoporös“ ist eine nicht konventionsgemäße Bezeichnung von Materialien mit Porendimensionen im Nanometerbereich, die sich allerdings zunehmend als Oberbegriff durchsetzt. Die exakte Nomenklatur innerhalb dieser Klasse ist nach IUPAC definiert und umfasst mikroporös (Porengröße < 2 nm), mesoporös (2 nm - 50 nm) und makroporös (> 50 nm).

che weitere, interessante Einsatzmöglichkeiten. Im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung kann z. B. salzhaltiges oder verschmutztes Wasser durch die Verwendung nanoporöser Membranen effektiver für den menschlichen Gebrauch aufbereitet werden [135], wodurch u. a. die Konstruktion von leistungsfähigeren, mobilen Anlagen für den Einsatz in Katastrophengebieten ermöglicht wird. Im Bereich der Energie- bzw. Verkehrstechnik werden entsprechende Membranen für den Bau von Brennstoffzellen benötigt [127, 169, 229] und ein aktuelles Thema hinsichtlich des Umweltschutzes ist die Filtrierung feinsten Rußpartikel aus dem Abgasstrom [2, 37]. Weiterhin werden nanoporöse Membranen als Filter für Bakterien eingesetzt. Zum Beispiel basieren kommerzielle Wasserhahnfilter, die u. a. zur Vermeidung einer Legionellen-Infektion immungeschwächter Personen verwendet werden, auf einer feinen Porosität [180, 253].

Als Grundwerkstoff für die Herstellung nanoporöser Strukturen zeigen alle Materialklassen, d. h. Polymere, Keramiken und Metalle, gleichermaßen Berechtigung. Zurzeit sind im Rahmen technisch relevanter Anwendungen jedoch primär Polymerstrukturen dominant, da deren Fertigung bislang äußerst wirtschaftlich umgesetzt werden kann. In der Regel werden die porösen Membranen auf Polymerbasis aus einer Lösung ausgeschieden. Dieses geschieht entweder durch eine schnelle Abkühlung oder durch Zugabe eines Fällungsmittels [11].

Aufgrund der mechanischen sowie thermischen Eigenschaften ist das Einsatzspektrum von Polymerstrukturen begrenzt. Für hohe Temperaturen bzw. eine höhere Eigenstabilität² ist z. B. der Einsatz keramischer Membranen sinnvoll. Neben der Sintertechnologie, die auf der Verwendung feinsten, homogener Pulver basiert, wurden für die Erzeugung ultradünn³, poröser Keramikstrukturen spezielle nanolithographische Verfahren [42, 240] und Technologien, die auf dem Prinzip der Selbstorganisation basieren [263], entwickelt. Diese eignen sich bislang jedoch aus wirtschaftlichen Gründen bzw. aufgrund von Schwierigkeiten bei der Prozesshomogenität nicht für eine kommerzielle Verwendung. Einen vielversprechenden Ansatz bietet hingegen die thermische Alterung amorpher Siliziumdünnschichten, die zu einer kontrollierten Erzeugung von Membranen mit Porengrößen im Bereich von wenigen zehn Nanometern genutzt werden kann [233].

²Polymere Membranen werden häufig in Verbindung mit grobporösen Stützstrukturen verwendet.

³Durch die Kombination äußerst geringer Porendimensionen mit sehr geringen Membrandicken soll eine effiziente, massenbasierte Stofftrennung bei gleichzeitig hohem Stoffdurchsatz erreicht werden.

Dass Keramiken als Basiswerkstoff für feinporöse Strukturen ebenfalls nicht das gesamte Anwendungsspektrum gänzlich zufriedenstellend abdecken können, wird u. a. im Falle von Fahrzeugpartikelfiltern deutlich. Diese leiden unter der geringen Bruchzähigkeit dieser Materialklasse, so dass starke Stöße im Betrieb zu einem umfassenden Funktionsverlust führen können. Zudem kann die geringe thermische und elektrische Leitfähigkeit dem Material bei einigen Anwendungen zum Nachteil gereichen.

In diesen Fällen können die Vorteile von Metallen genutzt werden. Neben einem flexiblen elektrischen und thermischen Verhalten weisen diese bei Bedarf gute Steifigkeiten und hohe Festigkeiten, insbesondere Bruchzähigkeiten, auf. Je nach Legierungszusammensetzung sind darüber hinaus spezielle chemische bzw. katalytische Effekte umsetzbar. Somit rundet die Verwendung von Metallen als Grundstoff für nanoporöse Strukturen das Anwendungsspektrum ab bzw. erweitert dieses hinsichtlich bislang nicht umsetzbarer Möglichkeiten.

Ein verbreitetes Verfahren zur Erzeugung poröser Metalle ist das Aufschäumen im flüssigen oder teigigen Zustand mit Hilfe von Gasen. Dabei kann ein Gas direkt in die Schmelze eingeleitet werden oder durch die Zersetzung eines Treibmittels entstehen [47, 104]. Die resultierenden Metallstrukturen weisen jedoch vorwiegend geschlossene Poren auf, so dass diese für einen Großteil funktionaler Anwendungsfelder nicht geeignet sind. Zudem fällt die erreichbare Gleichmäßigkeit der Porenstruktur gering aus. Die zur Herstellung von Metallschäumen ebenfalls denkbaren Gussprozesse stoßen bei der Fertigung von Gusskernen in den benötigten Dimensionen an ihre Grenzen [73].

Um offenporige feinporöse Strukturen zu erzeugen, ist in Analogie zu den Keramiken auch im Falle der Metalle ein Sinterprozess möglich [166]. Dabei können zahlreiche Legierungen, wie z. B. Nickelbasis-Legierungen, verarbeitet werden [69]. Jedoch stellt die hohe Anforderung an Feinheit und Homogenität der Ausgangspulver einen limitierenden Faktor dar, so dass bislang selbsttragende Membranen mit Porendimensionen im Nanometerbereich nicht kommerziell verfügbar sind. Außerdem sind die offenporigen Strukturen aus Gründen des Sinterverfahrens nicht regelmäßig, so dass eine Streuung der Porendimensionen prozessimmanent ist.

Als Alternative zur Erzeugung nanoporöser Metallstrukturen existieren bislang hauptsächlich Verfahren mit Nischencharakter. Zu diesen zählen das selektive Herauslösen von Atomen eines Elementes aus binären Legierungen, z. B. Silberatome aus Silber-Gold-Legierungen [50, 222], oder

die Erzeugung von Raney-Nickel [112]. Die Materialeigenschaften dieser Strukturen (Raney-Nickel ist z. B. pyrophor) lassen jedoch nur ein eingeschränktes Einsatzgebiet zu.

Daher könnte ein neuartiger Herstellungsprozess zur Fertigung nanoporöser Nickelbasis-Strukturen interessant sein, der die Erzeugung äußerst regelmäßiger, nanoporöser Metallmembranen erlaubt und im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wird. Neben der Beschreibung der Fertigungsroute werden weit reichende Untersuchungen zur Prozessoptimierung sowie Analysen der umsetzbaren mechanischen und funktionellen Eigenschaften diskutiert. Abschließend folgt eine Vorstellung potenzieller Anwendungsfelder.