

AEROSIL® und AEROXIDE® für Flüssigsiliconkautschuk (LSR/LIMS)

Technische Information 1253



Für die freundliche Überlassung des Bildmaterials
bedanken wir uns bei den Firmen:

ARBURG GmbH + Co
Arthur-Hehl-Straße
D-72290 Loßburg

und

NETZSCH Feinmahltechnik GmbH
Sedanstraße 70
D-95100 Selb

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	4
1.1 Flüssigsilikonkautschuk (LSR/LIMS) ein Werkstoff mit wachsender Bedeutung	4
1.2 Bestandteile des LSR-Systems	5
1.3 Verarbeitung von LSR	5
2 Hohe Anforderungen an Evonik Degussa Kieselsäuren bei der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung von LSR-Silikonkautschuk	6
3 Herstellung und Eigenschaften von pyrogenem AEROSIL®	7
3.1 Herstellung	7
3.2 Eigenschaften	7
4 Herstellung von LSR-Systemen	9
4.1 Compoundierung mittels „in-situ“-Hydrophobierung auf Basis von hydrophilen Kieselsäuren	9
4.2 Compoundierung mit hydrophoben Kieselsäuren	10
5 Effekte von hydrophobem AEROSIL® in einer LSR-Formulierung	11
5.1 Rheologische Eigenschaften der unvernetzten LSR-Compounds	11
5.2 Mechanische Eigenschaften der LSR-Vulkanisate	12
5.3 Optische Eigenschaften der LSR-Vulkanisate	13
6 Experimenteller Teil	14
6.1 LSR-Formulierung und Compoundierung	14
6.2 Vernetzung und Nachvulkanisation	15
7 Wirkungsvoller Hitzestabilisator für LSR-Formulierungen	15
7.1 Herstellung und Eigenschaften von AEROXIDE® TiO ₂ P 25	15
7.1.1 Herstellung	15
7.1.2 Physikalisch chemische Eigenschaften	16
7.2 Einfluss von AEROXIDE® TiO ₂ P 25 auf die Hitzestabilisierung von LSR	16
8 Zusammenfassung und Produktempfehlungen	17
8.1 Zusammenfassung	17
8.2 Produktempfehlungen	17
9 Literaturverzeichnis	18

1 Einleitung

Synthetische Kieselsäuren der Evonik Industries AG sind seit vielen Jahren in der Siliconindustrie bekannt. Sowohl pyrogene Kieselsäuren, als auch Fällungskieselsäuren werden als Verstärkeradditive zur Verbesserung der Eigenschaften des Siliconkautschuks eingesetzt.

Die pyrogenen Kieselsäuren in Form verschiedener hydrophiler und hydrophober Produkte von AEROSIL® finden in vielen verschiedenen Siliconsystemen (siehe **Abbildung 1**) Anwendung. Als wirkungsvolles Thixotropierungsmittel erhöhen sie beispielsweise die Viskosität und Standfestigkeit von Silicondichtungsmassen. Als effektive Verstärkerkomponente wirken sie sich vorteilhaft auf die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Siliconprodukte aus. Auch Produkte mit exzellenten optischen Eigenschaften (Transparenz) sind bei Verwendung von speziellen Typen von AEROSIL® realisierbar.

Hergestellt durch Flammenhydrolyse von Chlorsilanen und mit einem Siliciumdioxidgehalt von über 99,8 Gew.-% gehört AEROSIL® zu den reinsten kommerziell verfügbaren Kieselsäuren. Als anorganische Substanzen erfüllen die vollständig amorphen Produkte alle Forderungen der Verbraucher nach zuverlässigen und gesundheitlich unbedenklichen Rohstoffen.

Nach dem Verfahren zur Herstellung von AEROSIL® wird auch das hochdisperse Metalloxid AEROXIDE® TiO₂ P 25 hergestellt. Mit diesem Typen von AEROSIL® kann man im Siliconkautschuk eine Verbesserung der Wärmestabilität und somit auch eine Verbesserung der flammhemmenden Eigenschaften erzielen. Eigenschaften von hydrophilen und hydrophoben Typen von AEROSIL® sowie AEROXIDE® TiO₂ P 25 in der Anwendung Flüssigsiliconkautschuk werden in der vorliegenden Technischen Information vorgestellt. Dabei stehen vor allem aber die Eigenschaften der beiden hydrophoben Produkte

AEROSIL® R 812 S und AEROSIL® R 8200 im Vordergrund. Eine Reihe neuer und innovativer Versuchsprodukte für diese wachsende Siliconanwendung sind zur Zeit in Prüfung, so dass diese aktuelle Technische Information schon bald erweitert werden kann.

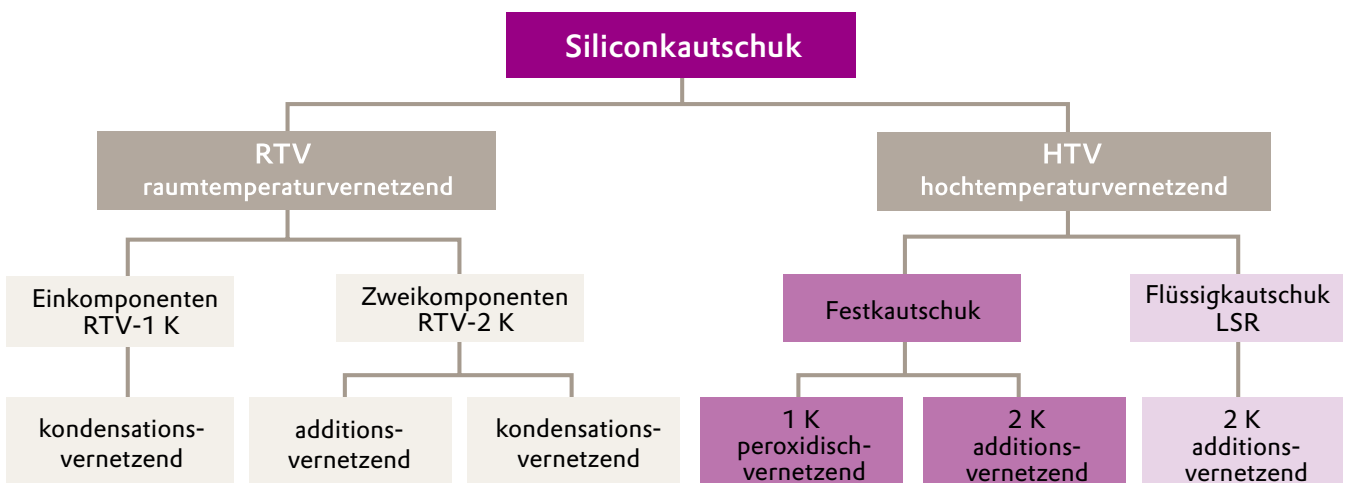
1.1 Flüssigsiliconkautschuk (LSR/LIMS) ein Werkstoff mit wachsender Bedeutung

Additionsvernetzende Flüssigsiliconkautschuke (LSR, engl. Liquid Silicone Rubber) wurden Ende der siebziger Jahre von Dow Corning entwickelt. Aufgrund ihrer guten Werkstoff- und Verarbeitungseigenschaften haben Flüssigsiliconkautschuke in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Basierend auf der fließfähigen Konsistenz und kurzen Vernetzungszeiten, ergibt sich eine hohe Produktivität durch schnelle, automatisierte sowie umweltverträgliche Fertigungsmöglichkeiten mittels Spritzgussverfahren (LIMS, engl. Liquid Injection Moulding System). Die Umstellung der Produktion von Formteilen auf eine automatisierte Fertigung ist ein ernsthaft zu überlegender Wirtschaftlichkeitsfaktor. Das Ergebnis wäre eine spürbare Senkung der Stückkosten. Zu den interessantesten Anwendungsbereichen gehören:

- Automobilbau und Fahrzeugbau
- Elektronik- und Elektrotechnik
- Human- und Lebensmittelsektor
- Medizintechnik
- Sanitär- und Haushaltsgeräte

Anwendungsgebiete für LSR-Produkte ergeben sich demnach in fast allen Industriezweigen. Wichtige Erzeugnisse sind zum Beispiel Schaltmatten für Tastenfelder, sogenannte Keypads, Dichtungen, Isolatoren in der Hochspannungstechnik sowie

Abbildung 1 Übersicht über die einzelnen Siliconvernetzungssysteme



Baby-Flaschensauger. Da das Material sterilisierbar ist und eine gute Biokompatibilität besitzt, sind auch zahlreiche Anwendungen aus der Medizintechnik bekannt. Das Bauteilespektrum erstreckt sich heute von Klein- und Präzisionsteilen mit einem Teilgewicht von unter 0,05 g in hohen Stückzahlen bis zu großvolumigen Teilen mit einem Gewicht von bis zu 80 kg in kleinen und mittleren Serien.

Die Vielfalt geeigneter Anwendungen erfährt gerade heute eine neue Revolution. Mit Hilfe der nun auch für Flüssigsilikonkautschuke zur Verfügung stehenden 2-Komponenten- oder Zweifarbenspritzgußtechnologie lassen sich auch Kunststoffe mit Siliconkautschuk in einem Arbeitsschritt verbinden.

1.2 Bestandteile des LSR-Systems

LSR wird aus einem Zweikomponentensystem aufgebaut, dessen Bestandteile A und B meist im Verhältnis 1:1 gemischt werden müssen. Sie bestehen aus Polysiloxanpolymeren oder -copolymeren, die aktive oder inaktive Füllstoffe enthalten. Im unvulkanisierten Zustand ist LSR ein Gemisch aus vinylgruppenhaltigem Siliconpolymer mit mindestens zwei Vinylgruppen pro Molekül und einer Vernetzkomponente, die mindestens 3 Si-H-Gruppen pro Molekül enthält.

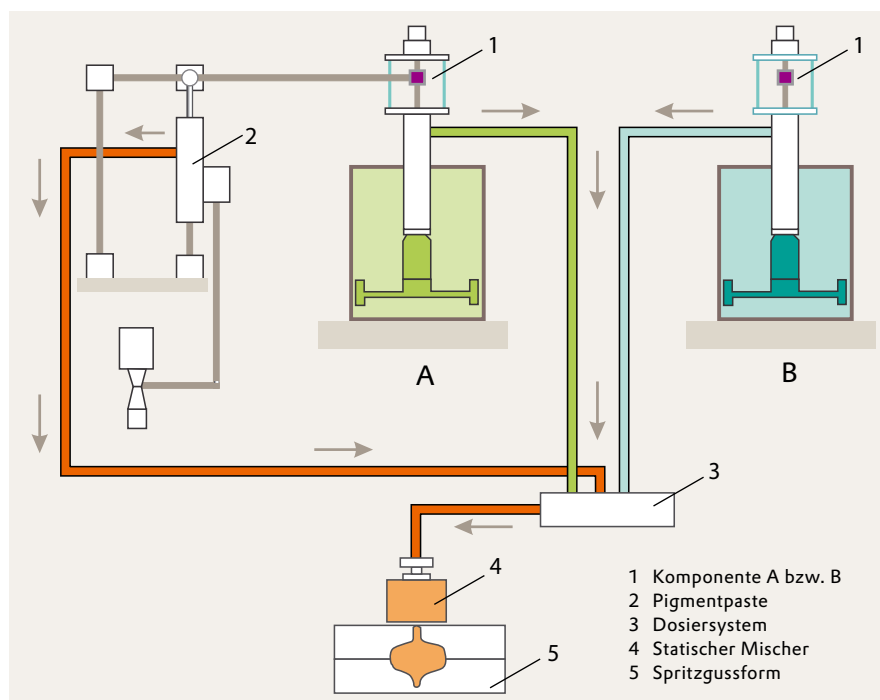
Ihre Konsistenz und ihr Vernetzungsverhalten erlauben exzellente Verarbeitbarkeit. Gegenüber Festsilikonkautschuk (HTV bzw. HCR) ist ihre Viskosität sehr niedrig. Die Vulkanisation folgt dem Prinzip der Additionsvernetzung nach dem Mechanismus der Hydrosilylierung unter Katalyse, durch geringste

Mengen von Pt(0)-Komplexen. Ergebnis dieser chemischen Reaktion ist ein hochelastisches 3-dimensionales Netzwerk mit hervorragenden mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften. Im Gegensatz zur peroxidischen Vernetzung werden bei der Vulkanisation von LSR-Compounds keine Vernetzerspaltprodukte freigesetzt. Gute Lagerstabilitäten erreicht man durch die Verwendung von Inhibitoren und der richtigen Auswahl der geeigneten Kieselsäure.

1.3 Verarbeitung von LSR

Entscheidend für den Verarbeitungsprozess ist die im Vergleich zur peroxidischen Vernetzung wesentlich höhere Vulkanisationsgeschwindigkeit. Kurze Zyklen bedeuten dabei geringe Stückkosten. Im Regelfall kann LSR im Spritzguss vollautomatisch verarbeitet werden. Wie in **Abbildung 2** zu sehen ist, werden die Komponenten A und B im Verhältnis 1:1 und ggf. gemeinsam mit einer Pigmentpaste, von einem Dosiersystem automatisch verarbeitet werden. Während der Verweilzeit in der heißen Form vulkanisiert das Gemisch zu einem festen elastischen Formteil aus und wird nach dem Öffnen der Form mit Hilfe eines automatischen Handling-Systems oder manuell entformt. Die mit Flüssigsilikonkautschuk erreichbaren Zykluszeiten liegen zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten. Um flüchtige Bestandteile zu entfernen und eine vollständigere Vulkanisation zu erreichen, können die so erhaltenen Formteile anschließend bei etwa 200 °C nachgetempert werden. In vielen Fällen ist eine Temperzeit von vier Stunden ausreichend.

Abbildung 2 Funktionsübersicht einer Spritzgießmaschine für die Verarbeitung von LSR



2 Hohe Anforderungen an Evonik Degussa Kieselsäuren bei der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung von LSR-Siliconkautschuk

Hohe Anforderungen an die Kieselsäure werden nicht nur bei der Herstellung der LSR-Compounds, sondern auch bei der Verarbeitung mittels Spritzguss-technologie (siehe **Abbildung 3**) der Fertigcompounds gestellt. Die Herausforderung an die Kieselsäure ist die gleichzeitige Erzielung von sehr hohen mechanischen Eigenschaften im Endprodukt und niedrigsten rheologischen Eigenschaften im Compound. Eine an sich widersprüchliche Forderung. Anspruchsvolle LSR-Produkte, welche ein hohes Niveau an mechanischen und optischen Eigenschaften (Transparenz) erfordern, werden ausschließlich durch Verwendung von pyrogenen Kieselsäuren hergestellt. Für einige Anwendungen wie beispielsweise Tastaturmatten aus Siliconkautschuk, sogenannte Keypads, eignen sich auch Fällungskieselsäuren, die die erforderlichen dynamischen Eigenschaften realisieren können. (Kapitel 3.2)

Anforderungen an die Kieselsäure in verschiedenen LSR-Endprodukten

- Sehr gute mechanische Eigenschaften (z. B. Härte, Zugfestigkeit, Weiterreißwiderstand)
- Exzellente optische Eigenschaften (z. B. hochtransparente Babysauger)
- Sehr gute dynamische Eigenschaften (niedriger Druckverformungsrest, z. B. für Tastaturmatten)
- Gute elektrische bzw. dielektrische Eigenschaften (z. B. für Isolatoren)
- Ausgezeichnete physiologische Verträglichkeit (z. B. in Medizinanwendungen)
- Gute Temperaturbeständigkeit (z. B. Back- oder Eiswürfelform)
- Vorteilhaftes Brandverhalten

Abbildung 3

LSR-Spritzgussmaschine, Fa. ARBURG GmbH + Co., Lossburg



Anforderungen an die Kieselsäure bei der LSR-Compoundherstellung

- Hohe Reinheit (keine Metallkontamination)
- Gute Lagerstabilität (geringe Feuchtigkeitsaufnahme)
- Schnelles Einarbeitungsverhalten
- Gute Beladungseigenschaften für „in-situ“-Hydrophobierung mittels Silanen
- Gute und schnelle Dispergierbarkeit
- Geringe Verdickung, d. h. sehr niedriges Rheologieniveau bei hohen Füllgraden

Anforderungen an die Kieselsäure im LSR-Compound und bei der LSR-Verarbeitung

- Gutes Rheologieniveau (niedrige Viskosität)
- Gute Fließeigenschaften (niedrige Fließgrenze)
- Gute Lagerstabilität (keine Nachverdickung)

Abbildung 4 Hochtransparente Babysauger aus LSR



3 Herstellung und Eigenschaften von pyrogenem AEROSIL®

3.1 Herstellung

AEROSIL® ist synthetisches, amorphes Siliciumdioxid, das durch Hydrolyse von Chlorsilanen in der Knallgasflamme gemäß der Reaktionsgleichung $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 4 \text{HCl}$ hergestellt wird. Das Herstellverfahren wurde 1942 von DEGUSSA zum Patent angemeldet, in den fünfziger Jahren in den Produktionsmaßstab übertragen und seitdem stetig weiterentwickelt. Aufgrund der Produktion mittels Flammenhydrolyse wird AEROSIL® als pyrogenes Siliciumdioxid bzw. als pyrogene Kieselsäure, wegen seiner Feinteiligkeit auch als hochdisperses Siliciumdioxid bezeichnet.

Hohe Reinheit

Die verwendeten Rohstoffe sind ausschließlich chemischen Ursprungs und sehr rein. Mit einem SiO_2 -Gehalt von über 99,8 Gew.-% (bezogen auf die geglühte Substanz) gehört AEROSIL® zu den reinsten am Markt erhältlichen Kieselsäuren. Der Gehalt an Schwermetallen liegt unterhalb der Nachweisgrenze gängiger Analysenmethoden. Tierische oder pflanzliche Rohstoffe sowie Lösemittel werden bei der Herstellung von AEROSIL® nicht verwendet. Nach dem AEROSIL® Verfahren stellt Evonik Degussa GmbH außerdem pyrogene Titan- und Aluminiumoxide, sowie verschiedene Mischoxide her.

Vielfältige Produkt-Modifikationen

Die Eigenschaften von AEROSIL® können in weiten Bereichen variiert werden. So beträgt beispielsweise die spezifische Oberfläche von AEROSIL® OX 50 nur $50 \text{ m}^2/\text{g}$, während die von AEROSIL® 380 nahezu achtmal so hoch ist.

Oberfläche und Struktur von AEROSIL® können auf vielfältige Weise verändert und an die Anforderungen moderner Siliconprodukte angepasst werden. So können durch chemische Reaktion mit organischen Siliciumverbindungen auf

der Oberfläche von AEROSIL® Dimethylsilyl-, Trimethylsilyl oder Polydimethylsiloxan-Gruppen verankert werden. Beispiele für oberflächenmodifizierte Produkte sind z. B. AEROSIL® R 972, AEROSIL® R 812 S bzw. AEROSIL® R 202. AEROSIL® R 8200 ist ein strukturmodifiziertes Produkt, das speziell für die Anwendung LSR und RTV-2K entwickelt wurde. Speziell granuliert pyrogene Kieselsäuren werden unter der Bezeichnung AEROPERL® angeboten.

3.2 Eigenschaften

Feinteilige Struktur

AEROSIL® ist ein weißes, feines und amorphes Pulver, das – je nach spezifischer Oberfläche – aus etwa 7 bis 40 nm großen Primärteilchen besteht. Die Primärteilchen liegen nicht isoliert vor, sondern sind zu stabilen Aggregaten verknüpft, die einige hundert Nanometer groß sein können. Die Aggregate wiederum bilden lockere mikrometergroße Agglomerate, die in der Anwendung wieder leicht zerfallen können.

Hydrophile und hydrophobe pyrogene Kieselsäuren

Auf der Oberfläche von unbehandeltem AEROSIL® befinden sich Silanol- und Siloxangruppen. Dadurch hat AEROSIL® eine hohe Affinität zu Wasser – es ist hydrophil – und wird von diesem vollständig benetzt. So vermag beispielsweise AEROSIL® 200 beträchtliche Mengen an Wasser zu adsorbieren. Durch die oben beschriebene Umsetzung der Silanolgruppen mit organischen Siliciumverbindungen werden auf der Oberfläche Alkylsilylgruppen chemisch verankert. Die resultierenden Produkte werden dann nicht mehr von Wasser benetzt – sie sind hydrophob – und nehmen nur noch sehr geringe Mengen an Wasser auf. Diese Produkte, wie zum Beispiel AEROSIL® R 812 S werden mit dem Suffix R gekennzeichnet (R = repellent).

Abbildung 5 TEM-Aufnahme von AEROSIL® 200

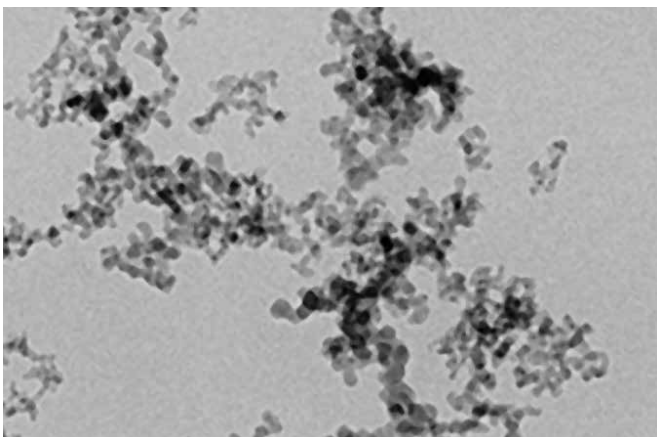


Abbildung 6 Verhalten von AEROSIL® 200 und AEROSIL® R 812 S gegenüber Wasser. Während AEROSIL® 200 sich leicht in Wasser dispergieren lässt, wird AEROSIL® R 812 S von Wasser nicht benetzt und schwimmt auf der Wasseroberfläche.



Tabelle 1 Typische physico-chemische Daten von AEROSIL® und SIPERNAT®

Prüfmethode	AEROSIL®					SIPERNAT®		
	200	300	380	R 812 S	R 8200	160	D 17	
Kieselsäuretyp	pyrogen					gefällt		
Verhalten gegenüber Wasser	hydrophil			hydrophob		hydrophil	hydrophob	
Aussehen	loose white powder							
Oberfläche ¹ nach BET	m ² /g	200 ± 25	300 ± 30	380 ± 30	220 ± 25	160 ± 25	ca, 165	ca, 100
Mittlere Größe der Primärteilchen	nm	12	7	7	7	7	–	–
Stampfdichte ² ca, Wert	g/l	50	50	50	60	140	65	150
Verdichtetes Material (Zusatz „V“)	g/l	120	120	120	–	–	–	–
Verdichtetes Material ³ (Zusatz „VV“)	g/l	50/75/120	50/75/120	–	–	–	–	–
Trocknungsverlust ⁴ (2 h bei 105°C) bei Verlassen des Lieferwerks	%	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2,0	≤ 0,5	≤ 0,5	3,0	4,0
Glühverlust ⁵ (2 h bei 1000°C)	%	≤ 1,0 ⁶	≤ 2,0 ⁶	≤ 2,5 ⁶	1,5–3,0 ⁶	2,5–3,5 ⁶	3,0 ⁷	7,0 ⁷
pH-Wert ⁸		3,7–4,7	3,7–4,7	3,7–4,7	5,5–7,5 ⁹	≤ 5,0 ⁹	5,5	8,0
C-Gehalt	%	–	–	–	3,0–4,0	2,0–4,0	–	2,0
SiO ₂ ¹⁰	%	≥ 99,8	≥ 99,8	≥ 99,8	≥ 99,8	≥ 99,8	99,4	98,0
Al ₂ O ₃ ¹⁰	%	≤ 0,050	≤ 0,050	≤ 0,050	≤ 0,050	–	–	–
Fe ₂ O ₃ ¹⁰	%	≤ 0,003	≤ 0,003	≤ 0,003	≤ 0,010	≤ 0,010	0,03	0,03
TiO ₂ ¹⁰	%	≤ 0,030	≤ 0,030	≤ 0,030	≤ 0,030	≤ 0,030	–	–
HCl ^{10,11}	%	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	–	–
Siebrückstand ¹² (nach Mocker, 45 µm)	%	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	–	–	–	–
Siebrückstand ¹³ (Brause, 45 µm)	%	–	–	–	–	–	0,05	0,3
Gebindegröße ¹⁴ (netto)	kg	10	10	10	10	15	12,5	15

¹ in Anlehnung an DIN ISO 9277

² in Anlehnung an DIN EN ISO 787-11, JIS K 5101/20 (nicht gesiebt)

³ VV-Ware wird zu Zeit ausschließlich vom Werk Rheinfelden geliefert

⁴ in Anlehnung an DIN EN ISO 787-2, ASTM D 280, JIS K 5101/23

⁵ bezogen auf die 2 Stunden bei 105° C getrocknete Substanz

⁶ in Anlehnung an DIN EN-ISO 3262-20, ASTM D 1208 JIS K 5101/24

⁷ in Anlehnung an DIN EN-ISO 3262-1, ASTM D 1208 JIS K 5101/24

⁸ in Anlehnung an DIN EN ISO 787-9, ASTM D 1208, JIS K 5101/26

⁹ Wasser : Methanol = 1:1

¹⁰ bezogen auf die 2 Stunden bei 1000° C gegläute Substanz

¹¹ HCl-Gehalt ist Bestandteil des Glühverlustes

¹² in Anlehnung an DIN EN ISO 787-18

¹³ Siebrückstand, Brause, in Anlehnung an DIN EN ISO 3262-19

¹⁴ V-Ware wird in Säcken zu 20 kg geliefert

Es handelt sich um unverbindliche Richtwerte.

4 Herstellung von LSR-Systemen

Zur Herstellung von LSR-Compounds werden verschiedene Kneter- und Mischertypen mit hohen Scherkräften eingesetzt. **Abbildung 7** zeigt einen Planetendissolver, Typ PMH 1400, der Firma Netzsch Feinmahltechnik GmbH mit 1400 l Nutzvolumen, wie er im Produktionsmaßstab eingesetzt wird. Grundsätzlich können LSR-Compounds unter Verwendung von hydrophilen und/oder hydrophoben Kieselsäuren gefertigt werden. Je nach Herstellverfahren sind Mischaggregate und Kieselsäuren auszuwählen. Die international tätigen LSR-Hersteller haben sich über lange Jahre hinweg ihr eigenes Know-how zur Herstellung von LSR-Produkten angeeignet. Prinzipiell gibt es dabei zwei verschiedene Möglichkeiten der Herstellung. Diese sind im folgenden Teil kurz beschrieben.

Abbildung 7 LSR-Planetendissolver im Produktionsmaßstab, 1400 l, Fa. Netzsch Feinmahltechnik GmbH, Mannheim



4.1 Compoundierung mittels „in-situ“-Hydrophobierung auf Basis von hydrophilen Kieselsäuren

Die von namhaften Herstellern eingesetzte Technologie zur Herstellung von LSR-Produkten vereint mehrere Verfahrensschritte bei der sogenannten „in-situ“-Hydrophobierung von hydrophilen Kieselsäuren. Dabei werden Abmischungen von verschiedenen LSR-Polymeren und/oder Siliconölen mit hydrophiler Kieselsäure hoch gefüllt. Diese hochviskosen Rohcompounds werden mittels leistungsstarker Mischer kräftig geschert. Der Mischvorgang erfolgt bei erhöhter Temperatur, um die Ausgangsviskosität zu reduzieren und so eine gute Dispergierung zu erzielen. Gleichzeitig wird die hydrophile Kieselsäure, z. B. AEROSIL® 300, durch Zugabe von Silanen (z. B. Hexa-methyldisilazan) „in-situ“-hydrophobiert, d. h. die Silanol-gruppen auf der Kieselsäureoberfläche reagieren mit dem eingesetzten Silan. Die Kieselsäure wird dabei nicht nur sehr hydrophob, sondern bedingt durch die stark wirkenden Scherkräfte gleichzeitig auch noch strukturmodifiziert. Nach Rückverdünnung (cut back) des LSR-Batches mittels reinem Polymer auf den gewünschten Füllgrad an Kieselsäure sind so sehr gute Fließeigenschaften, sowie exzellente mechanische und optische Eigenschaften zu erreichen.

Neben dem benötigten Know-How zur Durchführung dieses komplexen Verfahrens sind große Investitionen in die speziellen Geräte und Mischaggregate notwendig. Bedingt durch die erforderlichen Prozesstemperaturen von bis zu 200 °C und die relativ langen Batchzeiten (ca. 4 Std.) fallen zudem hohe Energiekosten an. Zusätzlich sind freiwerdende und entsorgungspflichtige Spaltprodukte (Ammoniak) bei dieser Compoundiermethode von großem Nachteil.

4.2 Compoundierung mit hydrophoben Kieselsäuren

Um eine Alternative zur beschriebenen Compoundierung mittels „in-situ“-Hydrophobierung zu bieten, möchten wir Ihnen mit der vorliegenden Technischen Information zwei Spezialprodukte der Evonik Degussa GmbH etwas intensiver vorstellen. Hydrophobes AEROSIL® ermöglicht eine vereinfachte Compoundierung auf Basis einer LSR-Formulierung. Beim Einsatz der hydrophoben Produkte AEROSIL® R 812 S und AEROSIL® R 8200 ist es möglich auf die unter Kapitel 4.1 beschriebene „in-situ“-Technologie zu verzichten. Die mit diesen hydrophoben Produkten erreichbaren Effekte sind im folgenden Teil zusammengefasst. Detaillierte Ergebnisse sind im Kapitel 5 beschrieben.

AEROSIL® R 812 S

Durch eine spezielle Modifizierung werden bei dieser pyrogen hergestellten Kieselsäure Trimethylsilyl-Gruppen chemisch auf der Oberfläche verankert. AEROSIL® R 812 S kann ohne Zugabe von Verarbeitungshilfsmitteln wie beispielsweise Hexamethyldisilazan (HMDS) im LSR eingesetzt werden. Basierend auf dem extrem hydrophoben Charakter von AEROSIL® R 812 S, ist eine sehr schnelle Verarbeitung (Einarbeitung sowie Dispergierung) der Kieselsäure im LSR-Polymer möglich. Bedingt durch die relativ hohe BET-Oberfläche von ca. 220 m²/g lassen sich sehr gute Transparenzen der Vulkanisate realisieren.

AEROSIL® R 8200

AEROSIL® R 8200 wurde speziell für die Anwendung LSR entwickelt und kann ebenfalls ohne Zugabe von Verarbeitungshilfsmitteln verarbeitet werden. Durch eine spezielle Modifizierung wurden auch bei dieser pyrogen hergestellten Kieselsäure Trimethylsilyl-Gruppen chemisch auf der Oberfläche verankert.

AEROSIL® R 8200 ist nicht nur stark hydrophob, sondern wird durch einen weiteren Verfahrensschritt noch strukturmodifiziert. Diese Kieselsäure zeichnet sich besonders durch eine sehr niedrige Verdickungswirkung auch bei hohen Füllgraden aus. Unter Verwendung von leicht dispergierbarem AEROSIL® R 8200 ist es demnach möglich, sehr gut fließfähige Compounds herzustellen. Basierend auf der speziellen Strukturmodifizierung sind bei erhöhten Füllgraden, neben sehr niedrigen Viskositäten bei einer guten Lagerstabilität, gleichzeitig auch noch exzellente mechanische Eigenschaften erreichbar. Bedingt durch die mit ca. 140 g/l relativ hohe Stampfdichte und die mit ca. 160 m²/g vergleichbar niedrige BET-Oberfläche, lässt sich AEROSIL® R 8200 sehr schnell in Polymersysteme einarbeiten.

Vorteile bei der Compoundierung mit hydrophoben Kieselsäuren:

- Keine „in-situ“-Hydrophobierung notwendig
- Geringere Investitionskosten (Aggregate und Sicherheitsausrüstung)
- Einsparung von Rohstoffkosten, da keine Silane benötigt werden
- Einsparung von Energiekosten, da keine erhöhten Temperaturen benötigt werden
- Umweltverträgliche Verarbeitung, da keine Spaltprodukte (Ammoniak) freigesetzt werden
- Schnelle Einarbeitung der Kieselsäure möglich, dadurch kurze Batch-Zeiten und Kapazitätserweiterung realisierbar
- Kontinuierliche LSR-Herstellung ist möglich
- Möglichkeit der standortunabhängigen Produktion

5 Effekte von hydrophobem AEROSIL® in einer LSR-Formulierung

Um die anwendungstechnischen Eigenschaften verschiedener hydrophober Produkte von AEROSIL® zu prüfen, wurden mittels Planetendissolver (siehe **Abbildung 14**) verschiedene LSR-Mischungen im Labormaßstab hergestellt und vernetzt. Detaillierte Informationen zur verwendeten Rezeptur und zur Versuchsdurchführung finden Sie im experimentellen Teil (**Kapitel 6.1**).

Als anwendungstechnische Eigenschaften wurden die benötigte Zeit zur Einarbeitung der Kieselsäure, die rheologischen Eigenschaften (Viskosität und Fließgrenze), die mechanischen Eigenschaften der Vulkanisate (Härte, Rückprallelastizität, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Weiterreißwiderstand), sowie die optischen Eigenschaften (Transparenz) ermittelt. Die einzelnen Ergebnisse werden im folgenden Teil dargestellt und diskutiert. Als Referenzmaterialien dienten zwei handelsübliche gebrauchsfertige Zweikomponenten-LSR-Produkte.

5.1 Rheologische Eigenschaften der unvernetzten LSR-Compounds

Wie schon aus dem Namen der Anwendung LSR (**LSR**, engl. Liquid Silicone Rubber) hervorgeht, sind die rheologischen Eigenschaften dieser Systeme von elementarer Bedeutung. Für die Verarbeitung von LSR-Compounds ist eine niedrige Rheologie, d. h. niedrige Viskositäten bei guten Fließeigenschaften (geringe Fließgrenzen) erforderlich. Für die Verarbeitung der Kieselsäure ist zudem die für die Einarbeitung benötigte Zeit von Wichtigkeit. **Tabelle 2** zeigt die benötigte Einarbeitungszeit, die Viskositäten sowie Fließgrenzen verschiedener Compounds basierend auf unterschiedlichen Füllgraden an AEROSIL® R 812 S und AEROSIL® R 8200.

Tabelle 2 Rheologische Eigenschaften der unvernetzten LSR-Compounds

Kieselsäure /Produkt	Füllgrad [%]	EZ/ KS* [min]	Fließgrenze [Pa]	Viskosität [Pas] D = 10 s ⁻¹
AEROSIL® R 812 S	20	12	0	183
AEROSIL® R 812 S	25	20	171	432
AEROSIL® R 812 S	30	28	370	1.050
AEROSIL® R 812 S	35	40	1.800	6.000
AEROSIL® R 8200	20	3	0	34
AEROSIL® R 8200	25	4	0	62
AEROSIL® R 8200	30	5	50	128
AEROSIL® R 8200	35	6	312	340
AEROSIL® R 8200	40	8	1.680	1.530
AEROSIL® R 8200	45	10	5.500	6.000
L 2-4, Komponente A	-	-	52	344
L 2-4, Komponente B	-	-	180	244
L 2-7, Komponente A	-	-	228	372
L 2-7, Komponente B	-	-	380	340

* EZ/KS = Benötigte Einarbeitungszeit für die Kieselsäure

Die Messung der rheologischen Eigenschaften zeigt, dass bei Verwendung von 20 % - 25 % AEROSIL® R 812 S eine Viskosität bzw. Fließgrenze erreicht ist, die in etwa auf dem Niveau des Referenzmaterials L 2-4 liegt. Wie **Abbildung 8** zeigt, steigt die Viskosität bzw. Fließgrenze mit steigen-dem Füllgrad an. Um einen höheren Füllgrad als 35 % zu erhalten, muss die Struktur der Kieselsäure modifiziert werden.

Die Ergebnisse basierend auf AEROSIL® R 8200 zeigen, dass es beim Einsatz eines strukturmodifizierten Produktes möglich ist auch höhere Füllgrade zu realisieren, ohne dabei das Rheologieniveau negativ zu beeinflussen.

Die rheologischen Eigenschaften bei einem Füllgrad von 35 % AEROSIL® R 8200 sind vergleichbar mit dem Referenzmaterial L 2-7.

Abbildung 8 Abhängigkeit der Viskosität vom Füllgrad

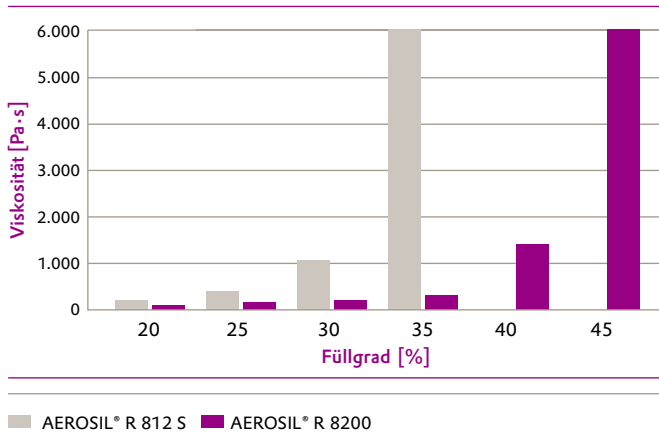
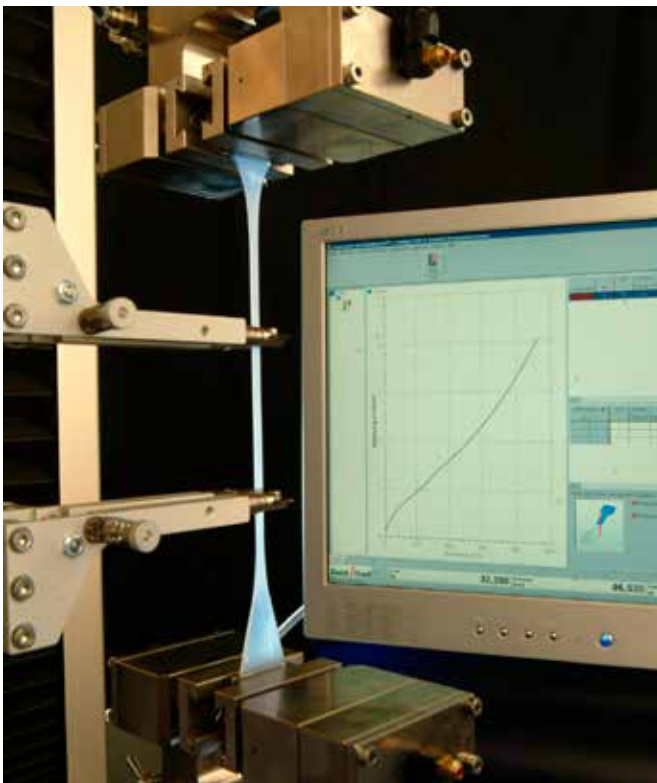


Abbildung 9 Zugprüfmaschine, Fa. Zwick GmbH & Co.KG ,Ulm



5.2 Mechanische Eigenschaften der LSR-Vulkanisate

Die mechanischen Eigenschaften der LSR-Vulkanisate, basierend auf unterschiedlichen Füllgraden an AEROSIL® R 812 S und AEROSIL® R 8200, sind in **Tabelle 3** zusammengestellt.

Erwartungsgemäß verbessern sich die mechanischen Eigenschaften der LSR-Vulkanisate mit steigendem Füllgrad an Kieselsäure. Abhängig vom Füllgrad sind Vulkanisathärten (Shore-A) von etwa 40, 50, 60 oder 70 zu erreichen. Wie in **Abbildung 10** deutlich wird, verbessert sich die Zugfestigkeit bei Verwendung von AEROSIL® R 812 S und AEROSIL® R 8200 mit steigender Konzentration.

Abbildung 10 Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Füllgrad

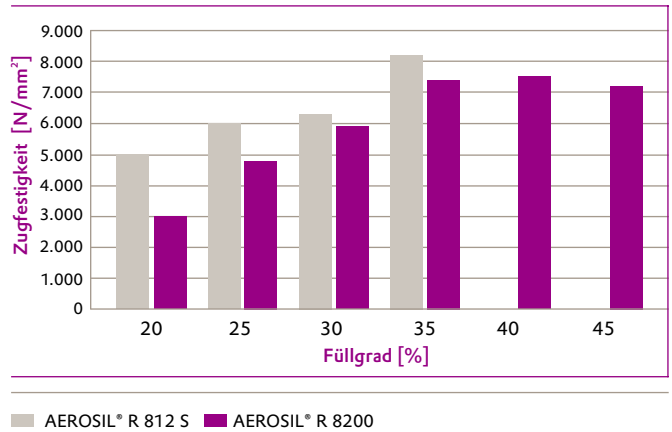


Tabelle 3 Mechanische Eigenschaften der LSR-Vulkanisate

Kieselsäure / Produkt	Füllgrad [%]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]	Weiterreiß- widerstand [N/mm]	Härte [Shore A]	Rückprall- Elastizität [%]
AEROSIL® R 812 S	20	5.0	350	19	43	59
AEROSIL® R 812 S	25	6.1	350	27	51	53
AEROSIL® R 812 S	30	6.3	300	34	62	50
AEROSIL® R 812 S	35	8.2	280	34	69	46
AEROSIL® R 8200	20	3.1	310	12	36	61
AEROSIL® R 8200	25	4.8	360	20	41	59
AEROSIL® R 8200	30	5.9	380	27	47	54
AEROSIL® R 8200	35	7.4	410	36	53	50
AEROSIL® R 8200	40	7.5	380	37	61	44
AEROSIL® R 8200	45	7.3	240	34	71	37
L 2-4	-	8.1	600	37	45	48
L 2-4	-	8.9	320	44	71	61

5.3 Optische Eigenschaften der LSR-Vulkanisate

Die optischen Eigenschaften der LSR-Vulkanisate, basierend auf unterschiedlichen Füllgraden an AEROSIL® R 812 S und AEROSIL® R 8200, sind in **Tabelle 4** dargestellt.

Die optischen Eigenschaften der untersuchten Kieselsäuren sind durchweg auf hohem Niveau. Mit steigendem Füllgrad verringert sich zum Teil die Transparenz der Vulkanisate. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die weniger gute Dispergierbarkeit, bedingt durch das relativ kleine Nutzvolumen des Mischaggregates im Labormaßstab.

Tabelle 4 Optische Eigenschaften der LSR-Vulkanisate

Kieselsäure / Produkt	Füllgrad [%]	Transparenz [DE*/D 65]
AEROSIL® R 812 S	20	42
AEROSIL® R 812 S	25	36
AEROSIL® R 812 S	30	39
AEROSIL® R 812 S	35	38
AEROSIL® R 8200	20	37
AEROSIL® R 8200	25	41
AEROSIL® R 8200	30	40
AEROSIL® R 8200	35	41
AEROSIL® R 8200	40	34
AEROSIL® R 8200	45	35
L 2-4	-	54
L 2-4	-	54

6 Experimenteller Teil

6.1 LSR-Formulierung und Compoundierung

Flüssiger Siliconkautschuk ist im allgemeinen eine verarbeitungsfertige Mischung von pastöser bis flüssiger Konsistenz. In der Praxis besteht das additionsvernetzende Kautschuksystem aus zwei Komponenten. Um alle relevanten anwendungstechnischen Eigenschaften prüfen zu können, ist es notwendig Vulkanisate herzustellen. Die dafür benötigten Komponenten A und B wurden in der folgenden, für den Labormaßstab besser handhabbaren Formulierung, als Einkomponentensystem zusammengefasst.

Basismischung:

Formulierung (1000 g Ansatz)	Bezeichnung (Hersteller)
60–80% Siliconpolymer	Silopren® U 10 (Momentive Performance Materials GmbH)
20–40% Kieselsäure	AEROSIL® (Evonik Industries AG)

Abbildung 11 Planetendissolver;
Hersteller: Hermann Linden, Marienheide, Germany



In einem Planetendissolver (siehe **Abbildung 11**) wird zunächst das Siliconpolymer vorgelegt. Bei geringer Drehzahl wird nun die Kieselsäure eingearbeitet. Anschließend wird diese Basismischung 30 Minuten lang unter Vakuum und Wasserkühlung bei erhöhter Drehzahl dispergiert. Von der so hergestellten Basismischung können nun die rheologischen Eigenschaften (siehe **Kapitel 5**) ermittelt werden.

Tabelle 5 LSR-Standardformulierung

LSR-Formulierung [350 g Ansatz, Beispiel für 20% Kieselsäure]	Anteil [%]	Bezeichnung der Komponente/Hersteller
Siliconpolymer	77,5	Silopren® U 10 (Momentive Performance Materials GmbH)
Synthetische Kieselsäure	19,4	AEROSIL® R 812 S (Evonik Industries AG)
Platin-Katalysator (10 ppm reines Pt)	0,2	PT-VTS-C 0,522 % in Toluol (Umicore AG & Co. KG)
Inhibitor (340 ppm reines ECH)	1,7	1-Ethynyl-1-cyclo-hexanol (Fa. Aldrich) 2% in Silopren® U 1 (Momentive Performance Materials GmbH)
SiH-Vernetzer	1,2	Silopren® U 730 (Momentive Performance Materials GmbH)

7 Wirkungsvoller Hitzestabilisator für LSR-Formulierungen

Der vorgelegten Basismischung wurden die restlichen Rezepturbestandteile in der oben dargestellten Reihenfolge etappenweise zugegeben und gut homogenisiert. Nach Zugabe der letzten Komponente wird der Compound zur Entlüftung unter Vakuum homogenisiert.

6.2 Vernetzung und Nachvulkanisation

Vernetzung

Zur Herstellung verschiedener LSR-Vulkanisate zu unterschiedlichen Prüfzwecken wurden speziell angefertigte Platten mit definierter Einwaage an LSR-Compound in einer Vulkanisationspresse (siehe **Abbildung 12**), je nach Dicke der Vulkanisate, für 10 bzw. 12 Minuten bei einem Druck von 100 bar und einer Temperatur von 120 °C vulkanisiert.

Abbildung 12 Vulkanisationspresse Fa. Wickert Maschinenbau GmbH, Landau



Nachvulkanisation

Die entformten Vulkanisate wurden anschließend für 4 h bei 200 °C in einem Umluftofen nachgetempert, um eine vollständige Vulkanisation zu erreichen und flüchtige Bestandteile aus dem Vulkanisat zu entfernen. Nach 72 h Lagerung der Vulkanisate im Normklima bei 23 °C und 50% Luftfeuchte, wurden die mechanischen und optischen Eigenschaften ermittelt (siehe **Kapitel 5**).

Wie schon in **Kapitel 1** beschrieben wird auch das hochdisperse Metalloxid der Evonik Degussa GmbH, AEROXIDE® TiO₂ P 25, nach dem bekannten Verfahren zur Herstellung von AEROSIL® produziert.

Mit AEROXIDE® TiO₂ P 25 kann man insbesondere in additionsvernetzenden Siliconsystemen, wie dem Flüssigsilikonkautschuk, eine deutliche Verbesserung der Temperaturstabilität des Siliconsystems erzielen.

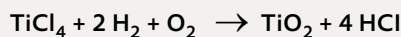
7.1 Herstellung und Eigenschaften von AEROXIDE® TiO₂ P 25

7.1.1 Herstellung

AEROXIDE® TiO₂ P 25 wird durch Flammenhydrolyse von Titan-tetrachlorid hergestellt.

Abbildung 13 Herstellreaktionen

AEROXIDE® TiO₂ P 25



7.1.2 Physikalisch chemische Eigenschaften

Das AEROXIDE® TiO₂ P 25 besteht kristallographisch aus etwa 80% Anatas und 20% Rutil und ist mit einer mittleren Primärteilchengröße von ca. 20 nm sehr feinteilig. Im Vergleich zu TiO₂-Pigmenten, deren Primärteilchen im Bereich zwischen 0,2 und 0,5 µm liegen, hat AEROXIDE® TiO₂ P 25 aus diesem Grund nur sehr geringe Pigmentiereigenschaften.

Die außergewöhnlich kleinen Primärteilchen bedingen die große spezifische Oberfläche von ca. 50 m²/g.

Tabelle 4 zeigt einen Überblick der physikalisch chemischen Eigenschaften von AEROXIDE® TiO₂ P 25.

Tabelle 6 Physikalisch chemische Eigenschaften von AEROXIDE® TiO₂ P 25

Prüfmethode	AEROXIDE® TiO ₂ P 25	
Aussehen	Aussehen lockeres weißes Pulver	
Spez. Oberfläche ¹ nach BET	m ² /g	50 ± 15
Mittlere Teilchengröße	nm	21
pH-Wert ² 4%ige Dispersion in Wasser		3,5–4,5
Trocknungsverlust ³ 2 h bei 105 °C	%	≤ 1,5
Glühverlust ^{4,5} 2 h bei 1000 °C	%	≤ 2,0
Eisenoxid ⁶	%	≥ 99,5
Iron oxide	%	≤ 0,01
Siliciumdioxid ^{4,6}	%	≤ 0,2
Aluminiumoxid	%	≤ 0,3
Stampfdichte ⁷	g/l	130

¹ in Anlehnung an DIN ISO 9277

² in Anlehnung an DIN EN ISO 787-9, ASTM D 1208, JIS K 5101/26

³ in Anlehnung an DIN EN ISO 787-2, ASTM D 280, JIS K 5101/23

⁴ in Anlehnung an DIN EN ISO 3262-20

⁵ bezogen auf die 2 Stunden bei 105 °C getrocknete Substanz

⁶ bezogen auf die 2 Stunden bei 1000 °C geglühte Substanz

⁷ in Anlehnung an DIN EN ISO 787-11, JIS K 5101/20 (nicht gesiebt)

7.2 Einfluss von AEROXIDE® TiO₂ P 25 auf die Hitzestabilisierung von LSR

AEROXIDE® TiO₂ P 25 wurde in einer Konzentration von 1,5 % in eine LSR-Standardformulierung eingearbeitet und mit einer Referenzprobe ohne Zusatz verglichen. Die Lagerung der Proben erfolgte in einem Umluftofen bei 275 °C.

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass AEROXIDE® TiO₂ P 25 sehr gut zur Hitzestabilisierung des LSR-Systems geeignet ist. Im Vergleich zur Referenzprobe bleiben die mechanischen Eigenschaften wie Härte und Dehnung länger stabil, wohingegen die Referenzprobe schon nach kurzer Lagerung bei 275 °C komplett zerstört ist

8 Zusammenfassung und Produktempfehlungen

8.1 Zusammenfassung

Grundsätzlich eignen sich sowohl pyrogene als auch gefällte Kieselsäuren zur Herstellung von LSR-Produkten. In Abhängigkeit von den für die Verarbeitung wichtigen Eigenschaften der LSR-Compounds, wie beispielsweise

- niedriges Rheologieniveau
- gute Fließeigenschaften
- schnelles Vulkanisationsverhalten
- gute Lagerstabilität

sowie den zu erzielenden Eigenschaften des jeweiligen Endproduktes wie z. B.

- gute mechanische Eigenschaften
- hohe Transparenz
- gute dynamische Eigenschaften (niedriger Druckverformungsrest)
- gute elektrische Eigenschaften

ist die Auswahl der Kieselsäure zu treffen.

8.2 Produktempfehlungen

Die folgenden Evonik Degussa-Produkte möchten wir für LSR-Anwendungen empfehlen:

AEROSIL® 200, AEROSIL® 300, AEROSIL® 380

Diese pyrogen hergestellten Kieselsäuren sind hydrophil. Die BET-Oberfläche von AEROSIL® 200 beträgt ca. 200 m²/g, die höheren Oberflächen haben AEROSIL® 300 mit ca. 300 m²/g bzw. AEROSIL® 380 mit ca. 380 m²/g. Alle Produkte sind sehr gut dispergierbar, und eignen sich ausgesprochen gut zur „in-situ“-Hydrophobierung. Die gute Reaktionsfähigkeit dieser Produkte mit Verarbeitungshilfsmitteln, wie beispielsweise Silanen (HMDS), führt zu sehr guten Fließeigenschaften und einer guten Lagerstabilität der Compounds. Neben den ausgesprochen guten mechanischen Eigenschaften (hohe Zugfestigkeiten und hohe Weiterreißwiderstände), sind sehr hohe Transparenzen der Vulkanisate erreichbar. Die Produktauswahl ist abhängig von dem gewünschten Rheologieniveau der LSR-Compounds.

AEROSIL® R 812 S

Durch eine spezielle Modifizierung wurden bei diesem pyrogen hergestellten Spezialprodukt Trimethylsilyl-Gruppen chemisch auf der Oberfläche verankert. AEROSIL® R 812 S kann ohne Zugabe von Verarbeitungshilfsmitteln im LSR eingesetzt werden. Dieses Produkt zeichnet sich besonders durch seine ausgeprägte Hydrophobie aus, die eine schnelle Verarbeitung (Einarbeitung) sowie eine sehr gute Dispergierbarkeit ermöglicht. Bedingt durch die relativ hohe BET-Oberfläche von ca. 220 m²/g lassen sich außerordentlich hohe Transparenzen der Vulkanisate realisieren.

AEROSIL® R 8200

Durch eine spezielle Modifizierung wurden auch bei diesem pyrogen hergestellten Spezialprodukt Trimethylsilyl-Gruppen chemisch auf der Oberfläche verankert. AEROSIL® R 8200 ist nicht nur ausgesprochen hydrophob, sondern wurde durch einen weiteren Verfahrensschritt noch strukturmodifiziert. AEROSIL® R 8200 wurde speziell für die Anwendungen LSR und RTV-2K entwickelt und zeichnet sich besonders durch eine sehr niedrige Verdickungswirkung, auch bei hohen Füllgraden aus. Unter Verwendung von AEROSIL® R 8200 ist es demnach möglich, sehr gut fließfähige Compounds herzustellen. Basierend auf der speziellen Strukturmodifizierung sind bei erhöhten Füllgraden neben sehr niedrigen Viskositäten gleichzeitig auch noch exzellente mechanische Eigenschaften erreichbar. Bedingt durch die mit ca. 140 g/l relativ hohe Stampfdichte und der mit ca. 160 m²/g vergleichbar niedrigen BET-Oberfläche, lässt sich AEROSIL® R 8200 sehr schnell in Polymersysteme einarbeiten.

AEROXIDE® TiO₂ P 25

AEROXIDE® TiO₂ P 25 ist ein sehr wirksamer Hitzestabilisator in Siliconkautschuk. Aufgrund der sehr guten Ergebnisse bei einer relativ geringen Zugabemenge von 0,5 bis 1,5 %, bezogen auf die Gesamtmenge der Formulierung, kann so eine günstige und effektive Stabilisierung erreicht werden.

SIPERNAT® 160

Diese hydrophile Fällungskieselsäure mit einer BET-Oberfläche von ca. 165 m²/g wurde speziell für Siliconanwendungen entwickelt. SIPERNAT® 160 ist sehr gut dispergierbar und zeigt nach „in-situ“-Hydrophobierung sehr gute Fließeigenschaften, sowie hohe Weiterreißwiderstände. Aufgrund der relativ hohen BET-Oberfläche lassen sich im Vergleich zu anderen Fällungskieselsäuren hohe Transparenzen der Vulkanisate erreichen. Aufgrund der sehr guten dynamischen Eigenschaften (niedriger Druckverformungsrest) sind die Zielanwendungen für SIPERNAT® 160 HTV- oder LSR-Compounds für „keypad-Anwendungen“.

SIPERNAT® D 17

Die Einarbeitung dieser hydrophoben Fällungskieselsäure in ein Siliconpolymer ist aufgrund der gleichmäßigen Hydrophobie der Oberfläche sehr schnell möglich. SIPERNAT® D 17 zeichnet sich durch eine sehr gute Dispergierbarkeit aus. Im LSR-System kann SIPERNAT® D 17 ohne Verwendung von Verarbeitungshilfsmitteln für nicht-transparente Anwendungen eingesetzt werden. Dynamische Eigenschaften, sowie elektrische Eigenschaften sind im Vergleich zu hydrophilen Fällungskieselsäuren ausgesprochen gut.

9 Literaturverzeichnis

- 1 Dow Corning
Injection Moulding of SILASTIC® Liquid Silicone Rubber
1998, 2001
- 2 Duffner, Eberhard: Elastomertechnik-LSR-Teile prozeßsicher produzieren, in: Kunststoff und Kautschuk-Zeitung, Isernhagen, Nr.3, 1999
- 3 Dr. S. Hasenzahl (Evonik Industries AG) Technische Information, TI 1251, AEROSIL®-Vielseitig und wirkungsvoll. Pyrogene Kieselsäuren für Körperpflege und Kosmetik, 2003
- 4 Tanton, Russ (Dow Corning): Increasing profitability of silicone molding, Rubber World, Nr. 20, 1994
- 5 Dr. M. Scholz (Evonik Industries AG), Schriftenreihe Pigmente Nr. 12, Degussa-Kieselsäuren für HTV-Siliconkautschuk, 2003
- 6 Dr. M. Scholz (Evonik Industries AG) Technische Information, TI 1218 Titandioxid PF 2 – Ein wirkungsvoller Hitzestabilisator für Siliconkautschuk, 2001
- 7 Andreas Tomanek, Silicone & Technik, Hanser Verlag / München, 1990
- 8 Clemens Trumm, Dr.-Ing. Enno Henze (GE Bayer Silicones GmbH), Flüssigsiliconkautschuk (LSR) – ein innovativer Elastomerwerkstoff für die Anforderungen der Zukunft, Fachtagung SKZ, Würzburg, April 2001
- 9 Lauhus, Werner P.: Spritzgießmaschinen für Elastomere – Gasinjektion bei LSR, in: KU-Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Bd. 5, 89. Jahrgang, 1999
- 10 ASTM D 573-99

Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an:

Evonik Resource Efficiency GmbH

Business Line Silica
Rodenbacher Chaussee 4
63457 Hanau

Anwendungstechnik

TELEFON +49 6181 59-3936
TELEFAX +49 6181 59-4201
technical.service.aerosil@evonik.com
www.evonik.com

Autoren

Dr. Mario Scholz
Michael Kempf

Business Line Silica
Evonik Resource Efficiency GmbH

Unsere Informationen entsprechen unseren heutigen Kenntnissen und Erfahrungen nach unserem besten Wissen. Wir geben sie jedoch ohne Verbindlichkeit weiter. Änderungen im Rahmen des technischen Fortschritts und der betrieblichen Weiterentwicklung bleiben vorbehalten. Unsere Informationen beschreiben lediglich die Beschaffenheit unserer Produkte und Leistungen und stellen keine Garantien dar. Der Abnehmer ist von einer sorgfältigen Prüfung der Funktionen bzw. Anwendungsmöglichkeiten der Produkte durch dafür qualifiziertes Personal nicht befreit. Dies gilt auch hinsichtlich der Wahrung von Schutzrechten Dritter. Die Erwähnung von Handelsnamen anderer Unternehmen ist keine Empfehlung und schließt die Verwendung anderer gleichartiger Produkte nicht aus.

AEROSIL®, AEROXIDE® und SIPERNAT® sind geschützte Marken der Evonik Industries AG oder ihrer Tochterunternehmen.



EVONIK
INDUSTRIES

Europa/Mittlerer Osten/
Afrika/Latein-Amerika

Evonik Resource Efficiency GmbH

Business Line Silica
Rodenbacher Chaussee 4
63457 Hanau
Germany

TELEFON +49 6181 59-12532

TELEFAX +49 6181 59-712532

ask-si@evonik.com

www.evonik.com

Nordamerika

Evonik Corporation

Business Line Silica
299 Jefferson Road
Parsippany, NJ 07054-0677
USA

TELEFON +1 800 233-8052

TELEFAX +1 973 929-8502

ask-si-nafta@evonik.com

Asien / Pazifik

Evonik (SEA) Pte. Ltd.

Business Line Silica
3 International Business Park
#07-18, Nordic European Centre
Singapore 609927

TELEFON +65 6809-6877

TELEFAX +65 6809-6677

ask-si-asia@evonik.com

Evonik. Kraft für Neues.