

Abschlußbericht

# NanoVer

Nanopartikelverstärkte Gleitlackssysteme für Verschleißschutzanwendungen  
in tribologisch hochbelasteten Anwendungen

Autorenkollektiv

März 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.	Motivation	3
2.	Stand der Technik	5
2.1.	Partikelsynthese . . . . .	5
2.2.	Gleitlackschichten . . . . .	6
3.	Ziele des Vorhabens	9
<b>II.</b>	<b>Kontinuierliche Synthese oxidischer Nanopartikel</b>	<b>13</b>
4.	Partikelentwicklung	15
4.1.	Funktionsprinzip von Gleitlacken . . . . .	15
4.2.	Verstärkungsmöglichkeiten von Gleitlacken . . . . .	15
4.3.	Geeignete Nanopartikel . . . . .	16
4.3.1.	Homogene Verteilung in der Lackmatrix . . . . .	17
4.3.2.	Kompatibilität . . . . .	17
4.3.3.	Einbindung in die Lackmatrix . . . . .	18
4.4.	Synthesekonzept . . . . .	18
4.5.	Universelle Einsetzbarkeit der Anlage . . . . .	18
5.	Aufbau und Betrieb der kontinuierlichen Technikumsanlage	21
5.1.	Prozessführung der Technikumsanlage . . . . .	21
5.1.1.	Kontinuierliche Fällung der Nanopartikel . . . . .	21
5.1.2.	Kontinuierliche Funktionalisierung der Partikel . . . . .	22
5.1.3.	Aufbau der Gesamtanlage . . . . .	31
5.1.4.	Rohrreaktor 2 . . . . .	32
5.1.5.	Kopplung der Anlagenteile . . . . .	37
5.2.	Automatisierung der Anlage und Sicherheit . . . . .	39
5.2.1.	Verschiedene Betriebsweisen und Steuerung . . . . .	40
5.2.2.	Steuerschemata für die drei Anlagenteile . . . . .	40
5.2.3.	Sicherheitsvorkehrungen . . . . .	41
5.3.	Analytik . . . . .	43
5.3.1.	Bestimmung des Silanisierungsgrades . . . . .	43

## Inhaltsverzeichnis

5.3.2.	Rasterelektronenmikroskopie (REM) . . . . .	48
5.3.3.	Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) . . . . .	49
5.4.	Zusammenfassung . . . . .	51
5.4.1.	Technischer Anlagenaufbau und Bearbeitung . . . . .	51
5.4.2.	Analytische Ergebnisse . . . . .	52
<b>III.</b>	<b>Gleitlackformulierung und -testung</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>Grundlagen und Einführung</b>	<b>57</b>
<b>7.</b>	<b>Entwicklung der Gleitlacksysteme</b>	<b>61</b>
7.1.	Stabilität der Nanopartikel im Gleitlack . . . . .	61
7.2.	Optimierung des Gleitlacksystems . . . . .	62
7.2.1.	Optimierung der Einbrennbedingungen . . . . .	62
7.2.2.	Prüfung der Medienbeständigkeit . . . . .	63
<b>8.</b>	<b>Entwicklung tribologischer Test- und Prüfmethode</b>	<b>65</b>
8.1.	Auswahl von Prüfmethode und tribologische Tests . . . . .	65
8.2.	SRV Prüfstand . . . . .	65
8.2.1.	Beschreibung des Prüfstands . . . . .	65
8.2.2.	Prüfung von PTFE-Gleitlacken . . . . .	67
8.2.3.	Prüfung von MoS <sub>2</sub> -Gleitlacken . . . . .	69
8.2.4.	Schichtdickenvariation . . . . .	71
8.3.	Heidon Prüfstand . . . . .	73
8.3.1.	Beschreibung des Prüfstands . . . . .	73
8.3.2.	Prüfung von PTFE-Gleitlacken . . . . .	76
8.3.3.	Prüfung von MoS <sub>2</sub> -Gleitlacken . . . . .	76
8.4.	Einfluß Wasser auf MoS <sub>2</sub> Gleitlack und PAI Klarlack . . . . .	78
<b>IV.</b>	<b>Lackapplikation und Bauteiltests</b>	<b>81</b>
<b>9.</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>83</b>
9.1.	Einführung . . . . .	83
9.2.	Zielsetzung . . . . .	84
<b>10.</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>85</b>
10.1.	Herkömmliche Gleitlacke . . . . .	85
<b>11.</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>87</b>
11.1.	Tribologie . . . . .	87
11.1.1.	Einführung . . . . .	87
11.1.2.	Reibung . . . . .	90
11.1.3.	Verschleiß . . . . .	94

11.2.	Gleitlacke . . . . .	97
11.2.1.	Herkömmliche Gleitlacke . . . . .	97
11.2.2.	Nanopartikuläre Gleitlacke . . . . .	102
11.3.	Silane . . . . .	103
11.3.1.	Überblick . . . . .	103
11.3.2.	Funktion als Haftvermittler . . . . .	103
11.3.3.	Funktion als Vernetzer . . . . .	104
<b>12.</b>	<b>Beschichtungsverfahren</b>	<b>105</b>
12.1.	Allgemein . . . . .	105
12.2.	Vorbehandlung . . . . .	106
12.3.	Beschichtung . . . . .	106
12.4.	Materialien . . . . .	106
12.4.1.	Additive . . . . .	106
12.5.	Applikation der Gleitlacke . . . . .	107
12.5.1.	Vorbehandlung der Shims . . . . .	107
12.5.2.	Beschichten der Shims . . . . .	108
<b>13.</b>	<b>Prüfverfahren</b>	<b>109</b>
13.1.	Messung der Oberflächenrauheit . . . . .	109
13.1.1.	Mittenrauwert $R_a$ . . . . .	109
13.1.2.	Rautiefe $R_z$ . . . . .	109
13.2.	Messung der Schichtdicke mittels Kugelkalottenschliff . . . . .	110
13.3.	Magnetinduktive Schichtdickenmessung . . . . .	112
13.4.	Messung der Haftfestigkeit via Gitterschnitt . . . . .	112
13.5.	Messung der Schichthaftung mittels Scratch-Test . . . . .	112
13.6.	Tribologische Prüfverfahren . . . . .	114
13.6.1.	Schwing-Reib-Verschleiß Tribotest . . . . .	114
13.6.2.	Kugel-Scheibe Tribotest . . . . .	117
<b>14.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>119</b>
14.1.	Oberflächenrauheit . . . . .	119
14.2.	Haftfestigkeit bei silanisierten Proben . . . . .	120
14.3.	Schichtdicke . . . . .	120
14.4.	Scratch-Test . . . . .	122
14.4.1.	Schichthaftung . . . . .	122
14.4.2.	Reibwert . . . . .	123
14.5.	SRV-Tribotest . . . . .	124
14.5.1.	Reibwert . . . . .	124
14.5.2.	Verschleiß . . . . .	129
14.6.	Kugel-Scheibe Tribotest . . . . .	132
14.6.1.	Reibwert . . . . .	132
14.6.2.	Verschleiß . . . . .	136
14.7.	Vergleich des SRV- und Kugel-Scheibe Tribotests . . . . .	140

## *Inhaltsverzeichnis*

14.8.	Zusammenfassung der Ergebnisse der Tribotests . . . . .	142
14.8.1.	Vergleich der Additive . . . . .	142
14.8.2.	Vergleich Vorbehandlungsmethode . . . . .	142
<b>15.</b>	<b>Anwendungen</b>	<b>145</b>
15.1.	Nanopartikuläre Gleitlacke . . . . .	145
15.1.1.	Gleitlager . . . . .	145
15.1.2.	Wälzlager . . . . .	146
<b>V.</b>	<b>Anhang</b>	<b>147</b>
A.	Schlussbemerkung und Dank	149
B.	Liste der Konsortialpartner	151
C.	Liste der Autoren	153