



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Metalle | 4 |
| 2.1 | Rückführung hochwertiger Metallfraktionen aus Abfallströmen | 4 |
| 2.1.1 | „SHREDDER-SAND“ - Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shredder-Sanden | 4 |
| 2.1.1.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 4 |
| 2.1.1.2 | Ziel des Vorhabens | 6 |
| 2.1.1.3 | Methoden und Verfahren | 7 |
| 2.1.1.4 | Wichtigste Ergebnisse | 9 |
| 2.1.1.5 | Zielerreichung | 13 |
| 2.1.1.6 | Forschungsbedarf | 13 |
| 2.1.1.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 14 |
| 2.1.1.8 | Ansprechpartner | 17 |
| 2.1.1.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens | 18 |
| 2.1.1.10 | Quellen | 18 |
| 2.1.2 | Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott durch energieoptimierte zero-waste Metallurgie | 19 |
| 2.1.2.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 19 |
| 2.1.2.2 | Ziel des Vorhabens | 22 |
| 2.1.2.3 | Methoden und Verfahren | 23 |
| 2.1.2.4 | Wichtigste Ergebnisse | 28 |
| | Materialcharakterisierung | 28 |
| | Ergebnisse der Laboruntersuchungen | 29 |
| | Ergebnisse der Technikums-Versuche | 32 |
| 2.1.2.5 | Zielerreichung | 33 |
| 2.1.2.6 | Forschungsbedarf | 35 |
| 2.1.2.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 35 |
| 2.1.2.8 | Ansprechpartner | 36 |
| 2.1.2.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens | 36 |
| 2.1.2.10 | Quellen | 37 |
| 2.1.3 | Analyse von Sekundärrohstoffen durch mikrowellenunterstützte Laser-Emissionsspektroskopie | 38 |
| 2.1.3.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 38 |
| 2.1.3.2 | Ziel des Vorhabens | 39 |
| 2.1.3.3 | Methoden und Verfahren | 40 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.1.3.4 | Wichtigste Ergebnisse | 42 |
| 2.1.3.5 | Zielerreichung | 46 |
| 2.1.3.6 | Forschungsbedarf | 47 |
| 2.1.3.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 48 |
| 2.1.3.8 | Ansprechpartner | 50 |
| 2.1.3.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 51 |
| 2.1.3.10 | Quellen | 51 |
| 2.1.4 | Innovative Gewinnung von Wertmetallen aus Kupferschiefer-Halden des ehemaligen Mansfelder Bergbaudistriktes, Sachsen-Anhalt | 52 |
| 2.1.4.1 | Stand zum Vorhabensbeginn..... | 52 |
| 2.1.4.2 | Ziel des Vorhabens..... | 54 |
| 2.1.4.3 | Methoden und Verfahren..... | 55 |
| 2.1.4.4 | Wichtigste Ergebnisse | 57 |
| 2.1.4.5 | Zielerreichung | 60 |
| 2.1.4.6 | Forschungsbedarf | 62 |
| 2.1.4.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 63 |
| 2.1.4.8 | Ansprechpartner | 65 |
| 2.1.4.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 65 |
| 2.1.4.10 | Quellen | 66 |
| 2.1.5 | Bessere Ressourcennutzung und Senkung des Primärenergieverbrauchs in der Bleimetallurgie | 68 |
| 2.1.5.1 | Stand zum Vorhabensbeginn..... | 68 |
| 2.1.5.2 | Ziel des Vorhabens..... | 69 |
| 2.1.5.3 | Methoden und Verfahren..... | 70 |
| | Reduktionsversuche im Tiegelmaßstab..... | 70 |
| | Untersuchung alternativer Reduktionsmittel für Bleipaste | 71 |
| | Aufarbeitung antimon- und zinnhaltiger Raffinationsprodukte | 72 |
| 2.1.5.4 | Wichtigste Ergebnisse | 72 |
| | Alternative Reduktionsmittel für Bleipaste | 72 |
| | Aufarbeitung antimon- und zinnhaltiger Kreislaufprodukte | 74 |
| 2.1.5.5 | Zielerreichung | 77 |
| | Alternative Reduktionsmittel für Bleipaste | 77 |
| | Aufarbeitung antimon- und zinnhaltiger Kreislaufprodukte | 78 |
| 2.1.5.6 | Forschungsbedarf | 80 |
| 2.1.5.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 80 |
| 2.1.5.8 | Ansprechpartner | 81 |
| 2.1.5.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 81 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 2.1.6 | Entzinkung von Stahlschrotten | 82 |
| 2.1.6.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 82 |
| 2.1.6.2 | Ziel des Vorhabens | 84 |
| | Globalziel | 84 |
| | Teilziele | 85 |
| 2.1.6.3 | Wichtigste Ergebnisse | 86 |
| | Stoffstrom „Entzinkter Edelschrott“: Sammlung, Bereitstellung und Transport zur Gießerei | 89 |
| 2.1.6.4 | Zielerreichung | 93 |
| 2.1.6.5 | Forschungsbedarf | 94 |
| 2.1.6.6 | Ressourceneffizienzpotenzial | 94 |
| 2.1.6.7 | Ansprechpartner | 95 |
| 2.1.6.8 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens | 96 |
| 2.1.6.9 | Quellen | 97 |
| 2.2 | Verbesserung der Materialeffizienz in der Metallerzeugung | 98 |
| 2.2.1 | Optimierte Prozessführung zur ressourceneffizienten Stahlerzeugung im Konverterprozess | 98 |
| 2.2.1.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 98 |
| 2.2.1.2 | Ziel des Vorhabens | 99 |
| 2.2.1.3 | Methoden und Verfahren | 99 |
| 2.2.1.4 | Wichtigste Ergebnisse | 101 |
| | Entwicklung und Validierung des Prozessmodells | 101 |
| | Implementierung einer neuen Abgasanalysetechnik | 104 |
| | Optimierte Blasendpunktbestimmung | 107 |
| | Automatische Korrektur des Blasvorgangs | 108 |
| 2.2.1.5 | Zielerreichung | 110 |
| 2.2.1.6 | Forschungsbedarf | 111 |
| 2.2.1.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 112 |
| 2.2.1.8 | Ansprechpartner | 112 |
| 2.2.1.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens | 113 |
| 2.2.1.10 | Quellen | 113 |
| 2.2.2 | Vermeidung von Metallverlusten in metallurgischen Schlacken am Beispiel der Kupfererzeugung | 114 |
| 2.2.2.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 114 |
| 2.2.2.2 | Ziel des Vorhabens | 116 |
| 2.2.2.3 | Methoden und Verfahren | 118 |
| 2.2.2.4 | Wichtigste Ergebnisse | 120 |

| | |
|--|-----|
| Erarbeitung der metallurgischen Grundlagen – Laborversuche am IME..... | 120 |
| Versuche im Technikums-Maßstab mit Festeinsatz..... | 122 |
| Versuche im Pilotmaßstab bei Aurubis mit Flüssigeinsatz..... | 123 |
| 2.2.2.5 Zielerreichung..... | 125 |
| Erarbeitung der metallurgischen Grundlagen - Laborversuche am IME..... | 125 |
| Versuche im Technikums-Maßstab mit Festeinsatz - Aufbau und Versuche des Aachener Rührreaktors im Technikums-Maßstab..... | 125 |
| Versuche im Pilotmaßstab bei Aurubis mit Flüssigeinsatz..... | 125 |
| 2.2.2.6 Forschungsbedarf..... | 126 |
| 2.2.2.7 Ressourceneffizienzpotenzial..... | 127 |
| 2.2.2.8 Ansprechpartner..... | 128 |
| 2.2.2.9 Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 128 |
| 2.2.2.10 Quellen..... | 128 |
| 2.2.3 Ressourceneffizienz mit dem Bandgießverfahren: Qualifizierung des Prozesses für die Produktion von HSD [®] -Stählen im Pilotmaßstab..... | 129 |
| 2.2.3.1 Stand zum Vorhabensbeginn..... | 129 |
| Stand der Technik und Bandgießverfahren..... | 129 |
| 2.2.3.2 Ziel des Vorhabens..... | 131 |
| Teilziele der Arbeitspakete..... | 131 |
| 2.2.3.3 Methoden und Verfahren..... | 132 |
| Ökobilanzielle Modellierung zur Beurteilung der Ressourcen- und Energieeffizienz..... | 133 |
| 2.2.3.4 Wichtigste Ergebnisse..... | 133 |
| 2.2.3.5 Zielerreichung..... | 137 |
| 2.2.3.6 Forschungsbedarf..... | 138 |
| 2.2.3.7 Ressourceneffizienzpotenzial..... | 139 |
| 2.2.3.8 Zusammenfassung..... | 141 |
| 2.2.3.9 Ansprechpartner..... | 141 |
| 2.2.3.10 Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 142 |
| 2.2.3.11 Quellen..... | 143 |
| 2.2.4 Herstellung eines phosphathaltigen Kalkdüngemittels auf der Basis von Stahlwerksschlacken und Reststoffphosphaten..... | 144 |
| 2.2.4.1 Stand zum Vorhabensbeginn..... | 144 |
| 2.2.4.2 Ziel des Vorhabens..... | 145 |
| 2.2.4.3 Methoden und Verfahren..... | 146 |
| Ermittlung der Löslichkeit und Aufschlusseffizienz von Klärschlamm- und Tiermehlaschen in flüssige LD-Schlacke in Laborversuchen..... | 146 |
| Verifizierung der Ergebnisse der Laborversuche in Betriebsversuchen..... | 146 |

| | |
|--|-----|
| Optimierung der betrieblichen Behandlung von LD-Schlacken mit Aschen | 147 |
| Maßnahmen in der Aufbereitung..... | 147 |
| Festlegung von Qualitätsanforderungen an Einsatzstoffe und erzeugte Produkte | 148 |
| Überprüfung der pflanzenphysiologischen Verfügbarkeit und Düngewirksamkeit in Gefäß- und Feldversuchen..... | 148 |
| 2.2.4.4 Wichtigste Ergebnisse | 148 |
| Auswirkungen der P ₂ O ₅ -Anreicherung von LD-Schlacke durch Aschen | 149 |
| Technische Umsetzung der Behandlung | 150 |
| Düngewirksamkeit des erzeugten Produkts..... | 152 |
| 2.2.4.5 Zielerreichung | 153 |
| 2.2.4.6 Forschungsbedarf | 154 |
| 2.2.4.7 Ressourceneffizienzpotenzial | 155 |
| 2.2.4.8 Ansprechpartner | 156 |
| 2.2.4.9 Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 156 |
| 2.2.4.10 Quellen | 157 |
| 2.2.5 Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz der Stahlerzeugung im Lichtbogenofen..... | 158 |
| 2.2.5.1 Stand zum Vorhabensbeginn..... | 158 |
| 2.2.5.2 Ziel des Vorhabens..... | 159 |
| 2.2.5.3 Methoden und Verfahren..... | 159 |
| Verringerung der thermischen Verluste durch feuerfeste Zustellung..... | 159 |
| Verbesserung der Energieeffizienz durch Prozesssteuerung und -regelung..... | 160 |
| Lichtbogenofenprozess der Georgsmarienhütte | 160 |
| Modellierung des Lichtbogenofenprozesses der GMH | 161 |
| Abgasanalyse am Lichtbogenofen der GMH | 161 |
| 2.2.5.4 Wichtigste Ergebnisse | 162 |
| Verringerung der thermischen Verluste durch feuerfeste Zustellung..... | 162 |
| Verbesserung der Energieeffizienz durch Prozesssteuerung und -regelung..... | 163 |
| Modellierung des Lichtbogenofenprozesses der GMH | 164 |
| Optimierung des chemischen Energieeintrags | 164 |
| Optimierung des metallischen Ausbringens durch gezielte Sauerstoffzufuhr..... | 166 |
| 2.2.5.5 Zielerreichung | 168 |
| 2.2.5.6 Forschungsbedarf | 168 |
| 2.2.5.7 Ressourceneffizienzpotenzial | 169 |
| 2.2.5.8 Ansprechpartner | 170 |
| 2.2.5.9 Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 170 |
| 2.2.5.10 Quellen | 170 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.2.6 | Ressourceneffiziente Formgebungsverfahren für Titan und hochwarmfeste Legierungen | 172 |
| 2.2.6.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 172 |
| 2.2.6.2 | Ziel des Vorhabens | 173 |
| 2.2.6.3 | Methoden und Verfahren | 174 |
| 2.2.6.4 | Wichtigste Ergebnisse | 175 |
| | Neue Erkenntnisse zu Materialkennwerten und Materialverhalten hochwarmfester Metalllegierungen | 175 |
| | Werkzeugentwicklung für Verfahren inkrementeller Walztechnologien | 176 |
| | Entwicklung Umformtechnologien - Axial-Vorschub-Querwalzen (AVQ) | 177 |
| | Prozessabbildung und Optimierung mittels numerischer Simulation | 178 |
| 2.2.6.5 | Zielerreichung | 179 |
| 2.2.6.6 | Forschungsbedarf | 180 |
| 2.2.6.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 180 |
| | Beispiel 1 – Masseverteilung in der Herstellung von Triebwerkschaufeln | 180 |
| | Beispiel 2 – Axialgesenkwalzen von Ventilsitzen | 182 |
| 2.2.6.8 | Ansprechpartner | 183 |
| 2.2.6.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens | 184 |
| 2.3 | Einordnung in das Forschungsfeld Metallurgie | 185 |
| 2.3.1 | Vorbemerkung | 185 |
| 2.3.2 | Forschungsschwerpunkte | 185 |
| 2.3.2.1 | Rückführung hochwertiger Metallfraktionen aus Abfallströmen | 186 |
| 2.3.2.2 | Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz in der Metallerzeugung | 188 |
| 2.3.2.3 | Neue Verfahrensentwicklung | 189 |
| 2.3.3 | Einordnung der erzielten Forschungsergebnisse in den Forschungs- und Entwicklungskontext | 190 |
| 2.3.3.1 | Stoffkreisläufe | 191 |
| 2.3.3.2 | Energie- und Reduktionsmittelverbrauch | 191 |
| 2.3.3.3 | Entfallstoffe | 191 |
| 2.3.3.4 | Ur- und Umformen | 192 |
| 2.3.4 | Zukünftige Forschungsbedarfe | 192 |
| 2.3.5 | Quellen | 194 |
| 3 | Katalyse und Beschichtungsprozesse | 195 |
| 3.1 | Katalytische Prozesse in der chemischen Industrie | 195 |
| 3.1.1 | Effizienzsteigerung bei der Chlorherstellung | 195 |
| 3.1.1.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 195 |
| 3.1.1.2 | Ziel des Vorhabens | 196 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.1.1.3 | Methoden und Verfahren..... | 197 |
| 3.1.1.4 | Wichtigste Ergebnisse | 198 |
| | Katalysatorentwicklung..... | 198 |
| | Charakterisierung | 200 |
| | Testung..... | 202 |
| | Elektrolyse..... | 202 |
| | Gasphasenoxidation (Deacon)..... | 203 |
| 3.1.1.5 | Zielerreichung | 204 |
| | Elektrolyse-Verfahren | 204 |
| | Deacon-Verfahren | 204 |
| 3.1.1.6 | Forschungsbedarf | 204 |
| 3.1.1.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 205 |
| 3.1.1.8 | Ansprechpartner | 205 |
| 3.1.1.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 205 |
| 3.1.2 | „ReAlSelOx“ – Ressourceneffiziente AlkanSelektivOxidation an neuen kristallinen Festkörperphasen | 209 |
| 3.1.2.1 | Stand zum Vorhabensbeginn..... | 209 |
| | Situationsbeschreibung: Rohstoffe..... | 209 |
| | Situationsbeschreibung: Selektivoxidationen..... | 210 |
| | Motivation und Problemstellung..... | 212 |
| 3.1.2.2 | Ziel des Vorhabens | 213 |
| 3.1.2.3 | Methoden und Verfahren..... | 213 |
| | Testverfahren und Testbedingungen | 215 |
| 3.1.2.4 | Wichtigste Ergebnisse | 215 |
| | Ag-V-P-O Phasen..... | 215 |
| | Ti-V-P-O-Phasen..... | 216 |
| | V-B-P-O System..... | 218 |
| 3.1.2.5 | Zielerreichung | 220 |
| 3.1.2.6 | Forschungsbedarf | 221 |
| 3.1.2.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 221 |
| 3.1.2.8 | Ansprechpartner | 221 |
| 3.1.2.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 222 |
| 3.1.2.10 | Quellen | 222 |
| 3.2 | Schließung von Kreisläufen in Beschichtungsprozessen..... | 224 |
| 3.2.1 | Effizienztechnologie für die Kreislaufschließung von Metallen und Spülwasser in der Weißblechproduktion | 224 |
| 3.2.1.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 224 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3.2.1.2 | Ziel des Vorhabens | 226 |
| 3.2.1.3 | Methoden und Verfahren..... | 227 |
| 3.2.1.4 | Wichtigste Ergebnisse | 229 |
| 3.2.1.5 | Zielerreichung | 232 |
| 3.2.1.6 | Forschungsbedarf | 233 |
| 3.2.1.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 233 |
| 3.2.1.8 | Ansprechpartner | 234 |
| 3.2.1.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 234 |
| 3.2.1.10 | Quellen | 235 |
| 3.2.2 | Entwicklung, Simulation und prozesssichere Umsetzung zur umweltfreundlicheren und wirtschaftlicheren Beschichtung von komplexen Kunststoffbauteilen (ENSIKOM) | 236 |
| 3.2.2.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 236 |
| 3.2.2.2 | Ziel des Vorhabens | 237 |
| 3.2.2.3 | Methoden und Verfahren..... | 238 |
| 3.2.2.4 | Wichtigste Ergebnisse | 240 |
| 3.2.2.5 | Zielerreichung | 240 |
| 3.2.2.6 | Forschungsbedarf | 240 |
| 3.2.2.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 240 |
| 3.2.2.8 | Ansprechpartner | 241 |
| 3.2.2.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 242 |
| 3.2.2.10 | Quellen | 242 |
| 3.3 | Einordnung in das Forschungsfeld Katalyse und Beschichtungsprozesse | 243 |
| 3.3.1 | Katalytische Prozesse in der chemischen Industrie | 243 |
| 3.3.1.1 | Vorbemerkung..... | 243 |
| 3.3.1.2 | Einordnung verfahrenstechnischer Prozesse in die industrielle Produktion..... | 244 |
| 3.3.1.3 | Ressourceneffizienz bei chemischen Prozessen..... | 246 |
| 3.3.1.4 | Katalytische Prozesse zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei chemischen Prozessen..... | 248 |
| 3.3.1.5 | Einordnung der erzielten Forschungsergebnisse in den Forschungs- und Entwicklungskontext der Ressourceneffizienz chemischer Prozesse | 249 |
| 3.3.1.6 | Zukünftiger Forschungsbedarf | 250 |
| 3.3.1.7 | Zusammenfassung | 253 |
| 3.3.2 | Beschichtungsprozesse | 254 |
| 3.3.2.1 | Einleitung | 254 |
| 3.3.2.2 | Stand der Technik..... | 255 |
| | Metallverarbeitende Industrie..... | 255 |

| | | |
|----------|---|------------|
| | Kunststoffverarbeitende Industrie | 259 |
| | Glasverarbeitende Industrie..... | 260 |
| | Strukturiertes Beschichten..... | 261 |
| 3.3.2.3 | Beispiele | 261 |
| 3.3.2.4 | F&E-Bedarf | 262 |
| 3.3.2.5 | Schlussbemerkung..... | 264 |
| 3.3.3 | Quellen..... | 264 |
| 4 | Mineralische Materialien | 267 |
| 4.1 | Trocknungs- und Sintervorgänge in der Keramikindustrie | 267 |
| 4.1.1 | DRY-CONTROL - Entwicklung einer ressourceneffizienten Trocknungstechnologie für keramische Produkte | 267 |
| 4.1.1.1 | Stand zum Vorhabensbeginn..... | 267 |
| 4.1.1.2 | Ziel des Vorhabens..... | 270 |
| 4.1.1.3 | Methoden und Verfahren..... | 271 |
| | Feuchtebestimmung..... | 271 |
| | Aktive Thermographie zur Rissdetektion..... | 271 |
| | Lokale Mikrowellentrocknung | 272 |
| 4.1.1.4 | Wichtigste Ergebnisse | 273 |
| | Aufbau eines Sensors zur Detektion von Feuchtenestern | 273 |
| | Thermographische Rissprüfung..... | 273 |
| | Reproduzierbare und steuerbare Erwärmung mit Mikrowellen | 275 |
| | Auslegung der Mikrowellenanlage zur lokalen Trocknung von Feuchtenestern | 276 |
| | Mikrowellenverschlüsse..... | 277 |
| 4.1.1.5 | Zielerreichung | 279 |
| 4.1.1.6 | Forschungsbedarf | 279 |
| 4.1.1.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 279 |
| 4.1.1.8 | Ansprechpartner | 279 |
| 4.1.1.9 | Quellen | 280 |
| 4.1.2 | Ressourceneffiziente Keramik-Niedrigtemperaturesinterung | 281 |
| 4.1.2.1 | Stand zum Vorhabensbeginn..... | 281 |
| 4.1.2.2 | Ziel des Vorhabens..... | 284 |
| 4.1.2.3 | Methoden und Verfahren..... | 285 |
| 4.1.2.4 | Wichtigste Ergebnisse | 287 |
| | Porzellangranulat mit hohem Anteil an Recyclingmaterial zum isostatischen Pressen | 292 |
| | Entwicklung eines Nasspressgranulates | 292 |
| | Einsatz von Holzgas als Brennstoff für Trocknungs- und Sintervorgänge | 296 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.1.2.5 | Zielerreichung | 297 |
| 4.1.2.6 | Forschungsbedarf | 298 |
| 4.1.2.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 298 |
| 4.1.2.8 | Ansprechpartner | 299 |
| 4.1.2.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 299 |
| 4.1.2.10 | Quellen | 299 |
| 4.2 | Verbesserung der Materialeffizienz durch innovative Baustoffe | 300 |
| 4.2.1 | Entwicklung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung . | 300 |
| 4.2.1.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 300 |
| 4.2.1.2 | Ziel des Vorhabens | 300 |
| 4.2.1.3 | Methoden und Verfahren..... | 301 |
| 4.2.1.4 | Wichtigste Ergebnisse | 303 |
| | Granulierung..... | 303 |
| | Thermische Stabilisierung und Porosierung im Drehrohrofen..... | 303 |
| | Hydrothermale Erhärtung..... | 305 |
| | Eigenschaften der Leichtgranulate | 305 |
| | Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch im Beton | 307 |
| 4.2.1.5 | Zielerreichung | 309 |
| 4.2.1.6 | Forschungsbedarf | 310 |
| 4.2.1.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 311 |
| 4.2.1.8 | Ansprechpartner | 312 |
| 4.2.1.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 313 |
| 4.2.1.10 | Quellen | 316 |
| 4.2.2 | Celitement – Entwicklung eines nachhaltigen Zementes | 317 |
| 4.2.2.1 | Stand zum Vorhabensbeginn..... | 317 |
| | Portlandzement..... | 317 |
| | Celitement-Prinzip..... | 318 |
| 4.2.2.2 | Ziel des Vorhabens | 319 |
| 4.2.2.3 | Methoden und Verfahren..... | 321 |
| | Hydrothermalsynthese | 321 |
| | Aktivierende Mahlung..... | 321 |
| | Entsäuern von karbonatischen Rohstoffen | 322 |
| | Analytik..... | 322 |
| 4.2.2.4 | Wichtigste Ergebnisse | 323 |
| | Versuchsanlage..... | 323 |
| | Rohstoffentsäuerung..... | 324 |

| | | |
|----------|--|------------|
| | In-situ-Untersuchung des Hydrothermalprozesses..... | 324 |
| | Untersuchung der Mikrostruktur | 324 |
| | Stoff- und Energiebilanzen / Marktchancen..... | 326 |
| 4.2.2.5 | Zielerreichung | 326 |
| | Bau und Betrieb der Versuchsanlage | 326 |
| | Stoffliche und energetische Optimierung des Produktionsverfahrens..... | 326 |
| | Entwicklung von Spezialanwendungen..... | 327 |
| | Vorbereitung Markteintritt | 327 |
| 4.2.2.6 | Forschungsbedarf | 327 |
| 4.2.2.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 328 |
| 4.2.2.8 | Ansprechpartner | 330 |
| 4.2.2.9 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 330 |
| 4.2.2.10 | Quellen | 332 |
| 4.3 | Einordnung in das Forschungsfeld Mineralik und Baustoffe | 334 |
| 4.3.1 | Übersicht über die r ² -Forschungsvorhaben..... | 334 |
| 4.3.1.1 | Entwicklung einer Technologie zur Herstellung hochwertiger Leichtgranulate aus sekundären Rohstoffen auf Basis von heterogenen Bau- und Abbruchabfällen | 334 |
| 4.3.1.2 | Ressourceneffiziente Trocknungstechnologie für Keramikprodukte | 335 |
| 4.3.1.3 | Niedrig-Temperatur-Sinterung von Porzellan | 336 |
| 4.3.1.4 | Entwicklung einer Pilotanlage für ein neuartiges Nassbindemittel, das Portlandzement ersetzt | 337 |
| 4.3.2 | Adressierte Technologien und Forschungsthemen | 338 |
| 4.3.2.1 | Bereich Keramik..... | 339 |
| 4.3.2.2 | Baubereich..... | 339 |
| 4.3.3 | Einordnung der Forschungsergebnisse | 339 |
| 4.3.4 | Weiterer Forschungsbedarf..... | 341 |
| 4.3.5 | Quellen..... | 342 |
| 5 | Netzwerke und Begleitforschung..... | 344 |
| 5.1 | Netzwerk und internetbasierte Webplattform zur Ressourceneffizienz als Lern- und Anwendungsmittel - RESEFI | 344 |
| 5.1.1 | Stand zum Vorhabensbeginn | 344 |
| 5.1.2 | Ziel des Vorhabens | 344 |
| 5.1.3 | Methoden und Verfahren..... | 345 |
| 5.1.4 | Ergebnisse..... | 345 |
| 5.1.5 | Zielerreichung..... | 349 |
| 5.1.6 | Forschungsbedarf..... | 353 |
| 5.1.7 | Ressourceneffizienzpotenzial | 354 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.1.8 | Ansprechpartner..... | 355 |
| 5.1.9 | Quellen..... | 355 |
| 5.2 | Ergebnisse der r ² -Begleitforschung: Potenziale von Innovationen in rohstoffintensiven Produktionsprozessen | 356 |
| 5.2.1 | Einleitung..... | 356 |
| 5.2.2 | Abschätzung der ökologischen und direkten ökonomischen Effekte der BMBF-Fördermaßnahme r ² | 358 |
| 5.2.2.1 | Vorgehensweise zur ökologischen und ökonomischen Bewertung..... | 358 |
| 5.2.2.2 | Synopse der Einsparpotenziale für die Fördermaßnahme r ² | 360 |
| 5.2.2.3 | Diskussion des Einsparpotenzials beim kumulierten Materialaufwand | 362 |
| 5.2.2.4 | Diskussion des Einsparpotenzials beim Primärenergiebedarf..... | 362 |
| 5.2.2.5 | Diskussion des Einsparpotenzials bei Treibhausgasemissionen..... | 363 |
| 5.2.2.6 | Diskussion des ökonomischen Einsparpotenzials | 363 |
| 5.2.3 | Potenzieller Beitrag der BMBF-Fördermaßnahme r ² zur Rohstoffproduktivität..... | 363 |
| 5.2.3.1 | Rohstoffproduktivität mit Rohstoffäquivalenten..... | 364 |
| 5.2.3.2 | Potenzieller Beitrag der unter r ² geförderten Technologien („ohne Rucksack“)..... | 365 |
| 5.2.3.3 | Potenzieller Beitrag der unter r ² geförderten Technologien („mit Rucksack“)..... | 366 |
| 5.2.4 | Gesamtwirtschaftliche Effekte der Ausschöpfung des Ressourceneffizienzpotenzials | 368 |
| 5.2.4.1 | Methode zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Potenziale von r ² | 368 |
| 5.2.4.2 | Ergebnisse auf gesamtwirtschaftlicher Ebene | 369 |
| 5.2.4.3 | Strukturelle Effekte | 371 |
| 5.2.4.4 | Rebound-Effekt | 371 |
| 5.2.5 | Meta-Roadmap zur Identifizierung branchenübergreifender Kreislaufschließungen der r ² -Verbundprojekte | 373 |
| 5.2.5.1 | Brancheninterne Kreislaufführung | 374 |
| 5.2.5.2 | Branchenübergreifende Kreislaufschließung | 375 |
| 5.2.6 | Vernetzungspotenziale rohstoffintensiver Wertschöpfungsketten | 378 |
| 5.2.6.1 | Eisen- und Stahlindustrie..... | 378 |
| 5.2.6.2 | Aluminiumindustrie..... | 379 |
| 5.2.6.3 | Bauindustrie..... | 380 |
| 5.2.6.4 | Synopse der Vernetzungspotenziale..... | 380 |
| 5.2.7 | Reflexionen zum Prozess der Begleitforschung in r ² | 381 |
| 5.2.7.1 | Arbeitsweise der Begleitforschung..... | 382 |
| 5.2.7.2 | Information und Ergebnisverwertung..... | 383 |
| 5.2.7.3 | Vernetzung der Verbünde..... | 385 |
| 5.2.7.4 | Fachliche Unterstützung der Verbünde | 386 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2.8 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 387 |
| 5.2.9 | Ansprechpartner..... | 388 |
| 5.2.10 | Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens..... | 389 |
| 5.2.11 | Quellen..... | 390 |
| 5.3 | Einordnung in das Forschungsfeld Ressourceneffizienz..... | 395 |
| 5.3.1 | Megatonnen statt Nanogramm..... | 395 |
| 5.3.2 | Life Cycle Thinking..... | 396 |
| 5.3.3 | Notwendigkeit einer ökologischen Bewertung..... | 398 |
| 5.3.4 | „Gewürzmetalle“ – zurück zu den Milligramm..... | 399 |
| 5.3.5 | Gesamtwirtschaftliches Potenzial..... | 399 |
| 5.3.6 | Betriebswirtschaftliches Potenzial..... | 400 |
| 5.3.7 | Systemeffizienz im Gesamtzusammenhang..... | 402 |
| 5.3.8 | Ausblick..... | 403 |
| 5.3.9 | Quellen..... | 405 |
| 6 | Wege zu einer umweltverträglichen Rohstoffwirtschaft..... | 407 |
| 6.1 | Einleitung..... | 407 |
| 6.2 | Bergrecht, Naturschutz- und Wasserrecht..... | 409 |
| 6.3 | Ökonomische Anreizinstrumente..... | 412 |
| 6.3.1 | Primärbaustoffsteuer..... | 412 |
| 6.3.2 | Materialinputsteuer..... | 413 |
| 6.3.3 | Emissionshandel..... | 413 |
| 6.4 | Instrumente für die Kreislaufführung von Rohstoffen..... | 414 |
| 6.4.1 | Herstellerorientierte Instrumente..... | 415 |
| 6.4.2 | Verbraucherorientierte Instrumente..... | 417 |
| 6.5 | Internationale Ansätze..... | 418 |
| 6.5.1 | Zertifizierungssysteme..... | 418 |
| 6.5.2 | Rohstoffpartnerschaften..... | 420 |
| 6.5.3 | Internationales Rohstoffrahmenabkommen..... | 421 |
| 6.6 | Ausblick..... | 424 |
| 6.7 | Quellen..... | 425 |
| 7 | Schlagwortverzeichnis..... | 433 |