



AiF-Forschungsvereinigung  
„Energie- und Umwelttechnik“

2015

# Innovationsreport

## Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF Forschungsvorhabensnummer: 17992 N

**Entwicklung von Instrumenten zur Erarbeitung, Dokumentation und Umsetzung des produktlebenszyklusorientierten Carbon Accounting, Carbon Planning und Carbon Controlling (Carbon Management) in der Druckluftfilterbranche**

Laufzeit: 01.12.2013 – 30.11.2015

Beteiligte Forschungsstelle(n):

1. IPRI – International Performance Research Institute gGmbH
2. Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.  
Bereich Luftreinhaltung & Filtration

Institut für Energie- und  
Umwelttechnik e. V.  
Bliersheimer Straße 58 - 60  
47229 Duisburg

Bereich Industrielle  
Gemeinschaftsforschung  
[www.iuta.de/igf](http://www.iuta.de/igf)

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Carbon Management***

der Forschungsstelle(n)

IPRI gGmbH

IUTA e.V.

Das IGF-Vorhaben 17992 N der Forschungsvereinigung Umwelttechnik wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Stuttgart, 24.02.2016

Ort, Datum

  
Dr.-Ing. Mölter-Siemens; Kasselmann, M.Sc.

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

## **Carbon Management -**

**Entwicklung von Instrumenten zur Erarbeitung, Dokumentation und Umsetzung des produktlebenszyklusorientierten Carbon Accounting, Carbon Planning und Carbon Controlling (Carbon Management) in der Druckluftfilterbranche**

Schlussbericht



**IPRI - International Performance Research Institute gGmbH**

Sebastian Kasselmann, M.Sc.

**IUTA - Institut für Energie- und Umwelttechnik**

Dr.-Ing. Asbach

Dr.-Ing. Mölter-Siemens

## I Inhaltsverzeichnis (Überblick)

<b>I Inhaltsverzeichnis (Überblick)</b>	<b>1</b>
<b>II Inhaltsverzeichnis (Detail)</b>	<b>2</b>
<b>III Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>IV Tabellenverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung</b>	<b>1</b>
<b>2. Ergebnisse</b>	<b>2</b>
<b>3. Innovativer Beitrag und Nutzen für KMU</b>	<b>90</b>
<b>4. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen</b>	<b>93</b>
<b>5. Forschungsstellen</b>	<b>99</b>
<b>6. Förderhinweis</b>	<b>101</b>
<b>V Literatur</b>	<b>102</b>
<b>VI Anhang</b>	<b>111</b>

## II Inhaltsverzeichnis (Detail)

I Inhaltsverzeichnis (Überblick).....	1
II Inhaltsverzeichnis (Detail).....	2
III Abbildungsverzeichnis.....	5
IV Tabellenverzeichnis .....	7
<b>1. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Ergebnisse .....</b>	<b>2</b>
2.1 Arbeitspaket 1: Grundlagen des Carbon Accounting .....	2
2.1.1 Ergebnis: Vorschläge für die Erstellung der Product Category Rules gemäß Typ III Umweltdeklarationen für Druckluftfilter .....	3
2.1.2 Ergebnis: Leitfaden, der die Anwendung der PCR zur Bestimmung des Druckverlustes, als normierbares CO <sub>2</sub> -Substitut der Betriebsphase, für den Vergleich von Druckluftfilter erläutert .....	5
2.1.3 Ergebnis: Vorschläge für um die Angabe des Druckverlusts als normierbares CO <sub>2</sub> -Substitut der Betriebsphase erweiterte Produktinformationsblätter .....	16
2.1.4 <i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	25
2.2 Arbeitspaket 2: Grundlagen zum ökonomischen und ökologischen Produktvergleich	26
2.2.1 Leitfaden zum Benchmarking .....	26
2.2.2 <i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	32
2.3 Arbeitspaket 3: Schätzvorgehen für Produkte ohne CO <sub>2</sub> -Angabe .....	32
2.3.1 Ergebnis: Leitfaden zur qualitativen Schätzung der CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	33
2.3.2 Fazit.....	42
2.3.3 <i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	45
2.4 Arbeitspaket 4: Identifikation und Analyse von Kenngrößen zu den Emissionstreibern in der Betriebs- und Entsorgungsphase .....	46
2.4.1 Ergebnis: Katalog von Kenngrößen zu Emissionstreibern in der Nutzungsphase.....	46
2.4.2 Ergebnis Wirkungszusammenhänge der Emissionstreiber .....	53
2.4.3 Fazit.....	54
2.4.4 <i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	55
2.5 Arbeitspaket 5: Kalkulationsvorschriften und Messmethoden für die Kenngrößen ....	55
2.5.1 Ergebnis: Leitfaden mit Messmethoden und -instrumenten aus Kundensicht.	55
2.5.2 Ergebnis: Excel-Demonstrator zur Kalkulation und Überwachung der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Kundensicht.....	61
2.5.3 <i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	66

2.6	Arbeitspaket 6: Emissionsorientierte Erweiterung „traditioneller“ Planungs- und Investitionskalküle .....	66
2.6.1	Ergebnis: Leitfaden zu ökologieorientierten Investitionsentscheidungen .....	67
2.6.2	Ergebnis: Excel-Demonstrator zur erweiterten Investitionsrechnung für die Entsorgungsphase.....	71
2.6.3	<i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	75
2.7	Arbeitspaket 7: Identifikation und Bewertung von Maßnahmen zur Emissionssenkung	75
2.7.1	Ergebnis: Erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung.....	75
2.7.2	Ergebnis: Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung	77
2.7.3	Fazit.....	82
2.7.4	<i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	82
2.8	Arbeitspaket 8: Validierung und Dokumentation der Ergebnisse in den Fallstudienunternehmen.....	82
2.8.1	Ergebnis Praxishandbuch, in dem das gesamte Vorgehen inkl. der Fallstudienanwendung beschrieben ist:.....	82
2.8.2	<i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	88
2.9	Arbeitspaket 9: Projektmanagement, Zwischenberichte und Transfer.....	88
2.9.1	Ergebnis: Abschlussbericht .....	88
2.9.2	Ergebnis: Veröffentlichungen.....	88
2.9.3	<i>Benötigte und eingesetzte Ressourcen</i> .....	88
2.10	Verwendung der Zuwendung .....	88
2.10.1	<i>Erläuterung zu den wichtigsten Positionen aus dem Einzelfinanzierungsplan (Ansatz A.1, Gerätebeschaffungen, Leistungen Dritter) je Forschungsstelle ..</i>	88
2.10.2	<i>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</i> .....	89
<b>3.</b>	<b>Innovativer Beitrag und Nutzen für KMU .....</b>	<b>90</b>
3.1	Innovativer Beitrag der erzielten Ergebnisse .....	90
3.2	Wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU .....	91
3.3	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse .....	92
<b>4.</b>	<b>Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen .....</b>	<b>93</b>
4.1	Projektbegleitender Ausschuss im Projekt.....	93
4.2	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft lt. Antrag während der Projektlaufzeit ..	94
4.3	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft lt. Antrag (Maßnahmen nach Projektende).....	97
4.4	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts .....	97
4.5	Veröffentlichungen und Vorträge im Projekt .....	98
4.6	Pressearbeit im Projekt.....	98

---

<b>5. Forschungsstellen .....</b>	<b>99</b>
<b>6. Förderhinweis.....</b>	<b>101</b>
<b>V Literatur .....</b>	<b>102</b>
<b>VI Anhang .....</b>	<b>111</b>

### III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Forschungszielen und Arbeitspaketen .....	1
Abbildung 2: Vorschlag für eine Gliederung der PCR in Bezug auf Druckluftfilter.....	5
Abbildung 3: Vorgehensweise zur vergleichenden ökologischen Bewertung .....	7
<i>Abbildung 4: Darstellung einer beispielhaften Durchbruchkurve .....</i>	<i>13</i>
Abbildung 5: Beispielhaftes Produkt-Ökolabel .....	16
Abbildung 6: Entwicklungsprozess des Produktinformationsblattes .....	18
Abbildung 7: Beispielhaftes Produktdatenblatt mit dem European Union Energy Label .....	21
Abbildung 8: Vorgeschlagenes Produktinformationsblatt für Koaleszenzfilter .....	23
Abbildung 9: Vorgeschlagenes Produktinformationsblatt für Partikelfilter .....	24
Abbildung 10: Vorgeschlagenes Produktinformationsblatt für Adsorptionsfilter .....	25
Abbildung 11: Prozessualer Aufbau des Benchmarkings in drei Phasen .....	26
Abbildung 12: Lebenszyklusphasen und Umweltwirkungen aus Herstellersicht .....	34
Abbildung 13: Phasendiagramm der Produkt-Ökobilanz nach ISO 14040 .....	36
Abbildung 14: Konstruktion eines Schätzmodells .....	41
Abbildung 15: Ergebnisse (a).....	42
Abbildung 16: Ergebnisse (b).....	42
Abbildung 17: Schnittbild eines Druckluft-Filters.....	47
<i>Abbildung 18: laminare vs. turbulente Strömung .....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 19: Luftverschmutzung 2011 Deutschland.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 20: Anschlussgröße 1" auf 1/2".....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 21: Hohlraumvolumen - Filtermedium.....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 22: schematische Darstellung der Filterwirkung (Partikel- und Koaleszenzfilter) 50</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 23: Aufbau Koaleszenzfilter .....</i>	<i>51</i>
Abbildung 24: Messung mit Filtermedium.....	52
Abbildung 25: Messung ohne Filtermedium.....	53
Abbildung 26: Strömungsoptimierte Luftführung (Beispiel Donaldson Ultra-Filter).....	53
Abbildung 27: Emissionstreiberbaum .....	54
Abbildung 28: Funktion eines Differenzdruckmanometers .....	57
Abbildung 29: Lebensphasen eines guten Druckluftfilters (eigene Darstellung).....	60
Abbildung 30: Vor- vs. Nachphase eines guten Druckluftfilters (eigene Darstellung).....	61
Abbildung 31: Erklärungsübersicht (Demonstrator-Screenshot).....	62
Abbildung 32: Strommix (Demonstrator-Screenshot) .....	63
Abbildung 33: Bestandsanalyse (Demonstrator-Screenshot) .....	63
Abbildung 34: Wartungsintervall (Demonstrator-Screenshot).....	64
Abbildung 35: Vergleichsmessungen im Zeitablauf (Demonstrator-Screenshot).....	65
Abbildung 36: Behälterdruckmessung (Demonstrator-Screenshot).....	66
Abbildung 37: Phasen eines Investitionsprozesses .....	68
Abbildung 38: Dateneingabefeld (eigene Darstellung) .....	72

Abbildung 39: Ein- und Ausgabewerte der Excel-Anwendung (eigene Darstellung) .....	73
Abbildung 40: Ökologisches Profil einer Investition (eigene Darstellung).....	74
Abbildung 41: Übersicht über die bewerteten Investitionen (eigene Darstellung).....	74
Abbildung 42: Mustersteckbrief.....	76
Abbildung 43: Operative Planung .....	78
Abbildung 44: Formalziel- und Sachzielplanung.....	79
Abbildung 45: Optimierung der Maßnahmen .....	80
Abbildung 46: Kontrolle der Ergebnisse.....	81
Abbildung 47: Ursachen von Abweichungen	81
Abbildung 48: Zusammenfassung: Regelkreis Planung und Steuerung.....	82
Abbildung 49: Validierungsvorgehen .....	83
Abbildung 50: Beurteilung.....	83
Abbildung 51: Fallstudienunternehmen .....	84
Abbildung 52: Bewertung Arbeitspaket 4.....	85
Abbildung 53: Bewertung Arbeitspaket 5.....	86
Abbildung 54: Bewertung Arbeitspaket 6.....	86
Abbildung 55: Bewertung Arbeitspaket 7.....	87

## IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Zielsetzung und erarbeiteten Ergebnissen .....	2
Tabelle 2: Wertebereiche für die Klasseneinteilung von Koaleszenzfilter .....	9
Tabelle 3: Bewertungsgrundlage zur Einteilung der CO <sub>2</sub> -Effizienzklassen.....	10
Tabelle 4: Vorschläge zur Klasseneinteilung von Partikelfilter .....	11
Tabelle 5: Bewertungsgrundlage zur Einteilung der CO <sub>2</sub> -Effizienzklassen von Partikelfilter .	12
Tabelle 6: Bewertungsgrundlage zur Einteilung der CO <sub>2</sub> -Effizienzklassen.....	15
Tabelle 7: Zusammenfassung der Messverfahren und Bewertungsgrößen .....	15
Tabelle 8: Teilnehmer der Telefonkonferenz am 28.03.2014 .....	18
Tabelle 9: Beispielhafte Zusammenstellung bestehender Produkt-Ökolabel .....	19
Tabelle 10: Emissionstreiber - Expertensicht.....	38
Tabelle 11: Emissionstreiber - Expertensicht.....	47
Tabelle 12: valide Emissionstreiber .....	51
Tabelle 13: Auszug - Emissionstreiber - gesamte Anlage .....	54
Tabelle 14: Vergleich Druckluftfilter .....	60
Tabelle 15: Bewertungskriterien .....	70
Tabelle 16: Maßnahmenkatalog .....	76
Tabelle 17: Wissenschaftlich-technischer Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU.....	91
Tabelle 18: Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses .....	93
<i>Tabelle 19: Sitzungen des PA und inhaltliche Schwerpunkte der jeweiligen Sitzung.....</i>	<i>93</i>
Tabelle 20: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit.....	96
Tabelle 21: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft nach Projektende .....	97
Tabelle 22: Veröffentlichungen im Projekt Carbon Management .....	98
Tabelle 23: Pressearbeit im Projekt Carbon Management .....	98

# 1. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung

Das Ziel des Forschungsprojekts „Carbon Management“ bestand in der Entwicklung von Instrumenten zur Erarbeitung, Dokumentation und Umsetzung des produktlebenszyklusorientierten Carbon Accounting, Carbon Planning und Carbon Controlling speziell für die Druckluftfilterbranche.

Konkret leiteten sich aus dem Stand der Wissenschaft und Praxis forschungsleitende Fragen ab, die zu drei Forschungszielen führten. Diese sollten durch neun Arbeitspakete erreicht werden (vgl. Abbildung 1).

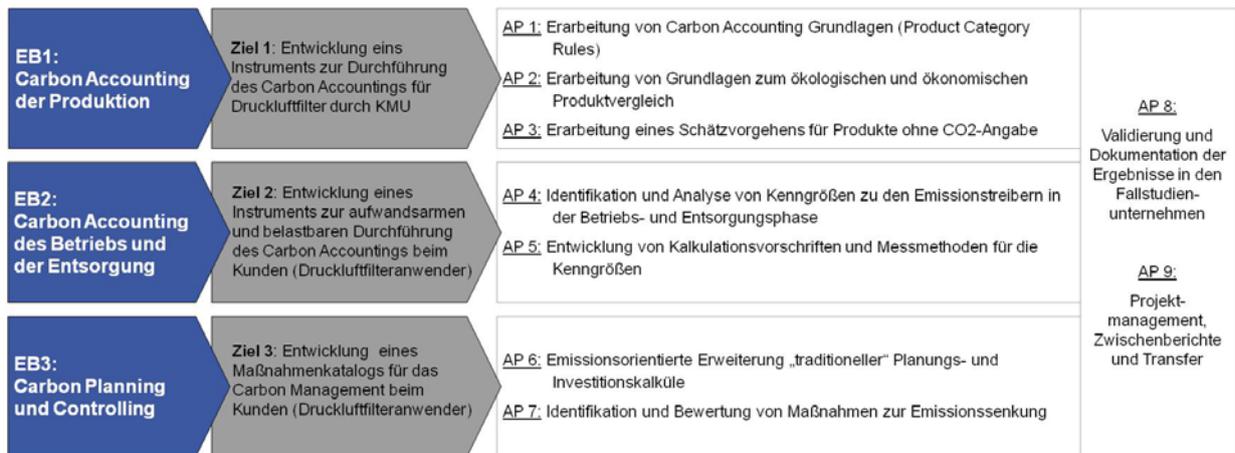


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Forschungszielen und Arbeitspaketen

Nachfolgend sind in der Übersicht die Arbeitspakete und deren geplante sowie die erzielten Ergebnisse abgebildet (siehe Tabelle 1). Deutlich wird, dass alle Teilziele als auch das Gesamtziel des Vorhabens erreicht wurden.

Arbeitspaket (AP)	Geplante Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse	Geplante Ergebnisse erreicht?
<b>AP 1: Erarbeitung von Carbon Accounting Grundlagen (Product Category Rules)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Vorschläge für Product Category Rules für verschiedene Luftfiltertypen und unterschiedliche Belastungsszenarien, die als Grundlage für eine Standardisierung dienen können</li> <li>Leitfaden, der die Anwendung der PCR zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Nutzungsphase von Druckluftfiltern erläutert</li> <li>Vorschläge für um CO<sub>2</sub>-Emissionen erweiterte Produktinformationsblätter</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Vorschlag für die Erstellung der PCR gem. Typ III Umweltdeklaration für Druckluftfilter</li> <li>Leitfaden, der die Anwendung der PCR zur Bestimmung des Druckverlustes, als normierbares CO<sub>2</sub>-Substitut der Betriebsphase, für den Vergleich von Druckluftfiltern erläutert</li> <li>Vorschläge für um die Angabe des Druckverlustes, als normierbares CO<sub>2</sub>-Substitut der Betriebsphase, erweiterte Produktinformationsblätter</li> </ol>	✓
<b>AP 2: Erarbeitung von Grundlagen zum ökologischen und ökonomischen Produktvergleich</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Leitfaden zum Benchmarking</li> <li>Demonstrator zur Unterstützung des Benchmarking</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Leitfaden zum Benchmarking</li> <li>Demonstrator zur Unterstützung des Benchmarking</li> </ol>	✓

<b>AP 3: Erarbeitung eines Schätzvorgehens für Produkte ohne CO<sub>2</sub>-Angabe</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Leitfaden zur qualitativen Schätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Leitfaden zur qualitativen Schätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen</li> </ol>	✓
<b>AP 4: Identifikation und Analyse von Kenngrößen zu den Emissionstreibern in der Betriebs- und Entsorgungsphase</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Katalog von Kenngrößen zu Emissionstreibern in der Nutzungsphase</li> <li>2. Wirkungszusammenhänge der Emissionstreiber</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Katalog von Kenngrößen zu Emissionstreibern in der Nutzungsphase</li> <li>2. Wirkungszusammenhänge der Emissionstreiber</li> </ol>	✓
<b>AP 5: Entwicklung von Kalkulationsvorschriften und Messmethoden für die Kenngrößen</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Leitfaden mit Messmethoden und -instrumenten aus Kundensicht</li> <li>2. Excel-Demonstrator zur Kalkulation und Überwachung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kundensicht</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Leitfaden mit Messmethoden und -instrumenten aus Kundensicht</li> <li>2. Excel-Demonstrator zur Kalkulation und Überwachung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kundensicht</li> </ol>	✓
<b>AP 6: Emissionsorientierte Erweiterung „traditioneller“ Planungs- und Investitionskalküle</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Excel-Demonstrator zur erweiterten Investitionsrechnung für die Entsorgungsphase</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Excel-Demonstrator zur erweiterten Investitionsrechnung für die Entsorgungsphase</li> </ol>	✓
<b>AP 7: Identifikation und Bewertung von Maßnahmen zur Emissionssenkung</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung</li> <li>2. Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung</li> <li>2. Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung</li> </ol>	✓
<b>AP 8: Validierung und Dokumentation der Ergebnisse in den Fallstudienunternehmen</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Praxishandbuch, in dem das gesamte Vorgehen inkl. der Fallstudienanwendung beschrieben ist</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Praxishandbuch, in dem das gesamte Vorgehen inkl. der Fallstudienanwendungen beschrieben ist</li> </ol>	✓
<b>AP 9: Projektmanagement, Zwischenberichte und Transfer</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Störungsfreier Projektablauf</li> <li>2. Projektveröffentlichungen und Realisierung des Plans zum Ergebnistransfer</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Störungsfreier Projektablauf</li> <li>2. Projektveröffentlichungen und Realisierung des Plans zum Ergebnistransfer</li> </ol>	✓

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Zielsetzung und erarbeiteten Ergebnissen

## 2. Ergebnisse

### 2.1 Arbeitspaket 1: Grundlagen des Carbon Accounting

Aufgrund des externen Drucks seitens Markt, Wettbewerb und Regierung fühlen sich Unternehmen zunehmend veranlasst, neben den **ökonomischen auch ökologische Ziele aktiv zu gestalten**, zu verfolgen und transparent zu machen.<sup>1,2,3</sup> Die besondere Aufmerksamkeit

<sup>1</sup> Vgl. Kersten et al. 2011

<sup>2</sup> Vgl. Burritt et al.

<sup>3</sup> Vgl. Horváth et al. 2012

der Öffentlichkeit gilt dabei den durch unternehmerisches Handeln verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>4</sup> Diese Fokussierung fordert Hersteller auf, die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Produkte mithilfe standardisierter Berechnungsvorschriften zu ermitteln und auszuweisen (Carbon Footprint).

Den Herstellern von Druckluftfiltern **fehlen derzeit standardisierte Berechnungsvorschriften** für die CO<sub>2</sub>-Berechnung der Herstellung und des Einsatzes industrieller Druckluftfilter. Ohne eine einheitliche und akzeptierte Berechnungsgrundlage fehlt den Herstellern jedoch die Basis für einen Ausweis von CO<sub>2</sub>-Emissionen der Druckluftfilter. Damit bietet sich für die Kunden momentan keine Möglichkeit die CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Druckluftfilter zu vergleichen und als Entscheidungskriterium beim Kauf einfließen zu lassen.

Gegenstand dieses Arbeitspakets ist deshalb die Unterstützung des Kunden (Filteranwender) durch den CO<sub>2</sub>-Ausweis einzelner Druckluftfilter anhand standardisierter Bewertungsgrundlagen für die verschiedenen Filtertypen.

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses Arbeitspakets:

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
<ol style="list-style-type: none"> <li>Vorschläge für Product Category Rules für verschiedene Luftfiltertypen und unterschiedliche Belastungsszenarien, die als Grundlage zur Standardisierung dienen können</li> <li>Leitfaden, der die Anwendung der PCR zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Nutzungsphase von Druckluftfiltern erläutert</li> <li>Vorschläge für um CO<sub>2</sub>-Emissionen erweiterte Produktinformationsblätter</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Vorschlag für die Erstellung der Product Category Rules gemäß Typ III Umweltdeklaration für Druckluftfilter</li> <li>Leitfaden, der die Anwendung der PCR zur Bestimmung des Druckverlustes, als normierbares CO<sub>2</sub>-Substitut der Betriebsphase, für den Vergleich von Druckluftfiltern erläutert</li> <li>Vorschläge für um die Angabe des Druckverlustes, als normierbares CO<sub>2</sub>-Substitut der Betriebsphase, erweiterte Produktinformationsblätter</li> </ol>

### 2.1.1 Ergebnis: Vorschläge für die Erstellung der Product Category Rules gemäß Typ III Umweltdeklarationen für Druckluftfilter

In den verschiedenen europäischen Ländern existieren **unterschiedliche Umweltzeichen** und -labels. Die Deklarationen enthalten z.B. ökobilanzierte Indikatoren u.a. zum Treibhauseffekt, zur Ressourcennutzung und zu jeweils spezifischen toxischen Wirkungen auf Menschen und Ökosysteme. Die Kennzeichnung wird in drei Stufen umgesetzt (Typ I, Typ II und Typ III).

#### Umweltzeichen Typ I (nach ISO 14024)

Die **Umweltkennzeichnung vom Typ I besteht aus einem Zeichen oder Logo**, mit der besondere Umwelleistungen ausgezeichnet werden. Bekannte Beispiele sind der „Blaue Engel“ oder das „natureplus“-Zeichen.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Vgl. Wiedmann und Minx 2007

<sup>5</sup> Vgl. Norm DIN EN ISO 14024:2001

### Umweltzeichen Typ II (nach ISO 14021)

Die Deklaration von **Umweltkennzeichen nach dem Typ II sind in der ISO 14021 - Umweltbezogene Anbietererklärungen - festgelegt**. Der Hersteller des Produkts ist für seine Umweltdeklaration selbst verantwortlich und kann sie zur Unterstreichung der Glaubwürdigkeit unabhängig überprüfen lassen.<sup>6</sup>

### Umweltzeichen Typ III (nach ISO 14025)

Die **Umweltdeklaration Typ III ist eine umfassende Beschreibung der Umwelleistung ohne Wertung**. Sie basiert auf der Ökobilanz ISO 14040, in der alle Stoffströme von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung systematisch erfasst werden. Die Umweltauswirkungen werden nach international anerkannten Konventionen charakterisiert, das Ergebnis sind Kennzahlen, z.B. der Treibhauseffekt in CO<sub>2</sub> bzw. ein äquivalentes, branchenspezifisches Maß für den Energiebedarf, als Basis für eine CO<sub>2</sub> Bilanz.<sup>7</sup>

Innerhalb des Vorhabens steht die Erstellung einer **Umweltdeklaration Typ III für Druckluftfilter im Vordergrund**, wobei naturgemäß die produktspezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen sind, in Absprache mit den Industriepartnern, aber auch eine Gewichtung der für die CO<sub>2</sub>-Bilanz wesentlichen Phasen realisiert werden soll. In der zugehörigen Norm ISO 14025 ist vermerkt: „Typ III Umweltdeklarationen stellen quantifizierte umweltbezogene Informationen aus dem Lebensweg eines Produkts zur Verfügung, um damit Vergleiche zwischen Produkten gleicher Funktion zu ermöglichen.“<sup>8</sup> Diese „Typ III Umweltdeklarationen“ sind in erster Linie für den Informationsaustausch innerhalb der anbietenden Wirtschaft gedacht, wobei ihre Anwendung für den Informationsaustausch zwischen anbietender Wirtschaft und Verbrauchern nicht ausgeschlossen sein soll.“<sup>9</sup>

Ein wesentlicher Teil der Umweltdeklaration Typ III sind die **Product Category Rules (PCR)** bzw. die **Produktkategorieregeln (PKR)**. Product Category Rules definieren die Grundsätze für Umweltdeklarationen durch die Festlegung der Bewertungsgrundlage als Abgrenzung für einen ökologischen Vergleich von Produkten. Für eine **einheitliche Erfassung, Analyse und der anschließenden ökologischen Bewertung** ist eine höchstmögliche Transparenz des Bewertungsverfahrens von Umweltauswirkungen der untersuchten Produkte anzustreben. Diese Vereinheitlichung gelingt durch die strikte Definition und Anwendung der Product Category Rules für die betrachtete Produktgruppe.

Nachstehend der erarbeitete **Vorschlag für eine Gliederung der PCR** in Bezug auf Druckluftfilter (Abbildung 2). Bei der Erarbeitung wurde ein Vorschlag taiwanesischer Kollegen in Bezug auf Wasserfilter aufgegriffen, angepasst und erweitert:<sup>10</sup>

---

<sup>6</sup> Vgl. Norm DIN EN ISO 14021

<sup>7</sup> Vgl. Norm DIN EN ISO 14025:2011

<sup>8</sup> Norm DIN EN ISO 14025:2011

<sup>9</sup> Norm DIN EN ISO 14025:2011

<sup>10</sup> Vgl. <http://www.edf.org.tw/>

- Allgemeine Informationen
- Firmen- und Produktbeschreibung
  - Produktgruppenbeschreibung
  - Komponenten des Produkts
  - Technische Beschreibung
- Liste der Materialien und verarbeiteten chemischen Substanzen
- Deklaration der betrachteten Einheit
- Systemgrenzen
- Abgrenzungsregeln
- Verteilungsregeln
- Einheiten
- Berechnungsregeln und Anforderungen an die Datenqualität
- Deklarierte Parameter
- Informationen zum Recycling
- Weitere Informationen

*Abbildung 2: Vorschlag für eine Gliederung der PCR in Bezug auf Druckluftfilter*

Nach Informationen aus der Industrie (Teilnehmer des projektbegleitenden Ausschusses) ist bei Druckluftfiltern der weitaus größte Anteil (> 80%) der **CO<sub>2</sub>-Bilanzierung mit der direkten Anwendung** (Betriebsphase), also nach der Installation beim Kunden (Druckluftfilteranwender) und vor dem Austausch der Filter nach vorgegebenen Wartungsintervallen, verbunden. Aus diesem Grunde wird innerhalb des Forschungsvorhabens zwar die Deklaration Typ III als Ganzes beschrieben (s.o.), jedoch wird die **Nutzungsphase des Produktes in den Vordergrund** gestellt. Es soll ein Werkzeug entwickelt und zur Verfügung gestellt werden, mit dem ein möglichst objektiver Vergleich der CO<sub>2</sub>-Bilanz von verschiedenen Druckluftfilter während der Nutzungsphase realisiert werden kann, wobei dem Energiebedarf die entscheidende Bedeutung zukommt.

### **2.1.2 Ergebnis: Leitfaden, der die Anwendung der PCR zur Bestimmung des Druckverlustes, als normierbares CO<sub>2</sub>-Substitut der Betriebsphase, für den Vergleich von Druckluftfilter erläutert**

Als Hinführung zu diesem Leitfaden zunächst einige Informationen zu Druckluftfiltern, deren Anwendung und Wirkungsweise.

**Druckluftfilter haben die Aufgabe, Öltröpfchen, Partikel oder auch gasförmige Verunreinigungen aus Druckluft zu entfernen.** Insbesondere die Abscheidung der Öltröpfchen, die bei der Komprimierung der Luft als Prozessmedium eingebracht werden müssen, stellt eine besondere Herausforderung dar. Oft kommen mehrschichtige Anordnungen zum Einsatz, bestehend aus einem Filtermedium und einem Drainagemedium. Die Tröpfchen werden zunächst im Filtermedium abgeschieden, koaleszieren hier und werden dann von der Strömung in das dahinterliegende Drainagemedium gedrückt. Im **Drainagemedium** bilden sie eine flüssige Phase (ggf. real **Öl-Wasser-Emulsion**), die nach unten abläuft und in das Filtergehäuse tropft. Die Abscheidung von Feststoffpartikeln (z.B. mechanischer Abrieb) erfolgt meist parallel, wobei diese im Filtermedium verbleiben und zum vorzeitigen Austausch

der Filterpatrone führen können. Für die Filtration der Tröpfchen und der Partikel kommen meist Faserfiltermedien mit **unterschiedlichem Aufbau** und unterschiedlichen Abscheidegraden zum Einsatz. Die Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen erfolgt mit sog. Adsorptionsfiltern, wobei meist eine Aktivkohleschicht in die Filterpatrone integriert ist.

Allen Filterarten ist gemeinsam, dass das zu reinigende Gas durch die Filter hindurchgedrückt werden muss, wobei in Abhängigkeit dieses **Filterwiderstandes** unterschiedlich **hohe Druckverluste** resultieren. Der Druckverlust muss zur Aufrechterhaltung des Betriebsdrucks durch die Bereitstellung von zusätzlicher Energie kompensiert werden.

Die **Reinigungsleistung** der Filter (Abscheidegrad) ist das **primäre Qualitätsmerkmal** von Druckluftfilter, der zugehörige Druckverlust das sekundäre. Dabei sollte üblicherweise bei höherem Druckverlust auch eine bessere Reinigungsleistung mit den Filtern erzielt werden.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden ein ökologisches Bewertungsverfahren für die Nutzungsphase von Druckluftfilter entwickelt, das Filter gleichen Abscheidegrades (Reinigungsleistung) auf Basis des Energiebedarfs (Druckverlust) vergleicht. **Es ist der Filter ökologisch vorteilhafter zu bewerten, der bei gleichem Abscheidegrad einen geringeren Druckverlust aufweist.**

Das nachfolgend vorgestellte **Bewertungsverfahren** erfüllt demnach Zweckmäßigkeit und Vergleichbarkeit von Typ III Umweltdeklarationen: „Der Zweck von Typ III Umweltdeklarationen ist, einem Einkäufer oder Anwender den Vergleich der Umwelleistung von Produkten unter Berücksichtigung ihres Lebenswegs zu ermöglichen. Deshalb ist die Vergleichbarkeit von Typ III Umweltdeklarationen entscheidend. Die Angaben, die für diesen Vergleich gemacht werden, müssen nachvollziehbar sein, damit der Einkäufer oder Anwender die immanenten Grenzen der Vergleichbarkeit der Typ III Umweltdeklarationen erkennen kann.“<sup>11</sup> Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass im Rahmen dieses Projektes nicht der gesamte Lebenswert in die Bewertung einfließt, sondern der **Fokus auf der Betriebsphase** liegt. Jedoch kann durch die Einbeziehung der vor- und nachgelagerten Produktlebensphasen die Typ III Umweltdeklaration jederzeit vervollständigt werden.

## Leitfaden

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 3) zeigt die vorgeschlagene **Vorgehensweise** zur **ökologischen Bewertung** von Druckluftfiltern im Überblick. In der ersten Stufe erfolgt die Klassifizierung der Druckluftfilter nach Filtertypen. Daraufhin erfolgen parallel die Bestimmung der Druckluftfilterklasse sowie des Druckverlusts, methodisch abhängig vom vorliegenden Druckluftfiltertyp. Die gemessenen Daten bilden die Grundlage zur ökologischen Bewertung.

---

<sup>11</sup> Norm DIN EN ISO 14025:2011

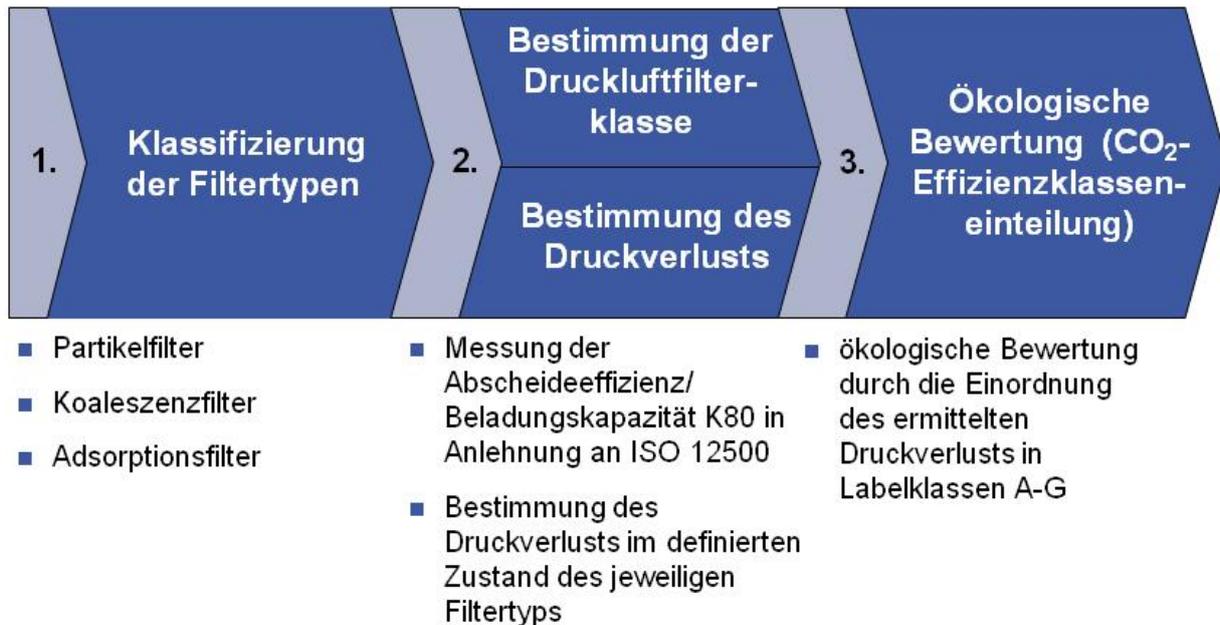


Abbildung 3: Vorgehensweise zur vergleichenden ökologischen Bewertung von Druckluftfiltern

Die vergleichende **ökologische Bewertung des Betriebsverhaltens** von Druckluftfiltern ist individuell für den jeweiligen Filtertyp durchzuführen und muss so **realitätsnah** wie möglich erfolgen. Andererseits sind der Komplexitätsgrad der Bewertungsverfahren zum einen und die Verfahrensvorschrift zum anderen so anzupassen, dass die Messung an einem identischen Filter in jedem Labor und durch jeden Laboranten zur gleichen Bewertung führen wird. Diese vergleichende Prüfung und Beurteilung der Druckluftfilter ist Gegenstand der **Norm ISO 12500** („Filters for compressed air – Test methods“) Teile 1 – 3.<sup>12</sup> Diese Norm wird zum Beleg der Leistungsfähigkeit gegenüber Kunden sowie zur internen Sicherung der Qualität angewendet. Die Druckluftfilter werden gemäß dieser Norm **standardisierten Tests** unterzogen, die auf internationaler Ebene vereinbart sind. Allerdings sind bei der praktischen Umsetzung dieser Norm einige Schwierigkeiten aufgetreten, die zum einen durch neue Erkenntnisse und zum anderen durch einige unscharfe Formulierungen in der vorliegenden Fassung begründet sind. Die entsprechenden Vorschriften werden somit individuell von Druckluftfilterhersteller angepasst mit dem Ergebnis einer nicht einheitlichen und somit letztlich nicht vergleichbaren Bewertung der Druckluftfilter. Hier muss Abhilfe geschaffen werden. Der vorgestellte Leitfaden kann und wird einen Beitrag zur Schärfung der Bewertungsmaßstäbe leisten. Einzelheiten werden Gegenstand einer Veröffentlichung sein. Ungeachtet dessen ist jedoch der Grundgedanke dieser Norm nach wie vor richtig, Druckluftfilter unter anwendungsnahen Bedingungen vergleichend zu bewerten.

**Eine Aussage über die zu erwartende Druckluftqualität in der tatsächlichen Anwendung ist jedoch nach wie vor nicht möglich.** Diese hängt von den jeweiligen Randbedingungen ab. Die Druckluftqualität selbst und deren messtechnischer Nachweis sind in der Norm ISO 8573 beschrieben.<sup>13</sup> Dort sind für jede der oben erwähnten Druckluftfiltertyp Effizienzklassen definiert. Diese Klasseneinteilung soll als Grundlage für die vergleichende Bewertung innerhalb dieses Vorhabens übernommen und gegebenenfalls angepasst werden. Der wesentliche Aspekt im Sinne einer ökologischen Bewertung im Rahmen eines Carbon

<sup>12</sup> Vgl. Norm ISO 12500

<sup>13</sup> Vgl. Norm ISO 8573

Management ist jedoch der Energiebedarf und bei Druckluftfiltern insbesondere der Energiebedarf während des Betriebes zur Kompensation des Druckverlustes. Auf Grund dieser Überlegungen wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

Die **Druckluftfilterklasseneinteilung** und die **Bestimmung des Druckverlusts** (2. Stufe des Bewertungsverfahrens) erfolgt in Anlehnung an die in der Norm ISO 8573 festgelegten Klassifizierungen für die drei Filterkategorien.<sup>14</sup> Die ökologische Bewertung (3. Stufe) erfolgt über die vergleichende ökologische Bewertung der Druckluftfilter jeder Druckluftfilterklasse. Diese ökologische Bewertung basiert auf der Angabe des Druckverlustes während der Durchströmung der Filter bei Nennvolumenstrom. Der Nennvolumenstrom ist Teil der technischen Daten von Druckluftfiltern und ist vom Hersteller anzugeben. Druckluftfilter werden in erheblich unterschiedlichen Baugrößen produziert. Die Angabe des **Nennvolumenstroms** ist wesentlich für die individuelle Qualitätsbeschreibung dieser unterschiedlichen Baugrößen, wobei die Qualitätsbeschreibung bei Nennvolumenstrom durchgeführt werden muss.

Die Vorgehensweise der energetischen Bewertung innerhalb verschiedener Filterklassen wird bereits für Filter in anderen Anwendungsbereichen erfolgreich angewendet.<sup>15</sup> Siehe hierzu das Dokument Eurovent 4/11 für Filter der raumluftechnische Anlagen (RLT-Filter).<sup>16</sup>

### 1. Stufe: Klassifizierung der Filtertypen

Die **Qualität der Druckluftfilter** (Abscheidegrad und Druckverlust) muss **abhängig** vom jeweiligen **Einsatzbereich** bewertet werden. Darauf basierend werden Druckluftfilter in drei Filterkategorien eingeteilt. Diese sind: Koaleszenzfilter, Adsorptionsfilter und Partikelfilter. Eine weitere Kategorie - Wasserabscheider im Druckluftbereich - wird innerhalb dieses Vorhabens nicht weiter betrachtet.

**Koaleszenzfilter** haben die Aufgabe, **Öltröpfchen**, die prozessbedingt in die Druckluft eingebracht werden müssen, wieder aus der Druckluft zu entfernen. Dabei werden die Tröpfchen im Filter abgeschieden, fließen innerhalb des Filters zusammen und tropfen nach und nach aus dem Filter in einen sog. Drainagebunker ab. Der Filter befindet sich während des Betriebes in einem durchnässten, gesättigten Zustand und muss demzufolge auch in einem solchen gesättigten Zustand qualitativ bewertet werden.

**Adsorptionsfilter** haben die Aufgabe, „**Fremdgase**“ aus der Druckluft zu entfernen. Fremdgase können sein: Öldampf in normalen Druckluftanwendungen, Schwefelwasserstoff bei der Aufbereitung von Erdgas, toxische gasförmige Komponenten niedriger Konzentration, die immer häufiger eine Rolle in der industriellen Produktion spielen. Üblicherweise werden die gasförmigen Komponenten mit Hilfe von Aktivkohlefiltern aus den Trägergasströmen entfernt. Um die verschiedenen Filter zu vergleichen, wurde einvernehmlich mit den Industriepartnern vereinbart, dass die Bewertung der Adsorption gasförmiger Bestandteile mit einer bestimmten gasförmigen Komponente durchgeführt wird.

**Partikelfilter** haben die Aufgabe, **partikelförmige Verunreinigungen** (feste Substanzen, wie Staubteilchen, die vom Kompressor angesaugt werden oder Abrieb auf Grund mechanischer Vorgänge) aus der Druckluft zu entfernen. Diese Partikel sammeln sich im Filter an und setzen den Filter nach und nach zu; der Druckabfall wird dadurch bedingt immer höher.

---

<sup>14</sup> Vgl. Norm ISO 8573

<sup>15</sup> Vgl. Norm EN 779:2012

<sup>16</sup> Vgl. Product Group 4B 2014

## 2. Stufe: Druckluftfilterklasseneinteilung und Bestimmung des Druckverlust als Grundlage der ökologischen Bewertung

### Koaleszenzfilter

Die normative **Testvorschrift zur ISO 12500-1** wird derzeit **überarbeitet**.<sup>17</sup> Die Überarbeitung bezieht sich im Wesentlichen auf die empfohlenen Nachweisverfahren. Unter Anwendung der novellierten Nachweisverfahren ist der Prüfablauf gem. ISO 12500 zu befolgen. Der Prüfablauf als solcher, insbesondere das Verfahren, um die Filter in einen **gesättigten Zustand** zu überführen, ist dort beschrieben und kann im Wesentlichen übernommen werden. Bei Filtern für ein spezifisches Öl sind detaillierte Angaben über das verwendete Öl zu machen.

Die **Effizienzklassen** (Abscheidegrad) werden in **Anlehnung an ISO 8573-1** (Norm zur Bestimmung der Druckluftqualität) wie folgt eingeteilt, wobei hier nicht das Gesamtrestöl (flüssiges Öl, Ölaerosol und Öldampf) bewerten werden soll, sondern nur der Ölaerosolgehalt.<sup>18</sup>

Druckluftfilterklasse	Ölaerosolgehalt X [mg/Nm <sup>3</sup> ] nach ISO 8573-1	Mindestabscheidegrad [%] nach ISO 12500-1
5	$X > 5$	< 50
4	$1 < X \leq 5$	50,0
3	$0,1 < X \leq 1$	90,0
2	$0,01 < X \leq 0,1$	99,0
1	$X < 0,01$	99,9

Tabelle 2: Wertebereiche für die Klasseneinteilung von Koaleszenzfilter

#### Bemerkung:

Je nach Ölsorte und Temperatur können sich deutlich unterschiedliche Öldampfkonzentrationen einstellen. Die bestimmenden Größen für die Dampfkonzentrationen sind der Dampfdruck des verwendeten Öls (Ölgemisches) in Abhängigkeit von der Temperatur, die Tröpfchengröße und die Verdampfungsgeschwindigkeit. Öldampfkonzentrationen können je nach Öl und Temperatur zwischen kleiner 0,01 mg/m<sup>3</sup> und größer 0,1 mg/m<sup>3</sup> liegen. Der Öldampfgehalt muss sicherlich bei der Bewertung der Druckluftqualität (ISO 8573-1) berücksichtigt werden, bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit von Koaleszenzfiltern sollte jedoch der Ölaerosolgehalt im Vordergrund stehen. Zur Reduzierung des Öldampfes werden Adsorptionsfilter verwendet, deren Bewertung weiter unten zu finden ist.

Als Beurteilungsmaßstab für den **Carbon Footprint** dient der **Druckverlust im gesättigten Zustand**. Folgende Einteilung wird in Anlehnung an die lineare Stufung nach Eurovent 4/11 (Klassifizierung von Filtern für raumlufttechnische Anlagen) für jede Filterklasse vorgeschlagen.<sup>19,20</sup>

<sup>17</sup> Vgl. Norm ISO 12500

<sup>18</sup> Vgl. Norm ISO 8573

<sup>19</sup> Vgl. Norm EN 779:2012

<sup>20</sup> Vgl. Product Group 4B 2014

Druckluftfilterklasse	1	2	3	4	5
Mindestabscheidegrad	99,9 %	99,0 %	90,0 %	50 %	< 50 %
CO <sub>2</sub> -Effizienzklassen	Druckverlustbereich im gesättigten Zustand [mbar]				
A	50-100	40-80	30-60	20-40	10-20
B	100-150	80-120	60-90	40-60	20-30
C	150-200	120-160	90-120	60-80	30-40
D	200-250	160-200	120-150	80-100	40-50
E	250-300	200-240	150-180	100-120	50-60
F	300-350	240-280	180-210	120-140	60-70
G	350-400	280-320	210-240	140-160	70-80

Tabelle 3: Bewertungsgrundlage zur Einteilung der CO<sub>2</sub>-Effizienzklassen von Koaleszenzfilter

An dieser Stelle wird auf das Arbeitspaket AP3 verwiesen. Die dortige Einteilung basiert auf ausgedehnten Messungen an einer Vielzahl von Druckluftfiltern. Die Messergebnisse wurden derart aufbereitet, dass eine auf realen Druckverlusten basierende Einteilung der CO<sub>2</sub> – Effizienzklassen (Druckverlust) erfolgen konnte. Das gleiche gilt auch für die nachfolgend behandelten Partikelfilter.

### Partikelfilter

Die **Testvorschrift zur ISO 12500-3 (Partikel) wird derzeit überarbeitet**.<sup>21</sup> Die Überarbeitung bezieht sich im Wesentlichen auf die empfohlenen Nachweisverfahren. Allerdings sind bei dem dort beschriebenen Prüfverfahren ebenfalls Optimierungen und Erweiterungen möglich. Eine notwendige Erweiterung bezieht sich auf die Bestimmung des dynamischen Druckanstiegs als Kriterium für die Standzeit des Druckluftfilters, neben der Bestimmung des Mindestabscheidegrads. Nur eine simultane Betrachtung des Mindestabscheidegrads und des dynamischen Druckanstiegs erlauben eine reale Bewertung der verschiedenen Filter durch den Anwender, da die Vorteile eines hohen Mindestabscheidegrads durch eine sehr kurze Standzeit aufgehoben werden.<sup>22</sup>

Die Bestimmung des Mindestabscheidegrades ist an einem trockenen, unbestäubten Druckluftfilter bei Nennvolumenstrom und bei einem Betriebsdruck von 7 bar (ü) vorzunehmen. Die Messung bei Betriebsdruck ist zwingend erforderlich, da der Abscheidegrad im Partikelgrößenbereich des MPPS (most penetration particle size) und darunter mit zunehmendem Druckniveau abnimmt.

Die Festlegung der Testvorschrift zur Einteilung der Druckluftfilterklassen gestaltet sich schwierig und muss letztendlich als Kompromiss dargestellt werden. In nachfolgender Tabelle sind fünf Vorschläge skizziert.

<sup>21</sup> Vgl. Norm ISO 12500

<sup>22</sup> Vgl. Norm EN 1822-1:2011

Vorschlag	Anlehnung an	Klasseneinteilung	Nachweis	Bemerkungen
1.	DIN EN 1822	Abscheidegrad im MPPS	unter Druck nicht möglich	MPPS von Druckluftfiltern bei Betriebsdruck von 7 bar (ü) mit druckfestem Partikelzähler nicht messbar (liegt außerhalb des Messbereiches); MPPS mit anderen Partikelzählern messbar aber erst nach Entspannung (Art und Weise der Entspannung beeinflusst Messgröße)
2.	EN 779	Abscheidegrad bei 0,3 µm	unter Druck möglich	Partikel der Größe 0,3 µm sind mit allen Verfahren gut messbar. Die Häufigkeit der Partikel der Größe 0,4 µm ist im Rohgas so hoch, dass auch Filter mit sehr hohen Abscheidegraden noch statistisch sicher vermessen werden können. Die Bewertung ist unabhängig von der Größenverteilung des Testaerosols, wenn nur genügend Partikel im Größenbereich um 0,4 µm vorhanden sind.
3.	ISO 8573	Abscheidegrad bezogen auf drei Partikelgrößenklassen	ab einer Partikelgröße von 0,2 µm auch unter Druck möglich	Die Berechnungsvorschrift für die Mittelung des Abscheidegrades innerhalb der Größenbereiche ist anzugeben. Drei Werte des Abscheidegrades bestimmen die Druckluftfilterklasse über eine Festlegung der jeweiligen Mindestabscheidegrade pro Größenbereich. Dabei ist eine Festlegung notwendig, wann eine bestimmte Druckluftfilterklasse erreicht ist. Damit wird eine Klasse erreicht, wenn alle drei oder wenn mindestens zwei oder wenn mindestens eine Forderungen erfüllt ist.
4.	VDMA 1 <sup>23</sup>	Gesamtabscheidegrad zwischen 0,2 µm und 5 µm	unter Druck möglich	Es ist die Angabe einer Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Gesamtabscheidegrades nötig. Das Ergebnis ist abhängig von der Größenverteilung des Testaerosols.
5.	VDMA 2 <sup>24</sup>	gemäß Herstellerangabe zwischen 5 µm Filter (grob) und 0,01 µm Filter (superfeinst)	unter Druck nicht möglich	Die Klassenbezeichnungen können übernommen werden. Allerdings sind die Messverfahren zur Bewertung neu festzulegen.

Tabelle 4: Vorschläge zur Klasseneinteilung von Partikelfilter

**Innerhalb dieses Vorhabens wird die 2. Variante** (in Anlehnung an EN 779) **vorgeschlagen**, allerdings bei einer Partikelgröße von 0,3 µm, denn bei Druckluftfiltern liefern die 0,4

<sup>23</sup> Vgl. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

<sup>24</sup> Vgl. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

µm-Werte nicht die geforderten Unterscheidungskriterien. Die Klassenbezeichnungen gemäß VDMA 2 können jedoch beibehalten werden.<sup>25</sup>

Damit ergibt sich nachstehende Möglichkeit der Klasseneinteilung (s. Tab. 5).

Druckluftfilter- klasse	Superfeinst	Feinst	Fein	Grob	5	6	7
Min- destabschei- degrad bei 0,4 µm	99,99995 %	99,9995 %	99,995 %	99,95 %	99,5 %	95 %	85 %
CO <sub>2</sub> - Effizienz- klassen	Druckabfallbereich trocken						
A	50-100	40-80	30-60	20-40	10-30	10-20	5-10
B	100-150	80-120	60-90	40-60	30-50	20-30	10-15
C	150-200	120-160	90-120	60-80	50-70	30-40	15-20
D	200-250	160-200	120-150	80-100	70-90	40-50	20-25
E	250-300	200-240	150-180	100-120	90-110	50-60	25-30
F	300-350	240-280	180-210	120-140	110-130	60-70	30-35
G	350-400	280-320	210-240	140-160	130-150	70-80	35-40

Tabelle 5: Bewertungsgrundlage zur Einteilung der CO<sub>2</sub>-Effizienzklassen von Partikelfilter

Die Bestimmung des **dynamischen Druckanstiegs** ist ebenfalls, wie der Druckverlust an einem **trockenen, unbestaubten Druckluftfilter vorzunehmen**. Als Testaerosol ist hier jedoch ein Feststoffaerosol zu verwenden. Die Generierung von trockenen Testaerosolen insbesondere aus den üblichen Teststäuben, wie z.B. AC fine, gegen einen Druck von 7 bar (ü) ist nur sehr schwierig zu realisieren. Jedoch kann der dynamische Druckanstieg auch bei Umgebungsdruck bestimmt werden. Dies ist dadurch gerechtfertigt, dass

- der Massenanteil des abgeschiedenen Staubes sowohl bei 7 bar(ü) als auch bei Umgebungsdruck nahezu 100 % beträgt (Die Verringerung des Mindestabscheidegrades mit zunehmendem Druckniveau bezieht sich nur auf Partikel kleiner 1 µm)
- im viskositätsdominierten Teil des Druckverlustes mit zunehmendem Druckniveau nur eine geringfügige Änderung des Druckverlustes zu erwarten ist.

Aus diesen Gründen wird folgende Vorgehensweise zur Bestimmung des dynamischen Druckanstieges empfohlen:

Die **Messung erfolgt bei Umgebungsdruck**. AC fine wird z.B. mit einem Trockendispergierer (verschiedene Varianten am Markt erhältlich) in ein Testaerosol überführt. Die Rohgaskonzentration ist auf einen noch festzulegenden Wert einzustellen (z.B. 100 mg/m<sup>3</sup>). Die Messung erfolgt bei reduziertem Nennvolumenstrom, also bei einem Volumenstrom, der zur gleichen Anströmgeschwindigkeit wie sie unter Nennbedingungen zu erwarten ist führt. Am Ende der Messung ist eine Kontrollwägung der Filterpatrone durchzuführen.

Die **Bemessungsgrundlage** bildet die **Erfassung der Druckverlustkurve** über die Zeit bei konstanter Rohgaspartikelkonzentration. Aus dieser Kurve wird die Zeitdifferenz ermittelt, bei der der Druckabfall um einen bestimmten Wert angestiegen ist. Daraus wird ein Maß für die Beladungskapazität (z.B. Staubstandzeit) abgeleitet.

<sup>25</sup> Vgl. Norm EN 779:2012

## Adsorptionsfilter

Die **Testvorschrift zur ISO 12500-2 (Öldampf)** bedarf nach Meinung von IUTA und unserer Industriepartner einer grundlegenden Überarbeitung. Die hier **vorgeschlagene Methode kann als Grundlage** dafür dienen.<sup>26</sup>

Adsorptionsfilter, wie sie zur Reduzierung dampfförmiger Stoffe in der Druckluft eingesetzt werden, können über zwei Qualitätskriterien beurteilt werden. Diese sind der **Sofortdurchbruch** und die **Kapazität**.

Der **Sofortdurchbruch** beschreibt die Situation, dass selbst mit einem neuen Filter nicht die gesamte Dampfacht aus der Druckluft entfernt wird. Dies kann bauartbedingt sein, z.B. durch eine sehr dünne, offene, adsorptive Schicht, die bei Nennvolumenstrom in zu kurzer Zeit durchströmt wird, oder auch auf unerwünschte Leckagen zurückgeführt werden. Der Sofortdurchbruch ist zudem abhängig von der Rohgaskonzentration, der Temperatur, der Durchströmgeschwindigkeit, dem Druckniveau und der Adsorptionskinetik, letztere ist eine Eigenschaft des Adsorbens.

Die **Kapazität** beschreibt die Aufnahmefähigkeit des Adsorbens gegenüber der Testsubstanz und ist ein Maß dafür, wie viel Dampf im Filter aufgenommen werden kann. Die Kapazität ist primär eine Adsorbenseigenschaft, jedoch auch abhängig von der Rohgaskonzentration, der Temperatur, der Durchströmgeschwindigkeit und vom Druckniveau.

Zur Bestimmung der Adsorptionskapazität wird nachstehende Verfahrensweise vorgeschlagen. Der zu bewertende Druckluftfilter ist mit trockener Druckluft bei einer Temperatur von 20 °C und einem Druckniveau von 7 bar (ü) mit Nennvolumenstrom zu durchströmen und der Druckverlust zu messen. Nach einer Stabilisierungsphase wird die Dampfzufuhr gestartet und sowohl rohgasseitig und reingasseitig die jeweilige Dampfkonzentration gemessen. Das Verhältnis aus Reingaskonzentration zu Rohgaskonzentration ergibt, aufgetragen über der Beladungszeit, die Durchbruchkurve. Aus der Durchbruchkurve kann sowohl die Beladungskapazität als auch der Sofortdurchbruch ermittelt werden.

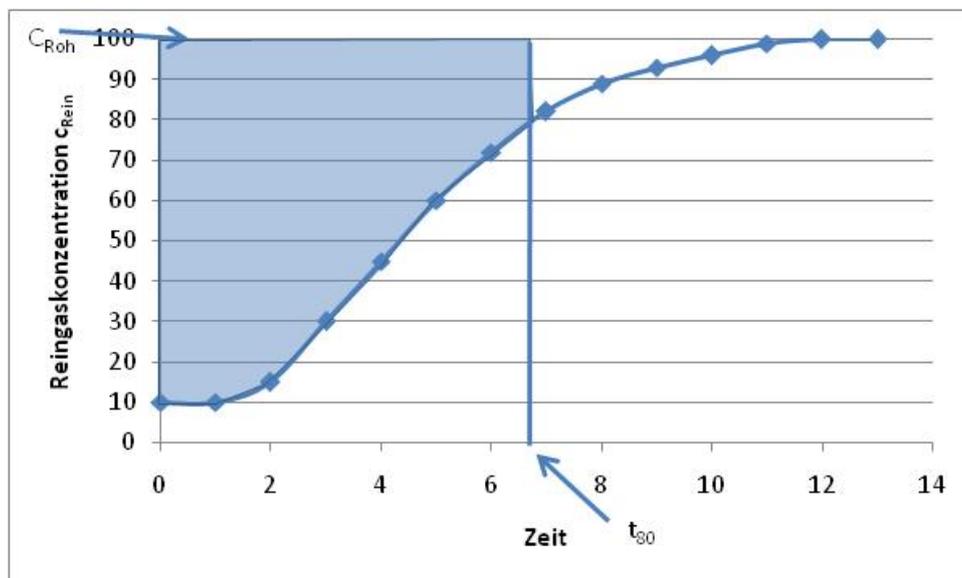


Abbildung 4: Darstellung einer beispielhaften Durchbruchkurve

Im Falle einer Durchbruchkurve, wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist, beträgt der Sofortdurchbruch 10 %. Die Basis zur Bestimmung der

<sup>26</sup> Vgl. Norm ISO 12500

Beladungskapazität ist die Masse an adsorbiertem Gas, die bis zum 80%-Durchbruch vom Adsorbens aufgenommen wurde. Dies entspricht dem blau eingefärbten Bereich in *Abbildung 4* und kann gemäß nachstehender Berechnungsvorschrift ermittelt werden.

$$m_{80} = \int_0^{t_{80}} (C_{\text{Roh}} - C_{\text{Retn}}(t)) \dot{V} dt$$

Die Beladungskapazität  $K_{80}$  selbst wird über das Verhältnis von adsorbierter Masse zur Gesamtmasse des Adsorbens  $m_{Ad}$  angegeben.

$$K_{80} = \frac{m_{80}}{m_{Ad}}$$

Auf diese Weise kann die Qualität von adsorptiven Druckluftfiltern auch für unterschiedliche Adsorbensmengen vergleichend dargestellt werden.

Der **Verlauf der Durchbruchkurve** hängt sehr stark von der **Adsorbensmenge** ab, die im Wesentlichen die Zeit  $t_{80}$  bis zum 80%-Durchbruch bestimmt. Aus Gründen einer hinreichend genauen Auswertung zum einen und einer akzeptablen Messzeit zum andern, sollte der 80%-Durchbruch innerhalb einer Zeitspanne von einer halben Stunde bis zu zwei Stunden erreicht sein.

Damit dies realisierbar ist, wird eine **dreistufig einstellbare Rohgaskonzentration** vorgeschlagen, wobei die drei unterschiedlichen Konzentrationen auf 100 mg, 300 mg und 1000 mg je Kilogramm trockene Druckluft einstellbar sein sollten. Die Stufung ist deswegen nötig, da bei einigen handelsüblichen Filtern mit einer Rohgaskonzentration von 1000 mg/kg (Konzentrationsvorschrift der ISO 12500-2) die Filter schon nach wenigen zehntel Sekunden erschöpft sind.<sup>27</sup> Damit ist eine belastbare Aussage über den Sofortdurchbruch und die Kapazität nicht möglich. Bei anderen Filtern wiederum wäre bei einer sehr niedrigen Konzentration der 80%-Durchbruch erst nach mehreren Stunden erreicht. Dies sollte aus Kostengründen vermieden werden.

Die Auswahl der Bewertungskonzentration unterliegt nachstehender Vorgabe: Zunächst wird mit einer Startkonzentration von 300 mg/kg beladen. Ist der 80%-Durchbruch schon nach weniger als 30 Minuten erreicht, dann ist die eigentliche Bewertung bei einer Konzentration von 100 mg/kg durchzuführen. Ist anhand des Kurvenverlaufes innerhalb der ersten 30 Minuten eine Durchbruchzeit von mehr als 2 Stunden zu erwarten, dann ist die eigentliche Bewertung bei einer Konzentration von 1000 mg/kg durchzuführen. Ansonsten wird die Bewertung bei Startkonzentration weiter durchgeführt. Die Bewertungskonzentration ist innerhalb der Dokumentation als zusätzlicher Testparameter anzugeben.

---

<sup>27</sup> Vgl. Norm ISO 12500

Druckluftfilterklasse	1	2	3	4	5
Beladungskapazität K80	>30 %	30 %	20 %	15 %	10 %
CO <sub>2</sub> -Effizienzklassen	Druckverlustbereich im gesättigten Zustand [mbar]				
A	50-100	40-80	30-60	20-40	10-20
B	100-150	80-120	60-90	40-60	20-40
C	150-200	120-160	90-120	60-80	40-60
D	200-250	160-200	120-150	80-100	60-80
E	250-300	200-240	150-180	100-120	80-100
F	300-350	240-280	180-210	120-140	100-120
G	350-400	280-320	210-240	140-160	120-140

Tabelle 6: Bewertungsgrundlage zur Einteilung der CO<sub>2</sub>-Effizienzklassen von Adsorptionsfilter

Die Einteilung gem. Tabelle 6: Bewertungsgrundlage zur Einteilung der CO<sub>2</sub>-Effizienzklassen von Adsorptionsfilter ist jedoch momentan eine rein willkürliche und nur der Vollständigkeit geschuldet. Im Bereich der Adsorptionsfilter liegen leider noch keine gesicherten Erkenntnisse vor, welche Parameter für eine Einteilung dieser Art herangezogen werden sollten. Es gibt weder belastbare Aussagen in der einschlägigen Literatur dazu, noch ist dieser Aspekt auf den Fachtagungen abschließend diskutiert worden. Nach Abstimmung mit den Fachleuten im Adsorptionsbereich lässt sich zusammenfassend sagen, dass hier noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. **Innerhalb dieses Vorhabens wurde deshalb auf eine weitere Betrachtung von Adsorptionsfilter verzichtet.**

### Zusammenfassung der Messverfahren und Bewertungsgrößen

In nachstehender Tabelle sind mögliche **Messverfahren und Bewertungsgrößen** für die drei Druckluftfilterkategorien zusammengefasst.

Filterkategorie	Koaleszenzfilter	Partikelfilter
Bewertungsgröße	Restölgehalt (tröpfchenförmig), bei Sättigung ggf. aufzuteilen in Primärpenetration und Reentrainment;	Fraktionsabscheidegrad bei 8 bar (a) im Neuzustand; Beladungsdynamik bei 1 bar (a) (Differenzdruck über Beladung);
Zusatzinfo	Beladungsdynamik bei 8 bar(a) (Differenzdruck über Beladung);	spezifischer Differenzdruck (Medium, Gehäuse) über Messung Differenzdruck gegen Betriebsvolumenstrom bei 8 bar (a)
Testsubstanzgenerierung	Generierung gegen 8 bar; Laskin	Generierung gegen 8 bar; Laskin für Tröpfchen; Generierung gegen max 500 mbar „Bürste“ für feste Stäube (AC fine)
Messverfahren	Tröpfchen sammeln auf Absolutfilter; eluieren und GC FID; Optional zusätzlich: druckfestes Aerosolspektrometer	Druckfestes Aerosolspektrometer (Entspannen und andere zählende Verfahren); Differenzdrucksensoren
Prüfparameter	Ölsorte; Sättigungsverfahren; Konzentration; Partikelspektrum; Volumenstrom; Druckniveau; Temperatur; Feuchte;	Partikelmaterial; Spektrum; Konzentration; Volumenstrom; Druckniveau; Temperatur; Feuchte;

Tabelle 7: Zusammenfassung der Messverfahren und Bewertungsgrößen

## 2.1.3 Ergebnis: Vorschläge für um die Angabe des Druckverlusts als normierbares CO<sub>2</sub>-Substitut der Betriebsphase erweiterte Produktinformationsblätter

### 2.1.3.1 Nutzenaspekte

Inhalt der im Rahmen dieses Projekts entwickelten **Produktinformationsblätter** besteht in der Zusammenführung von herstellereigenen **Produktdaten** des Druckluftfilters (Marke, Modell und Material), einem **Produkt-Ökolabel** und den zugrundeliegenden Testparametern und Testresultaten zur Einteilung des betrachteten Druckluftfilters in die entsprechende Klasse des Produkt-Ökolabels.

**Produkt-Ökolabel** entsprechen grafisch aufbereitete, produktbegleitende Informationen über bestimmte ökologische Eigenschaften des Produktes. Um eine schnelle Vergleichbarkeit der ökologischen Eigenschaften der Produkte einer bestimmten Produktkategorie zu gewährleisten, erfolgt der Ausweis des Produkt-Ökolabels oft in Form der Definition von **Klassen**, wie beispielsweise beim EU Energy Label. Abbildung 5: Beispielhaftes Produkt-Ökolabel zeigt eine solche Klasseneinteilung für die produktbezogene Eigenschaft „Wasserverbrauch“. Zugehörige Produkte zur Klasse A entsprechen dabei besonders wassersparenden Produkten, die der Klasse G weisen einen sehr hohen Wasserverbrauch auf.

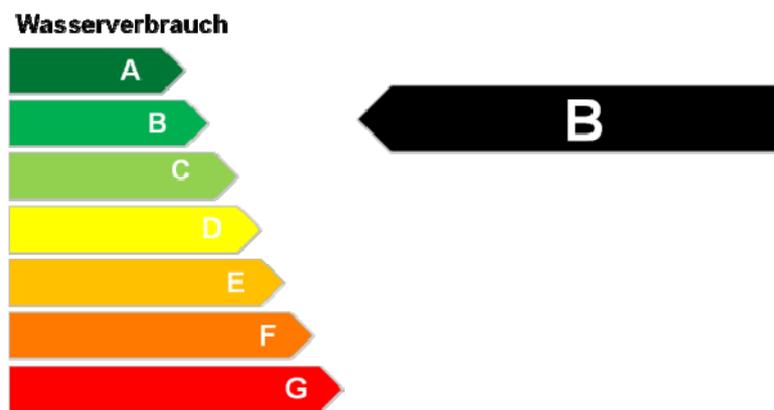


Abbildung 5: Beispielhaftes Produkt-Ökolabel

**Produkt-Ökolabel** gewinnen sowohl für Hersteller, als auch für Kunden **zunehmend an Bedeutung**. Die drei wichtigsten Nutzenaspekte der Produkt-Ökolabel liegen in der Vergleichbarkeit funktionsadäquater Produkte bzgl. der relevanten Umweltcharakteristika durch den Kunden, in einer Erweiterung der Kundenkaufkriterien und in der Bildung eines Mehrwerts für den Kunden.

Die **Vergleichbarkeit** funktional ähnlicher Produkte ist abhängig von den zugehörigen Güteigenschaften des Produktes. Produkteigenschaften unterteilen sich in Such-, Erfahrungs- und Vertrauenseigenschaften. Während sich die Sucheigenschaften eines Produktes durch eine einfache Inspektion des Produktes vor dem Kauf feststellen lassen (z.B. Farbe von Lebensmitteln) und sich Erfahrungseigenschaften für den Konsumenten nach dem Konsum klar herausstellen (z.B. Geschmack von Lebensmitteln), bleiben die Vertrauenseigenschaften des Gutes auch nach dem Erwerb des Produktes für den Kunden verborgen (z.B. Inhaltsstoffe von Lebensmitteln).<sup>28</sup> Je stärker die **Vertrauens- und Erfahrungseigenschaften** eines Gutes ausgeprägt sind und je wichtiger die Rolle dieser Eigenschaften für die Kaufentschei-

<sup>28</sup> Vgl. Nelson 1970

dung des Kunden sind, desto intensiver sollte die Informationskommunikation zwischen Hersteller und Kunde gestaltet werden.<sup>29</sup> Im Gegensatz zu den Herstellern, die über die relevanten Produktinformationen verfügen, weisen Kunden bei Erfahrungs- und Vertrauensgütern zumindest vor dem Kauf ein Informationsdefizit auf. Ziel der Produkt-Ökolabel ist demnach die -zumindest teilweise- Überwindung der asymmetrischen Informationsverteilung bei Erfahrungs- und Vertrauensgütern zwischen Hersteller und Kunde.<sup>30</sup> Die Kommunikation der Vertrauens- und Erfahrungseigenschaften mit einem **Produkt-Ökolabel (Signalling)** ermöglicht dem Kunden nun einen gezielten Vergleich von Substituten verschiedener Hersteller über die Anschaffungskosten hinweg (**Screening**).<sup>31,32</sup> Gelingt die Realisierung einer Informationstransparenz nicht, so kann die bestehende Informationsasymmetrie zwischen den Vertragspartnern (Käufer und Verkäufer) vor Vertragsabschluss zu adverser Selektion und schlussendlich Marktversagen führen.<sup>33,34</sup> Der Mechanismus der adversen Selektion und dem resultierenden Marktversagen geht auf Akerlof (1970) zurück. Grundlage seines Mechanismus bildet die Annahme einer vollständigen Informationsasymmetrie, das heißt die Nachfrager können nicht zwischen qualitativ guten und schlechten Produkten unterscheiden, wohingegen die Anbieter in genauer Kenntnis der von ihnen angebotenen Produktqualitäten stehen und versuchen ihre Produkte - unabhängig von der tatsächlichen Qualität - zu Preisen der Produkte hoher Qualität zu verkaufen (Beispiel: The Market for lemons). Die Nachfrager treffen daher die Annahme, dass alle angebotenen Produkte eine vergleichbare durchschnittliche Qualität aufweisen und richten ihre Zahlungsbereitschaft nach dieser aus. Diese Zahlungsbereitschaft liegt jedoch unterhalb des Preises für Produkte hoher Qualität, wodurch Anbieter hochwertiger Qualitäten vom Markt verdrängt werden. Anbieter minderwertiger Qualitäten dominieren schließlich den Markt.<sup>35</sup> Mit der Thematik der Informationsverteilung zwischen Hersteller und Konsument befasst sich die Prinzipal-Agenten-Theorie bzw. die mikroökonomische Vertragstheorie.<sup>36</sup>

Ein weiterer wichtiger Aspekt von **Produkt-Ökolabeln** besteht in der Möglichkeit des Kunden bei der **Kaufentscheidung**, neben den Anschaffungskosten, zusätzlich ökologische Kriterien als Entscheidungsunterstützung einfließen zu lassen.<sup>37</sup> Die Angabe der Energieeffizienz eines Produktes in der Betriebsphase kann den Kunden beispielsweise bei der Investitionsentscheidung unterstützen, indem nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch die Kosten der Betriebsphase berücksichtigt werden. Von diesen erweiterten Kundenkaufkriterien können auch qualitativ hochwertige Hersteller profitieren, da sie sich durch ökologisch vorteilhafte Produkte einerseits vom internationalen Wettbewerb, insbesondere von asiatischen Anbietern, differenzieren (Qualitätsaspekte), andererseits das Vertrauen ihrer Stakeholder stärken.<sup>38,39</sup> Beide Faktoren resultieren in einer möglichen Umsatzsteigerung.

---

<sup>29</sup> Vgl. Nelson 1970

<sup>30</sup> Vgl. Larson 2003

<sup>31</sup> Vgl. Nelson 1970, Cohen und Vandenberg 2012, S.4

<sup>32</sup> Vgl. Cohen und Vandenberg 2012, S.3

<sup>33</sup> Vgl. Akerlof 1970

<sup>34</sup> Vgl. Goebel 2002, S.100-101

<sup>35</sup> Vgl. Akerlof 1970

<sup>36</sup> Vgl. Sammer und Wüstenhagen 2006, S.2

<sup>37</sup> Vgl. Cohen und Vandenberg 2012, S.25

<sup>38</sup> Vgl. Cohen und Vandenberg 2012, S.4f.

<sup>39</sup> Vgl. Goebel 2002, S.104

Nicht zuletzt stellen Produkt-Ökolabel für den **Kunden einen Mehrwert**, z.B. in Form einer Premiummarke, dar.<sup>40,41</sup> Das Ausmaß der Erhöhung der Zahlungsbereitschaft und der Nachfrage für diesen Mehrwert ist, wie in einer Studie von Borchers et al. (2007) gezeigt, jedoch von zahlreichen Faktoren abhängig.<sup>42</sup> Am Beispiel des vorgeschriebenen European Energy Label kann nachgewiesen werden, dass energieeffiziente Produkte durchaus zu einer deutlich erhöhten Zahlungsbereitschaft führen.<sup>43</sup>

### 2.1.3.2 Herangehensweise zur Erstellung des Produktinformationsblattes

Der **Erstellung des Produktinformationsblattes** (PIB) für Druckluftfilter ging einerseits eine Literaturrecherche vorhandener, brancheninterner und -externer Produktinformationsblätter, andererseits Meinungen von Experten der Druckluftfilterbranche voraus. Das aus diesen Inputs entwickelte Produktinformationsblatt wurde anschließend durch die pA-Mitglieder auf dessen Anwendbarkeit validiert. Abbildung 6 stellt den Entwicklungsprozess des PIB schematisch dar.

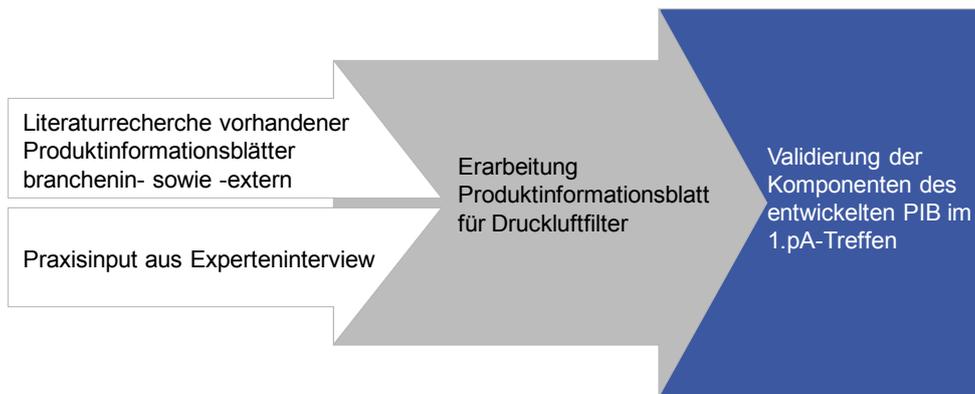


Abbildung 6: Entwicklungsprozess des Produktinformationsblattes

### Relevante Produktdaten

Die Erfassung der spezifischen, auszuweisenden Produktdaten der Druckluftfilter wurde im mehrmaligen Wissensaustausch zwischen den Forschungsstellen und in Expertenbefragungen, beispielsweise im Rahmen einer Telefonkonferenz am 28.03.2014, erreicht. Die Teilnehmer der Telefonkonferenz können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Teilnehmer	Unternehmen
Dr. Timmler, Jürgen	Parker Hannifin
Singer, Horst	Beko
Schuster, Hans-Michael	Donaldson

Tabelle 8: Teilnehmer der Telefonkonferenz am 28.03.2014

<sup>40</sup> Vgl. Heinzle und Wüstenhagen 2012, S.59

<sup>41</sup> Vgl. Goebel 2002, Sammer und Wüstenhagen 2006, S.2

<sup>42</sup> Vgl. Cohen und Vandenberg 2012, S.15-17

<sup>43</sup> Vgl. Sammer und Wüstenhagen 2006, S.21

Neben der Marke, dem Modell, dem verwendeten Material und dem Filtertyp (Partikel-, Koaleszenzfilter und Absorptionsfilter) wurden insbesondere die Parameter Nennvolumenstrom [m<sup>3</sup>/h], Nenndruck [bar], Temperatur [°C] und Mindestabscheideleistung [mg/m<sup>3</sup>] als wichtige funktionale Produkteigenschaften eines Druckluftfilters im Betrieb identifiziert. Diese Produktdaten werden auf dem Produktinformationsblatt ausgewiesen.

### Bewertungskriterium des Produkt-Ökolabels

Der **Entwicklung des Produktinformationsblattes** ging des Weiteren eine **Recherche** bereits vorhandener Produktinformationsblätter aus anderen Branchen, sowie der branchenverwandten Luftfilterindustrie, voraus. Tabelle 9 können beispielhafte Produkt-Ökolabel und ihre zugehörigen Branche entnommen werden.<sup>44</sup>

Label	Produktgruppe
U.S. Energy Star label	Waschmaschinen, Spülmaschinen, Kühlschränke
European Energy Label	Weißer Güter, Haushaltsgeräte, Glühbirnen
Europäisches Umweltzeichen	Produkte des allg. Bedarfs
Der blaue Engel	Papierprodukte, Möbel, elektrische Geräte, Farben, Lacke, Sanitär- und Hygieneprodukte
Forest Stewardship Council (FSC)	Holzprodukte
Programme for Endorsement of Forest Certification (PEFC)	Holzprodukte
Eurovent Energy Efficiency Class	Luftfilter

*Tabelle 9: Beispielhafte Zusammenstellung bestehender Produkt-Ökolabel*

Inhaltlich hat das Produkt-Ökolabel zum Ziel die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Druckluftfilters auszuweisen. Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbewertung wurde herausgefunden, dass 80 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Druckluftfilters in der Betriebsphase anfallen. Dieser hohe Anteil an der Gesamtemission des Druckluftfilters führt dazu, dass wir den Ausweis der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die in der Betriebsphase anfallenden reduzieren. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen resultieren in der Betriebsphase aus dem Energieverbrauch zur Kompensation des Druckverlusts. In Anlehnung an das Eurovent Energy Efficiency Class für Luftfilter wurde deshalb entschieden den Druckverlust [mbar] des Druckluftfilters als Bewertungskriterium für das Produkt-Ökolabel zu wählen. Aus dem Energieverbrauch zur Kompensation dieses Druckverlusts und dem eingespeisten Strommix kann auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Druckluftfilters zurückgerechnet werden. Als Basis einer einheitlichen Quantifizierung und Vergleichbarkeit der angegebenen Druckverluste dienen die festgelegten Product Category Rules und der zugehörige Leitfadens.

### Gestaltung des Produkt-Ökolabels

Bei der Gestaltung des Produkt-Ökolabels können zwei Labelarten unterschieden werden, das „endorsement“-Label und das „comparative“-Label.

Mit dem „endorsement“-Label oder auch genannt „**Best-in-Class-Label**“ werden nur die besten Produkte einer Produktkategorie, bewertet mit den entsprechenden Kriterien, ausge-

<sup>44</sup> Zusammenstellung der großen Umwelt-, Ökosiegel und Label unter <http://www.world-of-good.de/logo-suche/>

zeichnet.<sup>45</sup> Ein Beispiel für ein solches Label ist das Energy Star Label zur Kennzeichnung der energieeffizientesten Produkte.

Das „**comparative**“-Label dient als direkter Vergleich aller Produkte einer jeweiligen Produktparte. Die Bewertung der Produkte erfolgt dabei im absoluten Maßstab (bspw. A-G).<sup>46</sup> Ein Beispiel für solch ein Label stellt z.B. das European Union Energy Label dar. Zur Verdeutlichung des Aufbaus eines solchen Produkt-Ökolabels ist in Abbildung 7 ein Produktdatenblatt für einen Fernseher mit dem European Union Energy Label dargestellt. Im Rahmen dieses Projekts wurde diese Labelart gewählt.

Wichtig bei der Ökokennzeichnung ist in beiden Fällen die Nachvollziehbarkeit der Einordnung, eine einheitliche Datenerfassung und die Genauigkeit des Verfahrens, um die Glaubwürdigkeit des Labels gegenüber dem Kunden zu sichern.<sup>47</sup>

**Bei der Entwicklung und Implementierung des Produkt-Ökolabels kann zudem entschieden werden, ob das Label durch Dritte zertifiziert werden soll oder ob man auf den langwierigen Zertifizierungsprozess verzichtet und der Inhalt des Ökolabels den ungeprüften Herstellerangaben entspricht.** Da in diesem Projekt erstmals der Versuch unternommen wird verschiedene Druckluftfilter ökologisch zu bewerten, wird bislang auf den Zertifizierungsprozess des Produkt-Ökolabels durch Dritte verzichtet. Die Drittzertifizierung kann jedoch jederzeit nachgeholt werden.

---

<sup>45</sup> Vgl. Heinzle und Wüstenhagen 2012, S.61

<sup>46</sup> Vgl. Heinzle und Wüstenhagen 2012, S.61

<sup>47</sup> Vgl. Norm DIN EN ISO 14021, S.4

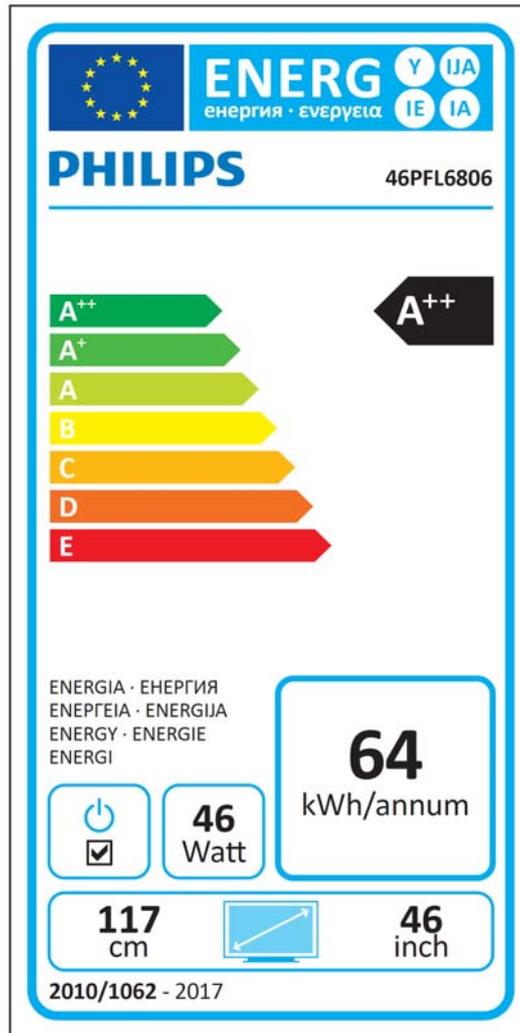


Abbildung 7: Beispielhaftes Produktdatenblatt mit dem European Union Energy Label für Fernseher<sup>48</sup>

### 2.1.3.3 Vorgeschlagene Produktinformationsblätter

Nachfolgend werden drei Produktinformationsblätter, differenziert nach den Filtertypen Partikelfilter, Koaleszenzfilter und Adsorptionsfilter, vorgeschlagen (siehe Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10).

Die Produktdateninformationsblätter enthalten neben den **allgemeinen Angaben** (Marke, Modell und Material) auch Angaben über die verwendeten Testparameter zur Bestimmung der Produkt-Ökolabelklasse (Nennvolumenstrom, Nenndruck, Temperatur, relative Feuchte, Testkonzentration und Testsubstanz) sowie die Testresultate (Mindestabscheidegrad bzw. Beladungskapazität K80 und Druckverlust). Bei den Partikelfiltern wird des Weiteren die Standzeit bis zum 100%igen Druckanstieg als Kenngröße der Lebensdauer angegeben. Adsorptionsfilter wird zudem der Sofortdurchbruch beigefügt.

Die Einteilung der unterschiedlichen Filtertypen mit den zugehörigen Mindestabscheideleistungen bzw. Beladungskapazitäten K80 können aus dem Leitfaden zur Anwendung der Product Category Rules (Kapitel 2.1.2) entnommen werden.

<sup>48</sup>[http://www.newscenter.philips.com/asset.aspx?alt=&p=http://www.newscenter.philips.com/pwc\\_nc/main/shared/assets/de/Downloadablefile/press/consumerelectronics/20111129\\_Energy-Label\\_46PFL6806.pdf](http://www.newscenter.philips.com/asset.aspx?alt=&p=http://www.newscenter.philips.com/pwc_nc/main/shared/assets/de/Downloadablefile/press/consumerelectronics/20111129_Energy-Label_46PFL6806.pdf)

Fokus der **Einordnung der einzelnen Produkte im Qualitätsvergleich** liegt auf der Energie- und damit indirekten CO<sub>2</sub>-Effizienz der Druckluftfilter in der Betriebsphase. Als Entscheidungskennzahl der Einordnung wurde der Druckverlust [mbar] des Druckluftfilters identifiziert, vergleichbar mit der Zertifizierung der Luftfilter **nach der Eurovent Energy Efficiency Class**.<sup>49</sup> Um jedoch vergleichende Aussagen über den Druckverlust eines Filtertyps treffen zu können ist es absolut notwendig den Druckverlust in einem bestimmten Zustand des Filters zu messen. Bei Partikel- und Adsorptionsfiltern erfolgt die Druckverlustmessung im trockenen Anfangszustand, bei Koaleszenzfiltern hingegen im nassen, gesättigten Zustand. Zudem muss der Druckverlust gemäß den angegebenen Testparametern erfasst werden. Der bei der Druckverlustmessung eingestellte Druck und das Durchflussvolumen entsprechen dabei dem vom Hersteller angegebenen Nenndruck und dem Nennvolumen. Die Messparameter Temperatur, relative Feuchte, Testkonzentration sowie die eingesetzte Testsubstanz richten sich nach den Angaben der **ISO-Reihe 12500** bzw. nach Abwandlungen dieser Norm gemäß Kapitel 2.1.2.

Das **Einordnungsverfahren (Klasse A-G) soll dabei durch Berücksichtigung des fortschreitenden technologischen Standards dynamisch gestaltet werden**, sodass die Klasse A immer als beste Klasse gilt. Im Zeitverlauf fordert das Produkt-Ökolabel und die daraus resultierende Veränderung des Kundenkaufverhaltens die Hersteller auf ihre Forschungsbemühungen auf eine Verbesserung der Energieeffizienz zu richten, sodass es zu einer stetigen Verbesserung der Energieeffizienz der Produkte kommt. Durch eine Akkumulation der Produkte mit dem Label der Klasse A wird dem Kunden durch das Labeling jedoch kein Kaufkriterium mehr geboten, sodass entweder die Klasseneinteilung an den jeweiligen Stand der Technik angepasst werden muss unter Beibehalt der Klassen A-G oder eine Klassenausweitung auf A+, A++ und A+++ vorgenommen werden muss (A-Plus-System). Eine Studie von Heinzle beweist diesbezüglich, dass eine Umstellung des Label-Formats von der ursprünglichen A-G Skalierung auf das neue A-Plus-System die Wirkung des Labels auf die Kaufentscheidung stark beeinträchtigt. So ergab eine Conjoint-Analyse, dass sich Kunden beim Angebot identischer Produkte (hier Fernseher), die sich lediglich durch die beiden Label-Skalen unterscheiden, 4,5 mal häufiger für das energieeffizienteste Produkt bei Verwendung der A-G-Skala im Vergleich zur erweiterten Skala entscheiden. Einhergehend führt die Verwendung der A-G-Skala daher zu einer deutlich erhöhten Zahlungsbereitschaft. Das veränderte Kaufverhalten resultiert aus der erhöhten Komplexität des A-Plus-Systems für den Kunden.<sup>50</sup> Bei der Nutzung des dynamischen Einordnungsverfahrens muss beachtet werden, dass die ausgezeichneten Produkt-Ökolabel mit einem Zeitstempel versehen werden, um den Zeitpunkt der Klasseneinteilung kenntlich zu machen. Diesem Zeitstempel werden die Produktinformationsblätter durch die Angabe des Bezugsjahres gerecht.

---

<sup>49</sup>[http://www.eurovent-association.eu/fic\\_bdd/document\\_en\\_fichier\\_pdf/Eurovent%204.11\\_13922816520.pdf](http://www.eurovent-association.eu/fic_bdd/document_en_fichier_pdf/Eurovent%204.11_13922816520.pdf)

<sup>50</sup> Vgl. Heinzle und Wüstenhagen 2012, S.66,67

# Produktinformationsblatt



**Filtertyp: Koaleszenzfilter**

Bezugsjahr: 2015

Marke: Mustermann GmbH  
 Modell: Mustermannmodell  
 Material: Gehäuse aus eloxiertem, seewasserbeständigen Aluminium  
 Filtermedium aus bindemittelfreien Borsilikat- und Polyesterfasern

Testparameter:

Nennvolumenstrom: 150 m<sup>3</sup>/h  
 Nenndruck: 7 bar  
 Temperatur: 20 °C  
 relative Feuchte: 3 %  
 Testkonzentration: 10 mg/m<sup>3</sup>  
 Testsubstanz: Öl, Viskositätsklasse 46

Testresultat:

Mindestabscheidegrad: 99,9 % Klasse 4  
**Druckverlust gesättigt: 120 mbar**

**CO<sub>2</sub>-Effizienzklasse**

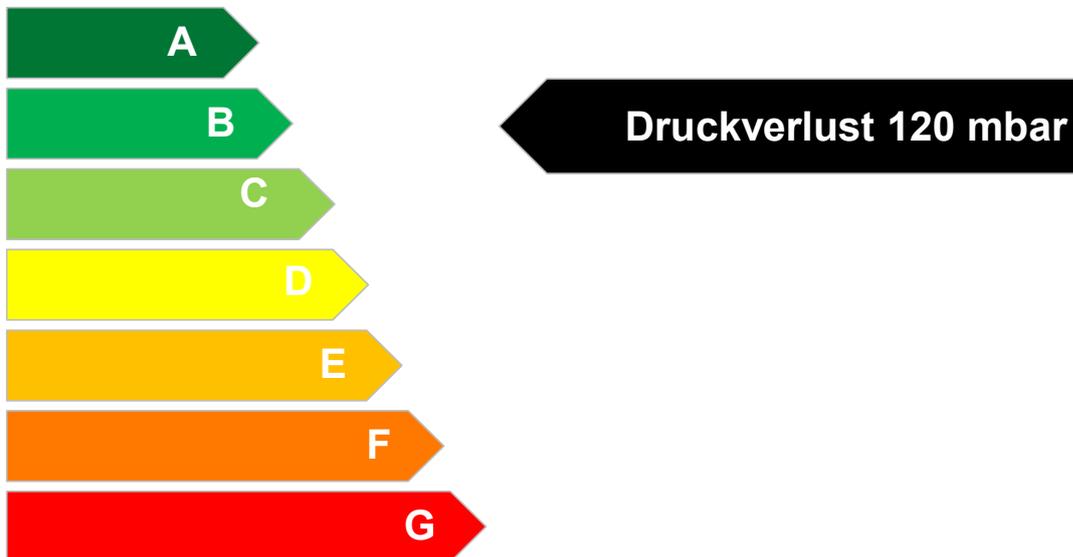


Abbildung 8: Vorgeschlagenes Produktinformationsblatt für Koaleszenzfilter

# Produktinformationsblatt



**Filtertyp: Partikelfilter**

Bezugsjahr: 2015

Marke: Mustermann GmbH  
 Modell: Mustermannmodell  
 Material: Gehäuse aus eloxiertem, seewasserbeständigen Aluminium  
 Filtermedium aus bindemittelfreien Borsilikat- und Polyesterfasern

Testparameter:

Nennvolumenstrom: 150 m<sup>3</sup>/h  
 Nenndruck: 7 bar  
 Temperatur: 20 °C  
 relative Feuchte: 3 %  
 Testkonzentration: 100 mg/m<sup>3</sup>  
 Testsubstanz: AC fine

Testresultat:

Mindestabscheidegrad trocken (0,4 µm): 99,9 % Klasse 4  
 Standzeit bis 100% Druckanstieg: 600 s  
**Druckverlust trocken: 120 mbar**

**CO<sub>2</sub>-Effizienzklasse**

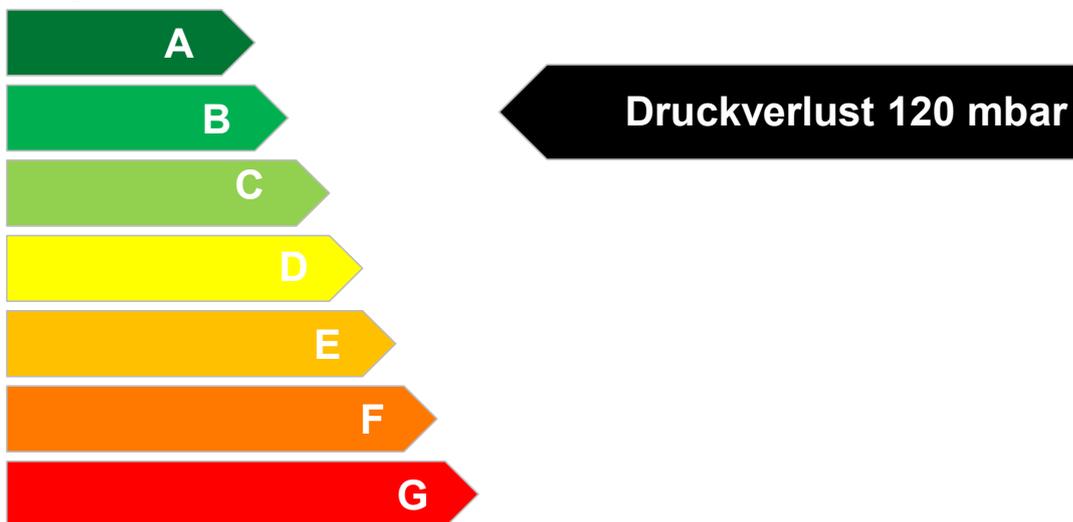


Abbildung 9: Vorgeschlagenes Produktinformationsblatt für Partikelfilter

# Produktinformationsblatt



**Filtertyp: Adsorptionsfilter**

Bezugsjahr: 2015

Marke: Mustermann GmbH  
 Modell: Mustermannmodell  
 Material: Gehäuse aus eloxiertem, seewasserbeständigen Aluminium  
 Filtermedium aus Aktivkohle

Testparameter:

Nennvolumenstrom: 150 m<sup>3</sup>/h  
 Nenndruck: 7 bar  
 Temperatur: 20 °C  
 relative Feuchte: 3 %  
 Testkonzentration: 10 ppm  
 Testsubstanz: n-Hexan

Testresultat:

Beladungskapazität K80: 15 % Klasse 2  
 Sofortdurchbruch: 2 %  
**Druckverlust: 80 mbar**

**CO<sub>2</sub>-Effizienzklasse**

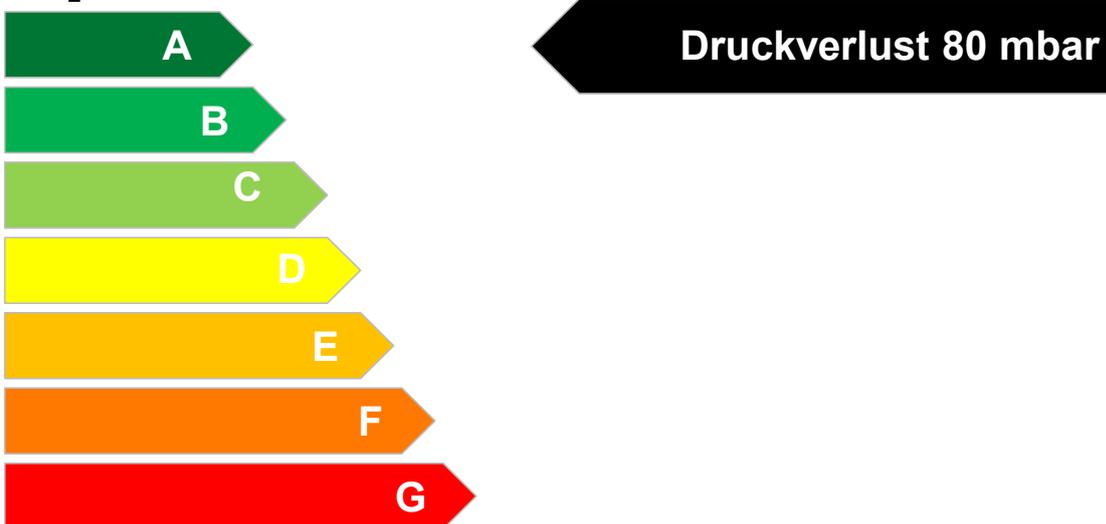


Abbildung 10: Vorgeschlagenes Produktinformationsblatt für Adsorptionsfilter

## 2.1.4 Benötigte und eingesetzte Ressourcen

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses APs durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstelle wurden dafür 3 Personenmonate (IPRI) und 5,5 Personenmonate [HPA A] (IUTA) aufgewendet.

## 2.2 Arbeitspaket 2: Grundlagen zum ökonomischen und ökologischen Produktvergleich

Ein geeignetes Instrument zum ökonomischen und ökologischen Produktvergleich stellt das **Benchmarking** dar. Dieses **Planungsinstrument** besteht aus einem kontinuierlichen Prozess, in dem Produkte, Dienstleistungen, Prozesse sowie Methoden betrieblicher Funktionen über mehrere Unternehmen verglichen werden. Der **Leistungsvergleich** über die Grenzen des eigenen Unternehmens hinaus dient der Verankerung der Wettbewerbsorientierung im Unternehmen, beispielsweise durch die Ableitung von an der Konkurrenz orientierte Zielvorgaben.<sup>51,52</sup>

Im Unterschied zur Konkurrenzanalyse geht beim Benchmarking die Analyse jedoch über die reine Identifikation der Leistungslücke hinaus. Wesentlich ist beim Benchmarking, dass die Ursachen der Leistungslücke ermittelt und daraus Möglichkeiten zur Verbesserung der eigenen Unternehmensposition abgeleitet werden können.<sup>53</sup>

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
1. Leitfaden zum Benchmarking 2. Demonstrator zur Unterstützung des Benchmarking	1. Leitfaden zum Benchmarking 2. Demonstrator zur Unterstützung des Benchmarking (siehe Kapitel 2.2.1)

### 2.2.1 Leitfaden zum Benchmarking

Dieser Leitfaden gibt eine Anleitung zum Benchmarking von Druckluftfiltern hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Anwendung des entwickelten Demonstrators. Der Demonstrator dient dabei als unterstützendes Tool an bestimmten Prozessstufen des Benchmarkings, jedoch nicht als Benchmarkdatenbank.

Die **Gliederung des Leitfadens** ist am prozessualen Aufbau des Benchmarkings nach Horváth und Herter orientiert (siehe Abbildung 11).<sup>54</sup>

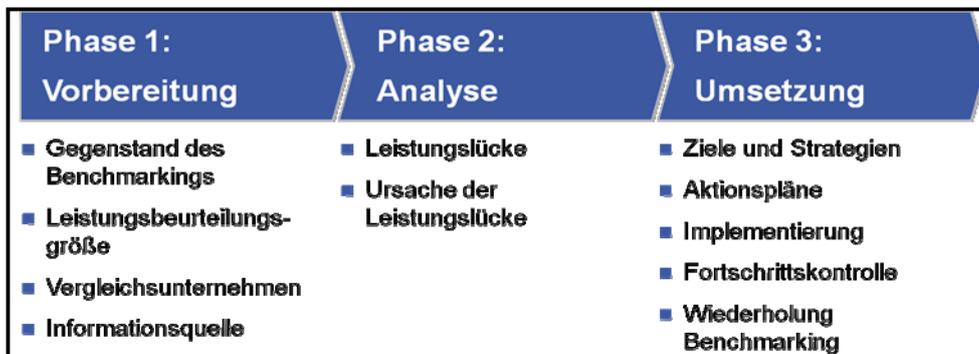


Abbildung 11: Prozessualer Aufbau des Benchmarkings in drei Phasen

In jeder Phase werden dabei zuerst Aspekte des Benchmarkings im Allgemeinen und in der Druckluftfilterbranche erläutert und anschließend das konkrete Vorgehen im Anwendungsfall mithilfe des Demonstrators beschrieben.

<sup>51</sup> Vgl. (Horváth & Herter, Benchmarking: Vergleich mit den Besten der Besten, 1992)

<sup>52</sup> Vgl. (Harrington, 1991)

<sup>53</sup> Vgl. (Horváth & Herter, Benchmarking: Vergleich mit den Besten der Besten, 1992)

<sup>54</sup> Vgl. (Horváth & Herter, Benchmarking: Vergleich mit den Besten der Besten, 1992)

## Phase 1: Vorbereitung

Die **Vorbereitung des Benchmarks** unterteilt sich in **vier Unterpunkte**: die Definition des Gegenstandes des Benchmarkings, der Festlegung der Leistungsbeurteilungsgröße, der Wahl der Vergleichsunternehmen sowie der möglichen Informationsquellen.

Der **Gegenstand des Benchmarkings** kann ein bestimmtes Produkt, eine Dienstleistung, ein Prozess sowie eine betriebliche Methode sein. Im Rahmen dieses Projekts stellen Druckluftfilter das Objekt des Benchmarkings dar. Zur Beurteilung der mit der Produktfunktion korrelierenden Leistungseigenschaft der Druckluftfilter muss des Weiteren eine Unterteilung in die Druckluftfiltertypen Partikelfilter, Koaleszenzfilter und Absorptionsfilter vorgenommen werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die **Definition der relevanten Leistungsbeurteilungsgröße** als zentrale Vergleichsgröße im Benchmarking-Prozess. Als Leistungsbeurteilungsgröße dient in Anlehnung an das entwickelte Produktdatenblatt in AP 1 der Druckverlust der Filter. Der Vergleich des Druckverlusts erlaubt die unterschiedlichen Druckluftfilter hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Betriebsphase zu bewerten. Da jedoch der Druckverlust in direktem Zusammenhang mit der Filterklasse steht, muss auch hier zur Wahrung eines objektiven Vergleichs zweier Filter eine Separation in die unterschiedlichen Filterklassen stattfinden. Die Unterteilung der unterschiedlichen Druckluftfilterklassen ist in Anlehnung an die ISO-Reihe 12500 (Herstellernorm) gestaltet. Diese Norm beinhaltet die Anforderungen der Beurteilung und Prüfung der Filtereigenschaften, sowie die Definition der Grenzwerte zur Klasseneinteilung.

Nach der Festlegung der Leistungsbeurteilungsgröße erfolgt die **Wahl der gewünschten Vergleichsunternehmen**. Für die Durchführung eines Produkt-Benchmarkings, wie in diesem Fall, empfiehlt sich ausschließlich der Vergleich mit Konkurrenzunternehmen einer Branche, da eine große Ähnlichkeit der Produkte vorliegen muss. Liegt der Gegenstand des Benchmarkings auf Prozesse und Methoden, die auch in branchenfremden Unternehmen praktiziert werden, so können oftmals auch große Verbesserungspotentiale durch den Vergleich mit Nicht-Konkurrenten aufgedeckt werden. Im Rahmen der Festlegung der Vergleichsunternehmen muss auch entschieden werden welche Art von Benchmark für die zugrundeliegende Zielsetzung als geeignet erscheint. Wahlweise stehen der konkurrenzbezogene sowie der branchenbezogene Benchmark zur Verfügung. Besteht die Motivation des Benchmarkings in der Einnahme der Branchenführerschaft in einem gewissen Bereich, so muss die eigene Unternehmung mit dem Branchenbesten in den Vergleich gesetzt werden (konkurrenzbezogenes Benchmark). Genügt die Einordnung der eigenen Leistung in einem gewissen Geschäftsbereich mit dem Durchschnitt der Branche, so eignet sich der branchenbezogene Benchmark.

In der letzten Stufe der Benchmarking-Vorbereitung werden die **geeigneten Informationsquellen identifiziert**. Unterschieden werden kann in Primär- und Sekundärinformationen. Primärinformationen stammen beispielsweise aus Betriebsbesichtigungen und stehen meist nur im Vergleich zu branchenfremden Unternehmen zur Verfügung. Erfolgt das Benchmarking hingegen branchenintern, kann meist nur auf Sekundärinformationen der Konkurrenten, beispielsweise auf Produktdatenblätter oder Homepageinformationen, zurückgegriffen werden.

Zur Verdeutlichung des Vorgehens der 1. Phase des Benchmarkings unter Zuhilfenahme des Demonstrators soll das Verbesserungspotential eines Koaleszenzfilters mit einem Ab-

scheidegrad von 92 % und einem Druckverlust im nassen und gesättigten Zustand von 180 mbar gegenüber dem Branchenbesten ermittelt werden.

Nach dem Öffnen der Excel-Datei erscheint der im Screenshot 1 dargestellte Eingangsbildschirm. Ein Klick auf den Button „Benchmarking-Demonstrator“ führt zum Screenshot 2.



*Screenshot 1: Eingangsbildschirm*

Im Screenshot 2 sind alle Produktdaten und Angaben zu tätigen, die den Rahmen des Benchmarkings festlegen. Zuerst muss der Filtertyp gewählt werden (1.). Hier wird zwischen Partikel-, Koaleszenz- und Absorptionsfilter unterschieden. Nach der Wahl des Filtertyps (hier: Koaleszenzfilter) wird die Eingabe der Filterklasse benötigt (2.). Zur Erleichterung der Identifikation der jeweiligen Filterklasse ist der Mindestabscheidegrad (%) für jede Klasse zusätzlich angegeben. Dieser Mindestabscheidegrad ändert sich je nach Wahl des Filtertyps automatisch. In diesem Anwendungsfall bedeutet daher ein Abscheidegrad von 92 % die Zugehörigkeit zur Filterklasse 3 (Klasse 3: 99 % > Abscheidegrad  $\geq$  90 %). Im 3. Schritt wird der Druckverlust in mbar eingegeben (180 mbar). Wichtig für die Vergleichbarkeit der Eingaben ist, dass der Druckverlust dem im angegeben Zustand (fett hinterlegt) entspricht. Der geforderte Zustand ändert sich ebenfalls automatisch mit der Wahl des Filtertyps. Im letzten Schritt der Vorbereitung des Benchmarkings wird der gewünschte Benchmark gewählt (4.). Hierbei besteht die Möglichkeit des konkurrenzbezogenen Benchmarks, des branchenbezogenen Benchmarks sowie eines eigenen Benchmarks. Zum Vergleich mit dem Branchenbesten ist der konkurrenzbezogene Benchmark zu wählen.

Durch den Button „Analyse“ gelangt man nach der vollständigen Dateneingabe zur nächsten Phase des Benchmarkings, der Button „zurück“ führt wieder auf den Eingangsbildschirm.

**Phase 1: Vorbereitung des Benchmarkings**

**Filtertyp**

Partikelfilter  1.  
 Koaleszenzfilter   
 Absorptionsfilter

**Filterklasse**

Klasse	Abscheidegrad (min.) [%]	<input type="checkbox"/>
1	99,9	<input type="checkbox"/>
2	99	<input type="checkbox"/>
3	90	<input checked="" type="checkbox"/>
4	50	<input type="checkbox"/>
5	<50	<input type="checkbox"/>

2.

**Leistungsbeurteilungsgröße**

Angabe des Druckverlust im **nassen, gesättigten Zustand**

Druckverlust  mbar 3.

**Wahl des Benchmarks**

konkurrenzbezogenes Benchmark  4.  
 branchenbezogenes Benchmark   
 eigenes Benchmark

zurück Analyse

Screenshot 2: Phase 1 - Vorbereitung des Benchmarkings

**Bisher liegt keine Benchmarkdatenbank für den Druckverlust von Druckluftfiltern vor.**

Für den konkurrenzbezogenen Benchmark wurden deshalb anstelle des Druckverlustes des branchenbesten Druckluftfilters die Obergrenze des Druckverlustes der Labelklasse A gewählt (erarbeitet in AP 1). Als Ersatz für den Branchendurchschnitt (branchenbezogenes Benchmark) wurde die Obergrenze des Druckverlustes der Labelklasse D gewählt. Wird die Option eines eigenen Benchmarks gewählt, so kann dieser in der nächsten Phase manuell eingegeben werden.

Screenshot 3 zeigt die festgelegten Benchmarks. Die obere Tabelle entspricht dabei den konkurrenzbezogenen Benchmarks, die untere Tabelle den branchenbezogenen Benchmarks, unterteilt in die jeweilige Filterklasse (1-5) und den jeweiligen Filtertyp (1-3). Die eingetragenen Werte können im Tabellensheet „Benchmarkschlüssel“ jederzeit durch andere Werte überschrieben werden.

konkurrenzbezogenes Benchmarking - 1			
Filtertyp	Partikelfilter	Koaleszenzfilter	Absorptionsfilter
Filterklasse	1	2	3
1	100	100	100
2	80	80	80
3	60	60	60
4	40	40	40
5	20	20	20

branchenbezogenes Benchmarking - 2			
Filtertyp	Partikelfilter	Koaleszenzfilter	Absorptionsfilter
Filterklasse	1	2	3
1	250	250	250
2	200	200	200
3	150	150	150
4	100	100	100
5	50	50	50

Screenshot 3: Festlegung der Benchmarks

## Phase 2: Analyse der Leistungslücke

In der nächsten Phase des **Benchmarking-Prozess** wird einerseits die **Leistungslücke zum gewählten Benchmark identifiziert**, andererseits versucht die Ursachen für diese Leistungslücke aufzudecken.

Die **Leistungslücke** entspricht in diesem Benchmarking der Reduktionsmöglichkeit des Druckverlustes und damit indirekt dem Einsparpotential von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Betriebsphase des betrachteten Druckluftfilters im Vergleich zum gewählten Benchmark. Berechnen lässt sich das Reduktionspotential des Druckverlustes Δp [%] nach folgender Formel:

$$\text{Reduktionspotential } \Delta p = \frac{\Delta p_{\text{Druckluftfilter}} - \Delta p_{\text{Benchmark}}}{\Delta p_{\text{Druckluftfilter}}} * 100$$

Die alleinige Identifikation des Rückstandes genügt bei der Benchmark-Analyse jedoch nicht. Entscheidend ist die Ermittlung der Ursachen für die vorhandene Leistungslücke.<sup>55</sup> Erst wenn die Ursachen für die Leistungslücke identifiziert sind, können in der letzten Phase des Benchmarking-Prozess sinnvolle Maßnahmen zur Schließung des Gaps ergriffen und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens gefördert werden.

Screenshot 4 zeigt, wie der Demonstrator die Identifikation der Leistungslücke in der 2. Phase des Benchmarking-Prozess unterstützt.

Wurde in der vorherigen Phase das konkurrenzbezogene oder das branchenbezogene Benchmark als Vergleichsmaßstab gewählt, so muss keine weitere Eingabe getätigt werden. Wurde die Option eigenes Benchmark getroffen, muss dieser Wert nun unter 1. eingegeben werden. Unter 2. besteht nun die Möglichkeit den verwendeten Benchmark sowie den eingegebenen Vergleichswert (Angabe Druckverlust - Phase 1) auf deren Richtigkeit zu überprüfen. Die Leistungslücke bzw. das prozentuale Einsparpotential des Druckverlusts kann direkt abgelesen werden (3.). Durch die Visualisierung des Einsparpotentials (4.) mithilfe der Auftragung des Benchmarks und des Vergleichswertes im Balkendiagramm wird das Verbesserungspotential auch grafisch verdeutlicht.

<sup>55</sup> Vgl. (Horváth & Herter, Benchmarking: Vergleich mit den Besten der Besten, 1992)

Der Button „Handlungsmaßnahmen“ führt zur Unterstützung der letzten Phase des Benchmarkings, der Umsetzung.

### Phase 2: Analyse

#### Identifikation der Leistungslücke

Bei Wahl eines **eigenen Benchmarks** bitte Benchmark eingeben:

1.  mbar

verwendeter Benchmark

2.  mbar

Vergleichswert

mbar

Leistungslücke/Einsparpotential

3.  %

4.

zurück
Handlungs-  
maßnahmen

Screenshot 4: Phase 2 - Analyse

Der **Demonstrator unterstützt die Identifikation der Leistungslücke**, nicht jedoch die Ermittlung deren Ursachen. Hierzu müssen weitere Produktinformationen des betrachteten Druckluftfilters analysiert werden. Beispielsweise kann die Abweichung des Druckverlusts in der Qualität des eingesetzten Filtermediums oder der Anzahl an Filterlagen begründet sein.

### Phase 3: Umsetzung

Aus Phase 2 des Benchmarkings - der Analyse - ist das Unternehmen in der Kenntnis über ihren momentanen Stand der untersuchten Leistungsparameter gegenüber der Konkurrenz. **Die identifizierte Leistungslücke bzw. der Rückstand zur Konkurrenz wird nun auf die Komptabilität mit der gewählten Wettbewerbsstrategie des jeweiligen Unternehmens überprüft.** In Abhängigkeit der Höhe dieser Abweichung müssen durch das Unternehmen nun Ziele und Strategien abgeleitet werden, um dieses Gap zu schließen. Möchte beispielsweise ein Hersteller die Qualitätsführerschaft einnehmen, weist aber einen großen Rückstand in qualitativen Leistungsparametern im konkurrenzbezogenen Benchmarking auf, so besteht für ihn ein großer Handlungsbedarf zur Verbesserung seiner Produktqualität. Erreichen kann er eine Verbesserung seiner Wettbewerbsposition z.B. in der Festsetzung neuer Leistungsstandards. Aufbauend auf dem Ergebnis des Benchmarkings müssen **konkrete Aktionspläne** zur Umsetzung und Implementierung von Handlungsmaßnahmen im relevanten Funktionalbereich entwickelt werden. Zur Sicherung der Umsetzung und der Zweckmäßigkeit dieser Handlungsmaßnahmen kann die Vorgabe von Entwicklungspfade für die Leistungsbeurteilungsgrößen geeignet sein. Diese Vorgabe ermöglicht eine regelmäßige

Überwachung des Fortschritts der Implementierung. Ergänzend an die **Fortschrittskontrollen** muss auch das Benchmarking kontinuierlich wiederholt werden. Die Ergebnisse des Benchmarking-Prozesses müssen ständig überprüft werden, da in dynamischen Märkten fortlaufend eine Verbesserung der eingesetzten Verfahren und Technologien stattfindet.<sup>56</sup>

Die letzte Phase des Benchmarking Prozesses kann durch den Demonstrator nur in geringem Umfang unterstützt werden. Screenshot 5 zeigt mögliche Handlungsmaßnahmen bei komponentenbedingten Ursachen der Leistungslücke. Dieser Maßnahmenkatalog kann gemäß den identifizierten Ursachen (Phase 2) beliebig weiter ergänzt werden.

<b>Phase 3: Umsetzen</b>		
komponentenbezogene Maßnahmen: Katalog an Handlungsmaßnahmen bei einer komponentenbedingten Ursache der Leistungslücke		
Komponente	mögliche Ursache der Leistungslücke	Maßnahme
<b>Filterelement</b>	zu geringe Oberfläche	Einsatz eines plissierten Filtermediums Erhöhung der Anzahl an Filterlagen
	Verstopfung	Auswechseln des Filterelements
	Qualität des Materials	Austausch des Filtermediums (High-tech Materialien)
	Ungeeignete Strömungsverteilung	Einsatz eines neuen Filterelements
<b>Gehäuse</b>	Größe des Querschnitt zu gering für ideale Filterfläche	Ersatz des Gehäuses

Screenshot 5: Phase 3 – Umsetzung

### 2.2.2 Benötigte und eingesetzte Ressourcen

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses APs durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstelle wurden dafür 5 Personenmonate (IPRI) und 1,5 Personenmonate [HPA A] (IUTA) aufgewendet.

### 2.3 Arbeitspaket 3: Schätzvorgehen für Produkte ohne CO<sub>2</sub>-Angabe

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses Arbeitspakets:

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Leitfaden zur qualitativen Schätzung der CO <sub>2</sub> -Emissionen	Leitfaden zur qualitativen Schätzung der CO <sub>2</sub> -Emissionen

In der Regel werden Druckluftfilter ohne Angabe der indirekten CO<sub>2</sub>-Emission vertrieben, dieser Umstand soll durch eine qualitative Schätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen behoben werden.

Ziel ist eine Anleitung zur groben Emissionsschätzung für (ausländische) Produkte ohne CO<sub>2</sub>-Ausweis. Dies ist aus Kundensicht notwendig, um auch bei diesen Filtern die Vergleichbarkeit verschiedener Produkte bei der Produktauswahl zu ermöglichen. Die Grundlage die-

<sup>56</sup> Vgl. (Fifer, 1988, S. 48)

ses Bestandteils bilden Instrumente, welche im Rahmen **vereinfachter Ökobilanzen** („Streamlined LCA“) entwickelt wurden. Beispiele hierfür sind die Life-cycle Design Strategy (LiDS) oder Eco-Compass. Diese Instrumente wurden im Rahmen des Forschungsprojekts angepasst, so dass auf der Grundlage weniger Parameter, welche signifikant auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Druckluftfilters auswirken eine qualitative Schätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich wird. Die Konzentration auf wenige einflussreiche Parameter ermöglicht eine aufwandsarme Informationsbeschaffung für die Verbesserung der eigenen Produkte und das Führen von Verkaufsgesprächen mit Kunden auf der Grundlage der Emissionsdaten. Das AP3 soll mit den beiden vorangegangenen Arbeitspaketen den Kunden (Druckluftanwender) bei der Kaufentscheidung unterstützen.

### 2.3.1 Ergebnis: Leitfaden zur qualitativen Schätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Zunächst wurden mehrere verschiedene Ansätze zu **Ökobilanzen** verglichen. Nach den Normen ISO 14040 und ISO 14044 ist die Ökobilanz ein anerkanntes und vereinheitlichtes Instrument zur Sammlung, wirkungsbezogener Aggregation, Analyse und Bewertung von Umweltinformationen<sup>57</sup>. Im internationalen Sprachraum hat sich der Begriff **Life-Cycle-Assessment** (LCA) als Synonym für den Begriff der Ökobilanz durchgesetzt. Nach ISO 14040 ist die Ökobilanz definiert als „Zusammenstellung und Beurteilung der **Input- und Outputflüsse** und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (DIN EN ISO 14040:2009).

Aufgrund ihrer methodischen Weiterentwicklungen, insbesondere in der ISO 14000-Normungsreihe und ihrer praktischen Erprobung, stellt die Ökobilanz heute ein Umweltinformationssystem dar, das eine fundierte Beurteilung der ökologischen Folgen unternehmerischen Handelns ermöglicht<sup>58</sup>.

Sie verfolgt einerseits das Ziel, Umweltwirkungen in jeder Phase des Lebenszyklus eines Produktsystems zur Verfügung zu stellen und so ökologieorientierte Entscheidungen zu systematisieren, unterstützen sowie transparent zu machen.<sup>59</sup> Andererseits trägt sie dazu bei, wesentliche Schwachstellen und Treiber von **Umweltwirkungen** innerhalb von **Produktlebenszyklen** zu analysieren und Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten aufzuzeigen.<sup>60</sup>

Wesentliche methodische Grundlage stellt die Lebenszyklusbetrachtung dar: „Grundsätzlich werden in einer Ökobilanz alle **Umweltveränderungen** betrachtet, die intentional und kausal mit einem zu betrachtenden Zurechnungsobjekt im Verlaufe dessen gesamten Lebenszyklus in Verbindungen stehen“.<sup>61</sup> Bei den Zurechnungsprojekten sind Unternehmen, Produkte oder Prozesse denkbar. Je nach Zurechnungsobjekt und Intention werden in der Literatur **unternehmens- oder produktorientierte Ökobilanzen** unterschieden.<sup>62</sup> In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die produktorientierte Ökobilanz (auch Produkt-Ökobilanz) einen deutlich höheren Stellenwert besitzt. Sie bezieht sich auf sämtliche **Umweltaspekte und potenzielle Umweltwirkungen im Lebenszyklus eines Produktes**, d.h. von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Nutzung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Entsorgung

<sup>57</sup> Vgl. (Dold & Wörner, 1996); (Schaltegger & Sturm, 2000)

<sup>58</sup> Vgl. (Hallay & Pfiem, 1994); (Seliger, 2012)

<sup>59</sup> Vgl. (Curran, 2006);

<sup>60</sup> Vgl. (Lundie, 1999); (Niederl-Schmidinger & Naradolawsky, 2008)

<sup>61</sup> Vgl. (Sundmacher, 2002)

<sup>62</sup> Vgl. (Müller-Wenk, 1978)

(DIN EN ISO 14040:2009).<sup>63</sup> Abbildung 12 stellt die Phasen eines Produktlebenszyklus für einen Druckluftfilter und damit einhergehende Input- und Outputflüsse exemplarisch dar, die es im Rahmen der Ökobilanzierung in Betracht zu ziehen gilt.

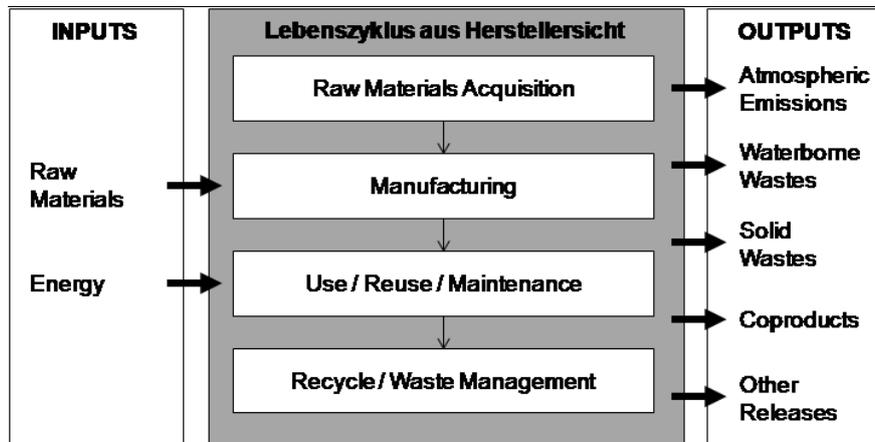


Abbildung 12: Lebenszyklusphasen und Umweltwirkungen aus Herstellersicht (Curran, 2006)

Die Vereinheitlichungen der Ökobilanz durch zahlreiche Gremien und nicht zuletzt durch die ISO-Normausschüsse (ISO 14040 ff.-Normungsreihe) haben dazu beigetragen, dass für das Instrument der produktorientierten Ökobilanz ein umfassendes Regelwerk mit Begriffsdefinitionen, Mindestanforderungen und Grundregeln existiert.<sup>64</sup> Dabei hat sich ein konsensfähiger Ansatz einer Grundstruktur zur Aufstellung von Ökobilanzen gebildet. Danach soll die Ökobilanz anhand von vier Phasen erstellt werden (DIN EN ISO 14040:2009):

- Phase der **Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen** für die Ökobilanz-Erstellung
- **Sachbilanz**-Phase: Bestandsaufnahme von Input-/Outputdaten in Bezug auf das zu untersuchende System; Sammlung der Daten, die zum Erreichen der Ziele notwendig sind
- Phase der **Wirkungsabschätzung**: Bereitstellung zusätzlicher Informationen zur Unterstützung der Einschätzung der Sachbilanzergebnisse eines Produktsystems, um deren Umweltrelevanz besser zu verstehen
- Phase der **Auswertung**: Zusammenfassung der Ergebnisse einer Sachbilanz oder einer Wirkungsabschätzung oder beider in Übereinstimmung mit der Zielstellung und dem Untersuchungsrahmen als Basis für Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Entscheidungshilfen

Charakteristisch für jede Ökobilanz ist, dass es sich immer um eine **Momentaufnahme** handelt.<sup>65</sup> Veränderungen bspw. im Produktionsprozess können nicht oder nur mit einem sehr hohen Aufwand nachträglich berücksichtigt werden. Deswegen ist die Interpretation der Ergebnisse meist auch nur **punktuell** z.B. im Rahmen eines Produktgruppenvergleichs oder einer Potenzialanalyse für die Reduzierung von Umweltwirkungen sinnvoll.<sup>66</sup>

<sup>63</sup> Vgl. (Wiedmann & Minx, 2007)

<sup>64</sup> Vgl. (Sundmacher, 2002)

<sup>65</sup> Vgl. (Schmidt, 2010)

<sup>66</sup> Vgl. (Schmidt, 2010)

Die Verfügbarkeit und Qualität der umweltbezogenen Daten sind die wichtigsten Kriterien zur Entscheidung, mit welcher Detaillierung eine Ökobilanzstudie durchgeführt werden kann.<sup>67</sup> Um auch mit geringerem Datenaufwand sinnvolle Aussagen zu treffen, besteht die Möglichkeit der Erstellung einer **vereinfachten Ökobilanz** (Simplified oder Streamlined LCA).<sup>68</sup> Diese gewinnt vor allem aus Sicht der Praxis aufgrund ihres geringeren Aufwands und der zeitnahen Zurverfügungstellung umweltbezogener Informationen zunehmend an Beliebtheit (Todd/Curran, 1999).<sup>69</sup>

Sie betrachten die wesentlichen Hauptumweltwirkungen im Produktlebenszyklus sowie die zentralen Treiber und Ursachen (z.B. Rohstoffeinsatz nach Gewicht) und stützen sich dabei auf direkt zugängliche und verfügbare Informationen und Daten, mit dem Ziel, den Prozess der Ökobilanzerstellung wesentlich zu vereinfachen (Bocken et al., 2012). Zudem konzentrieren sich vereinfachte Ökobilanzen häufig auf bestimmte Stufen bzw. Phasen im Produktlebenszyklus. Eine zutreffende Definition vereinfachter Ökobilanzen findet sich in Bocken et al., 2012: „Streamlined LCA is defined [...] as a LCA in which a reduced number of impacts or processes are analyzed“. Während die Ökobilanz eine umfassende quantitative Methode darstellt, werden im Rahmen von Verfahren zur vereinfachten Ökobilanzierung regelmäßig ausgewählte, besonders relevante Umweltwirkungen auf Basis semi-quantitativer oder qualitativer Scoring-Modelle analysiert (z.B. Bocken et al., 2012; Graedel, 1998; Wenzel, 1998). „Eine Ökobilanz betrachtet alle Attribute und Aspekte von natürlicher Umwelt, menschlicher Gesundheit und Ressourcen“ (DIN EN ISO 14040:2009). Während Ökobilanzen grundsätzlich alle Umweltwirkungen über den Lebenszyklus des Zurechnungsobjekts umfassen, fokussiert Carbon Management die Erfassung, die Messung, die Verteilung, den Ausweis und die Steuerung von Treibhausgasen insbesondere CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>70</sup> Andere Input- und Outputflüsse werden nicht betrachtet.<sup>71</sup> Grundlage des Carbon Managements bildet die Erstellung von Ökobilanzen.

---

<sup>67</sup> Vgl. (Klöpffer & Grahl, 2009)

<sup>68</sup> Vgl. (Bocken, Allwood, & King, 2012)

<sup>69</sup> Vgl. (Todd & Curran, 1999)

<sup>70</sup> Vgl. u.a. (Dresen & Wörner, 2009); (Stichnothe & von Thünen, 2009)

<sup>71</sup> Vgl. (Günther & Stechemesser, 2010)

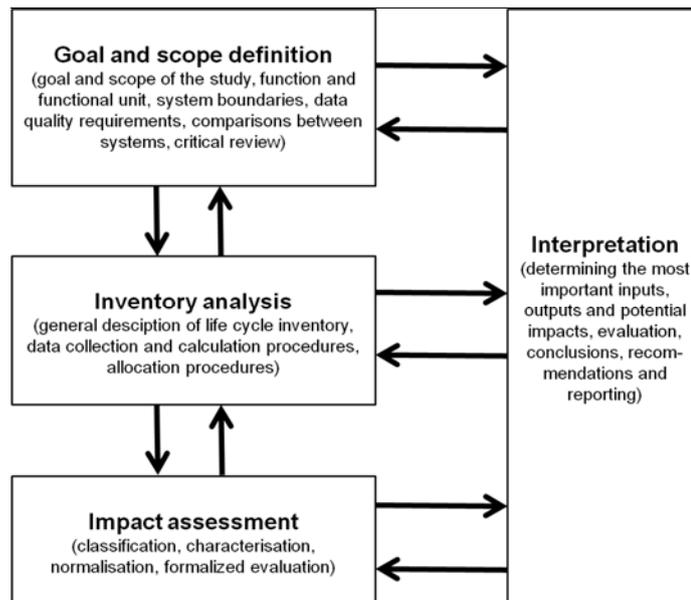


Abbildung 13: Phasendiagramm der Produkt-Ökobilanz nach ISO 14040

Eine Sachbilanz dient der Wertstoff- und Energiestromerfassung während der gesamten Lebensspanne. In der Literatur ist oftmals die Rede vom „von der Wiege bis zur Bahre“ Ansatz. Damit ist der gesamte Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung und Entsorgung) gemeint.

Die Wirkungsbilanz beurteilt alle potenziellen Wirkungen, die das Produkt auf Mensch und Umwelt haben kann. Diese Aufstellung kann recht umfangreich werden, da Auswirkungen sich auf viele Bereiche beziehen können. So sind z.B. Auswirkungen auf die Qualität der Luft, den Boden, Einbußen durch den Verbrauch von nicht erneuerbaren Rohstoffen usw. zu erfassen.

Die Auswertung gibt nicht nur eine Ist-Analyse wieder, sondern versucht auch Ansätze zur Verbesserung der Ökobilanzierung aufzuzeigen, sodass die Ökobilanz in Zukunft einen geringeren Emissionsausstoß bzw. Umweltwirkungen aufzeigen kann. Problematisch ist nach den ISO Normen 14040 und 14044 nur, dass keine Angaben über den Umfang der einzelnen Phasen gegeben werden. Diese Normen dienen lediglich zur Sicherstellung der Mindestanforderungen.

Werden Ökobilanzen jedoch nach außen, an externe Interessengruppen kommuniziert, so müssen wiederum grundsätzliche Anforderungen an Umweltaussagen berücksichtigt werden. Der Zielgruppe muss es ermöglicht werden, anhand der bereitgestellten Informationen die Ergebnisse nachvollziehen zu können. Folglich muss die Methodik der erhobenen Daten bekannt gemacht werden. Schlussfolgerungen müssen dem Leser soweit verständlich gemacht werden, dass dieser Rückschlüsse auf die verwendeten Punkte der Ökobilanz ziehen kann. Wird von Unternehmensseite ein Vergleich zu einem Konkurrenzprodukt angestrebt, so ist dieser nur auf verbaler Weise und nicht auf numerischer Weise vorzunehmen. Würde man jedoch einen numerischen Vergleich vorziehen, so ist die Ökobilanz von einem Expertenkreis, einem Critical Review zu unterziehen.

Eine Ökobilanz dient nicht nur der Erfassung eines Ist-Zustands, sondern unterstützt fast alle Bereiche im Unternehmen, ganz besonders im Controlling, Marketing und in der Produktentwicklung. Sie dient demzufolge auch zur Identifikation von Schwachstellen während des Lebenszyklus, da grobe Umweltwirkungen aufgedeckt werden.

Allgemein lassen sich Ökobilanzen zur Prozessoptimierung einer nachhaltigen Produktion nutzen. Ein in der Literatur weit verbreiteter Ansatz ist der Carbon Footprint, dieser ist sehr stark an die Ökobilanzierung angelehnt, jedoch fokussiert dieser den Beitrag zum Treibhauseffekt, sodass nur eine Emissionsklasse betrachtet wird (die Berechnungsmethoden decken sich mit denen der Ökobilanzierung).

In einer Ökobilanz wird der Anspruch der ganzheitlichen Erfassung von direkten und indirekten Umweltveränderungen im gesamten Lebenszyklus erhoben. Ökobilanzen sind nicht nur auf einzelne Produkte sondern auch auf ganze Unternehmen anwendbar, jedoch erhöht sich mit zusätzlichen Dimensionen auch der Erfassungsaufwand. Eine erstellte Ökobilanz ist ein statisches Gebilde und somit bildet diese immer nur eine Momentaufnahme ab. Werden hingegen Veränderungen im Produktionsprozess, neue Materialien oder Eigenschaften verändert, muss für jeden Fall eine neue Ökobilanz erstellt werden. Anpassungen sind mit erheblichem Aufwand verbunden. Folglich sind Aussagen und Interpretationen immer nur punktuelle Ist-Analysen, deren Aussagen sich auf Produktgruppenvergleiche oder Potenzialanalysen für die Reduzierung von Umweltwirkungen beziehen.

Die Hauptaufgabe bei der Erstellung einer Ökobilanz ist die Suche nach den passenden Daten, hierbei spielen die Verfügbarkeit und die Qualität die wichtigsten Rollen. Der Detailgrad einer Ökobilanzstudie variiert je nach Verfügbarkeit und Qualität der Daten. Diese Problematik greift die vereinfachte Ökobilanz (Simplified oder Streamlined LCA) auf, denn sie ermöglicht auch mit geringerem Datenmaterial eine sinnvolle Analyse. Dieses vereinfachte Verfahren setzt sich in der Praxis immer stärker durch, da Unternehmen mit einem geringeren Aufwand konfrontiert sind und somit einer raschen Ist-Analyse umweltbezogener Informationen nichts im Wege steht. Da die vereinfachte Ökobilanzierung auch für das Projekt Carbon Management zum Einsatz kommt, wird diese nachfolgend genauer beleuchtet.

Sie betrachten die wesentlichen Hauptumweltwirkungen im Produktlebenszyklus. Es wird auf zugängliche Daten und Informationen zurückgegriffen. So ist eine einfache Zuordnung von Emissionen anhand von Datenbanken (wie z.B. [www.probas.de](http://www.probas.de), des deutschen Umweltamtes) möglich den Rohstoffeinsatz nach Gewicht auf deren Umweltwirkungen hin zu erheben. Das ProBas vom Umweltbundesamt liefert prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme, mit deren Hilfe eine Ökobilanz leichter aufzustellen ist. So ist es zum Beispiel möglich den CO<sub>2</sub> Ausstoß für ein Gramm Kupfer zu erheben. Dies vereinfacht die Erhebung einer Ökobilanz ungemein. Des Weiteren ist es bei vereinfachten Ökobilanzen gestattet sich auf bestimmte Stufen bzw. Phasen im Produktlebenszyklus zu konzentrieren.<sup>72</sup> Eine zutreffende Definition vereinfachter Ökobilanzen findet sich in Bocken et al., 2012: „Streamlined LCA is defined [...] as a LCA in which a reduced number of impacts or processes are analyzed“.<sup>73</sup> Während die Ökobilanz eine umfassende quantitative Methode darstellt, werden im Rahmen von Verfahren zur vereinfachten Ökobilanzierung regelmäßig ausgewählte, besonders relevante Umweltwirkungen auf Basis semi-quantitativer oder qualitativer Scoring-Modelle analysiert (z.B. Bocken et al., 2012; Graedel, 1998; Wenzel, 1998). „Eine Ökobilanz betrachtet alle Attribute und Aspekte von natürlicher Umwelt, menschlicher Gesundheit und Ressourcen“ (DIN EN ISO 14040:2009). Während Ökobilanzen grundsätzlich alle Umweltwirkungen über den Lebenszyklus des Zurechnungsobjekts umfassen, fokussiert Carbon Management die Erfassung, die Messung, die Verteilung, den Ausweis und die Steuerung von Treibhausgasen insbesondere CO<sub>2</sub>-Emissionen. Andere

---

<sup>72</sup> Vgl. (Todd & Curran, 1999)

<sup>73</sup> (Bocken, Allwood, & King, 2012)

Input- und Outputflüsse werden nicht betrachtet. Die Erstellung von Ökobilanzen ist die Grundlage des Carbon Managements.

Zunächst wurde eine Marktrecherche mit den dazugehörigen Produktdatenblätter erhoben, diese Sammlung umfasst neben den produktspezifischen Daten: Filtertyp, Hersteller, Material, Abscheidegrad bezogen auf Partikel 0,01 µm, Restölgehalt auch weitere Merkmale. Diese Aufstellung wurde durch Messergebnisse (Differenzdruck) ergänzt. Mittels Expertengespräche wurden aus Sicht der Praxis Emissionstreiber bestimmt, welche als maßgebliche Druckdifferenzverursacher angesehen wurden. Unter Emissionstreiber versteht man Schwachstellen die maßgeblich für Emissionen verantwortlich sind. Das Projekt Carbon Management versteht unter Emissionen, den CO<sup>2</sup>-Ausstoß, welcher durch die Druckdifferenz (in mbar) vom Filter ausgehend ist. Denn für den Gegendruck bzw. den Druckverlust muss der Kompressor mehr Arbeit verrichten, sodass dieser indirekte Mehrverbrauch alleinig dem Druckluftfilter zuzuschreiben ist.

Als die wichtigsten identifizierten Komponenten werden das Gehäuse und das Filtermedium angesehen. Jedoch wurde bei Expertengespräche noch eine Vielzahl (siehe Tabelle 11) von Emissionstreibern, die aus Anwendungssicht Emissionstreiber sein müssten, genannt. Diese werden nachfolgend näher betrachtet. Diese Treiber wurden den Haupttreibern, Gehäuse und Medium zugeordnet:

*Tabelle 10: Emissionstreiber - Expertensicht*

<b>Emissionstreiber des Filtergehäuses</b>
Durchmesser des Druckluftanschlusses
Strömungswiderstand
Oberflächenrauigkeit
Gehäusegröße
<b>Emissionstreiber des Filtermediums</b>
Größe des Filterelements
Hohlraumvolumen
Physikalische Eigenschaften des Filtermediums
Aufbau des Filterelements

Es zeigte sich beim Filtergehäuse, dass der Durchmesser des Druckluftfilteranschlusses oftmals falsch oder unterschiedlich dimensioniert ist, sodass dies führt einen erheblichen Druckverlust verantwortlich ist. Die Lösung für diesen Emissionstreiber ist ein wohl dimensionierter durchgängiger Anschluss. Die Reduzierung eines Anschlusses von 1“ auf 1/2“ (freier Querschnitt um 65% reduziert) verringert den Eingangsdruck von 8 bar auf 7,5 bar. Dieser Druckabfall führt zu Emissionen, da der Kompressor, den Druckverlust ausgleichen muss.

Als weiterer Emissionstreiber wird der Strömungsführung gesehen, dieser Emissionstreiber tritt häufig bei verwinkelten Bauteilen auf. In der Praxis findet man häufig senkrechte Anschlüsse zum Filterelement und ein waagrechter Anschluss zur Druckrohrleitung. Durch die orthogonal liegenden Leitungen kommt es zur Ausbildung eines T-Elements. Dieser 90° Winkel wirkt sich negativ auf den Strömungswiderstand aus. Würde man die Strömungsführung anpassen z.B. mit Hilfe eines strömungsgünstigen Bogens, so könnte man die Druckdifferenz um den Faktor 0,9 senken. Ein Bogen hat im Vergleich zum Winkel einen um 75% reduzierten Strömungswiderstand.

Die Oberflächenbeschaffenheit im System kann zusätzlich den Strömungswiderstand beeinflussen. Dieses Problem hat zwei Ursachen, zum einen sind durch den Herstellungsprozess keine glatten Oberflächen entstanden, oder durch Korrosion. Möglicher Grund hierfür ist der Feuchtigkeitseintrag in der Druckluft, dieser lässt nämlich ungeschützte Oberflächen korrodieren. Hier gilt die Faustformel, je rauer die Oberfläche, desto ungünstiger sind die Luftführung und somit auch der Strömungswiderstand.

Die Gehäusegröße kann für die vorher genannten Emissionstreiber mitverantwortlich sein, denn die Gehäusegröße gibt maßgeblich die Voraussetzungen für die Strömungsführung und die Anschlussgröße. Auch hier gilt je größer das Gehäuse, desto mehr Raum steht dem Anschluss und auch der Strömungsführung zur Verfügung.

Das Filtermedium an sich liefert weitere Emissionstreiber: Die Größe des Filterelements hat wesentlichen Einfluss auf den Druckverlust, hierbei gilt: je größer das Filterelement, desto größer ist dessen Oberfläche und daraus resultiert ein geringerer Druckverlust. Dieser Treiber steht in Korrelation mit der Gehäusegröße, denn je größer das Gehäuse, desto größer kann das Filtermedium sein. Das Hohlraumvolumen hat auch einen Effekt auf die Druckluftströmung, je mehr Raum der Druckluft zur Durchströmung des Mediums gegenüber steht, desto niedriger sind der Strömungswiderstand und folglich auch der Druckverlust. Als ideale Lösung müssen das Hohlraumvolumen und die Größe des Filterelements aufeinander angepasst sein, um eine maximale Reduktion des Druckverlustes zu erreichen. Das Hohlraumvolumen spiegelt sich auch in der physikalischen Eigenschaft des Filtermediums wieder, denn ein hydrophobes (wasserabweisendes) Material vermindert die Ansammlung von Feuchtigkeit im Filtermedium (Fasern des Filters) und hilft dadurch das Hohlraumvolumen aufrecht zu erhalten. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig bei Koaleszenzfiltern.

Der Aufbau des Filterelements ist besonders relevant für die Abscheideleistung eines Filters. Die Anzahl der Filterlagen bestimmt die Abscheideleistung, hier gilt allgemein, dass mit steigender Abscheideleistung auch der Druckverlust steigt. Bei Koaleszenzfiltern ist der Aufbau der Filterlagenstärke von Belang, bei Partikel- bzw. Aktivkohlefiltern hingegen nicht. Die erste Lage sollte sehr dick und auch ein geringes Hohlraumvolumen aufweisen, dies fördert die Koaleszenz der Tröpfchen. Die nachfolgenden Lagen sollten von der Stärke stetig abnehmen bzw. offenerporiger werden, damit die Tröpfchen von innen nach außen anwachsen können.

Die soeben aufgezählten Emissionstreiber haben aber nicht alle die gleiche Wirkung auf den Gesamtdruckverlust, den ein Filter verursacht. Als maximale Einflussgröße für den Gesamtdruckverlust ist der Strömungswiderstand anzusehen, er macht laut Expertenmeinung zwischen 30 und 40% des Gesamtdruckverlustes aus.

Laut Antrag wurde für Arbeitspaket 3 ein Schätzvorgehen für Produkte ohne CO<sub>2</sub> Angabe versprochen. Das Projekt sieht für die ersten Arbeitspakete den Fokus auf die Arbeitsphase des Filters. Naturgemäß verursacht der Filter keinen eigenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß, sondern indirekt durch die Mehrbelastung des Kompressors. Diese Mehrleistung wird durch die Druckdifferenz ausgelöst. Die Luft muss durch den Filter strömen, dabei muss die komprimierte Luft einen Strömungswiderstand überwinden. Dieser Strömungswiderstand kommt durch die Beschaffenheit des Filtermaterials, der Gehäuseführung und des ganzen Filterdesign zustande. Es wurden mehrere Ansätze der vereinfachten Ökobilanzen analysiert, jedoch mit dem Entschluss eine sehr vereinfachte Form der Ökobilanz anzuwenden, welche wiederum mit einer Annahme zur indirekten Erfassung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erweitert worden ist. Die vereinfachten Ökobilanzkonzepte müssen um indirekte Emissionen (nicht zu verwechseln mit der Scope Betrachtung nach dem Treibhausgesetz) erweitert werden. Da der Filter an sich keine Emissionen während der Nutzung generiert, jedoch alleinig für den Mehrverbrauch an Ener-

gie durch den Druckluftkompressor verantwortlich ist, muss dieser Anstieg in die Berechnung einfließen. Ein Druckluftfilter erzeugt durch seinen Aufbau einen Gegendruck bzw. Druckverlust, dieser muss dem Druckluftdruckbedarf hinzuaddiert werden. Beispiel: ein Filter weist eine Druckdifferenz von 500 mbar auf, die Verbraucher im Druckluftnetz benötigen einen Betriebsdruck von 7,5 bar. Dies hat zur Folge, dass der Kompressor 8 bar an Druckluft bereitstellen muss (entspricht einer Mehrarbeit von 6,6%). Diese Mehrarbeit kann direkt auf die anteilige Stromaufnahme des Kompressors verrechnet werden. Durch die indirekte Erfassung ist auch ein CO<sub>2</sub>-Ausweis möglich, da die Stromzusammensetzung in der Regel bekannt ist. Um einen Vergleich verschiedener Druckluftfilter ziehen zu können sind einige Parameter zu standardisieren. Der Betriebsdruck der Verbraucher, der Kompressor und die Auslastung über einen gewissen Zeitraum müssen standardisiert bzw. konstant sein. Weicht hingegen eine der Kennzahlen ab, ist ein Vergleich verschiedener Ökobilanzen von Druckluftfiltern nicht möglich. Bei der praktischen Anwendung ist das größte Problem die Erfassung der Druckdifferenz. Im Normalfall gibt der Hersteller die Druckdifferenz nicht an, der Endkunde kann diese jedoch nur mittels Messtechnik ermitteln, welche wiederum nicht selbstverständlich verfügbar ist. Dies führt zu dem Umkehrschluss, dass der Endkunde die erforderlichen Daten i.d.R. nicht selbst erheben kann.

Der dritte und letzte Arbeitsschritt des Arbeitspakets beschäftigte sich mit der Validierung des Schätzvorgehens. Hierfür wurden die umfangreichen Messungen von IUTA verwertet. Anhand der durch Experteninterviews ermittelten Emissionstreiber wurde der Versuch angestellt ein Regressionsmodell aufzustellen. Dieses Modell bestand aus fünf für wichtig erachteten Emissionstreiber (top5), darunter die Gehäusegröße, das Filtermaterial, die Art der Filterbeschaffenheit, das Hohlraumvolumen und die Durchsatzleistung des Filters. Mittels dieser Emissionstreiber und dem gewünschten Abscheidegrad wurde ein Regressionsmodell aufgestellt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass dieses Schätzvorgehen für den Verbraucher mit zugänglichen Daten realisierbar sein soll. Diese Informationsanforderungen der fünf Emissionstreiber sind teilweise nicht auf dem Produktdatenblatt der Filter aufgeführt, sodass eine Endanwenderlösung mit diesen fünf Treibern nicht sinnvoll erscheint.

Bei der Auswertung der Regression ist kein plausibler Zusammenhang zwischen Eingabe und Ausgabe erkennbar. Im Nachhinein wurde im Projekt festgestellt, dass die fünf Emissionstreiber nicht maßgeblich für die Druckdifferenz des Filters verantwortlich sind. Es ist, wie auch von führenden Herstellern von Druckluftfiltern bestätigt die Strömungsführung der Druckluft von der druckführenden Leitung in das Filtergehäuse und durch das Filtermedium selbst. Dieses Merkmal ist jedoch für den Verbraucher nicht erkennbar und auch nicht von außen ersichtlich.

Zudem ist keine Korrelation der Druckdifferenz mit dem Preis festzustellen, die Aussage „hoher Preis = hohe Qualität = niedriger Druckverlust“ ist nach der Auswertung nicht haltbar.

Dieser Ansatz ist u.U. für hochwertige und minderwertige Filter zutreffend, jedoch ist es nicht mehr aussagekräftig für Filter die sich im gleichen Segment befinden, da innerhalb der Gruppen natürlich auch Preis und Qualitätsunterschiede bemerkbar machen.

Es bleibt also festzuhalten:

- Fehlende Datenbereitstellung durch Produktdatenblätter
- Offensichtliche Produktinformationen dienen nicht zum Vergleich
- Anwender nicht in der Lage von außen zu bewerten
- Preis kein alleiniges Merkmal

Dieses Problem aus der Antragserstellung ist leider nicht lösbar. Demzufolge beinhaltet der Leitfaden zur qualitativen Schätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nur die soeben beschriebenen Ansätze und theoretische Konstruktionen (siehe Abbildung 14).

**Idee: Konstruktion eines Schätzmodells****Vorgehen:**

1. Emissionstreiber bestimmen
2. Filtermessungen
3. Modellaufstellung

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>a. Abhängige Variable:</b> | <b>mbar Druckdifferenz</b>  |
| <b>Unabhängige Variablen:</b> | <b>Gehäusegröße, Filtermaterial, Filterbeschaffenheit, Hohlraumvolumen, Durchsatzleistung</b> |
| <b>b. Abhängige Variable:</b> | <b>mbar Druckdifferenz</b>  |
| <b>Unabhängige Variable:</b>  | <b>Preis</b>  |

*Abbildung 14: Konstruktion eines Schätzmodells*

Zunächst wurde das Schätzmodell aufgestellt, es wurden die relevanten Emissionstreiber bestimmt, und parallel hierzu Filtermessungen (Differenzdruckmessungen) vorgenommen. Alle Modelle haben als abhängige Variable den mbar Differenzdruck gemein. Dieser ermöglicht eine allgemeingültige Aussage über die Energieeffizienz (während der Nutzungsphase) des Druckluftfilter. Das erste Modell a) bestand aus mehreren unabhängigen Variablen (Emissionstreiber aus der Praxis). Jedoch zeigte sich, dass zum einen die Regression der Daten keine sinnvolle Aussage über die Druckdifferenz ermöglicht, sowie eine unzureichende Datengrundlage bei dem Endkunden vorliegt. Da dieser nicht in der Lage ist, die Güte/Beschaffenheit des Filtermediums zu bestimmen. Im Modell b) wurde schlichtweg der Preis mit der Druckdifferenz in Relation gesetzt. Jedoch zeigte sich, dass die Regression keine allgemeingültige Aussage zulässt.

Problem hierbei: Die Preise von Druckluftfiltern sind sehr nah beieinander, sodass ein Filter eines Markenhersteller u.U. zwar einen hohen Preis aufweist, jedoch nur eine mittlere Qualität und umgekehrt besitzt.

Als einzige sinnvolle Überlegung (in Absprache mit Vertretern des pA) kann festgehalten werden, dass die Strömungsführung als unabhängige Variable sinnvolle Ergebnisse liefern würde. Jedoch aus Mangel der Verfügbarkeit ist diese Methode für den Endanwender nicht zu realisieren. Während der Erhebung zeigte sich deutlich, dass die Qualität der Produktdatenblätter oftmals unterschiedliche Kenngrößen, aber auch nur ausgewählte Größen beinhaltet.

Es bleibt festzuhalten, dass dieses Ergebnis die Forderung nach einem Ökolabel aus dem Antrag bekräftigt (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16).

### 3. Modellaufstellung

**a. Abhängige Variable:** mbar Druckdifferenz

**Unabhängige Variablen:** Gehäusegröße, Filtermaterial, Filterbeschaffenheit, Hohlraumvolumen, Durchsatzleistung

- keine Regression möglich, da keine Korrelation der Variablen vorhanden ist
- Begründung: Zusammenhang der Variablen ist nicht signifikant

Messungen und Expertengespräche führten zu der Auffassung das die Strömungsführung als größter Emissionstreiber anzusehen ist, jedoch ist dies nicht im Projekt messbar.

- von außen ist der Zustand nicht ersichtlich, wäre dies so einfach bräuchte man kein Ökolabeling
- **diese Erkenntnis bestätigt den Nutzen eines Ökolabels**

Abbildung 15: Ergebnisse (a)

### 3. Modellaufstellung

**b. Abhängige Variable:** mbar Druckdifferenz

**Unabhängige Variable:** Preis

Funktioniert für Aussagen, wie z.B. Ein hochpreisiger Markenfilter hat eine höhere Effizienz als ein sehr günstiges asiatisches Plagiat.

Jedoch sobald man innerhalb der hochpreisigen Markenfilter diesen Vergleich anstreben will, funktioniert dies schon wieder nicht.

- **Notlösung: Versuch den Preis in Korrelation zur Druckdifferenz zu bringen.**

Abbildung 16: Ergebnisse (b)

## 2.3.2 Fazit

Dieses Problem aus der Antragserstellung ist leider nicht lösbar. Jedoch konnte mit Hilfe der gesammelten Daten eine Bestätigung der Notwendigkeit eines Produktökolabels gegeben werden.

Im Rahmen einer sehr vereinfachten Ökobilanz wurden für einen gängigen aktuellen Filter die Werte erhoben. Die Ökobilanz beschränkt sich im Anwendungsfall auf die Herstellungs-, Nutzungs- und Recyclingphase. Jedoch werden in der Herstellungsphase allein die eingesetzten Materialien (CO<sub>2</sub>-Bilanz der Rohstoffertigung) berücksichtigt. Im Rahmen des Projekts war keine exakte Umrechnung der Herstellungsemissionen möglich, die jedoch lt. Aussage von Experten als gering einzustufen sind. Der einzelne Filter wurde anhand des Gewichts und der verwendeten Materialien (Umweltdatenbank - ProBas) ausgewertet. Die Nutzungsphase bestimmt sich durch ein maximales Lastprofil, gekoppelt mit einem durchschnittlichen Energiemix. Die Recyclingphase beinhaltet, bei einem Druckluftfilter, die Entsorgung des Filtermediums (i.d.R. kann das Gehäuse mehrmals mit einem neuen Medium bestückt werden). Die Filterhersteller geben für ihre Filter ein Wartungsintervall von einem Jahr ein. Durch Expertengespräche wurde jedoch deutlich, dass viele Anwender dieses Intervall deutlich ausdehnen.

Für den indirekten Verbrauch an Strom ist als Beispiel ein gängiger Kompressor (90kW) verwendet worden. Es zeigt sich in den Berechnungen deutlich, dass die Nutzungsphase die anderen Phasen stark dominiert. Diese Berechnungen eignen sich für den Vergleich von unterschiedlichen Filtern deren Druckdifferenz bekannt sein muss. So ist aus wirtschaftlicher

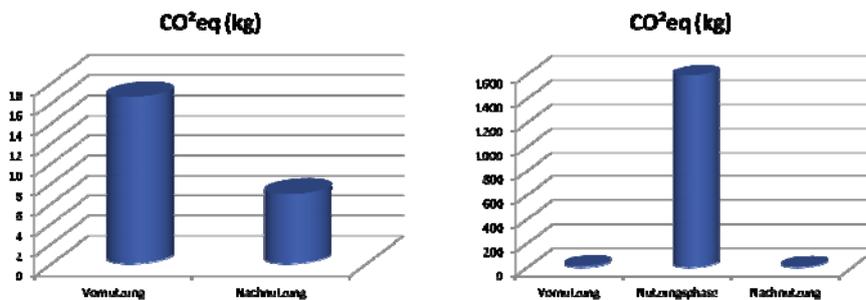
Sicht ein Vergleich der einzelnen Filter möglich. Erweitert wurde dieses Vorgehen um CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in den einzelnen Phasen anfallen. Auch hier ist die Nutzungsphase dominierend (es sei angemerkt, dass dies stark durch den verwendeten Energiemix beeinflusst wird).

Richtet sich die Betrachtung auf eine Periode, so besitzen die Anschaffungskosten deutlich mehr Gewicht als bei der Ausdehnung des Wartungsintervalls. Die Berechnungen lassen den Vergleich zu, wie schlecht ein Filter sein darf, jedoch unter monetären Gesichtspunkten ebenbürtig mit dem eines guten Filters. So zeigt sich das ökologische Betrachtung sinnvoll ist, da mit gleichem finanziellen Einsatz ein geringerer CO<sub>2</sub>-Ausstoß möglich ist (siehe nachfolgende Abbildungen):

**Betrachtung des Druckluftfilters im gesamten Lebenszyklus**

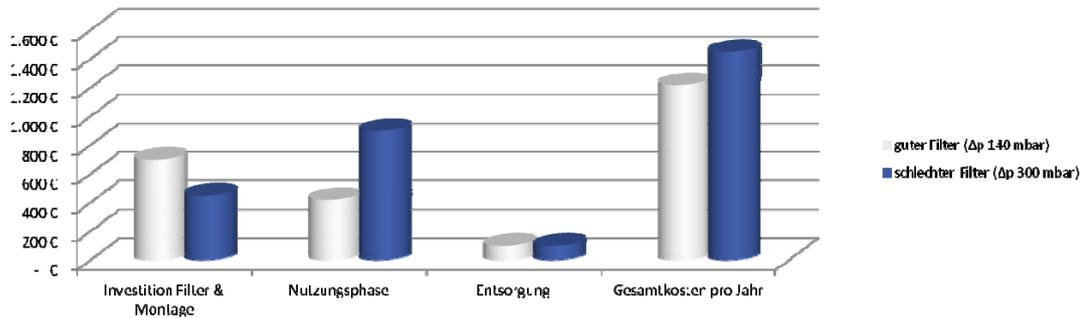
- Vorphase
- Nutzungsphase
- Nachphase
  
- Daten durch Bereitstellung von Herrn Schuster
  - Aufspaltung der Druckluftkomponenten
    - Gewicht
    - Material
  
- Daten (CO<sub>2</sub>-Äquivalent von PROBAS – Umweltbundesamt)

**Lebenszyklusbetrachtung – eine Periode**



- Gegenüberstellung der drei Phasen
- Vornutzung und Nachnutzung sind im Vergleich zur Nutzungsphase „fast“ zu vernachlässigen

## Lebenszyklusbetrachtung – eine Periode



	guter Filter (Δp 140 mbar)	schlechter Filter (Δp 300 mbar)
Investition Filter & Montage	700€	450€
Nutzungsphase	419€	899€
Entsorgung	100€	100€
Gesamtkosten pro Jahr	1.219€	1.449€
CO <sup>2</sup> -LCA	1614,26 kg CO <sup>2</sup> /Jahr	3432,23 kg CO <sup>2</sup> /Jahr

## Lebenszyklusbetrachtung - Fallunterscheidung

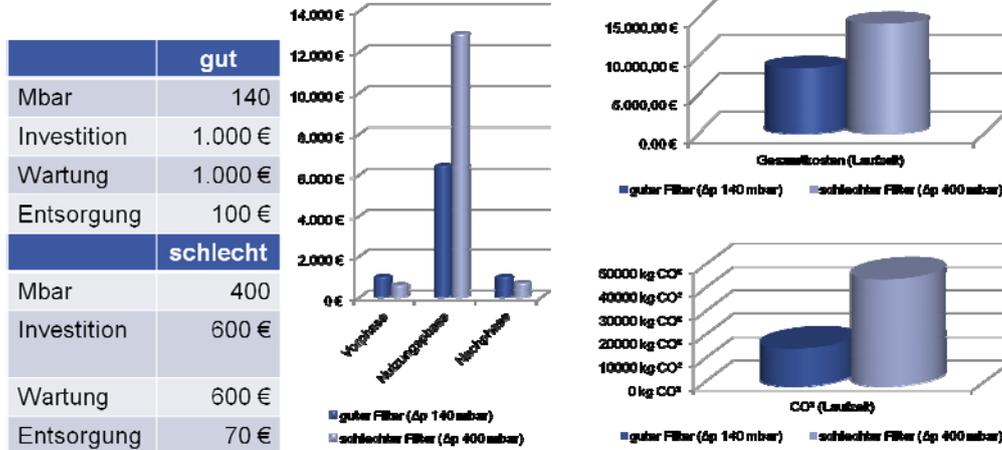
Betrachtungszeitraum: 10 Jahre

1. Guter Filter teurer im Vgl. zum „schlechten“ Filter = wesentlich höhere mbar Druckdifferenz
2. Lebenszykluskosten identisch, jedoch deutliche Klimaschädigung

	gut	schlecht
mbar	140	208
Investition Filter & Montage	1.000 €	600 €
Wartungskosten	1.000 €	600 €
Entsorgung	100 €	70 €

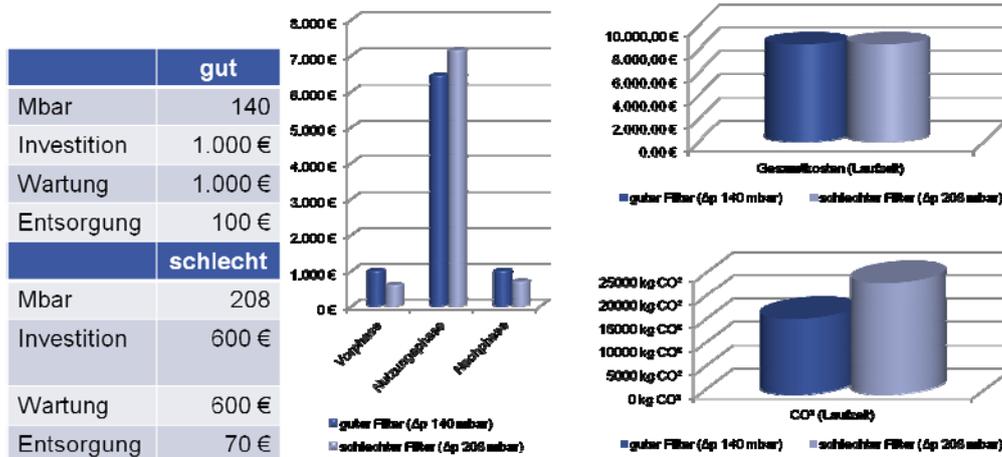
## Lebenszyklusbetrachtung - Fallunterscheidung

### 1. Guter Filter teurer im Vgl. zum „schlechten“ Filter = wesentlich höhere mbar Druckdifferenz



## Lebenszyklusbetrachtung- Fallunterscheidung

### 2. Lebenszykluskosten identisch, jedoch deutliche Klimaschädigung



### 2.3.3 Benötigte und eingesetzte Ressourcen

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses APs durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstellen wurden dafür 4 Personenmonate (IPRI) und 1,5 Personenmonate [HPA A] (IUTA) aufgewendet.

## 2.4 Arbeitspaket 4: Identifikation und Analyse von Kenngrößen zu den Emissionstreibern in der Betriebs- und Entsorgungsphase

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses Arbeitspakets:

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Katalog von Kenngrößen zu Emissionstreibern in der Nutzungsphase	Katalog von Kenngrößen zu Emissionstreibern in der Nutzungsphase
Wirkungszusammenhänge der Emissionstreiber	Wirkungszusammenhänge der Emissionstreiber

Ab diesem Arbeitspaket **rückt der Kunde in den Fokus** der Carbon Management Betrachtung. Es stellt die wichtigsten Kenngrößen zu Emissionstreibern in Abhängigkeit von unternehmensspezifischen Prozessen zusammen.

Das Carbon Management von Kunden in der Inbetriebnahme-, Betriebs- und Entsorgungsphase eines Filters basiert auf der **regelmäßigen Erfassung von Kenngrößen**, die stark mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Filters korrelieren („**Emissionstreiber**“). Die Emissionstreiber wurden hinsichtlich ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten und der Stärke der Korrelation mit den verursachten Emissionen analysiert. Hierzu wurden von den Herstellern verschiedene Kenngrößen der einzelnen Phasen bereitgestellt. Die Vorarbeiten aus Arbeitspaket 2 fließen stark in die Identifikation sowie Analyse der Emissionstreiber in der Betriebs- und Entsorgungsphase ein.

An dieser Stelle sei nochmals der Hinweis gegeben, dass Druckluftfilter nur indirekt für Emissionen verantwortlich sind (lt. Ökobilanz müssen alle Phasen: Herstellung, Nutzung sowie Entsorgung berücksichtigt werden). Dies führt dazu, dass ab sofort für die Bewertung die gesamte Anlage berücksichtigt werden muss und nicht mehr nur den Filtern autark.

### 2.4.1 Ergebnis: Katalog von Kenngrößen zu Emissionstreibern in der Nutzungsphase

Die aus den vergangenen Arbeitspaketen gesammelten Informationen (Basis: Expertengespräche) wurden auf die **wesentlichen Emissionstreiber** reduziert. Es zeigt sich, dass die Betriebsphase die eigentliche Phase, in der Emissionen indirekt erzeugt werden, ist. Der Differenzdruck muss durch einen höheren Energieaufwand des Kompressors ausgeglichen werden. Für die nähere Betrachtung wird von einem linearen Verlauf des Kompressors ausgegangen. Diese Annahme hat sich im Laufe des Projekts bewährt (z.B. Mitglieder des pA).

Zum leichteren Verständnis: Wenn die Verbraucher 7 bar Betriebsdruck benötigen und der Druckluftfilter eine Druckdifferenz von 500 mbar aufweist, muss der Kompressor (abgesehen von anderen Druckverlusten) auf 7,5 bar verdichten, anstatt lediglich des Betriebsdrucks von 7 bar. Dies entspricht einer Mehrleistung von 7,14%. Für eine vollständige Erfassung sind nun noch folgende Daten notwendig: jährlicher Verbrauch an Druckluft, kompressorspezifische Stromaufnahme, Energiemix. Anschließend kann die verbrauchte Druckluft z.B. in m<sup>3</sup> in Euro oder auch in CO<sub>2</sub>-Einheiten umgerechnet werden.

Das **Gehäuse** und das **Filtermedium** wurden als wichtigste Komponenten identifiziert (siehe Tabelle 11). Es wurde eine Vielzahl an **Emissionstreiber** durch Expertengespräche zusammengetragen, welche wiederum den Komponenten zugeordnet wurden.

Tabelle 11: Emissionstreiber - Expertensicht

<b>Emissionstreiber des Filtergehäuses</b>
<b>Durchmesser des Druckluftanschlusses</b>
<b>Strömungswiderstand</b>
<b>Oberflächenrauigkeit</b>
<b>Gehäusegröße</b>
<b>Emissionstreiber des Filtermediums</b>
<b>Größe des Filterelements</b>
<b>Hohlraumvolumen</b>
<b>Physikalische Eigenschaften des Filtermediums</b>
<b>Aufbau des Filterelements</b>

Nachfolgend wird **exemplarisch** auf die **wichtigsten Emissionstreiber** eingegangen (für nähere Informationen wird auf den Katalog von Kenngrößen verwiesen):

Es zeigte sich beim Filtergehäuse, dass der **Durchmesser des Druckluftfilteranschlusses** in der Praxis oftmals falsch oder unterschiedlich dimensioniert ist. Dies ist für einen erheblichen Druckverlust verantwortlich (siehe *Abbildung 20*). Die Lösung für diesen Emissionstreiber ist ein wohl dimensionierter durchgängiger Anschluss. Die Reduzierung eines Anschlusses von 1" auf 1/2" (freier Querschnitt um 65% reduziert) verringert den Eingangsdruck von 8 bar auf 7,5 bar. Da dieser Druckabfall vom Kompressor ausgeglichen werden muss führt dies ebenfalls zu Emissionen.

Als weiterer Emissionstreiber wird die **Strömungsführung** angesehen. Dieses Phänomen tritt häufig bei verwinkelten Bauteilen auf. In der Praxis findet man häufig senkrechte Anschlüsse zum Filterelement und einen waagrechten Anschluss zur Druckrohrleitung. Durch die orthogonal liegenden Leitungen kommt es zur Ausbildung eines T-Elements. Dieser 90° Winkel wirkt sich negativ auf den Strömungswiderstand aus. Würde man die Strömungsführung anpassen z.B. mit Hilfe eines strömungsgünstigen Bogens, so könnte man die Druckdifferenz um den Faktor 0,9 senken. Ein Bogen hat im Vergleich zum Winkel einen um 75% reduzierten Strömungswiderstand.

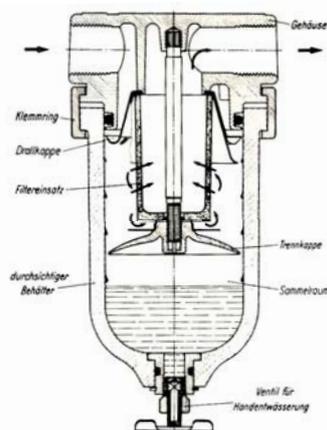


Abbildung 17: Schnittbild eines Druckluft-Filters

Die **Oberflächenbeschaffenheit** im System kann zusätzlich den Strömungswiderstand (siehe Abbildung 18: laminare vs. turbulente Strömung) beeinflussen. Dieses Problem hat zwei Ursachen, entweder es sind durch den Herstellungsprozess keine glatten Oberflächen entstanden, oder durch Korrosion im Laufe der Betriebsphase. Der Feuchtigkeitseintrag und der Einfluss schwefeliger Säure ( $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ ) in der Druckluft lässt ungeschützte Oberflächen korrodieren (siehe Abbildung 19: Luftverschmutzung 2011 Deutschland). Somit stellen die Bestandteile der Luft ein großes Problem für das Leitungsnetz dar, je nach Material kommt es zu einer verstärkten Rostbildung. Dies kann je nach Anwendung zu einem erhöhten Ausschuss führen (z.B. bei Lackierungen). Die Rostbildung führt zudem zu einem erhöhten Verschleiß der Werkzeuge, da Rostpartikel durch die strömende Druckluft gelöst werden können und diese dann den Schmierfilm innerhalb der Werkzeuge regelrecht abwaschen können.<sup>74</sup>

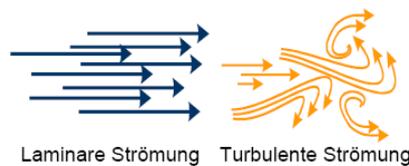


Abbildung 18: laminare vs. turbulente Strömung<sup>75</sup>

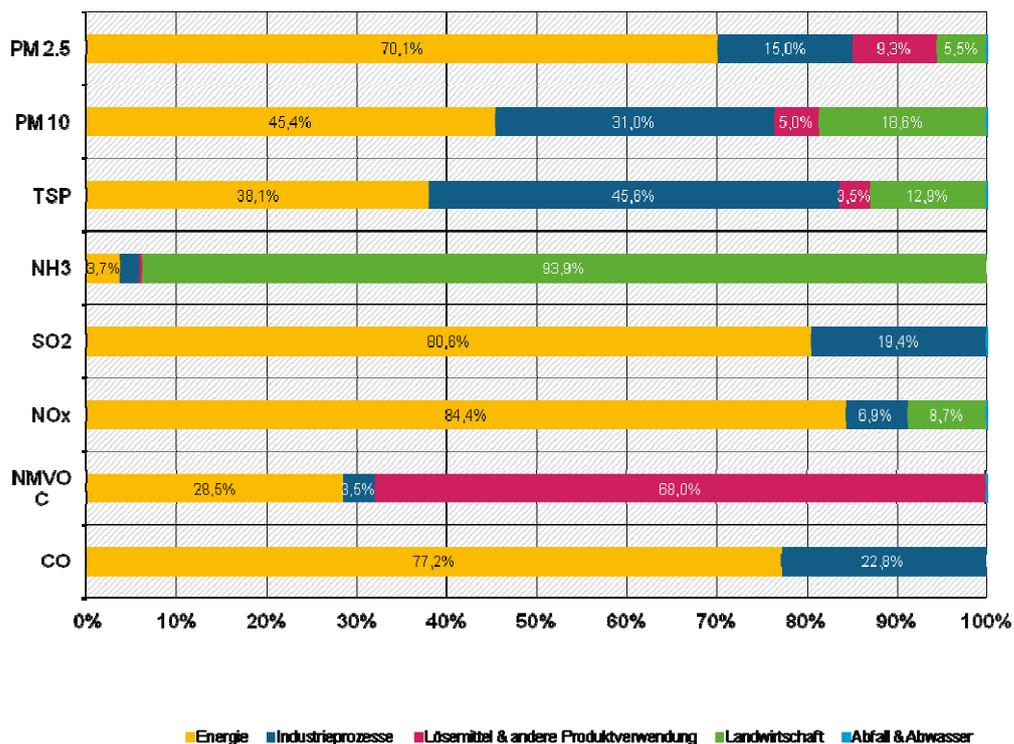


Abbildung 19: Luftverschmutzung 2011 Deutschland<sup>76</sup>

<sup>74</sup> Vgl. (Ruppelt, 2003)

<sup>75</sup> Vgl. (Fraunhofer ISI, 2003)

Zusammenfassen lässt sich über die Oberflächenbeschaffenheit sagen, je rauer die Oberfläche, desto ungünstiger ist die Luftführung und somit auch der Strömungswiderstand.

Die **Gehäusegröße** kann für die vorher genannten Emissionstreiber mitverantwortlich sein, denn die Gehäusegröße gibt maßgeblich die Voraussetzungen für die Strömungsführung und die Anschlussgröße. Auch hier gilt je größer das Gehäuse, desto mehr Raum steht dem Anschluss und auch der Strömungsführung zur Verfügung.

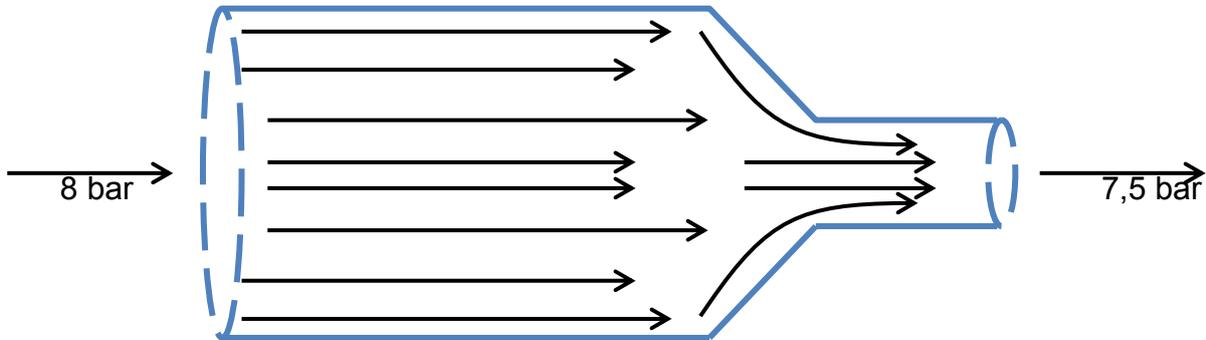


Abbildung 20: Anschlussgröße 1" auf 1/2"

Das Filtermedium an sich liefert weitere Emissionstreiber (siehe Tabelle 11): In der Praxis gilt immer der Trade-Off aus sehr guter Filterleistung und geringer Druckdifferenz zu vereinbaren. So besitzen z.B. Filter mit einem einschichtigen, gewickelten Lagenaufbau zwar einen geringeren Druckverlust, jedoch ist hier auch eine geringe Aufnahmekapazität zu verzeichnen. Gleiches gilt für Filtermedien, bei denen die Fasern eine geringe Oberfläche aufweisen.<sup>77</sup>

Die **Größe des Filterelements** hat wesentlichen Einfluss auf den Druckverlust, hierbei gilt: je größer das Filterelement, desto größer ist dessen Oberfläche und daraus resultierend ein geringerer Druckverlust. Dieser Treiber steht in Korrelation mit der Gehäusegröße, denn je größer das Gehäuse, desto größer kann das Filtermedium sein. Das Hohlraumvolumen besetzt auch einen Effekt auf die Druckluftströmung, je mehr Raum der Druckluft zum durchströmen des Mediums gegenüber steht, desto niedriger ist der Strömungswiderstand und folglich ist auch ein geringer Druckverlust möglich. Als ideale Lösung müssen das Hohlraumvolumen und die Größe des Filterelements aufeinander angepasst sein, um eine maximale Reduktion des Druckverlustes zu erreichen. Auch bei kleinen Filtern, muss im Umkehrschluss das Hohlraumvolumen für einen minimalen Druck reduziert werden.

Das **Hohlraumvolumen** bezeichnet den freien Raum des Filtermediums der zur Durchströmung dient (siehe Abbildung 21: Hohlraumvolumen - Filtermedium). Es spiegelt sich in der physikalischen Eigenschaft des Filtermediums wieder, denn ein hydrophobes (wasserabweisendes) Material vermindert die Ansammlung von Feuchtigkeit im Filtermedium (Fasern des Filters) und hilft dadurch das Hohlraumvolumen aufrecht zu erhalten.

<sup>76</sup> Umweltbundesamt. (2011). Quellen der Luftschadstoff-Emissionen 2011. Abgerufen am 24. April 2015 von Umweltbundesamt: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/quellen-der-luftschadstoffe>

<sup>77</sup> Vgl. (Rbayti, 2013)

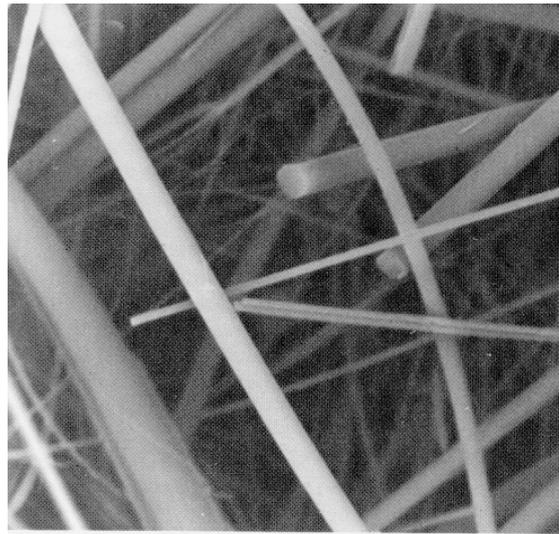


Abbildung 21: Hohlraumvolumen - Filtermedium<sup>78</sup>

Diese Eigenschaft ist besonders wichtig bei Koaleszenzfilter (siehe Abbildung 22: schematische Darstellung der Filterwirkung (Partikel- und Koaleszenzfilter)). Der Aufbau des Filterelements ist besonders relevant für die Abscheideleistung eines Filters. Die Anzahl der Filterlagen bestimmt die Abscheideleistung, hier gilt allgemein, dass mit steigender Abscheideleistung auch der Druckverlust steigt. Bei Koaleszenzfilter ist der Aufbau der Filterlagenstärke von Bedeutung, hingegen bei Partikel- bzw. Aktivkohlefiltern nicht (siehe *Abbildung 22* und *Abbildung 23*).

Für die Praxis ist es wichtig, dass die Filtration im Allgemeinen auf die jeweils geforderte Druckluftqualität angepasst sein muss. Eine unnötig zu sehr gereinigte Druckluft verursacht erhebliche Kosten und Emissionen, die bei Anpassung eingespart werden können.<sup>79</sup>

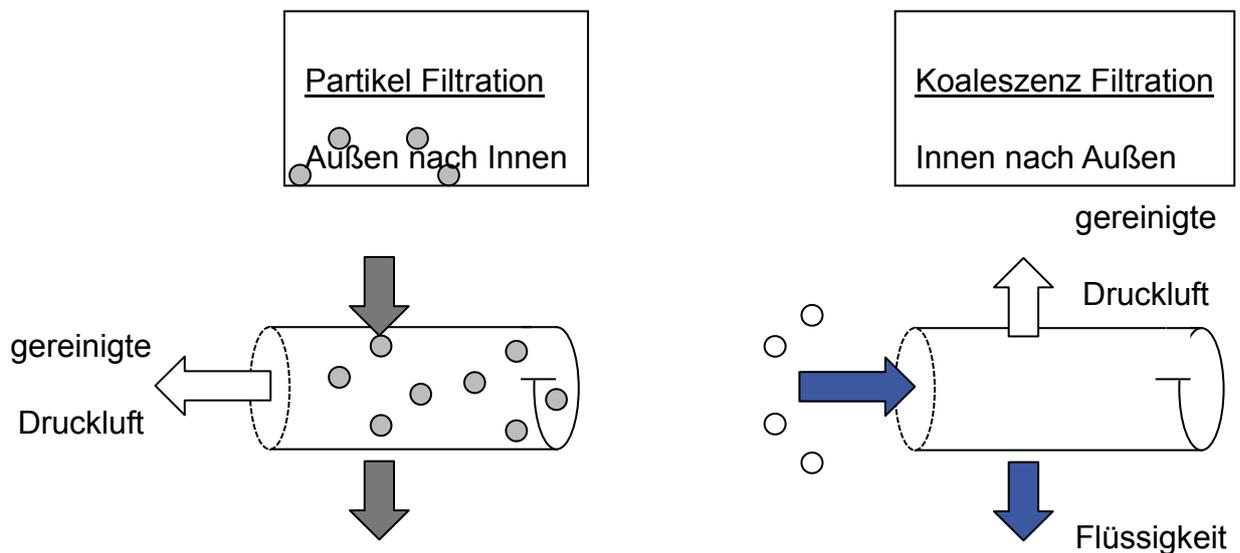


Abbildung 22: schematische Darstellung der Filterwirkung (Partikel- und Koaleszenzfilter)<sup>80</sup>

<sup>78</sup> Foto stammt aus dem pA – Unterlagen BEKO

<sup>79</sup> Vgl. (Rbayti, 2013)

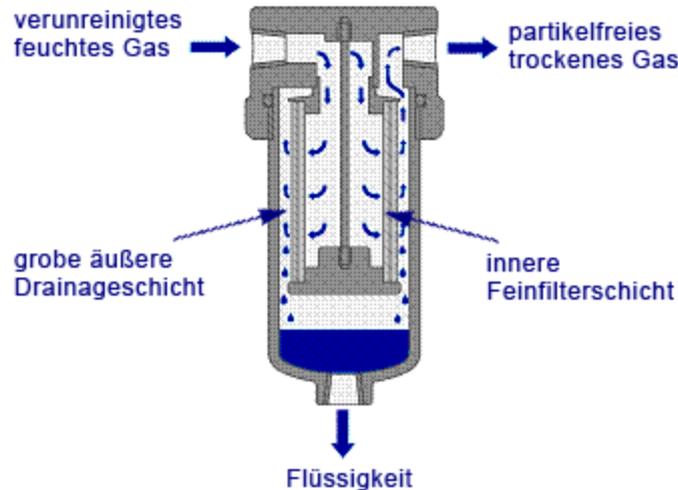


Abbildung 23: Aufbau Koaleszenzfilter<sup>81</sup>

Die soeben aufgezählten Emissionstreiber besitzen jedoch nicht alle die gleiche Wirkung auf den Gesamtdruckverlust, den ein Filter verursacht. Als **maximale Einflussgröße** für den Gesamtdruckverlust ist der **Strömungswiderstand** anzusehen, er macht laut Expertenmeinung zwischen 30 und 40% des Gesamtdruckverlustes aus.

Nach der Auswertung der Ergebnisse aus Arbeitspaket 2, sind aus messtechnischer Sicht mehrere Emissionstreiber nicht valide, bzw. nicht eindeutig dem besseren oder schlechteren Differenzdruck zuzuschreiben. Dies führt zu einer neuen Betrachtung des Arbeitspakets 3: Die untersuchten Emissionstreiber aus der Praxis werden nun auf drei **Hauptemissionstreiber** komprimiert. Als Emissionstreiber des Druckluftfilters werden fortfolgend (siehe Tabelle 12: valide Emissionstreiber) nur noch das Gehäuse, die Filterpatrone und das Filtermedium gesehen.

Tabelle 12: valide Emissionstreiber

Komponente	Teilkomponente	Bewertungsgröße	Gewichtung	Optimierung
<b>Gehäuse</b>	Anschlussmaße	Druckverlust	+++	Investition
	Strömungsführung	Druckverlust	+++	Investition
<b>Filterpatrone</b>	Strömungsführung	Druckverlust	+++	Investition
<b>Filtermedium</b>	Geforderte Effizienz	Druckverlust	+++	Labeling

Die validen Emissionstreiber wurden mithilfe eines anderen **Versuchsaufbaus** gemessen. Die **Differenzdruckmessung** wurde mit Hilfe von drei unterschiedlichen Messstellen auf die

<sup>80</sup> In Anlehnung an: SUN-Control-Analytik GmbH. (2013). Partikel- und Koaleszenzfilter. Abgerufen am 23. April 2015 von <http://www.sun-control-analytik.de/SUN-Control-Analytik-partikelfilter-PC-1410-E-koaleszenzfilter-im-edelstahlgehaeuse-sun-c-filter.htm>

<sup>81</sup> Dipl.-Kfm. Stock, T. (2014). Koaleszenzfilter. Abgerufen am 24. April 2015 von Infiltec GmbH: [http://www.infiltec.de/ger/gasfilter/gf\\_alu\\_koal.htm](http://www.infiltec.de/ger/gasfilter/gf_alu_koal.htm)

einzelnen Segmente eingegrenzt (siehe Abbildung 24: Messung mit Filtermedium und Abbildung 25: Messung ohne Filtermedium). Das Gehäuse ist verantwortlich für zwei Emissions-treiber, die Anschlussmaße und die Strömungsführung. Die Filterpatrone wird auch von der Strömungsführung beeinflusst und muss für einen reduzierten Druckverlust auch strömungsoptimiert sein (siehe Abbildung 26: Strömungsoptimierte Luftführung (Beispiel Donaldson Ultra-Filter)).<sup>82</sup>

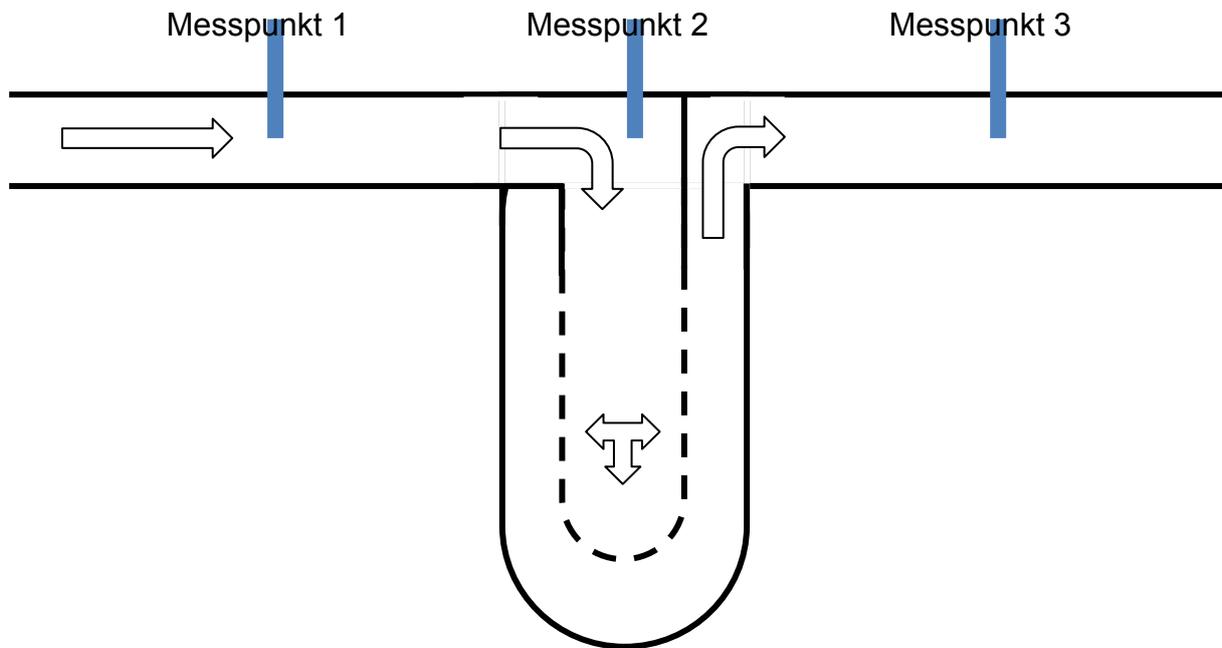


Abbildung 24: Messung mit Filtermedium

<sup>82</sup> In Anlehnung an Aussage pA: Donaldson Filtration Deutschland GmbH, 2014

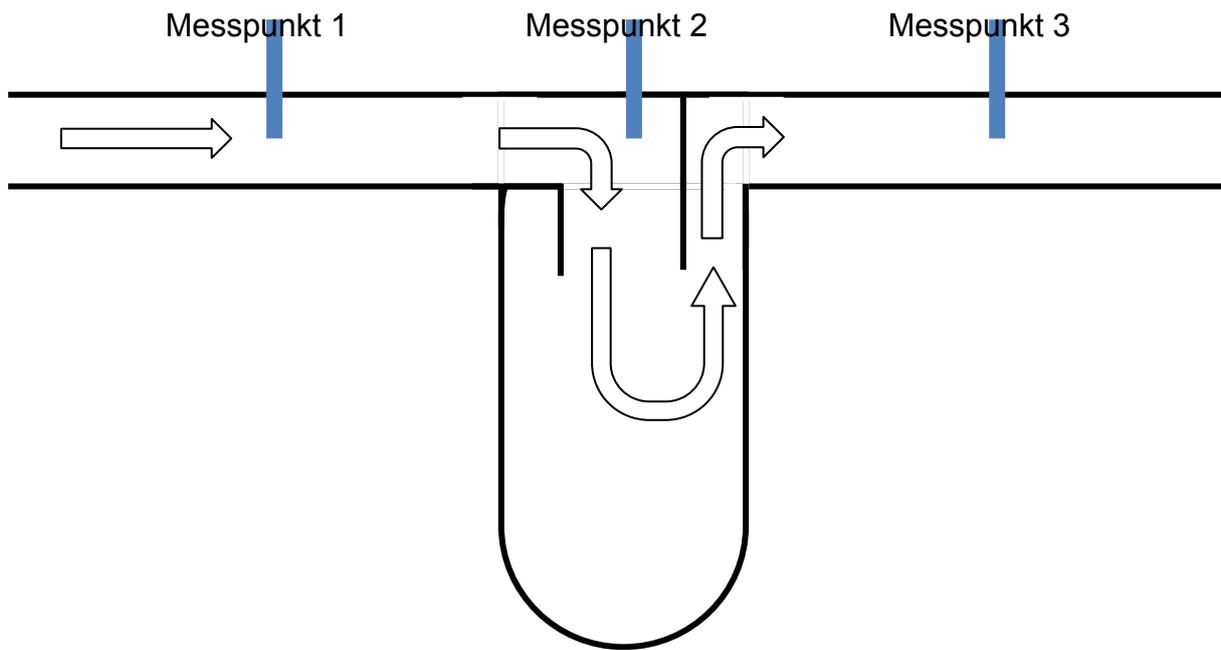


Abbildung 25: Messung ohne Filtermedium

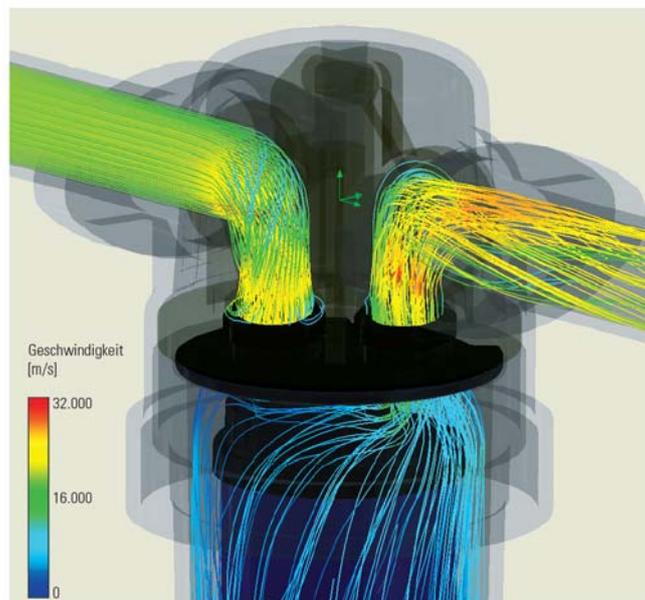


Abbildung 26: Strömungsoptimierte Luftführung (Beispiel Donaldson Ultra-Filter)<sup>83</sup>

## 2.4.2 Ergebnis Wirkungszusammenhänge der Emissionstreiber

Die evaluierten Emissionstreiber der Experten wurden zu einem Emissionstreiberbaum zusammengefasst (siehe Abbildung 27: Emissionstreiberbaum). Die Auswertung der vorangegangenen Ergebnisse (basierend auf Expertengespräche, Versuchen und Literaturlauswertung) ergab folgenden Emissionstreiberbaum.

<sup>83</sup> Foto stammt aus dem pA: Donaldson Filtration Deutschland GmbH, 2014

## Zusammenhänge in der Übersicht – Ergebnisse der Befragung der Unternehmen

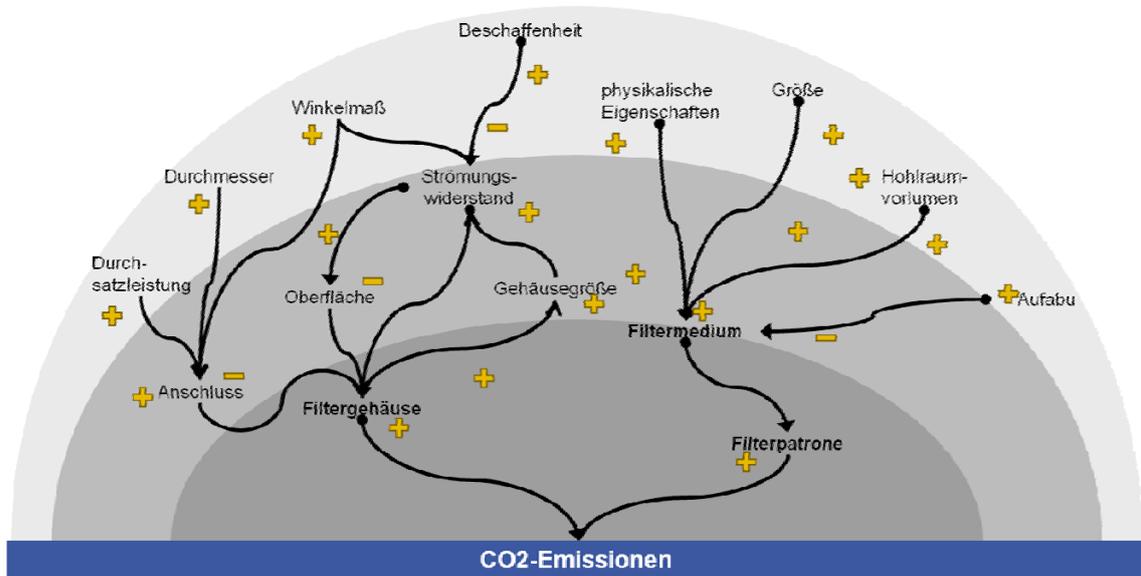


Abbildung 27: Emissionstreiberbaum

Die Abbildung zeigt, welche Komponenten wie zusammen agieren und welche für einen positiven bzw. negativen Effekt auf die Emissionen verantwortlich ist.

Die nächsten Arbeitspakete befassen sich mit der gesamten Anlage, sodass die im Rahmen von Arbeitspaket 4 gesammelten Informationen zusätzlich in folgender Tabelle 13 zusammengetragen wurden.

Tabelle 13: Auszug - Emissionstreiber - gesamte Anlage

Komponente	Bewertungsgröße	Gewichtung	Optimierung
<b>Kompressor</b>	Effizienz	+++	Wartung
<b>Verrohrung</b>	Druckverlust	+	Investition
<b>Leckagen</b>	Leistungsverlust	+++	Wartung
<b>Druckniveau unnötig hoch</b>	Leistungsverlust	++	Investition
<b>Druckluftfilter / Betrieb</b>	Druckverlust bei geforderte Effizienz	++	Wartung
<b>Druckluftfilter / Investition</b>	Druckverlust bei geforderter Effizienz	++	Labeling

### 2.4.3 Fazit

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 4 haben dazu maßgeblich beigetragen, dass das Verständnis eines Emissionstreibers sich im Rahmen des Projekts gewandelt hat. Es bestätigten sich die Ergebnisse aus Arbeitspaket 3, dass die Druckdifferenz nicht offensichtlichen Kennzahlen zuzuschreiben sind. Da alle Emissionstreiber zusammenwirken ist ein Rückschluss einzelner Treiber auf die Druckdifferenz nicht möglich. Kennzahlen wie die Strömungseigenschaft sind für den Endkunden auf dem Produktinformationsdatenblatt bisher nicht zugäng-

lich. Sodass viele Emissionstreiber zwar im Labor nachzuvollziehen sind, jedoch aus Endkundensicht nicht von außen ersichtlich sind.

**Diese Tatsache bekräftigt die Einführung eines Ökolabels, da so der Kunde die Möglichkeit besitzt, die Qualität (geringe Druckdifferenz) einzusehen.**

#### 2.4.4 *Benötigte und eingesetzte Ressourcen*

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses APs durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstelle wurden dafür 4 Personenmonate (IPRI) und 3 Personenmonate [HPA A] (IUTA) aufgewendet.

### 2.5 **Arbeitspaket 5: Kalkulationsvorschriften und Messmethoden für die Kenngrößen**

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses Arbeitspakets:

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Leitfaden mit Messmethoden und -instrumenten aus Kundensicht	Leitfaden mit Messmethoden und -instrumenten aus Kundensicht
Excel-Demonstrator zur Kalkulation und Überwachung der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Kundensicht	Excel-Demonstrator zur Kalkulation und Überwachung der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Kundensicht

Der Gegenstand des fünften Arbeitspakets ist die **Unterstützung des Kunden** (Filteranwender) bei seinem Carbon Management durch eine nachvollziehbare Anleitung zum direkten bzw. indirekten Messen der Emissionen. Hierzu entstand eine Zusammenstellung geeigneter Messinstrumente und Methoden sowie anschließend Kalkulationsvorschriften für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. In vielen Fällen ist die **direkte Messung der Emissionstreiber jedoch nicht möglich oder nicht wirtschaftlich umsetzbar**. Die daraus resultierenden Kalkulationsvorschriften, um aus den direkten und/oder indirekten Messungen CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnen zu können wurden in einen Excel-Demonstrator überführt.

Diese beiden Komponenten sollen den Kunden (Druckluftanwender) unterstützen, die durch den Filter im realen Einsatz verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufwandsarm zu messen.

#### 2.5.1 **Ergebnis: Leitfaden mit Messmethoden und -instrumenten aus Kundensicht**

Ziel des Leitfadens mit Messmethoden und -instrumenten aus Kundensicht ist es, den Entscheidungsträgern **nachvollziehbar Messmethoden** zur direkten bzw. indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionsmessung aufzuzeigen. Die realen Umstände, sind in der Regel nicht mit denen eines Prüfstandes vergleichbar. Die Dimension der Anlagen unterscheidet sich beträchtlich (Querschnitt, Länge, Wartungszustand, Alter, Ansaugluft, Verrohrung, Ölbeimengung, Ölgemisch und viele weitere Faktoren), sodass im Einzelfall zu entscheiden ist, welche Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>-Messung vorhanden sind. Unter Laborbedingungen sind Messungen ohne weiteres möglich, jedoch ist in der Praxis nicht immer das nötige Equipment vorhanden. Grundlegend für physikalische Messmethoden, ist die Aufteilung in direkte sowie indirekte Messmethoden. Es stellt sich die Frage welche Informationen der Anwender sinnvollerweise erheben soll:

- Druckdifferenz des Filters
- Leckagerate der Anlage
- Druckluftverbrauch

Zusammen mit Unternehmen des PA sowie zusätzlichen Messinstrumente-Herstellern wurden mit Hilfe von Experteninterviews und Gesprächen innerhalb der PA-Sitzungen die nachfolgenden Anforderungen an Messmethoden diskutiert und validiert. Gespräche mit der Praxis zeigten, obwohl die Druckluft zu den teuersten Energieformen zählt, werden in vielen Betrieben oftmals **hohe Energieverluste in Kauf genommen**. Selbst in Unternehmen, die sehr viel Zeit und Geld in ihre Druckluftanlage investieren, bleibt der Druckluftfilter meistens unangetastet. Messtechnik ist hier das Schlagwort.

Die eigentliche Messung geschieht mit unterschiedlichen Sensoren, deren Messergebnisse müssen entweder abgelesen oder durch Schnittstellen zentral zusammengefasst werden. Anschließend erfolgt die Analyse, wobei bei der Auswertung viele zusätzliche Parameter mit einfließen können. Wird z.B. nicht die Luftmenge, sondern nur eine Strom- und Leistungsmessung erhoben, so sind mit Parametern wie den Leistungsdaten des Kompressors Aussagen über den Energieverbrauch in kWh, Last-, Leerlauf-, Stoppzeit, Kompressorauflastung in %, Anzahl Be-/Entlastungen (Lastzyklen), spezifische Leistung in kWh/m<sup>3</sup> und über die Kosten in m<sup>3</sup> möglich. Verbindet man diese Strommessung mit einer echten Verbrauchsmessung, so lässt sich die Analyse erheblich präzisieren sowie Aussagen über die Leckage und den damit verbundenen Kosten treffen.

Die **Leckageberechnung** findet üblicherweise in der produktionsfreien Zeit statt, diese Phasen sind i.d.R. der Stillstand, das Wochenende oder die Urlaubsphase. Hier kann die wirkliche Liefermenge gemessen werden, da die **Kompressorsteuerung** einen konstanten Druck aufrechterhalten möchte. Da Leckagen jedoch Dauerverbraucher darstellen, wird in der Analyse die zusätzlichen Einschaltsequenzen des Kompressors sowie den Luftverbrauch wieder spiegeln. Für Fälle in denen rund um die Uhr produziert wird, gibt es Softwarelösungen. Diese ermöglichen mittels minimaler Zeitmessungen einen Rückschluss auf die Leckagerate.

Die direkte Methode umfasst alle Maßnahmen zur direkten Erfassung des Drucks, ohne zusätzliche Annahmen treffen zu müssen. Dies hat zur Folge, dass nur wenige Optionen zur direkten Messung des Differenzdrucks, des Verbrauchs und der Leckagerate möglich sind. Das Messen von Druckluft bereitet viele Probleme, da nicht jedes Messgerät für den jeweiligen Einsatz (Ort, Bedingungen) geeignet ist.

In der Praxis wird das Messen der Druckluft durch u.U. **erhebliche Kosten** erschwert. Das direkte Messen ist z.B. auf einfache und genaue Weise nur mit einem hochpreisigen Druckdifferenzmanometer möglich (Kosten pro Mess-Stelle ca. 1000€). Ziel des Forschungsvorhabens war es deshalb auch kostengünstigere Alternativen aufzuzeigen.

- Identifikation geeigneter Messinstrumente und -methoden zum direkten Messen von Emissionen

Druckluft lässt mehrere Möglichkeiten der direkten Messung zu, eine **Verbrauchsmessung**, eine **Druckmessung**, eine Messung der Leckagen sowie eine Strommessung. Die Verbrauchsmessung misst z.B. nach dem kalorimetrischen Messprinzip den Volumenstrom und gibt den Verbrauch als m<sup>3</sup> pro Stunde bzw. je nach gewählter Dauer an. Mit dieser Information sind Rückschlüsse auf: Verbrauch und mögliche Leckagen möglich. Man stelle sich vor,

die Druckluftanlage wird nicht ausgeschaltet, es wird jedoch am Wochenende nicht gearbeitet. Zeichnet nun der Verbrauchsmesser einen Verbrauch auf, so ist die einzige Erklärung, dass dieser Verbrauch der Leckage zuzuschreiben ist. Moderne Messinstrumente verfügen heute über Schnittstellen und Datenleitungen, sodass eine graphische Auswertung sehr einfach durchzuführen ist. Durch zusätzliche Informationen, wie z.B. Kosten pro m<sup>3</sup> Druckluft sind Rückschlüsse auf die Gesamtkosten sowie der CO<sup>2</sup> Emissionen möglich. Die Kosten basieren auf den Energiekosten kW/h, die durch den Kompressor verursacht werden. Mit Hilfe dieser Kennzahl ist eine Erweiterung mittels individueller Energie-Emissionskennzahl möglich. Somit lassen sich aus der Verbrauchsmessung die CO<sub>2</sub>-Emissionen ableiten. Mit dieser ganzheitlichen Messmethode ist jedoch kein Rückschluss auf den Filter möglich. Hierfür müssen andere Verfahren bzw. mehrere Messstellen vorhanden sein.

### Hauptziel ist die Messung der Druckdifferenz des Druckluftfilters aus Anwendersicht.

Die Druckdifferenz lässt sich mit einfachen Messinstrumenten nur sehr schwer ermitteln, da gute Filter nur wenige 100 mbar Druckdifferenz verursachen. Dies liegt jedoch oftmals im Tolleranzbereich der Messsensoren. Mechanische Druckmessgeräte funktionieren mit Federn, die Drücke sind hierdurch nur mit einem Bezugsdruck, dem Referenzdruck messbar. Hierfür dient i.d.R. der Atmosphärendruck. Jedoch sind diese nur bei zweifacher Messung (vor und hinter dem Filter) zu verwenden. Anders hingegen sind Differenzdruckmessgeräte, hier wird die Differenz zweier Drücke direkt erfasst und angezeigt. Auch diese verwenden Federn und gleiche Messprinzipien wie Druckmessgeräte. Ihr Aufbau besteht aus zwei abgeschlossenen Kammern, die sogenannten Messstoffräume, welche durch ein Messglied voneinander getrennt sind. Herrscht nun in beiden Räumen gleicher Betriebsdruck, so führt das Messglied keine Bewegung aus und somit auch keine Druckdifferenzanzeige. Erst wenn der Betriebsdruck in beiden Kammern unterschiedlich ist, schlägt die Anzeige in die eine oder andere Richtung aus (siehe Abbildung 28).

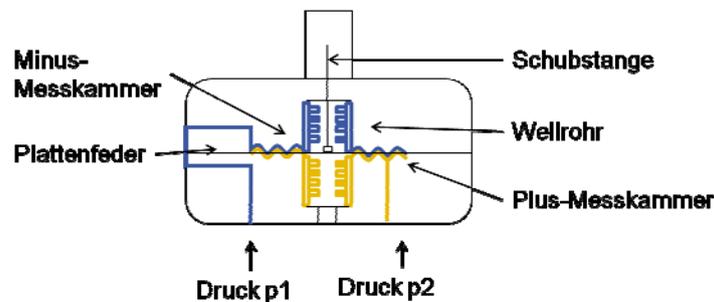


Abbildung 28: Funktion eines Differenzdruckmanometers<sup>84</sup>

Verwendet man hingegen einfache **Druckmanometer** so gibt es zwei Möglichkeiten die Druckdifferenz zu erfassen, zum einen das Zweifache Messen direkt hinter dem Druckluftfilter. Bei diesem Verfahren muss das Filtermedium nach dem ersten Messen (M1) getauscht werden. Dies ermöglicht nach dem zweiten Messen (M2) einen direkten Rückschluss auf die Druckdifferenz (**M2-M1=Druckdifferenz**). Jedoch muss hier unterstellt werden, dass ein älterer Filter (kurz vor dem Austauschen) einen höheren Differenzdruck aufweist als ein neuer Filter. **Problematisch ist bei diesem Verfahren, dass die Messung durch die Messung im neuen bzw. unbenetzten Zustand zu geringeren Differenzdrücken führt.**

<sup>84</sup> Abbildung in Anlehnung an: [http://de-de.wika.de/landingpage\\_differential\\_pressure\\_gauge\\_de\\_de.WIKA](http://de-de.wika.de/landingpage_differential_pressure_gauge_de_de.WIKA)

Zum anderen ist es auch möglich, die **Druckluft vor und hinter dem Druckluftfilter zu messen** (im Idealfall gleichzeitig). Dieser Aufbau sichert den Rückschluss auf den Differenzdruck des Filters, welche nur durch die Filtereinheit und die Verrohrung beeinflusst wird. Da diese Komponenten jedoch konstant sind, sind diese Einflüsse zu vernachlässigen. Stellt man den Aufbau zeitnah nach, nach der Wartung, so hat auch diese Methode das Problem, dass unbenetzte Filter einen geringeren Differenzdruck ausweisen. Je nach Öleintrag und Feuchtigkeit der Druckluft kann das Benetzen unterschiedlich lange dauern (1-2 Stunden bis hin zu über einem Jahr). Wie auch im gesamten Forschungsvorhaben muss der vollbenetzte Druckluftfilter Maßstab für Druckdifferenzvergleiche sein.

Die soeben vorgestellten Verfahren lassen sich äquivalent für Strömungssensoren anpassen, jedoch ist die direkte Druckmessung genauer.

- Identifikation geeigneter Instrumente und Methoden zur indirekten Messung von Emissionen

Laut Antragsidee sah man damals das Potenzial der indirekten Messung des Differenzdrucks durch die **Stromaufnahmemessung des Druckluftkompressors**. Diese Idee konnte im Rahmen des Projekts nicht bestätigt werden. Nur unter gewissen Annahmen sowie dem Einsatz hochpreisiger Messtechnik ist diese Methode zutreffend. Problem hierbei sind die gewaltigen Maßstabsunterschiede. Ein handelsüblicher Kompressor mit 90 kW Leistung erzeugt, 10 bar (Betriebsüberdruck) versucht man nun die Stromaufnahme des Kompressors zu messen, wäre dies sogar möglich, jedoch ist der **Stromverbrauch der dem Differenzdruck** zuzuschreiben ist **zu gering**, dass handelsübliche Strommessgeräte dies nachvollziehbar messen könnten.

Eine Möglichkeit, welche aber unter umweltgesichtspunkten nicht zu empfehlen ist, ist folgende Prüfprozedur (Messung 1 und Messung 2 müssen in kurzen Abständen erfolgen, um vergleichbare Umgebungszustände sicherzustellen: Messung 1 (benutzter Filter vor dem Wechseln): Entleeren des kompletten Druckluftsystems inklusive der Rohleitung und des Druckluftspeichers. Anschließend Messung der Stromaufnahme des Kompressors, sowie Zeitnahme bis das Druckluftsystem auf den eingestellten Druck befüllt wurde. Messung 2 (neuer Austauschfilter): Die komplette Anlage wird, wie bei Messung 1, komplett entleert und anschließend Stromaufnahme und Zeit bis zum Erreichen des eingestellten Drucks gemessen.

Mit Hilfe dieser Methode, ist ein Rückschluss auf den Differenzdruck nachvollziehbar, jedoch wirtschaftlich unrentabel. Die Ergebnisse der beiden Messungen lassen sich vergleichen, sodass anschließend der Stromverbrauch als Differenz beider Messungen dem Druckluftfilter zuzuschreiben ist (andere Parameter sind unverändert). Problem hierbei ist die Umrechnung von kWh in mbar. Dieser Maßstabsunterschied birgt große Abweichungspotenziale, sowie das Problem, dass die Auslastung des Kompressors zur Druckluftbereitstellung nicht linear verläuft (lt. Experten trifft die Annahme in den meisten Bereichen zu, jedoch nicht pauschal).

Die Leckagerate lässt sich mit einer ähnlichen Methode messen, hierfür wird ein vergleichbarer Versuch angestellt. Die Anlage muss hierfür den Betriebsdruck erreicht haben. Alle Verbraucher müssen in dem Zeitraum der Messung ausgeschaltet sein bzw. dürfen nicht benutzt werden.

- Anpassung, Vereinfachung und Praxistest bestehender Messmethoden

Durch Expertengespräche, auch im Rahmen der Validierungsphase (Arbeitspaket 8) konnten die gesammelten Ergebnisse validiert und vereinfacht werden. Es zeigte sich wie schon eingangs erwähnt, dass die indirekte Messmethode nicht zielführend ist und zwar eine gut gemeinte Idee im Antrag war, sich in der Praxis nicht umsetzen lässt.

- Beschreibung von Kalkulationsvorschriften zur CO<sub>2</sub>-Berechnung in den einzelnen Lebenszyklusphasen

Die einzelnen **Lebenszyklusphasen** eines Druckluftfilters umfassen insgesamt **drei Phasen**: **Herstellungsphase**, die **Nutzungsphase** sowie die **Entsorgungsphase**. CO<sub>2</sub>-Emissionen treten in allen drei Phasen auf, wie schon zuvor in Arbeitspaket 4 erwähnt. Die Herstellungsphase ist gekennzeichnet durch den Herstellungsprozess des Filters. Die Nutzungsphase sticht aus dieser Reihe heraus, da hier die meisten Emissionen anfallen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Filter nur indirekt durch den Mehrverbrauch des Kompressors Emissionen erzeugt. Wird z.B. nur Solarstrom verwendet oder sehr wenig Druckluft benötigt, ist die Phase jedoch weniger ausschlaggebend als im hier gezeigten Fall. Die Entsorgungsphase ist gekennzeichnet durch das Recyceln des Druckluftfilters.

Die Herstellungsphase muss alle Wertschöpfungsketten umfassen, denn ein handelsüblicher Filter besteht z.B. aus verschiedenen Kunststoffen, Glasfasern und Metallen. All diese Rohstoffe verursachen nicht nur bei der eigentlichen Produktion des Druckluftfilters Emissionen, sondern haben schon z.B. im Falle des Kunststoffgranulats Emissionen in der Rohstoffgewinnung erzeugt. Diese Emissionen sind durch das Umweltbundesamt, speziell durch die **PROBAS-Umweltdatenbank**<sup>85</sup> einsehbar. Mit Hilfe dieser Daten war es im Rahmen des Forschungsprojekts möglich, einen Emissionswert für Druckluftfilter zu erhalten. Dies ist jedoch aus Anwendersicht nicht möglich, zwar besteht ein freier Zugriff auf die Datenbank, nichtsdestotrotz liegt dem Anwender die genaue Zusammensetzung eines Druckluftfilters nicht vor. Die Recyclingphase basiert auf den gleichen Erkenntnissen wie die Berechnung der Emissionen der Herstellungsphase. Das Gewicht der einzelnen Komponenten wird mit dem Faktor für das Entsorgen dieser Posten multipliziert und anschließend aufsummiert. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, die Tatsache, dass ein Druckluftfilter im Laufe seiner Nutzungsphase mit Kompressorenöl und evtl. anderen chemischen Stoffen (Laugen und Säuren, durch den Feuchtigkeitseintrag bzw. der daraus resultierenden Reaktion) in Kontakt tritt. An für sich stellen diese Stoffe Sondermüll dar, welches aufwendig entsorgt werden müsste. Im Rahmen des Projekts zeigte sich durch Gespräche mit der Praxis, dass in vielen Betrieben diese in über den normalen Restmüll entsorgt werden, nur wenige Unternehmen nehmen diese zurück und führen diese dem Kreislauf zurück. Da die Zusammenstellung der einzelnen Komponenten wie auch schon in der Herstellungsphase dem Anwender nicht zugänglich ist, ist eine Berechnung der Entsorgungsphase aus Anwendersicht nicht möglich.

Die **Nutzungsphase ist die entscheidende Phase**: Wie schon im Forschungsantrag erwähnt ist die Druckdifferenz des Druckluftfilters für die indirekten Emissionen verantwortlich. Je nach Kompressorlaufzeit, Kompressorgüte, Stromzusammensetzung und natürlich Druckdifferenz schwanken die Emissionen dieser Phase erheblich. Beispiel: ein 90KW Kompressor arbeitet in einem Jahr 1.664 Stunden (bei einer Arbeitszeit von 40h pro Woche, 52 Wochen im Jahr, Auslastung 80%).

---

85

Zwei Szenarien: ein guter Filter mit 140mbar und ein schlechter Filter mit 400mbar. Wie aus Tabelle 14: Vergleich Druckluftfilter zu erkennen ist, ist ein guter Filter nicht nur bezogen auf die Gesamtkosten pro Jahr günstiger als ein vergleichbares Pendant mit schlechteren Druckdifferenz, sondern verursacht nur 35% der Emissionen im Vergleich zum schlechteren Druckluftfilter.

Tabelle 14: Vergleich Druckluftfilter

	<b>guter Filter (Δp 140 mbar)</b>	<b>schlechter Filter (Δp 400 mbar)</b>
Investition Filter & Montage	700 €	450 €
Nutzungsphase	419 €	1.198 €
Entsorgung	100 €	100 €
Gesamtkosten pro Jahr	<b>1.219 €</b>	<b>1.748 €</b>
CO <sup>2</sup> -LCA	<b>1614,26 kg CO<sup>2</sup>/Jahr</b>	<b>4568,46 kg CO<sup>2</sup>/Jahr</b>

Die nachfolgenden Diagramme (vgl. Abbildung 29: Lebensphasen eines guten Druckluftfilters (eigene Darstellung) und Abbildung 30: Vor- vs. Nachphase eines guten Druckluftfilters) verdeutlichen den Einfluss der Nutzungsphase auf die Emissionsbetrachtung. Die Herstellungs- sowie Entsorgungsphase sind im weiteren Vorgehen als nicht ausschlaggebend zu erachten, die maßgeblichen Emissionen werden in der Nutzungsphase erzeugt. Natürlich variiert dies enorm von der Auslastung, Kompressor, etc. Die Relation von guten zu schlechten Filtern bleibt jedoch konstant und hängt allein von den jeweiligen Druckdifferenzen ab. In diesem Beispiel ist das Verhältnis: 1:2,8, d.h. die Nutzungsphase wird in allen Fällen um das 2,8-fache größer sein als bei einem guten Druckluftfilter. Wenn der Kompressor einen Betriebsdruck von 7,5 bar erzeugt, verursacht ein Druckluftfilter eine Druckdifferenz um x mbar, dies entspricht  $(x/1000)/7,5 = y \%$  die durch den Druckluftfilter verschwendet werden. In unserem Beispiel umfasst das im Fall des guten Filters 1,8% bzw. 5,4% beim schlechten Filter.

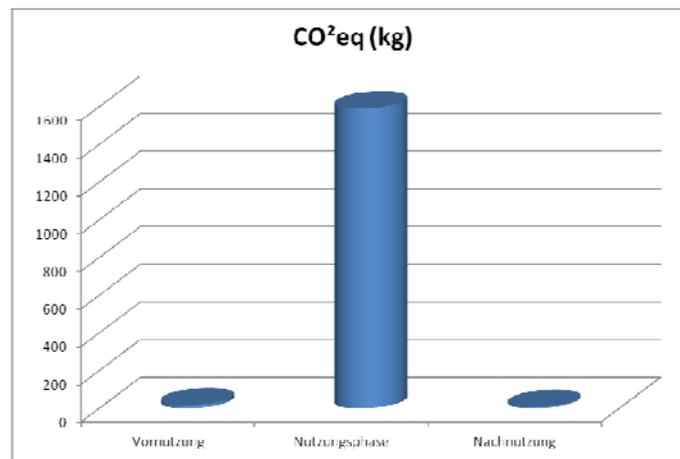


Abbildung 29: Lebensphasen eines guten Druckluftfilters (eigene Darstellung)

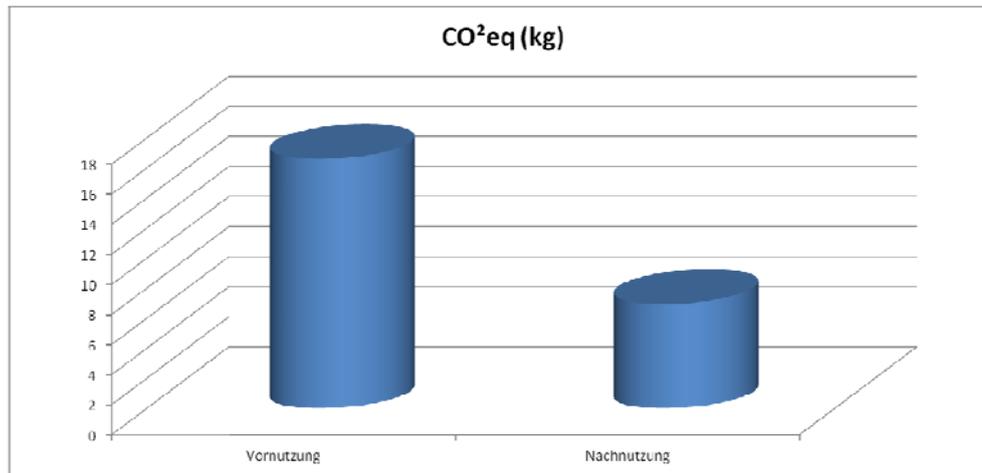


Abbildung 30: Vor- vs. Nachphase eines guten Druckluftfilters (eigene Darstellung)

## 2.5.2 Ergebnis: Excel-Demonstrator zur Kalkulation und Überwachung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kundensicht

### Ergebnis: Excel-Demonstrator zur Kalkulation und Überwachung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kundensicht

Der **Excel-Demonstrator** fasst die vorherigen Ergebnisse zusammen und ergänzt diese durch anschauliche Berechnungen. Eingangs findet der Anwender eine Zusammenstellung der wichtigsten Kalkulationsvorschriften sowie der Vorgehensweise innerhalb des Demonstrators (vgl. Abbildung 31: Erklärungsübersicht (Demonstrator-Screenshot)). Der nachfolgende Reiter befasst sich mit der individuellen Stromzusammenstellung (vgl. Abbildung 32: Strommix (Demonstrator-Screenshot)), dies ist notwendig, da die nachfolgenden Berechnungen auf diesen Ergebnissen aufbauen. Natürlich gibt es für Demonstrationszwecke auch die Möglichkeit Standardwerte einzutragen. Für die nachfolgenden Berechnungen ist die Eingabe der Ausstattung notwendig, denn diese trägt auch einen Beitrag zur Genauigkeit (vgl. Abbildung 33: Bestandsanalyse (Demonstrator-Screenshot)) bei. Der nächste Reiter befasst sich mit der Berechnung des idealen Wechselzeitpunkts aus ökonomischer, wie auch aus ökologischer Sichtweise (vgl. Abbildung 34: Wartungsintervall (Demonstrator-Screenshot)).

Anschließend folgen Tableaus zur direkten und indirekten Messung von Emissionen (siehe Abbildung 35 sowie Abbildung 36).

Start

## Erklärungen

- 1) Energiemix
- 2) Verwendete Infrastruktur
- 3) Wartungsintervall
- 4) direkte Messung
- 5) indirekte Messung
- 6) Auswertung

### Energiemix

Energieart	spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen ohne Vorkette [g/kWh <sub>net</sub> ]	spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen inkl. Vorkette [g/kWh <sub>net</sub> ]	Anteil	CO <sub>2</sub> -Emissionen für geg. Energiemix [g/kWh <sub>net</sub> ]
Steinkohle	894	931*	18%	167,55
Braunkohle	1152	1175*	26%	305,1
Mineralöl	776	859*	4%	34,38
Erdgas	469	518*	10%	51,9
Wasser-Windkraft	0	32*	26%	8,35
Kernenergie	0	11*	16%	1,72
			100%	



Emissionsfaktor [g/kWh <sub>net</sub> ]	669,25
Emissionsfaktor [g/kWh <sub>net</sub> ]	618,2

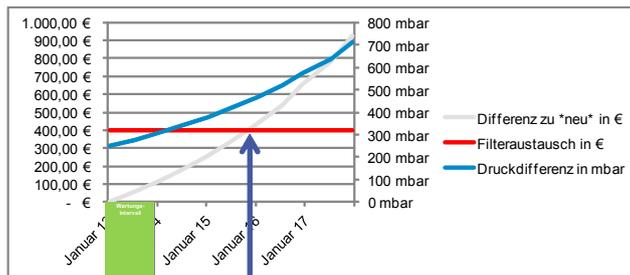
### Verwendete Infrastruktur

#### Ausstattung

<b>Kompressor</b>		<b>Druckbehälter</b>	
KW	90	Fassungsvermögen	1.000 l
Förderleistung [m <sup>3</sup> /s]	270		
<b>Arbeitszustand</b>		<b>Leitungsnetz</b>	
Auslastung	100%	Länge	1.000 m
h/Woche	40	Querschnitt	34 m <sup>2</sup>
57 Arbeitswochen	5	Fassungsvermögen	1.140 m <sup>3</sup>
Arbeitswochen	52		

270	h/s	0,27	m <sup>3</sup> /s	0,03	h/week	0,004	€
16.200	h/year	16,2	m <sup>3</sup> /year	1,5	h/week	0,23	€
972.000	h/year	972	m <sup>3</sup> /year	90	h/week	14	€
7.776.000	h/year	7.776	m <sup>3</sup> /year	720	h/week	108	€
38.880.000	h/year	38.880	m <sup>3</sup> /year	3.600	h/week	540	€
2.021.760.000	h/year	2.021.760	m <sup>3</sup> /year	187.200	h/week	28.080	€

### Wartungsintervall



3 Funktionen abgetragen (siehe Legende), am relevantesten ist der Bezug zum Wartungsintervall und der Schnittpunkt (rot&grau), denn ab diesem Zeitpunkt lohnt sich der Wechsel des Filters.

**Schnittpunkt - Differenz zu "neu" in € mit Filteraustausch in €**, sobald die Horizontale geschnitten wird, ist es für den Anwender kostengünstiger die Wartung (Austausch des Filters) vorzunehmen

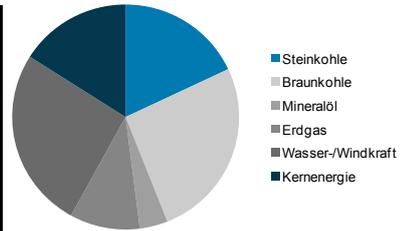
Abbildung 31: Erklärungsübersicht (Demonstrator-Screenshot)



Standardwerte  
weiter

### Strommix

Energieart	spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen ohne Vorkette [g/kWh <sub>netto</sub> ]	spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen inkl. Vorkette [g/kWh <sub>netto</sub> ]	Anteil	CO <sub>2</sub> -Emissionen für geg. Energiemix [g/kWh <sub>netto</sub> ]
Steinkohle	894	931	18%	167,58
Braunkohle	1152	1175	26%	305,5
Mineralöl	776	859	4%	34,36
Erdgas	469	518	10%	51,8
Wasser-/Windkraft	0	32	26%	8,32
Kernenergie	0	11	16%	1,76
100%				



<b>Emissionsfaktor</b> [g/kWh <sub>netto</sub> ]	<b>569,32</b>
---	---------------

Strompreis [€/kWh]	<b>0,15 €</b>
--------------------	---------------

Abbildung 32: Strommix (Demonstrator-Screenshot)



Standardwerte  
weiter

### Ausstattung

#### Kompressor

kW	90
Förderleistung [in l/s]	270

#### Druckbehälter

Fassungsvermögen	1.000 l
------------------	---------

#### Arbeitszustand

Auslastung	100%
h/Woche	40
5/7 Arbeitswoche	5
Arbeitswochen	52

#### Leitungsnetz

Länge	1.000 m
Querschnitt	3/4 "
Fassungsvermögen	1,14 m <sup>3</sup>
	1.140 l

270	l/sec	0,27	m <sup>3</sup> /sec	0,03	kW/sec	0,004 €
16.200	l/min	16,2	m <sup>3</sup> /min	1,5	kW/min	0,23 €
972.000	l/hour	972	m <sup>3</sup> /hour	90	kW/hour	14 €
7.776.000	l/day	7.776	m <sup>3</sup> /day	720	kW/day	108 €
38.880.000	l/week	38.880	m <sup>3</sup> /week	3.600	kW/week	540 €
2.021.760.000	l/year	2.021.760	m <sup>3</sup> /year	187.200	kW/year	28.080 €

Abbildung 33: Bestandsanalyse (Demonstrator-Screenshot)

Standardwerte	weiter
---------------	--------



**Kompressor**  
Leistung 90 kW  
Förderleistung [in l/s] 270 l/s  
Betriebsdruck 7 bar  
Preis (Strom) 0,15 €

**Arbeitszustand**  
Auslastung 100%  
h/Woche 40 h/Woche  
5/7 Arbeitswoche 5  
Arbeitswochen 52

**Filtereinheit**  
Einbau des Filters 01.01.2013  
Wartungsintervall 1 Jahr  
Δp (Neuzustand) 250  
Filterverschleißfaktor 3

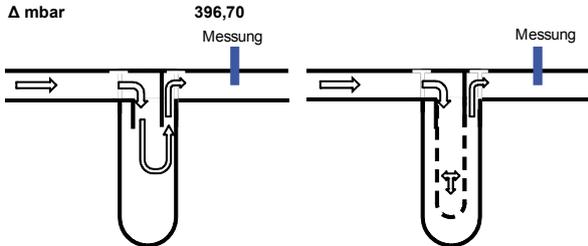
**Kosten - Filter**  
Neupreis/Wartung 400,00 €

**Verschleißfaktor**  
Vorfilter  
Feinfilter X

	Januar 13	Januar 14	Januar 15	Januar 16	Januar 17	Januar 18	Januar 19	Januar 20	Januar 21	Januar 22	Januar 23	Januar 24	Januar 25	Januar 26	Januar 27	Januar 28	Januar 29	Januar 30	Januar 31	Januar 32	Januar 33	Januar 34	Januar 35	Januar 36	Januar 37	Januar 38	Januar 39	Januar 40	Januar 41	Januar 42	Januar 43	Januar 44	Januar 45	Januar 46	Januar 47	Januar 48	Januar 49	Januar 50	Januar 51	Januar 52	Januar 53	Januar 54	Januar 55	Januar 56	Januar 57	Januar 58	Januar 59	Januar 60	Januar 61	Januar 62	Januar 63	Januar 64	Januar 65	Januar 66	Januar 67	Januar 68	Januar 69	Januar 70	Januar 71	Januar 72	Januar 73	Januar 74	Januar 75	Januar 76	Januar 77	Januar 78	Januar 79	Januar 80	Januar 81	Januar 82	Januar 83	Januar 84	Januar 85	Januar 86	Januar 87	Januar 88	Januar 89	Januar 90	Januar 91	Januar 92	Januar 93	Januar 94	Januar 95	Januar 96	Januar 97	Januar 98	Januar 99	Januar 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Druckdifferenz in mbar	250,00	308,06	341,96	379,60	421,37	467,75	519,23	576,37	639,81	710,22	781,84	854,61	923,08	997,16	1076,85	1162,16	1253,09	1349,64	1451,81	1559,60	1673,01	1792,04	1916,70	2047,00	2182,93	2324,50	2471,71	2624,56	2783,05	2947,18	3116,95	3292,36	3473,41	3660,10	3852,53	4050,70	4254,61	4464,26	4679,65	4900,78	5127,65	5360,26	5608,61	5872,70	6152,53	6448,10	6759,51	7086,76	7429,85	7788,78	8153,55	8534,16	8930,61	9342,90	9770,03	10212,00	10668,91	11140,76	11627,55	12129,28	12645,95	13177,56	13724,11	14285,70	14862,33	15454,00	16060,71	16682,46	17319,25	17971,08	18637,95	19319,86	20016,81	20728,80	21455,83	22197,90	22955,01	23727,16	24514,35	25316,58	26133,85	26966,16	27813,51	28675,90	29553,33	30445,80	31353,31	32275,86	33213,45	34166,08	35133,75	36116,46	37114,21	38127,00	39154,83	40197,70	41255,61	42328,56	43416,55	44519,58	45637,65	46770,76	47918,91	49082,10	50260,43	51453,90	52662,51	53886,26	55125,15	56379,18	57648,35	58932,66	60232,11	61546,70	62876,43	64221,30	65581,31	66956,46	68346,75	69752,18	71172,75	72608,46	74059,31	75525,30	77006,43	78502,70	80014,11	81540,66	83082,35	84639,18	86211,15	87798,26	89400,51	91017,90	92650,43	94298,10	95960,91	97638,86	99331,95	101040,18	102763,55	104502,06	106255,71	108024,50	109808,43	111607,50	113421,71	115251,06	117095,55	118955,18	120829,95	122719,86	124624,91	126545,10	128480,53	130431,20	132397,11	134378,26	136374,65	138386,28	140413,15	142455,26	144512,61	146585,20	148273,03	150076,10	151894,51	153728,26	155577,35	157441,78	159321,55	161216,66	163127,11	165052,90	166994,13	168950,80	170922,91	172910,46	174913,55	176932,18	178966,35	181016,06	183081,31	185162,10	187258,43	189370,30	191497,71	193640,66	195799,15	197973,18	200162,75	202367,86	204588,51	206824,70	209076,43	211343,70	213626,51	215924,86	218238,75	220568,18	222913,15	225273,66	227649,71	230041,30	232448,43	234871,10	237309,41	239763,36	242232,95	244718,18	247219,05	249735,56	252267,71	254815,50	257378,93	260058,00	262752,71	265463,06	268189,05	270930,68	273687,95	276460,86	279249,41	282053,60	284873,43	287708,90	290560,11	293427,06	296309,75	299208,18	302122,35	305052,26	307997,91	310959,30	313936,43	316929,30	319937,91	322962,26	326002,35	329058,18	332129,75	335217,06	338320,11	341438,90	344573,43	347723,70	350889,71	354071,46	357268,95	360482,18	363711,15	366955,86	370216,31	373492,50	376784,43	380092,10	383415,51	386754,66	390109,55	393480,18	396866,55	400268,66	403686,51	407120,10	410569,43	414034,50	417515,31	421011,86	424524,15	428052,18	431595,95	435155,46	438730,71	442321,70	445928,43	449550,90	453189,11	456843,06	460512,75	464198,18	467899,35	471616,26	475348,91	479097,30	482861,43	486641,30	490436,91	494248,26	498075,35	501918,18	505776,75	509651,16	513541,31	517447,20	521368,83	525306,20	529259,31	533228,16	537212,75	541213,18	545229,35	549261,26	553308,91	557372,30	561451,43	565546,30	569656,91	573783,26	577925,35	582083,18	586256,75	590446,16	594651,31	598872,20	603108,91	607361,43	611629,75	615913,88	620213,73	624529,30	628860,61	633207,66	637570,45	641948,98	646342,25	650751,26	655176,01	659616,50	664072,73	668544,70	673032,41	677535,86	682055,05	686589,98	691140,65	695707,06	700289,21	704887,10	709499,73	714128,10	718772,11	723431,76	728107,05	732798,00	737504,61	742226,88	746964,81	751718,40	756487,65	761272,56	766073,13	770889,36	775721,25	780568,80	785431,91	790310,58	795204,81	800114,60	805039,95	810080,86	815137,33	820209,36	825296,95	830399,10	835516,81	840649,08	845795,91	850957,30	856133,25	861323,76	866528,83	871748,46	876982,65	882231,40	887494,71	892772,58	898064,91	903371,70	908692,95	914028,66	919378,83	924843,46	930322,55	935816,10	941324,11	946846,58	952383,50	957934,87	963500,70	969081,00	974675,77	980284,91	985908,42	991546,30	997198,55	1002965,18	1008846,19	1014741,50	1020651,11	1026575,02	1032513,13	1038465,44	1044431,95	1050412,66	1056407,47	1062416,28	1068439,09	1074475,80	1080526,41	1086590,92	1092669,33	1098761,64	1104867,85	1110987,96	1117121,97	1123269,88	1129431,69	1135607,30	1141796,71	1147999,92	1154217,03	1160448,04	1166692,95	1172951,76	1179224,47	1185511,08	1191811,49	1198125,70	1204453,81	1210795,82	1217151,83	1223521,84	1229905,85	1236303,86	1242715,87	1249141,88	1255581,89	1262035,90	1268503,91	1274985,92	1281481,93	1287991,94	1294515,95	1301053,96	1307605,97	1314171,98	1320751,99	1327345,00	1333952,01	1340573,02	1347208,03	1353857,04	1360520,05	1367197,06	1373888,07	1380593,08	1387312,09	1394045,10	1400792,11	1407553,12	1414328,13	1421117,14	1427920,15	1434737,16	1441568,17	1448413,18	1455272,19	1462145,20	1469032,21	1475933,22	1482848,23	1489777,24	1496720,25	1503677,26	1510648,27	1517633,28	1524632,29	1531645,30	1538672,31	1545713,32	1552768,33	1559837,34	1566920,35	1574017,36	1581128,37	1588253,38	1595392,39	1602545,40	1609712,41	1616893,42	1624088,43	1631297,44	1638520,45	1645757,46	1653008,47	1660273,48	1667552,49	1674845,50	1682153,51	1689475,52	1696811,53	1704161,54	1711525,55	1718903,56	1726295,57	1733701,58	1741121,59	1748555,60	1756003,61	1763465,62	1770941,63	1778431,64	1785935,65	1793453,66	1800985,67	1808531,68	1816091,69	1823665,70	1831253,71	1838855,72	1846471,73	1854101,74	1861745,75	1869403,76	1877075,77	1884761,78	1892461,79	1900175,80	1907903,81	1915645,82	1923401,83	1931171,84	1938955,85	1946753,86	1954565,87	1962391,88	1970231,89	1978085,90	1985953,91	1993835,92	2001731,93	2009641,94	2017565,95	2025503,96	2033455,97	2041421,98	2049401,99	2057395,00	2065403,01	2073425,02	2081461,03	2089511,04	2097575,05	2105653,06	2113745,07	2121851,08	2129971,09	2138105,10	2146253,11	2154415,12	2162591,13	2170781,14	2178985,15	2187203,16	2195435,17	2203681,18	2211941,19	2220215,20	2228503,21	2236805,22	2245121,23	2253451,24	2261795,25	2270153,26	2278525,27	2286911,28	2295311,29	2303725,30	2312153,31	2320595,32	2329051,33	2337521,34	2346005,35	2354503,36	2363015,37	2371541,38	2380081,39	2388635,40	2397203,41	2405785,42	2414381,43	2422991,44	2431615,45	2440253,46	2448905,47	2457571,48	2466251,49	2474945,50	2483653,51	2492375,52	2501111,53	2509861,54	2518625,55	2527403,56	2536195,57	2545001,58	2553821,59	2562655,60	2571503,61	2580365,62	2589241,63	2598131,64	2607035,65	2615953,66	2624885,67	2633831,68	2642791,69	2651765,70	2660753,71	2669755,72	2678771,73	2687801,74	2696845,75	2705903,76	2714975,77	2724061,78	2733161,79	2742275,80	2751403,81	2760545,82	2769701,83	2778871,84	2788055,85	2797253,86	2806465,87	2815691,88	2824931,89	2834185,90	2843453,91	2852735,92	2862031,93	2871341,94	2880665,95	2889993,96	2899335,97	2908691,98	2918061,99	2927445,00	2936843,01	2946255,02	2955681,03	2965121,04	2974575,05	2984043,06	2993525,07	3003021,08	3012531,09	3022055,10	3031593,11	3041145,12	3050711,13	3060291,14	3069885,15	3079493,16	3089115,17	3098751,18	3108401,19	3118065,20	3127743,21	3137435,22	3147141,23	3156861,24	3166595,25	3176343,26	3186105,27	3195881,28	3205671,29	3215475,30	3225293,31	3235125,32	3244971,33	3254831,34	3264705,35	3274593,36	3284495,37	3294411,38	3304341,39	3314285,40	3324243,41	3334215,42	3344201,43	3354201,44	3364215,45	3374243,46	3384285,47	3394341,48	3404411,49	3414495,50	3424593,51	3434705,52	3444831,53	3454971,54	3465125,55	3475293,56	3485

Vergleichsmessungen im Zeitablauf

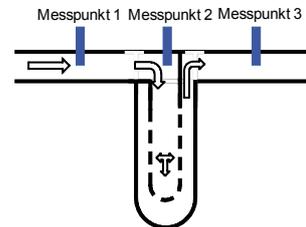
Datum	Messung mit Filter	Messung ohne Filter
01.06.2014	6,50	6,60
01.01.2015	6,70	7,00
01.02.2015	6,20	6,90
01.03.2015	6,10	6,90
Durchschnitt	6,58	6,98



Strömungsmessungen im Zeitablauf

Datum	M1	M2	M3
01.06.2014	6,50	6,60	5,00
01.01.2015	6,70	7,00	7,00
01.02.2015	6,20	6,90	6,90
01.03.2015	6,10	6,90	6,90
Durchschnitt	6,58	6,98	6,98

Δ M1-M2 -396,70 mbar  
Δ M2-M3 0,00 mbar  
Δ M1-M3 -396,70 mbar



Datum	M1	M2	M3
01.06.2014	6,50	6,60	6,60
01.01.2015	6,70	7,00	7,00
01.02.2015	6,20	6,90	6,90
01.03.2015	6,10	6,90	6,90
Durchschnitt	6,58	6,98	6,98

Δ M1-M2 -396,70 mbar  
Δ M2-M3 0,00 mbar  
Δ M1-M3 -396,70 mbar

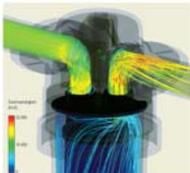
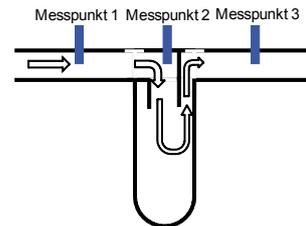


Abbildung 35: Vergleichsmessungen im Zeitablauf (Demonstrator-Screenshot)



Standardwerte
weiter

### Behältermessung

Leckageverlust	2140,09 l/min
Druckbehälterinhalt	2.140 l
Behälteranfangsdruck (Beginn der Zeitmessung)	7 bar
Behälterdruck (Ende der Zeitmessung)	6 bar
Messzeit	1,00 min

### Filtermessung - Stromaufnahme des Kompressors

#### Gebrauchter Filter

	Datum	Zählerstand	Auslastung	absolut (normiert)
Einbau Filter	01.01.2014	14000		
1. Messung	01.04.2014	17000	80%	41,67
2. Messung	01.07.2014	19000	50%	43,96
3. Messung	01.10.2014	24000	80%	67,93
4. Messung	01.01.2015	30000	90%	72,46
			90%	

#### Filterwechsel

	Datum	Zählerstand	Auslastung	absolut (normiert)
Einbau Filter	02.01.2015	30150		
1. Messung	01.04.2015	32000	90%	23,10
2. Messung	01.07.2015	34000	80%	27,47
3. Messung	01.08.2015	35000	70%	46,08
4. Messung	01.09.2015	36000	70%	46,08

Abbildung 36: Behälterdruckmessung (Demonstrator-Screenshot)

### 2.5.3 Benötigte und eingesetzte Ressourcen

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses APs durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstelle IPRI wurden dafür 6 Personenmonate und von der Forschungsstelle IUTA 1,9 HPA A aufgewendet.

### 2.6 Arbeitspaket 6: Emissionsorientierte Erweiterung „traditioneller“ Planungs- und Investitionskalküle

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses Arbeitspakets:

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Excel-Demonstrator zur erweiterten Investitionsrechnung für die Entsorgungsphase	Leitfaden zu ökologieorientierten Investitionsentscheidungen Excel-Demonstrator zur erweiterten Investitionsrechnung für die Entsorgungsphase

Die nachfolgenden Arbeitspakete dienen rein zur Unterstützung des Kunden (Filteranwenders). In Arbeitspaket 6 wurden wirtschaftliche und ökologische Planungs- und Investitionskalküle entwickelt, welche u.a. der Entscheidungsunterstützung bei Ersatzinvestitionen oder Lebenszyklusverlängerungen genutzt werden können.

## 2.6.1 Ergebnis: Leitfaden zu ökologieorientierten Investitionsentscheidungen

Das sechste Arbeitspaket beschäftigt sich mit der emissionsorientierten Erweiterung „traditioneller“ Planungs- und Investitionskalküle. Hierfür wurde nicht nur ein Excel-Demonstrator zur erweiterten Investitionsrechnung für die Entsorgungsphase entwickelt, sondern zudem ein Leitfaden zur Investitionsrechnung erstellt.

### • Identifikation vorhandener Ansätze ökologieorientierter Planungs- und Investitionskalküle

Es gibt keine einheitliche Definition des Investitionsbegriffs, da dieser Begriff in einer Vielzahl von wirtschaftlichen Disziplinen gebraucht wird. In der Regel werden Investitionen im finanzwirtschaftlichen Kontext verwendet, welcher sich u.a. durch Zahlungsströme charakterisiert. Diese Ströme sind charakterisiert durch eine Auszahlung am Anfang sowie Einzahlungen über die Projektzeit.<sup>86</sup> Aus finanzwirtschaftlicher Sicht ist diese Definition richtig, jedoch ist sie im Kontext mit ökologischen Aspekten schwer zu argumentieren. Da hier eine zusätzliche Zielgröße „Umweltaspekt / ökologischer Nutzen“ eingeführt wird. Hier spricht man nicht zwangsläufig von Ein- und Auszahlungen. Demzufolge ist im Falle eines ökologieorientierten Investitionsmanagements ein erweiterter Investitionsbegriff zu verwenden: „Investition ist der zukunftsorientierte Einsatz finanzieller Mittel für Güter, die zur Erfüllung bestimmter Ziele längerfristig genutzt werden sollen. Folglich ist eine Investition eine zielgerichtete Bindung von Kapital“.<sup>87</sup>

Demzufolge besteht eine Investition zwar aus Ein- und Auszahlungen, jedoch ist deren Erfolg nicht nur von dieser Zielgröße abhängig.

Die Investitionsarten können auch durch die Unterteilung in strategische und operative Investitionen unterschieden werden. Maßgeblich für diese Einteilung ist die Bedeutung für das Unternehmen. Zu den strategischen Investitionen zählen typischerweise<sup>88</sup>:

- Neue/verbesserte Produkte, Produktionsverfahren oder Prozesse
- neue Märkte, Vertriebswege und Standorte
- umfangreiche Reorganisationen
- strategisch bedingte Beteiligungen.

Diese Kriterien können als eine Art „Grundsatzentscheidung zur Entwicklung oder Anpassung langfristiger Erfolgspotentiale“ angesehen werden.<sup>89</sup> Diese Entscheidung ist von der Unternehmensführung zu treffen. Operative Investitionen (z. B.: kleinere Ersatz-, Erweiterungs- und Rationalisierungsinvestitionen) sind im Vergleich weniger komplex und verursachen zudem in der Planung weniger Aufwand. Diese Entscheidungen werden aufgrund ihrer geringeren Reichweite auf Bereichsebene getroffen.<sup>90</sup>

Diese Unterscheidung in strategische und operative Investitionen kann im ökologischen Kontext dazu führen, dass Ziele (strategisch bzw. operativ) messbar sind und weitere Kriterien daraus ableitbar sind.

<sup>86</sup> Vgl. Schneider 1992, S. 136

<sup>87</sup> Ter Horst 2009, S. 10

<sup>88</sup> Vgl. ter Horst 2009, S. 11

<sup>89</sup> Ebd.

<sup>90</sup> Vgl. ter Horst, S. 11

Der zeitliche Ablauf der Investitionstätigkeit wird durch den Investitionsprozess beschrieben. Hierzu hat sich ein 3-Phasenmodell etabliert (Abbildung 37):

- Planungsphase
- Realisationsphase
- Kontrollphase.

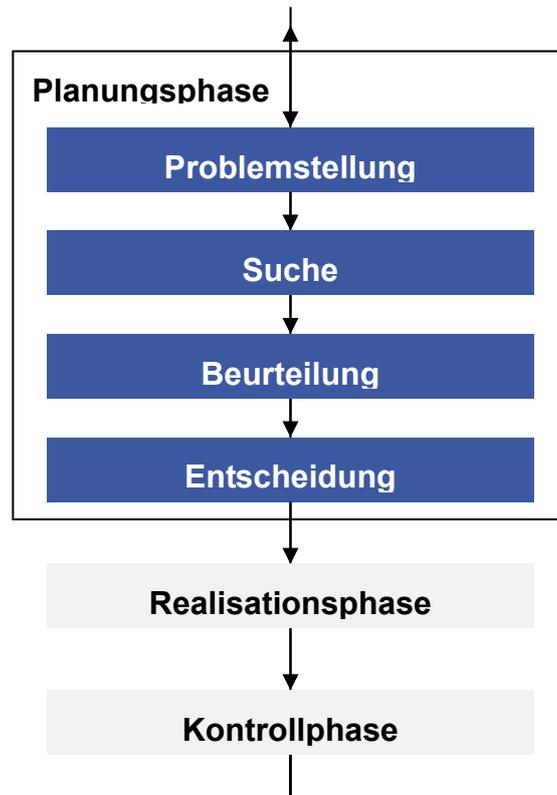


Abbildung 37: Phasen eines Investitionsprozesses (eigene Darstellung nach Kruschwitz 2011, S. 8)

Zuerst erfolgt die Planungsphase (Investitionsanregung), hier entsteht der Impuls eine Investition durchzuführen.<sup>91</sup> Diese Phase baut auf den Erkenntnissen, Analyse der Ausgangssituation, Problemerkennung sowie dem Investitionsziel auf.<sup>92</sup> Anschließend müssen konkrete Handlungsmöglichkeiten entwickelt werden.<sup>93</sup> In der Regel erstreckt sich diese Zielbildung über die gesamte Planungsphase, hierzu wird ein Optionenraum für die Ideen der Investitionen gesucht (vgl. Abbildung 37). Zuvor festgelegte allgemeine Ziele können nun konkretisiert und angepasst werden.<sup>94</sup> Die Auswahl der Investitionsziele bestimmt maßgeblich die nachfolgenden Prozesse. Im eigentlichen Investitionsbewertungsprozess bilden sie die Ausgangslage für die Bewertungskriterien. Um ökologische Aspekte in die Investitionsentscheidung einzubinden ist die Integration von eben diesen in die Festlegung ökologieorientierter Investitionsziele notwendig. In vielen Fällen haben die Mitarbeiter die Möglichkeit auf operative Ebene partizipativ innerhalb eines Ideenmanagements Optimierungen einzubringen. Hier ist zudem ein Ansatzpunkt für ökologische Verbesserungsmöglichkeiten und Integration die-

<sup>91</sup> Vgl. ter Horst 2009, S. 20

<sup>92</sup> Vgl. Kruschwitz 2011, S. 7

<sup>93</sup> Vgl. ebd.

<sup>94</sup> Vgl. ebd., S. 20

ser in die Investitionsziele. Dieses Vorgehen bzw. Erweiterung setzt jedoch eine umweltorientierte Unternehmenskultur, sowie für ökologische Themen sensibilisierte Mitarbeiter voraus. Hierzu fallen in der Planungsphase des Investitionsprozesses zwei zentrale Aufgaben an:

- Anregungsphase: Einbezug ökologischer Aspekte in die Untersuchung der Ausgangssituation
- Beurteilung: Einbezug ökonomischer und ökologischer Zielgrößen

Im nächsten Schritt erfolgt die Beurteilungs- und Entscheidungsphase, hierzu werden Investitionsalternativen auf Basis der definierten Ziele bewertet und darauf aufbauend die Investitionsentscheidung gefällt.<sup>95</sup>

Anschließend folgt die Realisierungsphase, hier finden die eigentliche Projektplanung und nachfolgend die Durchführung des Investitionsvorhabens statt.<sup>96</sup> Jede Planung benötigt auch eine Kontrollphase, diese kann parallel zur Durchführung oder aber auch als Schlusskontrolle erfolgen. Ziel ist es die Abweichung von Planwerten mittels Ergebniskontrollen sowie Abweichungsanalysen zu erfassen. Während der Laufzeit des Projekts wird hierdurch frühzeitig erkannt ob zusätzliche Maßnahmen zu Erreichung des Ziels notwendig sind.<sup>97</sup>

Jedes Unternehmen muss unternehmensspezifisch die Investitionsbewertungsverfahren auswählen, dies ist notwendig, da die individuellen Zielgrößen des Unternehmens nicht allgemein in Verfahren wiedergespiegelt werden können. Die Eignung der jeweiligen Verfahren wird durch das Unternehmen selbst bestimmt. Die Bewertungsverfahren werden hinsichtlich der Eignung für ein Unternehmen und dessen Ziele beurteilt, welche zuvor festgelegt worden sind. Diese sind nun die Basis für die notwendigen Rahmenbedingungen.

Die in diesem Arbeitspaket vorgestellten Bewertungsverfahren für die Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Investitionen sind absoluter und relativer Natur. Nachfolgend wird auf die unterschiedlichen Anforderungskriterien, diese orientieren sich neben wissenschaftlichen Gütekriterien auch an klassische Anforderungen von Kennzahlen und Kennzahlensystemen.<sup>98</sup> Nachfolgend werden die Bewertungskriterien und deren Anforderungen vorgestellt (vgl. Tabelle 15).

---

<sup>95</sup> Vgl. ebd., S. 7 f.

<sup>96</sup> Vgl. Götze 2014, S. 15

<sup>97</sup> Vgl. ter Horst 2009, S. 20, vgl. auch Kruschwitz 2011, S. 8

<sup>98</sup> Vgl. Preißler 2008, S. 23 f.

Tabelle 15: Bewertungskriterien

Anforderung	Bewertungskriterium
Zuverlässigkeit	Wissenschaftliche Gütekriterien <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Validität</li> <li>○ Reliabilität</li> <li>○ Objektivität</li> </ul> Genauigkeit
Aktualität	Aktualität der Datengrundlage Einbezug von Zukunftsprognosen Anpassungsfähigkeit
Effektivität	Ökonomischer Nutzen Ökologischer Nutzen
Legitimität	Akzeptanz bei internen und externen Stakeholdern des Unternehmens
Wirtschaftlichkeit	Ressourcenaufwand Ökonomische Effizienz

Nachfolgend werden quantitative Bewertungsverfahren für Investitionen vorgestellt. Für allgemeine Investitionsbewertungsverfahren wird auf Standardliteratur verwiesen, im Anschluss werden nur Verfahren unter Berücksichtigung ökologischer Kriterien berücksichtigt. Mit Hilfe der folgenden Kriterien werden die Verfahren beurteilt.

- Ökologieorientierte Erweiterung klassischer Investitionsrechnungsverfahren
- Verfahren zur Bestimmung der Umweltauswirkung einer Investition
- Verfahren zur Bewertung der ökologischen Effizienz.

Es findet eine ökologieorientierte Erweiterung klassischer Investitionsrechnungsverfahren statt, die ökologische Aspekte als monetäre Größe in der Bewertung beachtet. Ziel ist es alle relevanten Umweltbeeinflussungen einer Investition zu erfassen und als eine aggregierte Größe in die Bewertung einfließen zu lassen.

Zunächst wird die ökologische Nettowirkung sowie die Öko-Effizienz von Investitionen bestimmt, welche als Maß für die Bestimmung der Umweltauswirkung gesehen werden können. Hierzu wird die ökologische Nettowirkung mittels Kennzahlen über die absolute Umweltentlastung einer Investition in Relation zur verursachten Umweltbelastung (bei Investitionsumsetzung) herangezogen. Die Öko-Effizienz setzt die Umweltauswirkung bzw. Umweltleistung ins Verhältnis zur ökonomischen Größe

Dynamische Investitionsrechnungsverfahren beziehen alle relevanten Zahlungsströme in die Bewertung mit ein.<sup>99</sup> Möchte man hingegen nun die ökologischen Aspekte berücksichtigen, erweitert dies nun die Datengrundlage, die zu einer besseren Entscheidungsgrundlage beiträgt.

Nachfolgend ist eine Auswahl dynamischer Investitionsrechnungsverfahren aufgeführt (für Detailinformationen wird auf das Praxispaper sowie auf den Leitfaden verwiesen):

- Kapitalwertmethode
- Interne-Zinsfuß-Methode
- Annuitätenmethode
- Dynamische Amortisationsrechnung.

## 2.6.2 Ergebnis: Excel-Demonstrator zur erweiterten Investitionsrechnung für die Entsorgungsphase

- Übertragung der Planungs- und Investitionskalküle in einen Excel-Demonstrator

Die Ergebnisse wurden in einen Excel-Demonstrator überführt, mit dessen Hilfe ist der Anwender in der Lage die Investitionsentscheidungen in der Entsorgungsphase zu berechnen. Die Entsorgungsphase ist gekennzeichnet, durch folgende Tatbestände: Das Wartungsintervall von i.d.R. einem Jahr wurde erreicht, hierbei muss aus ökologischer Sicht unterstellt werden, dass der Filter nach dem einen Jahr sich mit Verunreinigungen zugesetzt hat. Durch Expertengespräche wurde vielfach bestätigt, dass die Praxis dieses Intervall entweder stur einhält und somit sich den Herstellervorgaben beugt oder im schlimmsten Fall das Wartungsintervall extrem verlängert, teilweise um das 5-10 fache des vorgeschriebenen Intervalls. Jedoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass nicht jeder Filterwechsel notwendig ist und dies im Einzelfall entschieden werden muss. Manche Filter direkt am Kompressor können schon nach wenigen Wochen verbraucht sein, andere Filter am Verbraucher hingegen erst nach vielen Jahren, je nach Schmutz- und Öleintrag in der Druckluft.

Aus den Ergebnissen der Literaturanalyse lassen sich folgende Anforderungen ableiten, die von der Excel-Anwendung erfüllt werden müssen:

- Darstellung der absoluten ökonomischen und ökologischen Kennzahlen (ökonomische und ökologische Effektivität)
- Öko-Effizienz und Ökologische Amortisationsdauer als relative Kennzahlen zum Abgleich mit strategischen Zielen
- Übersicht über alle Investitionsalternativen und Portfolioanalyse zur vergleichenden Beurteilung mehrerer Investitionsalternativen.

Da die Ermittlung des Kapitalwerts einer Investition in den meisten Unternehmen schon in den Controllingssystemen implementiert ist und die Erfassung der aggregierten Umweltleistung der Investition zu unternehmensspezifisch ausgeprägt ist, werden diese Größen in der Excel-Anwendung nicht berechnet, sondern gehen als Eingabewerte in die Berechnung ein. Die Daten, die zur Bewertung einer Investition benötigt werden, sind deshalb:

---

<sup>99</sup> Vgl. Wicke 1992, S. 274

- Kapitalwert der Investition
- Aggregierte Umweltleistung der Investition
  - Umweltleistung durch die Investitionsmaßnahme
  - Umweltleistung während der Nutzungsdauer
  - Umweltleistung der bestehenden Lösung (falls vorhanden)
  - Nutzungsdauer

Die Umweltleistung muss für die Berechnung der ökologischen Amortisations-dauer in die Belastung zur Herstellung der Maßnahme und Umweltleistung pro Periode getrennt werden. Außerdem müssen Informationen der bisherigen Belastung vorhanden sein, um die positive ökologische Nettowirkung zu ermitteln (vgl. Abbildung 38: Dateneingabefeld (eigene Darstellung)).

### Investitionsrechnung - Eingabemaske

Unter Umweltleistung (UL) werden die zu einer einzelnen Größe aggregierten Umweltbeeinflussung während des gesamten Lebenszyklus verstanden. „UL durch Investition“ bezeichnet. Alle Umweltbelastungen, die zur Realisierung der Investition notwendig sind (z.B. Herstellung einer Maschine). „UL pro Periode“ bezeichnet alle Umweltbelastungen, die während der Nutzungsdauer Anfallen (inkl. Entsorgungsphase). „Öko-Effizienz“ ist das Verhältnis aus Kapitalwert und Umweltleistung.

Nur auszufüllen, wenn Referenzwerte existieren. Die „Ökologische Amortisationsdauer“ ist die Zeit, die benötigt wird, um die Umweltbelastung durch die Investition zu kompensieren. Also:  $UL \text{ durch Investition} / \text{Entlastung pro Periode}$

Filterqualität sehr gut (150 mbar)	
Nutzungsdauer	2
Kapitalwert	4.000,00 €
normiert	1,00
Umweltleistung	
UL durch Investition	100
UL pro Periode	20
<b>UL gesamt</b>	<b>140</b>
normiert	0,583333333
<b>Öko-Effizienz</b>	<b>28,57</b>
Ökologische Amortisationsdauer	
UL pro Periode (bisher)	80
Entlastung pro Periode	60
<b>Dauer in Perioden</b>	<b>1,67</b>

Abbildung 38: Dateneingabefeld (eigene Darstellung)

Um qualitative Aspekte der Investitionen nicht zu vernachlässigen, werden zusätzlich Nutzwerte abgefragt und zu einem einzelnen Nutzwert aggregiert. Als Ausgabe liefert die Excel-Anwendung deshalb in erster Linie drei Werte (Abbildung 12):

- Nutzwert
- Öko-Effizienz
- Ökologische Amortisationsdauer.

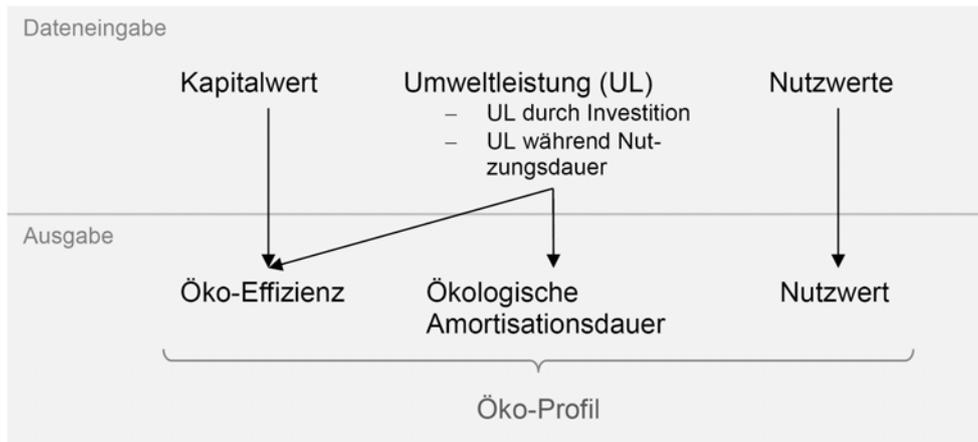


Abbildung 39: Ein- und Ausgabewerte der Excel-Anwendung (eigene Darstellung)

Diese werden folgendermaßen berechnet:

$$\text{Ökologische Amortisationsdauer} = \frac{\text{Umweltbelastung durch die Maßnahme}}{\text{Entlastung pro Periode}}$$

$$\text{Öko-Effizienz} = \frac{\text{Kapitalwert}}{\text{Umweltleistung}}$$

$$\text{Nutzwert} = \sum_{i=1}^{10} \text{Nutzwert}_i * \text{Gewichtungsfaktor}_i * 10$$

Die Ermittlung des Nutzwertes kann anhand von bis zu 10 Kriterien erfolgen. Die Gewichtungsfaktoren entsprechen der prozentualen Gewichtung des Kriteriums (insgesamt: 100%). Für die Werte der einzelnen Kriterien können Punkte von 0 bis 10 vergeben werden. Durch die Multiplikationen der gewichteten Werte mit 10 liegt der resultierende Nutzwert zwischen 0 (schlechtester Wert) und 100 (bester Wert). Die Einzelauswertung für eine Investition besteht also aus den absoluten Kennzahlen (Kapitalwert, Umweltleistung, Nutzwert) und den relativen Kennzahlen (Öko-Effizienz, Ökologische Amortisationsdauer). Die Nutzwerte sind einzeln aufgeführt und grafisch dargestellt. Aus den absoluten Kennzahlen wird ein Profil mittels Netzdiagramm erstellt, um die charakteristischen Ausprägungen hinsichtlich der drei Zielgrößen (ökonomisch, ökologisch, qualitativ) darzustellen (Abbildung 40: Ökologisches Profil einer Investition (eigene Darstellung)).

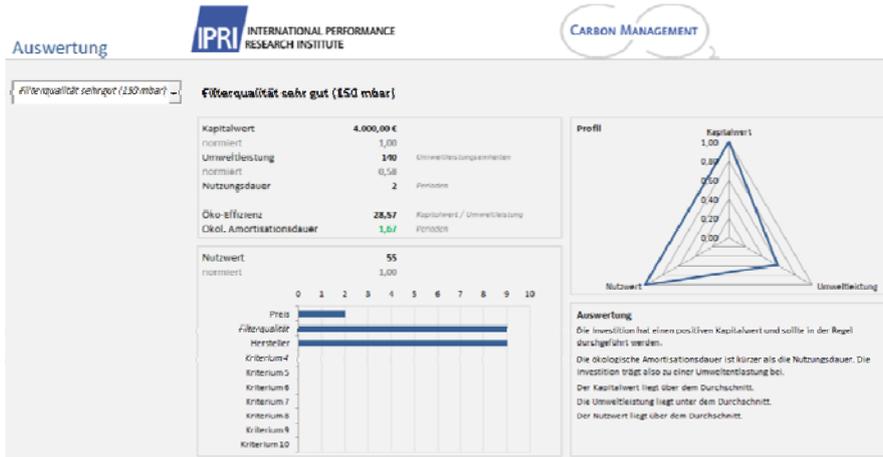


Abbildung 40: Ökologisches Profil einer Investition (eigene Darstellung)

Die Werte mehrerer Investitionen werden zusätzlich in einer vergleichenden Ansicht dargestellt und mittels bedingter Formatierung farblich unterschieden (grün: bester Wert, gelb: schlechtester Wert) (Abbildung 41: Übersicht über die bewerteten Investitionen (eigene Darstellung)).

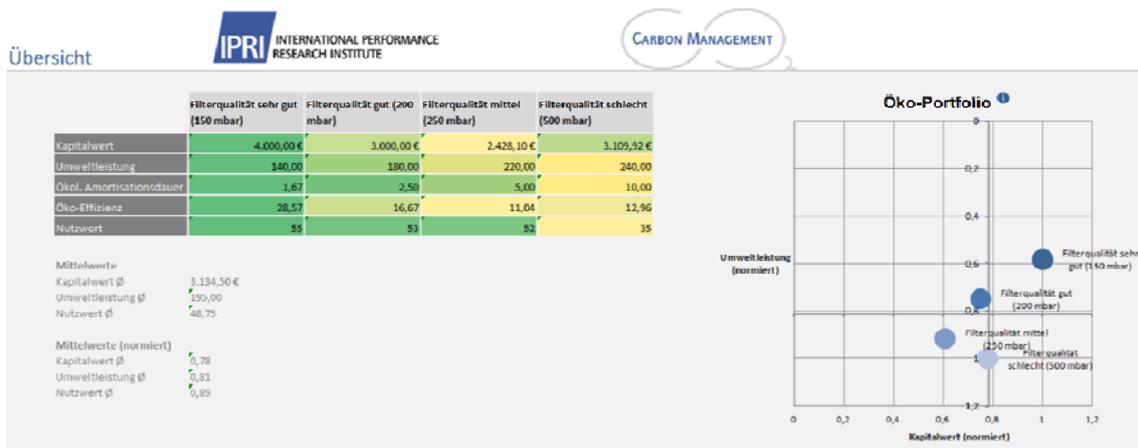


Abbildung 41: Übersicht über die bewerteten Investitionen (eigene Darstellung)

Zur Einordnung in das Öko-Portfolio werden die jeweiligen Kapitalwerte und Umweltleistungen der Investitionen normiert (Abbildung 41: Übersicht über die bewerteten Investitionen (eigene Darstellung)). Zur Einteilung des Portfolios in vier Quadranten werden die Mittelwerte der normierten Größen für Kapitalwert und Umweltleistung als Achsen verwendet. Dadurch entstehen 4 Quadranten.

Investitionen in den rechten Quadranten sind hinsichtlich ihres Kapitalwerts überdurchschnittlich vorteilhaft, Investitionen in den oberen Quadranten hinsichtlich ihrer Umweltleistung. Die Darstellung im Portfolio dient in erster Linie dazu, die finanziellen und ökologischen Vorteile der Investitionen vergleichend darzustellen und bei der Realisierung mehrerer Alternativen die verschiedenen Ausprägungen der Investitionen unter strategischen Gesichtspunkten beurteilen zu können.

### 2.6.3 **Benötigte und eingesetzte Ressourcen**

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses APs durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstelle IPRI wurden 4 Personenmonate und von der Forschungsstelle IUTA 1,5 HPA A aufgewendet.

## 2.7 **Arbeitspaket 7: Identifikation und Bewertung von Maßnahmen zur Emissionssenkung**

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses Arbeitspakets:

<b>Geplante Ergebnisse lt. Antrag</b>	<b>Erzielte Ergebnisse</b>
Erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung	Erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung
Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung	Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung

Im Rahmen des siebten Arbeitspakets war ein erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen geplant. Im Antrag wurde die Hauptbetrachtung des Arbeitspakets auf die Filtereinheit gelegt. Jedoch ist aus dem Vorwissen der vorhergehenden Arbeitspaketen deutlich geworden, dass ein Filterelement nur ein Baustein vieler Komponenten im Druckluftversorgungssystem ist, sodass der Katalog sich nicht nur um die Wartung des Filters bezieht, sondern auch Maßnahmen die die gesamte Anlage betreffen mit einbezieht. Leser des Katalogs können so entscheiden, welche Maßnahme welchen Vorteil bringt.

Darauf aufbauend entstand ein Leitfaden, der die Planung und Steuerung der Maßnahmen erleichtern soll. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf Empfehlungen zur Umsetzung mehrerer Maßnahmen innerhalb von Maßnahmenbündeln. Der Leitfaden umschreibt zunächst allgemein das Maßnahmencontrolling und geht dann im Detail auf die Besonderheiten im Rahmen des Carbon Managements ein.

### 2.7.1 **Ergebnis: Erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung**

- Erweiterbarer Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung

Der Gegenstand dieses Arbeitspakets ist die Unterstützung des Kunden (Filteranwender) durch einen Katalog mit wirtschaftlich und ökologisch bewerteten Maßnahmen zur kontinuierlichen Emissionssenkung. Beispiele aus dem Antrag sind der Austausch der textilen Filterelemente und die beschäftigungsabhängige Drucksteuerung des Filters. Mit Hilfe des erweiterbaren Katalogs sind Anwender in der Lage innerhalb ihres eigenen Carbon Managements zu entscheiden, wie Emissionen gesenkt werden sollen. Durch die Ausweisung der voraussichtlichen Kosten sowie der dadurch erwirkten Emissionssenkungen können Kunden, die im Rahmen ihrer Möglichkeiten passenden Maßnahmen auswählen. Für Hersteller bietet der Katalog die Grundlage, die eigene Expertise im Bereich der ökologischen Optimierung ihrer Produkte auszubauen. Dazu kann der Katalog um produktspezifische Eigenschaften sukzessive erweitert werden. Hersteller haben so die Möglichkeit zusätzliche Dienstleistungen z.B. im Rahmen zusätzlicher Wartungsaufträge anzubieten und dadurch zusätzliche Umsätze zu generieren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden 19 Maßnahmen (siehe Tabelle 16: Maßnahmenkatalog) entwickelt. Hierzu wurden durch Expertengespräche und Austausch bei pA-Treffen vorhandene Maßnahmen sowie neue Maßnahmen zur Emissionssenkung identifiziert. Diese Maßnahmen wurden in einem Katalog mit soweit möglich konkreten Inputs (Mitarbeiter, Technische Hilfsmittel, ...), dazugehörigen Umsetzungsschritten und Outputs (Kosten, sowie Emissionseffekte).

Tabelle 16: Maßnahmenkatalog

Maßnahmen	
Wärmetauscher	Revision des Kompressors
Leckagen am Kompressor	Alternativen zur Druckluft
Leckagen im Leitungsnetz	Umgang (ökologisch und ökonomisch)
Leckagen an den Verbrauchsstellen	Umgang mit Druckluft
Druckniveau	Automatisierung Druckluftsteuerung
Brauchwassererwärmung	Wartung der gesamten Anlage
Leerlauf und Abschaltung	Umgebungsbedingungen
Wahl des richtigen Kompressors	Anwender schulen
Neuanlage	Druckluftaufbereitung
Druckluftüberwachung	

Die Steckbriefe zu den einzelnen Maßnahmen entnehmen Sie bitte dem Anhang. Nachfolgend wird kurz der Aufbau eines Mustersteckbriefs erläutert (siehe Abbildung 42: Mustersteckbrief). Der Aufbau ist anwendungsorientiert schlicht gehalten, zuerst findet man die wichtigsten Punkte wie Name der Maßnahme, Handlungsfelder, Priorität, Umsetzungshorizont. Anschließend werden die Maßnahmen beschrieben und Handlungsschritte erläutert. Nun folgt die Umsetzung, mit konkreten Maßnahmen, welche mit erwarteten Kosten und Nutzen hinterlegt sind. Zu Schluss wird noch das CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial ausgewiesen. Die Grundlage bilden (siehe Anhang) Annahmen bezüglich der Stromzusammenstellung und der Kompressoranlage. Möchte der Anwender diesen Katalog für sich übernehmen, muss er nur Korrekturen an den Annahmen treffen.

<b>Maßnahme</b>	[Name der Maßnahme]				1
<b>Handlungsfeld</b>		Kompressor		Verbraucher	extern
		Leitung		Personal	allgemein
<b>Priorität</b>		mittel		hoch	sehr hoch
<b>Umsetzung</b>		sofort		kurzfristig	langfristig
<b>Beschreibung und Handlungsschritte</b>					
[Welches Problem herrscht vor und wie kann es behoben werden?]					
<b>Umsetzung</b>					
[Welche Maßnahmen sind zu treffen?]					
<b>Erwartete Kosten</b>					
[Wie hoch sind die durchschnittlichen Kosten für die Maßnahme, soweit dies möglich ist?]					
<b>Erwarteter Nutzen &amp; Einsparungen</b>					
[Wie machen sich die Maßnahmen bemerkbar finanziell aber auch andere Faktoren]					
<b>CO<sub>2</sub></b>	[Wie viel CO <sub>2</sub> kann durch eine durchschnittliche Maßnahme eingespart werden?]				
[Welche Annahmen wurden für die Berechnungen getroffen?]					

Abbildung 42: Mustersteckbrief

## 2.7.2 Ergebnis: Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung

Der Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung, inkl. Kennzahlen zur Beurteilung der Ergebnisqualität von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündeln. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf Empfehlungen zur Umsetzung mehrerer Maßnahmen innerhalb von Maßnahmenbündeln. Der Leitfaden beschreibt konkret, welche Einflussfaktoren bei der Umsetzung zu berücksichtigen sind und wie eine hohe Umsetzungsqualität erreicht werden kann. Im Fokus stehen insbesondere die Abhängigkeit von notwendigen Ressourcen und die Faktoren, die eine Umsetzung behindern könnten. Darüber hinaus enthält der Leitfaden Aussagen zu den ausführenden Personen oder den notwendigen Ressourcen sowie zum Zeitaufwand.

Kunden erhalten mit dem Leitfaden Anleitungen, wie emissionsenkende Maßnahmen bestmöglich in den jeweiligen Lebenszyklusphasen umgesetzt werden können. Hersteller können auf der Grundlage des Leitfadens die Kunden bei ihren Bestrebungen zur Emissionsenkung unterstützen und damit aus Kundensicht einen Mehrwert generieren.

### Erarbeitung eines Vorgehens zur Maßnahmenplanung und -umsetzung, insbesondere hinsichtlich der Umsetzung von Maßnahmenbündeln

Bei der Planung und Umsetzung stellt sich die Frage, wie die Maßnahmen vom Maßnahmenkatalog in die Unternehmung transferiert werden kann. Der Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung soll genau dies bewirken. Die Planungsfunktion im Unternehmen ist ein Managementkonzept zur Unterstützung der Unternehmensführung. Pläne sind die Ergebnisse, welche von den Organisationseinheiten umgesetzt werden müssen. I.d.R. geht mit der Planungsfunktion auch die Kontrolle der Pläne einher. Man benötigt ein Planungs- und Kontrollsystem, da die komplexe Umwelt, interne Komplexitäten sowie eine Vielzahl von Teilsystemen dies erfordern. Pläne sind demzufolge ein hierarchisches Konzept, das verschiedenartig aufgefasst werden kann<sup>100</sup>:

#### ■ Ergebnisorientierter Planungsbegriff

Planung ist die Produktion von Plänen, d.h. vereinfachter, symbolischer Modelle zukünftiger realer Systeme. Mit diesen Plänen soll ein Commitment geschaffen werden, innerhalb einer angegebenen Zeit bestimmte Systemzustände zu erreichen.

#### ■ Prozessorientierter Planungsbegriff

Planung ist eine Phase im „Ongoing Process“ der Problemhandhabung von Unternehmen, die v.a. mit Entwurf, Bewertung und Auswahl von Zielprojektionen und Maßnahmen in Zusammenhang steht. Dabei wird auch die Planungsphase selbst als ein komplexer Entscheidungsprozess, bestehend aus Exploration, Analyse, Planung und Steuerung, interpretiert.

#### ■ Institutioneller Planungsbegriff

Planung stellt ein organisatorisches Subsystem (Managementsystem) dar, das bestimmte Funktionen für die Unternehmung erfüllt.

<sup>100</sup> Vgl. Hammer, Richard M. (2015): Unternehmensplanung. Planung und Führung. 9., überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: De Gruyter.

Im Allgemeinen wird die Planung auf drei Ebenen durchgeführt<sup>101</sup>:

- unternehmenspolitische Rahmenplanung
- strategische Planung
- operative Planung

Der nachfolgende Abschnitt widmet sich der operativen Planung. Sie basiert auf den Vorgaben aus der strategischen Planung, jedoch wird nun diese in zeitliche Perioden (z.B. Jahresplanung) und ausführende Einheiten aufgeteilt. Sie bildet die Grundlage für die Budgetierung und Finanzplanung. Die Maßnahmen werden je nach Umfang, je nach Zeithorizont sowie nach den möglichen Kennzahlen sortiert. In der Planungspraxis lassen sich oftmals die operativen Pläne nicht aus den strategischen Plänen ableiten, da diese meistens sehr abstrakt formuliert sind.<sup>102</sup>

Der Planungsprozess besteht aus der Zielbildung, einer Umfeldanalyse, Umfeldprognose, Optionensuche und -bewertung sowie die eigentliche Entscheidung. Welche Maßnahmen schließlich umgesetzt werden wird mittels einer systematischen Analyse sowie Bewertung vorgenommen. Diese können sein: Stärken-Schwächen-Analysen, Szenario-Analysen, Investitionsrechnungsverfahren, Nutzwertanalyse, Portfolio-Analysen, Sensitivitätsanalysen.

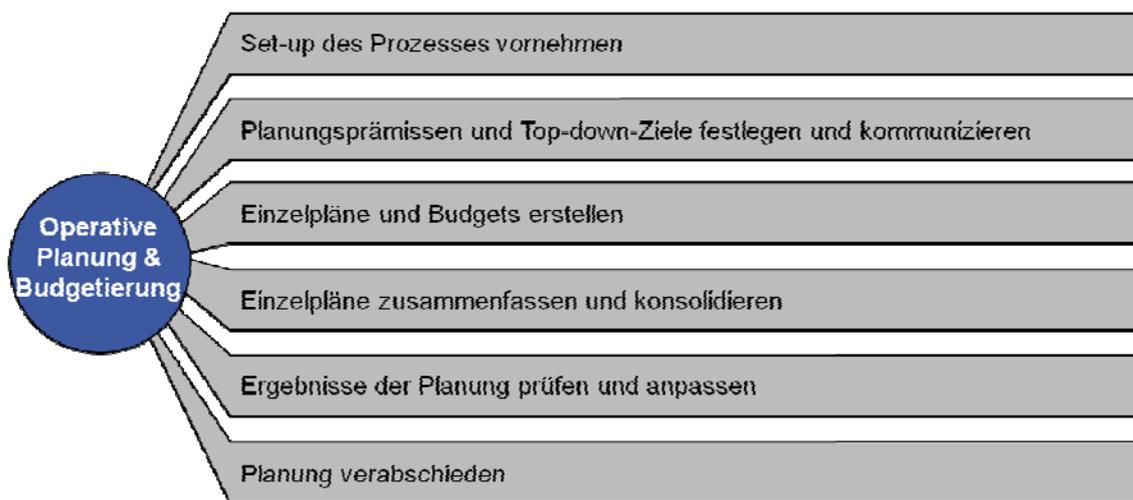


Abbildung 43: Operative Planung (in Anlehnung an: Weber, Jürgen; Schäffer, Utz (2011): Einführung in das Controlling. 13., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.)

Zuerst werden alle organisatorischen Aspekte (Planungskalender, Detailniveau,...) geklärt. Anschließend werden die Planungsprämissen und –ziele festgelegt, d.h. externe und interne Gegebenheiten, wie auch die Unternehmensstrategie müssen beachtet werden. Der eigentliche Planungsprozess besitzt mehrere Etappen, bis der eigentliche Plan feststeht. Anschließend muss dieser Einzelplan mit den anderen Plänen im Unternehmen abgestimmt werden, evtl. auch angepasst werden und schlussendlich verabschiedet werden.

<sup>101</sup> Vgl. Rieg, Robert (2015): Planung und Budgetierung. Was wirklich funktioniert. 2., überarbeitete Aufl. 2015. Wiesbaden: Gabler Verlag (SpringerLink : Bücher).

<sup>102</sup> Hammer, Richard M. (2015): Unternehmensplanung. Planung und Führung. 9., überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: De Gruyter.

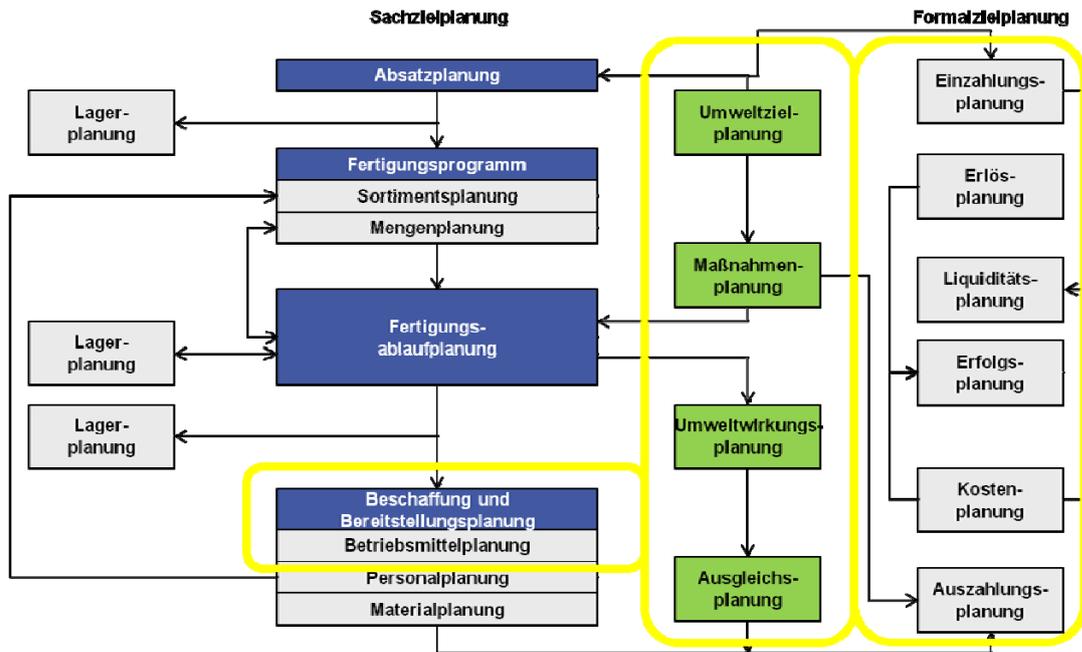


Abbildung 44: Formalziel- und Sachzielplanung (in Anlehnung an Weber, Jürgen; Schäffer, Utz (2011): Einführung in das Controlling. 13., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.)

Die operative Planung besteht aus zwei Planungsebenen, der Sachzielplanung und der Formalzielplanung (siehe Abbildung 44: Formalziel- und Sachzielplanung (in Anlehnung an Weber, Jürgen; Schäffer, Utz (2011): Einführung in das Controlling. 13., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.). Die Sachzielplanung betrifft das Unternehmen bzw. alle Bereiche des Unternehmens, hingegen betrifft die Formalzielplanung nur die finanzielle Sicht des Unternehmens. Die Maßnahmen aus dem erweiterbaren Katalog mit bewerteten Maßnahmen zur Emissionssenkung betreffen die gelben Bereiche.

Beispiel: Besteht von Seiten der Geschäftsführung das top-down Ziel: „Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 15%“, so ist zunächst sicherzustellen wie viel Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden müssen. Anschließend muss das Budget für die Betriebsmittelplanung festgelegt werden (Druckluft sowie die Druckluftanlage).

Die Hauptaufgabe ist die Maximierung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen mit dem festgelegten Budget. Dies hat zur Folge, dass zuerst eine Reihenfolge erstellt werden muss, dies geschieht, indem die Kosten und die CO<sub>2</sub>-Einsparung in Relation gesetzt werden (was kostet eine 1 Tonne CO<sub>2</sub> einzusparen?). 1. Methode: Reihung anhand der Relationen, es werden alle Maßnahmen ergriffen die günstig eine Einsparung ermöglichen. Jedoch besteht hier das Problem, dass nicht das volle Budget ausgeschöpft werden kann. Die zweite Methode benutzt das Schema der ersten Methode versucht jedoch anschließend noch das übrige Budget aufzubreuchen. Die dritte Methode basiert auf einer mathematischen Optimierung (Simplex-Methode), hierbei wird das Budget bestmöglich eingesetzt. Als Lösung erhält man in allen Fällen ein Maßnahmenportfolio bzw. ein Maßnahmenbündel.

Beispiel: Die Hauptaufgabe ist die Maximierung der CO2-Einsparungen mit dem festgelegten Budget.

Maßnahme	Einsparung	Kosten	Relation	Reihenfolge
A	10	3.000 €	300 €	2
B	3	400 €	133 €	1
C	4	4.000 €	1.000 €	6
D	3	2.500 €	833 €	5
E	11	6.200 €	564 €	4
F	6	3.000 €	500 €	3

Budget: 12.500 €

Maßnahmenbündel:	aufsummiert		aufsummiert		aufsummiert	
	Maßnahme	Kosten	Maßnahme	Kosten	Maßnahme	Kosten
	B	400 €	B	400 €	A	3.000 €
	A	3.000 €	A	3.000 €	E	6.200 €
	F	3.000 €	F	3.000 €	B	400 €
	E	6.200 €	D	2.500 €	D	2.500 €
	D	2.500 €	C	4.000 €		
	C	4.000 €				
max. CO2 Einsparung:		19		22		27
		6.400 €		8.900 €		12.100 €

Abbildung 45: Optimierung der Maßnahmen

Jede Planung besitzt ein Realisationsrisiko (Nichterfüllung des Plans). dies kann durch eine unzureichende Planverfolgung der ausführenden Organe oder durch unvorhersehbare Abweichungen der Prämissen erfolgen. Die Kontrolle kann auf zweierlei Arten erfolgen, zum einen am Ende des Projekts (Endkontrolle) oder aber auch zwischendurch (Meilensteine), sodass die Kontrolle fortlaufend erfolgt. Dies hat den Vorteil, dass eine Korrektur der Pläne und der Rahmenbedingungen aufgegriffen werden kann. Als Kontrollziel (siehe Abbildung 46: Kontrolle der Ergebnisse) ist z.B. die Wirtschaftlichkeit, der Erfolg, die Qualität oder wie am Beispiel der Maßnahmen zur CO2-Einsparung, die tatsächliche CO2-Einsparung. Hierfür sind zum einen die Planwerte aus den Maßnahmensteckbriefen relevant und auf der anderen Seite die Planvorgaben der unternehmensindividuellen Planung. Z.B. ist die Maßnahme „Einbau eines Wärmetauschers“ zwar im Steckbrief mit einem CO2-Ausweis und den dazugehörigen Kosten ausgewiesen, in der Praxis muss dies jedoch individuell geplant werden. Die Maßnahme ist nur sinnvoll bei einer Werkshalle, die nahe an den anderen Gebäuden steht, zudem muss der Kompressor geeignet, groß genug dimensioniert sowie eine hohe Auslastung aufweisen. Sind diese Kriterien erfüllt so richtet sich das Einsparpotenzial nach dem ursprünglichen Verbrauch an Heizöl in den Vorperioden.

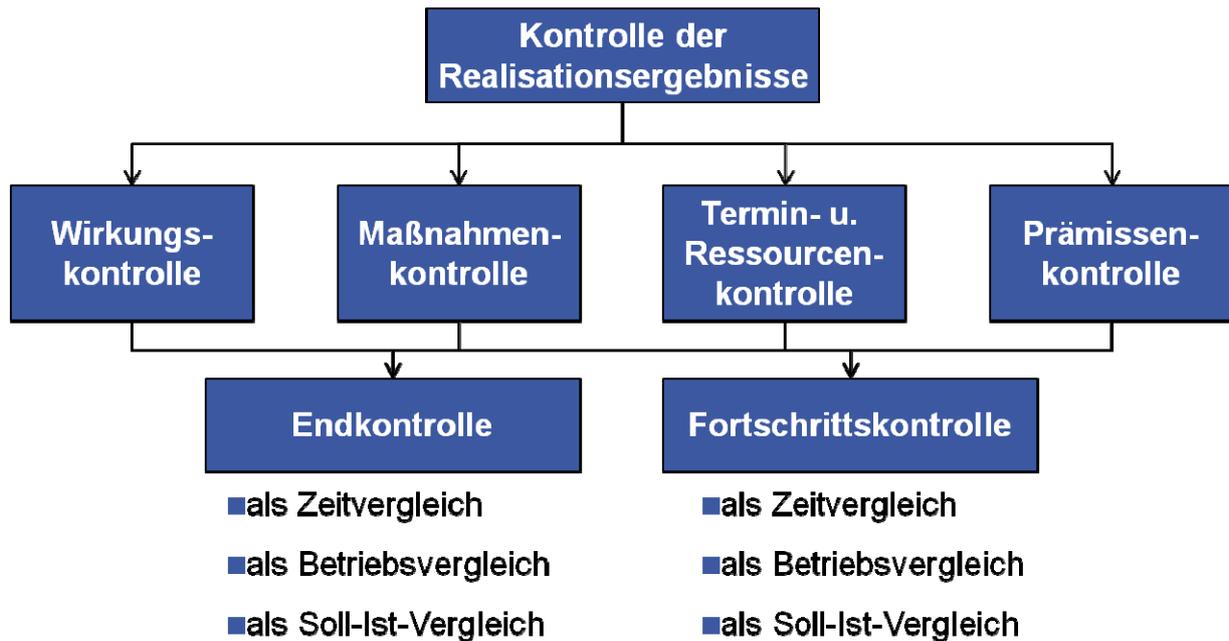


Abbildung 46: Kontrolle der Ergebnisse (in Anlehnung an Scherer (Kostenrechnung) S.477ff.)

Die Kontrolle dient zur Entscheidungsunterstützung, indem zusätzliche Informationen (Zielabweichungen) gewonnen werden, der laufende sowie zukünftige Entscheidungsprozess verbessert werden kann und natürlich das Projektergebnis sicherzustellen. Natürlich erfolgt durch die Kontrolle auch eine Verhaltensbeeinflussung, indem Zielkonflikte zwischen der Bereichsleitung und der Unternehmensleitung aufgedeckt werden, Informationsasymmetrien beseitigt und die Bemessungsgrundlage für verhaltensverändernde Maßnahmen angepasst werden kann.<sup>103</sup>

Arten von Teilabweichungen nach der Verantwortlichkeit		Abweichungsursachen
Zu eliminierende Teilabweichungen	Extern verursachte Teilabweichungen	Abweichungen bei Einflussfaktoren der Kontrollgröße, die vom Handlungsträger nicht gestaltbar sind
	Prognosebedingte Teilabweichungen (Planung)	Fehler bei der Prognose der Wirkungen einer Entscheidung auf die Kontrollgröße
	Auswertungsbedingte Teilabweichungen (Kontrolle)	Auswertungsfehler, d.h. Erfassungs-, Prognose- oder Berechnungsfehler bei der Bestimmung der Ist-, Wird- und Sollwerte für die Kontrolle
Vom Entscheidungsträger zu vertretende Fehler		Fehlentscheidungen, die ihre Ursache in Prognosefehlern oder der fehlerhaften Beschreibung von Prämissen oder Alternativen haben
Vom Ausführungsträger zu vertretende Fehler		Beabsichtigtes oder unbeabsichtigtes Abweichen von den Vorgaben eines Planes; Fehlverhalten bei der Planrealisation

Abbildung 47: Ursachen von Abweichungen (in Anlehnung an Berz (Kontrollsystem) S.986)

<sup>103</sup>Vgl. Thieme (Verhaltensbeeinflussung) S.22f. Laux/Lietmann (Erfolgskontrollen) S.7f. und Klock (Erfolgskontrolle) S.427f,

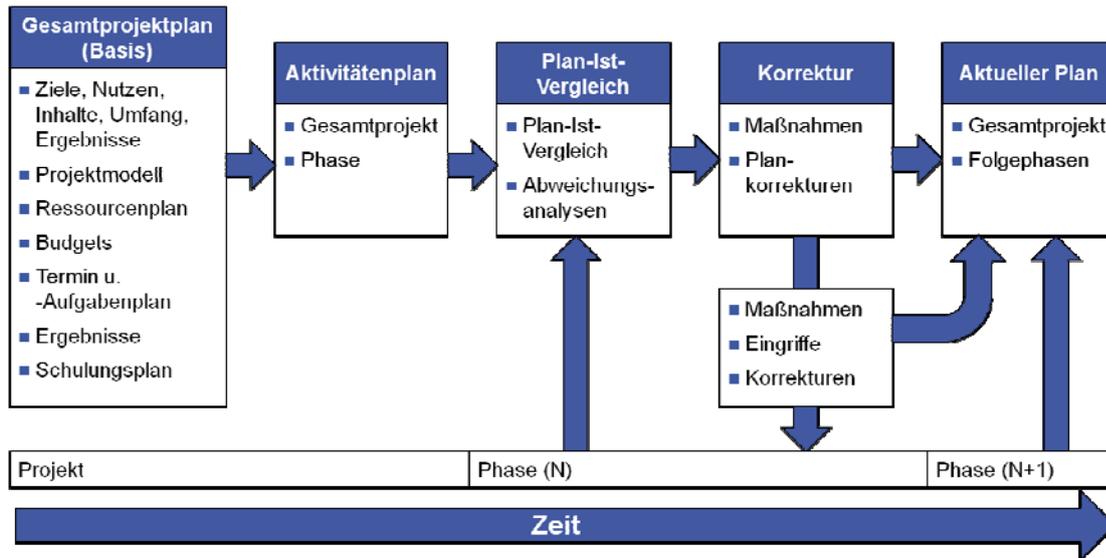


Abbildung 48: Zusammenfassung: Regelkreis Planung und Steuerung (in Anlehnung an Fiedler, Controlling von Projekten, 6. Auflage 2014)

Für detailliertere Informationen wird auf den Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung verwiesen.

### 2.7.3 Fazit

Insgesamt unterstützt das siebte Arbeitspaket den Kunden (Druckluftfilteranwender) CO<sub>2</sub>-Emissionen aufwandsarm zu planen und zu senken.

### 2.7.4 Benötigte und eingesetzte Ressourcen

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses APs durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstelle IPRI wurden 4 Personenmonate und von der Forschungsstelle IUTA 1,5 HPA A aufgewendet.

## 2.8 Arbeitspaket 8: Validierung und Dokumentation der Ergebnisse in den Fallstudienunternehmen

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses Arbeitspakets:

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Praxishandbuch, in dem das gesamte Vorgehen inkl. der Fallstudienanwendung beschrieben ist	Praxishandbuch, in dem das gesamte Vorgehen inkl. der Fallstudienanwendung beschrieben ist

### 2.8.1 Ergebnis Praxishandbuch, in dem das gesamte Vorgehen inkl. der Fallstudienanwendung beschrieben ist:

Die Projektergebnisse wurden im Rahmen von Arbeitstreffen (siehe Tabelle 18, Kapitel 4.1) und telefonischen Interviews (siehe Tabelle 19, Kapitel 4.1) sowie den Sitzungen des pro-

jektbegleitenden Ausschusses (siehe Tabelle 18, Kapitel 4.1) erarbeitet und diskutiert. Zudem wurden die Ergebnisse in drei Fallstudienunternehmen validiert.

Bei den drei Fallstudienunternehmen handelt es sich um vermittelte Kontakte durch den pA, darunter sind zwei mittelständische Anwender der Prüftechnik und ein Großunternehmen (Systemanbieter für technische Industrieprodukte). Mit deren Hilfe wurden die Projektergebnisse validiert. Mittels Aktionsforschung (*Altrichter/Posch, 1998*) konnte die Anwendungsorientierung der Forschung sichergestellt werden.

Aktionsforschung ist durch folgende Aspekte gekennzeichnet:

- Partizipation zwischen den einzelnen Parteien (Forschung und Praxis), mit dem Ziel objektive Ergebnisse vorweisen zu können.
- Kommunikation zwischen Theorie und Praxis, mit aufeinander aufbauenden Erkenntnissen.
- Interaktion der beiden Parteien wodurch das eigentliche Problem gelöst werden kann.
- Reflexion der gesammelten Erkenntnisse und anschließend einer kritischen Überprüfung gegebenenfalls sogar einer Revision.

Die Validierung (vgl. Abbildung 49) erfolgte in drei Arbeitsschritten:



Abbildung 49: Validierungsvorgehen

Zu Beginn wurden die Ergebnisse in den Unternehmen vorgestellt und angewendet. Anschließend wurden die Ergebnisse mit folgenden Kriterien (siehe *Abbildung 50*) auf ihre Praxistauglichkeit bewertet (Kirsch/Seidl/van Aaken 2007, S. 205ff.):

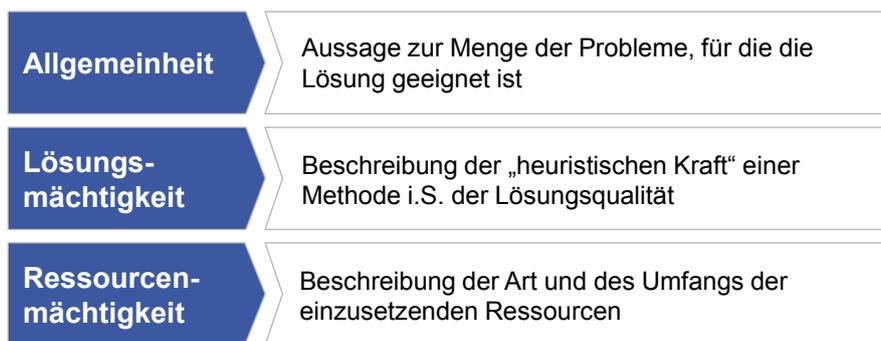


Abbildung 50: Beurteilung

Im letzten Schritt wurden die Ergebnisse durch die neuen Erkenntnisse angepasst. Dies umfasste weitestgehend den Maßnahmenkatalog, dessen Aufbau und Anwenderfreundlichkeit.

Gegenstand der Validierung waren die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen. Als wesentliche Projektergebnisse wurden die Erkenntnisse aus Arbeitspaket 4 (Emissionstreiber in der Betriebs- und Entsorgungsphase), aus Arbeitspaket 5 (Messmethoden), aus Arbeitspaket 6 (CO<sub>2</sub>-orientierte Investitionsrechnung) sowie aus Arbeitspaket 7 (Maßnahmenkatalog) angesehen.

Das Arbeitspaket 1 stellt das Grundlagenwissen des Carbon Accounting dar. Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 und 3 sind hingegen nur unter Laborbedingungen erzielbar und mangels verfügbarer Datengrundlage sind diese nicht in der Praxis abzubilden (siehe Begründung Kapitel 2.1.2).

Die Validierung wurde mithilfe von drei Fallstudienunternehmen (siehe Abbildung 51), sowie mit zusätzlichen Daten (generiert durch Unternehmen des pA) durchgeführt. Zwei Unternehmen davon sind kmU, welche Messtechnik produzieren. Das dritte Unternehmen ist ein Großunternehmen, welches als Systemanbieter technische Industrieprodukte produziert.

<b>Großunternehmen</b>	HÜBNER GmbH & Co. KG Heinrich-Hertz-Straße 2 34123 Kassel Thomas Meibert (Leiter Werktechnik)
<b>kmU</b>	Ehrler Prüftechnik Engineering GmbH Wilhelm-Hachtel-Straße 8 97996 Niederstetten Andreas Dengel (Product Development Manager)
<b>kmU</b>	CS Instruments GmbH Zindelsteinerstraße 15 78052 VS-Tannheim Dipl. Ing. (FH) Wolfgang Blessing (Geschäftsführer)

Abbildung 51: Fallstudienunternehmen

Die einzelnen Ergebnisse wurden zuvor mithilfe des PA erarbeitet und ausführlich diskutiert. Dieses Vorgehen sicherte schon vor der Validierungsphase ein praxistaugliches Ergebnis. Mithilfe einer Vor-Ort-Besichtigung konnten viele wichtige technische Fragen geklärt werden. u.a.:

- Aufbau der Anlage (verwendete Kompressoren, Anzahl und Länge Druckluftstränge, ...).
- Investitionsrechnung (wie werden bisher Investitionen bewertet, ökologische Aspekte).
- Maßnahmen zur Emissionssenkung (Stand heute, Planung, Einsparungen).
- Welche Daten werden im Rahmen des Carbon Accounting erhoben.

Diese Vor-Ort-Besichtigung war notwendig, da oftmals eine Druckluftanlage in der Praxis ein „gewachsenes“ Gebilde ist. Bestehend aus einem alten Kern, der in den Jahren nach der Erstinstallation viele Erweiterungen erfahren hat. Bei dieser Gelegenheit wurden auch ökologieorientierte Fragen zum Thema Investitionen beantwortet. Zum einen die grundsätzliche Stellung zum Thema Ökologie, den Stellenwert von CO<sub>2</sub> im unternehmerischen Alltag, desweiteren spezifische Detailfragen zur Bewertung von Investitionen. Es stellte sich heraus, dass alle Unternehmen einen Ökologiedanken (CO<sub>2</sub> zu sparen) verfolgen, jedoch natürlich die Kosten bei diesem Ziel nicht vernachlässigt werden dürfen. Ein Fallstudienunternehmen ist zum Beispiel in einen Neubau gezogen, welcher alle möglichen Emissionseinsparungen berücksichtigt (Solarstrom, Erdwärme, Dämmung etc.). Jedoch geschah diese Investition vor allem aus Kostengründen, da die Produktion fast ausschließlich über erneuerbare Energien erfolgt. Diese Erkenntnis konnte durch die Experteninterviews im Rahmen der Vor-Ort-Validierung bestätigt werden. In der Regel sind es Maßnahmen die einen ökologischen Zugewinn bereitstellen, aber auch auf Kostenseite bestehen können.

In Arbeitspaket 4 wurden die Emissionstreiber in der Betriebs- und Entsorgungsphase erhoben. Als Emissionstreiber wird in diesem Zusammenhang alle Kenngrößen die mit dem indi-

rekten Ausstoß von CO<sub>2</sub> bei der Druckluftfiltration stehen. Der Druckluftfilter verursacht allein betrachtet keine Emissionen während der Nutzung, jedoch wird der Luftstrom während der Druckluftbereitstellung durch den Filter gebremst wodurch es zu einem Druckverlust kommt. Diese indirekte Emissionsquelle wird durch zwei wesentliche Komponenten des Druckluftfilters erzeugt. Zum einen ist es das Filtergehäuse und zum anderen das eigentliche Filtermedium. In der Entsorgungsphase ist es der Recyclingprozess bzw. die eigentliche Entsorgung (Restmüll), welche zu Emissionen (CO<sub>2</sub>) führt. Es zeigte sich, dass in vielen Fällen eine Wiederverwertung der einzelnen Rohstoffe vorgesehen ist, jedoch von Seiten der Praxis weitestgehend nicht wahrgenommen wird.

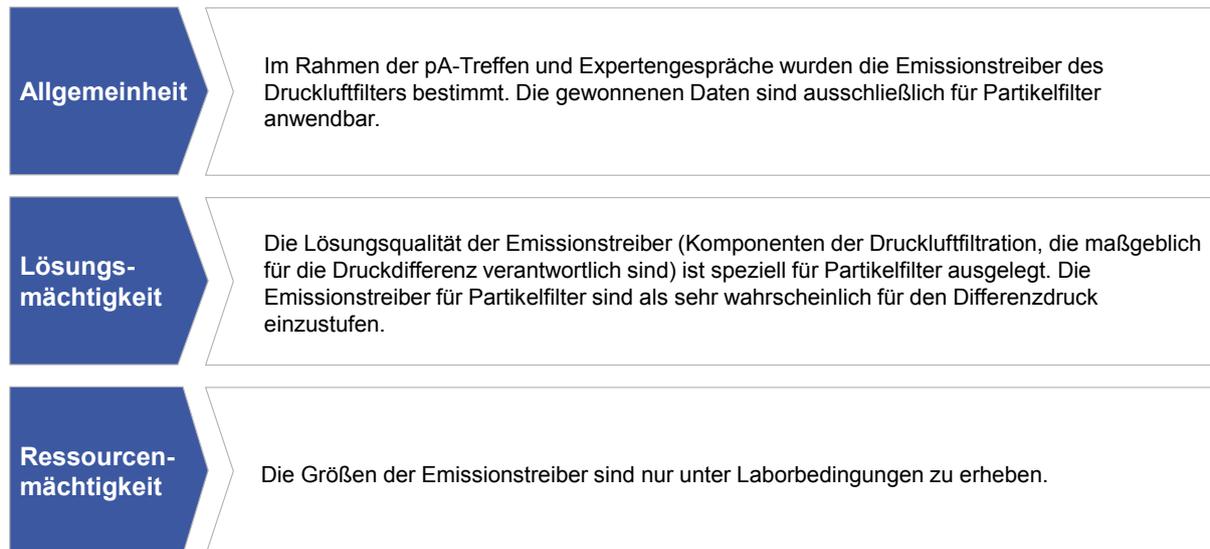


Abbildung 52: Bewertung Arbeitspaket 4

Es zeigte sich, dass die Ergebnisse nur für Partikelfilter anwendbar sind. Der Aufbau und die Zusammensetzung sind nicht mit denen von z.B. Koaleszenzfilter vergleichbar.

In Arbeitspaket 5 wurden Messmethoden entwickelt, welche der Praxis die Möglichkeit bieten soll, eigenhändig die Effizienz der Druckluftfiltration zu ermitteln. Hierfür wurden direkte und indirekte Methoden entwickelt. In diesem Arbeitspaket wurde von der sonst oft gebrauchten Einheit CO<sub>2</sub> abgewichen und die Druckdifferenz in den Fokus gehoben. Sie wird bestimmt durch die Differenz zwischen Einlass- und Auslassseite des Filters. Hier gilt, je geringer die Druckdifferenz ist, desto weniger muss der Kompressor die Differenz durch Mehrleistung kompensieren, wodurch schließlich weniger CO<sub>2</sub> emittiert wird.

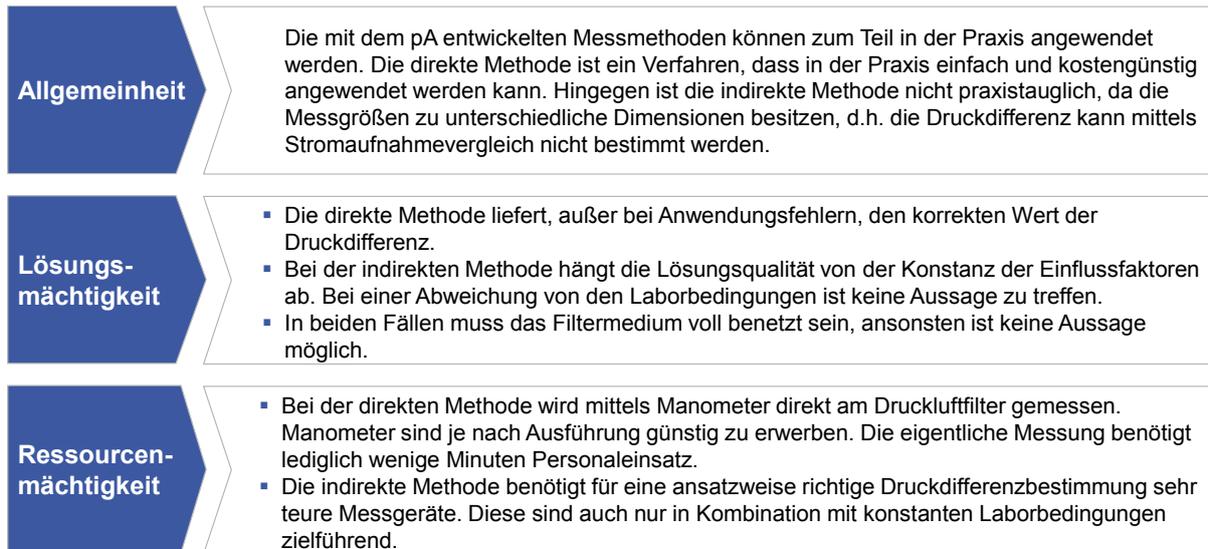


Abbildung 53: Bewertung Arbeitspaket 5

Die Ergebnisse wurden im Laufe der Validierung überarbeitet, es zeigte sich, dass indirekte Messmethoden unter Laborbedingungen funktionieren können, nicht aber im realen Einsatz. Dies ist begründet durch den enormen Unterschied der Größen (kW im Vergleich zu mbar). Der Kompressor muss schließlich nur geringe Mengen an Energie für die Kompensation des Druckluftfilters aufbringen, dessen Druckdifferenz macht folglich nur wenige Prozent des Gesamtenergiebedarfs aus. Ein weiteres Problem stellen die unterschiedlichen Bedingungen der Messung dar. Bei geringen Abweichungen (Alter der Anlage, Temperatur, Verschleiß, Ansaugluft,...) ist keine präzise Aussage über die Druckdifferenz möglich. Demzufolge sind die direkten Methoden für die Praxis das geeignete Mittel um Druckdifferenzen zu bestimmen.

In Arbeitspaket 6 wurden ökologieorientierte Investitionsbewertungsverfahren entwickelt. Alle Maßnahmen, rund um CO<sub>2</sub>-sparende Investitionen können nicht ausschließlich durch finanzielle Aspekte bewertet werden. Viele ökologieorientierte Maßnahmen haben im Vergleich zu herkömmlichen Maßnahmen einen geringeren Kapitalwert. Jedoch ermöglicht die zusätzliche Bewertungskomponente u.U. einen positiven Ausschlag zur CO<sub>2</sub>-sparenden Investition.

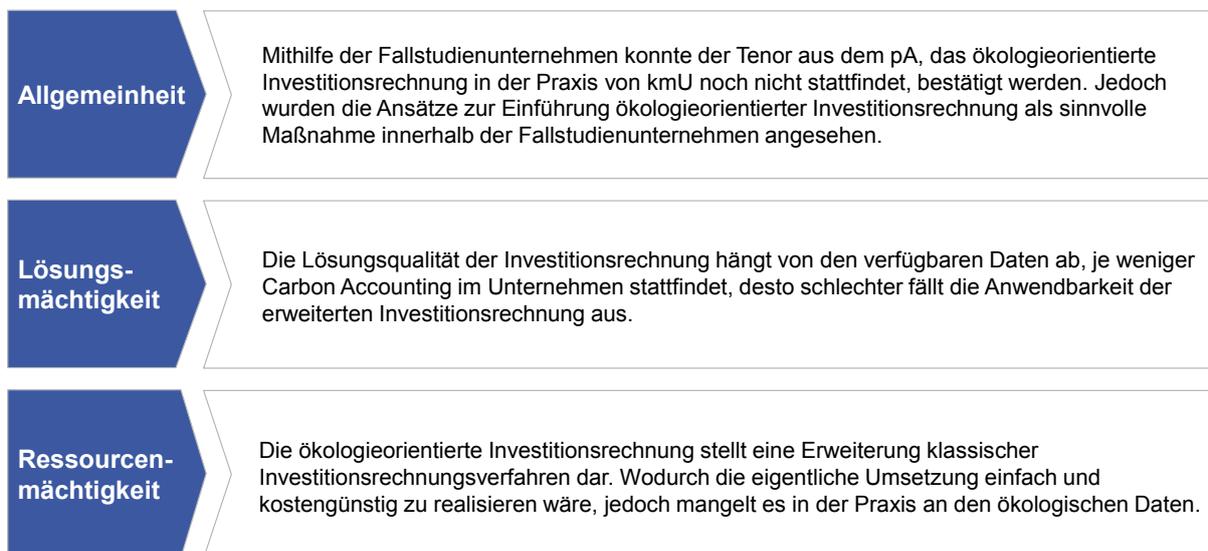


Abbildung 54: Bewertung Arbeitspaket 6

Es zeigte sich, dass obwohl viele Unternehmen ökologische Ziele verfolgen, viele keine Datengrundlage bereitstellen können um diese schließlich auch quantitativ zu überwachen. Sobald jedoch ökologische Ziele in ihrer Wertigkeit (sozial und finanziell) zulegen, ist eine Erweiterung der klassischen Investitionsziele in Form der vorgestellten ökologieorientierten Investitionsrechnung für kmU möglich.

In Arbeitspaket 7 wurden Maßnahmen zur Emissionssenkung identifiziert und bewertet. Es entstand ein Katalog mit 19 Einzelmaßnahmen, welche das Potenzial CO<sub>2</sub> einzusparen besitzen. Hierzu wird nicht nur der reine Filter wie in den anderen Arbeitspaketen zuvor betrachtet, sondern die komplette Anlage. Der Maßnahmenkatalog wurde von Seiten der Praxis für sinnvoll erachtet. Die Fallstudienunternehmen haben im Schnitt 50% der Maßnahmen umgesetzt bzw. sind bestrebt diese in naher Zukunft umzusetzen. Die Validierung zeigte, wie schon erwartet, dass der Druckluftfilter eine der wenigen Komponenten im Druckluftnetz ist, welche in der Regel vernachlässigt wird. Man fand in der Praxis beide Extreme, zum einen das mustergültige Warten der Anlage, speziell auch der Druckluftfiltration, aber auch das andere Extrem, indem keinerlei Daten über die Druckluftfilter erhoben wurden.

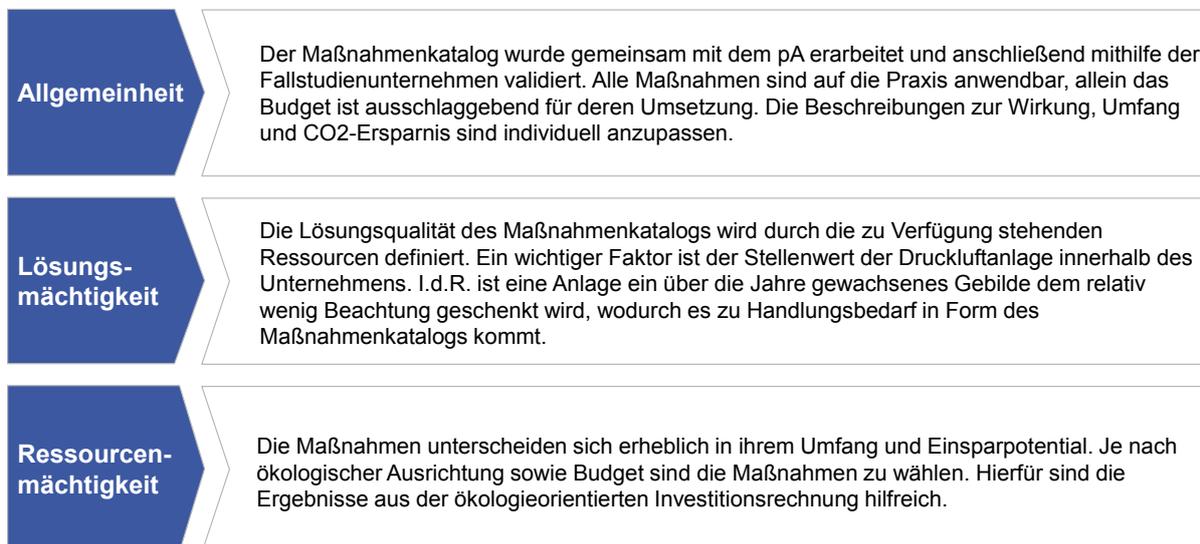


Abbildung 55: Bewertung Arbeitspaket 7

Die Bewertung zeigte, dass viele der Fallstudienunternehmen die Maßnahmen umsetzen werden bzw. bereits umgesetzt haben. Jedoch wurde deutlich, dass der Stellenwert der Druckluftanlage oftmals erst in den Vordergrund rückt, wenn diese nicht ordnungsgemäß funktioniert, solange wird Wartung und Investition in die Zukunft verlagert.

Mit Hilfe der drei Fallstudienunternehmen sowie zusätzlichen Datenmaterials (generiert durch den pA) konnten alle zu validierenden Ergebnisse des Forschungsprojekts validiert werden. Es zeigte sich, dass viele Unternehmen ein Carbon Management anstreben, jedoch wird dies in der Praxis nicht konsequent verfolgt. kmU stoßen meistens bei der Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen an ihre Grenzen. Die Praxis zeigte, dass CO<sub>2</sub> Emissionen dann eingespart werden, wenn daraus auch ein geldwerter Vorteil generiert werden kann. Ansonsten werden ökologische Ziele selten bis nie verfolgt.

Für nähere Informationen wird auf das Praxishandbuch verwiesen.

## **2.8.2 Benötigte und eingesetzte Ressourcen**

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde die Forschungsarbeit innerhalb dieses Arbeitspakets durch wissenschaftliches Personal durchgeführt. Seitens der Forschungsstellen wurden hierfür 8 Personenmonate (IPRI 5 PM; IUTA 4 HPA A) aufgewendet.

## **2.9 Arbeitspaket 9: Projektmanagement, Zwischenberichte und Transfer**

### **2.9.1 Ergebnis: Abschlussbericht**

Mithilfe von Projektmanagementmethoden konnten durch die beiden Forschungsstellen ein störungsfreier Projektablauf garantiert werden. Diese ermöglichten es, die Projektergebnisse zu erarbeiten und den Transferplan zu erfüllen.

Die projektbegleitenden Sitzungen (08.05.2014; 06.11.2014; 14.07.2015; 05.11.2015) wurden gewissenhaft vorbereitet, durchgeführt und anschließend aufbereitet. Diese bildeten die Basis für einen intensiven Erfahrungsaustausch der einzelnen Teilnehmer. Die Abstimmung zwischen den beiden Forschungsstellen sowie den Partnern verlief störungsfrei. Die Zwischenberichte (2013, 2014) wurden fristgerecht erstellt. Der Schlussbericht wird im Januar 2016, zwei Monate nach Projektende eingereicht. Alle in den Transfermaßnahmen versprochenen Leistungen wurden eingereicht bzw. teilweise schon publiziert.

Durch Pressemitteilungen sowie Ansprache zusätzlicher Unternehmen konnte das ursprüngliche Konsortium sogar erweitert werden.

### **2.9.2 Ergebnis: Veröffentlichungen**

Siehe Kapitel 4.2.

### **2.9.3 Benötigte und eingesetzte Ressourcen**

Entsprechend des Finanzierungsplans wurde das Projektmanagement durch wissenschaftliches Personal während der Projektlaufzeit durchgeführt. Seitens der Forschungsstellen wurden hierfür 2 Personenmonate (IPRI 1 PM; IUTA 1,5 HPA A) aufgewendet.

## **2.10 Verwendung der Zuwendung**

### **2.10.1 Erläuterung zu den wichtigsten Positionen aus dem Einzelfinanzierungsplan (Ansatz A.1, Gerätebeschaffungen, Leistungen Dritter) je Forschungsstelle**

#### **Personalausgaben**

Angabe der Mitarbeiter mit

- **Anzahl:** 1 HPA A
- **Ausbildungsabschluss:** Angestellte mit abg. wiss. Ausbildung Dr., Dipl.-Ing., Uni Master o.vglb.
- **Beschäftigungsgrad:** 100% (24 Personenmonate)
- **Entgeltgruppen nach TVL/TVöD:** angelehnt an E13

- **Tätigkeitsbeschreibung im Rahmen des Projektes:** Projektleitung und Bearbeitung der Arbeitspakete entsprechend des Arbeitsplans, Dokumentation der Forschungsergebnisse, Durchführung des Transfers und der Projektveröffentlichungen
- **Anzahl:** 1 HPA A
- **Ausbildungsabschluss:** Angestellte mit abg. wiss. Ausbildung Dr., Dipl.-Ing., Uni Master o.vglb.
- **Beschäftigungsgrad:** 50% (12 Personenmonate)
- **Entgeltgruppen nach TVL/TVöD:** angelehnt an E13
- **Tätigkeitsbeschreibung im Rahmen des Projektes:** Projektleitung und Bearbeitung der Arbeitspakete entsprechend des Arbeitsplans, Dokumentation der Forschungsergebnisse, Durchführung des Transfers und der Projektveröffentlichungen

Arbeitspaket	IPRI (HPA A)*	IUTA (HPA A)*
<b>Summe</b>	<b>36</b>	<b>21,9</b>

\*in Personenmonate

#### Ausgaben für Gerätebeschaffung

Keine Ausgaben für Geräte

#### Ausgaben für Leistungen Dritter

Keine Ausgaben für Leistungen Dritter

### **2.10.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die **Notwendigkeit** der geleisteten Arbeit ergibt sich aus der identifizierten Forschungslücke und wird in Gesprächen mit Unternehmen, insbesondere KMU der Druckluftfilterbranche deutlich. Das Forschungsthema zeigt deutliche Praxisrelevanz auf.

Die Erarbeitung eines Produktökolabels behebt ein bekanntes Problem in der Druckluftfilterbranche. Die Operationalisierung des aufgezeigten ökologieorientierten Labelings stellt einen innovativen Beitrag für mittelständische Druckluftfilterhersteller im Rahmen einer grüneren Produktpalette dar. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen eine vollständige und praktisch anwendbare ökologieorientierte Ausrichtung. Es wurde ein Instrumentarium für KMU entwickelt, das den Anwender befähigt, Druckdifferenzen zu messen, zu berechnen und in Geldeinheiten sowie in CO<sub>2</sub>-Einheiten zu verbuchen. Somit ist der Kunde und auch der Hersteller in der Lage den Lebenszyklus des Druckluftfilters zu bestimmen. Zudem wurden Maßnahmen zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen entwickelt. Mithilfe des aus den Ergebnissen entstandenen Praxishandbuchs werden Druckluftanwender und -hersteller dabei unterstützt, einen gemeinsamen ökologischen Standard für die Erfassung der Emissionen zu etablieren.

Die **Angemessenheit** der geleisteten Arbeit beider Forschungsstellen ergibt sich aus der Anwendung geeigneter wissenschaftlicher Methoden und der Befragung von Experten in der unternehmerischen Praxis in angemessener Weise.

Für die durchgeführten Arbeiten wurden je Forschungsstelle wissenschaftliche Mitarbeiter beschäftigt. Unterstützt wurde das wissenschaftlich-technische Personal durch studentische Hilfskräfte. Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten sowie bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens **notwendig** und **angemessen**.

### 3. Innovativer Beitrag und Nutzen für KMU

#### 3.1 Innovativer Beitrag der erzielten Ergebnisse

Das entwickelte Konzept leistet insgesamt einen innovativen Beitrag für KMU und **erfüllt damit die gestellten Anforderungen** in vollem Umfang.

Durch die Projektergebnisse werden bisherige Erkenntnisse zum **Themenfeld Carbon Managements in der Druckluftfilterbranche** erstens um einen Produktökolabeling erweitert. Die **Operationalisierung** des aufgezeigten **ökologieorientierten** Labelings stellt einen innovativen Beitrag für mittelständische Druckluftfilterhersteller im Rahmen einer **grüneren** Produktpalette dar. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen eine **vollständige und praktisch anwendbare ökologieorientierte Ausrichtung** der Unternehmen in Bezug auf das Gesamtunternehmen sowie unter Einbezug der verschiedenen Geschäftsbereiche.

Es sei an dieser Stelle nochmals herauszustellen, dass es sich bei dem im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten **Produktökolabel um einen Vorschlag handelt**, dessen Umsetzung muss an anderer Stelle erfolgen.

Zweitens ermöglicht die erstmalige Entwicklung von Messmethoden und -instrumenten für die Erfassung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Betriebs- und Entsorgungsphase von industriellen Druckluftfiltern ein Umdenken in der Praxis. Mithilfe der Instrumente wird die Bedeutung der Druckluftfilter gesteigert, zudem hat die Praxis ein Instrumentarium, welches aufwandsarm die CO<sub>2</sub>-Emissionen messen kann.

Drittens wurde erstmals **Maßnahmen und Maßnahmenbündel** für die kontinuierliche Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von industriellen Druckluftfiltern entwickelt.

Das Vorhaben trägt so zur Entwicklung von **Normen und Standards** bei. Ziel ist es, die Ergebnisse branchenweit als Standard zu etablieren. Die gesammelten Ergebnisse beheben ein auf Seiten der Wirtschaft bekanntes Problem und ermöglichen zudem noch den **Wissensaufbau bei den Filterherstellern**. Da die Anforderungen auf Seiten der Kunden an ihre Druckluftqualität -effizienz kontinuierlich steigen, sind diese Ergebnisse besonders für kmU interessant, da bisher nur Großunternehmen in der Lage waren ihr Carbon Management voranzutreiben.

Ergebnisse laut Antrag	Erzielte Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entscheidungsunterstützung durch CO<sub>2</sub>-Ausweis anhand standardisierter Belastungsszenarien und für verschiedene Filtertypen</li> <li>- Unterstützung beim Benchmarking verschiedener Filtertypen</li> <li>- Anleitung zur Emissionsschätzung für (ausländische) Produkte ohne CO<sub>2</sub>-Ausweis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erarbeitung von Carbon Accounting Grundlagen (Product Category Rules) [Kapitel 2.1]</li> <li>- Erarbeitung von Grundlagen zum ökologischen und ökonomischen Produktvergleich [Kapitel 2.2]</li> <li>- Erarbeitung eines Schätzvorgehens für Produkte ohne CO<sub>2</sub>-Angabe [Kapitel 2.1 ]</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusammenstellung wichtiger Kenngrößen zu den Emissionstreibern in Abhängigkeit von den unternehmensspezifischen Prozessen</li> <li>- Anleitung zum direkten/indirekten Messen der Emissionen und Zusammenstellung geeigneter Messinstrument und Methoden</li> <li>- Kalkulationsvorschriften für die Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identifikation und Analyse von Kenngrößen zu den Emissionstreibern in der Betriebs- und Entsorgungsphase [Kapitel 2.1]</li> <li>- Entwicklung von Kalkulationsvorschriften und Messmethoden für die Kenngrößen [Kapitel 2.5]</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wirtschaftliche und ökologische Entsorgungsplanung, inkl. Entscheidungsunterstützung bzgl. Ersatzinvestition vs. Lebenszyklusverlängerung</li> <li>- Katalog mit wirtschaftlich und ökologisch bewerteten Maßnahmen zur kontinuierlichen Emissionsenkung</li> <li>- Leitfaden zur Planung und Steuerung der Maßnahmenumsetzung, inkl. Kennzahlen zur Beurteilung der Ergebnisqualität von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissionsorientierte Erweiterung „traditioneller“ Planungs- und Investitionskalküle [Kapitel 2.6]</li> <li>- Identifikation und Bewertung von Maßnahmen zur Emissionsenkung [Kapitel 2.7]</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbon Management Zyklus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Praxishandbuch (Dokumentation der Ergebnisse in den Fallstudienunternehmen) [Kapitel 2.8.1]</li> </ul>

Tabelle 17: Wissenschaftlich-technischer Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

### 3.2 Wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Wirtschaftlich nutzbares Ergebnis dieses Forschungsvorhabens ist ein validiertes Konzept zur Entwicklung von ökologieorientierten Unternehmensstrategien sowie zur Implementierung bzw. Verbesserung eines Carbon Managements.

Das validierte Konzept wird der Öffentlichkeit in Form eines **Handlungsleitfadens** (Praxishandbuch) zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wird die vereinfachte und aufwandsarme Umsetzung des Konzepts durch einen **Software-Demonstrator** unterstützt. Das validierte Konzept wird ferner durch **Veröffentlichungen, Pressemeldungen, Workshops** und Seminare bekannt gemacht (siehe **Tabellen 7, 8, 9, 10**). Zusätzlich werden von IPRI zur Lösung spezifischer Fragestellungen und im Rahmen vertiefender Analysen **Beratungen** und **Dienstleistungen** angeboten.

Das Praxishandbuch ermöglicht die Umsetzung des ökologieorientierten Managements (Carbon Managements - **Accounting, Planning, Controlling und Reporting**) als eine Art Blaupause. Es verdeutlicht nicht nur die Relevanz eines Produktlabeling (**Ökolabel**), sondern auch die Umsetzung von CO<sub>2</sub> reduzierenden Maßnahmen und der dessen Maßnahmencontrolling (**Planung und Steuerung von Maßnahmen**).

Das gesamte Konzept wird in einem **Demonstrator** umgesetzt und mittels Leitfäden und Katalogen erklärt. Der Software-Demonstrator wurde den PA Mitgliedern im Rahmen von kleineren Arbeitstreffen vorgeführt sowie im Rahmen der Validierungsphase „vor-Ort“ erprobt. Dieser auf Standardsoftware basierende Demonstrator dient der einfachen und aufwandsarmen Anwendbarkeit des Konzepts.

Ein wirtschaftlich wichtiges Ergebnis ist vor allem aber auch die Möglichkeit der effektiven **Verminderung von CO<sub>2</sub> Emissionen**. Die langfristig zur Sicherung der unternehmenseigenen **Ökobilanz** fördert und zudem eine Signalwirkung nach außen besitzt.

**Unternehmen erzielen dauerhafte Wettbewerbsvorteile** in Form von einer schnellen Reaktion auf nachhaltige Kundenwünsche und Marktanforderungen sowie einer Risikominimierung bei zukünftigen Gesetzesänderungen. Im Falle eines CO<sub>2</sub>-Handels sind die Unternehmen die bereits ein Carbon Managementsystem implementiert haben für neue gesetzliche Regelungen gut aufgestellt. Des Weiteren können Hersteller ihre Druckluftfilter **ökologisch sinnvoll und energieeffizient** und dadurch kostenoptimal gestalten. Außerdem können durch die Vermeidung (**CO<sub>2</sub>**) Unternehmen glaubhaft mit ihrer Ökologieorientierung (Marketingmaßnahmen) werben, beispielsweise durch die Publikation von Maßnahmen und Kennzahlen in einem externen Umweltbericht. Dadurch lässt sich für Unternehmen ein

bedeutsamer **Imagegewinn** erzielen. Mittelfristig ermöglichen die Umsetzung der Projektergebnisse auch die **Durchsetzung höherer Preise**.

Die Unternehmen können durch das Konzept bereits **kurzfristig** wirtschaftlichen Nutzen durch einfach umzusetzende Energieeffizienzmaßnahmen erzielen. KMU können die zur Verbesserung der ökologischen Bilanz notwendigen Umweltmaßnahmen mit dem entwickelten validierten Konzept **effektiver und effizienter gestalten** und dadurch Kosten vermeiden.

KmU werden mit diesen Ergebnissen in die Lagen versetzt, ihren Kunden produktbegleitenden Dienstleistungen zum Carbon Management anzubieten. Diese Dienstleistungen führen zu einer Steigerung des Umsatzes mit vorhandenen Kunden und öffnen darüber hinaus den Zugang zu neuen potenziellen Kunden.

Die **entwickelten Instrumente** tragen dazu bei, die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Herstellungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase der Druckluftfilter zu beurteilen. Auf dieser Basis können Öko-Label für **Druckluftfilter** erstellt werden, die dem Kunden als Entscheidungsunterstützung bzw. **Kaufargument** dienen. Die Hersteller für Druckluftfilter können somit mithilfe der Forschungsergebnisse **Wettbewerbsvorteile** gegenüber dem **internationalen Wettbewerb** realisieren.

### 3.3 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse können in **jedem** mittelständischen Industriebetrieb Anwendung finden (Voraussetzung: Druckluft wird benötigt). Die aus dem Projekt hervorgegangene Ausgestaltung und Umsetzung eines Carbon Managements (Carbon Planning, Carbon Accounting, Carbon Controlling, Carbon Reporting) kann **standort- und länderübergreifend** eingesetzt werden.

Die Ergebnisse bieten beste Voraussetzungen zum **Einsatz** und **Marketing** der Ökologieorientierung bei Kunden, Lieferanten und in Kooperationen. Sie ermöglichen zudem eine Verbesserung der **Ökobilanz**. Die Wahrscheinlichkeit der Anwendung ist **sehr hoch**, da der Trend zu nachhaltigem Handeln (Umweltschutz) erkennbar ist. Zudem wird es von Großunternehmen vorgelebt und teilweise bereits gefordert.

## 4. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

### 4.1 Projektbegleitender Ausschuss im Projekt

Durch die aktive Einbindung des Projektbegleitenden Ausschusses wurden einerseits die **Praxisrelevanz** und andererseits die **Verbreitung der Ergebnisse** sichergestellt. Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse mehrmals im Jahr auf den **Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses** präsentiert und durch **Fachvorträge** sowie **Veröffentlichungen** weiteren Firmen zugänglich gemacht. Die Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses sind die in Tabelle 18 aufgeführten Unternehmen.

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner
Idealfilter	X	Herr Ludwigs
Parker Hannifin		Herr Dr. Timmler
Ehrler	X	Herr Ehrler
Fst	X	Herr Loy
Beko	X	Herr Singer
Richtvert Energieberatung	X	Herr Dr. Jentsch
Stieler Technologie- & Marketing-Beratung	X	Herr Dr. Steudle
LCS Life Cycle Simulation	X	Herr Maruschke
Donaldson		Hr. Schuster

Tabelle 18: Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses

Der Projektbegleitende Ausschuss trat **mehrmals im Jahr** zu einer gemeinsamen Sitzung zusammen, in denen die bisherigen Ergebnisse **diskutiert** und das weitere **Vorgehen abgestimmt** wurde. Für jede dieser Sitzungen wurden inhaltliche Schwerpunkte festgelegt (vgl. Tabelle 19)

Datum	Ort	Schwerpunkt
08.05.2014	Duisburg	Kick-Off Sitzung
06.11.2014	Duisburg	Product Labeling und Product Category Rules
14.07.2015	Duisburg	Druckdifferenzmessungen und Projektfortschritt
05.11.2015	Duisburg	Abschlussveranstaltung - Präsentation der Forschungsergebnisse

Tabelle 19: Sitzungen des PA und inhaltliche Schwerpunkte der jeweiligen Sitzung

#### 4.2 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft lt. Antrag während der Projektlaufzeit

Maßnahme(n)	Ziel	Zeitraum	Status
<b>Ergebnistransfer <u>während</u> der Projektlaufzeit</b>			
<b>Vorträge:</b> Vorstellung des Projekts auf wissenschaftlichen und praxisorientierten Veranstaltungen	Bekanntmachen der entwickelten Methoden und Leitfäden; Aufnehmen der Anforderungen weiterer Unternehmen; Sicherstellung der Allgemeingültigkeit der Methode durch die Diskussion der Anforderungen	Mögliche Veranstaltungen: - IUTA Filtrationstag - Innovationstag Mittelstand des BMWi - FILTECH - Palas ATS-Seminar - Deutsch-Chinesisches Umweltforum - Berlin conference on the human dimensions of global environmental change	<b>6.11.2014</b> <b>IUTA Filtrationstag</b> C. Gröll (IPRI): „Carbon Footprint“ von Druckluftfiltern. W. Mölter-Siemens (IUTA): Differenzdruckauslegung von Hochdruckluftfiltern. <b>13.10 – 14.10.2014</b> <b>Palas ATS Seminar</b> W. Mölter-Siemens (IUTA): Druckluftfiltertest und Entspannung von Aerosolen. <b>5.11.2015</b> <b>IUTA Filtrationstag</b> S. Kasselmann (IPRI); W. Mölter-Siemens (IUTA): „Carbon Management für Druckluftfilter“
Publikation von mindestens zwei <b>wissenschaftlichen oder praxisorientierten Beiträgen</b> während der Projektlaufzeit	Bekanntmachen der erarbeiteten Zwischenergebnisse in der Wissenschaftslandschaft	Ab Projektmitte (F&S - Filtrieren und Separieren, Chemie Ingenieur Technik, Aerosol Science and Technology, Journal of Cleaner Production)	<b>„Laminare und turbulente Strömungskennwerte für die Differenzdruckauslegung von Gas-hochdruckfiltern“:</b> F&S – Filtrieren und Separieren, 10/2015  Eingereicht: Nov/2015 <b>IPRI-Praxis-Paper:</b> Praxishandbuch: Carbon Management Zyklus

Maßnahme(n)	Ziel	Zeitraum	Status
Publikation von mindestens zwei <b>wissenschaftlichen Beiträgen</b> zum Ende der Projektlaufzeit	Bekanntmachen der erarbeiteten Projektergebnisse in der Wissenschaftslandschaft	Zum Projektende (Zeitschrift für Controlling, Journal of Cleaner Production, F&S - Filtrieren und Separieren, Chemie Ingenieur Technik, Druckluft)	<b>An Approach Towards Eco-Labeling of Compressed Air Filters based on Carbon Footprint:</b> Journal of Cleaner Production (eingereicht Nov/2015)  <b>Öko-Labeling von Druckluft-Filtern</b> <b>Neues aus der Forschung</b> <b>(1.12.2015: <a href="http://neues-aus-der-forschung.de/?p=336">http://neues-aus-der-forschung.de/?p=336</a>)</b>
Publikation von einem ausführlichen <b>IPRI-Praxis-Paper</b> (Fallstudienberichte oder Konzeptarbeit)			Eingereicht: Nov/2015 <b>IPRI-Praxis-Paper:</b> Entwicklung von Ökolabeln für die erfolgreiche Kundenkommunikation am Beispiel industrieller Druckluftfilter
Vorstellung des Projekts und der Projektergebnisse im <b>IPRI-Journal</b>	Bekanntmachen des Projekts und der erzielten Projektergebnisse, Integration aktueller Entwicklungen zum Themenfeld des Forschungsvorhabens aus der unternehmerischen Praxis	Sommer-Ausgabe (Juni 2014) Winter-Ausgabe (Dez. 2014)	Projektvorstellung im IPRI-Sommerjournal 2014
Vorstellung des Projekts und der Projektergebnisse in <b>iuta-aktuell</b>		Fortlaufend nach 6 Monaten Projektlaufzeit	IUTA-Aktuell; IUTA-Tätigkeitsbericht 2014
Jährlicher Gedanken- und Wissensaustausch interessierter KMU im Rahmen des <b>Arbeitskreises</b> „Green Controlling“ beim ICV		Unterstützung und Leitung des ICV-Arbeitskreises „Green Controlling“ während der gesamten Projektlaufzeit und über diese hinaus	ICV-Arbeitskreis Treffen September 2014

Maßnahme(n)	Ziel	Zeitraum	Status
Präsenz im <b>Internet</b>	Bekanntmachen der Forschungsberichte auf - Projekt-Homepage - IPRI-Homepage (www.ipri-institute.com) - IUTA-Homepage (www.iuta.de)	Über die gesamte Projektlaufzeit	<a href="http://sustainability-control.org/carbon-management/">http://sustainability-control.org/carbon-management/</a> (Projekt-Homepage)  Pressemitteilung am 12. Dezember 2013 (IPRI-Homepage) 22. Oktober 2015 (IPRI-Homepage) 18. Dezember 2015 (IPRI-Homepage)  IUTA-Homepage: Aktuelle Projekte, Bereich Luftreinhaltung Filtration
<b>Pressemeldungen</b>	Weitere Verbreitung der Projekthinhalte und -ergebnisse, insbesondere über den IDW - Informationsdienst Wissenschaft ( <a href="http://idw-online.de/de/">http://idw-online.de/de/</a> )	Über die gesamte Projektlaufzeit Angestrebt sind mindestens folgende Mitteilungen: - zum Projektstart - zur Veröffentlichung von IPRI-Praxis-Paper - zur öffentlichen Abschlussveranstaltung	<b>Zum Projektstart: 13.12.2013 :</b> <a href="http://idw-online.de/de/news566378">http://idw-online.de/de/news566378</a> <b>Zur Abschlussveranstaltung: 22.10.2015</b> <a href="https://idw-online.de/de/news640033">https://idw-online.de/de/news640033</a>
Vorstellung des Konzepts in einem öffentlichen <b>IPRI-Fachworkshop</b>	Transfer der Projektergebnisse in die Wirtschaft durch Vorstellung der Methode und der Ergebnisse sowie Praxisbeispielen; Sicherstellung der Allgemeingültigkeit des Konzepts durch Diskussionen	Zum Projektende als Abschlussveranstaltung des Forschungsvorhabens, zu dem Teilnehmer aus Wissenschaft und Praxis eingeladen werden	<b>5.11.2015</b> IUTA Filtrationstag: Idealer Rahmen (Vertreter der Druckluftindustrie im Plenum)

Tabelle 20: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft lt. Antrag während der Projektlaufzeit

### 4.3 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft lt. Antrag (Maßnahmen nach Projektende)

Maßnahme(n)	Ziel	Zeitraum	Status
<b>Ergebnistransfer nach der Projektlaufzeit</b>			
<b>Vorträge:</b> Vorstellung der erzielten Projektergebnisse auf wissenschaftlichen und praxisorientierten Veranstaltungen	Bekanntmachen und Weiterentwicklung der entwickelten Methoden und Leitfäden; Aufnehmen der Anforderungen weiterer Unternehmen	Mögliche Veranstaltungen: - European Aerosol Conference - World Filtration Congress - FILTECH - IUTA Filtrationstag - ProcessNet Fachtagung	
<b>Seminare</b> in der IPRI-Seminarreihe	Es wird ein Seminarkonzept entwickelt, das im Rahmen der IPRI-Seminarreihe die Forschungsergebnisse in den Themenfeldern „Green Controlling“ in die Praxis trägt	Konzeption während der Projektlaufzeit, Durchführung nach der Projektlaufzeit	Konzeption erfolgt, erstes Seminar am 21.06.2016
Einbindung der Projektergebnisse in die <b>akademische Lehrveranstaltung Air Pollution Control</b> an der Universität Duisburg-Essen, Dr.-Ing. Stefan Haep	Bekanntmachen des Projekts und der erzielten Projektergebnisse bei Studierenden vor deren Eintritt ins Berufsleben	Fortlaufend nach Projektende	

Tabelle 21: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft nach Projektende

### 4.4 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Das vorgeschlagene und aktualisierte Transferkonzept bietet hervorragende Aussichten einer **vollständigen Realisierbarkeit**.

- **Publikationen:** alle Publikationen sind publiziert bzw. eingereicht. Das IPRI-Praxis zum Projekt wird direkt nach Projektlaufzeit publiziert.
- **Vorstellung des Konzepts in einem öffentlichen Fachworkshop:** Das Konzept wurde auf der öffentlichen Abschlussveranstaltung vorgestellt und diskutiert.
- **Seminare in der IPRI-Seminarreihe:** Unterlagen zu IPRI-Seminaren sind erarbeitet, erstes Seminar wird im Herbst 2016 angeboten.

#### 4.5 Veröffentlichungen und Vorträge im Projekt

Um der interessierten Öffentlichkeit die Ergebnisse bestmöglich zugänglich zu machen, wurden neben der allgemeinen Presse- und Öffentlichkeitsarbeit mehrere Veröffentlichungen in diesem Projekt erstellt. Tabelle 22 gibt einen Überblick über die Projektveröffentlichungen.

Autor(en)	Datum	Titel	Medium	Adressaten
C. Gröll	6.11.2014	Carbon Footprint“ von Druckluftfiltern	Vortrag	Praxis
W. Mölter-Siemens	6.11.2014	Differenzdruckauslegung von Hochdruckluftfiltern	Vortrag	Praxis
W. Mölter-Siemens	10/2015	Laminare und turbulente Strömungskennwerte für die Differenzdruckauslegung von Gas-hochdruckfiltern	Beitrag	Praxis
W. Mölter-Siemens; S. Kasselmann; S. Berlin; C. Asbach	11/2015 eingereicht	An Approach Towards Eco-Labeling of Compressed Air Filters based on Carbon Footprint	Beitrag	Praxis Wissenschaft
S. Kasselmann	11/2015 eingereicht	Entwicklung von Ökolabeln für die erfolgreiche Kundenkommunikation am Beispiel industrieller Druckluftfilter	IPRI-Praxis	Praxis
S. Kasselmann	2/2016 eingereicht	Carbon Management Zyklus	IPRI-Praxis	Praxis

Tabelle 22: Veröffentlichungen im Projekt Carbon Management

#### 4.6 Pressearbeit im Projekt

Im Rahmen des Projekts wurde gezielt Pressearbeit betrieben. Bereits zu Projektbeginn wurde eine Pressemeldung veröffentlicht, in welcher interessierte Unternehmen zur Teilnahme an diesem Projekt eingeladen wurden. Die Pressearbeit ist ausführlich in Tabelle 23 dargestellt.

Art	Datum	Inhalt	Adressatenkreis	Quelle
Pressemitteilung	13.12.2013	Projektstart	Wissenschaft, Praxis, allgemeine Öffentlichkeit	<a href="http://idw-online.de/de/news566378">http://idw-online.de/de/news566378</a>
Internet	13.12.2013	Projekt-Homepage	Wissenschaft, Praxis, allgemeine Öffentlichkeit	<a href="http://sustainability-control.org/carbon-management/">http://sustainability-control.org/carbon-management/</a>
Pressemitteilung	22.10.2013	Abschlussveranstaltung	Wissenschaft, Praxis, allgemeine Öffentlichkeit	<a href="https://idw-online.de/de/news640033">https://idw-online.de/de/news640033</a>
Pressemitteilung	18.12.2015	Projektabschluss	Wissenschaft, Praxis, allgemeine Öffentlichkeit	<a href="http://www.ipri-institute.com/fileadmin/PDFs/pressemeldungen/2015/2015_12_18_Projektende_CarbonManagement.pdf">http://www.ipri-institute.com/fileadmin/PDFs/pressemeldungen/2015/2015_12_18_Projektende_CarbonManagement.pdf</a>

Tabelle 23: Pressearbeit im Projekt Carbon Management

## 5. Forschungsstellen

Die **IPRI – International Performance Research Institute** gemeinnützige GmbH wurde gegründet mit der Zielsetzung, Forschung auf dem Gebiet des Performance Management von Organisationen, Unternehmen und Unternehmensnetzwerken zu betreiben.

Unter Leitung von Prof. Dr. Mischa Seiter untersucht IPRI in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und kleinen und mittelständischen Unternehmen die Wirkungszusammenhänge und Potenziale in den Bereichen Controlling, Finanzen, Logistik und Produktion.

Forschungsschwerpunkt des Gründers Prof. Horváth ist die Erarbeitung neuer Methoden im Bereich des Controllings und der Transfer dieser Ergebnisse in die Praxis. Die Forschungsstelle arbeitet eng mit der Bundesvereinigung Logistik e. V., dem VDMA und Unterverbänden (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e. V.) sowie der IHK zusammen. Zudem wird der Kontakt zu Experten aus der Praxis über regelmäßige Veranstaltungen und Workshops hergestellt.

Für die durchgeführten Recherchen und Untersuchungen wurden mehrere wissenschaftliche Mitarbeiter beschäftigt. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

**IUTA – Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.** ist eines der großen verfahrenstechnischen Institute Deutschlands im Bereich der Energie- und Umwelttechnik. Die ca. 130 Mitarbeiter bearbeiten anwendungsorientierte F&E-Projekte, bei denen gemeinsam mit Industrie-Partnern wissenschaftliche Erkenntnisse in neue oder verbesserte Verfahren oder Produkte überführt werden. In Kooperation mit Universitäten und Hochschulen, insbesondere der Universität Duisburg-Essen, befassen sich die Mitarbeiter der wissenschaftlichen Bereiche zudem mit der Beantwortung grundlegender wissenschaftlicher Fragestellungen. Aufgrund der großen Bandbreite und hohen Komplexität der Arbeitsgebiete werden die F&E-Projekte in der Regel von interdisziplinären Teams von Mitarbeitern mit Spezialkenntnissen in Maschinen- und Anlagenbau, Energietechnik, Verfahrenstechnik, Chemie, Analytik oder Mess- und Regelungstechnik bearbeitet.

Auf dieser Basis wurden in den letzten Jahren in neueste Entwicklungen auf Seiten der Messtechnik und der Versuchsstände investiert. Damit sind Forschungsarbeiten zu wegweisenden Trends auf dem Gebiet der Adsorption, der Funktionalisierung textiler Medien, über die Bedeutung der Agglomeratfiltration in der chemischen Industrie sowie über die komplexen Zusammenhänge bei der Filtration von Tröpfchen mit Koaleszenzfiltern möglich geworden.

In jüngster Zeit liegt der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Tätigkeit in der Entwicklung von Methoden zur Effizienzbewertung im industriellen Umfeld sowie in der Entwicklung von Konzepten zur rationellen Energienutzung. Neben der wissenschaftlichen Arbeit nimmt IUTA Dokumentations- und Informationsaufgaben wahr und engagiert sich in der Aus- und Weiterbildung im Bereich der Energie- und Umwelttechnik. Dies geschieht in der Regel in enger Zusammenarbeit mit Behörden, Unternehmen, Verbänden und anderen Organisationen.

<b>Forschungsstelle 1</b>		<b>IPRI International Performance Research Institute gGmbH</b>	
Anschrift		Königstraße 5, 70173 Stuttgart	
Leiter Forschungsstelle	der	Prof. Dr. Mischa Seiter	
Projektleitung		Sebastian Kasselmann, M.Sc.	
Kontakt		Tel.: 0711/ 6203268-8030, <a href="http://www.ipri-institute.com">www.ipri-institute.com</a>	
<b>Forschungsstelle 2</b>		<b>Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. - IUTA</b>	
Anschrift		Bliersheimer Straße 60, 47229 Duisburg	
Leiter Forschungsstelle	der	Prof. Dr.-Ing. Dieter Bathen (Wissenschaftlicher Leiter) Dr.-Ing. Stefan Haep (Vorstandsvorsitzender und Geschäftsführer)	
Projektleitung		Dr.-Ing. Wolfgang Mölter-Siemens	
Kontakt		Tel.: 02065/418-400, <a href="http://www.iuta.de">www.iuta.de</a>	

## **6. Förderhinweis**

Das IGF-Vorhaben 17992 N / 1 der Forschungsvereinigung Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. - IUTA, Bliersheimer Straße 60, 47229 Duisburg wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung und Unterstützung sei gedankt.

## V Literatur

- Abele, E., Kuske, P., & Lang, H. (2011). *Schutz vor Produktpiraterie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Akerlof, George A. (1970): The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism. In: *The Quarterly Journal of Economics* 3 (84), S. 488–500.
- Alber, K. (2008). *Schneller als die Piraten*. S&I.
- Andreas Stihl AG & Ca. KG. (2008). *Stihl virtuelle Werksführung*. (Stihl) Abgerufen am 03.. Dez. 2013 von <http://www2.stihl.de/werksfuehrung/default.htm>
- Andreas Stihl AG & Co. KG. (2007). *Service Manual - Stihl MS 171, 181, 211*. Waiblingen: Andreas Stihl AG & Co. KG.
- Andreas Stihl AG & Co. KG. (2010). *STIHL price list 2010*. Waiblingen: Andreas Stihl AG & Co. KG.
- Andreas Stihl AG & Co. KG. (2011). *Gebrauchsanleitung - Stihl MS 171, 181, 211*. Waiblingen: Andreas Stihl AG & Co. KG.
- Blind, K. (2009). *Die volkswirtschaftliche Bedeutung geistigen Eigentums und dessen Schutzes im Fokus auf den Mittelstand*. BWT-Studie.
- Bocken, N., Allwood, J., & King, J. (2012). Development of a tool for rapidly assessing the implementation difficulty and emissions benefits of innovations. *Technovation*(32), S. 19-31.
- Breiling, A., & Knosala, R. (1997). *Bewerten technischer Systeme*. Berlin: Springer.
- Bundesministerium für Justiz. (o.J.). *Patentrecht und Produktpiraterie*. Abgerufen am 05. 07 2013 von [http://www.bmj.de/DE/Buerger/wirtschaftHandel/PatentrechtProduktpir/patentrechtProduktpir\\_node.html](http://www.bmj.de/DE/Buerger/wirtschaftHandel/PatentrechtProduktpir/patentrechtProduktpir_node.html)
- Burritt, Roger L.; Schaltegger, S.; Zvezdov, Dimitar: *Carbon management accounting. Practice in leading German companies*, no. 2.
- Camarda, C. G., Eilers, P. H., & Gampe, J. (Aug. 2008). *Modelling general patterns of digit preference*. *Statistical Modelling*, S. 385-401.
- Chase, K. W. (1999). *Minimum-Cost Tolerance Allocation*. Provo: ADCATS.
- Cohen, Mark A.; Vandenberg, Michael P. (2012): *The potential role of carbon labeling in a green economy*. In: *Energy Economics* 34, S. S53–S63. DOI: 10.1016/j.eneco.2012.08.032.
- Curran, M. (2006). *National Riskmanagement Research Laboratory Office of Research and Development*. Abgerufen am 04. 22 2015 von U.S. Environmental Protection Agency: <http://www.cs.ucsb.edu/~chong/290N-W10/EPAonLCA2006.pdf>
- CW Bearing GmbH. (2013). *Einreihige Rillenkugellager*. Abgerufen am 28.. Aug. 2013 von <http://www.cwbearing.de/d/downloads/rillenkugellager2.pdf>
- Dierig, C. (22. 04 2008). *Deutsche fälschen ihre Maschinen gerne selbst*. Abgerufen am 01. 09 2012 von Die Welt: <http://www.welt.de/wirtschaft/article1928254/Deutsche-faelschen-ihre-Maschinen-gerne-selbst.html>
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1984). *DIN 475-1 - Schlüsselweiten*. Berlin: Beuth.

- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1985). DIN 6763 - Nummerung. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1988). DIN 620-2 - Wälzlager; Wälzlagertoleranzen; Toleranzen für Radiallager. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1990). DIN 988 - Paßscheiben und Stützscheiben. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1991). DIN ISO 2768-1 - Allgemeintoleranzen. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1999). DIN 13-5 - Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003). DIN 336 - Durchmesser für Bohrer für Gewindekerndurchmesser von geschnittenen Gewinden. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2006). DIN 653 - Rändelschraube, niedrige Form. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2007). DIN ISO 691 - Schraubwerkzeuge - Schlüsselweiten. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2010). DIN EN 1706 - Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gussstücke - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2010). DIN ISO 281 - Wälzlager; Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012). DIN EN ISO 1101 - Geometrische Produktspezifikation (GPS). Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2013). DIN ISO 3601 - O-Ringe. Berlin: Beuth.
- Dobner, H.-J., & Engelmann, B. (2003). Analysis. 2. Integralrechnung und mehrdimensionale Analysis. Leipzig: Carl Hanser.
- Dold, G., & Wörner, C. (1996). Einordnung, Aufbau und Grenzen von Ökobilanzen. In G. Dold, & H. Krcmar, Aspekte der Ökobilanzierung, Ansprüche, Ziele und Computerunterstützung (S. 1-21). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Döppling, H., Geiger, E., & al., e. (08.. Okt. 2009). Deutschland Patentnr. DE102008016977.
- Dresen, B., & Wörner, C. (2009). Carbon Footprint von Produkten (CFP), Bilanzierung in kleinen und mittleren Unternehmen. In S. Feifel, Ökobilanzierung 2009: Ansätze und Weiterentwicklungen zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit (S. 91-96). Tagungsband Ökobilanz-Werkstatt.
- ECIIA - European Confederation of Institutes of Internal Auditing. (2009). Common Body of Knowledge in Internal Auditing - A state of the art in Europe. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Eigner, M., & Stelzer, R. (2009). Product Lifecycle Management. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. The Academy of Management Review, 14/4, 532-550.
- Fabig, C., & Haasper, A. (2012). Complexigence: Komplexität verstehen und aktiv managen. Norderstedt: BoD.

- Fifer, R. M. (1988). Beating the competition: a practical guide to, benchmarking. Kaiser Associates.**
- Fink, A., & Siebe, A. (2011). Handbuch Zukunftsmanagement. Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung. Frankfurt, New York: 2. Aufl.**
- Fink, A., Schlake, O., & Siebe, A. (2001). Erfolg durch Szenario-Management. Frankfurt a.M. .**
- Fraunhofer ISI. (August 2003). Druckluft effizient. Karlsruhe.**
- Fuchs, H. J. (2006). Piraten, Fälscher und Kopierer: Strategien und Instrumente zum Schutz geistigen Eigentums in der Volksrepublik China. Wiesbaden: Gabler.**
- Gausemeier, J., Fink, A., & Schlake, O. (1996). Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien (2. bearb. Auflage Ausg.). München, Wien: Carl Hanser Verlag.**
- Gausemeier, J., Glatz, R., & Lindemann, U. (2012). Präventiver Produktschutz - Leitfaden und Anwendungsbeispiele. München: Hanser.**
- Geiger, R. (2008). Piraterierisiken: State-of-the-Art und eine Systematik zur Identifizierung. Research Paper Nr. 18. Stuttgart.**
- Geiger, R. (2009). Wirtschaftlichkeitsanalyse von Schutzmaßnahmen gegen Produktpiraterie im Maschinenbau. Stuttgart: IPRI Research Paper Nr. 24.**
- Geiger, R. (2009). Wirtschaftlichkeitsanalyse von Schutzmaßnahmen gegen Produktpiraterie im Maschinenbau. Stuttgart: IPRI Reserach Paper Nr. 24.**
- Geiger, R. (2011). Schutzmaßnahmen müssen wirtschaftlich sein. In M. Stephan, & M. J. Schneider, Marken- und Produktpiraterie. Fälscherstrategien, Schutzinstrumente, Bekämpfungsmanagement. Düsseldorf: Symposion Verlag.**
- Gießmann, M. (2010). Komplexitätsmanagement in der Logistik: kausalanalytische Untersuchung zum Einfluss der Beschaffungskomplexität auf den Logistikerfolg. Köln: Josef Eul.**
- Gill, T. G. (2011). Informing with the case method, A guide to case method Research, Writing & Facilitation. Santa Rosa, California: Informing Science Press.**
- Gleißner, W., & Romeike, F. (2005). Risikomanagement. Freiburg im Breisgau: Haufe.**
- Goebel, Elisabeth (2002): Neue Institutionenökonomik. Konzeption und betriebswirtschaftliche Anwendungen. Stuttgart: Lucius & Lucius (Betriebswirtschaftslehre, 2235).**
- Goos, H. (08.. Jan. 2007). Die Spur der Säge. (R. Augstein, Hrsg.) Der Spiegel(2), 231.**
- Götze, U., & Mikus, B. (1999). Strategisches Management. Chemnitz: GUC Verlag.**
- Graebig, K. (2002). Fallbeispiele ISO 9001:2000. Erfahrungen aus der Auditpraxis. . Frankfurt a.M.: DQS GmbH.**
- Grahl, J., & Hübener, G. (21.. Mär. 2006). Arbeitskostenanteil nur 20 Prozent? Abgerufen am 03.. Dez. 2013 von <http://www.sfv.de/lokal/mails/kd/arbeitsk.htm#quelle>**
- Gray, I. H., & Manson, S. (2007). The Audit Process: Principles, Practice and Cases. London: Thomson Learning.**
- Grote, K.-H. (2012). Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau. (J. Feldhusen, Hrsg.) Berlin, Heidelberg: Springer.**

- Günther, C., & Stechemesser, K. (2010). Carbon Controlling. Zeitschrift für Controlling & Management, 54(1), S. 2-5.
- Hallay, H., & Pfriem, R. (1994). Erleichtern Ökobilanzen die Kommunikation über ökologische Folgewirkungen? Informationsdienst des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung e.V.(9), S. 1-3.
- Harrington, H. J. (1991). Business process improvement: The breakthrough strategy for total quality, productivity, and competitiveness. New York : McGraw-Hill.
- Heinze, Stefanie Lena; Wüstenhagen, Rolf (2012): Dynamic Adjustment of Eco-labeling Schemes and Consumer Choice - the Revision of the EU Energy Label as a Missed Opportunity? In: Bus. Strat. Env. 21 (1), S. 60–70. DOI: 10.1002/bse.722.
- Homburg, C., & Krohmer, H. (2003). Marketingmanagement. Strategie, Instrumente, Umsetzung, Unternehmensführung. Wiesbaden : Gabler.
- Homburg, C., & Krohmer, H. (2006). Marketingmanagement. Strategie, Instrumente, Umsetzung, Unternehmensführung. Wiesbaden: Gabler.
- Honton, E. J., Stacey, G. S., & Millett, S. M. (1984). Future Scenarios. The BASICS Computational Method. Columbus.
- Horváth, P. (2011). Controlling. München: Vahlen.
- Horváth, P., & Herter, R. N. (1992). Benchmarking: Vergleich mit den Besten der Besten. Controlling(1), S. 4-11.
- Horváth, P., & Reichmann, T. (2003). Vahlens Großes Controlling Lexikon. München: Franz Vahlen Verlag.
- Horváth, P., Seiter, M., & Isensee, J. (2009). Empfängerorientiertes Reporting für KMU - Stand, Anforderungen, Gestaltungsempfehlungen. In W. Mussnig, G. Mödritscher, & M. Heidenbauer (Hrsg.), Erfolgsstrategien mittelständischer Unternehmen (S. 99-130). Wien: Linde.
- Horváth, Péter; Isensee, Johannes; Michel, Uwe (2012): „Green Controlling“ – Bedarf einer Integration von ökologischen Aspekten in das Controlling. In: Martin Tschandl und Alfred Posch (Hg.): Integriertes Umweltcontrolling: Gabler Verlag, S. 41–50. Online verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-6844-9\\_2](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-6844-9_2).
- IBC WÄLZLAGER GMBH. (2013). Angular Contact Ball Bearings 40°. Abgerufen am 28.. Aug. 2013 von [http://www.ibc-waelzlager.eu/dmdocuments/en2009/IBC\\_Angular\\_Contact\\_Ball\\_Bearings\\_40.pdf](http://www.ibc-waelzlager.eu/dmdocuments/en2009/IBC_Angular_Contact_Ball_Bearings_40.pdf)
- IGM Institut für Getriebetechnik & Maschinendynamik. (25.. Aug. 2006). IGM-Getriebesammlung - Ebene Schubkurbel mit einstellbarer Versetzung. Aachen: Institut für Getriebetechnik & Maschinendynamik, RWTH Aachen. Abgerufen am 25. 11 2013 von <http://www.igm.rwth-aachen.de/getriebemodellsammlung/pdf/Getriebe248.pdf>
- Jacobs, G. (2012). Maschinengestaltung (Bd. 1). Aachen: Schumacher.
- Jacobs, G. (2012). Maschinengestaltung (Bd. 2). Aachen: Schumacher.
- JTEKT EuropeBearings BV. (Sep. 2012). Koyo Prics List 09 2012. Abgerufen am 03.. Nov. 2013 von <http://www.koyo.eu/en/support/media-downloads/category/1-catalogue.html?start=20>

- Kersten, Wolfgang; Becker, Jens; Allonas, Claudia; Berlin, Sebastian (2011): Entwicklung von grünen Logistikdienstleistungen mit einem erweiterten Target Costing Ansatz. In: Controlling - Zeitschrift für erfolgsorientierte Unternehmenssteuerung 23. Jahrgang, S. 443–450.**
- Klein, B. (2012). Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. München: Oldenbourg.**
- Klöpffer, W., & Grahl, B. (2009). Ökobilanz (LCA), Ein Leitfaden Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH.**
- Küpper, H.-U. (2008). Controlling. Konzeptions, Aufgaben, Instrumente (5. überarb. Auflage Ausg.). Stuttgart: Schäffer-Poeschel.**
- Larson, Bruce A. (2003): Eco-labels for credence attributes: the case of shade-grown coffee. In: Envir. Dev. Econ. 8 (3), S. 529–547. DOI: 10.1017/S1355770X0300287.**
- Lindemann, U., Meiwald, T., & al., e. (2012). Know-how-Schutz im Wettbewerb. Berlin, Heidelberg: Springer.**
- Lotter, B. (2012). Montage in der industriellen Produktion : Ein Handbuch für die Praxis. (H.-P. Wiendahl, Hrsg.) Berlin, Heidelberg: Springer.**
- Lundie, S. (1999). Ökobilanzierung und Entscheidungstheorie: Praxisorientierte Produktbewertung auf der Basis gesellschaftlicher Werterhaltungen. Berlin: Springer-Verlag.**
- Maurer, W. (05.. Jan. 2008). <http://systemdesign.ch/>. (idp - Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)) Abgerufen am 25.. Nov. 2013 von <http://systemdesign.ch/index.php/Rechte-Hand-Regel>**
- Maxwell, J. A. (2005). Qualitative Research Design, An Interactive Approach. Thousand Oaks, London, New Delhi: Sage Publications.**
- Meier, M. (2013). Welle-Nabe-Verbindung - Einleitung - Definition, Funktion und Einteilung. Zürich: Digitale Bibliothek ETH Zürich. Von <http://www.diglib.ethz.ch/input/wnv/b004wnvz.gif> abgerufen**
- Mirdamadi, S., Etienne, A., & al., e. (2013). Cost Estimation Method for Variation Management. 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. Paris.**
- Müller-Stewens, G., & Lechner, C. (2001). Strategisches Management. Wie strategische Initiativen zum Wandel führen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.**
- Müller-Wenk, R. (1978). Die ökologische Buchhaltung. Ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik. Frankfurt: Campus.**
- Nagel, T., & Kamusella, A. (kein Datum). Software: OptiY-Workflow - Einfache Toleranzkette. (Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design) Abgerufen am 18.. Sep. 2013 von [http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:\\_OptiY-Workflow\\_-\\_Einfache\\_Toleranzkette](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_OptiY-Workflow_-_Einfache_Toleranzkette)**
- Neemann, C. (2007). Methodik zum Schutz gegen Produktimitationen (Bd. Berichte aus der Produktionstechnik; 13/2007). Aachen: Shaker.**
- Neemann, C. W. (2007). Methodik zum Schutz gegen Produktimitationen: Berichte aus der Produktionstechnik. Aachen: Shaker Verlag.**
- Nelson, Phillip (1970): Information and Consumer Behavior. In: Journal of Political Economy 2 (78), S. 311–329.**

- Niederl-Schmidinger, A., & Naradolowsky, M. (2008).** Life Cycle Assessment as an engineer's tool? *Journal of Cleaner Production*(16), S. 245-252.
- NKE AUSTRIA GmbH. (2012).** Hauptkatalog. Steyr, Austria: NKE AUSTRIA GmbH. Abgerufen am 28. 08 2013 von [http://www.nke.at/fileadmin/user\\_upload/material/brochures/NKE\\_Hauptkatalog\\_General\\_Catalogue.pdf](http://www.nke.at/fileadmin/user_upload/material/brochures/NKE_Hauptkatalog_General_Catalogue.pdf)
- Norm DIN EN ISO 14024:2001,** Februar 2011: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen (Umweltkennzeichnung Typ I) - Grundsätze und Verfahren.
- Norm DIN EN ISO 14025:2011,** Oktober 2011: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren.
- Norm DIN EN ISO 14021,** April 2012: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II).
- Norm EN 1822-1:2011,** Januar 2011: Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung;
- Norm EN 779:2012,** Oktober 2012: Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik - Bestimmung der Filterleistung.
- Norm ISO 12500: Filters for compressed air - Methods of test.**
- Norm ISO 8573: Compressed air -- Part 1-Part 4.**
- Pahl, G., Beitz, W., & al., e. (2013).** Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Porter, M. E. (2004).** Competitive Strategy. New York u.a.: Free Press.
- Product Group 4B (2014): Energy Efficiency Classification of Air Filters for General Ventilation Purposes.** Hg. v. Eurovent Association. Online verfügbar unter [http://www.eurovent-association.eu/fic\\_bdd/document\\_en\\_fichier\\_pdf/Eurovent%204.11\\_13922816520.pdf](http://www.eurovent-association.eu/fic_bdd/document_en_fichier_pdf/Eurovent%204.11_13922816520.pdf).
- Rbayti, A. (11 2013).** Druckluftfiltration und die Norm ISO 12500. Chemie Technik.
- Rosenkranz, F., & Mißler-Behr, M. (2005).** Unternehmensrisiken erkennen und managen: Einführung in die quantitative Planung. Berlin, Heidelberg.
- Roth, K. (2001).** Konstruieren mit Konstruktionskatalogen (Bd. 2). Berlin: Springer.
- Ruppelt, E. (2003).** Druckluft-Handbuch (4 Ausg.). Essen: Vulkan-Verlag GmbH.
- Rüth, D. (2013).** Kostenrechnung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Sammer, Katharina; Wüstenhagen, Rolf (2006):** The Influence of Eco-Labeling on Consumer Behaviour. Results of a Discrete Choice Analysis for Washing Machines. In: *Business Strategy and the Environment* 3 (15), S. 185–199. Online verfügbar unter <https://www.alexandria.unisg.ch/Publikationen/4941>.
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG. (Feb. 2012).** Preisliste 2012-02. Abgerufen am 03.. Nov. 2013 von [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/catalogue\\_1/downloads\\_6/prs.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/prs.pdf)
- Schäfer, F., & van Basshuysen. (2005).** Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Wiesbaden: Vieweg.
- Schaltegger, S., & Sturm, A. (2000).** Ökologieorientierte Entscheidungen in Unternehmen Ökologisches Rechnungswesen statt Ökobilanzierung: Notwendigkeit, Kriterien, Konzepte. Basel.

- Schmidt, M. (2010). Carbon Accounting zwischen Modeerscheinung und ökologischem Verbesserungsprozess. Zeitschrift für Controlling & Management, 54(1), S. 32-37.
- Schnapauff, K. (2010). Präventiver Nachahmungsschutz bei technischen Produkten - für industrielle oder professionelle Anwendungen. München: TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG.
- Schnell, R., Hill, P. B., & Esser, E. (2005). Methoden der empirischen Sozialforschung. München, Wien: Oldenbourg Verlag.
- Schröder, C. (Sep. 2012). Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich. IW-Trends Heft 2012/3: Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln(03/2012), S. 116.
- Seliger, G. (2012). Sustainable Manufacturing: Shaping Global Value Creation. New York/Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sepp, V. (2005). Wirtschaft – Das IHK-Magazin. Abgerufen am 12. 09 2008 von Gefährliche Kopien – Produktpiraterie: [http://www.muenchen.ihk.de/internet/mike/WirUeberUns/ihk\\_magazin/112005/Politik\\_und\\_Standort/name.html](http://www.muenchen.ihk.de/internet/mike/WirUeberUns/ihk_magazin/112005/Politik_und_Standort/name.html)
- Siegenthaler, C. P. (2006). Ökologische Rationalität durch Ökobilanzierung: Eine Bestandsaufnahme aus historischer, methodischer und praktischer Perspektive. Marburg: Metropolis-Verlag für Ökonomie, Gesellschaft und Politik GmbH.
- SKF GmbH. (2008). Hauptkatalog - Das Wälzlagerhandbuch für Studenten. Schweinfurt: SKF Gruppe.
- SKF GmbH. (2012). Price list € 2012. Abgerufen am 03.. Nov. 2013 von <http://www.skf.com/files/885008.pdf>
- Spotts, M. F. (Aug. 1973). Allocation of Tolerances to Minimize Cost of Assembly. Journal of Engineering for Industry, S. 762-764.
- Statistisches Bundesamt. (2005). Produzierendes Gewerbe - Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden, 2003. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Steland, A. (2013). Basiswissen Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Stephan, M., & Schneider, M. (2011). Marken- und Produktpiraterie - Fälscherstrategien, Schutzinstrumente, Bekämpfungsmanagement. Düsseldorf: Symposion.
- Stichnothe, H., & von Thünen, J.-H. (2009). Carbon Footprint, Der britische "Standard" PAS 2050 im Spiegel der Ökobilanz-Methodik und weitere Normierungsbestrebungen. In S. Feifel, Ökobilanzierung 2009, Ansätze und Weiterentwicklungen zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit (S. 39-43). Tagungsband Ökobilanz-Werkstatt.
- Strebel, H. (1974). Relevanzbäume als Planungsinstrument. BfuP, Jg. 26, S. 34-52.
- Sundmacher, T. (2002). Das Umweltinformationsinstrument Ökobilanz (LCA): Anwendungsbezug und instrumentelle Ausgestaltungsmöglichkeiten. Frankfurt am Main: Peter Lang - Internationaler Verlag der Wissenschaften.

- Swoboda, P. (1993). Kosten-Nutzen-Analysen. In W. Lück (Hrsg.), Lexikon der Betriebswirtschaft, 5. Auflage. Landsberg a. L.**
- Todd, J., & Curran, M. (1999). Streamlined Life-Cycle Assessment. A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup. Brüssel.**
- Töpfer, A. (1976). Planungs- und Kontrollsysteme industrieller Unternehmen. Berlin: Duncker & Humblot.**
- Töpfer, A. (1976). Planungs- und Kontrollsysteme industrieller Unternehmen. Berlin: Duncker & Humblot.**
- Union des Fabricants. (2003). Counterfeiting and Organized Crime. Paris : Union des Fabricants.**
- VDMA. (2008). VDMA-Untersuchung. Produkt- und Markenpiraterie in der Investitionsgüterindustrie.**
- VDMA. (2012). VDMA Studie Produktpiraterie 2012. Frankfurt am Main: VDMA.**
- VDMA. (2013). Statistisches Handbuch für den Maschinenbau. Frankfurt/M.: VDMA.**
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.: Druckluftqualität – Teil 1: Typische Reinheitsklassen gemäß ISO 8573-1 und Anleitungen zur Erzeugung, Aufbereitung und Überwachung von Druckluft. Vorgesehen als Ersatz für VDMA 15390:2004-03. Online verfügbar unter [http://www.vdma.org/documents/105628/2244593/Entwurf%20VDMA%2015390-1\\_2013-11.pdf/cba60fde-1a72-4a0c-a48d-9bb566b552e5](http://www.vdma.org/documents/105628/2244593/Entwurf%20VDMA%2015390-1_2013-11.pdf/cba60fde-1a72-4a0c-a48d-9bb566b552e5), zuletzt geprüft am 19.09.2014.**
- Verein Deutscher Ingenieure. (2003). VDI 2230 - Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen. Berlin: Beuth.**
- Vester, F. (1999). Die Kunst vernetzt zu denken. Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. München: Deutscher Taschenbuch Verlag.**
- Wegener, E. (2003). Montagegerechte Anlagenplanung. Weinheim: WILEY-VCH Verlag.**
- Weimer-Jehle, W. (2010). Einführung in die qualitative System- und Szenarioanalyse mit der Cross-Impact-Bilanzanalyse. Methodenblätter zur Cross-Impact-Bilanzanalyse Blatt Nr. 1, S. 1-12.**
- Weimer-Jehle, W. (2012). ScenarioWizard 4.0. Programm zur qualitativen System- und Szenarioanalyse mit der Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB). Bedienungsanleitung. Universität Stuttgart: ZIRIUS.**
- Westkämper, E. (2006). Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer.**
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2007). A Definition of 'Carbon Footprint'. ISA UK Research Report(1).**
- Wiedmann, T.; Minx, J. (2007): A Definition of 'Carbon Footprint'. ISA Research Report. In: Carolyn C. Pertsova (Hg.): Ecological economics research trends. New York: Nova Science Publishers.**
- Wildemann, H., Ann, C., & al., e. (2006). Plagiatschutz - Handlungsspielräume der produzierenden Industrie gegen Produktpiraterie. München.**
- Wildemann, H., Ann, C., & al., e. (2007). Plagiatschutz - Handlungsspielräume der produzierenden Industrie gegen Produktpiraterie. München: TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG.**

- Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D., & Voßiek, J. (2013). Roloff /Matek - Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung. Wiesbaden: Springer Vieweg.**
- Yin, R. K. (2009). Case Study Research, Design and Methods. Thousand Oaks: Sage Publications.**

## **VI Anhang**

Nachfolgend finden Sie alle Projektergebnisse nach Arbeitspaket sortiert: