

Die

# Lebensweg- Vorfallanalyse

Methode zur Quantifizierung der Auswirkungen  
nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände  
auf Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit  
über den Lebensweg von Produkten

Marc-Andree Wolf

Dissertation

Universität Stuttgart

Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik

2014

Diese Dissertationsschrift ist kostenlos erhältlich in elektronischer Form über die Universitätsbibliothek Stuttgart, sowie über den Autor. Alle weiteren Rechte liegen beim Autor.

Kontakt: [Marc-Andree.Wolf@maki-consulting.com](mailto:Marc-Andree.Wolf@maki-consulting.com)

Umschlag gestaltet unter Verwendung von Grafiken von Andrej Kaprinay/Bigstock.com

# **Die Lebensweg-Vorfallanalyse**

**Methode zur Quantifizierung der Auswirkungen nicht  
bestimmungsgemäßer Betriebszustände auf Mensch, Umwelt und  
Ressourcenverfügbarkeit über den Lebensweg von Produkten**

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung**

**von**

**Marc-Andree Wolf**

**aus Bremen**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eyerer  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. pol. Dipl.-Ing. Meike Tilebein  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath

Tag der mündlichen Prüfung: 3. April 2014

Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) der Universität Stuttgart

2014

# Danksagung

Die Grundlage zur vorliegenden Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi) am damaligen Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) der Universität Stuttgart. Während meiner knapp 7-jährigen Mitarbeit am *Joint Research Centre* der Europäischen Kommission haben die Arbeiten am Dissertationsvorhaben weitgehend geruht und erst ab 2012 konnte ich das Thema wieder aufgreifen und nach methodischer Weiterentwicklung und Aktualisierung des Standes der Technik und des Wissens zu einem erfolgreichen Abschluss bringen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eyerer danke ich herzlichst für die wohlwollende und volle Unterstützung, die Gewährung der wissenschaftlichen Freiheit bei der Umsetzung der Arbeit und die wertvollen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben, sowie für die Übernahme des Hauptberichtes.

Frau Prof. Dr. rer. pol. Dipl.-Ing. Meike Tilebein und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath danke ich sehr für ihre Bereitschaft, den Mitbericht zu übernehmen.

Weiterhin danke ich allen damaligen und derzeitigen Mitarbeitern der Abteilung GaBi – die inzwischen am Lehrstuhl für Bauphysik (LBP) erfolgreich fortgeführt wird – für die kollegiale und offene Zusammenarbeit und die wichtigen Diskussionen. Insbesondere danke ich Herrn Matthias Fischer sowie Frau Anna Braune für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Frau Lea Schädel danke ich für das Korrektorat.

Zudem danke ich besonders meiner Frau Kirana für kritische Fachdiskussionen sowie – auf privater Ebene – ihre tatkräftige und moralische Unterstützung während meiner Fertigstellung der Ausarbeitung.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die es mir finanziell erlaubt haben, mich derzeit voll auf mein Studium zu konzentrieren und die mich bei meinen beruflichen Entscheidungen immer unterstützt haben. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

• • •

Das Wissen ist endlos. Deshalb übertrifft derjenige, der sehr viel weiß, unendlich wenig denjenigen, der sehr wenig weiß. (Leo Tolstoi, 1828 bis 1910)

# Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG .....	II
TABELLENVERZEICHNIS .....	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	IX
ABKÜRZUNGS- UND EINHEITENVERZEICHNIS.....	XI
GLOSSAR .....	XV
MATHEMATISCHE FORMELZEICHEN .....	XXIX
ZUSAMMENFASSUNG UND <i>ABSTRACT</i> .....	XXXIII
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 ZUR RELEVANZ VON VORFÄLLEN FÜR MENSCH UND UMWELT .....	1
1.2 MOTIVATION DER METHODENENTWICKLUNG .....	2
<b>2 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE .....</b>	<b>7</b>
2.1 ZIELSETZUNG .....	7
2.2 VORGEHENSWEISE UND STRUKTUR DIESER ARBEIT.....	8
<b>3 METHODISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>9</b>
3.1 ÖKOBILANZIERUNG .....	9
3.1.1 Kurzcharakterisierung.....	9
3.1.2 Anwendungsbereiche .....	16
3.1.3 DALY – Behinderungs-angepasste Lebensjahre.....	18
3.2 QUANTITATIVE RISIKOANALYSE (QRA) .....	21
3.2.1 Kurzcharakterisierung.....	21
3.2.2 Anwendungsbereiche .....	22
3.2.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisablaufanalyse.....	23
3.2.4 Wesentliche Begriffe der QRA .....	27
<b>4 STAND DER TECHNIK UND DES WISSENS .....</b>	<b>31</b>
4.1 KAPITELÜBERSICHT .....	31
4.2 ERFASSUNG UNFALLBEDINGTER TOTER UND VERLETZTER IN ÖKOBILANZIERUNG, LEBNSWEG-ARBEITSUMFELDANALYSE, SOZIAL- ÖKOBILANZIERUNG UND NACHHALTIGKEITSBILANZIERUNG (DIVERSE AUTOREN 1989 BIS 2013) .....	32
4.3 <i>HAZARD ASSESSMENT APPROACH</i> - ERFASSUNG UNFALLBEDINGTER STOFFFREISETZUNGEN NACH [PIRHONEN 1995] .....	35
4.4 <i>LIFE CYCLE INVENTORY ANALYSIS OF CHEMICAL PROCESSES</i> - LEBNSWEGINVENTARANALYSE CHEMISCHER PROZESSE [AELION ET AL. 1995] .....	36
4.5 BERUFLICHE GESUNDHEITSRISIKEN AUS UNFÄLLEN UND BERUFSKRANKHEITEN IM ENERGIESYSTEMLEBENSZYKLUS NACH [KREWITT 1996] .....	37
4.6 <i>SEVERE ACCIDENT RISKS</i> - METHODE FÜR DIREKTE PERSONENSCHÄDEN IM LEBENSZYKLUS VON ENERGIETRÄGERN NACH [HIRSCHBERG ET AL. 1998] BIS [BURGHERR ET AL. 2012] .....	39
4.7 <i>FIRE-LCA-MODEL</i> - METHODE ZUR ERFASSUNG VON EMISSIONEN AUS FEUERN WÄHREND DER PRODUKTNUTZUNG NACH [SIMONSON ET AL. 1998] UND [ANDERSSON ET AL. 2005].....	41
4.8 <i>LIFE CYCLE RISK ASSESSMENT (LCRA)</i> - FÜR DIE ERFASSUNG VON RISIKEN ÜBER DEN PRODUKTLEBENSWEG VON [AISSANI ET AL. 2012] .....	42
4.9 DISKUSSION DES STANDES DER TECHNIK.....	44
4.9.1 Kapitelübersicht.....	44
4.9.2 Erfassung unfallbedingter Toter und Verletzter in Ökobilanzierung, Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, Sozial-Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbilanzierung (diverse Autoren 1989 bis 2013) .....	44
4.9.3 <i>Hazard assessment approach</i> - Erfassung unfallbedingter Stofffreisetzung nach [Pirhonen 1995] .	45
4.9.4 <i>Life Cycle Inventory Analysis of Chemical Processes</i> – Lebensweginventaranalyse chemischer Prozesse [Aelion et al. 1995].....	46

4.9.5	Berufliche Gesundheitsrisiken aus Unfällen und Berufskrankheiten im Energiesystemlebenszyklus nach [Krewitt 1996] .....	47
4.9.6	<i>Severe Accident Risks</i> - Methode für direkte Personenschäden im Lebenszyklus von Energieträgern nach [Hirschberg et al. 1998] bis [Burgherr et al. 2012] .....	48
4.9.7	<i>Fire-LCA-Model</i> - Methode zur Erfassung von Emissionen aus Feuern während der Produktnutzung nach [Simonson et al. 1998] und [Andersson et al. 2005] .....	49
4.9.8	<i>Life Cycle Risk Assessment (LCRA)</i> - Methode für die Erfassung von Risiken über den Produktlebensweg von [Aissani et al. 2012] .....	50
<b>4.10</b>	<b>BISHER FEHLENDE SOWIE WEITERZUENTWICKELNDE METHODENELEMENTE .....</b>	<b>51</b>
4.10.1	Kapitelübersicht .....	51
4.10.2	Abgrenzung Vorfall (= nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand) vom bestimmungsgemäßen Betriebszustand .....	53
4.10.3	Erweiterung von Unfällen zu Vorfällen .....	54
4.10.4	Qualitative Zuordnung von Vorfällen zu Prozessen .....	54
4.10.5	Quantitative Zuordnung von multikausalen Vorfällen .....	55
4.10.6	Quantitative Zuordnung bei unterschiedlicher Granularität Vorfall und Modul .....	55
4.10.7	Quantitative Zuordnung bei Nutzung sowohl detaillierter QRA-Studien als auch aggregierter Vorfalldaten und -statistiken .....	55
4.10.8	Differenzierung des Zuordnungsansatzes je nach Zielsetzung der LVA-Studie .....	56
4.10.9	Modellierung von Vorfällen in <i>attributional</i> und <i>consequential</i> Studien .....	56
4.10.10	Kombination zu einer Methodik .....	56
<b>4.11</b>	<b>DATENSITUATION .....</b>	<b>57</b>
4.11.1	Einleitung .....	57
4.11.2	Ökobilanzdatenbanken .....	57
4.11.3	QRA-Studien, FBA und EEA .....	58
4.11.4	Vorfalldatenbanken und -statistiken .....	60
<b>5</b>	<b>METHODE DER LEBENSWEG-VORFALLANALYSE (LVA) .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>KAPITELÜBERSICHT .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>ÜBERGEORDNETE METHODISCHE FESTLEGUNGEN .....</b>	<b>66</b>
5.2.1	Kapitelübersicht .....	66
5.2.2	Grundansatz zur Erfassung von Vorfallauswirkungen über den Lebensweg von Produkten .....	66
5.2.3	Abgrenzung Vorfall (= nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand) und bestimmungsgemäßer Betriebszustand .....	69
5.2.4	Unterschiedliche Vorfalltypen .....	71
5.2.5	Abgrenzung der LVA von angrenzenden, lebenswegbasierten Methoden .....	73
<b>5.3</b>	<b>ZIELDEFINITION .....</b>	<b>75</b>
<b>5.4</b>	<b>ABLEITUNG DES UNTERSUCHUNGSRAHMENS .....</b>	<b>76</b>
5.4.1	Kapitelübersicht .....	76
5.4.2	Methodischer Rahmen der Vorfallmodellierung .....	77
5.4.3	Qualitative Zuordnung des Vorfalls zu den vorfallbeteiligten Prozessen und Modulen .....	78
5.4.4	Behandlung multikausaler Vorfälle und komplexer Vorfälle .....	81
5.4.5	Quantitative Zuordnung des Vorfalls zu den vorfallbeteiligten Prozessen .....	83
5.4.6	Quantitative Abschneidekriterien .....	95
5.4.7	Anbindung der Vorfallsachinventare an die Wirkungsanalyse .....	96
<b>5.5</b>	<b>VORFALLSACHBILANZ .....</b>	<b>99</b>
5.5.1	Kapitelübersicht .....	99
5.5.2	Einheitsvorfall - Datensammlung und Modellierung .....	102
5.5.3	Vorfallsystem – Datensammlung und Modellierung .....	113
5.5.4	Durchschnittsbildung und Vorfallsachbilanz-Ergebnisse .....	120
5.5.5	Lösen der Multifunktionalität von Prozessen bei <i>attributional</i> Modellierung .....	123
<b>5.6</b>	<b>WIRKUNGSABSCHÄTZUNG .....</b>	<b>125</b>

5.7	AUSWERTUNG.....	126
5.8	BERICHTERSTATTUNG UND DOKUMENTATION .....	127
5.9	KRITISCHE PRÜFUNG.....	129
<b>6</b>	<b>EXEMPLARISCHE ERPROBUNG DER METHODE.....</b>	<b>131</b>
6.1	ANSATZ DER METHODENERPROBUNG.....	131
6.2	ANWENDUNGSBEISPIEL ZUCKERSTAUBEXPLOSION – BASIERT AUF FEHLERBAUM UND HISTORISCHEM UNFALLBERICHT .....	131
6.2.1	Einleitung.....	131
6.2.2	Zielsetzung.....	132
6.2.3	Untersuchungsrahmen .....	132
6.2.4	Vorfallsachbilanz.....	133
6.2.5	Wirkungsabschätzung.....	149
6.2.6	Auswertung.....	152
6.3	VARIANTE DES ZUCKERSTAUBEXPLOSIONSBEISPIELS – QUANTITATIVE ZUORDNUNG MULTIKAUSALER VORFÄLLE ZU EINZELNEN VORFALLBETEILIGTEN PROZESSEN UND PRODUKTEN .....	152
6.4	ANWENDUNGSBEISPIEL „ATTENTATE AUF ROHÖLFÖRDEREINRICHTUNGEN“ .....	164
6.4.1	Einleitung.....	164
6.4.2	Zielsetzung.....	164
6.4.3	Untersuchungsrahmen .....	164
6.4.4	Vorfallsachbilanz.....	165
6.4.5	Wirkungsabschätzung und Auswertung .....	168
<b>7</b>	<b>DISKUSSION DER METHODE .....</b>	<b>171</b>
<b>8</b>	<b>AUSBlick .....</b>	<b>175</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>179</b>
<b>ANHANG A</b>	<b>DISKUSSION: ZWECKMÄßIGKEIT DER IN DIESER ARBEIT VORGESTELLTEN DEFINITION „NICHT BESTIMMUNGSGEMÄßER BETRIEBZUSTAND“ (= VORFALL).....</b>	<b>198</b>
<b>ANHANG B</b>	<b>WEITERE METHODISCHE DETAILS ZUM VERBESSERUNGSPOTENZIAL-ANSATZ .....</b>	<b>200</b>
<b>ANHANG C</b>	<b>DISKUSSION: ART DER INVENTARWERTE/INDIKATOREN FÜR VORFÄLLE .....</b>	<b>203</b>
<b>ANHANG D</b>	<b>KORREKTURFAKTOREN DER UNFALLSCHWERE UND EINTRITTSHÄUFIGKEIT .....</b>	<b>206</b>
<b>ANHANG E</b>	<b>BERICHTERSTATTUNG – ELEMENTE UND GLIEDERUNG .....</b>	<b>207</b>
<b>ANHANG F</b>	<b>BEHINDERUNGSGEWICHTUNGS- UND LEBENSERWARTUNGSTABELLEN .....</b>	<b>213</b>
<b>ANHANG G</b>	<b>NUTZUNG DER LVA ZUR BEWERTUNG VON UNFALLVERMEIDUNGS- UND -MINDERUNGSTECHNOLOGIEN.....</b>	<b>217</b>
<b>ANHANG H</b>	<b>VORFALLSACHBILANZ- UND -WIRKUNGSABSCHÄTZUNGS- ERGEBNISSE DES FALLBEISPIELS ZUCKERSTAUBEXPLOSION.....</b>	<b>219</b>
<b>ANHANG I</b>	<b>LEBENS LAUF .....</b>	<b>259</b>





## Tabellenverzeichnis

TAB. 1	UNTERGLIEDERUNG VON VORFÄLLEN IN VERSCHIEDENE TYPEN ANHAND WICHTIGER CHARAKTERISTIKA UND MANAGEMENT-ZUSTÄNDIGKEITEN.....	71
TAB. 2	ZUORDNUNGSFAKTOREN FÜR DIE VORFALLBETEILIGTEN PRIMÄRAUSFÄLLE (UND DAMIT DEREN PROZESSE/MODULE) ANHAND FORMEL (I) FÜR DAS FEHLERBAUMBEISPIEL AUS ABB. 9. ....	89
TAB. 3	METHODISCHE FESTLEGUNG DES ANZUWENDENDEN ZUORDNUNGSANSATZES IN ABHÄNGIGKEIT DER ZIELSETZUNG DER LVA-STUDIE, ANFORDERUNGEN AN DIE MEHRFACHZÄHLUNG, ZUORDNUNGSREGELN. ....	93
TAB. 4	DETAILINFORMATIONEN ZU DEN TOTEN UND VERLETZTEN DER PORT WENTWORTH ZUCKERSTAUB-EXPLOSION UND FEUER VOM FEBRUAR 2008. ....	137
TAB. 5	VORFALLSACHBILANZ-ERGEBNIS DES VORFALLSYSTEMS „ZUCKERSTAUBEXPLOSION PORT WENTWORTH FEB. 2008“, AUSZUG.....	143
TAB. 6	GEGENÜBERSTELLUNG SACHBILANZ- UND VORFALLSACHBILANZ-ERGEBNIS JE 1 KG KRISTALLZUCKER USA, AUSZUG.....	146
TAB. 7	FEHLERBAUMAUSWERTUNG DES FEHLERBAUMS VON [ABUSWER 2012].....	155
TAB. 8	FEHLERBAUMAUSWERTUNG DES ANGEPASSTEN FEHLERBAUMS. ....	161
TAB. 9	EMISSIONEN IN DIE UMWELT AUS DEN BRENNENDEN ÖLQUELLEN IN KUWAIT VON JANUAR BIS NOVEMBER 1991. ....	167
TAB. 10	BEHINDERUNGSGEWICHTE AUSGEWÄHLTER VERLETZUNGEN EINSCHLIEßLICH VERGIFTUNGEN UND VERBRENNUNGEN. ....	213
TAB. 11	LEBENSERWARTUNGSTABELLE IN ABHÄNGIGKEIT DES ERREICHTEN LEBENSALTERS. ....	215
TAB. 12	VORFALLSACHBILANZ-ERGEBNIS DES VORFALLSYSTEMS „ZUCKERSTAUBEXPLOSION PORT WENTWORTH FEB. 2008“. ....	219
TAB. 13	WIRKUNGSABSCHÄTZUNGS-ERGEBNISSE UND VORFALLWIRKUNGSABSCHÄTZUNGS-ERGEBNISSE AUS ZUCKERSTAUBEXPLOSIONEN WÄHREND ZUCKERZWISCHENLAGERUNG UND -VERPACKUNG JE 1 KG VERPACKTER KRISTALLZUCKER. ....	257



## Abbildungsverzeichnis

ABB. 1.	BEISPIELE FÜR VORFÄLLE, ILLUSTRATIV.....	1
ABB. 2.	HAUPTSCHRITTE DER VORLIEGENDEN ARBEIT UND KORRESPONDIERENDE KAPITEL, SCHEMATISCH. ....	8
ABB. 3.	LEBENSWEG EINES PRODUKTES, SCHEMATISCH, VEREINFACHT.....	10
ABB. 4.	DAS (PROZESS-)MODUL – GRUNDBAUSTEIN DER ÖKOBILANZIERUNG, SCHEMATISCH.....	11
ABB. 5.	UMWELTMECHANISMEN DER WIRKUNGSMODELLE AM BEISPIEL TREIBHAUSEFFEKT/GLOBALE KLIMAVERÄNDERUNG, SCHEMATISCH, VEREINFACHT.. ....	13
ABB. 6.	WIRKANALYSE – VON DEN UMWELTBELASTUNGEN ÜBER WIRKPOTENZIALE ZU SCHÄDEN/WIRKUNGEN, SCHEMATISCH.. ....	14
ABB. 7.	RAHMEN DER ÖKOBILANZIERUNG.. ....	14
ABB. 8.	ABLAUF EINER ÖKOBILANZ MIT FOKUS AUF DIE SACHBILANZ.. ....	15
ABB. 9.	BEISPIEL FÜR EIN FEHLERBAUMDIAGRAMM.....	24
ABB. 10.	ILLUSTRATIVES BEISPIEL EINER EREIGNISABLAUFAUSWERTUNG – CHEMISCHER REAKTOR MIT KÜHLUNGSVERLUST.. ....	26
ABB. 11.	F-N-KURVE UND AKZEPTABLE GESELLSCHAFTLICHE RISIKEN AM BEISPIEL HONGKONG.. ....	29
ABB. 12.	ABLAUF DER LVA-METHODIK UND ZUGEHÖRIGE UNTERKAPITEL. ....	64
ABB. 13.	PROZESSNETZ DES PRODUKTLEBENSWEGES DER ÖKOBILANZIERUNG (LINKS), QRA-MODELLE, VORFALLDATENBANKEN, VORFALLBERICHTE UND ANDERE INFORMATIONQUELLEN FÜR VORFÄLLE (RECHTS) UND DIE STAFFELN DER HIER NEU EINGEFÜHRTE VORFALLSYSTEME (MITTE), SCHEMATISCH.. ....	68
ABB. 14.	HAUPTSCHRITTE DER ZIELDEFINITION IN DER LVA, IDENTISCH ZUR ÖKOBILANZIERUNG. ....	75
ABB. 15.	HAUPTSCHRITTE DER ABLEITUNG DES UNTERSUCHUNGSRAHMENS IN DER LVA'. ....	76
ABB. 16.	FORMEN VON MONO- UND MULTIKAUSALITÄT.....	82
ABB. 17.	POTENZIELLE MEHRFACHZÄHLUNG INNERHALB DES PRODUKTSYSTEMS A (MODULE A1 UND A2 SIND VORFALLBETEILIGT AM SELBEN VORFALL 1) UND ZWISCHEN PRODUKTSYSTEMEN A UND B (MODULE A2 UND B2 SIND VORFALLBETEILIGT AM SELBEN VORFALL 2), SCHEMATISCH. ....	84
ABB. 18.	HAUPTSCHRITTE DER VORFALLSACHBILANZ IN DER LVA.....	100
ABB. 19.	ABLAUFDIAGRAMM DER VORFALLSACHBILANZ EINES VORFALLS.. ....	101
ABB. 20.	EINHEITSVORFALL, SCHEMATISCH.. ....	109
ABB. 21.	VORFALL/EREIGNIS UND MODUL HABEN DIESELBE GRANULARITÄT. ....	111
ABB. 22.	VORFALL HAT EINE GERINGERE GRANULARITÄT ALS DAS MODUL.....	111
ABB. 23.	VORFALL/EREIGNIS HAT EINE HÖHERE GRANULARITÄT ALS DAS MODUL.. ....	112
ABB. 24.	VORFALLSYSTEM MIT EINHEITSVORFÄLLEN, PRODUKTSYSTEMEN INNERHALB DES VORFALLSYSTEMS, EREIGNISSEN, INTERVENTIONEN MIT DER UMWELT (EMISSIONEN, RESSOURCENENTNAHME UND -INANSPRUCHNAHME) SOWIE DIREKTEN PERSONENSCHÄDEN (EINSCHLIEßLICH VORFALLBEDINGTER BERUFSKRANKHEITEN), SCHEMATISCH.. ....	115
ABB. 25.	WICHTIGSTE STUFEN VERTIKALER AGGREGATION VOM VORFALLSYSTEM BIS ZUM VORFALLSACHBILANZ-ERGEBNIS DES UNTERSUCHTEN PRODUKTSYSTEMS, SCHEMATISCH.. ....	121
ABB. 26.	HAUPTSCHRITTE DER WIRKUNGSABSCHÄTZUNG IN DER LVA.. ....	125
ABB. 27.	HAUPTSCHRITTE DER AUSWERTUNG IN DER LVA. ....	127
ABB. 28.	HAUPTSCHRITTE DER BERICHTERSTATTUNG UND DOKUMENTATION IN DER LVA.....	128
ABB. 29.	WESENTLICHE ELEMENTE DER KRITISCHEN PRÜFUNG IN DER LVA.....	129
ABB. 30.	IMPERIAL SUGAR RAFFINERIE IN PORT WENTWORTH, GEORGIA, USA, NACH DEN ZUCKERSTAUBEXPLOSIONEN UND FOLGEBRÄNDEN VOM 7. FEBRUAR 2008. ....	133
ABB. 31.	LEBENSWEG DES KRISTALLZUCKERS, SCHEMATISCH. ....	141
ABB. 32.	„VORFALLSYSTEM ZUCKERSTAUBEXPLOSION ...“, EMULIERT IN GABI ÖKOBILANZSOFTWARE. ....	142
ABB. 33.	ZENTRALER EINHEITSVORFALL „US: EINHEITSVORFALL ...“, MODELLIERT IN GABI ÖKOBILANZSOFTWARE. ....	142
ABB. 34.	RELATIVE ANTEILE DER BEITRÄGER IM VORFALLSYSTEM ZU DEN MENGEN AUSGEWÄHLTER EMISSIONEN IN LUFT.. ....	144

ABB. 35. BEITRÄGER ZU DEN AUSWIRKUNGEN AUF DEN MENSCHEN AUS ZUCKERSTAUBEXPLOSIONEN WÄHREND ZUCKERZWISCHENLAGERUNG UND -VERPACKUNG, IN DALY AUS AUSGEWÄHLTEN WIRKKATEGORIEN UND JE 1 KG VERPACKTER KRISTALLZUCKER. ....	150
ABB. 36. WIRKUNGSABSCHÄTZUNGS-ERGEBNISSE (BLAU) UND VORFALLWIRKUNGSABSCHÄTZUNGS-ERGEBNISSE (ROT) JE 1 [KG] VERPACKTER KRISTALLZUCKER, AUSZUG.. ....	151

## Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis

a	Jahr, $3,15576 \cdot 10^7$ [s], Einheit
ALARP Prinzip	„So niedrig wie vernünftigerweise praktikabel“ Prinzip („As Low As Reasonably Practicable“)
ARIA	Staatliche Französische Unfall-Datenbank ARIA ( <i>Analyse, Recherche et Informations sur les Accidents</i> )
Bq	Becquerel, Einheit
CRA	Vergleichende Risikoanalyse ,Methodenfamilie ( <i>Comparative Risk Assessment</i> )
CSB	US Chemikaliensicherheits-Kommission ( <i>US Chemical Safety Board</i> )
d	Tag, 86.400 [s], Einheit
DALY	Behinderungsbereinigte Lebensjahre, Größe, in [a] ( <i>Disability-adjusted Life Years</i> )
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAA	Ereignisablaufanalyse
EC	Europäische Kommission ( <i>European Commission</i> )
EDIP	Umweltliches Design industrieller Produkte, Forschungsinstitut ( <i>Environmental Design of Industrial Products</i> )
EHS	Umwelt, Gesundheit und Sicherheit ( <i>Environment, Health and Safety</i> )
ELCD	Europäische Referenz-Lebenswegdatenbank ( <i>European Reference Life Cycle Database</i> )
EN	Europäisches Komitee für Normung ( <i>European Committee for Standards</i> )
ENSAD	<i>Ecole nationale supérieure des arts décoratifs</i> , Französische Universität
EU	Europäische Union
FBA	Fehlerbaumanalyse ( <i>Fault Tree Analysis</i> )
FMEA	Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse, vormals Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse ( <i>Failure Mode and Effects Analysis</i> )
GaBE	Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen, Schweizerische Projekt und Arbeitsgruppe
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung, Methode und Arbeitsgruppe an der Universität Stuttgart
h	Stunde, 3.600 [s], Einheit
IKP	(ehemaliges) Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart
ILCD	Internationales Referenz-Lebenswegdatensystem, Methodenrahmen ( <i>International Reference Life Cycle Data System</i> )

ILO	Internationale Arbeitsorganisation ( <i>International Labour Organisation</i> )
IPCC	Zwischenstaatliches Expertengremium für Klimaänderungen ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
IPP	Integrierte Produktpolitik ( <i>Integrated Product Policy</i> )
ISO	Internationale Organisation für Normung ( <i>International Standards Organisation</i> )
IVF	Swerea IVF, Schwedisches Forschungsinstitut ( <i>Swerea IVF - Institutet för Verkstadsteknisk Forskning</i> )
IVL	Schwedisches Umweltforschungsinstitut ( <i>Svenska Miljöinstitutet</i> )
kg	Kilogramm, 1.000 [g], Einheit
km	Kilometer, 1.000 [m], Einheit
l	Liter, 0,001 [m <sup>3</sup> ], Einheit
LCA	Ökobilanzierung, Methodenrahmen (auch Lebensweganalyse, Lebenszyklusanalyse; <i>Life Cycle Assessment</i> )
LCIA	Wirkungsabschätzung in der Ökobilanzierung, Abschnitt der Ökobilanzierung ( <i>Life Cycle Impact Assessment</i> )
LC-Impact	Projekt zur Entwicklung von Methoden der Ökobilanzierungs-Wirkungsabschätzung ( <i>Life Cycle Impact assessment Methods for imProved sustAinability Characterisation of Technologies</i> )
LCRA	Lebensweg-Risikoanalyse, Methodenfamilie ( <i>Life Cycle Risk Assessment</i> )
LCSA	Lebensweg-Nachhaltigkeitsanalyse, Methodenfamilie ( <i>Life Cycle Sustainability Assessment</i> )
LCWT	Lebensweg-Arbeitszeitanalyse, Methode ( <i>Life Cycle Working Time</i> )
LIME	Wirkungsabschätzungs-Methode auf Basis von Schadensmodellierung, Methode ( <i>Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling</i> )
LKW	Lastkraftwagen
LOC	Sauerstoffgrenzkonzentration, SGK ( <i>Limiting oxygen concentration</i> )
LPG	Flüssiggas ( <i>Liquified petroleum gas</i> )
LVA	Lebensweg-Vorfallanalyse, Methode
LWAA	Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, Methodenfamilie ( <i>Life Cycle Working Environment</i> )
MARS	Berichterstattungs-System wichtiger Unfälle, Datenbank ( <i>Major Accident Reporting System</i> )
MEC	Minimale explosionsfähige Konzentration ( <i>Minimum explosible concentration</i> )
MJ	Megajoule, 10 <sup>3</sup> [J], Einheit

OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung ( <i>Organisation for Economic Cooperation and Development</i> )
OEF	Umweltlicher Fußabdruck von Organisationen, Methode ( <i>Organisation Environmental Footprint</i> )
PEF	Umweltlicher Fußabdruck von Produkten, Methode ( <i>Product Environmental Footprint</i> )
PLL	Potenzieller Verlust von Menschenleben, Indikator ( <i>Potential Loss of Life</i> )
PRA	Probabilistische Risikoanalyse, Methodenfamilie ( <i>Probabilistic Risk Assessment</i> )
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse, Methodenfamilie ( <i>Probabilistic Safety Analysis</i> )
QALY	Qualitätsbereinigte Lebensjahre, Größe, in [a] ( <i>Quality-adjusted life years</i> )
QRA	Quantitative Risikoanalyse, Methodenfamilie ( <i>Quantitative (or: Quantified) Risk Assessment</i> )
RA	Risikoanalyse oder Risikobewertung, Methodenfamilie ( <i>Risk assessment</i> )
ROD	Todesfallrate, $R_{Tod}$ , Indikator ( <i>Rate of Death</i> )
SCP	Nachhaltiger Konsum und Produktion, Rahmenpolitik ( <i>Sustainable Consumption and Production</i> )
SEEBALANCE	Sozio-Ökoeffizienz-Analyse, Methode ( <i>SocioEcoEfficiency Analysis</i> )
SETAC	Gesellschaft für Umwelttoxikologie und -chemie ( <i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> )
SGK	Sauerstoffgrenzkonzentration (für Explosionen), Kenngröße
SIP	Nachhaltige Industriepolitik ( <i>Sustainable Industrial Policy</i> )
S-LCA	Sozialbilanz, Methode (auch Sozial-Ökobilanzierung; <i>Social Life Cycle Assessment</i> )
t	Tonne, Megagramm, $10^6$ [g], Einheit
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen ( <i>United Nations Environment Programme</i> )
US/USA	Vereinigte Staaten von Amerika ( <i>United States of America</i> )
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung, Methodenrahmen ( <i>Environmental Impact Assessment</i> )
VDE	Verein Deutscher Ingenieure
WHO	Weltgesundheitsorganisation ( <i>World Health Organisation</i> )
YLD	Mit Behinderung verbrachte Lebensjahre, Größe, in [a], Indikator ( <i>Years Lived Disabled</i> )
YLL	Verlorene Lebensjahre, Größe, in [a], Indikator ( <i>Years of Life Lost due to premature mortality</i> )

YOLI	Anzahl der Jahre mit beeinträchtigter Gesundheit, Größe, in [a], Indikator ( <i>Years of Life Impaired</i> )
YOLL	Verlorene Lebensjahre, Größe, in [a], Indikator ( <i>Years of Life Lost</i> )
ZEMA	Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen



## Glossar

Begriff, Akronyme (Synonyme)	Definition (Quelle) (Kommentar)
Anfangsereignis (auslösendes Ereignis)	Am Anfang eines Ereignisablaufs stehendes Ereignis. (Abgeleitet aus Beschreibung in [Norm DIN 25419:1985])
<i>attributonal</i>	Beschreibendes Ökobilanzmodellierungsprinzip, das die tatsächlichen Zulieferernetze, die Nutzung und die Entsorgungsnetze des untersuchten Produktsystems abbildet.  (Unter Verwendung von [Weidema 2003] und [European Commission - JRC-IES 2010a], verändert; Übersetzung durch den Verfasser.)  (Kommentar: Dieser englische Fachbegriff wird im Deutschen identisch verwendet. Dieser Ansatz steht im Gegensatz zur <i>consequential</i> Modellierung; siehe dort.)
Auslöser	Ein(e) nicht bestimmungsgemäßes Verhalten, Zustand oder Eigenschaft eines technischen Prozesses oder Produktes oder von deren Komponenten oder ein natürlicher oder institutioneller Vorgang oder ein menschliches Verhalten, der oder das zeitlich und kausal direkt oder über eine Ereigniskette zu einem Vorfall beiträgt. (Diverse Autoren, angepasst.)
Bedrohung	Jegliches Anzeichen, Umstand oder Ereignis mit dem Potenzial, den Verlust oder die Schädigung von Personen oder Vermögenswerten herbeizuführen. ([Moore 2007], angepasst; Übersetzung durch den Verfasser.)
Behinderungsbereinigte Lebensjahre, DALYs	Die Summe der potenziell verlorenen Lebensjahre aufgrund Todesfall vor Erreichung der statistischen Lebenserwartung und aufgrund der mit Behinderung verbrachten, um die Behinderungsschwere bereinigten Lebensjahre. ([Murray 1994]; Übersetzung durch den Verfasser.) (Kommentar: Englisch <i>Disability-adjusted life years</i> )
Bestimmungsgemäßer Betrieb (regulärer Betrieb, störungsfreier Betrieb, nicht gestörter Betrieb, ungestörter Betrieb, ordnungsgemäßer Betrieb)	Verwendung einer Maschine oder eines Produktes oder deren Entsorgung in Übereinstimmung mit den in den Benutzerinformationen bereitgestellten Informationen. ([Norm DIN EN ISO 12100-1:2004], modifiziert/erweitert.) (Kommentar: Umfasst bestimmungsgemäßen Betrieb und bestimmungsgemäße Entsorgung. [Kurth et al. 2004] verwendet diesen Begriff im Sinne „bestimmungsgemäßer Betriebszustand“.)

Begriff, Akronyme (Synonyme)	Definition (Quelle) (Kommentar)
Bestimmungsgemäßer Betriebszustand	<p>Konstruktions- oder betriebsseitig geplante Zustände eines Prozesses (z. B. Inbetriebnahme, Anfahrphase, Normalbetrieb, Wartungs- und Instandhaltungsphase, Abfahrphase, Außerbetriebnahme usw.), sofern kein Vorfall geschieht; analog für Dienstleistungen.</p> <p>(Kommentar: [Kurth et al. 2004] verwendet für diesen Sachverhalt den Begriff „bestimmungsgemäßer Betrieb“.)</p>
Beteiligungsansatz	<p>Zuordnungsansatz, der 100 % der Vorfallauswirkungen den Prozessen/Modulen anhand deren Anteils an der Eintrittshäufigkeit zuordnet. In drei Varianten mit unterschiedlicher Zuordnung der spezifischen Auswirkungen auch zu zunächst passiv vorfallbeteiligten Prozessen/Modulen.</p> <p>(Kommentar: Vergleiche Verbesserungspotenzial-Ansatz.)</p>
<i>consequential</i>	<p>Die Konsequenzen abbildendes Ökobilanzmodellierungsprinzip, das die aufgrund der untersuchten Alternative theoretisch zusätzlichen oder nicht mehr benötigten Prozesse und damit die Zulieferer- und Entsorgungsnetze des untersuchten Produktsystems mit Hilfe der über Marktmechanismen ermittelten, von der untersuchten Entscheidung betroffenen Prozessen/Modulen abbildet.</p> <p>(Unter Verwendung von [Weidema 2003] und [European Commission - JRC-IES 2010a], verändert; Übersetzung durch den Verfasser.)</p> <p>(Kommentar: Dieser englische Fachbegriff wird im Deutschen identisch verwendet. Der Ansatz steht im Gegensatz zur <i>attributional</i> Modellierung; siehe dort.)</p>
Direkter Personenschaden	<p>Schädigung der Gesundheit eines Menschen im direkten Kontext eines Vorfalls, d. h. Verletzung, Intoxikation, andersartige Schädigung, Tod.</p> <p>(Spezifizierung von „Schaden“ aus [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004], modifiziert.)</p> <p>(Kommentar: Einschließlich vorfallbedingte Berufskrankheiten und vorfallbedingte Anteile von Berufskrankheiten.)</p>
Eigenschaften	<p>Die bestimmungsgemäßen chemischen, physikalischen oder biologischen Charakteristika eines in den Vorfall direkt einbezogenen Produktes oder Prozesses, die die genaue Art oder Auswirkungen des Vorfalls direkt oder indirekt mitbedingen.</p>

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
Einheitsvorfall	<p>Kleinster Anteil eines Vorfallsystems, für den im Rahmen einer Lebensweg-Vorfallanalyse Daten gesammelt werden.</p> <p>(In Anlehnung an den englischen Begriff <i>unit process</i> aus [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)</p> <p>(Kommentar: Entspricht in wichtigen Aspekten dem Modul der Ökobilanzierung.)</p>
Eintrittshäufigkeit (Eintrittsfrequenz)	<p>Häufigkeit, mit der ein primärer Ausfall, ein Anfangsereignis, ein unerwünschtes Ereignis oder ein Endzustand innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls eintritt; hier innerhalb eines Jahres.</p> <p>(Verschiedene Quellen)</p>
Eintrittswahrscheinlichkeit	<p>Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1, dass ein primärer Ausfall, ein Anfangsereignis, ein unerwünschtes Ereignis oder ein Endzustand auftreten, hier bezogen auf das Zeitintervall ein Jahr.</p> <p>(Verschiedene Quellen)</p>
Elementarfluss (in der LVA)	<p>Intervention mit der Umwelt oder direkter Personenschaden (siehe dort).</p> <p>(Kommentar: Der Begriff Elementarfluss in der LVA ist demnach in doppelter Hinsicht breiter als in der Ökobilanzierung: Er umfasst weitere Interventionen mit der Umwelt und direkte Personenschäden.)</p>
Elementarfluss (in der Ökobilanzierung)	<p>Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde, oder Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])</p> <p>(Kommentar: In der Ökobilanzpraxis werden regelmäßig auch andere, nicht stoff-oder energieflussbezogene Interventionen mit der Umwelt als Elementarfluss erfasst.)</p>
Endzustand	<p>Einer der am Ende der von einem Anfangsereignis ausgehenden Ereigniskette stehenden Zustände des untersuchten Systems (in der Ereignisablaufanalyse).</p> <p>(Abgeleitet aus Text in [Norm DIN 25419:1985].)</p>
Ereignis (in der LVA)	<p>Objekttyp zur Repräsentation des Vorfalls und von Folgeunfällen im LVA-Modell.</p>
Ereignis (in der Ereignisablaufanalyse)	<p>Verwendung in „Anfangsereignis“ und „auslösendes Ereignis“; siehe dort.</p>

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
Ereignis (in der Fehlerbaumanalyse)	Verwendung in „unerwünschtes Ereignis“; siehe dort.
Ereignisablaufanalyse, EAA	<p>Induktives Verfahren, in dem von einem Anfangsereignis ausgehend die möglichen Folgeereignisse und Zwischenzustände sowie Endzustände des untersuchten Systems mittels logischer und stochastischer Verfahren abgebildet werden.</p> <p>([Norm DIN 25419:1985], modifiziert.)</p>
Fehlerbaumanalyse, FBA	<p>Deduktives Verfahren, in dem die möglichen primären und sekundären Ausfälle (Auslöser) und deren Verläufe hin zu einem vorgegebenen unerwünschten Ereignis mittels logischer und stochastischer Verfahren abgebildet werden.</p> <p>(Aus Text in [Norm DIN 25424 Teil 1:1981] abgeleitet.)</p>
Folgeunfall	Auf einen zentralen Einheitsvorfall oder einen vorausgehenden Folgeunfall in einer Ereigniskette oder einem Fehlerbaum folgender Unfall.
Funktionelle Einheit	<p>Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit in einer Ökobilanzstudie.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])</p>
Gefährdung	<p>Potenzielle Schadensquelle.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 12100-1:2004])</p> <p>(Kommentar: Umfasst potenzielle kurzfristige Wirkungen z. B. im Falle eines Feuers und potenzielle langfristige Wirkungen durch Freisetzung z. B. von giftigen Substanzen; Auftreten sowohl im bestimmungsgemäßen Betrieb als auch im Kontext von möglichen Vorfällen.)</p>
Gesellschaftliches Risiko (Kollektivrisiko)	<p>Die Beziehung zwischen der Häufigkeit und der Anzahl der Personen einer gegebenen Personengruppe, die ein bestimmtes Ausmaß an Schädigung aufgrund der Ausprägung spezifizierter Gefahren erleiden. (Meistens ausgedrückt in Form der Häufigkeitsverteilung von Unfällen mit mehreren Opfern.)</p> <p>([Jones 1992], ergänzt. Übersetzung durch den Verfasser. Englisch <i>societal risk</i>.)</p> <p>(Kommentar: Die Todesfallrate ist eine häufig verwendete Kenngröße für das gesellschaftliche Risiko; siehe dort.)</p>
Hintergrundsystem	In Management-Perspektive: Prozesse des untersuchten Produktsystems, die nicht unter direkter Kontrolle oder entscheidender Beeinflussung durch den Produzenten des Produktes, Betreiber der Dienstleistung oder Nutzer des Produktes

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
	<p>sind.</p> <p>In Spezifitäts-Perspektive: Diejenigen Prozesse des untersuchten Produktsystems, die unspezifisch für es sind, d. h. wo durchschnittliche oder generisch den Durchschnitt repräsentierende Prozesse diese ersetzen könnten, ohne zu relevant unterschiedlichen Sachbilanzergebnissen zu kommen. Aufgrund des verdurchschnittlichenden Effektes der Zulieferer kann ein homogener Markt mit durchschnittlichen (oder generischen) (Sachbilanz-)Daten angenommen werden, der den infrage stehenden Prozess angemessen repräsentiert.</p> <p>([European Commission - JRC-IES 2010a]; Erläuterungen ergänzt. Übersetzung durch den Verfasser.)</p>
Input (beim Modul)	<p>Ein in ein Modul eingehende(s/r) Produkt, Abfall oder Intervention mit der Umwelt.</p> <p>(Erweitert auf Basis [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)</p>
Input (beim Einheitsvorfall)	<p>Ein in einen Einheitsvorfall eingehende(s/r) Produkt, Abfall, Intervention mit der Umwelt, oder Ereignis.</p> <p>(Angepasst auf Basis [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)</p>
Intervention (mit der Umwelt)	<p>Durch den Menschen verursachte physikalische, chemische oder biologische Wechselwirkung mit der natürlichen Umwelt, insbesondere Ressourcenentnahme, Emission (inkl. Lärm und Wärme) und Flächeninanspruchnahme oder -umwandlung.</p> <p>(Basierend auf [Guinée et al. 2002], angepasst und erweitert; Übersetzung durch den Verfasser.)</p> <p>(Kommentar: Der Begriff ist breiter als „Elementarfluss“ in der Ökobilanzierung.)</p>
Kommandierter Ausfall	<p>Ausfall trotz funktionsfähiger Komponente infolge einer falschen bzw. fehlenden Anregung oder des Ausfalls einer Hilfsquelle (in Fehlerbäumen).</p> <p>([Norm DIN 25424 Teil 1:1981])</p>
Lebensjahre mit Behinderung, YLD	<p>Durch Behinderung erschwerte Lebensjahre, gewichtet mit dem Ausmaß der Behinderung.</p> <p>([Murray 1994], Übersetzung durch den Verfasser.)</p>
Lebensweg	<p>Aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])</p>
Lebensweg-Vorfall-	<p>Methode zur Abschätzung der vorfallbedingten Schädigung von</p>

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
analyse, LVA	Mensch und Umwelt aufgrund direkter Personenschäden und Interventionen mit der Umwelt über den Lebensweg von Produktsystemen.
Modul (Prozess- modul)	Kleinster in der Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil für den Input- und Outputdaten quantifiziert werden.  ([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])  (Kommentar: Das Modul repräsentiert in dem Produktsystem einen Prozess oder eine Prozesskette, z. B. eine Anlage oder ganzen Standort.)
Nicht bestimmungs- gemäßer Betrieb	Verwendung eines Maschine oder eines Produktes oder deren Entsorgung unter Verletzung der in den Benutzerinformationen bereitgestellten Informationen zu Nutzung und Einsatzbedingungen.  (Angepasst auf Basis [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004])  (Kommentar: Umfasst nicht bestimmungsgemäße(n) Betrieb und Entsorgung. Siehe auch Vorfall (= nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand).)
Nicht bestimmungs- gemäßer Betriebs- zustand	Siehe Vorfall.
Normierte und gewichtete Vorfallwirkungs- indikator-Ergebnisse	Auf eine Bezugsgröße – typischerweise die Jahressumme der Wirkungsindikator-Ergebnisse einer gesamten Volkswirtschaft oder eines durchschnittlichen Bürgers einer Volkswirtschaft – normierte und mittels Werthaltungen beinhaltende Gewichte (typischerweise die angenommene relative Relevanz der Wirkungskategorien untereinander) gewichtete Vorfallwirkungsindikator-Ergebnisse.  (Anpassung und Differenzierung nach [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] „Wirkungs(kategorie)-Indikator“, „Normierung“ und „Gewichtung“.)
Normierte Vorfallwirkungs- indikator-Ergebnisse	Auf eine Bezugsgröße – typischerweise die Jahressumme der Wirkungsindikator-Ergebnisse einer gesamten Volkswirtschaft oder eines durchschnittlichen Bürgers einer Volkswirtschaft – normierte Vorfallwirkungsindikator-Ergebnisse.  (Anpassung und Differenzierung nach [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] „Wirkungs(kategorie)-Indikator“ und „Normierung“)
Ökobilanz	Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges.

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
	([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])
Output (beim Modul)	<p>Ein aus einem Modul hervorgehende(s/r) Produkt, Abfall, oder Intervention mit der Umwelt oder ein Ereignis.</p> <p>(Erweitert auf Basis [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)</p> <p>(Kommentar: Im Unterschied zur Ökobilanzierung können Module in der LVA zusätzlich Ereignisse im Output haben.)</p>
Output (beim Einheitsvorfall)	<p>Ein aus einem Einheitsvorfall hervorgehende(s/r) Produkt, Abfall, oder Intervention mit der Umwelt, ein direkter Personenschaden oder ein Ereignis.</p> <p>(Angepasst auf Basis [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)</p>
Primärer Ausfall	<p>Ausfall bei zulässigen Einsatzbedingungen einer Komponente (in Fehlerbäumen).</p> <p>([Norm DIN 25424 Teil 1:1981])</p>
Produkt	<p>Jede Ware oder Dienstleistung.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14044:2006-10], modifiziert übernommen aus [Norm DIN EN ISO 14021:1999] und [Norm DIN EN ISO 9000:2005-12].)</p> <p>(Anmerkungen: Das Produkt kann in folgende Kategorien eingeteilt werden: Dienstleistungen (z. B. Transport), Software (z. B. Rechenprogramm, Wörterbuch), Hardware (z. B. mechanisches Motorteil), verfahrenstechnische Produkte (z. B. Schmiermittel). Weitere Anmerkungen siehe [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10], Seite 9.)</p>
Produktsystem	<p>Zusammenstellung von Prozessmodulen mit Elementar- Produkt-, und Abfallflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11]; erweitert um Abfallflüsse)</p>
Prozess	<p>Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14044:2006-10]; Definition 3.4.1, ohne Anmerkungen], ursprünglich aus [Norm DIN EN ISO 9000:2005-12].)</p> <p>(Kommentar: In der Norm [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und der vorliegenden Arbeit wird anstelle von „Eingaben“ „Inputs“ und anstelle von „Ergebnissen“ „Outputs“ verwendet. Ergebnisse beinhalten immer ein oder mehrere Produkte.)</p>
Quantitative Risikoanalyse, QRA	<p>Prozess zur Erfassung des Wesens eines Risikos und zur Bestimmung der quantitativen Risikohöhe.</p>

Begriff, Akronyme (Synonyme)	Definition (Quelle) (Kommentar)
	(Basierend auf „Risikoanalyse“ aus [Norm DIN EN 31010:2010], erweitert.)
Realprozess	<p>Der den Vorfall passiv erleidende oder aktiv (mit-)auslösende(s) Prozess/Anlage oder Produkt.</p> <p>(Kommentar: Im Gegensatz zum Prozess/Modul als Element im untersuchten Produktsystem, der meist auf eine Einheit des Referenzflusses skaliert ist (z.B. 1 kg Diesel), bezieht sich der Realprozess auf den Prozess oder die Anlage oder das Produkt in seiner tatsächlichen Größe (z.B. Raffinerie mit <math>1,53 \cdot 10^6</math> [t] Jahreskapazität). Verwendet ausschließlich im Vorfall-System. Siehe auch „vorfallbeteiligt“.)</p>
Referenzfluss	<p>Maß für die Outputs von Prozessen eines vorhandenen Produktsystems, die zur Erfüllung der Funktion, ausgedrückt durch die funktionelle Einheit, erforderlich sind.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])</p>
Referenzgröße (des Moduls)	<p>Quantitative Bezugsgröße eines Moduls zu dem alle Daten in Beziehung stehen.</p> <p>(Entwickelt aus Beschreibung „<i>quantitative Reference</i>“ in [Vornorm ISO/TS 14048:2002-04]; Übersetzung durch den Verfasser.)</p> <p>(Kommentar: Beispiele sind die funktionelle Einheit, der Referenzfluss, ein Produktionszeitraum usw.)</p>
Referenzgröße (des Einheitsvorfalls)	<p>Quantitative Bezugsgröße eines Einheitsvorfalls zu dem alle Daten in Beziehung stehen.</p> <p>(Kommentar: In Anlehnung an die Referenzgröße des Moduls.)</p> <p>(Kommentar: Dies ist meist die Jahresleistung der vorfallbeteiligten Anlage oder des vorfallbeteiligten Prozesses.)</p>
Risiko	<p>Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Vorfall und dessen Schadensausmaß.</p> <p>(Verschiedene Quellen, u. a. [SFK 2004], [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004].)</p>
Sachbilanzergebnis	<p>Ergebnis der Sachbilanz, das die Flüsse katalogisiert, die die Systemgrenze überschreiten, und das den Ausgangspunkt für die Wirkungsabschätzung darstellt.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])</p> <p>(Kommentar: Verwendet in der Ökobilanzierung und in der LVA zudem bezogen auf Module im Vorfallsystem.)</p>
Sachinventar (in der Ökobilanzierung)	Vektor der Flüsse im Modul oder aggregierten Produktsystem.



Begriff, Akronyme (Synonyme)	Definition (Quelle) (Kommentar)
	(Kommentar: Verwendet in der Ökobilanzierung und in der LVA zudem bezogen auf Module im Vorfallsystem, in allgemeinem Bezug auf den Vektor; siehe auch Sachbilanzergebnis.)
Schaden (Effekt, Auswirkung, Wirkung)	Schaden einer Person, Schädigung eines Vermögenswertes, oder erfolgte Interventionen mit der Umwelt, die die menschliche Gesundheit, natürliche Umwelt oder Ressourcenverfügbarkeit negativ beeinflussen.  (Verschiedene Quellen, angepasst.)
Schaden einer Person	Physische oder psychische Verletzung oder Schädigung der Gesundheit.  ([Norm DIN EN ISO 12100-1:2004], erweitert.)
Schadensausmaß	Menge oder Stärke des Schadens.  (Verschiedene Quellen.)
Schadenspotenzial	Größe des von einem Vorfall betroffenen Prozesses oder einer Anlage, die den maximal möglichen Schaden in Form zerstörbarer Vermögenswerte, freisetzbarer Stoffe, potenzial tödlich verunfallender Personen usw. quantitativ erfasst.  (Kommentar: Das Schadenspotenzial kann sich auf technische Prozesse/Anlagen beziehen, ebenso wie auf Dienstleistungsprozesse.)
Schädigung eines Vermögenswertes	Physikalische, chemische, biologische oder informatorische Schädigung eines Vermögenswertes.  (Auf Basis [Moore 2007], angepasst, Übersetzung durch den Verfasser.)
Sekundärer Ausfall	Folgeausfall, Ausfall bei unzulässigen Einsatzbedingungen.  ([Norm DIN 25424 Teil 1:1981])
Systemgrenze	Ein Satz von Kriterien zur Festlegung, welche (Prozess)module Teil eines Produktsystems sind.  ([Norm DIN EN ISO 14044:2006-10], angepasst.)
Todesfallrate, $R_{Tod}$	Anzahl vorfallbedingter Todesfälle pro Jahr und bezogen auf einen definierten Prozess, eine Anlage oder eine Technologie.  ([CCPS 2000], p 434; erweitert. Übersetzung durch den Verfasser.)  (Kommentar: Entspricht der Fläche unter der F-N-Kurve. Englisch <i>Rate of Death</i> , ROD oder auch <i>Potential Loss of Life</i> , PLL.)

Begriff, Akronyme (Synonyme)	Definition (Quelle) (Kommentar)
Umweltschadensrate , $R_{Umw}$	<p>Jährliche Rate der Interventionen mit der Umwelt bezogen auf einen definierten Prozess oder eine Anlage.</p> <p>(Basiert auf [Aelion et al. 1995], angepasst, Übersetzung durch den Verfasser.)</p> <p>(Kommentar: <math>R_{Umw}</math> entspricht der Fläche unter der F-N-Kurve der Umweltschäden.)</p>
Unerwünschtes Ereignis (Fehlerbaumausgang, Vorfall)	<p>Vorgegebener Ausfall des untersuchten Funktionssystems als Systemendzustand eines Fehlerbaums.</p> <p>(Basierend auf [Norm DIN 25424 Teil 1:1981], angepasst.)</p>
Unfall	<p>Nicht absichtlich herbeigeführter Vorfall, unter Ausschluss von Ausschuss/Fehlchargen.</p> <p>(Kommentar: Umfasst in dieser Arbeit auch (grob) fahrlässig herbeigeführte Unfälle.)</p>
Untersuchtes Modul/Produktsystem	<p>Direkt (Produktsystem) oder indirekt (Prozess/Modul als Teil des untersuchten Produktsystems) im Erkenntnisinteresse einer LVA-Studie stehend.</p> <p>(Kommentar: Im Text wird zwischen dem untersuchten Modul, Prozess oder Produktsystem und anderen/dritten Modulen, Prozessen oder Produktsystemen unterschieden.)</p>
Ursache	<p>Ein technischer, natürlicher, menschlicher oder institutioneller Vorgang oder Zustand, der den oder die Auslöser des Vorfalls (mit-)bedingt.</p> <p>(Diverse Autoren, angepasst.)</p> <p>(Kommentar: die einem Auslöser zugrunde liegende(n) Ursache(n). Siehe auch „Auslöser“.)</p>
Verbesserungspotenzial-Ansatz	<p>Zuordnungsansatz, der die Vorfallauswirkungen den Prozessen/Modulen anhand deren individuell ermittelten Nettoeffekts zur Eintrittshäufigkeit zuordnet, auch unter Inkaufnahme von Mehrfachzählung der Vorfallauswirkungen.</p>
Verletztenrate, $R_{Ver}$	<p>Anzahl vorfallbedingter Fälle von Verletzten ohne Todesfolge, pro Jahr und bezogen auf einen definierten Prozess, eine Anlage oder eine Technologie.</p> <p>(Auf Basis „Todesfallrate“ aus [CCPS 2000], p 434; erweitert; Übersetzung durch den Verfasser.)</p>
Verlorene Lebensjahre, YLL	<p>Durch Todesfälle gegenüber der statistischen Lebenserwartung verlorene Lebensjahre.</p> <p>([Murray 1994], Übersetzung durch den Verfasser.)</p>

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
Vermögenswert	<p>Jegliche Person, Umwelt, Anlage, Material, Information, Reputation oder Aktivität mit einem positiven Wert für eine von einem Vorfall betroffene juristische oder natürliche Person.</p> <p>([Moore 2007], erweitert; Übersetzung durch den Verfasser.)</p>
Vernünftigerweise vorhersehbare Fehl- anwendung	<p>Verwendung einer Maschine oder eines Produktes in einer Weise, die vom Konstrukteur bzw. Produzenten nicht vorgesehen ist, sich jedoch aus dem leicht vorhersehbaren menschlichen Verhalten ergeben kann.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 12100-1:2004], modifiziert.)</p>
Vordergrundsystem	<p>In Management-Perspektive: Diejenigen Prozesse des untersuchten Produktsystems, die hinsichtlich ihrer Auswahl oder Betriebsweise direkt von den untersuchten Entscheidungen betroffen sind, d. h. unter direkter Kontrolle oder entscheidender Beeinflussung seitens des Produzenten des Produktes, Betreibers der Dienstleistung oder des Nutzers des Produktes stehen.</p> <p>In Spezifitäts-Perspektive: Diejenigen Prozesse des untersuchten Produktsystems, die spezifisch für es sind, d. h. wo durchschnittliche oder generisch den Durchschnitt repräsentierende Prozesse diese nicht ersetzen könnten, ohne zu relevant unterschiedlichen Sachbilanzergebnissen zu kommen.</p> <p>([European Commission - JRC-IES 2010a], Erläuterungen ergänzt. Übersetzung durch den Verfasser.)</p>
Vorfall (nicht bestimmungsgemä- ser Betriebszustand, unerwünschtes Ereignis, Endzustand)	<p>Geschehnis unter Involvierung von Produkten oder Prozessen, das zu einer direkten oder indirekten Schädigung von Menschen, Vermögenswerten oder der Umwelt führt oder im Rahmen von Folgeunfällen und -aktivitäten dieses Geschehnisses solche Schädigungen bedingt UND das offiziell seitens der Prozess- oder Produktentwickler oder Produkthersteller oder -betreiber nicht geplant ist, wenngleich es als Teil des bestimmungsgemäßen Betriebes technisch antizipiert sein kann.</p>
vorfallbeteiligt	<p>Aktiv als Auslöser oder passiv aufgrund bestimmungsgemäßer Eigenschaften im direkten Kontext eines Vorfalls stehend.</p> <p>(Kommentar: z. B. vorfallbeteiligtes Modul, vorfallbeteiligter Prozess, vorfallbeteiligter Realprozess)</p>
Vorfallsachbilanz	<p>Phase der Datenerhebung für das Vorfallsachinventar des Einheitsprozesses und Vorfallsystems.</p>
Vorfallsachbilanz- Ergebnis	<p>Summe der mittels Eintrittshäufigkeit und Skalierung zur Referenzgröße eines Moduls oder Produktsystems skalierten Vorfallsachinventare eines oder mehrerer Vorfallsysteme eines untersuchten Prozesses oder Produktsystems.</p>

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
	<p>(In Anlehnung an "Sachbilanzergebnis" aus [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10].)</p> <p>(Kommentar: Enthält im Idealfall ausschließlich die die Systemgrenze überschreitenden Elementarflüsse (d. h. Interventionen mit der Umwelt und direkte Personenschäden). In der Praxis verbleiben zusätzlich oft nicht vollständig modellierte Produkt- und Abfallflüsse geringer Relevanz in der Sachbilanz und zusätzlich Ereignisse in der Vorfallsachbilanz.)</p>
Vorfallsachinventar	<p>Vektor der Ereignisse und Flüsse im Einheitsunfall oder aggregierten Vorfallsystem.</p> <p>(Kommentar: Verwendet in allgemeinem Bezug auf den Vektor, siehe auch Vorfallsachbilanz und Vorfallsachbilanz-Ergebnis.)</p>
Vorfallskalierungs- faktor	<p>Produkt aus Eintrittshäufigkeit eines Vorfalls und dem Quotienten aus der Referenzgröße des vorfallbeteiligten Moduls und der Referenzgröße des vorfallbeteiligten Realprozesses.</p>
Vorfallsystem	<p>Auf ein vorfallbeteiligtes Model bezogenes quantitatives Schadensmodell eines Vorfalls oder Vorfallszenarios, mit den durch Ereignisse verbundenen Einheitsvorfällen und den durch Produkt- oder Abfallflüsse an die Einheitsvorfälle angebotenen Module und Produktsysteme.</p> <p>(In Anlehnung an "Produktsystem" aus [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)</p>
Vorfallwirkungs- abschätzungs- Ergebnis	<p>Numerisches Ergebnis der Vorfallwirkungsabschätzung aller einbezogenen Wirkungskategorien.</p> <p>(In Anlehnung an „Wirkungsabschätzungs-Ergebnis“.)</p>
Vorfallwirkungs- abschätzung	<p>Bestandteil der Lebensweg-Vorfallanalyse, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen und direkten Personenschäden eines Prozesses oder Produktsystems dient.</p> <p>(In Anlehnung an "Wirkungsabschätzung" aus [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)</p>
Wirkungsab- schätzung	<p>Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient.</p> <p>([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])</p>

<b>Begriff, Akronyme (Synonyme)</b>	<b>Definition (Quelle) (Kommentar)</b>
Wirkungsabschätzungs-Ergebnis (Wirkungsabschätzungs-Profil)	Numerisches Ergebnis der Wirkungsabschätzung aller einbezogenen Wirkungskategorien.  (Abgeleitet aus Beschreibung in [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)
Wirkungsendpunkt	Eigenschaft oder Aspekt der natürlichen Umwelt, der menschlichen Gesundheit oder der Ressourcen, die oder der ein Umweltthema identifiziert, das Grund zur Besorgnis darstellt.  ([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])  (Kommentar: Englisch <i>category endpoint</i> .)
Wirkungskategorie	Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können.  ([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11])
Wirkungszwischenpunkt	Eigenschaft oder Aspekt der natürlichen Umwelt, der menschlichen Gesundheit oder der Ressourcen, die oder der ein Umweltphänomen identifiziert, das einen Zwischenschritt in der Wirkkette von Interventionen mit der Umwelt hin zu den Wirkungsendpunkten darstellt.  (In Anlehnung an Wirkungsendpunkt aus [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11].)  (Kommentar: Englisch <i>category midpoint</i> .)
Zwischenzustand	Ein in einem Ereignisablauf zwischen dem Anfangsereignis und den Endzuständen stehender Systemzustand.  ([Norm DIN 25419:1985])



## Mathematische Formelzeichen

Symbol	Größe; Einheit, Wertebereich	Definition (Kommentar)
$A$	$[-], \in [0, 1]$	Zuordnungsfaktor (Kommentar: Schadensanteil, der einem vorfallbeteiligten Prozess oder Produkt und damit dem Modul zugeordnet wird, als gemeinsamer Faktor auf das gesamte Vorfallsachinventar oder differenziert als Vektor auf einzelne Flüsse.)
$\vec{A}_F$		Vektor der Zuordnungsfaktoren des Vorfallsachinventars eines Folgeunfalls
$\vec{A}_Z$		Vektor der Zuordnungsfaktoren des Vorfallsachinventars des zentralen Vorfalls
$b$	$[-], \in [0, 1]$	Umrechnungsfaktor für Größen und Einheiten zwischen Referenzgröße Vorfall und Modul
$c$	$[-], \in [0, 1]$	Schadenspotenzial-Anpassungsfaktor (Kommentar: Verwendet bei Übertragung von Vorfalldaten auf ähnliche Prozesse mit unterschiedlichem Schadenspotenzial.)
$D$	[a]	Durchschnittliche oder tatsächliche Dauer einer Behinderung oder Verletzung
$DALY$	[a]	Behinderungsbereinigte Lebensjahre (Englisch <i>Disability-adjusted Life Years</i> )
$e$	Anzahl, Ereignisse In [-]	Ereignis (Kommentar: Trägt zusätzlich die nicht zu skalierenden Informationen der Eintrittshäufigkeit und Referenzgröße des vorfallbeteiligten Realprozesses.)
$\vec{E}$		Vektor der Ereignisse.
$f$	Masse, Energie usw. In [kg], [MJ] usw.	Fluss
$\vec{F}_D$		Vektor der direkten Personenschäden
$f_D$	Anzahl, Betroffene In [-]	Direkter Personenschaden (Fluss)
$\vec{F}_I$		Vektor der Interventionen mit der Umwel

$f_I$	Masse, Energie usw. In [kg], [MJ] usw.	Intervention mit der Umwelt (Fluss)
$\vec{F}_P$		Vektor der Produkt- und Abfallflüsse
$f_P$	Masse, Energie usw. In [kg], [MJ] usw.	Produkt- oder Abfallfluss
$f_s$	Masse, Energie usw. In [kg], [MJ] usw.	Skalierter Fluss
$G$	[-], $\in [0, 1]$	Durchschnittliche Gewichtung der Schwere der Behinderung einer Verletzung
$i$		Laufindex
$L_i$	[a]	Standard-Lebenserwartung bei Todesalter in Jahren
$\vec{M}$		Sachinventar des Moduls in der LVA
$\mu$	Typischerweise in $[a^{-1}]$	Durchschnittliche Ausfallrate/Frequenz/Häufigkeit einer Komponente, eines Vorfalls usw.
$\mu_F$	[-]	Relative Eintrittshäufigkeit (= Ereignisse pro eingetretenem Vorgängerunfall) eines Folgeunfalls (Kommentar: Gespeichert im input-seitigen Ereignis des Folgeunfalls.)
$\mu_Z$	$[a^{-1}]$	Eintrittshäufigkeit (Ereignisse pro Jahr) des zentralen Einheitsvorfalls (Kommentar: Gespeichert im input-seitigen Ereignis des zentralen Einheitsunfalls.)
$N_T$	[-]	Anzahl Todesfälle einer bestimmten Altersklasse
$N_V$	[-]	Anzahl Verletztenfälle einer bestimmten Verletzung
$R_M$	Masse, Massen-Kilometer usw.	Referenzgröße des vorfallbeteiligten Moduls



	In [kg] (z.B. Benzin), [tkm] (z.B. LKW-Transport) usw.	
$R_{Tod}$	[a <sup>-1</sup> ]	Todesfallrate
$R_{Umw}$	[a <sup>-1</sup> ]	Umweltschadensrate (Kommentar: Menge einer bestimmten Intervention mit der Umwelt, analog zu Todesfallrate.)
$R_V$	Masse, Massen-Kilometer usw.  In [kg] (z.B. Benzin), [tkm] (z.B. LKW-Transport) usw.	Referenzgröße des vorfallbeteiligten Realprozesses/Vorfalls
$R_{Ver}$	[a <sup>-1</sup> ]	Verletztenrate
$t$	[a]	Zeit
$\vec{V}$		Vorfallsachinventar (z. B. des Einheitsvorfalls, Vorfallsystems usw.)
$\vec{V}_s$		Vorfallsachinventar, skaliert auf vorfallbeteiligtes Modul
$\vec{V}_{Fs}$		Vorfallsachinventar eines Folgeunfalls, skaliert auf vorfallbeteiligtes Modul
$\vec{V}_{Zs}$		Vorfallsachinventar des zentralen Vorfalls, skaliert auf vorfallbeteiligtes Modul
$W$	[-], ∈ [0, 1]	Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente oder Eintrittswahrscheinlichkeit des primären Ausfalls oder Anfangsereignisses oder des Vorfalls
$W_i$	[-], ∈ [0, 1]	Eintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls wenn Eintrittswahrscheinlichkeit des primären Ausfalls $i = 0$
$YLD$	[a]	Mit Behinderung verbrachte Lebensjahre (Englisch: <i>Years Lived Disabled</i> )
$YLL$	[a]	Verlorene Lebensjahre (Englisch: <i>Years of Life Lost due to premature mortality</i> )
$Z$	[-], ∈ [0, 1]	Zuverlässigkeit einer Komponente



# Zusammenfassung und *Abstract*

## Zusammenfassung

**Status:** Quantitative Risikoanalysen (QRA) von Vorfällen einerseits und Produkt-Ökobilanzen andererseits werden bisher in der Praxis isoliert durchgeführt. Zur gezielten Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Relevanz von Vorfallauswirkungen über den Lebensweg von Produkten fehlt bisher eine allgemeine integrierte Methode ebenso wie zum integriert ökobilanziellen und vorfallbezogenen Vergleich von Produkten oder Technologien.

Bisherige Arbeiten zur Integration beziehen lediglich bestimmte Arten von Vorfällen ein (z. B. Feuer während der Produktnutzung) oder nur bestimmte Auswirkungen (z. B. ausschließlich Todesopfer). Neben Unfällen werden in den entsprechenden Arbeiten andere Vorfälle nicht oder nur untergeordnet einbezogen. Zudem ist für eine Reihe methodischer Fragen bisher kein systematisches Vorgehen oder keine Formalisierung vorgestellt worden, einschließlich für die grundlegende Frage der systematischen, qualitativen und quantitativen Zuordnung von Vorfallauswirkungen zu den vorfallbeteiligten Prozessen und Produkten.

**Zielgruppe:** Die Zielgruppe der hier vorgestellten neuen Methode der Lebensweg-Vorfallanalyse (LVA) sind einerseits Ökobilanz-Praktiker, die Wirkungen auf Mensch und Umwelt aus nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen (d. h. Vorfällen) umfassend und systematisch in ihre Analysen einbeziehen möchten. Andererseits sind dies Sicherheitsbeauftragte – bei Sabotage und terroristischen Bedrohungen auch Gefahrenabwehrbeauftragte genannt – und Qualitätsmanager, die die Auswirkungen von Vorfällen über den Lebensweg von Produkten erfassen und analysieren wollen.

**Methodik:** Die Methode der Lebensweg-Vorfallanalyse (LVA) bringt bestehende Lösungen zusammen, passt diese an und stellt neue methodische Lösungen vor, die wichtige Lücken schließen. Die LVA nutzt dabei die modellierten Eintrittshäufigkeiten aus Fehlerbaumanalysen (FBA) und Ereignisablaufanalysen (EEA), die Vorfallausmaßinformationen aus QRA-Studien sowie Informationen aus Vorfallstatistiken und aus historischen Vorfällen.

Die vorfallbedingten Inventare werden hierzu auf der Ebene des Sachinventars analog zur [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11] und [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] der Ökobilanzierung erfasst und mit weiteren vorfallspezifischen Informationen in Einheitsvorfällen inventarisiert. In der Vorfallinventarisierung werden zusätzlich zu den – auch in der Ökobilanzierung üblichen –

Interventionen umweltrelevanter und humantoxischer Emissionen sowie dem Verbrauch von natürlichen Ressourcen auch direkte Schädigungen von Menschen (insbesondere Tod, Verletzung und vorfallbedingte Berufskrankheiten) erfasst. Direkte Schädigungen von Menschen treten während bestimmungsgemäßer Betriebszustände definitionsgemäß nicht auf und werden bisher in der Ökobilanzierung nicht oder nur rudimentär<sup>1</sup> erfasst.

Die Vorfallauswirkungen werden in der LVA in Vorfallsystemen modelliert, die über Ereignisse in zentralen Einheitsvorfällen an die Module der Produktlebenswegmodelle quantitativ angebunden und skaliert werden. Zusätzlich zu den direkten Vorfallauswirkungen werden die Auswirkungen vorfallbedingter indirekter Vorfalldaten erfasst, z. B. Vorfallobekämpfungsmaßnahmen, Evakuierungen, Aufräumung und Sanierung, Wiederherstellung zerstörter Güter usw.

Die LVA erlaubt es – analog und konsistent zur Ökobilanzierung – an die Inventarisierung eine Wirkanalyse, Normierung und Gewichtung der Inventarergebnisse und vergleichende Auswertung anzuschließen.

**Methodisch wichtige Entwicklungen dieser Arbeit** sind:

- Definition qualitativer Zuordnungsregeln von Vorfällen zu Prozessen und Produkten und damit zu den (Prozess-)Modulen im Lebensweg.
- Allgemeingültige Formalisierung der quantitativen Zuordnung der Vorfallauswirkungen und deren Skalierung bezogen auf die quantitativen Referenzen der vorfallbeteiligten Module. Dies beinhaltet methodische Lösungen zur quantitativen Zuordnung
  - unter Berücksichtigung produkteigenschaftsbedingter Auswirkungen,
  - bei unterschiedlicher Granularität von Vorfall und Modul,
  - bei Nutzung sowohl detaillierter QRA Ergebnisse als auch aggregierter Vorfalldaten und -statistiken und zudem
  - differenziert je nach Zielsetzung der LVA-Studie.
- Adressierung der Frage der Modellierung von Vorfällen in „*attributional*“ und „*consequential*“<sup>2</sup> Studien.

---

<sup>1</sup> Der Inventarwert Unfallopfer (Englisch *casualties, victims*) wurde bereits von [Guinée et al. 1992] zur Nutzung innerhalb der Ökobilanzierung vorgeschlagen, jedoch ohne systematische oder methodische Details der Vorfallmodellierung oder Einbeziehung anderer Vorfalldaten. Unfallopfer werden nach diesem sehr einfachen Ansatz vereinzelt in Ökobilanz-Studien einbezogen.

<sup>2</sup> Diese beiden englischen Fachbegriffe werden identisch im Deutschen verwendet.

- Methodische Erweiterung und Kombination bestehender Lösungen zur LVA-Methodik für die Erfassung der Interventionen und direkten Personenschäden sowie deren Auswirkungen auf Mensch, Natur und Ressourcenverfügbarkeit aus nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen über den Lebensweg beliebiger Prozesse und Produkte. Neben Unfällen können absichtlich herbeigeführte Vorfälle aufgrund von Terrorismus, Sabotage und anderer krimineller Akte sowie Selbstmord konsistent erfasst werden.

In zwei **Anwendungsbeispielen** wird die Praktikabilität der Methode einschließlich Fragen der Datenerhebung und -schätzung erprobt und diskutiert.

**Ausblick:** Wesentliche offene Punkte sind die breitere Erprobung der LVA einschließlich des Verbesserungspotenzial-Ansatzes als Methodenvariante, der Verwendung der vorgeschlagenen zusätzlichen Skalierungsfaktoren bei der Übertragung von Vorfalldaten auf ähnliche Prozesse und Produkte, die methodische Detailausarbeitung für die Erfassung von Ausschussproduktion und letztlich die Entwicklung von LVA-unterstützenden Vorfalldatenbanken und Softwarewerkzeugen.

## **Abstract**

**Status:** Quantitative risk assessment (QRA) of incidents on the one hand and Life Cycle Assessment (LCA) of products on the other hand, are carried out so far in isolation. For a targeted decision support on the relevance of incident impacts throughout the life cycle of products, a general, integrated approach is lacking, same as for an integrated life cycle based, incident-related comparison of products or technologies. Previous work related to such an integration considers only specific types of incidents in the life cycle assessment (e.g. fires during product use) or only certain effects (e.g. exclusively fatalities). In addition to accidents, other incidents are not included or only in a subordinate manner. In addition, for several methodological issues methods or formalizations have not been presented so far, including for the fundamental question of the systematic, qualitative and quantitative assignment of incident impacts to the processes and products that are involved in an incident.

**Target group:** The target group of the new method of Incident Life Cycle Assessment (ILCA) are on the one hand LCA practitioners that intend to systematically include the effects on humans and the environment from non-intended operating conditions (i.e. incidents) in a comprehensive and systematic manner into their analyses. On the other hand, these are safety officers - for sabotage and terrorist threats also called security officers - and quality managers who want to capture and analyse the impact of incidents throughout the life cycle of products.

**Method:** The ILCA method integrates existing solutions and further develops them as well as provides new methodological solutions to overcome main gaps. The ILCA uses the modelled incident frequencies based on Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA), incident impact information from QRA studies, and information from incident statistics and from historical incidents.

The incident impacts are initially recorded at the inventory level analogous in unit incidents (analogous to unit processes of LCA acc. to [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11] and [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10]), together with incident-specific information. In addition to direct consequences of the incident, indirect impacts that are caused by activities that are related to the incident are included, such as emergency response operations, evacuations, clean-up and rehabilitation, restoration of damaged assets, etc. In the incident inventory, also direct damage to persons (especially death, injury and incident-related occupational diseases) are inventoried, in addition to the interventions with the environment that are of relevance to the environment, human health and the depletion of natural resources and that are known from LCA. Direct

xxxvi

*damage to people does not occur during the intended operating conditions, per definition, and is hence not included in LCA or in a limited and simplified manner<sup>3</sup>.*

*In ILCA, the incident effects are modelled in incident systems that are quantitatively connected via events in the central unit incident to the incidence-related unit processes of the product life cycle model.*

*The ILCA allows - analogous to and consistent with LCA – to perform an impact assessment, normalisation and weighting of the inventory results and a comparative evaluation.*

**Methodologically important developments of this thesis are:**

- *Definition of qualitative assignment rules of incidents to processes/products and thereby to the unit processes of the life cycle model*
- *Generally applicable mathematical formalisation of the quantitative assignment of the incident impacts and the impact's scaling relative to the quantitative reference of the unit processes to which an incident is assigned. This includes methodological solutions for the quantitative assignment of the impacts taking into account*
  - *product-property related effects,*
  - *different granularity of incident model and unit process,*
  - *using both detailed QRA results and aggregated incident data and statistics, and furthermore*
  - *differentiated according to the objective of the ILCA study.*
- *Addressing the issue of modelling incidents in "attributional" and "consequential" studies*
- *Methodological extension and integration of existing solutions, obtaining a methodology for capturing the interventions and direct harms to humans and the related effects on man, nature, and the future availability of natural resources, from non-intended operating conditions over the life cycle of any process and product. In addition to accidents, intentional incidents of terrorism, sabotage, and other criminal acts as well as suicide, are inventoried consistently.*

*In two illustrative **cases** the practicality of the method is demonstrated and discussed, including issues of collecting and estimating data.*

---

<sup>3</sup> *The inventory item "casualties" (also: "victims") has been proposed by [Guinée et al. 1992] for use in LCA, but without systematic or methodical details on the incident modelling or on the integration of other incident effects. Casualties are considered in some LCA studies following this basic approach.*

**Outlook:** *The main open issues are a wider testing of the ILCA, including of the improvement potential approach as a method variant, and of using the proposed additional scaling factors in the transfer of incident data to similar processes and products. Furthermore, the methodological details of inventorying the impacts of faulty production wait to be worked out and the development of ILCA-supporting incident databases and software tools are open tasks.*



# 1 Einleitung

## 1.1 Zur Relevanz von Vorfällen für Mensch und Umwelt

Unfälle, Sabotage, Terrorismus mit Angriffen auf technische Anlagen und andere **Vorfälle nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände**, die im Fokus dieser Arbeit stehen, sind eine wichtige Schattenseite des technologischen Fortschritts. Abb. 1 illustriert wichtige Typen der im Fokus dieser Arbeit stehenden Vorfälle.



**Abb. 1. Beispiele für Vorfälle, illustrativ. Von links oben nach rechts unten: Transportunfall Güterzug mit Stofffreisetzung ([Sharp 2010]), brennende Ölquellen in Kuwait aufgrund Sabotage im Kriegskontext ([NASA's Earth Observatory 1991]), petrochemisches Unfallfeuer ([Sangobpai 2012]), Wildfeuer durch Brandstiftung ([Wolf 1995]).**

Bekannte **Beispiele** schwerer Vorfälle sind der *blowout* der Ölförderplattform „*Deepwater Horizon*“ im Golf von Mexiko im April 2010, die Havarie der Kernreaktoren von Fukushima im März 2011 ausgelöst durch einen Tsunami und das absichtliche Zerstören und in Brand setzen von Ölförderanlagen in Kuwait und Irak im Rahmen der Golfkriege in den 1990er und 2000er Jahren.

Derartige **schwere Vorfälle** nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände erfahren eine große öffentliche Aufmerksamkeit, stellen global gesehen aber nur die **Spitze eines Eisberges** dar: [Lim et al. 2012] haben weltweit für 2010 allein ca. 480.000 Todesfälle aufgrund berufsbezogener Unfälle geschätzt. Hinzu kommt eine größere Anzahl an Verletzten und an Fällen vorfallbedingter Berufskrankheiten. Zu den Gesamtumweltschäden aus Unfällen und anderen Vorfällen fehlen robuste Zahlen ebenso wie für den diesbezüglichen Verlust an natürlichen Ressourcen.

## 1.2 Motivation der Methodenentwicklung

### **Vorfallanalysen und Lebenswegsicht**

Ein großer Aufwand zur Vermeidung und Verminderung von Vorfällen wird seit vielen Jahrzehnten seitens Unternehmen und Politik getrieben. Die Methode der Wahl zur Analyse der Häufigkeit und Schwere von Vorfällen aller Art ist die **Quantitative Risikoanalyse (QRA)** ([Crowl & Louvar 2011]). QRA-Studien und ihre Kernmethoden **Fehlerbaumanalyse (FBA)** und **Ereignisablaufanalyse (EAA)** werden zur Analyse von Unfallgefahren ([Crowl & Louvar 2011]) ebenso genutzt wie zur Analyse von Terrorismusbedrohungen [Kaplan 2003] und von Vorfällen, die zu Fehlchargen und Produktionsausfällen führen ([Wolf 2012a]). QRA-Studien werden vom **Gesetzgeber** in vielen Ländern beim Bau neuer Anlagen sowie beim maßgeblichen Umbau bestehender Anlagen gefordert ([CCPS 2009]).

Die QRA untersucht dabei Vorfallauswirkungen traditionellerweise meist auf bestimmte Abläufe und technische Prozesse oder auf den Standort bezogen.

Während die QRA hervorragende Dienste leistet, die Häufigkeit und Schwere von Vorfällen einzelner Anlagen und Produkte zu untersuchen und lokale spezifische Verbesserungsoptionen zu evaluieren, kann sie nicht verhindern, dass isolierte Entscheidungen zur sicherheitstechnischen Verbesserung zu einer **Problemverlagerung entlang des Lebensweges** führen können: Die Wahl unfalltechnisch sichererer Prozesse oder Rohstoffe kann häufigere und/oder

schwerere Vorfälle bei vorgelagerten oder nachgelagerten Abschnitten des Lebensweges dieser Prozesse und Rohstoffe bedingen.

Ähnlich können isolierte Entscheidungen der unfalltechnischen Verbesserung zur **Verlagerung von Problemen in den bestimmungsgemäßen Betrieb** führen: Zum Beispiel mag ein sichererer Prozess einen höheren Energieverbrauch haben, der in Gesamtsicht einschließlich der damit zusammenhängenden Emissionen die Gesamtwirkungsabschätzung des Prozesses verschlechtert.

Leider ist ein aussagekräftiger direkter Vergleich (*benchmark*) der Unfallwirkungen von Prozessen und Anlagen mithilfe der QRA in ihrer derzeitigen Form kaum möglich, u. a. da der **Bezug auf die Systemleistung fehlt**. Dies war auch ein wesentliches Fazit von [Kurth et al. 2004] in ihrer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes.

### **Vorteile der Lebenswegbetrachtung, Situation der Ökobilanzierung**

Hinsichtlich der Emissionen und Ressourcenverbräuche während des **bestimmungsgemäßen Betriebs** und ihrer Wirkungen auf Mensch und Umwelt hat sich die Sichtweise in den vergangenen 25 Jahren von einer isolierten Betrachtung von Einzelemissionen, Prozessen, Anlagen und der Nutzung von Produkten hin zu einer integrierten **lebenswegbezogenen Sichtweise** gewandelt. Ziel lebenswegbezogener Methoden – wie insbesondere der Ökobilanzierung – ist es, produkt- und technologiebezogene Entscheidungen in ganzheitlicher Sicht zu treffen. Dies bedingt, dass z. B. Schadstoffemissionen nicht mehr für jede Aktivität isoliert betrachtet werden, sondern aggregiert über den Lebensweg des Produktes. Zudem werden nicht einzelne Emissionen betrachtet, sondern alle relevanten Emissionen gemeinsam und zusammengefasst für unterschiedliche Typen von Schadwirkungen auf Mensch und Umwelt. Um zudem die angemessene Vergleichbarkeit solcher Analysen sicherzustellen, werden alle Wirkungen auf einen definierten Prozess oder ein definiertes Produkt<sup>4</sup> und seine Funktion und Leistung bezogen.

Die prozessbasierte **Ökobilanzierung** ist seit den frühen 1990er Jahren eine weit verbreitete Methode für solche Untersuchungen. Seit 1997 ist sie in der DIN EN ISO 14040 Normenreihe

---

<sup>4</sup> Im Kontext der Lebenswegmodellierung und auch der vorliegenden Arbeit werden Prozess und Produkt oft synonym verwendet. Dies geht darauf zurück, dass Produkte über ihre quantitative und qualitative Funktion (also ihre Leistung) definiert und mithin in sehr vielen methodischen Aspekten gleichartig zu Prozessen behandelt werden können.

normiert (insbesondere [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11] und [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10]).

Damit ermöglicht die Ökobilanzierung direkte Produktvergleiche und Schwachstellenanalysen über den Produktlebensweg – hinsichtlich Umweltwirkungen<sup>5</sup> aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb.

In der **Politik** werden ökobilanzbasierte Methoden verstärkt seit Beginn des neuen Jahrtausends eingesetzt. Auf europäischer Ebene werden Lebenswegstudien u. a. genutzt, um im Rahmen der Ökodesign-Direktive produkttypspezifische Mindest- oder Höchstwerte zumeist technischer Kenngrößen abzuleiten ([2009/125/EC]), ebenso wie um EU Ökokennzeichenkriterien festzulegen ([2010/66/EC]). Zurzeit läuft seit Herbst 2013 unter dem Begriff „*Environmental Footprint of Products and Organisations*“ ein Pilottest, um die EU-weite Kennzeichnung der Umweltgesamtleistung von Produkten anhand Ökobilanzberechnungen zu erproben ([2013/179/EU]).

### **Bislang fehlende Methode der Erfassung von Vorfallauswirkungen über den Produktlebensweg**

Die Auswirkungen von **Vorfällen werden in der prozessbasierten Ökobilanz nicht oder nur rudimentär und in Einzelfällen betrachtet** ([Zamagni et al. 2008], [European Commission - JRC-IES 2011], [Wolf et al. 2012]<sup>6</sup>). Es gibt bisher keine allgemein anwendbare quantitative Methode, die die risikobehafteten Auswirkungen von Unfällen und anderen Vorfällen auf Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit sowie bezogen auf die Leistung des betroffenen Produktes betrachten und über den Produktlebensweg aggregieren würde. Dies haben [Kurth et al. 2004] in ihrer umfassenden Studie für das Umweltbundesamt festgestellt und es ist nach wie vor so gültig<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> Umweltwirkungen = über Interventionen mit der Umwelt, mit Wirkungen auf Mensch, Umwelt und die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen.

<sup>6</sup> [Guinée et al. 1992] haben vorgeschlagen die Wirkkategorie „Todesfälle“ (Englisch *casualties*, ursprünglich *victims*) aus Unfällen einzuführen. In manchen Studien wird dieser stark vereinfachte Ansatz genutzt. In derselben Arbeit wird zudem vorgeschlagen, andere Unfallauswirkungen gemeinsam mit denen bestimmungsgemäßer Betriebszustände zu erfassen, ohne allerdings weitere Details zu nennen. Manche Arbeitsgruppen erfassen häufige und regelmäßig berichtete Vorfälle, ein Beispiel ist [ecoinvent 2013]. Kriterium ist dort, dass das einzelne Ereignis den Jahresdurchschnitt nicht wesentlich beeinflusst. Als Beispiel wird der Bruch einer Transport-Pipeline für Rohöl genannt. Die Erfassung geschieht zusammen mit den Auswirkungen bestimmungsgemäßer Betriebszustände, es werden keinerlei weitere methodische Details beschrieben. Zu weiteren Methoden siehe Kap. 4.2.

<sup>7</sup> Für wenige spezielle Themen gibt es vereinfachte Ansätze, z. B. zur Anzahl an Todesopfern und Verletzten aus Energieerstellungsketten je kWh Strom (siehe Kap. 4.5 und 4.6).

Erst die gleichzeitige Erfassung, aber separate Abbildung und Auswertung der Auswirkungen von bestimmungsgemäßen und nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen über den gesamten Produktlebensweg ermöglicht eine tatsächlich effektive und effiziente Entscheidungsunterstützung in der nachhaltigkeitsorientierten Verbesserung von Prozessen und Produkten.



## 2 Zielsetzung und Vorgehensweise

### 2.1 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, die die direkten und indirekten schädlichen Auswirkungen nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände („Vorfälle“) auf Mensch, Umwelt und die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen quantitativ und bezogen auf Produkte<sup>8</sup> und Prozesse über den gesamten Produktlebensweg erfasst. Diese Methode der prozessbasierten Lebensweg-Vorfallanalyse (LVA) hat **zwei direkte Zielgruppen und Anwendungszwecke:**

Die LVA soll **Sicherheitsbeauftragten** und anderen Fachleuten, die sich mit der Vorfallvermeidung und -verminderung befassen, dazu dienen, die lebenswegweiten Vorfallasswirkungen<sup>9</sup> quantifizieren und den Vergleich von Designalternativen und Produkten vergleichbarer Funktion durchführen zu können. Dies mit dem primären Ziel, die Vorfallhäufigkeit zu verringern und die -schwere zu vermindern. Zudem sollen auch Vergleiche sicherheitstechnischer Produkte durch die Methode unterstützt werden.

**Ökobilanzpraktikern** soll es ermöglicht werden, neben den Auswirkungen während bestimmungsgemäßer Betriebszustände auch diejenigen aus nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen konsistent, aber separat, zu erfassen und so zu weiter vervollständigten Wirkungsabschätzungen und besserer und zudem besser differenzierter Entscheidungsunterstützung zu kommen.

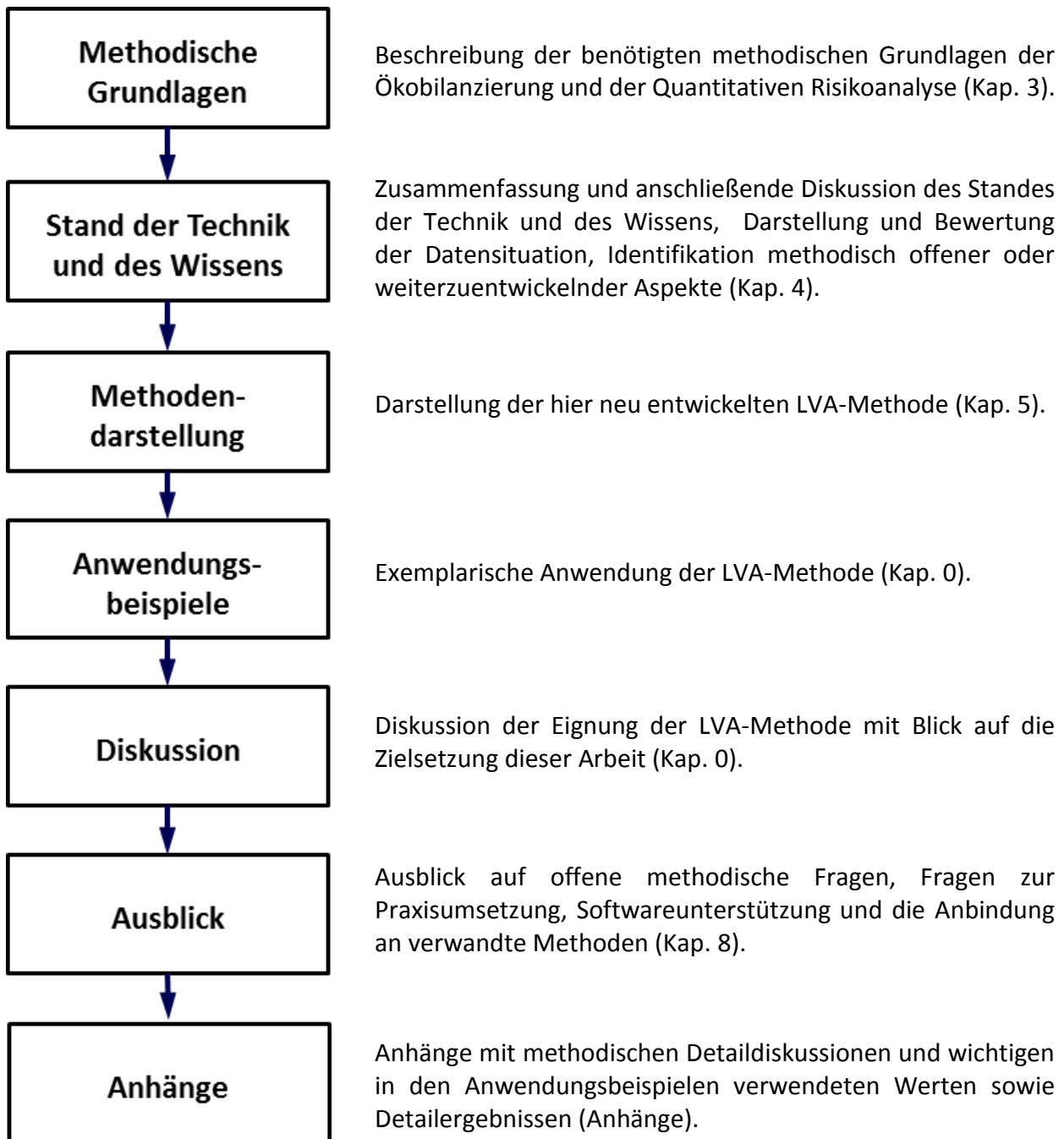
---

<sup>8</sup> Begriffsdefinitionen siehe Glossar.

<sup>9</sup> Erfasst werden soll also das Risiko aus möglichen Vorfällen (*ex ante*) und/oder aus bereits eingetretenen Schäden (*ex post*) in Kombination mit Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß.

## 2.2 Vorgehensweise und Struktur dieser Arbeit

Abb. 2 zeigt schematisch die systematische Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit:



**Abb. 2. Hauptschritte der vorliegenden Arbeit und korrespondierende Kapitel, schematisch.**



# 3 Methodische Grundlagen

## 3.1 Ökobilanzierung

### 3.1.1 Kurzcharakterisierung

Die Ökobilanzierung (englisch *Life Cycle Assessment*) ist eine in [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11] und [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] international normierte Methode, die die potenziellen Auswirkungen eines Produktsystems auf die Schutzziele Mensch, natürliche Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit<sup>10</sup> über den Lebensweg des untersuchten Produktes (Gut oder Dienstleistung) aufgrund von Ressourcennutzung und Emissionen in die Umwelt während bestimmungsgemäßer Betriebszustände quantitativ erfasst und auswertet.

Die fünf **Grundprinzipien der Ökobilanzierung** sind laut [Wolf et al. 2012]:

- **Anwendbarkeit auf jedes definierte System:** Z. B. ein Gut, eine Dienstleistung, eine Technologiestrategie, ein Unternehmen oder ein Land.
- **Produktsystemerfassung:** Erfassung des gesamten Lebensweges des Produktes oder anderen Systems (z. B. ein Unternehmen).
- **Leistungsbezogene Vergleichbarkeit:** Bezug der potenziellen Auswirkungen auf die Funktion(en) des Prozesses oder Produktes und dessen funktionelle Einheit, d. h. was leistet es, wie viel leistet es, wie gut tut es dies und für wie lange.<sup>11,12</sup>
- **Umfassende Umweltwirkungen:** Einbeziehung aller relevanten, lokal, regional oder global über Interventionen mit der Umwelt agierenden Auswirkungen auf die Schutzgüter Mensch, natürliche Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit.
- **Quantitativ und wissenschaftsbasiert:** Quantitativer wissenschaftsbasierter Ansatz der Erfassung und Modellierung der Interventionen mit der Umwelt und der potenziellen Wirkungen auf die Schutzgüter.

---

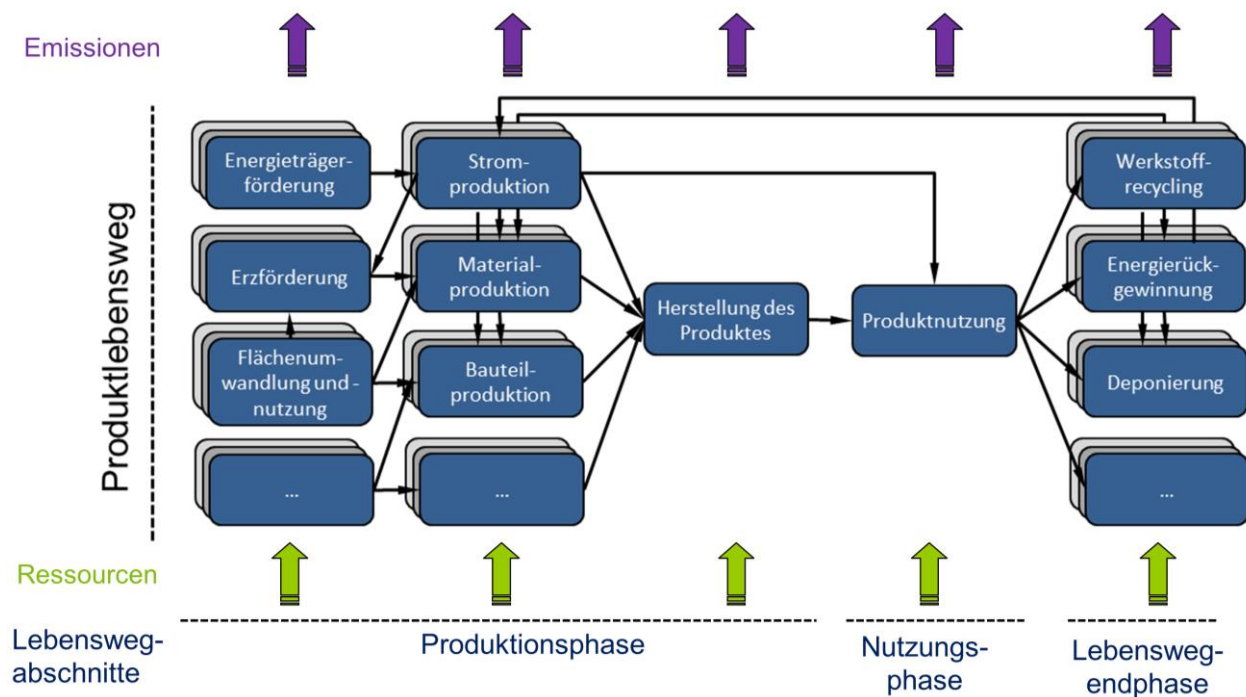
<sup>10</sup> In Erweiterung werden in manchen Studien zudem Schäden an der bebauten Umwelt erfasst – als zusätzliche Wirkkategorie und zugleich als viertes Schutzziel.

<sup>11</sup> Die funktionelle Einheit kann je nach Fragestellung auch ein Zeitraum (z. B. ein Jahr Produktion einer Anlage) oder eine andere geeignete Angabe sein. Bei anwendungsunspezifischen Werkstoffen (z. B. Stahl) und Bauteilen (z. B. Schraube) tritt deren technische Spezifikation an die Stelle der funktionellen Einheit ([European Commission - JRC-IES 2010a]).

<sup>12</sup> Vereinfachte Aussagen z.B. auf Materialebene sind daher nicht zulässig. Jedes Material hat seine spezifischen Stärken und Schwächen – es gibt keine pauschal umweltlich guten oder schlechten Materialien, worauf u.a. [Baitz & Wolf 2006] und [Wolf et al. 2010] hingewiesen haben.

Wichtig zum Verständnis ist zudem, dass die Ökobilanz nicht mit Sicherheitsfaktoren, sondern mit Durchschnittswerten arbeitet, um die Vergleichbarkeit von (Produkt-)Alternativen zu gewährleisten und um die Auswirkungen quantitativ abzuschätzen.

Unter **Lebensweg** werden alle durch die Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Produkte bedingten Prozesse verstanden, d. h. vom Abbau der benötigten Rohstoffe über die Herstellung von Materialien und Zwischenprodukten, die Produktion der Güter oder Bereitstellung der Dienstleistungen bis hin zu deren Nutzung und Entsorgung sowie der Verwertung oder Ablagerung aller im Lebensweg anfallenden Abfälle. Diese Prozesse umfassen grundsätzlich und soweit quantitativ relevant auch alle notwendigen Transporte, Lagerungs-, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, Verwaltungstätigkeiten usw. sowie die Lebenswege der benötigten Investitionsgüter wie Maschinen, Lagerhallen usw. und ferner Verbrauchsmaterialien und Hilfsstoffe. Damit entspricht der Lebensweg dem gesamten **Zulieferernetz** des untersuchten Produktes plus Produktnutzung und Entsorgungsketten, siehe Abb. 3<sup>13</sup>.

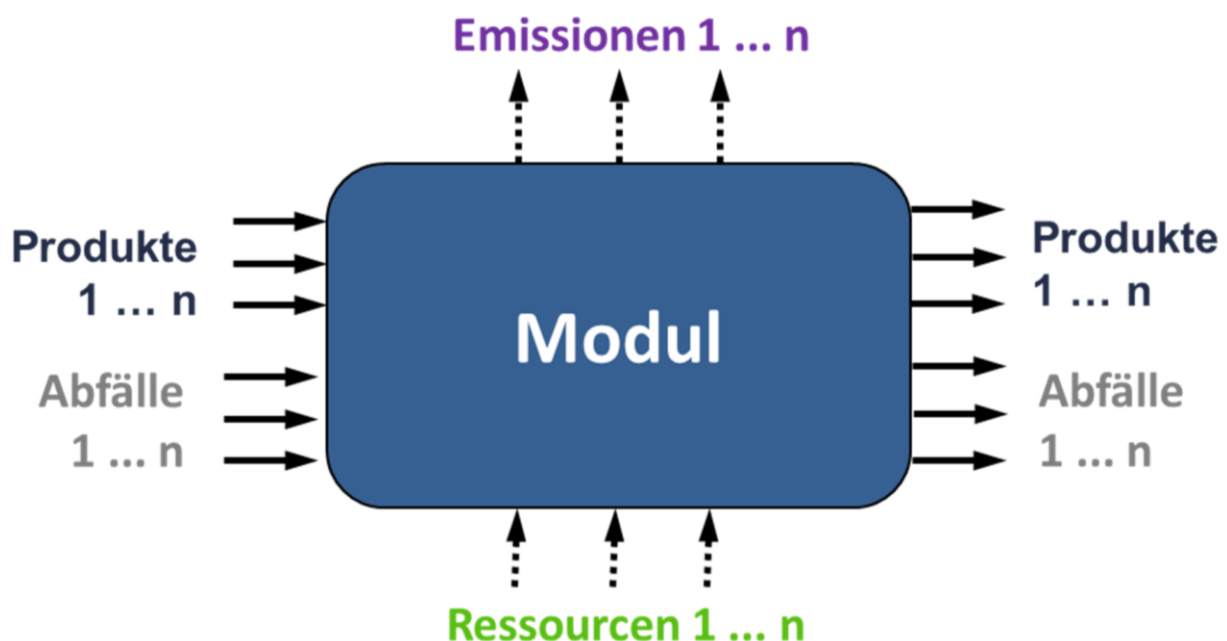


**Abb. 3. Lebensweg eines Produktes, schematisch, vereinfacht. Nicht dargestellt sind u. a. Transport- und Lagerungsprozesse sowie andere Dienstleistungen (z. B. Handel und Reparatur). Aus [Wolf & Pennington], verändert. Übersetzung durch den Verfasser.**

<sup>13</sup> Dies ist gültig für den am weitesten verbreiteten, den Lebensweg beschreibend erfassenden, *attributional* Modellierungsansatz. Bei der die Entscheidungskonsequenzen erfassenden, *consequential* Modellierung werden die aufgrund der untersuchten Entscheidung als marginal beeinflusst angenommenen Prozesse modelliert, siehe Glossar.

Der Grundbaustein der Ökobilanzierung ist das (Prozess-)Modul (Englisch *unit process*), schematisch dargestellt in Abb. 4.

Über die **Produktflüsse zwischen den Modulen** und zur weiteren Behandlung oder Ablagerung innerhalb der Technosphäre ausgetauschter Abfälle und Abwässer wird der **technische Lebensweg** modelliert. Individuelle Interventionen der Module mit der Umwelt (d. h. Emissionen wie z. B. SO<sub>2</sub>-Emissionen in Luft oder spezifische Ressourcenverbräuche und -inanspruchnahmen, wie z. B. Steinkohleentnahme aus Lagerstätten, agrarische Landflächennutzung usw.) werden in absoluten Werten und physikalischen Einheiten als Umweltbelastungen im Sachinventar erfasst.



**Abb. 4.** Das (Prozess-)Modul – Grundbaustein der Ökobilanzierung, schematisch. Aus [European Commission - JRC-IES 2010a], verändert. Übersetzung durch den Verfasser.

Ein **Modul** kann dabei einen technisch nicht weiter zu unterteilenden Prozessschritt umfassen, eine integrierte Anlage oder gar einen ganzen Standort. Dies ist abhängig von der Detailliertheit der Datenaufnahme, die wiederum vom Erkenntnisinteresse, der Datenverfügbarkeit und anderen Faktoren abhängt.

Der Lebensweg und damit der Datenerfassungs- und Modellierungsaufwand wird in der Praxis mithilfe von **Abschneidekriterien** auf die ergebnisseitig relevanten Prozesse und Interventionen beschränkt.

Die **potentiellen Auswirkungen** auf die eingangs genannten Schutzziele werden mittels Wirkungsabschätzung der Interventionen abgeleitet, bezogen auf unterschiedliche Wirk-

kategorien und zunächst auf der Ebene der sog. **Wirkungszwischenpunkte** (Abb. 5 und Abb. 6). Die Interventionsmengen werden dazu mit dem Vektor der spezifischen Wirkfaktoren („Charakterisierungsfaktoren“) multipliziert. Diese Wirkfaktoren entsprechen dem Ausmaß in dem die entsprechende Intervention zu dem Phänomen der jeweiligen Wirkkategorie beiträgt und werden in den meisten Methoden anhand Transport-, Umwandlungs- und Expositionsmodellen wissenschaftlich abgeleitet. Ein Beispiel sind die Wirkfaktoren für CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1 [kg CO<sub>2</sub>-eq./kg Emission] und für Methanemissionen von 25 [kg CO<sub>2</sub>-eq./kg Emission], bezogen auf den globalen Treibhauseffekt, die vom IPCC veröffentlicht und in der Ökobilanzierung genutzt werden: Methan hat (bezogen auf die Referenzdauer von 100 Jahren) einen 25 mal höheren Treibhauseffekt als das CO<sub>2</sub>, das für diese Wirkkategorie zugleich als Bezugsgröße genutzt wird und daher laut IPCC den Wert 1 hat [Forster et al. 2007]. Anschließend werden die derart charakterisierten Interventionen je Wirkkategorie (in diesem Beispiel: Treibhauseffekt) aggregiert.

Die **Wirkkategorien** umfassen nach Stand der Technik (in Klammern oft verwendete Unterkategorien):

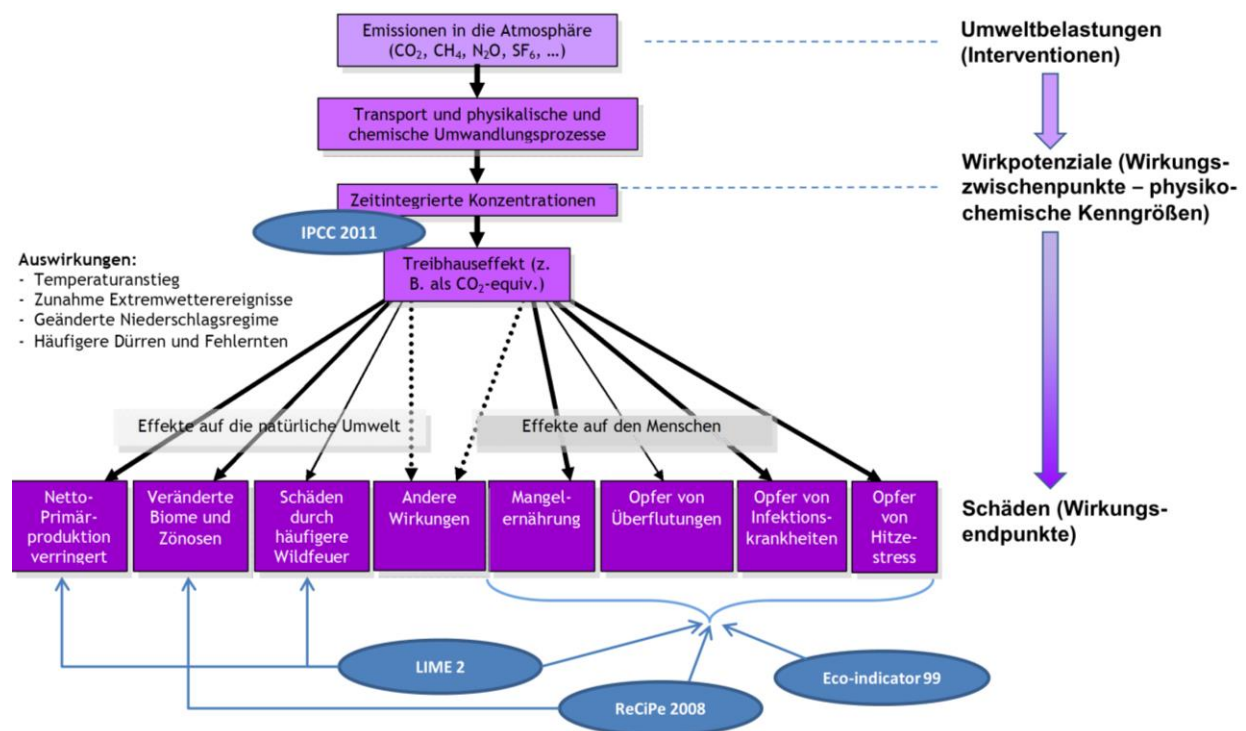
- Globale Klimaveränderung,
- Stratosphärischer Ozonschichtabbau,
- Humantoxizität (Krebs, Nicht-Krebs),
- Partikel/Respiratorische Anorganika,
- Ionisierende Strahlung (Menschliche Gesundheit, Ökosysteme),
- Fotochemische Oxidantienbildung,
- Versauerung (terrestrisch, limnisch, marin),
- Eutrophierung (terrestrisch, limnisch, marin),
- Ökotoxizität (terrestrisch, limnisch, marin),
- Flächeninanspruchnahme und -umwandlung<sup>14</sup> sowie
- Ressourcenverbrauch (Metalle und Mineralien, nicht erneuerbare Energieträger, erneuerbare Energieträger, Wasser)<sup>15</sup>.

---

<sup>14</sup> Dies beinhaltet implizit oder explizit in vielen Fällen Bodenerosion, Austrocknung aufgrund Grundwasserabsenkung, Versalzung und andere spezielle Wirkungen ([Baitz et al. 2000] und [Baitz 2002]).

**Neue Problemfelder** kommen entsprechend dem wissenschaftlichen Fortschritt der Wirkmethodenentwicklung hinzu. Bereits in einzelnen Studien verwendet gehören dazu u. a.: Lärm, Vermüllung (Landschaft, Meere), Innenraumemissionen mit direkter Wirkung auf den Menschen ohne den Umweg über die Umwelt.

Diese Wirkergebnisse auf Ebene der Wirkungszwischenpunkte können in weiteren Schritten entweder über eine **Normierung und Gewichtung zu Wirkungsendpunkten** auf Ebene der Schutzziele weiter aggregiert werden. Oder aber die Wirkungsendpunkte werden über **Schadensmodelle** modelliert, letzterer Ansatz wird im illustrativen Anwendungsbeispiel der vorliegenden Arbeit verwendet. Ein Beispiel für ein Schadensmodell ist die Ableitung der zusätzlich sterbenden oder erkrankenden Menschen – aufgrund von Überschwemmungen, Missernten und anderen Effekte – die von Treibhausgasen und anderen Beiträgern zur globalen Klimaveränderung ausgelöst werden, siehe Abb. 5.



**Abb. 5. Umweltmechanismen der Wirkungsmodelle am Beispiel Treibhauseffekt/globale Klimaveränderung, schematisch, vereinfacht. In blauen Ellipsen ausgewählte Wirkmethoden an den Wirkungszwischenpunkten (IPCC) und den -endpunkten (LIME 2, ReCiPe 2008, Eco-indicator 99). Erläuterungen siehe vorausgehender Text. Aus [European Commission - JRC-IES 2011], verändert. Übersetzung durch den Verfasser.**

<sup>15</sup> In Englisch, aus [European Commission - JRC-IES 2011], umsortiert: *Climate change, Ozone depletion, Human toxicity (cancer effects, non-cancer effects), Particulate matter/Respiratory inorganics, Ionising radiation (human health, ecosystems), Photochemical ozone formation, Acidification (terrestrial, freshwater, marine), Eutrophication, (terrestrial, freshwater, marine), Ecotoxicity (terrestrial, freshwater, marine), Land use, Resource depletion (minerals, fossil energy, renewable energy, water).* Übersetzung durch den Verfasser.

Abb. 6 zeigt schematisch die Schritte von den Interventionen bis zu den Wirkungsendpunkten. Zum besseren Verständnis: Abb. 5 ist in vereinfachter Form in Abb. 6 enthalten.

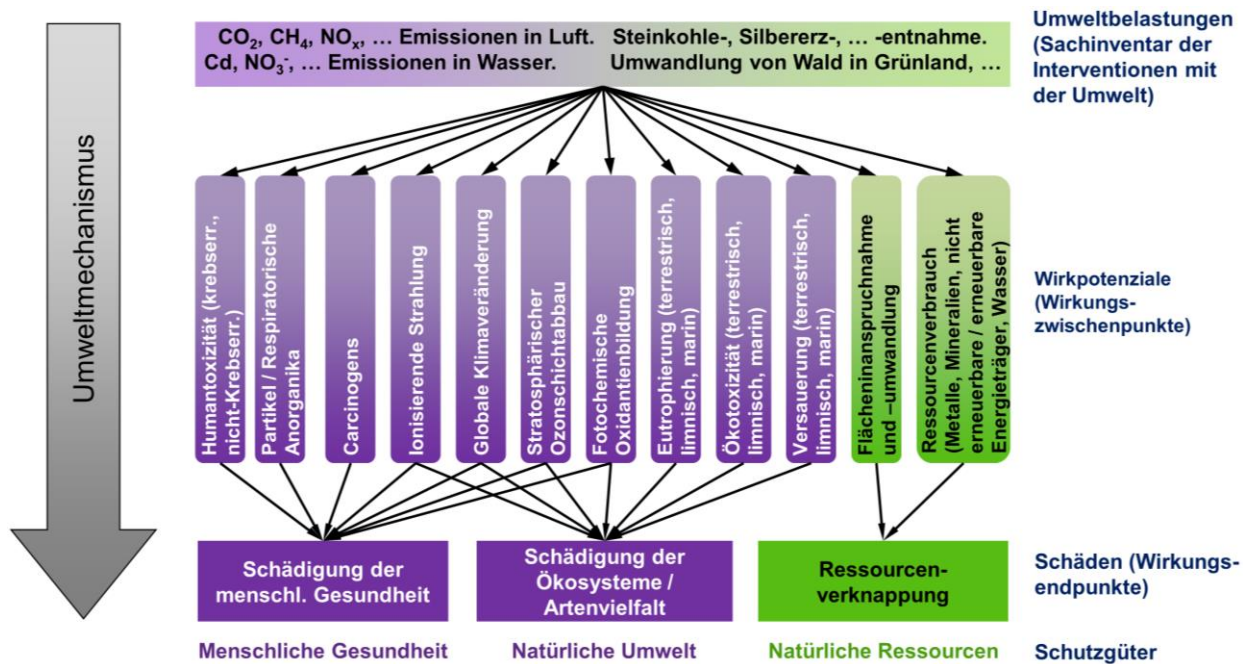


Abb. 6. Wirkanalyse – von den Umweltbelastungen über Wirkpotenziale zu Schäden/Wirkungen, schematisch. Aus [European Commission - JRC-IES 2010a], verändert. Übersetzung durch den Verfasser.

Eine Ökobilanz-Studie umfasst die folgenden **fünf Hauptphasen** [European Commission - JRC-IES 2010a], siehe Abb. 7:

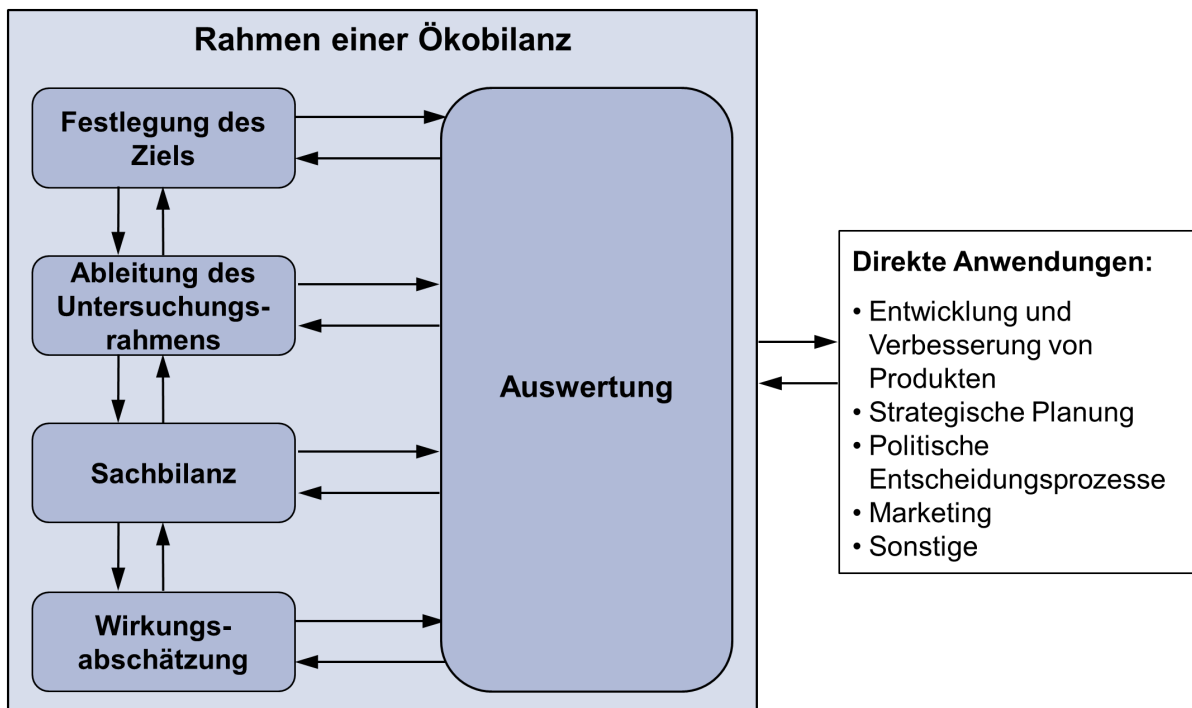
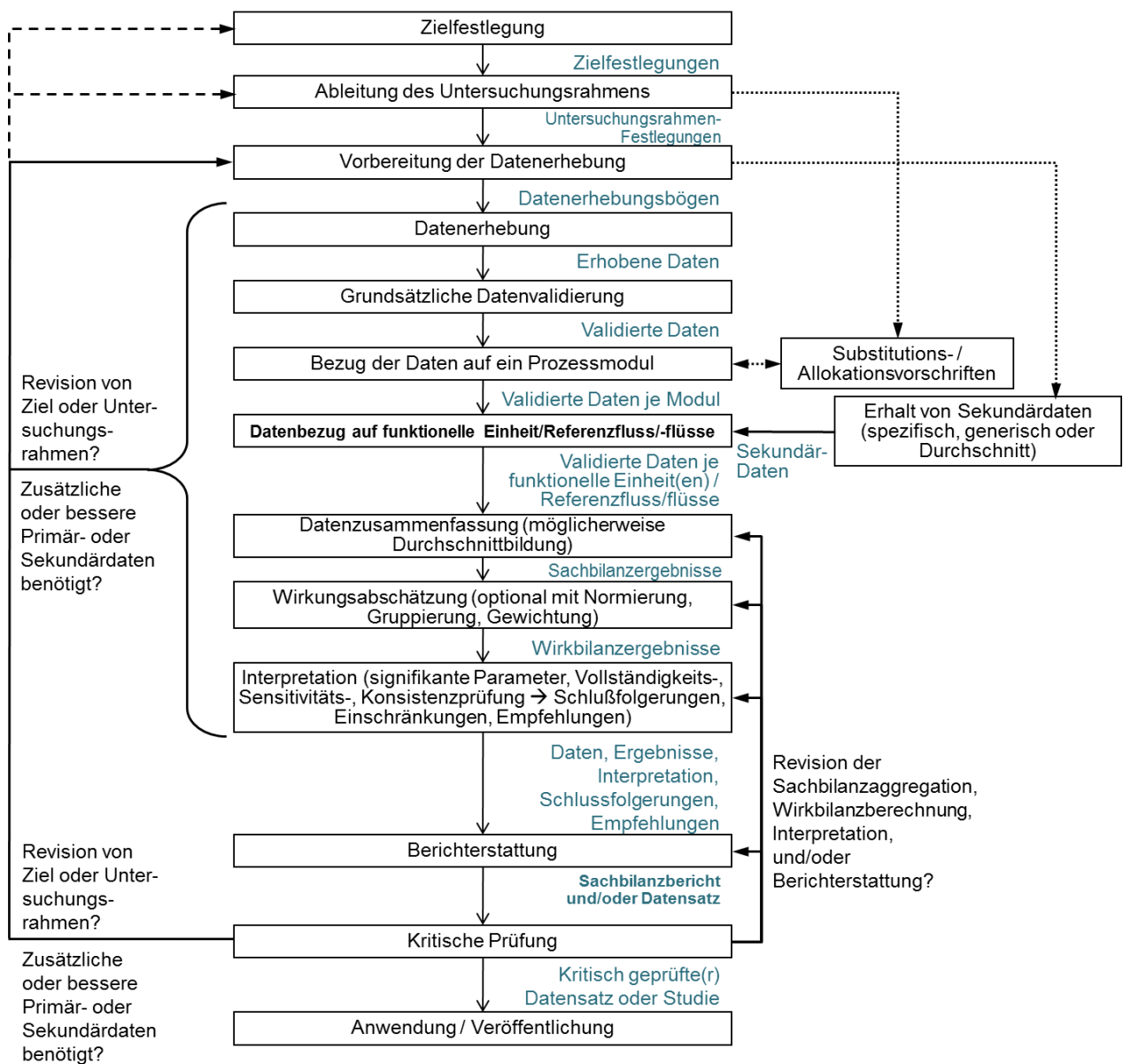


Abb. 7. Rahmen der Ökobilanzierung. Aus [European Commission - JRC-IES 2010a]; ursprünglich abgeleitet aus [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10], modifiziert. Übersetzung durch den Verfasser.

- Festlegung des Zieles
- Ableitung des Untersuchungsrahmens (d. h. Was genau wird untersucht und wie)
- Sachbilanz (d. h. Datenerhebung und Lebenswegmodellierung)
- Wirkungsabschätzung (d. h. Berechnung der potenziellen Wirkungen auf die Schutzziele)
- Auswertung

Zusätzlich ist die **Dokumentation** ein essenzieller Teil von Ökobilanzstudien, ebenso wie die **kritische Prüfung** (soweit im jeweiligen Fall vorgesehen).

Abb. 8 zeigt den Ablauf einer Ökobilanz mit Fokus auf die Sachbilanz.



**Abb. 8. Ablauf einer Ökobilanz mit Fokus auf die Sachbilanz. [European Commission - JRC-IES 2010a], ursprünglich erweitert auf Basis [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10]. Übersetzung durch den Verfasser.**

Für **weitere Informationen** wird auf die einschlägigen Normen ([Norm DIN EN ISO 14040:2009-11] und [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10]) verwiesen, sowie für weitere Details auf das ILCD Handbuch ([European Commission - JRC-IES 2010a]), das das neueste umfassende Handbuch zur Ökobilanzierung ist. Auch die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Begriffe der Ökobilanzierung werden aus [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11] und [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] übernommen und mit ins Deutsche übertragenen Begriffen des ILCD Handbuches ([European Commission - JRC-IES 2010a]) ergänzt, siehe Glossar.

Zur Ökobilanzierung existiert zudem eine umfangreiche Literatur zu speziellen methodischen Fragen und Anwendungsfällen, insbesondere folgende ausgewählte **Dissertationen an der Universität Stuttgart**: [Dekorsy 1993], [Schuckert 1996], [Bohnacker 1998], [Harsch 1998], [Beddies 1999], [Gediga 2001], [Baitz 2002], [Gabriel 2004], [Kupfer 2005], [Faltenbacher 2006], [Shibasaki 2008], [Mayer-Spohn 2009], [Makishi Colodel 2010] und [Schuller 2011] sowie Dissertationen zur Umsetzung in Softwarewerkzeuge durch [Volz 1999] und [Pfleiderer 1998].

Hinsichtlich der Erweiterung der Ökobilanzierung zur **Ganzheitlichen Bilanzierung** siehe [Eyerer 1996] und zur **Ökoeffizienzanalyse** u. a. [Saling et al. 2002] und [Huppel & Ishikawa 2005].

Die im Kontext der vorliegenden Arbeit relevanten **Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse** und **Sozial-Ökobilanzierung** sowie die Erweiterung zur **Nachhaltigkeitsbilanzierung** werden im Kap. 4.2 kurz adressiert.

### 3.1.2 Anwendungsbereiche

Die **Anfänge der Ökobilanzierung** gehen ins Jahr 1969 zurück [Hunt & Franklin 1990], gefolgt von einem stetigen aber zunächst langsamen Wachstum [Jensen et al. 1997]. Seit Anfang der 1990er Jahre hat die **Nutzung in Unternehmen** stark zugenommen. So gab es in Deutschland richtungsweisende Projekte zu Verpackungen (z. B. [ifeu 1990]), in der Automobilindustrie (z. B. die erste Ökobilanzierung eines kompletten Fahrzeugs in [IKP 1995]) und in der Bauindustrie (z. B. [IKP 1994]). Schwerpunkt der Anwendung war dabei mehr die innerbetriebliche Analyse von Produkten und Technologien als der – naturgemäß breiter wahrgenommene – veröffentlichte Vergleich von konkurrierenden Produkten.

**Typische Fragestellungen** der Ökobilanzierung sind Lebensweg-Schwachstellenanalysen und Vergleiche von Material- und Technologiealternativen. Sein größtes Potenzial im industriellen Einsatz hat die Ökobilanzierung beim Einsatz in der Vorentwicklung und Entwicklung von



Produkten, wenn das ökologische Profil weitgehend festgelegt wird, aber noch wesentliche Änderungen möglich sind ([Eyerer 1996]). Die Entwicklung geht aus diesem Grund, aber auch um die Kosten für die Anwendung der Methode zu senken, hin zu einer **Vereinfachung** der Nutzung des Experteninstrumentes Ökobilanz z. B. durch Einbettung in Entwicklungsumgebungen (z. B. in CAD Software [PE International AG 2011]).

Zunehmend wird das der Ökobilanzierung zugrunde liegende Lebenswegdenken, aber auch die eigentliche Ökobilanzierung in der **Politik** eingesetzt, um den Weg zu einer **kohärenteren (Umwelt-)Gesetzgebung** und einer **wissenschaftsbasierten Politik** zu unterstützen. Wesentliche lebenswegbasierte Entwicklungen in der europäischen Politik sind die Kommunikation zur integrierten Produktpolitik ([COM(2003) 302 final]), die thematischen Strategien zu erneuerbaren Ressourcen ([COM(2005) 670]) und Abfall ([COM(2005) 666]), die Kommunikation zu nachhaltigem Konsum und nachhaltiger Produktion sowie nachhaltiger Industriepolitik ([COM(2008) 397]) und die Kommunikation zur Ressourceneffizienz ([COM(2011) 21]).

Gegenwärtig wird in einem EU-weiten Pilotprojekt der Europäischen Kommission unter dem Begriff *Product Environmental Footprint* (PEF) die Nutzung von Ökobilanzen zur allgemeinen umweltlichen Kennzeichnung von Produkten erprobt und entsprechend mit dem *Organisation Environmental Footprint* (OEF) die umweltliche Leistung von Organisationen erfasst ([2013/179/EU]).

In der **öffentlich geförderten Forschung** entwickelt sich die Ökobilanz von einem freiwillig angebotenen ergänzenden Instrument in den letzten Jahren schrittweise zu einem verpflichtenden Element der Projektentscheidungsunterstützung und -dokumentation der umweltlichen Auswirkungen der entwickelten Produkte und Technologien. Wichtige Beispiele für derartige Ausschreibungen und Projekte sind [EC 2012], [Wittstock et al. 2012], [Lozanovski et al. 2011] und [Duce et al. 2013].

Gleichzeitig ist die Ökobilanz **keine Universalmethode**, sondern nur ein – wenngleich leistungsstarkes – Element, das erst gemeinsam mit anderen Instrumenten die beste umweltbezogene Entscheidungsunterstützung ermöglicht.

### 3.1.3 DALY – Behinderungs-angepasste Lebensjahre

Das Konzept der – in der vorliegenden Arbeit für direkte Personenschäden verwendeten – **DALYs** wird im Folgenden kurz beschrieben: Die Methode der Behinderungs-angepassten Lebensjahre (Englisch *Disability-adjusted life years*, DALY) aggregiert Informationen zu Kranken, Verletzten und Toten, indem sie die durch vorzeitige Todesfälle verlorenen Lebensjahre (Englisch *Years of life lost due to premature mortality*, YLL) und die entsprechend dem Ausmaß an Behinderung erschwerten Lebensjahre von Kranken und Verletzten (Englisch *Years lived disabled*, YLD) in derselben Größe und Dimension zusammenfasst, siehe Formel (a).

Die **Methode** geht auf das Projekt *The Global Burden of Disease* der Weltbank zurück ([Murray 1994]). Informationen zu den Hintergründen der Studie und der Ziele sowie detaillierte methodische Informationen finden sich in [Murray & Acharaya 1996].

DALYs errechnen sich demnach wie folgt ([Prüss-Üstün et al. 2003], erweitert um Summenbildung und Ermöglichung der tatsächlichen Verletzungsdauer (gegenüber der durchschnittlichen Verletzungsdauer in der Originalformel), Nomenklatur angepasst):

$$\text{Formel (a)} \quad DALY = YLL + YLD$$

Mit den durch vorzeitige Todesfälle verlorenen Lebensjahren:

$$\text{Formel (b)} \quad YLL = \sum_{i=1}^n N_{T_i} \cdot L_i$$

Mit

$i$  : Lebensjahr [a]<sup>16</sup>

$N_{T_i}$  : Anzahl Todesfälle im  $i$ -ten Lebensjahr

$L_i$  : Verbleibende Standard-Lebenserwartung<sup>17</sup> bei Todesalter  $i$

---

<sup>16</sup> Da die Lebenserwartungstabellen nicht feiner als ein Lebensjahr differenzieren, kann  $i$  hier als Alterslaufindex verwendet werden.

<sup>17</sup> Aufgrund unterschiedlicher Lebenserwartung von Frauen und Männern gibt es zwei Tabellen, der Klarheit halber wird hier die vereinfachte Formel dargestellt.

Und den aufgrund von Ausmaß von Behinderung gewichtet erschwerten Lebensjahre von Kranken und Verletzten:

$$\text{Formel (c)} \quad YLD = \sum_{i=1}^n N_{V_i} \cdot G_i \cdot D_i$$

Mit

$i$  : Laufindex der berücksichtigten Verletzungstypen

$N_{V_i}$  : Anzahl Verletzte für Verletzungstyp  $i$

$G_i$  : Durchschnittliche Gewichtung der Behinderung des Verletzungstyps  $i$  (Ein Gewichtungsfaktor  $G_i$  von 1 entspricht dem Tod und 0 entspricht perfekter Gesundheit ([Murray & Acharaya 1996]).)

$D_i$  : Durchschnittliche oder tatsächliche Dauer der Behinderung aufgrund Verletzungstyp  $i$

Informationen zu **Art, Schwere und Dauer von Verletzungen** gehen in die Bestimmung der DALY-Faktoren ebenso ein wie das **Alter von Verstorbenen**. Neben den kurzfristigen Behinderungen werden die bleibenden langfristigen Behinderungen einbezogen. Je detaillierter die Informationen sind, desto genauer können DALY-Faktoren errechnet werden. Andernfalls werden Durchschnittswerte verwendet oder fallspezifische Annahmen getroffen.

In **späteren Arbeiten** anderer Forscher wurde die Original-Methode variiert und es wurden Faktoren für weitere Gesundheitsbeeinträchtigungen und Krankheitsklassifikationsschemata erarbeitet. Eine ausführliche Diskussion der Original-Methode und verschiedener später vorgeschlagener Weiterentwicklungen findet sich in [Gawrich 2002]. Verschiedene Autoren haben entsprechende Varianten der Behinderungsgewichtungen tabellarisch dokumentiert, wobei Unterschiede in den Lebenserwartungstabellen und damit der Anzahl der im Todesfall verlorenen Lebensjahre, der Kurzfristig- und Langfristigkeit der Beeinträchtigungen, der Unterscheidung behandelter und unbehandelter Fälle, der Nutzung von Diskontierungen, der Altersabhängigkeit des Ausmaßes an Beeinträchtigung und damit der Behinderungsgewichtung und in anderen Aspekten liegen. Insbesondere die Diskontierung von weiter in der Zukunft liegenden Verletzungen und Todesfällen wurde bereits von verschiedenen Autoren u. a. aus ethischen Gründen kritisiert (z. B. diverse Beiträge in [Ezzati et al. 2002]). Auch [Homedes 1996] listet weitere Kritikpunkte auf. Die in der Ökobilanzierung verwendeten DALY Methoden

arbeiten zumeist ohne Diskontierung für zukünftige Fälle. Dies reflektiert den weitverbreiteten Ansatz der Ökobilanzierung, zukünftige Wirkungen und Wirkpotenziale gleich zu gewichten mit Gegenwärtigen. In der LVA-Methode werden Diskontierungen daher ebenfalls nicht verwendet.

Anhang Tab. 10 listet einen **Auszug der Behinderungsgewichtungs-Tabelle der WHO** [WHOa], mit Fokus auf Verletzungen, die Gesamttabelle deckt zudem eine große Anzahl an Krankheiten und anderen Zuständen ab (insgesamt werden über 350 Zustände unterschieden).

**In der Ökobilanzierung** kann die DALY-Methode als die geeignetste Methode zur Wirkanalyse von Verletzten und Toten verstanden werden. Zu diesem Schluss kommen [Hofstetter & Hammitt 2001] nach detaillierter Darstellung und Diskussion von DALY, QALY, Zahlungsbereitschaft (Englisch *willingness to pay*) und weiteren Ansätzen zur Bewertung von Gesundheitseffekten zur Nutzung in Entscheidungsunterstützungswerkzeugen. Ihre Argumentation gilt auch für die Randbedingungen der hier vorgeschlagenen Methode der LVA und ist mangels grundsätzlich neuer geeigneter Methoden als nach wie vor gültig einzuschätzen.

[Hofstetter 1998] beschreibt in seiner Dissertation umfassend die Nutzung von DALY als Wirkgröße in der Ökobilanzierung<sup>18</sup>. DALY wird in vielen relevanten **Wirkmethoden der Ökobilanzierung** für Schadwirkungen auf den Menschen verwendet, z. B. in Impact 2002+ ([Jolliet et al. 2003]), LIME 2 ([Itsubo & Inaba 2003]) und LIME 3 (in Vorbereitung, siehe [Itsubo 2013]), ReCiPe 2008 ([Goedkoop et al. 2009]), sowie ImpactWorld+ ([IMPACT World+ consortium 2013]).

Es sei darauf hingewiesen, dass die Faktoren der Schwere der Verletzungen **Werthaltungen** beinhalten.

Bei der Verwendung von **DALY Werten für direkte Personenschäden** werden die Wirkungsendpunkte direkt über die DALY-Faktoren und ohne ein Transport-, Umwandlungs- und Wirkmodell aus den Elementarflüssen berechnet, da diese im Falle direkter Personenschäden – anders als Interventionen mit der Umwelt – bereits die tatsächliche Wirkung auf das Schutzgut Mensch erfassen.

---

<sup>18</sup> [Hofstetter & Norris 2003] haben eine sektorbasierte Lebenswegmethode zur Ermittlung der DALY Werte für Produkte vorgestellt. Diese Methode wird im Kap. 4.2 „Stand der Technik und des Wissens“ allerdings nicht weiter charakterisiert, da sie keine relevanten Beiträge zur Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beinhaltet.

## 3.2 Quantitative Risikoanalyse (QRA)

### 3.2.1 Kurzcharakterisierung

Die quantitative Risikoanalyse, **QRA**, wird von Fachleuten in Unternehmen und Behörden eingesetzt, um die **Eintrittshäufigkeit und Schwere von Vorfällen in Industrieanlagen und Produkten** *ex ante* und *ex post* zu analysieren, mit dem Ziel, die Vorfalhäufigkeit zu verringern und deren Schwere zu mindern ([Marx & Cornwell 2001], [Gooijer et al. 2011])<sup>19</sup>. Die Schwere eines Vorfalls bezieht sich auf die möglichen Vorfallasswirkungen auf Mensch (Individualrisiko und gesellschaftliches Risiko), Umwelt und Vermögenswerte. Beispiel für Vorfallasswirkungen sind Tote und Verletzte, Freisetzung von Substanzen, Generierung von Ausschuss, Zerstörung von Anlagen, Produktionsausfälle usw.

Der erste und wesentliche Teil der QRA ist die **Probabilistische Risikoanalyse**, PRA (auch Probabilistische Sicherheitsanalyse, PSA, genannt), die im Kern auf die Ermittlung von Eintrittshäufigkeiten von Vorfällen abzielt. Wichtige Methoden der PRA sind Fehlerbaumanalyse (FBA), Ereignisablaufanalyse (EAA), Ausfalleffektanalyse, Zuverlässigkeitsanalyse sowie Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (vormals Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, FMEA) ([Crowl & Louvar 2011]). FBA und EAA werden später in diesem Kapitel kurz beschrieben, da deren Ergebnisse in der LVA verwendet werden. Eine gute Kurzübersicht über alle diese Verfahren bieten u. a. [Kurth et al. 2004] und ausgiebiger [Hauptmanns et al. 1987]. Eine vertiefte Diskussion der Verfahren sowie Anwendungsbeispiele finden sich z. B. in [Crowl & Louvar 2011].

In Ergänzung der Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, werden **Auswirkungsmodelle** eingesetzt. Hierzu gehören Modelle, die Freisetzungsraten und -mengen aus geschädigten chemischen Anlagenteilen und -bauteilen modellieren, ebenso wie Modelle, die Art und Schwere von Feuern, Explosionen usw. und die daraus potenziell resultierenden Opferzahlen schätzen ([Crowl & Louvar 2011])<sup>20</sup>. Manche Methoden schätzen semiquantitative oder quantitative Angaben zu freigesetzten Stoffmengen. Oft sind solche Auswirkungsmodelle in

---

<sup>19</sup> Die QRA wird auch in anderen Bereichen, wie z. B. dem Projektmanagement von Softwareprojekten verwendet. Hier wird allerdings auf die Nutzung im Kontext von Industrieprozessen, -anlagen- und -produkten fokussiert.

<sup>20</sup> Methoden zur Abschätzung der physikalischen, chemischen und biologischen Wirkung von Vorfällen sind sehr vielfältig und spezifisch für die untersuchte Anlage oder das Produkt. Zudem werden in der hier vorliegenden Arbeit ausschließlich die Ergebnisse solcher Wirkmodelle verwendet, nicht aber deren methodische Teile oder Aspekte. Daher wird hier nicht weiter auf derartige Methoden und Unfallfolgenmodelle eingegangen.

**Softwarepakete** integriert, die zudem oft auch die Fehlerbaumanalyse und Ereignisablaufanalyse umfassen (z. B. [DNVa], [INL]), eine systematische Übersicht hierzu findet sich in [Lewis 2005].

Angaben zu **erwarteten Emissionen z. B. aus Bränden usw.** werden meist nicht innerhalb der QRA erfasst/geschätzt oder nur insoweit als die grundsätzliche Gefährdung von Anwohnern durch toxische Gase qualitativ bewertet wird. Ebenfalls wird die Leistung der untersuchten oder verunglückten Prozesse, z. B. jährliche Produktionsmengen, nicht gezielt als Teil der QRA dokumentiert, da sie keine relevante Bezugsgröße der QRA darstellt. Lediglich die während eines Vorfalls im betroffenen Teil der Anlage anwesenden Stoffmengen und ähnlich Angaben werden oft dokumentiert, wie eine eigene Auswertung von über 20 QRA-Studien des US-amerikanischen *Chemical Safety Board* (siehe CSB Website [CSB]) zur Anlagengenehmigung und Unfallanalyse gezeigt hat.

Unter dem Oberbegriff **Vergleichende Risikoanalyse** (Englisch *Comparative Risk Assessment*, CRA) werden verschiedene Ansätze der Kombination von Risikoanalyse-Methoden mit anderen Werkzeugen – u. a. auch der Ökobilanzierung – zusammengefasst ([Schütz et al. 2003]). Ihnen gemeinsam ist das Ziel, Risiken quantitativ vergleichbar zu machen. Dies erstreckt sich von Produkten über Krankheitsbehandlungs-Methoden bis hin zu Lebensstilen. Die im Rahmen dieser Dissertation zu erarbeitende Methode fällt daher formal in den Oberbereich der Vergleichenden Risikoanalyse.

### 3.2.2 Anwendungsbereiche

Die Quantitative Risikoanalyse geht im Kern zurück auf [Farmer 1967], der mit der **Risiko-Grenzkurve** (auch F-N-Kurve oder Farmer-Kurve genannt, Beispiel siehe Abb. 11) die methodische Grundlage für die quantitative Risikobewertung industrieller Anlagen schuf. Die Risiko-Grenzkurve bezieht sich auf das Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß eines Unfalls und wurde von Farmer zum Zweck der *ex ante* Unfallanalyse von Kernreaktoren entwickelt.

Eine wichtige Motivation für die Entwicklung von QRA Methoden sind **gesetzliche Vorgaben zur Anlagensicherheit**. Darauf aufbauende Sicherheits- und Umweltverträglichkeitsprüfungen, UVP (Englisch *Environmental Impact Assessment*, EIA), sind in vielen Ländern weltweit vor der

Genehmigung neuer Anlagen oder maßgeblicher Änderungen und Erweiterungen bestehender Anlage zu erstellen [CCPS 2009].

Viele Länder und Regionen (z. B. die Niederlande, Großbritannien, Australien, Hong Kong, Staat Sao Paulo) haben laut [Ball & Floyd 1997] und [CCPS 2009] **Obergrenzen für akzeptable Unfallrisiken** für bestehende und insbesondere neue Technologien und Anlagen festgelegt. Deren Einhaltung ist anhand von QRA-Studien nachzuweisen. Den Umständen entsprechend sind dies zumeist *ex ante* Studien, Details siehe Kap. 3.2.4 unter „F-N-Kurve“.

Neben der Untersuchung von Unfallrisiken und der Nachvollziehung von erfolgten Unfällen kann die QRA zudem zur Analyse von **Terrorbedrohungen von Industrieanlagen** eingesetzt werden ([Kaplan 2003]).

### 3.2.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisablaufanalyse

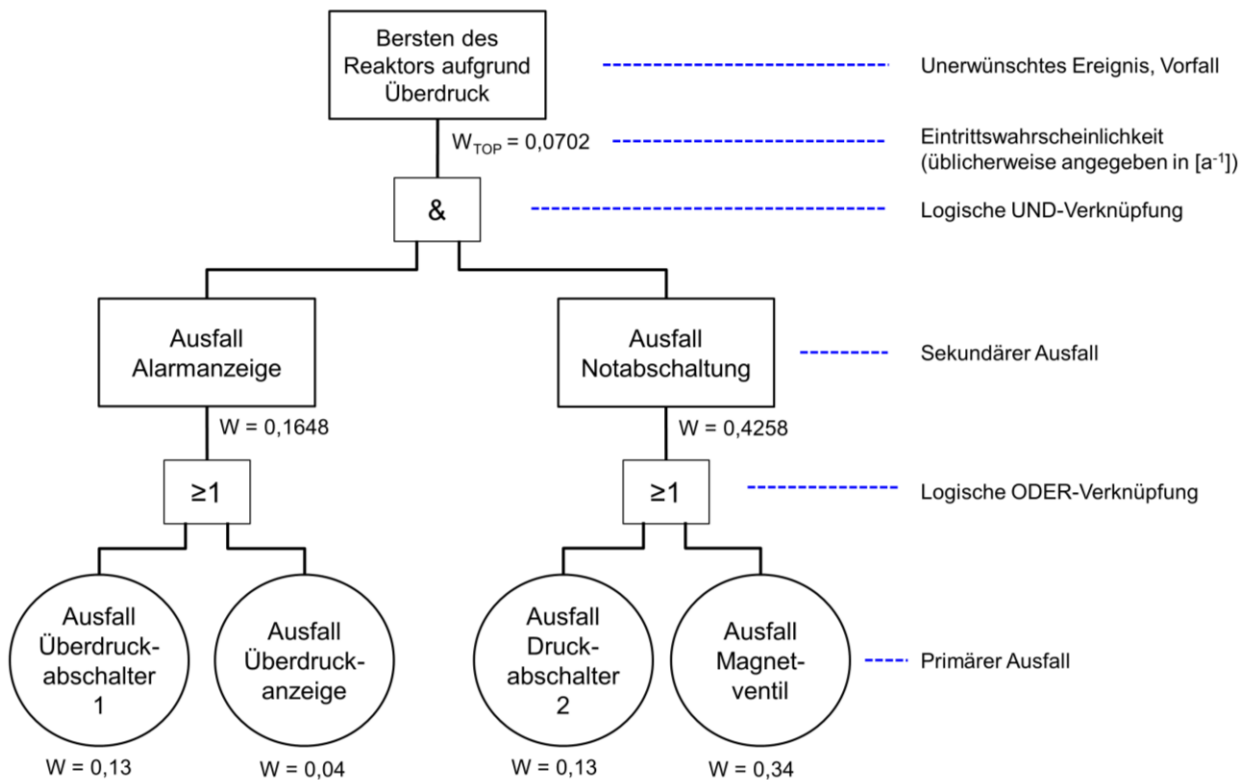
#### **Fehlerbaumanalyse**

Die Fehlerbaumanalyse (FBA) geht auf H. A. Watson zurück [Ericson 1999] und wurde in [Norm DIN 25424 Teil 1:1981] und [Norm DIN 25424 Teil 2:1990] erstmals in Deutschland in standardisierter Form beschrieben. Die FBA dient dazu, **deduktiv und systematisch alle möglichen primären Auslöser** zu identifizieren, die zu einem vorgegebenen **unerwünschten Ereignis (hier auch: Vorfall; Englisch *top event*)** führen können. Die Ereignisketten, die zu diesem unerwünschten Ereignis führen können, werden mithilfe des Fehlerbaums dargestellt ([Norm DIN 25424 Teil 1:1981]). Die Fehlerbaumanalyse der [Norm DIN 25424 Teil 1:1981] ist auf die Anwendung für technische Systeme zugeschnitten, aber auf Ereignisse nicht technischer Art grundsätzlich übertragbar ([Norm DIN 25424 Teil 1:1981]).

Über die Ermittlung von **Eintrittshäufigkeiten** der einzelnen primären Ausfälle, die entlang verschiedener Pfade letztlich zu dem vorgegebenen unerwünschten Ereignis führen, kann die statistische Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. -häufigkeit dieses unerwünschten Ereignisses errechnet werden. Mittels Monte-Carlo-Simulation und anderer Fehlerrechnungsmethoden ist eine stochastische Analyse der ermittelten Häufigkeiten möglich, sofern die benötigten stochastischen Informationen zur Verfügung stehen.

In der **Fehlerbaumauswertung** werden die Ereignisketten mit ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten und Vorfallschweren dargestellt und die Wahrscheinlichkeiten des unerwünschten Ereignisses und der vorgelagerten sekundären und kommandierten Ausfälle ermittelt.

Abb. 9 zeigt das **Beispiel eines einfachen Fehlerbaums**, dem Bersten eines Reaktors aufgrund Überdruck als unerwünschtes Ereignis<sup>21</sup>. Die Abbildung zeigt die Wahrscheinlichkeiten ( $W$ ) des Eintritts der primären und sekundären Ausfälle und des unerwünschten Ereignisses jeweils unterhalb der Symbole. Der Reaktor birst, wenn sowohl die Alarmanzeige als auch die Notabschaltung ausfällt. Diese sekundären Ausfälle treten auf, wenn die dargestellten primären Ausfälle jeweils alternativ (oder gemeinsam) auftreten.



**Abb. 9. Beispiel für ein Fehlerbaumdiagramm. Aus [Crowl & Louvar 2011], verändert, mit den Bildzeichen aus [Norm DIN 25424 Teil 1:1981]. Übersetzung durch den Verfasser.**

Bei der **quantitativen Auswertung von Fehlerbäumen mit multiplen Auslösern** ist die logische Verrechnung der Eintrittshäufigkeiten der beteiligten Ausfälle vorzusehen. Wesentliche Fälle sind hierbei die in den DIN-Normen [Norm DIN 25419:1985] und [Norm DIN 25424 Teil 1:1981] unter Standardbildzeichen genannten Verknüpfungen der NICHT-Verknüpfung (Negation), ODER-Verknüpfung (logische Vereinigung, Bildzeichen  $\geq$  in Abb. 9) sowie UND-Verknüpfung (logischer Durchschnitt, Bildzeichen  $\&$  in Abb. 9). Mithilfe dieser grundlegenden logischen Verknüpfungen lassen sich die wesentlichen Ereignisabfolgen der Fehlerbaumanalyse abbilden.

<sup>21</sup> In der vorliegenden Arbeit entspricht dieses einem Vorfall.



Die folgenden **Beziehungen** werden oftmals benötigt, um Eintrittswahrscheinlichkeiten, Zuverlässigkeiten und Ausfallraten/Ereignishäufigkeiten beim Aufbau und der Auswertung von Fehlerbäumen ineinander umzurechnen ([Crowl & Louvar 2011]):

**Formel (d)**      $Z = e^{-\mu \cdot t}$

**Formel (e)**      $W = 1 - Z = 1 - e^{-\mu \cdot t}$

**Formel (f)**      $\mu = -\ln Z$

**Formel (g)**      $\mu = -\ln(1 - W)$

Mit:

$Z$  : Zuverlässigkeit  $\in [0, 1]$

$\mu$  : Durchschnittliche Ausfallrate (Häufigkeit) [ $a^{-1}$ ]

$W$  : Ausfallwahrscheinlichkeit (Eintrittswahrscheinlichkeit)  $\in [0, 1]$

**Weiteres** zur Aufstellung von Fehlerbäumen und zur Verrechnung der Eintrittshäufigkeiten entlang der Ereignisfolgen sowie zu den grafischen Bildzeichen sind in [Norm DIN 25424 Teil 1:1981] und [Norm DIN 25424 Teil 2:1990] sowie der einschlägigen Literatur (z. B. [Bedford & Cooke 2001], [Grams 2001], [Crowl & Louvar 2011]) beschrieben, wo sich auch Anwendungsbeispiele und vertiefte Diskussionen zur Fehlerbaumanalyse finden.

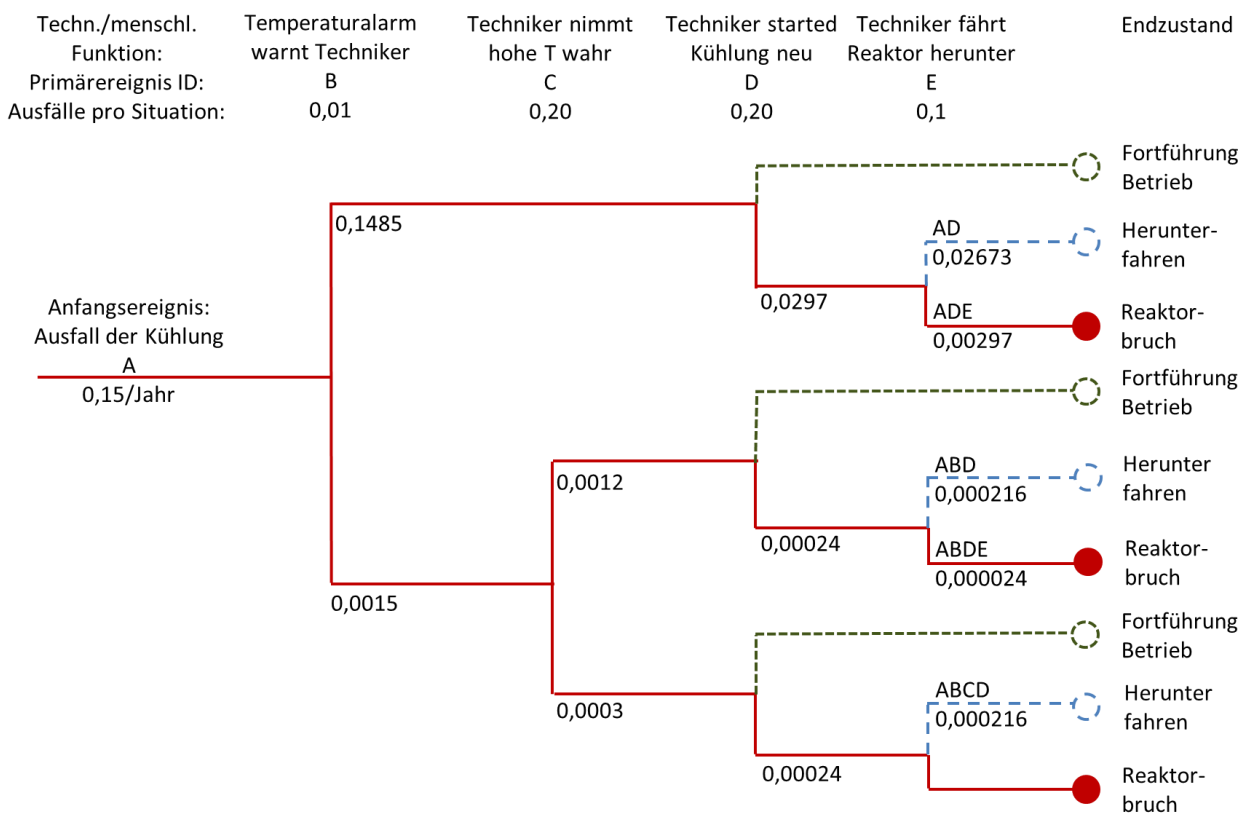
### **Ereignisablaufanalyse**

Die Ereignisablaufanalyse, EAA, bezieht sich auf ein bestimmtes, **auslösendes Ereignis** und ermittelt die **Zwischen- und Endzustände** (hier: Vorfälle), die sich **induktiv aus einem vorgegebenen Anfangsereignis** entwickeln können ([Norm DIN 25419:1985]). Auch diese Methode wird zur Untersuchung von Störungen und Störfällen in technischen Systemen eingesetzt, ist aber angelegt zur Beschreibung und Bewertung von Ereignisabläufen aller Art. Das genannte Anfangsereignis kann ein Ausfall einer technischen Komponente, ein bestimmtes menschliches Versagen oder ein externes Ereignis sein. [Debray et al. 2004] listet eine Vielzahl differenzierter Anfangsereignisse (dort als „causes“ bezeichnet), basierend auf einer Analyse der iChemE Unfalldatenbank.

Das **Ereignisablaufdiagramm** stellt die Abläufe grafisch dar. Die logischen Operationen sind ähnlich zur FBA, wobei anstelle der einschließenden logischen Vereinigung hier die ausschließende logische Vereinigung tritt, die NICHT- und die UND-Verknüpfung treten nicht auf, zusätzlich treten Verzweigungen auf ([Norm DIN 25419:1985]).

Nach Überführung der logischen Zusammenhänge und **Eintrittshäufigkeiten** im Ereignisablauf kann die Häufigkeit des Eintritts der einzelnen Endzustände (z. B. Szenarien unterschiedlicher Vorfälle aber auch schadloser Endzustände) errechnet werden. Die Methoden der FBA werden hierbei angewendet ([Norm DIN 25419:1985]).

Abb. 10 zeigt ein Beispiel einer Ereignisablaufauswertung mit den Eintrittshäufigkeiten verschiedener Endzustände.



**Abb. 10. Illustratives Beispiel einer Ereignisablaufauswertung – chemischer Reaktor mit Kühlungsverlust. Der jeweils untere Arm nach einer Verzweigung bezieht sich auf den Ausfall. Die Vorfälle (unerwünschte Endzustände) mit Reaktorbruch sind mit rot gefüllten Kreisen markiert und der Ablauf zu diesen Vorfällen mit roter ununterbrochener Linie dargestellt. Zudem ist hier bereits die spezifische Ausfallhäufigkeit des Anfangsereignisses angegeben, anstelle der meist auf „1“ gesetzten Häufigkeit. Erstellt unter Verwendung von Elementen aus [Crowl & Louvar 2011] und [Norm DIN 25419:1985], modifiziert. Übersetzung durch den Verfasser.**

Mithilfe der Monte-Carlo-Simulation und anderer Methoden können die ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten oder -häufigkeiten der Endzustände zudem stochastisch untersucht werden ([CCPS 2000]).

Weiteres zur Aufstellung von Ereignisablaufdiagrammen und zur Verrechnung der Eintrittshäufigkeiten entlang der Ereignisfolgen sowie den vorgeschlagenen grafischen Bildzeichen sind in [Norm DIN 25419:1985] sowie der einschlägigen Literatur (z. B. [Grams 2001], [Crowl & Louvar 2011]) beschrieben, in der sich auch Anwendungsbeispiele und vertiefte Diskussionen zur Ereignisablaufanalyse finden.

### 3.2.4 Wesentliche Begriffe der QRA

#### Begriffsquellen

Im deutschsprachigen Raum werden eine Reihe Begriffe der QRA in der [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004] definiert<sup>22</sup>. Soweit möglich und im Kontext dieser Arbeit zielführend, wurden diese Begriffe verwendet. Weitere relevante, teilweise auf spezifische Anwendungsfelder zugeschnittene und entsprechend abweichende Definitionen, finden sich in [Norm DIN 40041:1990-12] und [Norm DIN EN 31010:2010]. Gab es für die in der vorliegenden Arbeit benötigten Sachverhalte in den zuvor genannten Quellen keine geeignete Definition, wurde auf andere Quellen zurückgegriffen oder die Begriffe sind zur Verwendung in der hier vorliegenden Arbeit definiert worden, siehe **Glossar**. Einige wesentliche Begriffe werden im Folgenden näher beschrieben:

#### Eigenschaften, Auslöser und Ursachen

Jeder Vorfall wird erst ermöglicht durch die spezifischen **Eigenschaften** des Systems, das den Vorfall erleidet. So ist die Brennbarkeit eines Produktes Voraussetzung dafür, dass es brennen kann und die entstehenden Emissionen zu den Vorfallfolgen beitragen können. Das Vorhandensein von Sauerstoff ist hierfür eine weitere notwendige Systemeigenschaft. Zudem

---

<sup>22</sup> Die fachlich korrekte Verwendung von Begriffen der Vorfalfforschung und Quantitativen Risikoanalyse im Kontext einer allgemeingültigen Methode steht vor dem Problem einer inkonsistenten Verwendung der identischen Begriffe je nach spezifischem Methodenansatz, Produkt- oder Prozesstyp, Branche, Land usw. Umfassend formuliert die OECD dieses Problem wie folgt: "*This lack of consistency in the definitions of essential terms of art creates an impediment to understanding among countries and among stakeholders of the approaches and methodologies used in risk assessment and consequently, creates uncertainty of the significance of the results obtained.*" ([OECD 2003]). Dieselbe Quelle enthält eine umfangreiche englischsprachige Zusammenstellung verschiedener Definitionen für den jeweils identischen Fachbegriff, womit zugleich das obige Zitat anschaulich illustriert wird.

modifizieren die speziellen Eigenschaften eines Produktes die genaue Art der möglichen Vorfallauswirkungen. So führen beispielsweise schwefelhaltige Verbindungen in Feuern zu verschiedenen schwefelhaltigen Verbrennungsprodukten, insbesondere  $\text{SO}_2$ .

Zudem hat jeder Vorfall mindestens einen **Auslöser**, der den Vorfall inhaltlich und zeitlich initiiert. Ein Beispiel ist die Überhitzung eines elektrischen Gerätes durch Abdeckung seitens des Nutzers als Auslöser für ein Feuer.

Weiterhin gibt es mindestens eine **Ursache** für jeden Vorfall. Ein Beispiel ist die Nicht-Beachtung der Bedienungsanleitung eines elektrischen Gerätes, die zu dem zuvor genannten Auslöser führt. Ursachen gehen also den Auslösern voraus, in FBA und EAA werden sie in der Regel nicht einbezogen, es sei denn, die Studie zielt auf die den Auslösern zugrunde liegenden Ursachen ab.

Die Definition dieser drei Begriffe zur Verwendung in der vorliegenden Arbeit erfolgt im Kap. 5.4.3, siehe auch Glossar.

### **F-N-Kurve und durchschnittliche Todesfallrate**

Die **F-N-Kurve** ( Häufigkeits-Anzahl-Kurve, Englisch *frequency-number curve*, auch *Farmer curve* nach dem Entwickler Reginald F. Farmer) ist eine häufig verwendete, doppelt-logarithmische Darstellung der gesellschaftlichen Risiken aus Vorfällen ([CCPS 2000]).

Für neue Technologien oder spezifische Industrieanlagen haben – wie bereits erwähnt – viele Nationen Grenzen akzeptabler Risiken festgelegt ([CCPS 2009]). Bei der Festlegung akzeptabler Risiken werden meist sowohl besonders häufige Unfälle als auch besonders schwere Unfälle (alleinig oder wesentlich anhand der Anzahl von Todesfällen definiert) als nicht tolerierbar eingestuft. Dazwischen wird die **Toleranzgrenze** oft proportional zum Produkt aus Risiko\* Ausmaß gezogen, wohingegen die Grenzlinien in anderen Ländern steiler verlaufen, also Todesfälle aus besonders schweren Unfällen stärker gewichtet werden als solche aus weniger schweren. Extrem seltene und in der Realität bisher nicht vorgekommene Vorfälle (z. B. Meteoriteneinschlag) werden oft ausgeklammert.

Abb. 11 zeigt das **Beispiel** für Hongkong: Vorhaben, deren Kurve oberhalb oder rechts von der roten gestrichelten Linie liegen sind nicht akzeptabel, Projekte unterhalb der schwarzen gepunkteten Linie sind akzeptabel. Für zwischen diesen beiden Linien liegende Projekte, dem

ALARP-Bereich, sollen durch Maßnahmen so geringe Risiken wie möglich erreicht werden ([Hong Kong Planning Division 2013b], [Hong Kong Planning Division 2013a]).

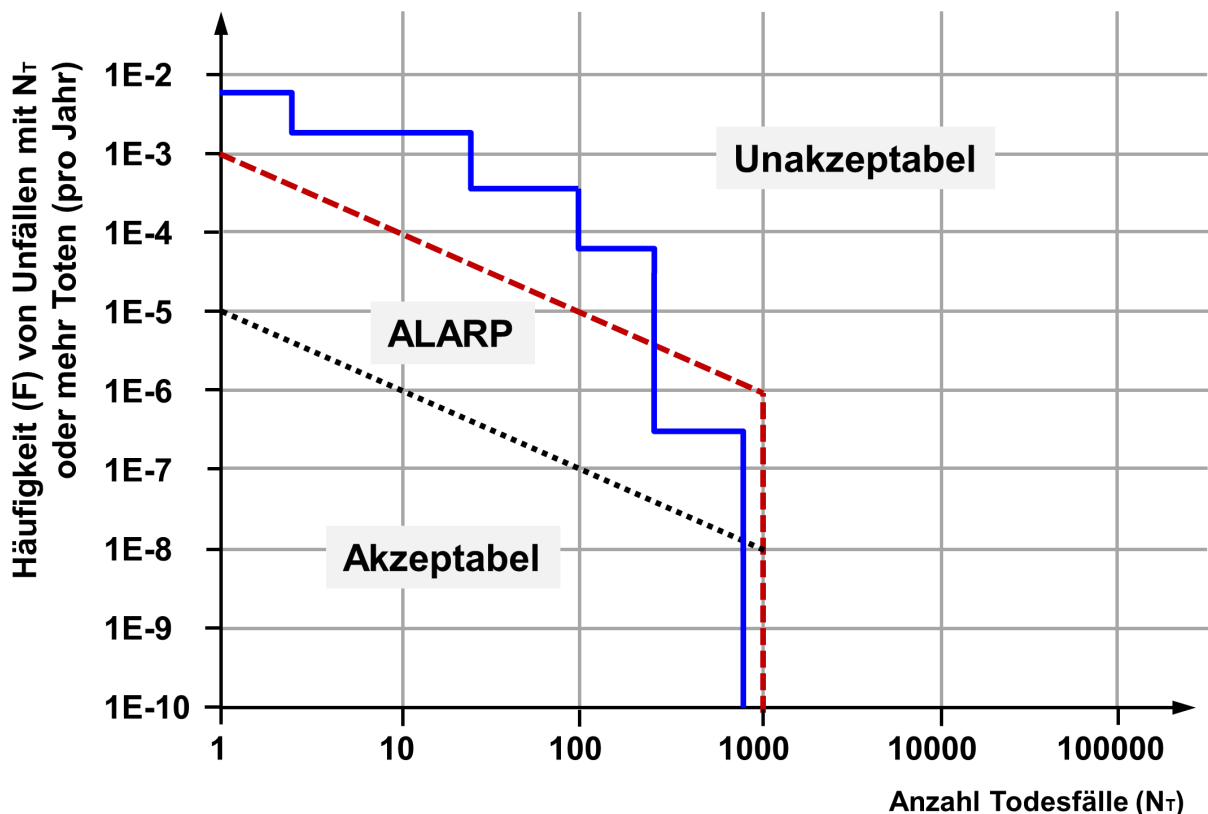


Abb. 11. F-N-Kurve und akzeptable gesellschaftliche Risiken am Beispiel Hongkong: Virtuelles Beispiel einer neuen Industrieanlage (blaue F-N-Kurve) mit unakzeptabel hohen Vorfallhäufigkeiten im Bereich von Vorfällen unter ca. 250 und im ALARP Bereich zwischen ca. 250 und ca. 900 Todesfällen je Vorfall, Erläuterungen siehe vorausgehender Text. [Hong Kong Planning Division 2013b], Beispiel ergänzt. Übersetzung durch den Verfasser.

Die **durchschnittliche Todesfallrate**,  $R_{Tod}$  (Englisch *Rate of Death*, ROD oder auch *Potential Loss of Life*, PLL) – als Anzahl durchschnittlich erwarteter Todesfälle pro Jahr und bezogen auf einen definierten Prozess oder Anlage – entspricht der Fläche unter der F-N-Kurve ([CCPS 2000]).

Bei explizit modellierten Vorfallszenarien kann sie wie folgt errechnet werden (siehe Formel (h), aus [Lees 1996], Nomenklatur angepasst), andernfalls als Integral der F-N-Kurve, wie von [Aelion et al. 1995] vorgeschlagen.

$$\text{Formel (h)} \quad R_{Tod} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot N_{T_i}$$

Mit

$i$  : Laufindex der berücksichtigten spezifischen Vorfälle oder der Vorfalltypen bestimmter Schwereklassen

$\mu_i$  : Häufigkeit des Vorfalls oder Vorfalltyps  $i$  (entspricht F in Abb. 11)

$N_{T_i}$  : Anzahl Todesfälle bei Vorfall oder Vorfalltyp  $i$

## 4 Stand der Technik und des Wissens

### 4.1 Kapitelübersicht

Dieses Kapitel beschreibt den Stand der Technik und des Wissens in der quantitativen lebenswegbezogenen Erfassung von Vorfällen und deren Wirkungen auf Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit, **bis einschließlich September 2013**.

Dabei liegt der Fokus auf Arbeiten, die entsprechend den Zielvorgaben der hier vorliegenden Arbeit die Vorfallauswirkungen mit Bezug zu einem Produkt oder Prozess sowie deren funktioneller Einheit inventarisieren<sup>23</sup>.

In **Kap. 4.2** werden zunächst **eine Reihe nahe verwandter Methoden gemeinsam vorgestellt**, die aus der Ökobilanzierung abgeleitet wurden und Tote und Verletzte aus Unfällen in einfacher Form inventarisieren und auswerten.

Die weiteren, im Kontext der vorliegenden Arbeit relevanten Methoden, werden in **Kap. 4.3 bis 4.8 Methode für Methode in chronologischer Reihenfolge** dargestellt.

Anschließend wird der **Stand der Technik diskutiert (Kap. 4.9)**.

Das daran anschließende **Kap. 4.10** identifiziert diejenigen methodischen Komponenten, die über den Stand der Technik hinaus noch zu erarbeiten oder weiter zu entwickeln sind, und **steckt damit den engeren Rahmen der Methodenentwicklung in der hier vorliegenden Arbeit ab**.

Abschließend wird in Kap. 4.11 der **Informationsstand zu Datenbanken und Statistiken** mit quantitativen Informationen zu technischen Lebenswegen und Vorfällen, sowie zu QRA-Studien kurz vorgestellt und anschließend bewertet.

---

<sup>23</sup> Kennzahlmethoden werden hier ausgeschlossen, da sie grundsätzlich nicht mit den in der Ökobilanz erfassten Auswirkungen vergleichbar sind. Hierzu gehören insbesondere die Arbeiten zur Risikopotenzialanalyse (RPA) als Scoring-System aufgrund Material- und Prozesscharakteristika nach [Fleischer 1998] und zu Risikokennzahlen für nicht bestimmungsgemäße Betriebszustände von Industrieanlagen im Rahmen von Ökobilanzen nach [Kurth et al. 2004]. Ferner werden auch industriesektorbasierte Methoden ausgeklammert, da sie nicht prozess- oder produktbezogen sind und die differenzierte Datenerfassung und -auswertung daher nicht unterstützen.

## 4.2 Erfassung unfallbedingter Toter und Verletzter in Ökobilanzierung, Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, Sozial-Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbilanzierung (diverse Autoren 1989 bis 2013)

### Kapitelübersicht

Im Bereich der Ökobilanzierung und den daraus abgeleiteten Methodenfamilien der Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, LWAA (Englisch *Life Cycle Working Environment*, LCWE), Sozial-Ökobilanzierung (Englisch *Social Life Cycle Assessment*, S-LCA) und Nachhaltigkeitsbilanzierung (Englisch *Life Cycle Sustainability Assessment*, LCSA) haben eine Reihe Arbeitsgruppen nahe miteinander verwandte lebenswegbezogene und quantitative Methoden erarbeitet, die u. a. die **Erfassung der Auswirkungen von Unfällen auf den Menschen** beinhalten.

Allen hier genannten Methoden ist gemeinsam, dass sie **ausschließlich unfallbedingte Personenschäden (und teilweise die Gesamtheit aller Berufskrankheiten)** erfassen. Je nach Methode werden grundsätzlich **alle oder ausschließlich „schwere“ Unfälle** einbezogen und dies in unterschiedlicher Differenzierung der Verletzungen, Alter der tödlich Verunfallten usw. Inventarisiert werden in der Regel Elementarflüsse nach dem Schema 5 „Todesfälle“, 2 „Verletzte“, 3 „Fälle von chronischer Bronchitis“ usw. Die Wirkanalyse nutzt meist DALY, siehe Kap. 3.1.3.

Die Methoden sind **generell branchenunabhängig**, teilweise werden alle Branchen explizit einbezogen. Die Inventare für Prozesse oder Produkte werden entweder auf Basis **prozessbasierter oder standortbasierter** Datenaufnahme und Aggregation entlang des Lebensweges erstellt (z. B. [Bengtsson & Berglund 1996], [Hauschild & Wenzel 1998]) oder auf Basis industriesektorbasierter Datenaufnahme heruntergebrochen (z. B. [Antonsson & Carlsson 1995], [Schmidt et al. 2000]) oder in Kombination dieser beiden Ansätze erstellt (z. B. [Wolf et al. 2002]).

Die prozessbasierten und standortbasierten Methoden orientieren sich explizit oder implizit an der DIN EN ISO 14040 Reihe. Die industriesektorbasierten Methoden sind nicht oder nur sehr eingeschränkt für die vorliegende Arbeit geeignet, da die Datenaufnahme sich dort nicht auf das Prozessmodul bezieht, sondern auf ganze Industriesektoren eines Landes.



Die Arbeiten haben teilweise einen methodischen Fokus, teilweise stehen die Fallstudien im Vordergrund, und/oder der Aufbau von Datenbanken ist Hauptziel.

Die **qualitative und quantitative Zuordnung der Unfälle zu den unfallbeteiligten Prozessen** erfolgt in allen identifizierten Methoden ohne detaillierte methodische Vorschrift, also implizit.

Im Folgenden werden wichtige Arbeiten aufgelistet, gruppiert entsprechend des verwendeten Methodenrahmens:

### **Ökobilanzierung**

In der Ökobilanzierung werden tödliche Unfallwirkungen als Elementarflüsse (d. h. Anzahl Tote) von manchen Arbeitsgruppen einbezogen, wie bereits von [Guinée et al. 1992] und [Guinée et al. 2002] vorgeschlagen. Erfasst werden **Unfallopfer** (Englisch *casualties*, ursprünglich *direct victims* bezeichnet) **als Inventarfluss und zugleich Wirkkategorie**.

Auf der Ökobilanzierung beruht auch die Externe Methode ([Dreicer et al. 1995] und [Bickel & Friedrich 2005]), die die Auswirkungen in externe Kosten überführt, siehe auch den Hinweis am Ende von Kap. 4.5.

### **Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse**

Die Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse erfasst **arbeitsplatzbezogene Wirkungen auf den Menschen und weitere arbeitsplatzbezogene Aspekte**. Sie umfasst z. B. neben Arbeitszeitaufwendungen verschiedener Qualifikationsstufen, Kinderarbeit, Ungleichbezahlung von Frauen, Arbeitnehmerrechte wie das auf gewerkschaftliche Organisation usw. sowie als eine Komponente auch Unfälle am Arbeitsplatz. Einbezogen werden unfallbedingte Tote sowie oft auch Verletzte und diese teils differenziert nach Schweregrad oder Verletzungstyp und – je nach Methode – auch Fälle von Berufskrankheiten. Wichtige Arbeiten sind [Bengtsson & Berglund 1996], [Broberg & Rasmussen 1996], [Hauschild & Wenzel 1998], und [Wolf et al. 2002].

Eine sehr gute und ausführliche **Übersicht und Analyse** der insbesondere im skandinavischen Raum erarbeiteten Methoden findet sich in [Schmidt et al. 2004a]. Hier sind weitere sektorbasierte Methoden beinhaltet, die für die vorliegende Arbeit allerdings keine zusätzlichen methodischen Beiträge leisten, insbesondere [Antonsson & Carlsson 1995], [Schmidt et al. 2000] und [Schmidt et al. 2004b].

Die Weiterentwicklung der LWAA-Methoden ab 2005 hat zumeist in die Sozial-Ökobilanzierung gemündet.

### **Sozial-Ökobilanzierung**

Die Sozial-Ökobilanzierung ([Dreyer et al. 2006], [Benoît et al. 2009] und [Benoît-Norris et al. 2011]) erweitert die Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse auf den **gesamten Lebensweg** und ergänzt insbesondere nutzungsabschnittsspezifische **individuelle und gesellschaftliche soziale Auswirkungen**<sup>24</sup>.

### **Nachhaltigkeitsbilanzierung**

Die Nachhaltigkeitsbilanzierung **integriert Methoden zur umweltlichen ökonomischen und sozialen Lebenswegbilanzierung in einem gemeinsamen Betrachtungsrahmen**. Unfallbedingte Tote und Verletzte sowie Fälle von Berufskrankheiten werden dabei im Bereich der sozialen Methodenkomponente erfasst. Die Nachhaltigkeitsbilanzierung ist daher als Kombination der vorgenannten Methoden zu verstehen. Interessanterweise gibt es eine sehr frühe Arbeit, die als ihrer Zeit voraus verstanden werden kann und daher seinerzeit fast keine Anwendungsprojekte zur Folge hatte: die Methode der Produktlinienanalyse ([Öko-Institut 1987]). Wichtige Arbeiten sind zudem [Wolf et al. 2001], [Schmidt et al. 2004c], [Saling & Analysis 2011], [Pelletier et al. 2012] und [Scheumann et al. 2013].

### **Praxisumsetzung und Weiterentwicklungen**

Die verschiedenen Methoden und Teilmethoden der Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, Sozial-Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbilanzierung sind in einer größeren Anzahl von **Fallstudien** angewandt worden (z. B. [BIOFOAM consortium], [Ekener-Petersen & Finnveden 2012]) und teilweise in **Software** umgesetzt worden (z. B. im Jahr 2003 in die GaBi Software v. 4 von [PE Europe & IKP Universität Stuttgart 2003]). Erste, entsprechende **Datenbanken** sind aufgebaut worden (z. B. [PE International AG 2008], [Benoît et al. 2009]).

---

<sup>24</sup> Die wesentlich früheren Arbeiten in Frankreich zur *Bilan social* – die allerdings keine Lebenswegsicht nehmen – sind in den Artikeln L. 2323-68 bis L. 2323-77 sowie R. 2323-17 des *Code du travail français* (in der Fassung vom 14. September 2013) Teil der Berichterstattung von Unternehmen; sie beinhalten Arbeitsunfälle und Zahlen zu Toten und Verletzten.

### 4.3 *Hazard assessment approach* - Erfassung unfallbedingter Stofffreisetzungen nach [Pirhonen 1995]

In ihrer Dissertationsschrift entwickelt [Pirhonen 1995] in einer von drei Fallstudien eine Methode, um **umweltrelevante und humantoxische Emissionen aus häufigen Unfällen** (Englisch *accidental releases*) zu erfassen und **über den Lebensweg von Produkten** zu aggregieren.

Die Methode orientiert sich an der damaligen Praxis der Ökobilanzierung<sup>25</sup>.

Fokus der Arbeit ist es, für die vorgeschlagene Methode die Eignung zur **betrieblichen Entscheidungsunterstützung** – hier in der Erdölindustrie mit dem Produkt Benzin – aufzuzeigen, eine gemeinsame Auswertung mit der Ökobilanzierung ist vorgesehen. Der Kern der Methode ist beschrieben und mit genauen Rechenvorschriften hinterlegt.

Die **methodische Vorschrift der Zuordnung** der Unfälle zu den beteiligten Prozessen ist nicht dokumentiert.

**Zwei Arten von Unfällen** werden unterschieden:

- "Häufige, kontrollierte Stofffreisetzungen" (Englisch *Controlled accidental releases of different substances*). Wirkungen dieser Freisetzungen werden analog zur Ökobilanzierung als nicht lokal angenommen.
- „Seltene, nicht kontrollierte Stofffreisetzungen“ (Englisch *Uncontrolled accidental releases of different substances*). Lokale Wirkungen stehen hier im Vordergrund.

Unfälle werden in eigenen, der Wirkmethoden der Ökobilanzierung analogen, Auswirkungsfamilien (Englisch *Consequence families*) und Auswirkungstypen (Englisch *Consequence types*) erfasst.

**"Häufige, kontrollierte Stofffreisetzungen" werden – wie in der Ökobilanzierung – als Emissionsinventarwerte erfasst.** Errechnet werden sie als das Integral über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Vorfalleignisses über das Integral der Eintrittswahrscheinlichkeit möglicher Vorfällefolgen (Stofffreisetzungseignisse), multipliziert mit deren Ausmaß.

---

<sup>25</sup> Die DIN EN ISO 14040 Reihe war seinerzeit noch in der Entwicklung.

Diese „häufigen, kontrollierten Stofffreisetzungen“ werden methodisch von Emissionen während bestimmungsgemäßer Betriebszustände abgegrenzt, umfassen aber auch solche Stofffreisetzungen, die in der Ökobilanzpraxis miterfasst werden (z. B. Emissionen aus der Fackel bei Ölförderplattformen). Die Skalierung der Unfallauswirkungen in Relation zu der im Modul erzeugten Produktmenge wird formalisiert unter Einbeziehung der Stoffmengenbasis und Eintrittsfrequenz des Unfalls, bezogen auf das Modul unter zusätzlicher Berücksichtigung der Skalierung des Moduls im Produktlebensweg.

**"Seltene, nicht kontrollierte Stofffreisetzungen" werden als Risikozahlen** aufgrund Stoffeigenschaften, in Klassen aufgeteilte Freisetzungsmengen und Sensibilität der betroffenen Umwelt erfasst. Diese Risikozahl beinhaltet demnach bereits die Umweltwirkung.

Die Emissionen und Risikozahlen werden dem jeweiligen Prozessprodukt und dessen funktionaler Einheit zugeordnet und über den Lebensweg des betrachteten Produktsystems aufsummiert. Die Emissionen aus den "häufigen Unfällen" werden dabei an die in der Ökobilanz übliche Wirkanalyse angebunden. Die nicht zur Wirkanalyse der Ökobilanzierung kompatiblen Risikozahlen der "seltene nicht kontrollierten Stofffreisetzungen" werden ohne Wirkanalyse separat und als solche ausgewertet.

Für die Arbeit von [Pirhonen 1995] konnten keine weiteren Praxisanwendungen, Weiterentwicklungen oder methodische Umsetzungen in Form von Software oder Datenbanken identifiziert werden.

#### 4.4 *Life Cycle Inventory Analysis of Chemical Processes* - Lebensweginventaranalyse chemischer Prozesse [Aelion et al. 1995]

In ihrem Artikel stellen [Aelion et al. 1995] eine allgemeine **Sachinventarmethode** der Ökobilanzierung für chemische Prozesse vor. Neben Interventionen aus dem „beabsichtigten“ Betrieb sollen auch solche aus dem „**unbeabsichtigten**“ **Betrieb** erfasst werden. Als Beispiele werden **Unfälle, Ausschussproduktion und Entsorgung** von „verdorbenen“ (Englisch *perished*) Materialien genannt. Neben direkten unbeabsichtigten chemischen Freisetzungen sollen chemische Freisetzungen aufgrund von **Unfallbekämpfungsmaßnahmen** erfasst werden, als Beispiel werden Feuerlöschchemikalien genannt. Auch die Entsorgung von Ausschuss und – soweit rückgehalten – chemischen Leckagen u. ä. sollen erfasst werden.

Die Methode wurde vor Abschluss des ersten ISO 14040 Standards veröffentlicht und bezieht sich methodisch noch auf die in [Consoli et al. 1993] beschriebene Methode der Ökobilanzierung.

Der **Bezug zur funktionellen Einheit** (hier: der Menge der produzierten Chemikalie) findet statt.

Die Menge der Freisetzungen wird anhand der **Fläche unter einer umweltfreisetzungsbezogenen F-N-Kurve quantifiziert**. Die mögliche Nutzung von Fehlerbaumanalysen und Ereignisablaufanalysen für Unfälle wird erwähnt, aber nicht weiter ausgeführt, ebenso wie die Nutzung von Qualitätskontrollangaben zur Ermittlung der Ausschussmengen.

Fokus der Arbeit ist die methodische Beschreibung und **grundlegende Formalisierung der Inventarmethodik**. Die Berechnungsvorschriften beziehen sich auf den allgemeinen Inventarfall, wie er in der Ökobilanzierung verwendet wird. Die Methodik beinhaltet **keine speziellen Vorschriften für die unbeabsichtigten Stofffreisetzungen**.

Die Methodik wird in einem **vereinfachten virtuellen Beispiel** grundlegend demonstriert.

Anwendungsziel der Methodik ist die Entscheidungsunterstützung **in der chemischen Industrie**, insbesondere die Schwachstellenanalyse.

Die **Sachinventare** nutzen die in der Ökobilanzierung derzeit etablierten Elementarflüsse, aber auch Abfallmengen, die heutzutage in der Regel weiter modelliert werden, um ausschließlich Elementarflüsse zu erhalten ([European Commission - JRC-IES 2010a]). Um der speziellen Situation von unbeabsichtigten Stofffreisetzungen gerecht zu werden, soll laut [Aelion et al. 1995] auch die Freisetzungsrate und -häufigkeit zur möglichen Nutzung in der Wirkanalyse dokumentiert werden.

Für die Arbeit von [Aelion et al. 1995] konnten keine Praxisanwendungen, Weiterentwicklungen oder methodische Umsetzungen in Form von Software oder Datenbanken identifiziert werden.

## 4.5 Berufliche Gesundheitsrisiken aus Unfällen und Berufskrankheiten im Energiesystemlebenszyklus nach [Krewitt 1996]

[Krewitt 1996] betrachtet in seiner Dissertationsschrift für verschiedene Stromerzeugungssysteme **Gesundheitsrisiken aus Emissionen während bestimmungsgemäßer Betriebszustände sowie direkte Personenschäden durch Arbeitsunfälle und Berufs-**

**krankheiten.** Die Fallstudie umfasst inhaltlich die Stromproduktion allgemein sowie separat die Lebenswege der Stromerzeugung aus Steinkohle, Braunkohle, Öl, Erdgas, Fotovoltaik, Windkraft und Kernkraft.

Der **Fokus der Fallstudie** liegt auf den direkten Gesundheitsrisiken aufgrund von Unfällen und Berufskrankheiten. Als Indikatoren im Bereich Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten werden unterschiedlich schwere Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten jeweils nach Schweregrad zusammengefasst, Wegeunfälle werden dabei ausgeschlossen. Da Daten zu Emissionen aus Unfällen laut Autor nicht verfügbar waren, werden sie methodisch und inhaltlich nicht betrachtet.

Für die **Prozesskette "1. Ordnung"**, d. h. die dem betrachteten Prozess jeweils direkt vor- und nachgelagerten Prozesse, werden Daten aus statistischen Quellen verwendet, u. a. Daten der deutschen Berufsgenossenschaften, die Methode ist teilweise spezifisch auf diese Datenquelle ausgerichtet. Für **Prozessketten "höherer Ordnung"** werden die Auswirkungen mittels einer industriesektorbasierten Input/Output-Methode quantifiziert.

Die Daten werden bezogen auf den Referenzfluss und über den Lebensweg des untersuchten Produktsystems summiert. Ein Bezug auf die – seinerzeit noch in Entwicklung befindliche – DIN EN ISO14040 Reihe findet nicht statt.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der **Ergebnisermittlung für die untersuchten Energiesysteme** und der diesbezüglichen Datenerhebung und -abschätzung. Der Kern der Methode ist beschrieben und mit Rechenvorschriften hinterlegt.

Die Arbeit strebt eine **direkte Vergleichbarkeit** zwischen allen einbezogenen Schädigungsarten an, d. h. denen aus Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten und denen aufgrund von Emissionen in die Umwelt während bestimmungsgemäßer Betriebszustände. Die Inventarisierung erfolgt als Todesfallzahl, YOLL (Verlorene Lebensjahre - *Years of Life Lost*) und beeinträchtigte Lebensjahre, YOLI (Anzahl der Jahre mit beeinträchtigter Gesundheit - *Years of Life Impaired*) sowie einer Monetarisierung auf Basis der Zahlungsbereitschaft der Konsumenten (*Willingness to pay*). Die Darstellung und Analyse der Ergebnisse erfolgt als Nettorisiko, das definiert wird als Individualrisiko in positiver oder negativer Abweichung vom durchschnittlichen Risiko in der Gesamtwirtschaft.

Die Methodik von [Krewitt 1996] wurde laut [Krewitt 2004]<sup>26</sup> bis 2004 in keinen weiteren Projekten angewendet. Die erarbeiteten Daten sind in die Datenbank der Ökobilanzierungssoftware „Balance“ des Instituts für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart aufgenommen worden, sie wurden aber bis 2004 nicht aktualisiert und methodische Weiterentwicklungen gab es nicht ([Krewitt 2004]).

Ohne Bezug auf diese Arbeit erfassen auch die ExternE Projekte [Bickel & Friedrich 2005] unter Mitarbeit des Autors unfallbedingte Tote und Verletzte in methodisch sehr ähnlicher Form.

Der Weiterentwicklungsbedarf der ExternE Methode beinhaltet laut [Friedrich 2004] Terrorismus. Spätere Weiterentwicklungen am selben Institut wurden u. a. von [Friedrich 2012] vorgestellt, beinhalten aber keine in der hier vorliegenden Arbeit relevanten Aspekte. Als Grund für den Ausschluss von Terrorismus aus der Methodik nennt [Friedrich 2012] die mangelnde öffentliche Verfügbarkeit von Daten.

#### 4.6 *Severe Accident Risks* - Methode für direkte Personenschäden im Lebenszyklus von Energieträgern nach [Hirschberg et al. 1998] bis [Burgherr et al. 2012]

[Hirschberg et al. 1998] und in der neuesten Version [Burgherr et al. 2012] verfolgen im Rahmen des Projektes und der gleich bezeichneten Arbeitsgruppe GaBE (Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen) das Ziel, die **Auswirkungen schwerer Unfälle auf Mensch und Umwelt** methodisch und datenseitig in die Inventarisierung, Analyse und Bewertung von Energielebenswegketten einzubeziehen.

Die Arbeiten umfassen inhaltlich die **Stromproduktion** allgemein und separat die Lebenswege der Strombereitstellung auf Basis von Kohle, Öl, Erdgas, LPG, Kernkraft und Wasserkraft mit Fokus auf den beiden letztgenannten Energieträgern. Der Lebensweg wird dabei – mit Verweis auf die geringe Differenzierung der zur Verfügung stehenden Daten – in die Lebenswegabschnitte Exploration, Extraktion, Transport, Verarbeitung, Lagerung, Stromproduktion und Abfallentsorgung untergliedert bzw. gruppiert.

Mit Verweis auf den Mangel an weiteren Daten in den ausgewerteten Unfalldatenbanken werden grundsätzlich **ausschließlich Tote, Verletzte, Evakuierte und der finanzielle Verlust aus**

---

<sup>26</sup> Wolfram Krewitt ist im Jahre 2009 verstorben.

"**schweren Unfällen**" einbezogen. „Schwere Unfälle“ sind hier Unfälle, die zu mindestens 5 Todesfällen oder mindestens 10 Verletzten oder mindestens 200 Evakuierten oder einem weitreichenden Verbot der Nutzung betroffener Nahrungsmittel oder einer Freisetzung von über 10.000 t Kohlenwasserstoffen oder zu einer durchgesetzten Reinigung von mindestens 25 km<sup>2</sup> Land- und Wasserflächen geführt haben oder zu finanziellen Verlusten von mindestens USD(2000) 5 Millionen geführt haben [Burgherr et al. 2012]. Ausschließlich für **Kernkraft** werden neben den unfallbedingten Toten auch die in Folge von **Emissionen radioaktiver Substanzen in die Umwelt** potenziell zukünftig tödlich an Krebs erkrankenden Personen einbezogen.

Die Erfassung mithilfe statistischer Methoden findet dabei sowohl auf der eigentlichen **Inventarebene** (z. B. direkte Todesfälle, freigesetzte Mengen radioaktiver Stoffe usw.) als auch auf der **Wirkebene** (d. h. langfristige potenzielle Todesfälle aufgrund freigesetzter radioaktiver Stoffe) statt.

Fokus der Arbeit war die **Erzielung inhaltlicher Ergebnisse für Energieketten** und weniger die Erarbeitung einer allgemeinen Methode – der **Kern der Methode und die Rechenvorschriften sind rein textlich beschrieben**, Schwerpunkt ist die statistische Auswertung und Überführung in F-N-Kurven bezogen auf die kWh Strom.

Ein Schwerpunkt der Arbeit und ein wichtiges Ergebnis ist die Zusammenführung einer Vielzahl weltweit vorhandener Unfalldatenbanken [insbesondere MHIDAS, FACTS, China Coal Industry Yearbook, ETC Tanker Spill Database, HSELINE/LLP und über 170 weitere Quellen bereits für Unfälle bis zum Jahr 2000] zur **ENSAD-Datenbank** ([PSI 1998] und [Burgherr & Hirschberg 2008]).

Nach der Vorgehensweise von [Hirschberg et al. 1998] sind eine größere Anzahl weiterer Studien (z. B. [Hirschberg et al. 2003], [Burgherr 2007], [Burgherr et al. 2011], [Eckle & Burgherr 2013]) im selben Institut durchgeführt worden. Die ENSAD Datenbank wird fortgeführt und projektbezogen aktualisiert, z. B. um kleinere Unfälle mit Rohölfreisetzung ab 200 t, wie [Eckle et al. 2012] berichten.

Laut einem, nur als *Executive Summary* öffentlich verfügbaren, Bericht im Rahmen eines Forschungsprojektes haben dieselben Autoren in einer explorativen Studie eine Methode zur Erfassung möglicher Auswirkungen von **Terrorismus** auf Energieanlagen erarbeitet ([Eckle et al. 2011]). Einbezogen werden demnach die Wahrscheinlichkeit, dass ein Angriff geplant wird und



dass bestimmte Angriffsszenarien implementiert werden können, unter Berücksichtigung verfügbarer Ressourcen, Zeit, und Wissen möglicher Angreifer und existenter Abwehrmaßnahmen. Als Auswirkungen werden laut Angaben im *Executive Summary* Todesfälle und Verletztenfälle sowie die Kontamination von Land erfasst.

#### 4.7 *Fire-LCA-Model* - Methode zur Erfassung von Emissionen aus Feuern während der Produktnutzung nach [Simonson et al. 1998] und [Andersson et al. 2005]

[Simonson et al. 1998] haben in einem Teilvorhaben eines weiter gefassten Projektes eine spezifische Methode entwickelt, um **weniger häufige schwere Brände von Produkten während deren Nutzung und nach der Nutzung auf Abfalldeponien in die Lebensweganalyse** einzubeziehen. Für häufige kleine Brände wird dagegen die Einbeziehung in die Ökobilanzierung vorgeschlagen.

Angewandt wurde die ursprüngliche Methode im Jahr 1998 auf **Verbundpolymere mit/ohne Flammenschutzmittel**. Die Ergebnisse der Studien erlauben anhand der verglichenen Varianten (z. B. Polstermöbel mit und ohne FlammSchutzausrüstung) eine spezifische Entscheidungsunterstützung.

Einbezogen werden neben den direkten Emissionen aus dem Feuer **auch Interventionen mit der Umwelt aus ausgewählten anderen Aktivitäten**, die mit dem Unfall in direkter Verbindung stehen. Dies sind die Wiederherstellung der im Feuer zerstörten Güter, Feuerbekämpfungsmaßnahmen, Dekontaminierungsaktivitäten, Abfallentsorgung von Verbrennungsresten sowie Interventionen und Folgeaktivitäten aus sekundären Feuern.

Ein methodischer Bezug zur seinerzeit neuen ersten Ausgabe von 1997 der jetzigen [Norm ISO 14040:2006] und den noch in Finalisierung befindlichen Normen ISO 14041, 14042 und 1443 (inzwischen in [Norm ISO 14044:2006 (E)] zusammengeführt) findet statt.

Der Fokus dieser methodischen Vorstudie liegt auf der derzeit geplanten Anwendung im Hauptprojekt und auf den wiederum dort im Fokus stehenden angestrebten inhaltlichen Projektergebnissen. **Der Kern der Methode ist textlich und grafisch schematisch beschrieben**, ohne Berechnungsvorschriften.

Ein **Praxisleitfaden** für die Anwendung der *Fire-LCA*-Methode im Rahmen von FlammSchutzmitteln-Studien wurde seit 2004 drittmittelfinanziert am selben Institut erarbeitet

([Simonson 2004]). Er ist inzwischen in [Andersson et al. 2005] als allgemeine *Fire-LCA*-Methodenanleitung veröffentlicht, die eine weitergehende Formalisierung enthält. Berechnungsvorschriften sind wiederum nicht enthalten.

**Inventarisiert** werden Elementarflüsse (d. h. Emissionen und Ressourcenverbräuche) aus den Inventaren der Brände und aus den oben genannten Folgeaktivitäten.

Die **Wirkanalyse** der Interventionen nutzt die Methoden der Ökobilanzierung. Feuerbedingte Tote und Verletzte werden nicht betrachtet, ebenso wenig wie feuerbedingte Berufskrankheiten, was von [Simonson et al. 2005] als ein nach wie vor offener Punkt möglicher Weiterentwicklung genannt wird.

In der Auswertung werden die Teilergebnisse der Ökobilanzierung und die individuellen feuerbedingten Interventionen auf der Ebene der Sachbilanz und Wirkbilanz miteinander verglichen.

Nach der Methode von [Simonson et al. 1998] sind im gleichen Institut **weitere Studien** durchgeführt worden, u. a. zu Fernsehern [Simonson et al. 2000], elektrischen Kabeln [Simonson et al. 2001] und Polstermöbeln [Andersson et al. 2003a].

Eine externe Erprobung hat die Methode durch [Hamzi et al. 2008] erfahren, die die Methode auf Feuer in Raffinerien angewandt haben. [Blum 2012] hat die Arbeit von [Simonson et al. 2000] im Kontext der internationalen Standardisierung der Brandschutzanforderungen an TV-Geräte genutzt.

Methodische Weiterentwicklungen nach 2005 konnten nicht identifiziert werden.

#### 4.8 *Life Cycle Risk Assessment* (LCRA) - für die Erfassung von Risiken über den Produktlebensweg von [Aissani et al. 2012]

[Aissani et al. 2012] haben eine Lebensweg-Risikoanalyse (Englisch *Life Cycle Risk Assessment*, LCRA) genannte Methode entwickelt, um **Unfallrisiken in Lebenswegsicht** analysieren und den Ergebnissen aus der Ökobilanzierung gegenüberstellen zu können.

Anwendungszweck der Methode ist die Erfassung von Risiken über den Produktlebensweg und die Nutzung der Ergebnisse zur Verringerung von Unfallhäufigkeiten und der Verminderung der Unfallschwere.

Die Methode wird exemplarisch auf den **Vergleich von Benzin und Wasserstoff als Kraftstoff für Personenkraftwagen** angewandt. Die **Methode ist technologieunspezifisch** angelegt und soll individuell auf Ebene der wichtigsten Lebenswegabschnitte angewandt werden. Im Anwendungsbeispiel sind dies Rohstoffgewinnung, (Treibstoff-)Produktion, Lagerung und Verteilung sowie Nutzung.

Einbezogen werden **Risiken für die Schutzziele Mensch, Ausrüstung und Umwelt**. Abhängig vom Kontext der Studie soll auf die relevanten Ziele fokussiert werden. Die Arten einbezogener möglicher Schäden sollen ebenfalls begrenzt werden, im Anwendungsbeispiel werden ausschließlich **potenziell tödliche Unfälle** berücksichtigt.

Die LCRA-Methodik wird schrittweise aus der Ökobilanzierung nach [Norm ISO 14040:2006] und [Norm ISO 14044:2006 (E)] abgeleitet.

In der **Sachbilanz** werden nicht die in der Ökobilanzierung verwendeten Elementarflüsse, sondern „gefährliche Situationen“ unterschiedlicher Art und „Gefahrenquellen“ erfasst. Im Anwendungsbeispiel werden die gefährlichen Situationen für Benzin aus den in der französischen Unfalldatenbank ARIA [French Ministry of Ecology] dokumentierten Unfällen abgeleitet. Da es für die neue wasserstoffbasierte Technologie bisher wenige Unfälle gab, werden hier die gefährlichen Situationen mittels einer *ex ante* Methode geschätzt.

In der **Wirkungsabschätzung** wird der Risiko-Level für jede Gefahrensituation bewertet: Das Risiko wird geschätzt ausgehend von der Identifikation verschiedener Typen potenzieller Unfälle für jede erfasste gefährliche Situation. Dies geschieht durch Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit (in 3 Klassen) und Unfallschwere (in 2 Klassen) zu einem Risiko-Level (in 3 Klassen). Anschließend werden die Risiko-Level der erfassten Gefahrensituationen aggregiert.

Der Methodenteil ist knapp gehalten, beinhaltet aber die **Berechnungsvorschriften zur Aggregation der Risiko-Level**.

Die Involviertheit (hier von Wasserstoff oder Benzin) in Risikosituationen wird implizit als Zuordnungskriterium von gefährlichen Situationen zu den Prozessen oder Produkten verwendet.

## 4.9 Diskussion des Standes der Technik

### 4.9.1 Kapitelübersicht

Die zuvor vorgestellten Methoden und deren spezifische methodische Komponenten werden im Folgenden bewertet hinsichtlich ihrer Eignung mit Blick auf die Zielsetzung dieser Arbeit.

Im Anschluss daran werden in Kap. 4.10 diejenigen methodischen Aspekte gelistet und diskutiert, die nach Stand der Technik für die vorliegende Arbeit noch ungelöst sind oder einer abgeänderte Lösung bedürfen.

### 4.9.2 Erfassung unfallbedingter Toter und Verletzter in Ökobilanzierung, Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, Sozial-Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbilanzierung (diverse Autoren 1989 bis 2013)

Die in Kap. 4.2 unter den Methodenfamilien Ökobilanzierung, Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, Sozial-Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbilanzierung zusammengefassten Arbeiten verschiedener Autoren weisen folgende **Stärken** auf: Direkte Personenschäden aus Unfällen werden über den Produktlebensweg als Inventarwerte erfasst und z. B. in Form von DALYs in Wirkgrößen überführt. Dies ermöglicht sowohl die praxisrelevante detaillierte Erhebung als auch die vereinfachte Nutzung aggregierter Unfallinformationen aus Statistiken und die entsprechende Auswertung.

**Nachteilig** ist allen Methoden die fehlende Unfallsystemdifferenzierung: Folgeunfälle und Unfallszenarien werden nicht adressiert. Ferner werden unfallbedingte Interventionen mit der Umwelt nicht einbezogen. Die Methoden adressieren zudem ausschließlich Unfälle – Auswirkungen anderer Arten von Vorfällen wie z. B. von Sabotage, Terrorismus und Kriegsgeschehen werden nicht berücksichtigt. Auch die Abgrenzung Unfall und bestimmungsgemäßer Betriebszustand erfolgt entweder nur implizit oder lediglich anhand der Eintrittshäufigkeit der Unfälle, was zur methodisch unvollständigen gemeinsamen Erfassung aller Unfälle und eingeschränkter Entscheidungsunterstützung führt. Die methodisch wichtige Zuordnung der Unfallauswirkungen zu den unfallbeteiligten Prozessen ist ferner nicht oder nicht reproduzierbar adressiert. Ebenso fehlen methodische Ansätze zur quantitativen Zuordnung und Inventarisierung multikausaler Unfälle. Eine tiefer gehende methodische Differenzierung für beschreibende, vergleichende oder Änderungen analysierende Fragestellungen von Studien wird ebenfalls nicht adressiert.

Damit tragen die verschiedenen Methoden in **Gesamtsicht** nur einzelne, wenngleich wichtige, Aspekte zu der hier benötigten Methodik bei.

#### 4.9.3 *Hazard assessment approach* - Erfassung unfallbedingter Stofffreisetzungen nach [Pirhonen 1995]

Die von [Pirhonen 1995] erarbeitete Methode hat folgende **Stärken**: Es ist eine sehr frühe Arbeit, die einen detaillierten methodischen Ansatz beschreibt, unfallbedingte Interventionen mit der Umwelt explizit mit dem Lebenswegansatz zusammenzubringen. Unfallbedingte Emissionen werden unter Einbeziehung der Eintrittsfrequenzen der Unfälle errechnet und separat in das Sachinventar der Ökobilanzierung integriert. Auch die Skalierung der vorfallbedingten Interventionen zur quantitativen Referenz des Produktes oder Prozesses erfolgt analog zur Ökobilanzierung. In der Teilmethode für „häufige Unfälle“ werden zudem die gleichen Interventionen inventarisiert wie in der Ökobilanzierung, was eine direkte Vergleichbarkeit auf Sachbilanzebene ermöglicht und zudem die Anbindung an die Wirkmethoden der Ökobilanzierung unterstützt.

Diesen Stärken stehen die folgenden **Schwächen** gegenüber: Mit Blick auf die Zielvorgaben der vorliegenden Arbeit ist die Ausklammerung direkter Personenschäden nachteilig. Auch ist die Zuordnung der Unfälle zu den Prozessen methodisch nicht adressiert, sondern erfolgt implizit. Die Methode erfasst ferner ausschließlich Unfälle – Auswirkungen von Sabotage, Terrorismus und Kriegsgeschehen usw. werden nicht berücksichtigt. Da eine Unfallsystemdifferenzierung (Auslöser, Folgeunfälle) fehlt, ist keine detaillierte Vorfallanalyse möglich und damit auch keine entsprechende Entscheidungsunterstützung. Die nicht stattfindende Einbeziehung von Unfallfolgeaktivitäten macht die Erfassung der Unfallauswirkungen unvollständig. Ferner sind Unfälle während der Produktnutzung methodisch nicht adressiert. Zudem hat der gewählte methodische Ansatz der Bildung eines Integrals über alle Vorfallvarianten einen extrem hohen Datenbedarf, der in der Praxis als nicht leistbar erscheint. Als Letztes ist die methodisch abweichende Einbeziehung "seltener Unfälle"<sup>27</sup> anhand einer Risikozahl argumentativ nicht nachvollziehbar und im Rahmen dieser Arbeit methodisch ungeeignet: Dies macht „seltene“ und schwere Unfälle nicht gemeinsam und konsistent mit Ökobilanzergebnissen auswertbar.

---

<sup>27</sup> „Selten“ bezieht sich hier auf Unfälle, zu denen historische Unfälle vorliegen und entsprechende Daten zu Eintrittshäufigkeiten und wichtigen Auswirkungen, nicht auf die in den meisten Arbeiten ausgeschlossenen „extrem seltenen“ Unfälle, die bisher nie aufgetreten sind.

**Insgesamt** erfüllt diese Methode damit nur einzelne, wenngleich einige wichtige, Punkte der Anforderungen an die vorliegende Arbeit.

#### 4.9.4 *Life Cycle Inventory Analysis of Chemical Processes* – Lebensweginventaranalyse chemischer Prozesse [Aelion et al. 1995]

Die von [Aelion et al. 1995] vorgestellte Methode hat folgende **Stärken**: Nicht beabsichtigte Stofffreisetzungen in die Umwelt können mittels Nutzung umweltbezogener F-N-Kurven in die Sachinventare der Ökobilanzierung einbezogen werden. Stofffreisetzungen aus Unfall-Bekämpfungsaktivitäten werden ebenfalls berücksichtigt. Auch Fehlchargen (Englisch *off-spec*) und deren Entsorgung werden erfasst. Die vorgeschlagene Nutzung von FBA und EEA für Eintrittshäufigkeiten und zur Ableitung der Stofffreisetzungen sowie von Qualitätskenngrößen für Ausschussproduktion stärkt den Ansatz.

Die **Hauptschwächen** der Arbeit liegen zum einen in der wenig detaillierten Methodenbeschreibung und den beschränkten Rechenvorschriften. Zum anderen bleiben viele wichtige Fragen ganz offen, z. B. die Behandlung der Multikausalität von Unfällen, die wichtige Frage der quantitativen Zuordnung von Stofffreisetzungen aus FBA und EEA zum untersuchten Modul, die Zuordnung von Folgeunfällen und die grundsätzliche Frage der Anwendung auf andere Arten von Unfällen als Stofffreisetzungen, für andere Produkte als Chemikalien und für andere Lebenswegphasen als die Produktion (insbesondere die Produkt-Nutzungsphase). Zudem werden direkte Personenschäden nicht erfasst. Ferner werden Fälle von Terrorismus, Sabotage usw. als beabsichtigte Vorfälle implizit ausgegrenzt. Auch findet keine formale Definition und Abgrenzung von beabsichtigten und nicht beabsichtigten Stofffreisetzungen statt. Die gemischte Inventarisierung aller Freisetzungen gemeinsam mit den Ökobilanz-Sachinventaren verringert zudem den Wert für die Entscheidungsunterstützung in der Praxis.

In **Gesamtsicht** leistet diese frühe Arbeit einen wichtigen Beitrag, insbesondere die Nutzung von F-N-Kurven und Unfallinformationen zur quantitativen Erfassung von Stofffreisetzungen. Der Arbeit fehlt allerdings die weitere Ausarbeitung der Methodik und die Adressierung von Fragen der allgemeinen Anwendbarkeit außerhalb des speziellen Rahmens chemischer Stofffreisetzungen.

#### 4.9.5 Berufliche Gesundheitsrisiken aus Unfällen und Berufskrankheiten im Energiesystemlebenszyklus nach [Krewitt 1996]

Die von [Krewitt 1996] erarbeitete Methode weist folgende **Stärken** auf: Direkte Personenschäden werden den Modulen analog zur Ökobilanz zugeordnet, allerdings ohne explizite Zuordnungsvorschrift. Der quantitative Bezug zur quantitativen Referenz des Produktes oder Prozesses wird damit sichergestellt, wenngleich die Zuordnung methodisch nicht adressiert wird. Der Ansatz, verschieden schwere Unfälle über YOLs und YOLIs vergleichbar zu machen, unterstützt eine zweckmäßige Anbindung an die Wirkungsabschätzung direkter Personenschäden. Ein wichtiger Beitrag ist die Anwendung der Methode auf eine Reihe von Energieträgern und die damit gewonnene Anwendungserfahrung lebenswegbezogener Unfallanalyse.

**Nachteilig** ist aus Sicht der Anforderungen der vorliegenden Arbeit zunächst die fehlende Einbeziehung vorfallbedingter Interventionen mit der Umwelt. Da ferner ein systematischer Ansatz der Zuordnung der Unfälle zu den Prozessen fehlt, ebenso wie eine Unfallsystemdifferenzierung (z. B. multikausale Unfälle, Folgeunfälle), ist keine detaillierte Vorfallaanalyse und differenzierte Entscheidungsunterstützung möglich. Die nicht stattfindende Einbeziehung von Unfallfolgeaktivitäten macht die Erfassung der Unfallauswirkungen unvollständig. Ferner fehlt die Einbeziehung der Produktnutzung. Die Methode adressiert zudem ausschließlich Unfälle – Auswirkungen von Sabotage, Terrorismus und Kriegsgeschehen usw. werden nicht berücksichtigt. Die Ausrichtung von Teilen der Methode (YOLIs) an der sehr speziellen Datenquelle "Deutsche Berufsgenossenschaften" erschwert zudem eine international konsistente Anwendung der Methode über die weltweit vernetzten Produktlebenswege. Weiterhin ist die Auswertung auf Ebene des neu eingeführten Nettorisikos zu nennen, die zu nur scheinbar deutlichen Unterschieden zwischen zwei in Bruttosicht sehr ähnlichen Produktionsprozess- oder Produktvarianten führt, was die Anschaulichkeit der Ergebnisse verringert. Da sich zudem das Bezugsniveau der Betrachtung über die Jahre hinweg ändert, verliert die Auswertung weiter an Transparenz und Zeitreihenauswertungen sind nur nach Rücktransformation der Ergebnisse möglich. Die Einführung dieses Nettorisikos ist daher als nicht zielführend einzuschätzen.

Auch diese Methode erfüllt damit in **Gesamtsicht** methodisch nur einige der Anforderungen der vorliegenden Arbeit, hat aber durch die Anwendung auf verschiedene Energieketten wichtige Praxiserfahrungen zur lebenswegbezogenen Erfassung von Unfallauswirkungen gesammelt. Die

am selben Institut entwickelte ExternE Methode ([Friedrich 2012]) beinhaltet keine für die vorliegende Arbeit relevanten methodischen Weiterentwicklungen.

#### 4.9.6 *Severe Accident Risks* - Methode für direkte Personenschäden im Lebenszyklus von Energieträgern nach [Hirschberg et al. 1998] bis [Burgherr et al. 2012]

Für die erstmals von [Hirschberg et al. 1998] erarbeitete und von [Burgherr et al. 2012] in etwas weiter entwickelter Form vorgestellte Methode sind folgende **Stärken** zu nennen: Die Zuordnung der direkten Personenschäden zu Modulen und der quantitative Bezug zur quantitativen Referenz des Produktes oder Prozesses machen die Methode in wesentlichen Aspekten kompatibel mit der Ökobilanz, wengleich die qualitative und quantitative Zuordnung der Unfälle zu den Modulen methodisch nicht adressiert wird. Ein wichtiger Beitrag ist die Anwendung der Methode auf eine Reihe von Energieträgern weltweit, die damit gewonnene Anwendungserfahrung in lebenswegbezogener Unfallanalyse sowie der erfolgte Aufbau einer umfangreichen Unfalldatenbank (ENSAD), die allerdings extern nur für Projektpartner verfügbar ist.

**Hauptnachteile** der Methode sind die meist<sup>28</sup> fehlende Einbeziehung vorfallbedingter Interventionen mit der Umwelt, die Ausklammerung mittel-schwerer und leichter Unfälle<sup>28</sup>, der fehlende systematische Ansatz der Zuordnung von Unfällen zu den Modulen, die fehlende Unfallsystemdifferenzierung (Multikausalität, Folgeunfälle) sowie die fehlende methodische Adressierung von Unfallfolgeaktivitäten und der Produktnutzung. Die Methode adressiert zudem ausschließlich Unfälle, wengleich „Sabotage“ als eine mögliche zu dokumentierende Form von Unfällen genannt wird; methodisch wird dies aber nicht weiter adressiert. Für „Terrorismus“ wurde eine Methode entwickelt, die aber nicht öffentlich verfügbar ist und, laut Angaben des veröffentlichten *Executive Summary*, Auswirkungen auf die Umwelt in nicht weiter differenzierter Weise sowie Vorfallfolgeaktivitäten nicht berücksichtigt [Eckle et al. 2011]. Ferner ist die Anbindung an die Wirkanalyse unklar, da Verletzte methodisch nur als Inventarwert auftauchen. Da der Methodenteil in allen genannten Veröffentlichungen knapp gehalten ist, bleiben weitere methodische Unklarheiten.

---

<sup>28</sup> Im Kontext spezifischer Studien wird die ENSAD Datenbank erweitert, z. B. um ausgewählte Stofffreisetzungen, so um Rohölfreisetzungen ab 200 t ([Eckle et al. 2012]).



Diese Methode erfüllt damit **in Gesamtsicht** nur einige der Anforderungen an die in der hier vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Methode, hat aber wichtige Anwendungserfahrungen gesammelt, eine – wenngleich nicht öffentlich zugängliche – Datenbank schwerer Unfälle aufgebaut und erstmals eine – allerdings nicht veröffentlichte – Methode erarbeitet, die ausgewählte Auswirkungen von Terrorismus erfasst.

#### 4.9.7 *Fire-LCA-Model* - Methode zur Erfassung von Emissionen aus Feuern während der Produktnutzung nach [Simonson et al. 1998] und [Andersson et al. 2005]

Die erstmals von [Simonson et al. 1998] beschriebene und von [Andersson et al. 2005] in etwas weiterentwickelter Form vorgestellte Methode weist folgende **Stärken** auf: Die Zuordnung der einbezogenen Interventionen zur Produktnutzung und zur funktionellen Einheit sowie der Entsorgungsphase entspricht dem Vorgehen in der Ökobilanzierung. Da dieselben Interventionen einbezogen werden wie in der Ökobilanzpraxis und diese in dieselbe Wirkanalyse eingehen, besteht diesbezüglich eine gute methodische Abstimmung. Die feuerbedingten Interventionen werden durch die Überlagerung der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Interventionsprofils des Feuers inventarisiert, separat von den Interventionen des bestimmungsgemäßen Betriebs. Ferner werden die Brände als System modelliert, einschließlich der Folgeaktivitäten wie Feuerwehreinsatz, Güterwiederherstellung usw. Dies erhöht die Vollständigkeit der Ergebnisse und erlaubt zudem eine detailliertere Analyse und Entscheidungsunterstützung als alle anderen hier bisher diskutierten Methoden.

Eine wichtige **Schwäche** der Arbeit ist die sehr knappe Methodenbeschreibung, die zudem keinerlei Rechenvorschriften enthält. Brände während der Produktion von Gütern und jegliche andere Unfalltypen werden nicht adressiert – die einzige einbezogene Unfallart sind Brände während der Produktnutzung und Entsorgung. Zudem ist die erfolgte Ausklammerung „häufiger“ kleiner Feuer nicht nachvollziehbar und mangels klarer Abgrenzung nicht reproduzierbar, die Abtrennung vom bestimmungsgemäßen Betrieb erscheint daher nicht vollständig und methodisch nicht eindeutig gelungen. Die Methode adressiert ferner ausschließlich Brände aufgrund von Unfällen – Brände aufgrund von Sabotage, Terrorismus und Kriegsgeschehen usw. werden nicht adressiert. Der kausale Bezug zum verunfallten Produkt beschränkt sich auf die Brennbarkeit der Güter, ein Bezug zu dem Auslöser oder den Auslösern des Brandes fehlt, was alle nicht brennbaren Produkte implizit ausschließt. Grundsätzlich

werden Produktflüsse zur Anbindung des Unfalls an die Module des Produktsystems verwendet und die Unfallhäufigkeit wird zur Skalierung der Unfallauswirkungen genutzt. Dies ist hier möglich, da keine Umrechnung der Referenzgröße des verbrannten Objektes (z. B. Sofa, Fernseher) zum vorfallbeteiligten Modul benötigt wird, da beide immer identisch sind. Formal ausgedrückt ist der Vorfall in seiner Skalierung identisch der funktionellen Einheit des Produktsystems. Diese einfache Lösung ist jedoch nur für derartige Fälle möglich. Ferner wird Multikausalität von Unfällen methodisch nicht adressiert. Dies schränkt die Möglichkeiten und grundsätzliche Qualität der Entscheidungsunterstützung der Methode deutlich ein. Letztlich fehlt in der Methode auch die Einbeziehung direkter Personenschäden, es werden ausschließlich Emissionen in die Umwelt adressiert.

Obwohl die Methode einigen wichtigen Anforderungen dieser Arbeit gerecht wird, fehlen mehrere entscheidende Punkte sowie eine allgemeine methodische Beschreibung samt Rechenvorschriften. **Insgesamt** trägt diese Methode damit nur einzelne, aber wichtige, Elemente im Rahmen der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bei.

#### 4.9.8 *Life Cycle Risk Assessment (LCRA)* - Methode für die Erfassung von Risiken über den Produktlebensweg von [Aissani et al. 2012]

Die von [Aissani et al. 2012] vorgestellte Methode hat folgende **Stärken**: Die Methode passt die Ökobilanzmethodik systematisch für die Erfassung von Risiken über den Produktlebensweg an.

Eine wichtige **Schwäche** der Methode ist die grundsätzlich andere Natur von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung im Vergleich zur Ökobilanzierung: Die Methode verbleibt auf der semiquantitativen Ebene. Ein direkter Vergleich der Relevanz von Ökobilanzergebnissen mit Ergebnissen der LCRA ist somit nicht möglich. Ebenso können Zielkonflikte zwischen Normalbetrieb und Unfällen nicht auf quantitativer und vergleichbarer Ebene bewertet werden sondern die Ergebnisse stehen isoliert nebeneinander. Die Zuordnung von Unfällen zu Prozessen wird nicht adressiert, ebenso wenig wie die Multikausalität von Unfällen.

So schlussfolgern die Autoren selbst, dass die Methode nicht sehr präzise für die Evaluierung von Risiken sei und nennen als verbleibende wichtige Herausforderung die Entwicklung einer quantitativen Methode.

In **Gesamtsicht** trägt diese Methode keine mit Blick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit relevanten neuen Aspekte bei.

## 4.10 Bisher fehlende sowie weiterzuentwickelnde Methodenelemente

### 4.10.1 Kapitelübersicht

Mit Blick auf die Ziele der hier vorliegenden Arbeit und alle vorgestellten bisherigen Arbeiten sind folgende Punkte und Unterpunkte nach Stand der Technik insgesamt noch ungelöst, es fehlen noch Berechnungsvorschriften oder es bedarf anderer Lösungen:

- Abgrenzung Vorfall (= nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand) vom bestimmungsgemäßen Betriebszustand
- Erweiterung von Unfällen (und Differenzierung in unterschiedliche Typen von Vorfällen wie z. B. Sabotage, Terrorismus und Kriegsgeschehen)
- Qualitative Zuordnung von Vorfällen zu Prozessen („Vorfallbeteiligung“)
- Quantitative Zuordnung von multikausalen Vorfällen
- Quantitative Zuordnung bei unterschiedlicher Granularität von Vorfall und Modul
- Quantitative Zuordnung bei Nutzung sowohl detaillierter QRA-Studien als auch aggregierter Vorfalldaten und -statistiken
- Differenzierung des Zuordnungsansatzes je nach Zielsetzung der LVA-Studie
- Adressierung der Modellierung von Vorfällen in *attributional* und *consequential* Ökobilanzstudien
- Kombination der in unterschiedlichen Arbeiten vorgestellten und der hier neu entwickelten Methodenkomponenten zu einer Methodik

**Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es bisher keine Arbeit gibt, die die Lebenswegaggregation von Vorfallauswirkungen im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit methodisch gelöst hätte**

Auch in der Literatur wird das Fehlen einer solchen allgemein anwendbaren Methode immer wieder genannt, so in [Ozawa 2002], [Kurth et al. 2004], [Zamagni et al. 2008], [European

Commission - JRC-IES 2011] und [Wolf et al. 2012]<sup>29,30</sup>. Die im Stand der Technik beschriebenen Arbeiten beinhalten allerdings Lösungen für einzelne wichtige Aspekte und bilden eine wichtige Basis der hier neu vorgestellten LVA-Methode<sup>31</sup>.

Der **spezielle methodische Entwicklungsbedarf** wird im Folgenden anhand des bereits vorgestellten Standes der Technik diskutiert. Weitere Arbeiten, die zu dem speziellen Aspekt einen methodischen Beitrag leisten, werden hinzugezogen.

---

<sup>29</sup> Die Ursachen für die bisher fehlende methodische und praktische Integration der Lebenswegsicht in die Vorfalleanalyse können aus der Historie der QRA und der Ökobilanzierung abgeleitet werden: Der Fokus der QRA wurde und wird – aus Unternehmenssicht zunächst nachvollziehbar – auf Risiken gesetzt, die direkte justiziable Auswirkungen haben oder Kosten verursachen. Entsprechende Methoden und Werkzeuge wurden entwickelt. Hinzu kommen Aspekte, die das Unternehmensimage berühren, die Beziehungen zur Kommune und anderen externen Interessengruppen betreffen sowie nicht zuletzt die Gesundheit und Sicherheit der Mitarbeiter schädigen ([Kleindorfer 2002]). Der Fokus liegt daher bisher auf dem Unternehmen und den innerbetrieblichen Prozessen, nicht auf den Produktlebensweg. Auch vom Gesetzgeber wurden lebenswegbezogene Betrachtungen von Vorfällen bislang nicht gefordert – weder bezogen auf Produkte noch auf Unternehmensebene. Eine Lebenswegsicht im Kontext stoffbezogenes Risikomanagement wird im Rahmen der Chemikalien-Direktive seitens der Europäischen Kommission in REACH ([2006/1907/EC]) gefordert, allerdings in anderer Form und vor anderem Hintergrund als in der Ökobilanzierung. Mit Blick auf die Ökobilanzpraxis kann argumentiert werden, dass die bisher fehlende systematische Integration von Vorfällen darauf zurückgeht, dass die Ökobilanzierung ursprünglich den Fokus darauf hatte, die nicht anderweitig betrachteten global wirkenden Treibhausgase und den Verbrauch von fossilen Energieträgern während bestimmungsgemäßer Betriebszustände zu untersuchen. Dementsprechend werden bisher in der Ökobilanzierung auch die direkten Wirkungen der Produktnutzung auf den Menschen (z. B. Kosmetika, Körperpflegemittel, Nahrungsmittel usw.) ausgeklammert ([Wolf et al. 2012]): Diese Auswirkungen werden seit langem mit den Methoden der Risikoanalyse erfasst, allerdings nicht über den Lebensweg. Exemplarische Untersuchungen zur relativen Bedeutung von Unfällen über den Lebensweg von Produkten haben zudem Mitte der 90er Jahre, zumindest für die derzeit untersuchten Energiesysteme, die deutlich höhere Bedeutung des bestimmungsgemäßen Betriebs gezeigt ([Krewitt 1996]). Allerdings hat [Hofstetter 1998] für die von ihm untersuchten Produktsysteme gefunden, dass die humantoxische Wirkung krebserregender Emissionen aus Unfällen höher ist, als die Wirkung derartiger Emissionen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb. Eine systematische Einbeziehung von Unfällen und anderen Vorfällen in Lebensweganalysen fand letztlich nur sporadisch statt und ohne eine allgemeingültige Methodik. Die Methodenerweiterung der Ökobilanzierung hat dann zunächst andere Problemfelder und die diesbezüglichen Emissionen und Ressourceninanspruchnahmen umfasst, die mit bestimmungsgemäßen Betriebszuständen einhergehen (z. B. Saurer Regen, Ökotoxizität, Flächeninanspruchnahme usw.).

<sup>30</sup> Die Priorität einer solchen Methodenentwicklung wird allerdings unterschiedlich beurteilt. So werten [Zamagni et al. 2009] diese als „niedrig“, ohne allerdings Argumente, Fakten oder Daten anzugeben. Diese Beurteilung muss mit Blick auf die im Kap. 1.1 genannten Zahlen von weltweit jährlich 480.000 Unfalltoten allein aus dem beruflichen Umfeld zurückgewiesen werden. Auch vorfallbedingte Emissionen in die Umwelt (z. B. aus vorsätzlichen Wildfeuern, die alleine aufgrund der Partikelemissionen gemäß der konservativen Modellierung von [Johnston et al. 2012] jährlich weltweit zu 339.000 Todesfällen führen) sind ein global wesentliches Problem: Die Relevanz von Unfällen und anderen Vorfällen ist demnach als mittel bis hoch einzuschätzen. Insbesondere ist die gemeinsame vergleichbare Quantifizierung mit Interventionen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb notwendig, um Prioritäten zu setzen und die Verschiebung von Lasten entlang des Lebensweges quantitativ zu erfassen und damit vermeidbar zu machen.

<sup>31</sup> Auffällig bei der Auswertung des Standes der Technik ist, dass die hier näher betrachteten Methoden oft unabhängig voneinander immer wieder neu entwickelt worden sind: Es wird nur selten Bezug auf die Ergebnisse oder Erkenntnisse der Vorarbeiten genommen und diese fehlen oft gänzlich in den Referenzen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Feld Unfall- und Vorfalleanalyse sowie Risikoanalyse sehr umfangreich ist und noch immer eine inkonsistente Begrifflichkeit hat (siehe Fußnote 22), was die Literatursuche stark erschwert.

#### 4.10.2 Abgrenzung Vorfall (= nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand) vom bestimmungsgemäßen Betriebszustand

Die **praktikable, soweit möglich eindeutige, und allgemeingültige Definition von Vorfällen** und damit deren Abgrenzung von bestimmungsgemäßen Betriebszuständen ist ein wichtiger Schritt hin zu komplementären und sowohl gemeinsam wie auch separat auswertbaren LVA- und Ökobilanz-Studien.

Viele bisherige Arbeiten haben weniger schwere Unfälle, häufigere (und mithin weniger schwere) Unfälle oder Unfälle höherer Ordnung (d. h. in nicht direkt vor- und nachgelagerten Prozessschritten im Lebensweg) ausgeklammert oder methodisch in nicht mit der Ökobilanz kompatibler Weise adressiert. Da allerdings die Häufigkeit weniger schwerer Unfälle größer ist, kann dies zu dem Ausschluss relevanter Teile der Gesamtwirkungen führen ([Burgherr & Hirschberg 2008]). Ähnliches kann für die Ausklammerung von Unfällen höherer Ordnung angenommen werden, da der relative Unfallbeitrag nicht systematisch von der Position des betroffenen Moduls im Lebensweg abhängt.

Wichtige Elemente zu einer Definition des Vorfalls kommen aus der [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004]: Der Begriff **Schaden** wird dort definiert als die „physische Verletzung oder Schädigung der Gesundheit“, wobei Schädigungen auf Umwelt und Eigentum explizit ausgeklammert werden. Die Norm weist zudem darauf hin, dass Gefährdungen als potenzielle Schadensquelle sowohl bei der bestimmungsgemäßen Verwendung (in der Norm bezogen auf Maschinen) als auch **unerwartet** auftreten können. Im Rahmen der während dieser bestimmungsgemäßen Verwendung auftretenden Gefährdungen werden in der Norm allerdings als Beispiele sowohl Ausfälle und Situationen genannt, die zu einem Unfall führen können, als auch solche (z. B. ungesunde Körperhaltung, Geräuschemission) die zu Berufskrankheiten während bestimmungsgemäßer Betriebszustände führen können.

[Aelion et al. 1995] nutzen zudem den Begriff **unbeabsichtigt** (Englisch *unintended*), andere Autoren **ungeplant** und **ungewollt** zur Abgrenzung, was wichtige Aspekte zur Definition von Unfällen, nicht aber von Terrorismus usw. oder von Selbstmorden beiträgt.

Eine **allgemeingültige und im Kontext der vorliegenden Arbeit anwendbare eindeutige Abgrenzung von Unfällen oder Vorfällen blieb bisher offen.**

### 4.10.3 Erweiterung von Unfällen zu Vorfällen

Die Erfassung von Vorfallauswirkungen über den Lebensweg in bisherigen Arbeiten beziehen sich **fast ausschließlich auf Unfälle**. Ausschuss ([Aelion et al. 1995]) und Sabotage/Terrorismus ([Friedrich 2004], [Friedrich 2012]) werden vereinzelt als fehlend bemängelt. Die einzige Arbeit, die einen methodischen Ansatz zum Thema Terrorismus und Energieanlagen erarbeitet hat, ist der bereits genannte nicht öffentlich verfügbare Forschungsbericht von [Eckle et al. 2011]. Auch hier fehlen aber wichtige Auswirkungen (wie Stofffreisetzungen und Unfall-Folgeaktivitäten) und es bleibt unklar, ob und ggf. wie die Zuordnung zu den vorfallbeteiligten Prozessen und Produkten vorgenommen wird.

Die sehr wenigen sonstigen Arbeiten, die andere Arten von Vorfällen berücksichtigen, insbesondere **Sabotage, Terrorismus und Kriegsgeschehen usw.**, sind qualitativer Art oder arbeiten mit Indikatoren, die nicht dem Superpositionsprinzip genügen, d. h. sie erlauben nicht, diese zu den Prozessprodukten zu skalieren und über den Lebensweg summieren zu können gemäß [Pfleiderer 1998]. Die Ergebnisse derartiger Ansätze erlauben keine direkten Vergleiche mit den Ergebnissen der Ökobilanzierung.

### 4.10.4 Qualitative Zuordnung von Vorfällen zu Prozessen

**Allgemeingültige und praktikable Zuordnungskriterien zur eindeutigen qualitativen Zuordnung von Vorfällen zu den beteiligten Produkten oder Prozessen wurden bisher nicht vorgestellt<sup>32</sup>.** Die Zuordnung wird methodisch in den untersuchten Arbeiten nicht adressiert sondern erfolgt implizit, meist anhand einer ungenannten oder zumindest nicht näher definierten Vorfallbeteiligung. Da die Zuordnung nicht immer offensichtlich ist, wird hier argumentiert, dass diese Situation zu Mehrfachzählungen und Lücken in der Sachbilanz führt und damit zu nicht vergleichbaren Ergebnissen von Studien unterschiedlicher Bearbeiter.

[Kurth et al. 2004] haben die qualitative Zuordnung von Unfallauswirkungen zu den Modulen im Lebensweg als ein Kriterium verwendet, um Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für die

---

<sup>32</sup> Diese Logik hat – allerdings aus versicherungstechnischer, juristischer und gesellschaftlicher Sicht und bezogen auf die Kostenauswirkungen von Unfällen – bereits sehr früh [Calabresi 1965] beschrieben: „*The cost of each accident might be divided pro rata among the activities involved and then cumulated for each activity.*“ (p. 740) und an anderer Stelle „*In other words the accident costs of making widgets out of aluminum are to be put on aluminum widgets, and the accident costs of making widgets out of steel are to be put on steel widgets, so that the nation of buyers can decide, on the basis of a full picture of what it costs to have each, how many of each are desired.*“

lebenswegbezogen Erfassung von Unfällen zu evaluieren; diese Zuordnung wird jedoch nicht weiter spezifiziert, ist implizit.

#### 4.10.5 Quantitative Zuordnung von multikausalen Vorfällen

Ein besonderer Aspekt ist die Multikausalität von Vorfällen. Sie wirft die Frage auf, ob und wenn ja wie Vorfallauswirkungen auf mehrere vorfallbeteiligte Prozesse verteilt werden müssen. Die **quantitative Zuordnung der Schäden aus multikausalen Vorfällen zu den vorfallbeteiligten Prozessen/Modulen wird in keiner der untersuchten Arbeiten methodisch ausgearbeitet.** Zusätzlich zu den näher analysierten Methoden haben [Kurth et al. 2004] neben der qualitativen auch die quantitative Zuordnung von Unfallauswirkungen zu den Modulen im Lebensweg in ihrer Analyse berücksichtigt, haben aber keine Zuordnungsmethode ausgearbeitet.

#### 4.10.6 Quantitative Zuordnung bei unterschiedlicher Granularität Vorfall und Modul

Die Granularität von Lebenswegmodellen ist in der Praxis sehr unterschiedlich. Teils werden einzelne Grundoperationen einer Anlage einzeln erfasst, teils werden ganze Anlagen oder Standorte (z. B. eine Raffinerie) als ein (Prozess-)Modul abgebildet. Verfügbare Informationen zu Vorfällen sind ebenfalls teils sehr detailliert (z. B. aus Ereignisablaufanalysen) teils sehr grob (z. B. aus Statistiken).

Dies bringt **zwei Arten von Problemen** mit sich: Erstens die **Zuweisung weniger detaillierter Vorfälle zu einer detaillierten Prozesskette.** Zweitens die **Zuweisung detaillierter Vorfälle zu wenig detaillierten Prozessketten.** Diese Probleme sind **in keiner der genannten Arbeiten methodisch bearbeitet** worden.

#### 4.10.7 Quantitative Zuordnung bei Nutzung sowohl detaillierter QRA-Studien als auch aggregierter Vorfalldaten und -statistiken

Um sowohl detaillierte Vorfallinformationen (z. B. aus innerbetrieblichen QRA-Studien mit Fehlerbäumen und Ereignisabläufen) als auch statistische Vorfalldaten verwenden zu können, bedarf es einer Methode die diesbezüglich flexibel ist. Die bislang vorgestellten Methoden nutzen entweder ausschließlich statistische Daten (z. B. [Hirschberg et al. 1998], [Krewitt 1996]) oder bilden mehr oder weniger detaillierte Ereignisketten ab (insbesondere [Simonson et al.

1998] und Folgearbeiten). Eine **Kombination oder andersartige Lösung wird demnach noch benötigt.**

#### 4.10.8 Differenzierung des Zuordnungsansatzes je nach Zielsetzung der LVA-Studie

Es wird davon ausgegangen, dass die Zuordnungskriterien der Vorfallauswirkungen sich je nach Fragestellung der LVA-Studie unterscheiden können: Beschreibende Studien mögen eine andersartige Zuordnung von Vorfallauswirkungen auf die Module bedingen als z. B. vergleichende Studien oder als Studien zur Analyse von Verbesserungsoptionen. Eine ähnliche Situation gibt es in der Ökobilanzierung, in der verschiedene Sachinventarmethoden je nach Fragestellung zum Einsatz kommen ([Lundie et al. 2007], [European Commission - JRC-IES 2010a]). Für Vorfälle wurden **derartige Überlegungen bisher in keiner der untersuchten Veröffentlichungen adressiert.**

#### 4.10.9 Modellierung von Vorfällen in *attributional* und *consequential* Studien

Ferner hat **keiner der Autoren bisher die mit der Differenzierung des Zuordnungsansatzes verwandte Frage adressiert, wie Vorfälle in den beiden grundsätzlich unterschiedlichen Lebensweg-Modellierungsansätzen** zu behandeln sind: Die beschreibende *attributional* und die die Auswirkungen von Entscheidungen modellierende *consequential* Herangehensweise. In der Ökobilanzierung wird dies mit zwei grundsätzlich unterschiedlichen Lebenswegmodellen umgesetzt. Es ist zu klären, ob und wenn ja inwieweit dies eine unterschiedliche Erfassung von Vorfällen über den Lebensweg impliziert.

#### 4.10.10 Kombination zu einer Methodik

Als letzter Schritt fehlt noch die **Abstimmung und methodische Kombination** aller Lösungsansätze und Rechenvorschriften in eine konsistente allgemeingültige Methode und deren exemplarische Darstellung der Anwendbarkeit.



## 4.11 Datensituation

### 4.11.1 Einleitung

Weitgehend unabhängig von der speziellen methodischen Lösung der Fragestellung dieser Arbeit werden **folgende Arten von Daten und Informationen** benötigt:

- **Technische Lebensweginformationen und -daten**, d. h. das quantitative Lebenswegnetz des zu untersuchenden Prozesses oder Produktes.
- **Qualitative Vorfallinformationen** einschließlich zu Auslösern und zum Vorfallablauf, die es erlauben, die Vorfallauswirkungen den einzelnen Prozessen/Modulen des untersuchten Produktlebenswegs zuzuordnen.
- **Quantitative Vorfallinformationen** zu den potenziellen und tatsächlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sowie auf Vermögenswerte und zu Vorfallfolgeaktivitäten.

Wichtige mögliche Quellen für diese Daten und Informationen sind:

- **Ökobilanzdatenbanken** zur Abbildung des quantitativen Lebenswegnetzes des zu untersuchenden Produktes, von Vorfallfolgeaktivitäten und – soweit Teil der Analyse – für die gleichzeitige Ökobilanz-Studie.
- **Ex ante und ex post QRA-Studien mit Fehlerbaum- und/oder Ereignisablaufmodellen** für Vorfälle insbesondere im Vordergrundsystem und deren Auswirkungen.
- **Vorfalldatenbanken und –statistiken** für Vorfälle insbesondere im Hintergrundsystem und als Ergänzung bei Datenlücken im Vordergrundsystem.

Die folgenden Unterkapitel diskutieren kurz die jeweilige Situation dieser Daten- und Informationsquellen.

### 4.11.2 Ökobilanzdatenbanken

Um vorfallbedingte Wirkungen über den Lebensweg eines Produktes quantitativ zu erfassen, benötigt man zunächst das **Lebenswegnetz des Produktes, das das Rückgrat des LVA-Modelles bildet**. Die wichtigste Quelle für Lebenswegnetze sind Datenbanken der am weitesten verbreiteten quantitativen Lebenswegmethode, der **Ökobilanzierung**.

Gleichzeitig enthalten diese Datenbanken die Ökobilanz-Sachinventare von Produkten und/oder Prozessschritten. Diese werden zur Modellierung der Auswirkungen von Vorfallfolgeaktivitäten innerhalb der LVA benötigt und um die Wirkungen aus Vorfällen denen

aus bestimmungsgemäßen Betriebszuständen gegenüberzustellen oder mit diesen zu kombinieren.

Der **relative Mangel an hochwertigen, akkuraten, aktuellen und zugänglichen Ökobilanzdaten** wird nach wie vor als eine wichtige Schwäche der Ökobilanzierung genannt und entsprechende Aktivitäten wurden und werden begonnen, um die Situation zu verbessern ([European Commission - JRC-IES 2013a], [Sonnemann et al. 2010]). Allerdings beziehen sich diese Aussagen auf die detaillierten Sachinventardaten zu Emissionen und Ressourcenverbräuchen der Prozesse des Lebensweges und bezogen auf die gesamte Breite der Wirkkategorien. Die Datenlage zu den grundsätzlichen technischen Lebenswegmodellen ist als besser einzuschätzen.

Es sind mehrere große Datenbanken verfügbar, die jeweils Lebenswegketten mehrerer tausend Produkttypen enthalten. Wichtige Beispiele sind die GaBi Datenbanken [PE International AG 2013b] und die ecoinvent Datenbank [ecoinvent 2013]. Eine umfassende Übersicht bietet [European Commission - JRC-IES 2013b]. Datenbanknetzwerke sind in Vorbereitung, insbesondere das ILCD Datennetzwerk der Europäischen Kommission [Wolf et al. 2012], auch Life Cycle Data Network (LCDN) genannt.

Darüber hinaus werden Ökobilanzdaten in den vergangenen Jahren zunehmend in der Politik eingesetzt, die hohe Anforderungen an die Datenqualität und Verlässlichkeit stellen muss. Hierzu gehören auf Europäischer Ebene insbesondere die Ökodesign-Direktive ([2009/125/EC]) und der in der Erprobung befindliche Umweltliche Fußabdruck von Produkten (Englisch *Product Environmental Footprint*, [2013/179/EU]). Ein weiterer starker Ausbau von Ökobilanzdatenbanken kann angenommen werden.

**Der Stand des Wissens hinsichtlich der Lebenswegmodelle wird demnach als gut beurteilt, um eine LVA zu implementieren.**

#### 4.11.3 QRA-Studien, FBA und EEA

Eine der zwei wichtigsten möglichen Quellen für Vorfalldaten sind QRA-Studien und die grundlegenden FBA- und EEA-Modelle. **QRA-Studien** werden in Unternehmen zur Unterstützung von Vorfallvermeidung und -minderung sowie im Kontext von **Genehmigungsverfahren** neuer oder maßgeblich geänderter Anlagen erstellt. Auch für die **Analyse schwerer**

**historischer Vorfälle** werden QRA-Studien oder Fehlerbäume erstellt, sowohl innerbetrieblich als auch von staatlichen Stellen (z. B. dem *US Chemical Safety Board (CSB)*).

Derartige Studien beinhalten **detaillierte quantitative Informationen** zu möglichen oder tatsächlichen Vorfällen und Vorfallszenarien, insbesondere zu deren **Eintrittshäufigkeiten** sowie den wichtigsten Auswirkungen, zumindest zu **Toten und Verletzte**. Detaillierte Informationen zu **Umweltschäden** (z. B. zu den genauen Mengen freigesetzter Stoffe, Emissionen aus Bränden usw.) sind dagegen oft nicht oder nur eingeschränkt enthalten, ebenso wie zu **Vorfallfolgeaktivitäten**. Zudem fehlen Angaben zur **Referenzgröße** der betroffenen Prozesse und Produkte (z. B. Jahresproduktionsmengen) ([Kurth et al. 2004]). Je nach gesetzlichen Anforderungen sind die Studien für Anlagengenehmigungen von unterschiedlicher Detailliertheit und teilweise lediglich qualitativ oder semiquantitativ.

Eine wichtige Eingangsgröße für die QRA sind zudem **Eintrittshäufigkeiten von Ausfällen technischer Komponenten** in Form von Tabellen und Datenbanken. Diese generischen Informationen werden in FBA und EAA in der Modellierung gemeinsam verwendet mit spezifischen Informationen der unternehmenseigenen Prozesse und denen der Zulieferer. Solche Tabellen und Datenbanken werden sowohl von Beratungsunternehmen angeboten, aber auch von Verbänden aus Daten der Mitgliedsunternehmen bereitgestellt (z. B. in der Ölindustrie: [OGP 2010d], [OGP 2010a], [OGP 2010c], [OGP 2010b]) sowie von staatlichen Stellen (z. B. in Großbritannien: [HSE 2010]) und über Forschungsvorhaben (z. B. [Debray et al. 2004]).

Fehlerbäume und QRA-Studien werden regelmäßig in Unternehmen erarbeitet. Die **innerbetriebliche Datenlage zu Häufigkeiten und direkten Personenschäden ist daher als gut einzuschätzen**.

Die **Datenlage zu den detaillierten Vorfallfolgen** (insbesondere Umweltfolgen und Vorfallfolgeaktivitäten), wie sie für die ökobilanzanaloge Erfassung der Auswirkungen über den Lebensweg benötigt werden, ist dagegen **weniger gut und schränkt die mögliche Vollständigkeit und Genauigkeit von Studien derzeit teilweise ein**. Eine solche Situation wurde von [Kurth et al. 2004] beschrieben und wird ähnlich nach wie vor angetroffen.

Die Schätzung von Informationen und die **schrittweise Erarbeitung von Vorfalldatenbanken** aus detaillierten Studien könnten diese Lücken nach und nach schließen und die Qualität der Studien erhöhen, ähnlich wie dies auch in der Ökobilanzierung Anfang der 1990er Jahre

geschehen ist. **Gesetzliche Anforderungen** an eine bessere Dokumentation entsprechender Aspekte in Unfallberichten oder die Erarbeitung entsprechender harmonisierter **Normen** wären weitere wichtige Komponenten, um die Datenlage in QRA-Studien systematisch zu verbessern.

#### 4.11.4 Vorfalldatenbanken und -statistiken

Weitgehend unabhängig von der Analyse möglicher oder tatsächlicher Vorfälle werden **Informationen zu historischen Vorfällen** gesammelt und in Form von Datenbanken oder aufbereitet als Statistiken dokumentiert.

Datenbanken von **Unfällen** werden u. a. aufgrund **gesetzlicher Vorgaben an staatlichen Stellen** geführt. In Deutschland am Umweltbundesamt z. B. die ZEMA zu schweren Unfällen ([UBA 2011]), in Frankreich die ARIA ([French Ministry of Ecology]) und auf europäischer Ebene die MARS ([European Commission - JRC 2012]). Ferner gibt es Datenbanken von **privatwirtschaftlichen Organisationen**, z. B. [TNO], [OECD & ITF] und [DNVb], die jeweils bis zu mehrere 10.000 Unfälle dokumentieren.

Informations- und Datenquellen sind je nach Situation und neben gesetzlichen Dokumentationspflichten (siehe zuvor) auch Zeitungsberichte (z. B. in [Global Terrorism Database 2012]). Diese Datenbanken dienen zur Information von Politik und Öffentlichkeit über gesellschaftlich stark wahrgenommene Typen von Unfällen (z. B. „Chemieunfälle“, „Verkehrsunfälle“) und – insbesondere in Form der Unfallanalysen – als Hintergrundinformationen zur Verringerung und Minderung von Unfällen und ihrer Schwere durch die Sicherheitsbeauftragten in Unternehmen.

In den genannten Datenbanken werden meist **Unfälle bestimmter Art** (z. B. Unfälle im öffentlichen Personen- und Gütertransport) und **ab einer Mindestschwere erfasst**. In Europa und für Unfälle ist seit 2012 die überarbeitete sogenannte **Störfall-Richtlinie** ([2012/18/EU]) in Kraft, die derzeit in nationales Recht umgesetzt wird. Anhang VI listet die Kriterien für die zu berichtenden „schweren Unfälle“ auf: Z. B. mindestens 1 Toter oder 6 Verletzte im Betrieb mit über 24 h Krankenhausaufenthalt oder „erhebliche oder langfristige“ Schädigungen von natürlichen Lebensräumen, z. B. See oder Teich ab 10.000 m<sup>2</sup>, oder innerbetriebliche Sachschäden ab EUR 2 Millionen usw. Weniger schwere, aber häufigere und daher in Gesamtsicht durchaus relevante, Unfälle werden demnach nicht erfasst. Die im Falle schwerer Unfälle zu berichtenden und seitens der ZEMA veröffentlichten Informationen ([UBA 2011])

umfassen zudem nach wie vor nicht die Produktionsleistung des Betriebes. Auch genauere Angaben zu den Mengen freigesetzter Stoffe sind nicht gefordert – diese Datenquelle stellt also für die LVA nur einige der benötigten Informationen bereit.

Im Fokus stehen in Datenbanken und Statistiken also die **Anzahl an Toten und Verletzten**, die akute lokale Gefahr aufgrund von Stofffreisetzungen sowie der wirtschaftliche Schaden (bei Produktionsstandorten wird dieser meist unterteilt nach Schäden an den Anlagen und außerhalb der Anlagen). Andere Informationen zu **detaillierten Umweltbelastungen** (z. B. Mengen freigesetzter Stoffe, Emissionsmenge von Verbrennungsprodukten aus Bränden) werden nicht oder nur grob erfasst [Burgherr et al. 2011]. Dies geht auf die mangelnde Erfassung bei den einzelnen Unfällen zurück, worauf im vorhergehenden Kapitel bereits hingewiesen wurde.

Zudem fehlen in aller Regel **Angaben zur Referenzgröße der betroffenen Prozesse und Produkte**, zumindest bei Unfällen in Produktionsanlagen (z. B. Jahresproduktionsmengen), worauf auch [Kurth et al. 2004] bereits hingewiesen hat. Für statistische Informationen, die aus den genannten Datenbanken abgeleitet werden, ist es im Gegenzug dazu **oft möglich, eine Referenzgröße abzuleiten**. Dies ist der Fall, wenn alle Unfälle z. B. in chemischen Produktionsanlagen eines Landes erfasst werden und die Gesamtmenge aller produzierten Chemikalien in anderen Statistiken dokumentiert ist. Naturgemäß ist in diesem Beispiel die quantitative Zuordnung der Unfälle zu den Produkten sehr ungenau, da die Anzahl, Art und Schwere von Unfällen je nach Chemikalie als stark unterschiedlich angenommen werden kann. Bessere Daten sind erhältlich z. B. für Personen- und Gütertransporte, einschließlich von Rohöl.

Wichtige Datenbanken für **Sabotage, Vandalismus, Verbrechen, Terrorismus und Kriegsauswirkungen** sind z. B. [globalincidentmap.com 2013] mit über 100.000 erfassten Vorfällen weltweit seit 2007 und [Global Terrorism Database 2012] mit mehreren 10.000 dokumentierten Fällen, weitere Datenbanken werden in [Sheehan 2012] analysiert. Allerdings sind auch in diesen Datenbanken detaillierte Informationen zu Schäden an Umwelt und Vermögenswerten und in physikalischen Einheiten nur eingeschränkt verfügbar. [Friedrich 2012] nennt mangelnde öffentliche Verfügbarkeit von terroristischen Anschlägen als grundsätzliches Hindernis für deren Berücksichtigung in der ExternE Methode. Dies ist – eingeschränkt – nachvollziehbar: Die beiden zuvor genannten Datenquellen sind öffentlich und beinhalten wesentliche Informationen, wenngleich wenig Details zu den Auswirkungen mit

Ausnahme von Todesfällen und – fallweise – Verletzten sowie halbquantitativen Angaben zu Umweltauswirkungen und Vorfalldolgeaktivitäten.

Die Datensituation in vielen OECD Ländern zu **Häufigkeiten** bestimmter Unfalltypen und bestimmter betroffener Prozesse ist gut, in Nicht-OECD-Ländern und zu weniger häufigen Unfalltypen und von anderen Prozessen finden sich deutlich weniger Informationen. Daten zur Häufigkeit kleinerer und sehr häufiger Vorfälle liegen meist nicht vor – [Etkin 2001] weist z. B. auf die Unterschätzung der Häufigkeit kleinerer Rohölverluste unter 340 t und insbesondere außerhalb der USA hin, [Burgherr & Hirschberg 2008] zufolge sind die Gesamtauswirkungen der Vielzahl kleiner Unfälle mit geringeren Auswirkungen substantiell.

Arbeiten verschiedener Autoren, die unterschiedliche Typen und Quellen von Unfällen ausgewertet haben, sind eine wichtige Basis für die lebenswegbezogene Erfassung. Beispiele sind die Arbeit von [Etkin 2001] selbst, in der Unfälle mit Rohölfreisetzung weltweit und über die vorhergehenden 30 Jahre systematisch zusammengestellt sind, und von [Eckle et al. 2012], die F-N-Kurven für Ölfreisetzungen in die Umwelt aus Unfällen ab 200 t je Ereignis über die vergangenen 40 Jahre statistisch aufbereitet haben.

Die Datenlage zu **Vorfalldschäden** ist demnach als gut bis sehr gut für Verletzte und Tote einzuschätzen und mäßig bis schlecht für Stofffreisetzungen, Unfallfolgeaktivitäten usw. Zudem liegen Informationen zu den vorfallbeteiligten Auslösern nicht immer in auswertbarer und vergleichbarer Form vor, insbesondere fehlen oft **Angaben zur Multikausalität**.

**Insgesamt wird damit die Datenlage als noch ausreichend eingeschätzt** und ist abhängig vom speziellen Untersuchungsobjekt und Fragestellung. LVA-Studien sollten daher die jeweilige Datenlage als potenziell wichtiges einschränkendes Kriterium hinsichtlich der Belastbarkeit der Aussagen adressieren.

# 5 Methode der Lebensweg-Vorfallanalyse (LVA)

## 5.1 Kapitelübersicht

Das Methodenkapitel adressiert **zunächst übergeordnete methodische Festlegungen** (Kap. 5.2). Dies sind insbesondere:

- Identifikation eines geeigneten Grundansatzes, um Vorfallauswirkungen bezogen auf die vorfallbeteiligten Prozesse und Produkte zu erfassen sowie über den Produktlebensweg zu aggregieren.
- Definition nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände (= Vorfälle) und damit die Abgrenzung vom mittels der Ökobilanz erfassten bestimmungsgemäßen Betrieb.
- Differenzierung von Vorfällen in verschiedene Typen.
- Abgrenzung der LVA von angrenzenden lebenswegbasierten Methoden.

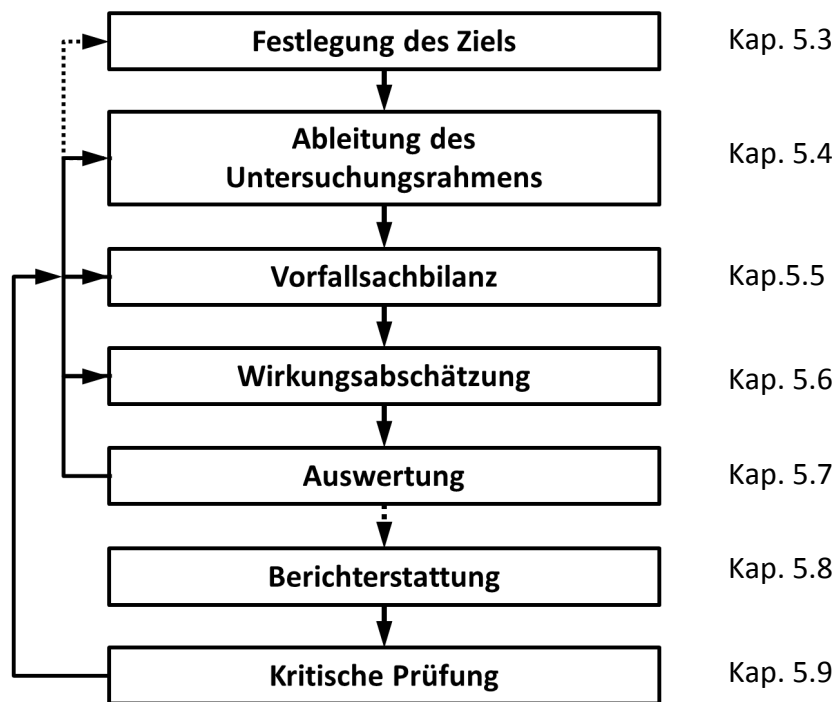
Daran **anschließend wird die eigentliche LVA-Methode beschrieben.**

Die LVA-Methode folgt den in Kap. 3.1.1 vorgestellten Prinzipien der Ökobilanzierung und greift für eine Reihe methodischer Fragen auf die erprobten Lösungen der Ökobilanzierung zurück.

Daher orientiert sich die weitere Kapitelgliederung an der Grundstruktur der Ökobilanzierung entsprechend dem *ILCD Handbook – General guide for Life Cycle Assessment* ([European Commission - JRC-IES 2010a]), das die [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] implementiert und näher spezifiziert sowie um die in dieser Norm nicht adressierten Aspekte erweitert.

Der Fokus der LVA-Methodikbeschreibung liegt auf denjenigen Methodenaspekten, die sich maßgeblich vom Vorgehen in der Ökobilanzierung unterscheiden.

Die LVA-Methodik wird in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt, siehe Abb. 12. Die zusätzlichen, von unten nach oben **rückläufigen Ablaufpfeile** in Abb. 12 zeigen die **iterative Natur der LVA** (analog zur Ökobilanzierung laut [European Commission - JRC-IES 2010a]): Zunächst werden anhand direkt verfügbarer Daten und Abschätzungen ein vereinfachtes Vorfallsachbilanzmodell gebildet, die Vorfallwirkungsabschätzung durchgeführt und die vorläufigen Ergebnisse ausgewertet. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse wird das Modell in einer oder mehrerer Iterationen verfeinert, was u. a. die vertiefte Datenerhebung, die Überarbeitung des Untersuchungsrahmens und – in manchen Fällen – die Revision des Studienzieles bedingen kann.



**Abb. 12. Ablauf der LVA-Methodik und zugehörige Unterkapitel, Erläuterungen siehe Text.**

Am Beginn jeder LVA-Studie steht – wie in der Ökobilanzierung – die **Zieldefinition**, d. h. die Identifikation der Ziele, die Klarstellung der beabsichtigten Anwendungen der Ergebnisse und weitere grundlegende Festlegungen.

Methodische Spezifika der Studie werden in der anschließenden Phase des **Untersuchungsrahmens** aus der Zielsetzung der LVA-Studie abgeleitet<sup>33</sup>.

Grundprinzip der auf den Untersuchungsrahmen folgenden und im Kern der hier vorgestellten Arbeit stehenden Modellierung der **Vorfallsachbilanz** ist die Erfassung der Vorfallauswirkungen in Form von ökobilanzanalogen Vorfallsachinventaren in Einheitsvorfällen als Entsprechung zu den (Prozess-)Modulen der Ökobilanzierung. Vorfallauswirkungen sind dabei:

- direkte Personenschäden (d. h. Tote, Verletzte, vorfallbedingte Berufskrankheiten)
- direkte oder aus Umwandlungen (z. B. während Bränden) hervorgehende Interventionen mit der Umwelt (d. h. Emissionen, Ressourceninanspruchnahmen) und die hieraus folgenden Schadwirkungen an Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit

<sup>33</sup> Zur besseren Nachvollziehbarkeit der LVA-Methodik sei hier darauf hingewiesen, dass in der Ökobilanzierung zielsetzungsabhängige methodische Festlegungen im Kapitel „Untersuchungsrahmen“ beschrieben werden. Fragen, die erst bei der Umsetzung der entsprechenden Methodik auftreten, werden in den entsprechenden, nachfolgenden Kapiteln behandelt, z. B. der „Sachbilanz“. Demgemäß finden auch hier methodische Festlegungen z. B. zur Vorfallsachbilanzierung im Kapitel „Untersuchungsrahmen“ statt und umsetzungsrelevante Methodikaspekte werden erst im Kapitel „Vorfallsachbilanz“ beschrieben.



- die Interventionen mit der Umwelt aufgrund von Vorfallfolgeaktivitäten (z. B. Wiederherstellung zerstörter Güter, Rettungseinsätze, Abfallentsorgung usw.) und die ebenfalls hieraus und die hieraus folgenden Schadwirkungen an Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit
- Folgeunfälle und deren Auswirkungen in Form der in den vorhergehenden drei Punkten genannten möglichen Auswirkungen

Die Modellierung der Vorfälle erfolgt in Vorfallsystemen, ausgehend von jeweils einem zentralen Einheitsvorfall, der das oben genannte Vorfallsachinventar beinhaltet.

Soweit effektiver, werden manche Vorfallauswirkungen nicht direkt in den Einheitsvorfällen inventarisiert, sondern innerhalb der Vorfallsysteme (weiter-)modelliert. Dies gilt z. B. für die genauen Arten und Mengen an Emissionen aus Feuern, die in den verfügbaren Vorfall-datenquellen typischerweise nicht direkt vorliegen. Auch die Interventionen mit der Umwelt aus Vorfallfolgeaktivitäten werden in der Regel zweckmäßig nicht direkt im zentralen Einheitsvorfall erfasst, sondern als Produktsysteme innerhalb der Vorfallsysteme mittels der Ökobilanzmethodik modelliert. Folgeunfälle und die von diesen ausgehenden Auswirkungen werden ebenfalls oft geeigneter als separate Einheitsvorfälle im Vorfallsystem abgebildet.

Ein wesentlicher Schritt ist die qualitative und quantitative Zuordnung der Vorfallauswirkungen zu den vorfallbeteiligten Prozessen und Produkten und damit den Modulen des Lebensweges. Bei absichtlich herbeigeführten Vorfällen erfolgt diese Zuordnung zusätzlich zu den vorfallbeteiligten Personen oder Institutionen.

Die Vorfallsysteme werden mittels zentraler Einheitsvorfälle über Ereignisse quantitativ an die vorfallbeteiligten Module im Lebenswegmodell des untersuchten Produktsystems angebunden (siehe Abb. 24) und zur quantitativen Referenz des jeweiligen Moduls skaliert. Die Flüsse der Einheitsvorfälle werden mittels zusätzlicher Skalierungsfaktoren – den Zuordnungsfaktoren – den vorfallbeteiligten Prozessen und damit den Modulen des Lebensweges quantitativ zugeordnet.

Über mehrere Stufen werden die Vorfallsachinventare der Vorfallsysteme zum Vorfallsachbilanz-Ergebnis über den Produktlebensweg (oder Teile davon, je nach Erkenntnisinteresse) aggregiert.

An die Vorfallsachbilanz schließt sich die **Wirkungsabschätzung des Vorfalls** an, die alle Interventionen mit der Umwelt identisch zur Ökobilanzierung behandelt. Die ausschließlich

vorfallbedingten direkten Personenschäden werden mittels des DALY-Ansatzes bewertet und sind damit auf Ebene der Wirkungsendpunkte direkt vergleichbar mit den indirekten Auswirkungen, die erst über Interventionen mit der Umwelt auf den Menschen wirken.

Die anschließende **Auswertung**, die **Berichterstattung** und die fallweise stattfindende **kritische Prüfung** von LVA-Studien erfolgt weitgehend analog zur Ökobilanzierung. Die kritische Prüfung kann alternativ zur vorhergehenden Darstellung auch als begleitende Prüfung während der Studiererstellung stattfinden.

## 5.2 Übergeordnete methodische Festlegungen

### 5.2.1 Kapitelübersicht

Bevor die LVA-Methode im Detail beschrieben werden kann, sind mit Blick auf die Ziele und Vorgaben dieser Arbeit noch **einige Definitionen und übergeordnete methodische Festlegungen** erforderlich<sup>34</sup>:

- Als erstes ist zu klären, welcher **Grundansatz** verfolgt werden soll, um die Vorfallauswirkungen bezogen auf die vorfallbeteiligten Prozessen und Produkte effektiv und effizient zu erfassen sowie über den Produktlebensweg zu aggregieren.
- Zudem wird eine geeignete **Definition von Vorfällen (= nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen)** benötigt, um eine eindeutige Abgrenzung von den in der Ökobilanz adressierten bestimmungsgemäßen Betriebszuständen zu erreichen.
- Eine Unterteilung von Vorfällen in geeignete **Vorfalltypen** ist zielführend, um die entsprechend differenzierte Auswertung zu unterstützen.
- Die **Abgrenzung** von anderen Arten von lebenswegbezogenen Wirkungen von Produkten und den diesbezüglich genutzten angrenzenden Methoden schließt die Behandlung übergeordneter Fragen ab.

### 5.2.2 Grundansatz zur Erfassung von Vorfallauswirkungen über den Lebensweg von Produkten

**Drei Ansätze** erscheinen vielversprechend, um Vorfallauswirkungen Prozessen und Produkten geeignet zuzuordnen:

---

<sup>34</sup> Dies, und die verfolgten Grundansätze, wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit in [Wolf 2012b] kurz vorgestellt.

- Die Erweiterung von Fehlerbaumanalyse und/oder Ereignisablaufanalyse um ein Ökobilanzmodell („**QRA-basierter Integrationsansatz**“).
- Die Erweiterung von Ökobilanzmodellen um Fehlerbaum- und Ereignisablauf-Modellierungsfunktionen („**ökobilanzbasierter Integrationsansatz**“).
- Die Erfassung der Ergebnisse von QRA-Studien und Vorfalldaten in einem eigenen Vorfalldatenmodell und dessen Anbindung an den Produktlebensweg („**modularer Kombinationsansatz**“).

In der hier vorgelegten Arbeit wird der letztgenannte Ansatz verfolgt, aus den folgenden Überlegungen heraus: Die Errechnung der Vorfalldaten und grundlegender Wirkungen (d. h. Todesopfer, Anzahl und Art von Verletzungen, Art und Mengen freigesetzter oder verbrannter Produkte, Grad der Schädigung von Anlagen und anderen Vermögenswerten) ist die Domäne der QRA. Fehlerbaumanalysen und Ereignisablaufanalysen sind Teil bereits erarbeiteter QRA-Studien und stellen Daten zu Eintrittswahrscheinlichkeiten und -häufigkeiten von Vorfalldaten bereit. Wesentliche Vorfalldaten sind Ergebnis der QRA-Szenarien, teilweise geschätzt mittels Folgenabschätzungsmodellen (Englisch *Consequence analysis models*), insbesondere bei der Freisetzung brennbarer oder toxischer Stoffe. Es wird argumentiert, dass es effizienter ist, auf diesen in der industriellen Praxis oft verfügbaren Vorfalldateninformationen modular aufzubauen, anstelle Fehlerbäume und Ereignisabläufe erneut abzubilden, wie es im ökobilanzbasierten Integrationsansatz geschähe. Ähnlich können Vorfalldaten und grundlegende Auswirkungen aus Statistiken und Vorfalldatenberichten in den modularen Kombinationsansatz übernommen werden.

Die Ergebnisse der QRA sind für manche Vorfalldatenvorgänge allerdings unvollständig mit Blick auf die benötigte Vergleichbarkeit mit Ökobilanzergebnissen: So mögen zwar Daten zur Art und Menge verbrannter Substanzen vorliegen, nicht aber die Menge und Art der als Verbrennungsprodukte freigesetzten Emissionen. Die hierfür benötigten Input-Output-Prozesse der generischen Stoffumwandlung sind die Domäne der Ökobilanzierung. Ebenfalls eignet sich die Ökobilanz sehr gut dazu, die Umweltlasten aus der Wiederherstellung zerstörter Anlagen und Gebäuden, von Feuerwehreinsätzen und anderen Vorfalldatenfolgeaktivitäten als Produktsysteme abzubilden. Die komplementäre Modellierung und die Inventarisierung der Vorfalldatenwirkungen erfolgt demnach effektiv mit der Ökobilanzierung. Ferner ist auch die grundlegende Modellierung des Produktlebensweges des untersuchten Produktsystems eine Kernstärke der Ökobilanzierung – Produktlebenswegmodelle einer Vielzahl von Produkten

liegen in Ökobilanzdatenbanken bereits vor. Die Lebenswegmodelle in einem QRA-basierten Integrationsansatz erneut zu modellieren, ist daher weniger effizient. Zudem ist die Berechnung der potenziellen Wirkungen in den Wirkkategorien ein erprobter Kernbestandteil der Ökobilanzierung und erfolgt daher ebenfalls zweckmäßigerweise mittels der Ökobilanzmethodik.

Die quantitativen QRA-Ergebnisse und Informationen aus Vorfalldatenbanken und -Datenbanken werden demnach in dem hier verfolgten modularen Kombinationsansatz in einem Vorfallsystemmodell zusammengeführt und an die Lebenswegmodelle des untersuchten Produktsystems oder Prozesses angebunden. Das Vorfallsystem dient als Mittler zwischen den Vorfalldatenquellen und den Ökobilanzmodellen.

Abb. 13 zeigt schematisch die Anbindung der Ergebnisse von Fehlerbaumanalysen, Ereignisablaufanalysen und QRA-Studien mittels Vorfallsystemen an die Module des Produktlebenswegmodells.

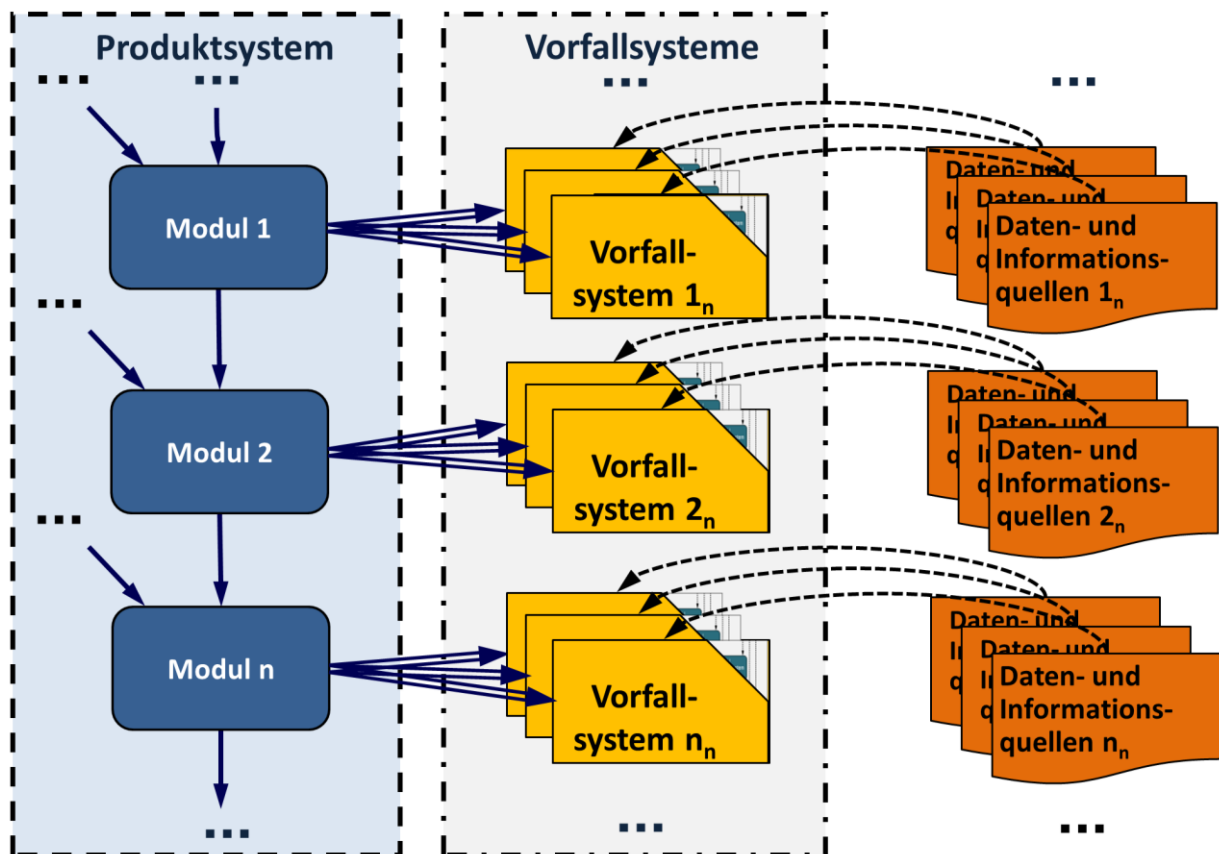


Abb. 13. Prozessnetz des Produktlebensweges der Ökobilanzierung (links), QRA-Modelle, Vorfalldatenbanken, Vorfalldatenbanken, Vorfalldatenbanken und andere Informationsquellen für Vorfälle (rechts) und die Staffeln der hier neu eingeführten Vorfallsysteme (Mitte), schematisch. Anbindung der Vorfallsysteme an die Module und Vorfallsachbilanzskalierung erfolgt mittels Ereignissen (Doppelpfeile).

Die weiteren Berechnungen, Aggregation und Wirkanalysen finden mittels Ökobilanzmethodik statt, unter Nutzung QRA-spezifischer Kenngrößen, insbesondere von Eintrittshäufigkeiten<sup>35</sup>.

### 5.2.3 Abgrenzung Vorfall (= nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand) und bestimmungsgemäßer Betriebszustand

#### Einleitung

Eine allgemeingültige eindeutige Definition von Vorfällen und damit deren Abgrenzung von den mittels Ökobilanzierung erfassten Schadwirkungen während bestimmungsgemäßen Betriebszuständen<sup>36</sup> ist sehr wichtig, um Überlappungen und Lücken der Daten zu minimieren, aber zugleich nicht trivial [Hirschberg et al. 1998].

Da es bisher keine Definition von Vorfällen gibt, die vollständig für die hier zu erarbeitende Methode geeignet wäre, wird eine solche Definition hier eingeführt, basierend auf Aspekten aus [Aelion et al. 1995] und Beschreibungen in diversen anderen Arbeiten<sup>37</sup>:

#### Definition Vorfall

**Vorfall: "Geschehnis unter Involvierung von Produkten oder Prozessen, das zu einer direkten oder indirekten Schädigung von Menschen, Vermögenswerten oder der Umwelt führt oder im Rahmen von Folgeunfällen und -aktivitäten dieses Geschehnisses solche Schädigungen bedingt UND das offiziell seitens der Prozess- oder Produktentwickler oder Produkthersteller oder -betreiber nicht geplant ist, wenngleich es technisch antizipiert sein kann."**

In Kurzform: "**Ein prozessbezogenes, schädliches und offiziell nicht geplantes Geschehnis.**"

---

<sup>35</sup> Als vierter Weg ist eine computergestützte Integration bestehender QRA-Modelle und Ökobilanzmodelle denkbar, um eine stärker automatisierte Übergabe von Informationen und Erleichterung der Szenarienberechnung zu unterstützen. Methodisch könnte dies auf der hier vorgestellten LVA-Methode aufbauen, siehe Ausblick Kap. 8.

<sup>36</sup> Es wird hier ferner unterschieden zwischen bestimmungsgemäßigem Betrieb und bestimmungsgemäßen Betriebszuständen; letztere können sowohl im bestimmungsgemäßen als auch nicht bestimmungsgemäßen Betrieb auftreten, siehe Glossar.

<sup>37</sup> Es ist bemerkenswert, dass es in der Literatur keine, für die vorliegende Arbeit geeignete, Definition gibt. Bei den diesbezüglichen ausgiebigen Recherchen wurden immer nur Definitionen gefunden, die entweder auf bestimmte Branchen oder Technologien (z. B. [Freund et al. 1989] und [Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen 1993] für kerntechnische Anlagen) oder Lebenswegabschnitte zugeschnitten sind, sich an juristischen Verantwortlichkeiten orientierten oder aber zu allgemein gehalten und daher in konkreten Fällen nicht uneindeutig anwendbar sind. Häufig wird die Abgrenzung mittels Schadensschwellen festgelegt ([12. BImSchV], [2003/105/EC], [Hirschberg et al. 1998], auch [Freund et al. 1989] und [Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen 1993] differenzieren hier weiter). Dies führt aber zu erheblichen Lücken, da die unterhalb der Schadensschwellen liegenden Vorfälle entweder nicht oder nur teilweise erfasst werden.

Die Notwendigkeit der Definition mit drei kombinierten Kriterien wird im Anhang A anhand einiger Beispiele diskutiert.

Unter **bestimmungsgemäßigem Betriebszustand** wird hier also einer der konstruktions- oder betriebsseitig geplanten Zustände verstanden (wie Inbetriebnahme, Anfahrphase, Normalbetrieb, Wartungs- und Instandhaltungsphase, Abfahrphase, Außerbetriebnahme usw.), insoweit kein Vorfall entsprechend der obigen Definition geschieht. Ereignet sich dagegen ein Vorfall, wird hier der Begriff **nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand** verwendet<sup>38</sup>; [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004] spricht von dem Versagen der Maschine.

### **Sonderfall Berufskrankheiten**

Fälle von **Berufskrankheiten** werden aufgrund der Abgrenzung „Vorfall“ von „bestimmungsgemäßen Betriebszuständen“ nur in dem Maße einbezogen, wie sie auf Vorfälle zurückgehen. Die quantitative Aufteilung der Beiträge zu Berufskrankheiten durch Wirkungen auf Mitarbeiter während bestimmungsgemäßer Betriebszustände (z. B. durch eingeplante Emissionen am Arbeitsplatz, Arbeitsplatz-Ergonomie, eingeplante Geräuschpegel) und aufgrund von Vorfällen (z. B. Stofffreisetzungen in die Innenraumluft bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen) soll anhand Statistiken und quantitativen Informationen aus Studien durchgeführt werden.

### **Praxisaspekte**

Die Abgrenzung von Vorfällen soll grundsätzlich auch **vom Ziel- und Untersuchungsrahmen der Studie abhängig** gemacht werden.

Gleichzeitig gilt das **Relevanzprinzip**, d. h. wenn nicht eindeutig zuzuordnende Fälle quantitativ nicht relevant sind, kann der mögliche Zuordnungsfehler akzeptiert werden. Das Arbeiten mit relativen Abschneidekriterien – analog zur Ökobilanzierung – ist der hierzu geeignete Ansatz, der in Kap. 5.4.6 behandelt wird.

---

<sup>38</sup> Dabei ist zu beachten, dass eine vorfallbedingte Schädigung, z. B. von Arbeitern, stattfinden kann, ohne dass der Betrieb des Produktes oder Prozesses selbst notwendigerweise gestört wird. Ein Beispiel ist das Überrollen eines Arbeiters mit schwerem Minengerät. Dies führt zur Unterscheidung von derartigen Vorfällen, die den Betrieb selbst ungestört lassen (obschon sie zu Maßnahmen führen können, die den Betrieb unterbrechen), von solchen, die den Betrieb selbst auslösend stören.

## 5.2.4 Unterschiedliche Vorfalltypen

Mit Blick auf die geforderte differenzierte Entscheidungsunterstützung mittels der LVA ist es hilfreich, Vorfälle weiter zu unterteilen:

Tab. 1 stellt eine Unterteilung in verschiedene Vorfalltypen vor, die sich an wesentlichen Charakteristika der Vorfälle und zugleich den betrieblichen Zuständigkeiten orientiert:

**Tab. 1 Untergliederung von Vorfällen in verschiedene Typen anhand wichtiger Charakteristika und Management-Zuständigkeiten.**

Vorfalltyp	Auslöser	Wirkungsmechanismen	Management/Entscheidungsunterstützung
<b>Funktionsstörung, Produktionsausfälle, Ausschuss</b> <sup>39</sup>	Ausschließlich unbeabsichtigte Auslöser, prozessintern	Wirkungen auf Mensch und Umwelt ausschließlich indirekt und aufgrund qualitativer Schädigung der Prozessfunktion(en) oder -produkte <sup>40</sup> .	Qualitätsmanagement
<b>Unfälle im bestimmungsgemäßen Betrieb</b>	Ausschließlich unbeabsichtigte Auslöser, prozessintern oder -extern	Wirkungen via Interventionen mit der Umwelt, oft ortsspezifisch	Sicherheitsmanagement
<b>Unfälle im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb</b>	Ausschließlich unbeabsichtigte Auslöser, prozessintern oder -extern	und/oder direkte Wirkungen auf die menschliche Gesundheit (Verletzte, Tote)	
<b>Sabotage, Terrorismus, Unruhen, Bürgerkrieg,</b>	Zumindest ein relevanter, beabsichtigter Auslöser, prozesseextern	und/oder Wirkungen indirekt aufgrund qua-	Bedrohungsmanagement (oder als Teil des

<sup>39</sup> Methodisch gehören Ausschuss und Fehlchargen (und analog fehlgelaufene Dienstleistungen) zu den Vorfällen. Zu deren Analyse und Vermeidung wird im Rahmen des Qualitätsmanagements oft ebenfalls die Fehlerablaufanalyse angewandt ([Wolf 2012a]). Die zweckmäßige Zuordnung von Ausschuss und Fehlchargen zu entweder Ökobilanzen oder Vorfällen ist allerdings erschwert, da es sowohl Fälle gibt, in denen die qualitativen Fehlchargen noch ganz oder teilweise verkaufbar sind (z. B. als geringer wertige Qualitätsstufe oder Ware zweiter Wahl) und solche, in denen das Produkt als Abfall entsorgt werden muss. Beide Fälle werden seit den Anfängen in die Ökobilanz einbezogen. Auch die verwendeten Rohstoffe, produktionsbedingte Emissionen und – oft gemeinsam erfasste – bestimmungsgemäße Produktionsabfälle sind ein nicht einfach abtrennbarer Bestandteil des Sachinventars der Ökobilanzierung. Gleiches gilt für rein quantitative Minderproduktion, die Bestandteil der bestimmungsgemäßen Ökobilanz ist. Qualitätsmanager, die sich mit Sicherstellung qualitativ und quantitativ erfolgreicher Produktion befassen, werden als Zielgruppe in dieser Arbeit daher bewusst ausgeklammert. Gleichzeitig eröffnet die LVA-Methode die grundsätzliche Möglichkeit, Ausschuss und Fehlchargen separat von den Auswirkungen des Normalbetriebs zu erfassen, zu quantifizieren und über den Produktlebensweg auszuwerten. Solche Weiterentwicklungen sind allerdings jenseits des Rahmens dieser Dissertation.

<sup>40</sup> Rein quantitative Schädigungen der Produktion (Minderausbeuten etc.) sind Teil der Ökobilanzierung, der Übergang ist allerdings fließend, da die Auslöser sowohl in bestimmungsgemäßen als auch in nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen liegen können.

<b>Vandalismus, andere kriminelle Akte sowie Auswirkungen von Kriegsgeschehen auf Produkte und Prozesse</b>	Primär gegen Vermögenswerte und/oder andere Personen gerichtet, fallweise unter Inkaufnahme oder Beabsichtigung der Schädigung auch der eigenen Person	litativer Schädigung von Vermögenswerten und der Prozessfunktion(en) oder deren Produkte.  Mögliche, zusätzliche Wirkungen aufgrund von Vorfalldfolgeaktivitäten (z. B. zusätzlich benötigte Güter und Dienstleistungen, Feuerbekämpfung und Evakuierung).	Sicherheitsmanagements <sup>41)</sup>
<b>Selbstmorde</b>	Zumindest ein relevanter, beabsichtigter Auslöser  Primär gegen die eigene Person gerichtet, fallweise unter Inkaufnahme der Schädigung anderer Personen und von Vermögenswerten		Teil des Sicherheitsmanagements (oder als Teil des Bedrohungsmanagements)

**Unfälle können sowohl im bestimmungsgemäßen als auch im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb auftreten**, wie in [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004] impliziert<sup>42</sup>. Der bestimmungsgemäße Betrieb wird hier in Erweiterung der Definition von [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004] als bestimmungsgemäße(r) Betrieb/Verwendung auf alle Produkte und Prozesse und deren Nutzung ausschließlich für die vorgesehenen Anwendungen bezogen<sup>43</sup>. Dies dient hier dazu, bei Unfällen die Verwendung von Produkten für nicht vorgesehene Zwecke oder außerhalb der vorgesehenen Betriebsbedingungen zu differenzieren, z. B. die Verwendung einer Zange um einen Nagel in die Wand zu schlagen. Zudem wird in der Praxis für den Vorfalldtyp „Unfall im bestimmungsgemäßen Betrieb“ oft die **vernünftigerweise vorhersehbare Fehlanwendung** ([Norm DIN EN ISO 12100-1:2004]) unterschieden. Derartige Fälle sollen im Standardfall in die LVA einbezogen werden, da sie innerhalb der Verwendungsgrenzen des Produktes/Prozesses liegen ([Norm DIN EN ISO 12100-1:2004])<sup>44,45</sup>.

<sup>41</sup> Z. B. in [Bundesministerium des Inneren 2005]

<sup>42</sup> [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004] (S. 5) spricht von „unerwartet“ auftretenden Gefährdungen im Gegensatz zu Schäden während der „bestimmungsgemäßen Verwendung (der Maschine)“.

<sup>43</sup> Was bestimmungsgemäß ist, wird entweder vom Produkthersteller oder bei gewerblicher Nutzung vom Prozessbetreiber festgelegt. Das Rauchverbot in Anlagen mit brennbaren Substanzen setzt Rauchen in derartigen Anlagen als nicht bestimmungsgemäße Produktverwendung fest. Liegen keine hersteller- oder betreiberspezifischen Informationen vor, sind geeignete andere Quellen (z. B. Verbände oder gesetzliche Vorgaben) zu verwenden.

<sup>44</sup> [Norm DIN EN ISO 12100-1:2004] bezieht derartige Fehlanwendungen in die Verwendungsgrenzen von Maschinen und deren Konstruktion ein, diese Einbeziehung wird hier auf alle Produkte und Prozesse erweitert.

<sup>45</sup> Ein in jedem Fall einzubeziehender Spezialfall von Vorfällen ist das Allmählichkeitsereignis, das phänotypisch oft nicht als Unfall oder Ereignis wahrgenommen wird, worauf auch [Jaggy 1995] hinweist. Ein Beispiel ist eine sich langsam entwickelnde Leckage einer Pipeline oder der Abdichtung einer Deponie. Vorfälle müssen folglich keinen „Plötzlichkeitscharakter“ haben.



Im Gegensatz zu Unfällen als nicht **absichtlich herbeigeführte Vorfälle** sind bei absichtlich herbeigeführten Vorfällen regelmäßig Produkte beteiligt, die durch die ausführenden Personen nicht bestimmungsgemäß verwendet werden, z. B. die Verwendung von bergmännischen Sprengstoffen oder LKWs für terroristische Anschläge<sup>46</sup>. Die Vorfallobeteiligung derartiger Produkte oder Prozesse ist ein eigenschaftsbedingter passiver Vorgang (Details siehe Kap. 5.4.3 und am Ende von Kap. 5.4.5).

Ferner ist es wichtig zu unterscheiden, ob ein Vorfall ausschließlich durch externe Auslöser bedingt ist – der Prozess den Vorfall also ausschließlich **passiv** erleidet – oder ob der vorfallbeteiligte Prozess oder das Produkt selbst auslösend **aktiv** beteiligt ist. Diese wichtige Unterscheidung wird in Kap. 5.4.5 verwendet, um die quantitative Zuordnung von Vorfallobwirkungen zu den vorfallbeteiligten Prozessen abzuleiten.

## 5.2.5 Abgrenzung der LVA von angrenzenden, lebenswegbasierten Methoden

### Einleitung

Aus der LVA implizit ausgeklammert sind nach der Vorfall-Definition in Kap. 5.2.3 verschiedene schädliche Vorgänge und Wirkungen, die in diesem Kapitel identifiziert werden.

### Abgrenzung von der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung erfasst Umweltaspekte während bestimmungsgemäßer Betriebszustände von Prozessen, Details siehe Kap. 3.1.

### Abgrenzung von der Sozial-Ökobilanzierung und der Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse

Die Sozial-Ökobilanzierung und die Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse, LWAA (Englisch *Life Cycle Working Environment*, LCWE) adressieren verschiedene prozessbezogene Auswirkungen auf den Menschen. Hierzu gehören – je nach Ansatz – sowohl direkte schädliche Auswirkungen **während bestimmungsgemäßer Betriebszustände wie z. B. viele Berufskrankheiten, Schwere**

---

<sup>46</sup> Bei vorsätzlich herbeigeführten multikausalen Vorfällen mit passiv vorfallbeteiligten Prozessen und Produkten, d. h. Sabotage u. ä. und Selbstmorde, tritt die Besonderheit auf, dass die für diese Akte eingesetzten Produkte (z. B. Sprengstoff, S-Bahn) nicht bestimmungsgemäß verwendet werden. Dies hat zur Folge, dass – je nach Zuordnungsansatz – diesen Produkten/Prozessen keine oder wenige Vorfalbschäden zugeordnet werden. Dieses Vorgehen wird im Kap. 5.4.5 wieder aufgegriffen und motiviert. Auch bei Unfällen spielt diese Regel eine wichtige Rolle: Wird ein Raffineriefener durch ein/e Streichholz/Zigarette ausgelöst, werden diesen Produkten die Auswirkungen als „Unfälle im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb“ zugeordnet, da auf der Raffinerie Rauchen untersagt ist, dies also eine nicht bestimmungsgemäße Nutzung von Streichholz und Zigarette ist.

**der Arbeit usw.** als auch solche **aus Unfällen, insbesondere Tote und Verletzte.** Zudem werden auch Auswirkungen unabhängig vom Betriebszustand erfasst, wie **z. B. Qualifikation der Mitarbeiter, Anteil Frauenarbeit, Anteil Kinderarbeit usw.** Manche Forschergruppen beziehen auch nicht direkt quantifizierbare Aspekte wie **Partizipationsstruktur, Mitarbeiter-Zufriedenheit usw.** ein (z. B. [Benoît-Norris et al. 2011]). Insbesondere die Sozial-Ökobilanzierung erfasst je nach spezieller Methode eine Vielzahl weiterer sozialer Aspekte. Nicht erfasst werden dagegen unfallbedingte Interventionen mit der Umwelt und Unfallfolgeaktivitäten (z. B. Güterwiederherstellung).

Die breite Einbeziehung aller sozial relevanten Aspekte in die Sozial-Ökobilanzierung und LWAA ist nicht in allen Punkten praxisorientiert: In der Praxis werden Fragen der Arbeitsumwelt während bestimmungsgemäßer Betriebszustände mit anderen Methoden analysiert, als dies für Unfälle gilt: Unfälle sind ungeplant und mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit versehen. Mit Ausnahme ausschließlich der direkten Personenschäden werden in der Sozial-Ökobilanzierung und LWAA derzeit ausschließlich Schadwirkungen während bestimmungsgemäßer Betriebszustände erfasst. Um dieser unterschiedlichen Natur von Vorfällen einerseits und bestimmungsgemäßen Betriebszuständen andererseits gerecht zu werden und zur effektiven Unterstützung der EHS-Praxis wird daher hier argumentiert, dass die Datenerhebung und Modellierung primär an der Art der Auslöser (und den diesen zugrunde liegenden Ursachen) der Schäden orientiert werden sollte. Das heißt, dass auch soziale Aspekte sowohl während bestimmungsgemäßer Betriebszustände als auch aus Vorfällen zwar in einem gemeinsamen Rahmen, aber methodisch getrennt erfasst, modelliert und analysiert werden sollten. **Folgerichtig wird hier vorgeschlagen, alle Vorfälle mithilfe der in der hier vorliegenden Arbeit entwickelten LVA (oder ähnlichen Ansätzen) zu erfassen** und direkte Auswirkungen auf den Menschen während bestimmungsgemäßer Betriebszustände mittels Sozial-Ökobilanzierung oder Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse zu adressieren.

### **Abgrenzung von weiteren Wirkungen auf Mensch und Umwelt**

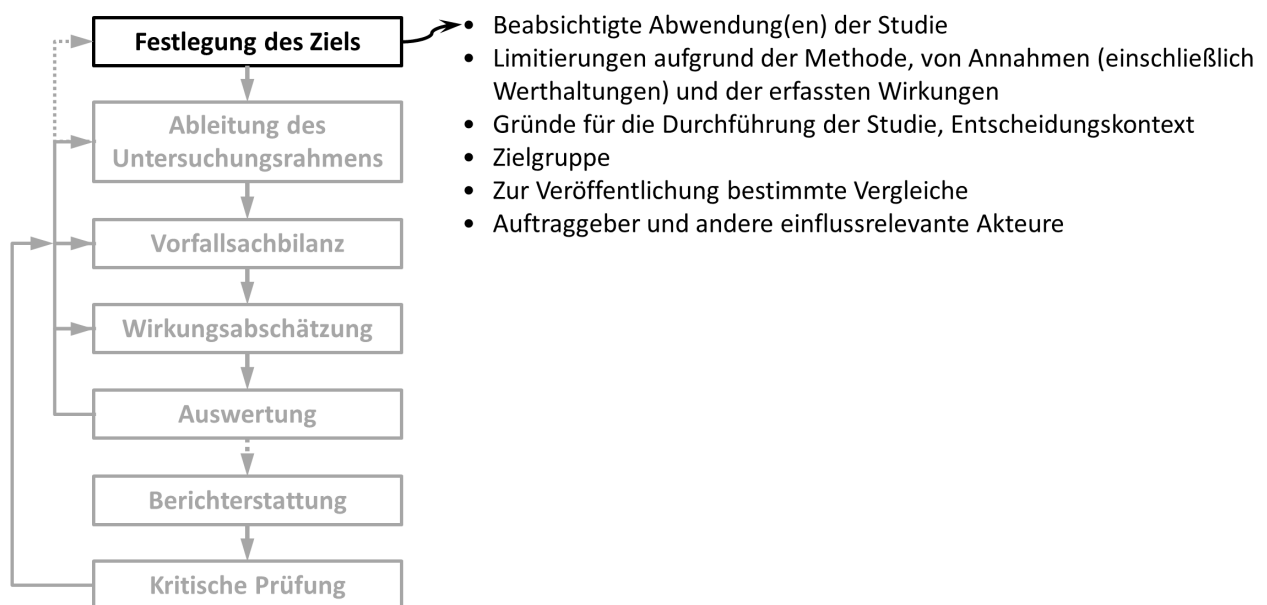
Die **direkten Wirkungen von bestimmungsgemäß genutzten Produkten auf den Menschen** (Nahrungsmittel, Genussmittel, Medikamente, Kosmetika, Körperpflegemittel usw.) sind nicht Teil der Ökobilanzierung [Wolf et al. 2012]. So sie denn im Rahmen bestimmungsgemäßer Betriebszustände stattfinden, sind sie auch nicht Teil der LVA, sondern derartige Wirkungen auf die menschliche Gesundheit **benötigen eine eigene neue Methodik.**

## Überleitung

Nach hiermit erfolgter Klärung wichtiger übergeordneter methodischer Fragestellungen und der erfolgten Abgrenzung angrenzender Lebenswegmethoden wird in den folgenden Unterkapiteln die LVA-Methode im Detail beschrieben.

### 5.3 Zieldefinition

Die **erste Phase der LVA** ist **ebenso wie in der Ökobilanzierung** die Zieldefinition. Diese Phase umfasst die folgenden Aspekte, die aus dem *ILCD Handbook – General Guide for Life Cycle Assessment* ([European Commission - JRC-IES 2010a]) übernommen wurden, siehe Abb. 14:



**Abb. 14.** Hauptschritte der Zieldefinition in der LVA, identisch zur Ökobilanzierung, entnommen aus [European Commission - JRC-IES 2010a]. Übersetzung durch den Verfasser<sup>47</sup>.

Diese ursprünglich für die Ökobilanzierung entwickelten Zieldefinitionsaspekte weisen bei Anwendung in der LVA **keine tiefer gehenden methodischen Besonderheiten** auf: Diese Aspekte sind analog<sup>48</sup> für vorfallbezogene Fragestellungen gültig und werden **daher hier nicht weiter ausgeführt**. Details finden sich in [European Commission - JRC-IES 2010a] und [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10].

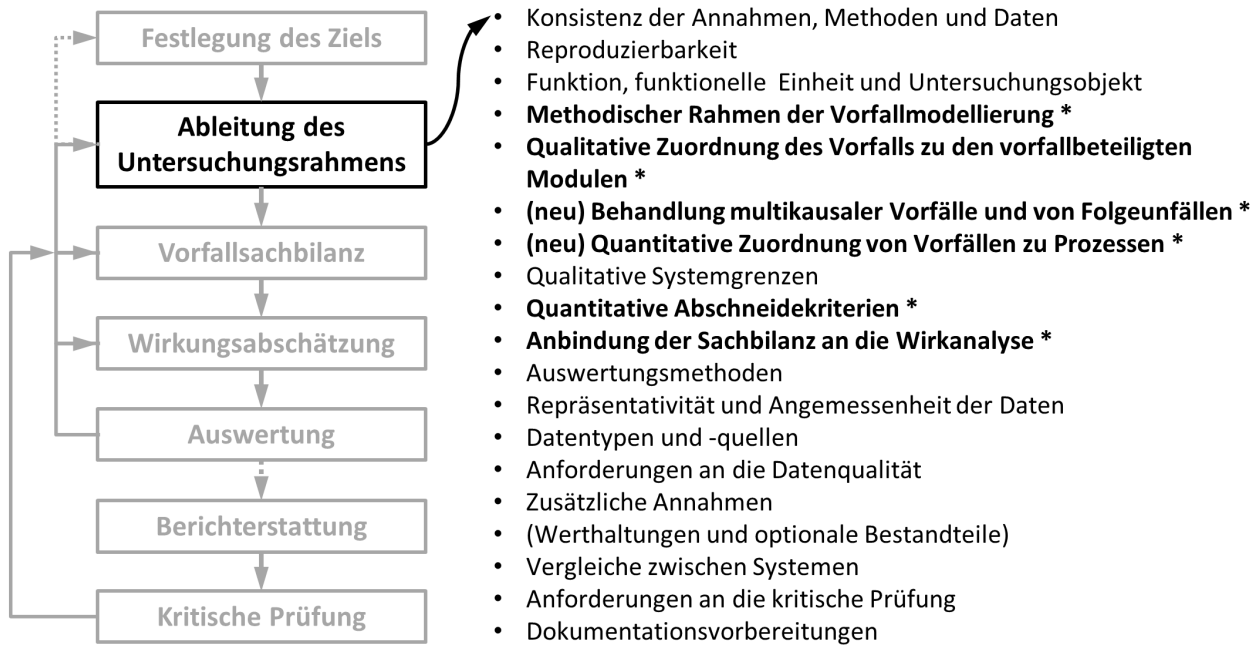
<sup>47</sup> Zu beachten ist, dass die in [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] im „Untersuchungsrahmen“ behandelten Elemente „Annahmen“ und „Werthaltungen“ aufgrund ihres grundlegenden Charakters in [European Commission - JRC-IES 2010a] bereits während der „Zieldefinition“ behandelt werden, d. h. hier bereits enthalten sind.

<sup>48</sup> Während sich z. B. die möglichen Anwendungen einer LVA-Studie von denen einer Ökobilanzstudie deutlich unterscheiden können, ist die grundsätzliche generische Frage nach den beabsichtigten Anwendungen analog und ohne wesentliche zusätzliche Erläuterungen auf LVA-Studien anwendbar. In diesem Sinne werden auch alle anderen analog anwendbaren Aspekte in den folgenden Kapiteln nicht weiter ausgeführt

## 5.4 Ableitung des Untersuchungsrahmens

### 5.4.1 Kapitelübersicht

In Anlehnung an [European Commission - JRC-IES 2010a] umfasst die Ableitung des Untersuchungsrahmens für Vorfälle folgende wesentliche Aspekte, siehe Abb. 15:



**Abb. 15. Hauptschritte der Ableitung des Untersuchungsrahmens in der LVA, Erläuterungen siehe folgender Text<sup>49,50</sup>.**

Für die in Abb. 15 nicht mit einem „\*“ gekennzeichneten Aspekte gibt es keine relevanten Unterschiede zur Ökobilanzierung. Das ist zunächst der Fall für alle Aspekte, die sich auf die Modellierung des untersuchten Produktlebensweges selbst beziehen, was grundsätzlich identisch für Ökobilanzierung und LVA ist. In weiteren Fällen sind die Aspekte in enger Analogie zur Ökobilanzierung anzuwenden, z. B. hinsichtlich generischer Anforderungen an die Datenqualität (Alter, Repräsentativität usw.) und die kritische Prüfung. Alle diese Aspekte werden im Weiteren nicht näher ausgeführt.

<sup>49</sup> Grundlegende „Werthaltungen und optionale Bestandteile“ sind bereits in der Zieldefinition behandelt. Weitere, die sich während der Ableitung des Untersuchungsrahmens ergeben, werden in dieser Phase adressiert.

<sup>50</sup> Die „Anforderungen an die kritische Prüfung“ werden im ILCD Handbuch in drei eigenständigen Dokumenten adressiert: „Prüfungsschemata“ (Englisch *Review schemes*, [European Commission - JRC-IES 2010b]), „Prüfer-Qualifikation“ (Englisch *Reviewer qualification*, [European Commission - JRC-IES 2010c]) sowie (bisher noch in Vorbereitung) „Prüfungsumfang, -methoden und -dokumentation“ (Englisch *Review scope, methods, and documentation*). [DIN EN ISO 14044:2006] beschreibt dagegen nur sehr kurz die kritische Prüfung durch einen qualifizierten Prüfer sowie – bei zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen – durch ein Panel unter Einbeziehung interessierter Kreise.

Teilweise werden dagegen **in der LVA spezielle methodische Lösungen benötigt**, die maßgeblich von denen der Ökobilanzierung abweichen (Kennzeichnung in Abb. 15 mit „\*“) oder gänzlich neu sind (Kennzeichnung mit „\*“ und „(neu)“). Die folgenden Unterkapitel behandeln ausschließlich diese Fälle, die in der LVA eine speziell angepasste Methodik erfordern.

## 5.4.2 Methodischer Rahmen der Vorfalldmodellierung

Da die geeignete Implementierung des methodischen Rahmens bei der Modellierung des Produktlebensweges in der Ökobilanzierung umstritten ist, soll er hier kurz angerissen werden, obgleich sich im Ergebnis für die hier neu entwickelten Elemente der LVA selbst keine methodischen Besonderheiten ergeben: Mit Blick auf die zwei grundverschiedenen Lebenswegmodellprinzipien der Ökobilanzierung (*attributinal* und *consequential*<sup>51</sup>) ist zu bewerten, ob auch Vorfälle entsprechend differenziert zu modellieren sind.

Die methodische Auswahl der Lebenswegmodellierungsmethode erfolgt zweckmäßig mit Blick auf die grundlegende **Zielsetzung und den Entscheidungskontext**, d. h. bezogen auf das untersuchte Produktsystem ([European Commission - JRC-IES 2010a]) und damit unabhängig vom Betriebszustand.

Das angewendete Lebenswegmodellierungsprinzip hat dabei allerdings Auswirkungen auf die Module und Produktsysteme innerhalb von Vorfalldmodellen. Bei der *consequential* Modellierung sind die Lebenswegmodelle der Güterwiederherstellung, des externen Rettungskräfteinsatzes usw. so abzubilden, dass sie die Konsequenzen der untersuchten Entscheidung widerspiegeln. Dies ist adäquat, da diese Lebenswege innerhalb des Vorfalldsystems dennoch über Marktmechanismen beeinflusst werden. **Unverändert sind dagegen die Daten der Vorfälle selbst, die *attributinal* auszuwählen sind, da sie nicht über Marktmechanismen beeinflusst werden.**

Die Lösung der Multifunktionalität von Prozessen im Produktlebensweg der Vorfalldfolgeaktivitäten erfolgt gleichartig zur Ökobilanz: Diese geschieht auf der Ebene der Kofunktionen des jeweiligen Moduls. Die Regeln in [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und die detaillierteren Provisionen in [European Commission - JRC-IES 2010a] zur Unterteilung von Modulen und zur Substitution/Systemraumerweiterung können dabei gleichartig angewandt werden. Die **Vorfalldauswirkungen werden hierbei identisch behandelt wie die Interventionen**

---

<sup>51</sup> Zu den Begriffen siehe Glossar und zu Details [European Commission - JRC-IES 2010a].

**mit der Umwelt der Ökobilanzierung.** Spezifische Anpassungen sind dagegen notwendig, falls Allokation zur Lösung der Multifunktionalität angewandt wird. Dies wird – analog zu [European Commission - JRC-IES 2010a] – im Kapitel der Vorfallsachbilanz (Kap. 5.5) adressiert.

### 5.4.3 Qualitative Zuordnung des Vorfalles zu den vorfallbeteiligten Prozessen und Modulen

#### Einleitung

Voraussetzung für die prozess- und produktbezogene Erfassung von Vorfällen und deren schädlichen Auswirkungen ist die Zuordnung der Vorfälle zu den vorfallbeteiligten Prozessen und damit zu den Modulen im untersuchten Produktlebensweg.

In diesem Kapitel werden zunächst die **Kriterien der qualitativen Zuordnung** beschrieben, anhand der Zuordnungskriterien „Eigenschaften“ und „Auslöser“, auch auf „Ursachen“ wird kurz eingegangen. Deren Nutzung bei der quantitativen Zuordnung insbesondere von multikausalen Vorfällen und in Abhängigkeit von der Zielsetzung einer LVA-Studie wird in den folgenden beiden Kapiteln adressiert.

Als vorbereitender Schritt der qualitativen Zuordnung sind zunächst die **Prozesse** im Sinne der Lebensweganalyse zu identifizieren, zu denen die primären Ausfälle (bei Verwendung von Fehlerbäumen) und Anfangsereignisse (bei Ereignisabläufen) gehören.

Oft ist diese Zuordnung trivial und offensichtlich: Versagen die Bremsen eines LKW, ist der Prozess der Transport des entsprechenden Gutes. Ähnlich können ausfallende Komponenten in Anlagen meist eindeutig zu Prozessen im Lebensweg zugeordnet werden.

Schwieriger ist die Zuordnung bei Komponenten, die **Querschnittsfunktionen** haben, beispielsweise Teile der Mess- und Regelungstechnik, die mehrere Prozesse überwacht. Dieser Fall entspricht der Situation unterschiedlicher Granularität von Vorfall und Modul, was in Kap. 5.5.2 adressiert wird.

Schwierig ist die Zuordnung, wenn im Fehlerbaum oder Ereignisablauf primäre Ausfälle oder Anfangsereignisse verwendet werden, die keine Komponenten sind, sondern Zustände, die Ergebnis nicht explizit abgebildeter Abläufe sind (z. B. Staubkonzentrationen in der Luft oberhalb der Explosionsgrenze). Beispiele hierzu werden im Fallbeispiel in Kap. 6.3 kurz diskutiert. Derart **unvollständige oder vereinfachte Fehlerbäume und Ereignisabläufe** müssen – sofern notwendig mit Blick auf das Erkenntnisinteresse und die Detailliertheit der

notwendigen Analyse – zunächst vervollständigt und auf die zugrunde liegenden primären Ausfälle und die diese darstellenden Prozesse und Komponenten zurückgeführt werden.

Neben technischen Prozessen können auch **natürliche Vorgänge** zu Vorfällen beitragen oder diese als primärer Ausfall auslösen, zum Beispiel Erdbeben. Die derartigen primären „Ausfälle“ oder Anfangsereignisse werden den entsprechenden natürlichen Prozessen zugeordnet, analog zur Zuordnung zu technischen Prozessen.

Neben technischen und natürlichen Prozessen und Vorgängen können auch **menschliche oder institutionelle Aktivitäten und Zustände** vorfallbeteiligt sein, insbesondere im Kontext von Sabotage und anderen absichtlich herbeigeführten Vorfällen. Während der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf produktbezogene Fragestellungen liegt, sind derartige Vorfallbeteiligungen dennoch in die qualitative Zuordnung einzubeziehen, da sie andernfalls – ähnlich wie natürliche Vorgänge – keine Vorfallauswirkungen zugewiesen bekämen und im Gegenzug die vorfallbeteiligten Prozesse unrichtigerweise höhere Beiträge erhielten.

### **Übersicht - die Zuordnungskriterien „Eigenschaften“ und „Auslöser“**

Das in Kap. 3.2.4 kurz beschriebene Schema von Eigenschaft(en) und Auslöser(n) ist die Basis für die **reproduzierbare, qualitative und quantitative Zuordnung** von Vorfällen und deren Auswirkungen zu den vorfallbeteiligten Prozessen<sup>52</sup>.

Die im Folgenden definierten **Eigenschaften und Auslöser** werden in der LVA unabhängig voneinander als notwendig und hinreichend für die qualitative und auch die anschließende quantitative Zuordnung genutzt.

**Eigenschaften (passiv): "Die bestimmungsgemäßen chemischen, physikalischen oder biologischen Charakteristika eines in den Vorfall direkt einbezogenen Produktes oder Prozesses, die die genaue Art oder Auswirkungen des Vorfalles direkt oder indirekt mit bedingen."**

Eigenschaften können sich auf zwei Situationen beziehen:

- In absichtlich herbeigeführten Vorfällen verwendete Produkte und Prozesse.

---

<sup>52</sup> Und ferner natürliche Vorgänge und menschliche sowie institutionelle Aktivitäten, die demnach ebenfalls später Teile der Vorfallauswirkungen quantitativ zugeordnet bekommen.

- In allen Vorfalldtypen mögliche, ausschließlich passiv vorfallbeteiligte Produkte oder Prozesse, die zumindest im ersten Schritt durch ausschließlich externe Vorgänge geschädigt werden<sup>53</sup>.

Während Folgeunfällen im Kontext des untersuchten Vorfalls können aber auch zunächst passiv vorfallbeteiligte Produkte und Prozesse dann aktiv<sup>54</sup> an deren Entstehung beteiligt sein.

**Auslöser (aktiv): "Ein nicht bestimmungsgemäßes Verhalten oder Zustand/Eigenschaft eines technischen Prozesses oder Produktes oder von deren Bestandteilen oder ein natürlicher, menschlicher oder institutioneller Vorgang oder Verhalten, der oder das zeitlich und kausal direkt oder über eine Ereigniskette zu einem Vorfall beiträgt."** Basierend auf diversen Autoren, angepasst.

Ein Zündfunke, der eine Gaswolkenexplosion auslöst, oder der Bruch eines korrodierten Rohrbogens sind Beispiele für Auslöser, ebenso wie das Versagen eines Messfühlers oder das Unterlassen von Kontrollmaßnahmen.

Im Falle absichtlich herbeigeführter Vorfälle sind die hierbei verwendeten Produkte – obschon den Vorfall mitauslösend – ebenso wie die geschädigten Prozesse oder Produkte als eigenschaftsbedingt (d. h. passiv) vorfallbeteiligt zu erfassen. Aktiv sind in derartigen Fällen ausschließlich die Personen oder Institutionen, die als aktive Auslöser die Vorfallauswirkungen anteilig zugeordnet bekommen.

## **Ursachen**

Auslöser gehen auf Ursachen zurück (siehe auch Fußnote 55). Ursachen werden in der LVA-Methode im Standardfall nicht abgebildet. Die hier vorgestellte LVA-Methode kann allerdings um derartige Modelle von Fehler-Ursachen-Analysen erweitert werden, um die den Auslösern zugeordneten Vorfallauswirkungen auf die zugrunde liegenden Ursachen zurückzuführen und diesen qualitativ und quantitativ zuzuweisen.

**Ursache: "Ein technischer, natürlicher, menschlicher oder institutioneller Vorgang oder Zustand, der den oder die Auslöser des Vorfalls (mit-)bedingt."** Basierend auf diversen Autoren, angepasst.

---

<sup>53</sup> Ein Beispiel für einen passiv vorfallbeteiligten Prozess ist eine Rohölraffinerie, auf die ein Flugzeug abstürzt. Die Emissionen aus den Feuern der Raffinerieprodukte sind eigenschaftsbedingte Vorfallauswirkungen des Raffinerieprozesses.

<sup>54</sup> Ein Sonderfall sind kommandierte Ausfälle, die aus Sicht des betroffenen Komponente, deren Ausfall kommandiert erfolgt, als passiv einzuordnen sind.



Die „Ursache“<sup>55</sup> kann – indirekt, mittels eines Auslösers – sowohl zu einem Vorfall bei dem verursachenden Prozess als auch bei anderen Prozessen führen.

Ist die Zuordnung von Ausfällen zu entweder Auslöser oder Ursache nicht eindeutig, ist diese anhand des Erkenntnisinteresses vorzunehmen.

#### 5.4.4 Behandlung multikausaler Vorfälle und komplexer Vorfälle

##### Einleitung

In vielen Fällen sind mehrere Auslöser an einem Vorfall beteiligt und die bestimmungsgemäßen Eigenschaften der aktiv oder passiv beteiligten Prozesse oder Produkte modifizieren ihn. Sie führen erst alle zusammen zu dem spezifischen Vorfall oder einer Kette von Vorfall und Folgeunfällen. Diese Situationen werden im Folgenden Multikausalität genannt.

##### Multikausalität

Ein **Beispiel** für einen multikausalen Vorfall ist das Bersten eines unter Überdruck stehenden Rohres durch Innenkorrosion, wodurch eine explosionsfähige Gaswolke einer in der Anlage produzierten Chemikalie entweicht. Diese Gaswolke explodiert durch Funkenbildung einer zur selben Produktion gehörenden elektrischen Anlage. Die Explosion verletzt einen Arbeiter schwer, zerstört die Anlage, setzt direkte Emissionen in die Luft frei usw. Da in der hier vorgestellten Methode der LVA die Vorfallauswirkungen auf einzelne (Prozess-)Module zu beziehen sind, sind ausschließlich die dem jeweils untersuchten Modul zuzuordnenden Schäden und Eintrittshäufigkeiten zu ermitteln. Im geschilderten Beispiel sind alle vorfallbeteiligten Prozesse und Module Teil desselben Produktsystems. Alle Vorfallauswirkungen werden daher diesem chemischen Produktionsprozess und seinen Produkten zugeordnet. Eine Differenzierung der beteiligten Auslöser und Eigenschaften wird daher dann nicht benötigt,

---

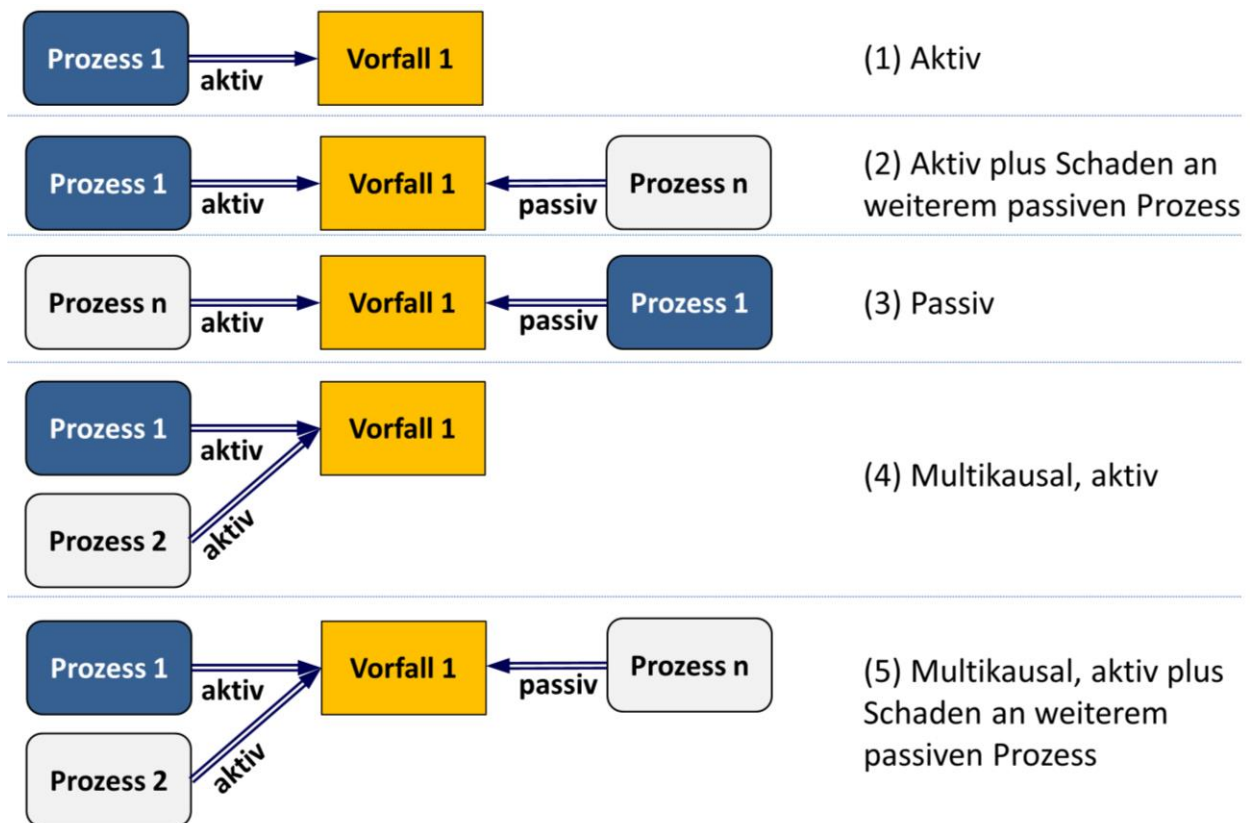
<sup>55</sup> In anderen Arbeiten werden die hier unterschiedenen "Auslöser" und "Ursachen" beide als „Ursachen“ bezeichnet, aber teilweise wie z. B. bei [LAI 2002] in "Ursachen" und "tiefer liegende Ursachen" und in der Fassung von 2009 als „hintergründige Ursachen“ unterschieden. So können Fehler in der Anlagenplanung als Unfallursache wiederum ihre Ursache in mangelnder Ausbildung des Anlagenplaners haben. Oder ein, einen Unfall auslösender, Bedienfehler geht auf Alkoholkonsum oder Ablenkung durch ein Mobiltelefonat zurück. Derartige tiefer liegende Ursachen werden mittels der Fehler-Ursachen-Analyse, FUA (Englisch *root-cause analysis*, RCA), Methode analysiert. Eine Aufteilung in die beiden, den Vorfall bedingenden, Einflussstypen „Auslöser“ und „Ursache“ wird hier aufgrund ihrer unterschiedlichen Qualität genutzt, da Auslöser einen direkten Produkt- und/oder Prozessbezug aufweisen und (tiefer liegende) Ursachen zunehmend unklarer zu bestimmen sind. Studienzielsetzungen können allerdings auch die Relevanz bestimmter tiefer liegender Ursachen sein, z. B. Fragestellungen der alkoholmissbrauchsbedingten Vorfällefolgen. Derartige Untersuchungen bedingen die Modellierung der Ursachen in Erweiterung der Fehlerbäume oder Ereignisabläufe. Anstelle der Auslöser treten dann in der LVA-Methode die Ursachen, dies wird hier nicht vertieft sondern in den Ausblick verwiesen.

wenn es das Ziel ist, die Vorfallauswirkungen der Herstellung der genannten Chemikalie zu erfassen<sup>56</sup>.

Anders gelagert sind Vorfälle, an denen Prozesse verschiedener Produktsysteme beteiligt sind. Als **Variante obigen Beispiels** sei angenommen, dass die Zündung durch einen externen Prozess ausgelöst wird, z. B. eine Fackel, und zudem eine dritte Produktionsanlage zerstört wird. Welche Vorfälllasten sind in diesem Fall welchen der drei beteiligten Produktionsprozessen zuzuordnen? Diese wichtige Frage wird im Folgenden adressiert, als Startpunkt für die Ausarbeitung der im darauf folgenden Kapitel dargestellten quantitativen Zuordnungsregeln.

### Zuordnungsrelevante Varianten von Kausalität

Mit Blick auf die quantitative Zuordnung der Vorfälllasten auf Prozesse/Produkte werden hier folgende fünf **Fälle von Kausalität** unterschieden (siehe Abb. 16):



**Abb. 16.** Formen von Mono- und Multikausalität. „Prozess 1“ (dunkeloliv) ist jeweils der durch das untersuchte Modul repräsentierte Prozess, der Teil des untersuchten Produktsystems ist, Erläuterungen siehe folgender Text.

<sup>56</sup> Eine Differenzierung wird dagegen auch hier benötigt, wenn das Objekt der Untersuchung nur einer der vorfallbeteiligten Prozesse oder eine auslösende Komponente/Technologie ist.

- **(1):** Monokausalität oder modulinterne Multikausalität, bei der der durch das untersuchte Modul repräsentierte Prozess auslösend (d. h. aktiv) vorfallbeteiligt ist und keine direkten Schäden an weiteren Prozessen oder Produkten entstehen. Erster Fall in Abb. 16.
- **(2):** Monokausalität oder modulinterne Multikausalität, bei der der durch das untersuchte Modul repräsentierte Prozess auslösend (aktiv) vorfallbeteiligt ist und es zu direkten Schäden an mindestens einem weiteren, ausschließlich passiv vorfallbeteiligten Prozess  $n$  (hellgrau) kommt. Zweiter Fall in Abb. 16<sup>57</sup>.
- **(3):** Monokausalität oder Multikausalität, bei der der durch das untersuchte Modul repräsentierte Prozess ausschließlich passiv vorfallbeteiligt ist. Dritter Fall in Abb. 16.
- **(4):** Multikausalität, bei der der durch das untersuchte Modul repräsentierte Prozess auslösend (aktiv) vorfallbeteiligt ist, mit mindestens einem zweiten, auslösend beteiligten Prozess 2, der nicht Teil des untersuchten Moduls ist. Direkte Schäden an weiteren, nicht auslösend beteiligten Prozessen treten nicht auf. Vierter Fall in Abb. 16.
- **(5):** Multikausalität, bei der der durch das untersuchte Modul repräsentierte Prozess auslösend (aktiv) vorfallbeteiligt ist, mit mindestens einem zweiten, auslösend beteiligten Prozess 2, der nicht Teil des untersuchten Moduls ist. Direkte Schäden an mindestens einem dritten und ausschließlich passiv vorfallbeteiligten Prozess  $n$  treten auf. Fünfter Fall in Abb. 16.

#### 5.4.5 Quantitative Zuordnung des Vorfalles zu den vorfallbeteiligten Prozessen

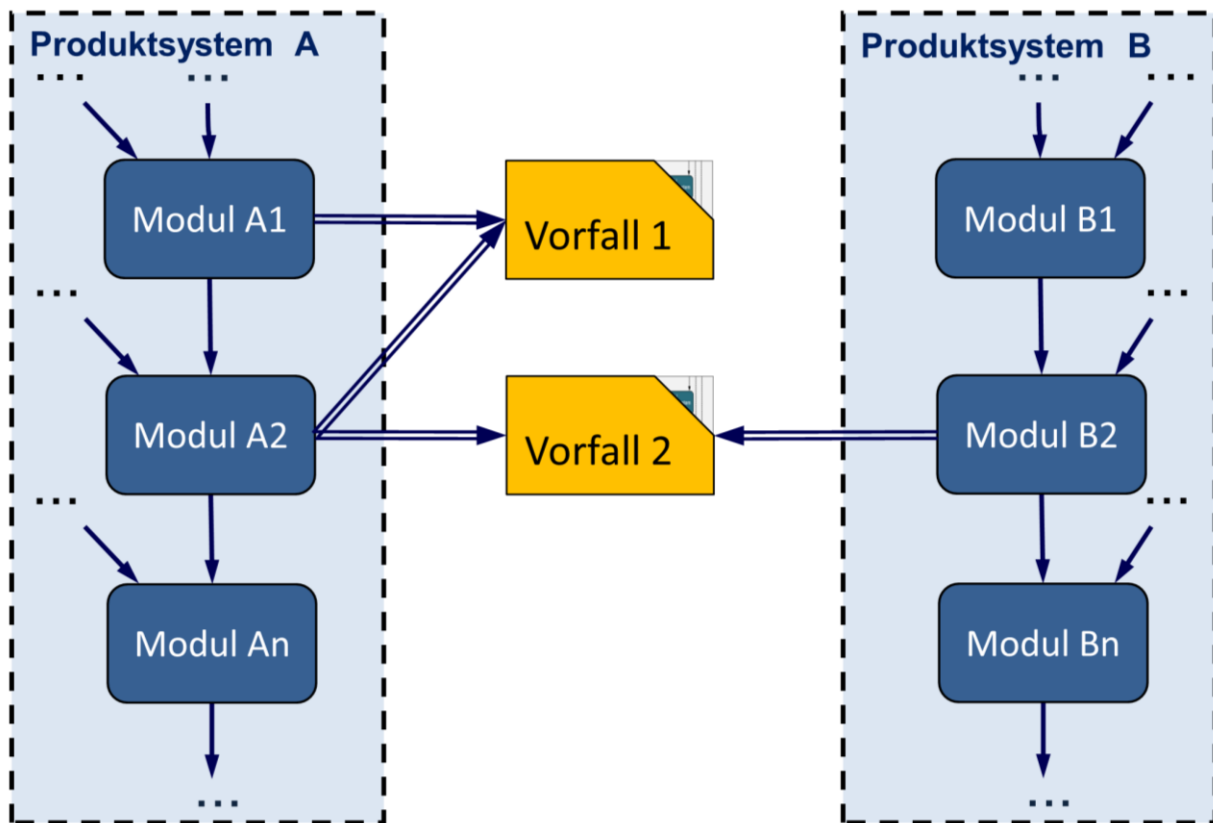
##### **Ableitung des Zuordnungsprinzips aus der Zielsetzung der Studie**

Ein multikausaler Vorfall lässt sich vermeiden, wenn auch nur einer der über eine UND-Verknüpfung beitragenden und unabdingbaren Auslöser vermieden wird. Dementsprechend ist es bei Studien, in denen es um die **Quantifizierung des Verbesserungspotenzials** von vorfallvermeidenden Maßnahmen geht, sinnvoll, jedem der entsprechend vorfallbeteiligten Prozesse die vollen Vorfallauswirkungen zu zuweisen. Bei z. B. drei solchen unabdingbaren Auslösern werden die Vorfallauswirkungen demnach dreifach voll zugeordnet.

---

<sup>57</sup> Die ausschließlich passiv vorfallbeteiligten Prozesse in (2), (3) und (5) können auch indirekt über einen Folgeunfall geschädigt werden.

Abb. 17 zeigt **schematisch** die Multikausalität innerhalb eines Produktsystems und zwischen Produktsystemen.



**Abb. 17.** Potenzielle Mehrfachzählung innerhalb des Produktsystems A (Module A1 und A2 sind vorfallbeteiligt am selben Vorfall 1) und zwischen Produktsystemen A und B (Module A2 und B2 sind vorfallbeteiligt am selben Vorfall 2), schematisch.

Hat die Studie dagegen das Ziel, die Vorfallauswirkungen über den Lebensweg eines Produktes zu aggregieren, zum Beispiel zum Zwecke der Unterstützung von Produktvergleichen oder der beschreibenden Bereitstellung der Vorfallauswirkungen über den Produktlebensweg, ist eine solche Mehrfachzählung zu vermeiden, da dies die Vergleiche der aggregierten Ergebnisse verzerrt. In derartigen Fällen sind die Auswirkungen jedes Vorfalles auf die vorfallbeteiligten Prozesse **beteiligungsbasiert** aufzuteilen und in ihrer Gesamtheit nur einmal zu erfassen.

Die jeweils wichtigsten Beiträge zum Vorfall tragen allerdings auch hier die größten Anteile der Lasten. Das heißt, dass auch dieser Ansatz zur Identifikation der wichtigsten Beiträge im Lebensweg genutzt werden kann. Allerdings spielt in diesem Fall auch die spezifische Funktion und die Stellung der ausfallenden Komponente in der betroffenen Anlage eine Rolle: Komponenten mit geringer Ausfallhäufigkeit können dennoch die wichtigsten Auslöser sein, wenn sie an entscheidenden Stellen im technischen System verwendet werden, oder ihre

Funktionen nicht über Redundanz abgesichert sind<sup>58</sup>. Die beteiligungsbasierte Aufteilung erfasst also die gemeinsame Beteiligung der Komponenten im speziellen Systemkontext.

Diesen Überlegungen folgend, lassen sich bei der Zuordnung von Vorfallsachinventaren zu den einzelnen vorfallbeteiligten Prozessen zwei grundverschiedene Ansätze unterscheiden: der **Verbesserungspotenzial-Ansatz** und der **Beteiligungsansatz**.

**Die vorliegende Arbeit fokussiert im Wesentlichen auf den Beteiligungsansatz**, da er für Produktvergleiche benötigt wird, zudem auch zur Identifizierung des größten Beiträgers in einer Verbesserungsanalyse genutzt werden kann und mithin die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit abdeckt. Lediglich die Quantifizierung der absoluten Größe der vermeidbaren Vorfallschäden benötigt den Verbesserungspotenzial-Ansatz, für die Zielsetzung der Arbeit ist dies untergeordnet.

Die genannte **Mehrfachzählung** ist beim Beteiligungsansatz in jedem Fall innerhalb desselben Produktsystems zu vermeiden, bei Produktvergleichen auch zwischen den zu vergleichenden Produktsystemen.

Weitere Überlegungen zum **Verbesserungspotenzial-Ansatz** sind im Anhang B dokumentiert.

### **Beteiligungsansatz in drei Varianten**

Beim **Beteiligungsansatz werden 100 % des Gesamtinventars auf die vorfallbeteiligten Prozesse anhand von Regeln aufgeteilt**. Dies baut grundsätzlich auf dem bereits 1965 von [Calabresi 1965] beschriebenen Ansatz auf (siehe Fußnote 32): Die Logik dieses Ansatzes ist es, dass jeder Beiträger eines Vorfalls seiner Beteiligung entsprechend einen Anteil der Vorfallauswirkungen zugewiesen bekommt. Jede Vorfallauswirkung darf dabei quantitativ nur einmal zugeordnet werden. Die Summe der Vorfallsachinventare aller vorfallbeteiligten Prozesse ist dann – skaliert entsprechend deren globaler Produktionsmenge – weltweit identisch mit den Gesamtwirkungen aller Vorfälle.

---

<sup>58</sup> Für ein quantitatives Beispiel siehe Tab. 2 und die diesbezügliche Fußnote **Error! Bookmark not defined..** Wenn es daher um die Analyse und Verringerung der Ausfallhäufigkeit (oder Sabotageanfälligkeit usw.) von Komponenten geht, benötigt man einen anderen Ansatz: die Analyse der Ausfallhäufigkeit der einzelnen Komponente, die in der klassischen Risikoanalyse im Fokus steht. In der vorliegenden Arbeit wird dagegen zweckgemäß die Systemsicht gewählt, da es um die Eintrittshäufigkeiten und Schäden auf Ebene der betroffenen Prozesse/Produkte geht, und nicht auf Ebene der einzelnen auslösenden Komponenten, weswegen diese letztgenannte, klassische Kenngröße nicht hinreichend ist. Damit verwendet die LVA ausschließlich die beiden zuvor beschriebenen Ansätze des Verbesserungspotenzials und der beteiligungsbasierten Zuordnung.

**Drei Varianten des Beteiligungsansatzes** sollen hier unterschieden werden: eine **eingeschränkte Variante**, eine **Basisvariante** und eine **vollständige Variante**. Diese Varianten spiegeln unterschiedliche Werthaltungen und unterschiedliche Grade der Übernahme von Verantwortung für eine passive Vorfallobeteiligung wieder. Die Wahl einer dieser Varianten soll anhand der Zielsetzung der Studie erfolgen und ist zu begründen, **im Standardfall soll der vollständige Beteiligungsansatz verwendet werden.**

Der **Beteiligungsansatz** weist **in seiner eingeschränkten Variante** die Vorfallsachinventare ausschließlich den Auslösern zu, d. h. nicht den lediglich passiv, bestimmungsgemäß eigenschaftsbedingt beteiligten Prozessen/Produkten, selbst wenn diese zu Folgeunfällen beitragen. Die Logik hierfür ist die Annahme, dass einer bestimmungsgemäßen Sensitivität eines Produktes (z. B. Brennbarkeit) keine (Mit-)schuld an den Vorfallauswirkungen zugeordnet werden darf, im Sinne „es ist nicht die Schuld des Spiegels, dass er zerbricht und eine Person verletzt, wenn er herunterfällt“, sondern alleinig z. B. die mangelhafte Aufhängung hat den Unfall ausgelöst und verschuldet. Ähnlich werden den bei terroristischen Anschlägen verwendeten Produkten (z. B. bergmännischer Sprengstoff), aufgrund deren definitionsgemäß passiver Vorfallobeteiligung, bei diesem Ansatz keine Vorfallauswirkungen zugeordnet.

Beim **Basisbeteiligungsansatz** werden neben den aktiven Auslösern den passiv vorfallbeteiligten Prozessen/Produkten anteilig genau die Teile des Vorfallobinventars mit zugeordnet, die über die Schädigung dieses passiv beteiligten Prozesses/Produktes selbst und dessen Wiederherstellung hinausgehen. Wird beispielsweise ein Kernkraftwerk aufgrund eines Flugzeugabsturzes beschädigt, wird die Wiederherstellung des Kraftwerkes ausschließlich dem aktiv auslösenden Prozess „Flugzeug“ (genauer: den Passagier- und Gütertransportprozessen) zugeordnet. Jegliche Freisetzung von Radioaktivität, die Evakuierung der Bevölkerung, Folgeunfälle an dritten Anlagen usw. werden dagegen auch dem passiv beteiligten Kernkraftprozess anteilig zugeordnet. Ist dieser Vorfall ein terroristischer Anschlag, ist darüber hinaus auch das Flugzeug passiv vorfallbeteiligt und alleinig die ausführende Terrororganisation ist aktiv vorfallbeteiligter Auslöser.

Beim **vollständigen Beteiligungsansatz** werden jedem passiv vorfallbeteiligten Prozess in Erweiterung der Basisvariante auch die Lasten aus der Wiederherstellung dieses Prozesses/Produktes selbst anteilig zugeordnet, im obigen Beispiel die Wiederherstellung des Kernkraftwerkes. Zwischen den vorfallbeteiligten Prozessen werden die Vorfallsachinventare wie folgt zugeordnet, wobei die drei Situationen der Nutzung detaillierter prognostizierender QRA,

aggregierter Vorfallstatistiken und Berichte historischer Vorfälle aufgrund unterschiedlicher Detaillierung der verfügbaren Informationen in der Praxis eine leicht abweichende Umsetzung benötigen:

### **Zuordnungsregeln beim eingeschränkten Beteiligungsansatz bei Nutzung detaillierter QRA**

Bei **Nutzung detaillierter QRA und dem eingeschränkten Beteiligungsansatz** werden die Vorfallsachinventare ausschließlich auf die aktiv vorfallbeteiligten, d. h. auslösenden Prozesse aufgeteilt, proportional zu deren relativen Beitrag zur Eintrittswahrscheinlichkeit<sup>59</sup> des Vorfalles. Die ausschließlich passiv vorfallbeteiligten Prozesse tragen keine Auswirkungen.

Bei Nutzung von **Fehlerbäumen**, die in diesen Fällen als vorliegend angenommen werden, wird dieser relative Beitrag zur Eintrittswahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses (d. h. des Vorfalles) wie im Folgenden beschrieben ermittelt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Fehlerbäume als primäre Ausfälle keine Ursachen beinhalten, sondern ausschließlich Auslöser sowie – falls vorkommend – Eigenschaften von zunächst passiv vorfallbeteiligten Prozessen und Produkten<sup>60</sup>.

Dieser im Folgenden im Detail beschriebene und formalisierte quantitative Zuordnungs-/Aufteilungsansatz war in der relevanten Literatur auch bei ausgiebiger Recherche nicht zu finden:

**Die Eintrittswahrscheinlichkeit jedes aktiven primären Ausfalls<sup>61</sup> wird als je ein Szenario des Fehlerbaums und unabhängig von allen anderen primären Ausfällen jeweils auf „0“ gesetzt.** Beim eingeschränkten Beteiligungsansatz werden dabei alle zunächst **passiv vorfallbeteiligten Prozesse** in der Berechnung **übersprungen**. D. h. sie sind nicht Teil der in die Zuordnungsberechnung einbezogenen primären Ausfälle, verbleiben aber im Fehlerbaum und damit in der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses.

---

<sup>59</sup> Bei Vorliegen der Eintrittshäufigkeiten werden diese mittels der in Kap. 3.2.4 angegebenen Formeln in die Eintrittswahrscheinlichkeiten umgerechnet.

<sup>60</sup> Sollen die Vorfallauswirkungen den den Auslösern zugrunde liegenden Ursachen zugeordnet werden, ist der Fehlerbaum systematisch so zu erweitern, dass alle Auslöser auf die Ursachen zurückgeführt werden. In diesem Fall erhält man eine lebenswegbezogene Fehler-Ursachen-Analyse als Variante der LVA-Methode. Diese Variante wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter ausgeführt. Siehe auch Fußnote 55.

<sup>61</sup> Diese Ausfälle können auch ein Zustand oder Beiträger sein, z.B. eine im bestimmungsgemäßen Betrieb befindliche Fackel, die eine Gaswolke zündet.

Für jedes dieser Szenarien wird die relative Änderung der Eintrittswahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses und damit zugleich der Schadensanteil („**Zuordnungsfaktor**“) des jeweiligen primären Ausfalls – und damit des Prozesses/Modus zudem dieser Ausfall gehört – ermittelt als<sup>62</sup>:

$$\text{Formel (i)} \quad A_i = \frac{W - W_i}{W} / \sum_{i=1}^n \frac{W - W_i}{W} = \frac{W - W_i}{\sum_{i=1}^n (W - W_i)}$$

Mit

$i$  : Laufindex der primären Ausfälle im Fehlerbaum

$A_i$  : Zuordnungsfaktor  $\in [0, 1]$ . Schadensanteil des Vorfalls, der einem aktiv vorfallbeteiligten primären Ausfall  $i$  und damit dessen Prozess oder Produkt und damit wiederum dessen Modul im Produktlebensweg zugeordnet wird. (Der Zuordnungsfaktor wird bei der weiteren Verrechnung als skalarer Faktor auf alle Flüsse oder als Vektor  $\vec{A}_{Z_i}$  differenziert auf einzelne Flüsse des zentralen Einheitsvorfalls (als  $\vec{A}_{F_i}$  für Flüsse in Folgeunfällen) angewandt).

$W$  : Eintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls laut Fehlerbaum/Ereignisablauf (unter Einbeziehung aller primären Ausfälle).

$W_i$  : Eintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls laut Fehlerbaum/Ereignisablauf (unter Einbeziehung aller primären Ausfälle) bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von „0“ des aktiven primären Ausfalls  $i$ .

Ist die Grundlage nicht ein Fehlerbaum, sondern eine **Ereignisablaufanalyse**, wird zweckmäßig jeder schädliche Endzustand als ein Vorfallszenario betrachtet und der Zuordnungsfaktor unter Nutzung derselben Formel (i) ermittelt.

Sind **mehrere unabhängige, primäre Ausfälle Teil desselben Moduls**, werden die Zuordnungsfaktoren dieser primären Ausfälle zum Zuordnungsfaktor des Moduls additiv aggregiert.

---

<sup>62</sup> Eine informationstechnische Anbindung der Fehlerbaum- und Ereignisablaufmodelle an die LVA wird in der Praxis wichtig sein, um die Effizienz und Praktikabilität dieser Berechnungen maßgeblich zu erhöhen.



Tab. 2 illustriert die Errechnung der quantitativen Zuordnungsfaktoren anhand des Fehlerbaumbeispiels aus Abb. 9.

Tab.2 Zuordnungsfaktoren für die vorfallbeteiligten Primärausfälle (und damit deren Prozesse/Module) anhand Formel (i) für das Fehlerbaumbeispiel aus Abb. 9; die roten Symbole & und  $\geq 1$  identifizieren die Art der Verknüpfung (UND oder ODER) der primären und sekundären Ausfälle. Die hellblauen Pfeile zeigen die Leserichtung der Verrechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten. Erläuterungen siehe vorausgehender Text.

Primäre Ausfälle	Eintrittswahrscheinlichkeit primärer Ausfall	Sekundäre Ausfälle	Eintrittswahrscheinlichkeit sekundärer Ausfall	Unerwünschtes Ereignis, Vorfall	$W$ Vorfall	$W_i$ (siehe Text)	$\frac{(W - W_i)}{W}$ (siehe folgenden Text)	$A_i$ Zuordnungsfaktor laut Beteiligungsansatz
				BERSTEN DES REAKTORS AUFGRUND ÜBERDRUCK &	0,0702			
		AUSFALL ALARM-ANZEIGE $\geq 1$	0,165					
Ausfall Überdruckschalter 1	0,13					0,017	0,76	<b>0,41</b>
Ausfall Überdruckanzeige	0,04					0,055	0,21	<b>0,11</b>
		AUSFALL NOTABSCHALTUNG $\geq 1$	0,426					
Ausfall Überdruckschalter 2	0,13					0,056	0,20	<b>0,11</b>
Ausfall Magnetventil	0,34					0,021	0,69	<b>0,37</b>
						<b>Summe</b>	<b>1,86</b>	<b>1,00</b>

Als Ergebnis werden beispielsweise dem „Ausfall des Überdruckschalters 1“ 0,41 Anteile (d. h. 41 %) der Vorfallauswirkungen zugewiesen. Die derart ermittelten Anteile der primären Ausfälle am Zustandekommen des Vorfalls sind nicht trivial und bisweilen wird zuverlässigeren Komponenten korrekterweise ein höherer Schadensanteil zugewiesen als weniger zuverlässigen

Komponenten. Dies liegt in der Stellung im Fehlerbaum, ihrer UND- oder ODER-Verknüpfung und zudem an den spezifischen Ausfallraten anderer Komponenten<sup>63</sup>.

Tab. 2 beinhaltet als Zwischenergebnis in der zweitletzten Spalte den Zuordnungsfaktor des jeweiligen primären Ausfalls und damit des zugehörigen Prozesses/Produktes bei Anwendung des **Verbesserungspotenzial-Ansatzes**. Die Summe dieser Spalte ist dabei das Ausmaß an Mehrfachzählung, das bei Anwendung des Verbesserungspotenzial-Ansatzes auftreten würde.

Der Berechnungsschritt zur letzten Spalte skaliert die Beiträge der primären Ausfälle, um insgesamt genau 100 % der Vorfalldaten beteiligungsgerecht und ohne Mehrfachzählung zuzuordnen.

Die **spezifischen bestimmungsgemäßen Eigenschaften** der auslösenden Prozesse/Produkte spielen beim eingeschränkten Beteiligungsansatz bei der Zuordnung der individuellen Vorfalldaten keine Rolle, da die Zuordnung ausschließlich über die Funktion als Auslöser erfolgt<sup>64</sup>.

Bei **Folgeunfällen** werden die obigen Berechnungen für jeden der Folgeunfälle wiederholt. Dabei werden die dem jeweiligen Folgeunfall entsprechenden Zwischenzustände oder Endzustände (bei Ereignisablaufanalysen) oder sekundären Ausfälle oder unerwünschten Ereignisse<sup>65</sup> (bei Fehlerbaumanalysen) in Formel (i) als unerwünschtes Ereignis gesetzt. Den vorfallbeteiligten Prozessen werden dann vollkommen analog zum Standardfall (d. h. ohne Folgeunfälle) anteilig zusätzlich die jeweiligen Schäden des Folgeunfalls oder der Folgeunfälle zugeordnet. Diese Anteile werden als prozess-/modulspezifische Zuordnungsfaktoren in den Ereignissen der Vorfalldateninventare der Folgeunfälle abgelegt (siehe Kap. 5.5.2).

---

<sup>63</sup> Bemerkenswert ist in diesem Beispiel, dass das Magnetventil, das mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 deutlich häufiger ausfällt als der Überdruckschalter 1 mit 0,13, dennoch einen geringeren Anteil am Vorfalldaten trägt. Grund ist, dass bei voller Funktion des Überdruckschalters 1 der mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,04 recht seltene Ausfall der Überdruckanzeige auftreten muss, damit der Vorfall zustande kommt, dann mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 0,017. Fällt dagegen das Magnetventil aus, ist die Wahrscheinlichkeit des Vorfalles mit 0,021 dennoch größer als die genannten 0,017, da der zum Magnetventil in ODER-Beziehung stehende Überdruckschalter 2 nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,13 ausfällt.

<sup>64</sup> Eine methodische Variante ist denkbar, in der die eigenschaftsbedingt spezifischen Auswirkungen in höheren Anteilen den individuellen vorfallbeteiligten Prozessen/Produkten zugeordnet werden, entsprechend deren Eigenschaftsausprägung.

<sup>65</sup> Dies hängt davon ab, welcher Einheitsvorfall als zentraler Einheitsvorfall des Vorfalldatensystems an das vorfallbeteiligte Modul angebunden wird, dies wird im Kap. 5.5.3 weiter erläutert. Fehlerbaum und Ereignisablaufmodell können auch kombiniert werden. So kann ein unerwünschtes Ereignis eines Fehlerbaums als Anfangsereignis in einem Ereignisablauf stehen und verschiedene Folgeunfälle modelliert werden. Oder aber es gibt im Fehlerbaum bereits sekundäre Ausfälle die zu Schäden führen, d. h. das unerwünschte Ereignis ist *de facto* ein Folgeunfall.

## **Zuordnungsregeln beim Basisbeteiligungsansatz und beim vollständigen Beteiligungsansatz bei Nutzung detaillierter QRA**

Beim **Basisbeteiligungsansatz** werden die über die Schädigung und Wiederherstellung des passiv vorfallbeteiligten Prozesses/Produktes hinausgehenden Auswirkungen in gleichartiger Vorgehensweise auch diesem Prozess/Produkt mit zugeordnet (Argumentation siehe weiter oben in diesem Kapitel). Zur Berechnung der relativen Beiträge werden dementsprechend hier auch die passiv vorfallbeteiligten Prozesse/Produkte in die Berechnung nach Formel (i) mit einbezogen. Allerdings werden die erhaltenen Zuordnungsfaktoren ausschließlich auf die genannten, über die Schädigung und Wiederherstellung des geschädigten, passiv vorfallbeteiligten Prozesses/Produktes hinausgehenden Auswirkungen und die auf diesen Prozess oder dieses Produkt bezogenen Vorfallfolgeaktivitäten angewandt (siehe Kap. 5.5.2).

Effektiv heißt dies, dass die diesbezüglichen, eigenschaftsbedingten Flüsse<sup>66</sup> im Einheitsvorfall nach Formel (i) allen denjenigen vorfallbeteiligten Prozessen anteilig zugeordnet werden, die die entsprechende Eigenschaft haben und/oder die auslösend vorfallbeteiligt sind. Haben zwei oder mehr, ausschließlich passiv vorfallbeteiligte, Prozesse die entsprechende Eigenschaft, wird zusätzlich das Ausmaß der Ausprägung dieser Eigenschaft (z. B. die unterschiedlichen Mengen einer verbrannten Substanz in den verbrannten Produkten) in die quantitative Zuordnung einbezogen<sup>67,68</sup>.

Beim **vollständigen Beteiligungsansatz** wird analog wie beim Basisbeteiligungsansatz vorgegangen, wobei hier zusätzlich die Auswirkungen aus der Wiederherstellung der geschädigten passiv vorfallbeteiligten Prozesse/Produkte anteilig diesen Prozessen mit zugewiesen werden.

In der LVA soll der **vollständige Beteiligungsansatz als Standardfall verwendet** werden. Es wird argumentiert, dass dieser am besten die technischen Möglichkeiten der Vorfallvermeidung und -verminderung widerspiegelt und demnach eine effektive Entscheidungsunterstützung ermöglicht, ohne zu Mehrfachzählungen der Vorfallauswirkungen zu kommen.

---

<sup>66</sup> Ereignisse erhalten keinen Zuordnungsfaktor.

<sup>67</sup> In einem angenommenen Unfallfeuer in einer Lagerhalle für verschiedenes Stückgut werden beispielsweise die Verbrennungsemissionen jedes Stückgutes zwischen dem jeweiligen Stückgut und dem oder den auslösenden Prozessen aufgeteilt.

<sup>68</sup> Die Anteile der zugeordneten Emissionen unterscheiden sich je nach spezifischem Vorfall. Da der die Eigenschaft tragende passiv vorfallbeteiligte Prozess eine notwendige Voraussetzung für die Emission (oder anderen Fluss) ist, werden diesem Prozess effektiv bis zu 50 % der Flussmenge zugeordnet.

## **Zuordnungsregeln Beteiligungsansatz bei der Nutzung von Vorfalldaten**

Bei Nutzung von Vorfalldaten ist die zuvor beschriebene **differenzierte Zuordnung oft sowohl qualitativ als auch quantitativ erschwert**, wenn die benötigten Vorfalldaten-Detailinformationen nicht verfügbar sind. In derartigen Fällen sollen dieselben Zuordnungsregeln soweit möglich angewendet werden, allerdings sollen Hinweise auf fehlende Informationen zu weiteren vorfallbeteiligten Prozessen und Vorfalldaten usw. dokumentiert werden. Es wird hier argumentiert, dass dieser Mangel an Informationen tendenziell zu einer Überschätzung der Beiträge der (wenigen) bekannten vorfallbeteiligten Prozesse führt, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist.

Zudem müssen die **Referenzgröße der Vorfälle und die Eintrittshäufigkeiten** aus statistischen Quellen **abgeleitet** werden und die Häufigkeiten in Wahrscheinlichkeiten umgerechnet werden. Die meist unterschiedliche Größe z. B. verunglückter Anlagen im Vergleich zu derjenigen des untersuchten Prozesses sowie die technischen Unterschiede erhöhen dabei die Unsicherheit der Ergebnisse, was ebenfalls bei der Interpretation zu beachten ist.

## **Zuordnungsregeln beim Beteiligungsansatz bei Nutzung von historischen Vorfällen**

Werden **historische Vorfälle im Detail** ausgewertet, ergibt sich oft die Situation, dass

- Vorfalldaten und Auslöser nicht in allen Einzelheiten bekannt sind,
- Vorfalldatenhäufigkeiten nicht robust statistisch ableitbar sind, aber
- Unfallauswirkungen dagegen gut oder sogar sehr gut bekannt sind.

Diese Erkenntnisse ergaben sich bei Durchsicht einer Vielzahl der Unfallberichte des US-amerikanischen *Chemical Safety Boards* ([CSB 2013]). Die Zuordnungsregeln für die zuvor beschriebenen Datenquellen sind entsprechend der speziellen Daten- und Detaillierungslage anzuwenden und Informationslücken und -unsicherheiten in der Auswertung zu berücksichtigen.

Insbesondere **bei seltenen Vorfällen** ergibt sich die Schwierigkeit der Zuordnung/Übertragung der Vorfälle auf die vorfallbeteiligten Prozesse. Ein Beispiel ist der Reaktorunfall von Tschernobyl im Jahre 1986 [N.N. 2013b]: In diesem Fall wäre zu entscheiden, ob die Auswirkungen allen Kernreaktoren weltweit zugeordnet werden, allen in der Sowjetunion (oder der Ukraine?), allen desselben Reaktortyps in der Sowjetunion usw. Die Zuordnung könnte auch unter **Einbeziehung eines weiteren Zuordnungsfaktors** geschehen, einem Übertragungsfaktor im Wertebereich  $[0, 1]$ , der die Übertragbarkeit anhand verschiedener Kriterien ermittelt.

Für seltene **terroristische Vorfälle und Sabotage** könnte unter Anpassung des – nicht im Detail veröffentlichten – Ansatzes von [Eckle et al. 2011] geschehen, in dem die Wahrscheinlichkeit terroristischer Anschläge in Abhängigkeit der Ziele, deren Verwundbarkeit und den, den Angreifern zur Verfügung stehenden, Ressourcen, Zeit und Wissen sowie existenter Abwehrmaßnahmen geschätzt wird. Im Fall der Auswirkungen von Kriegssabotage könnte die politische Stabilität der jeweiligen Region mit herangezogen werden. Derartige Weiterentwicklungen der LVA werden in den Ausblick verwiesen.

### Zusammenfassung der zielsetzungsabhängigen Auswahl des Zuordnungsansatzes

Tab. 3 fasst die anzuwendenden Zuordnungsansätze in Abhängigkeit der Zielsetzung der LVA-Studie zusammen und identifiziert die Notwendigkeiten mit der Mehrfachzählung umzugehen.

**Tab. 3 Methodische Festlegung des anzuwendenden Zuordnungsansatzes in Abhängigkeit der Zielsetzung der LVA-Studie, Anforderungen an die Mehrfachzählung, Zuordnungsregeln. Erläuterungen siehe vorausgehender Text.**

Zielsetzung(en)	Zuordnungsansatz	Mehrfachzählung	Zuordnungsregel
Produktcharakterisierung, Produktvergleich, lebenswegweite Schwachstellenanalyse.  Ablehnung passiver Produktverantwortung bei Vorfällen.	<b>Eingeschränkter Beteiligungsansatz</b>	Auszuschließen	Auslösende Prozesse teilen sich alle Schäden entsprechend ihres Zuordnungsfaktors.
Produktcharakterisierung, Produktvergleich, lebenswegweite Schwachstellenanalyse.  Teilweise Ablehnung passiver Produktverantwortung bei Vorfällen.	<b>Basis-Beteiligungsansatz</b>	Auszuschließen	Wie eingeschränkter Ansatz, plus: Ausschließlich passiv (d. h. eigenschaftsbedingt) vorfallbeteiligte Prozesse tragen Teile der durch sie bedingten externen Schäden entsprechend ihres Zuordnungsfaktors.
Produktcharakterisierung, Produktvergleich, lebenswegweite Schwachstellenanalyse.  Anteilige Übernahme auch passiver Produktverantwortung bei Vorfällen.	<b>Vollständiger Beteiligungsansatz (Anmerkung: Standardmethode der LVA)</b>	Auszuschließen	Wie Basisansatz, plus: Passiv (d. h. eigenschaftsbedingt) vorfallbeteiligte Prozesse tragen Teile der sie selbst betreffenden Schäden entsprechend ihres Zuordnungsfaktors.

Verbesserungspotenzialanalyse mit Identifikation der absoluten Höhe des Potenzials	<b>Verbesserungspotenzialansatz</b> <sup>69</sup>	Lebenswegintern auszuschließen; andernfalls unproblematisch / beabsichtigt	Auslösende Prozesse tragen jeweils die vollen Schäden. Passiv (d. h. eigenschaftsbedingt) vorfallbeteiligte Prozesse tragen die vollen Lasten der sie selbst betreffenden und der von ihnen bedingten, externen Schäden. In dem Maße wie an demselben Vorfall beteiligte Prozesse Teil desselben, untersuchten Produktlebensweges sind, werden die Vorfallschäden zwischen diesen Prozessen aufgeteilt, d. h. nicht mehrfach gezählt.
Verbesserungsanalyse einzelner Komponenten (NICHT im Fokus dieser Dissertation)	<b>Ausfallhäufigkeit bzw. Nichtverfügbarkeit der Komponente</b>	Nicht zutreffend	Die geschätzten oder ermittelten Ausfallhäufigkeiten usw. der Komponenten werden direkt verwendet

### **Auswirkungen auf die Erfassung der Auswirkungen von absichtlich herbeigeführten Vorfällen (Terrorismus, Selbstmorde u. a.)**

Für alle Beteiligungsansatzvarianten und ausschließlich im Fall absichtlich herbeigeführter Vorfälle (Sabotage, Terrorismus, usw.) werden abweichend nur **alle diejenigen Auslöser in die Zuordnung einbezogen, die selbst substantiell die Schadenshöhe (mit) bedingen**: Das im Beispiel genannte Flugzeug bedingt selbst substantiell den Schaden an der Raffinerie mit. In einem anderen Fall, wo beispielsweise ein Feuer mit Hilfe von Streichhölzern und etwas Benzin gelegt wird, tragen diese beiden Produkte nicht substantiell zur Schadenshöhe bei, werden also in die Zuordnung nicht einbezogen. Dieser Ansatz ist dadurch begründet, dass es nicht plausibel erscheint, Streichhölzern, Feuerzeugen usw. einen vollwertigen Schadensanteil zuzuordnen: Da diese Vorfälle absichtlich herbeigeführt werden, sind derartige, nicht selbst und substantiell den Schaden mitbedingende Produkte nur ein austauschbares Mittel zum Zweck (im Gegensatz z.B. zum Sprengstoff bei einem Sprengstoffanschlag, der selbst substantiell die Schadenshöhe mit bedingt).

<sup>69</sup> Der Verbesserungspotenzial-Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit nicht im Detail weiter ausgearbeitet oder exemplarisch angewandt. Einige Aspekte werden aber im Anhang B skizziert.

Diese Sonderregel und die anderen, obigen Zuordnungsregeln haben im Verbund mit dem Ausschluss von Vorfällen während des nicht bestimmungsgemäßen Betriebes von Prozessen und der nicht bestimmungsgemäßen Verwendung von Produkten bei der Erfassung von absichtlich herbeigeführten Vorfällen die folgenden **Konsequenzen**:

- Beim eingeschränkten Beteiligungsansatz werden die Vorfallauswirkungen keinem Prozess oder Produkt zugeordnet<sup>70</sup>.
- Beim Basis-Beteiligungsansatz werden die Wiederherstellung geschädigter Güter und Teile der Vorfalldesaktivitäten keinem Prozess oder Produkt zugeordnet<sup>71</sup>.

Diese Situation **unterstreicht die Präferenz der Nutzung des vollständigen Beteiligungsansatzes in der LVA-Methode.**

#### 5.4.6 Quantitative Abschneidekriterien

Um die verfügbaren Ressourcen effektiv und effizient einzusetzen, werden in der LVA – ähnlich wie in der Ökobilanzierung – quantitative Abschneidekriterien eingesetzt: Ausschließlich diejenigen Vorfälle und Vorfallauswirkungen, die relevant zu den Gesamtauswirkungen des untersuchten Produktes oder Prozesses beitragen, müssen erfasst werden.

Die Ausführungen des *ILCD Handbook – General guide for LCA* ([European Commission - JRC-IES 2010a]) zu den quantitativen Abschneidekriterien gelten in der LVA analog, mit folgenden Erweiterungen: Die **Eintrittshäufigkeit** und die **Schwere** von Vorfällen (insbesondere als das Produkt von Häufigkeit und Schwere) sind zusätzliche Charakteristika, die in Abschneidekriterien einbezogen werden sollen.

Zudem können bisher weltweit nicht vorgekommene **Vorfalltypen mit demnach extrem geringer Häufigkeit als nicht plausibel und nicht praxisrelevant abgeschnitten werden**. Dies entspricht der Praxis der QRA, in der z. B. Meteoriteneinschläge in Anlagen nicht in die Untersuchung einbezogen werden. Diese Regel darf aber nicht dafür verwendet werden, neue Technologien – mangels historischer Vorfälle – als sicher einzuordnen. Die Vorfalldhäufigkeiten

---

<sup>70</sup> Wird bei einem Terroranschlag auf eine Raffinerie beispielsweise bergmännischer Sprengstoff (d. h. nicht bestimmungsgemäß) für den Anschlag verwendet, werden sowohl die Raffinerie und ihre Produkte als auch der Sprengstoff von der Zuordnung ausgenommen. In Konsequenz werden die Vorfallauswirkungen keinem Prozess oder Produkt zugeordnet sondern ausschließlich der den Terroranschlag ausführenden Organisation.

<sup>71</sup> Diese werden ausschließlich der den Terroranschlag ausführenden Organisation zugeordnet.

und -auswirkungen sind derartigen Fällen mittels QRA und unter Übertragung vergleichbarer Vorfälle ähnlicher Technologien zu schätzen.

**Vorfälle mit sehr geringer Schwere können ebenfalls abgeschnitten werden, auch wenn sie häufig auftreten, wichtig ist hier aber das Produkt aus Häufigkeit und Schwere:** [CCPS 2000] weist darauf hin, dass häufigere, mittelschwere Vorfälle oft den größten Beitrag zum Gesamtrisiko darstellen können. [Burgherr & Hirschberg 2008] haben zudem abgeschätzt, dass häufige, aber weniger schwere Unfälle ebenfalls relevant sind.

Liegen F-N-Kurven vor oder können diese abgeleitet werden, können anstelle einer Abschneidung weniger schwere Ausprägungen der Vorfälle auch **durch Extrapolation der F-N-Kurve geschätzt werden**, dieser Ansatz wurde verschiedentlich angewandt.

Da Vorfälle zusätzlich zu den in der Ökobilanz analog erfassten Interventionen mit der Umwelt auch **direkte Personenschäden** erfassen, sollen letztere zusätzlich in die Festlegung und Anwendung der quantitativen Abschneidekriterien der LVA einbezogen werden.

#### 5.4.7 Anbindung der Vorfallsachinventare an die Wirkungsanalyse

##### **Kapitelübersicht**

Die **Auswahl der** in die Inventarisierung **einzubeziehenden Vorfallauswirkungen** leitet sich entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Kap. 2.1) aus den abzudeckenden **Schutzgütern** (= Mensch, natürliche Umwelt, Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen) ab. Es soll eine gemeinsame, auch vergleichende, Auswertbarkeit mit der Ökobilanz gewährleistet werden.

Es wird daher hier festgelegt, dass in der LVA als Elementarflüsse die auch in der **Ökobilanz** inventarisierten Interventionen mit der Umwelt, sowie zusätzlich die vorfallsspezifisch auftretenden direkten Personenschäden erfasst werden<sup>72</sup>.

Die folgenden Ausführungen fassen bestehende Methoden und Praktiken aus der Ökobilanzierung und zur Wirkungsabschätzung speziell mithilfe von DALYs zusammen und spezifizieren einige wenige Besonderheiten und Erweiterungen.

---

<sup>72</sup> Eine Diskussion alternativer Inventarwertansätze ist im Anhang C festgehalten



## Interventionen mit der Umwelt

Einbezogen werden alle relevanten **Emissionen** aus der Technosphäre in die Umwelt. Dies sind all diejenigen Emissionen, die zu den in der Ökobilanzpraxis üblicherweise betrachteten Wirkkategorien beitragen (vgl. Kap. 3.1.1).

Um der Ortsspezifität von Vorfällen gerecht zu werden, sollen – soweit bekannt und relevant – die Emissionen **mit Ortsangaben** inventarisiert werden, dies wurde bereits von [Aelion et al. 1995] für Unfälle vorgeschlagen: Die in der Ökobilanzierung genutzten Wirkmethoden nehmen in der Regel eine marginale Wirkung (d. h. Erhöhung der Hintergrundkonzentration) an. Eine Anpassung der Ökobilanz-Wirkmethoden zur Quantifizierung der **nicht marginalen lokalen Wirkungen**, wie sie bei vielen Vorfällen typisch sind, würde daher die Qualität der Wirkanalyse in der LVA verbessern.

Im Kontext marginal arbeitender Wirkungsabschätzung sind verschiedene Ansätze zur geografischen Differenzierung von Interventionen sind vorgestellt worden oder in Vorbereitung (u. a. [Hauschild & Potting 2005], [IMPACT World+ consortium 2013], [LC-Impact 2013], [Itsubo 2013]). Da sich in der Ökobilanzierung zur geografischen Differenzierung bislang keine allgemein angewendete oder anerkannte Methode oder Struktur etabliert hat, wird dies hier nicht weiter vertieft. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass für Vorfälle im Hintergrundsystem – ähnlich wie in der Ökobilanz – von einer Mittelung der ortsspezifischen Wirkungen ausgegangen werden kann, eine generische, nicht ortsspezifische, Modellierung der Vorfälle im Hintergrundsystem wird daher hier als zunächst ausreichend angesehen.

**Ferner werden die Ressourcenentnahme** aus der Umwelt **und die Ressourceninanspruchnahme** inventarisiert. Mit Ausnahme einiger weniger vorfallbedingter Fälle, wie z. B. der direkten Schädigung von Flächenfunktionen (z. B. Agrar- oder Forstproduktivität bei Bränden) oder der Entnahme von Frischwasser (z. B. bei Löscharbeiten), sind die Ressourcenentnahmen in der LVA ausschließlich durch Prozesse im Hintergrundsystem der Vorfallfolgeaktivitäten bedingt und dann nicht oder nur unwesentlich ortsspezifisch. Für die Wirkkategorien Flächeninanspruchnahme und Wassernutzung gilt das für Emissionen zum Thema Ortsspezifität zuvor gesagte dagegen analog.

Die in einer LVA-Studie zur Verwendung **vorgesehenen spezifischen Wirkmethoden** sollen in diesem Schritt festgelegt und diese Festlegung soll dokumentiert werden<sup>73</sup>.

### **Direkte Personenschäden einschließlich vorfallbedingter Berufskrankheiten**

Einbezogen als direkte Personenschäden werden im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit grundsätzlich die vorfallbedingten **direkten Todesfälle und Verletzte** (einschließlich vergiftete Personen) sowie die **anteiligen Fälle vorfallbedingter Berufskrankheiten**.

Vorfallbedingte **Emissionen in die Innenraumluft** (Gebäude, Fahrzeuge usw.) im Privatbereich oder am Arbeitsplatz werden daher nicht als solche einbezogen, sondern in Form ihrer Wirkungen auf den Menschen, d. h. als Verletzte (einschließlich akut vergiftete Personen) und Fälle von Berufskrankheiten. Zusätzlich sind diese Emissionen in die Innenraumluft als Emissionen in die Umwelt zu erfassen, in dem Maße wie sie quantitativ in die Umwelt gelangen.

**Weitere Informationen zu Art der Verletzung oder Berufskrankheit** sollen erfasst werden soweit bekannt, da dies hilft, die Schwere der Personenschäden mittels der Umwandlung in DALYs (siehe Kap. 3.1.3) genauer zu quantifizieren.

Die vorfallbedingten Toten können zudem einer **Wirkkategorie Todesfälle** zugeordnet werden, die vorfallbedingten Verletzten einer **Wirkkategorie Verletzte** und die vorfallbedingten Fälle von Berufskrankheiten einer **Wirkkategorie Vorfallbedingte Berufskrankheiten**. Diese drei Wirkkategorien können den Wirkkategorien der Ökobilanzierung in der Ergebnisdarstellung und Auswertung an die Seite gestellt werden.

Die **spezifischen Wirkmethoden**, d. h. Lebensdauertabellen, Gewichtungstabellen für Verletzungen und Berufskrankheiten usw. zur Wirkungsabschätzung der direkten Personenschäden einschließlich vorfallbedingter Berufskrankheiten sollen bei Durchführung einer LVA-Studie in diesem Schritt ebenfalls festgelegt und dokumentiert werden.

Zusätzlich zur Festlegung der Wirkmethoden soll in diesem Schritt festgelegt und dokumentiert werden, ob **Normierung und Gewichtung** der Wirkergebnisse vorgesehen sind und wenn ja **welche Normierungs- und Gewichtungssätze** verwendet werden sollen:

---

<sup>73</sup> Dies dient wie in der Ökobilanzierung zur Verhinderung der Auswahl von das eigene Produkt begünstigenden Methoden zu einem späteren Zeitpunkt, wenn erste Ergebnisse der Vorfallsachbilanz vorliegen [European Commission - JRC-IES 2010a].

## Ermittlung von Normierungsfaktoren

Die **Normierungsbasis** (z. B. Deutschland, Europa etc. gesamt oder pro Einwohner) ist vom Anwender festzulegen. Dies soll in Abhängigkeit vom Ziel der Studie sowie der Erstreckung des Lebensweges des Produktsystems über verschiedene Länder erfolgen.

Der hinsichtlich der vorfallbedingten **Interventionen mit der Umwelt** zu ermittelnde Normierungsfaktor soll identisch sein zu dem in der Ökobilanz für die Interventionen verwendeten, da die gleichen Transport-, Expositions- und Wirkpfade der gleichen Interventionen adressiert werden. Allerdings sollte die Normierungsbasis, die in der Ökobilanz ausschließlich die anthropogen bedingten Interventionen aus bestimmungsgemäßen Betriebszuständen umfassen, um diejenigen Interventionsmengen aus Vorfällen erweitert werden. Die solchermaßen **komplettierte Normierungsbasis** ist dann auch für eine eventuell durchgeführte parallele Ökobilanzstudie zu verwenden.

Für die **Normierungsbasis der direkten Personenschäden** werden die vorfallbedingten Todesfälle und Verletzten einschließlich vorfallbedingter Berufskrankheiten einbezogen.

## Ermittlung von Gewichtungsfaktoren

Auch die Gewichtungsfaktoren werden vom Anwender festgelegt.

Für die Wirkkategorien „Todesfälle“ und „Verletzte“ ist zu beachten, dass der jeweilige Gewichtungsfaktor sich ausschließlich auf die vorfallbedingten Fälle beziehen darf<sup>74</sup>.

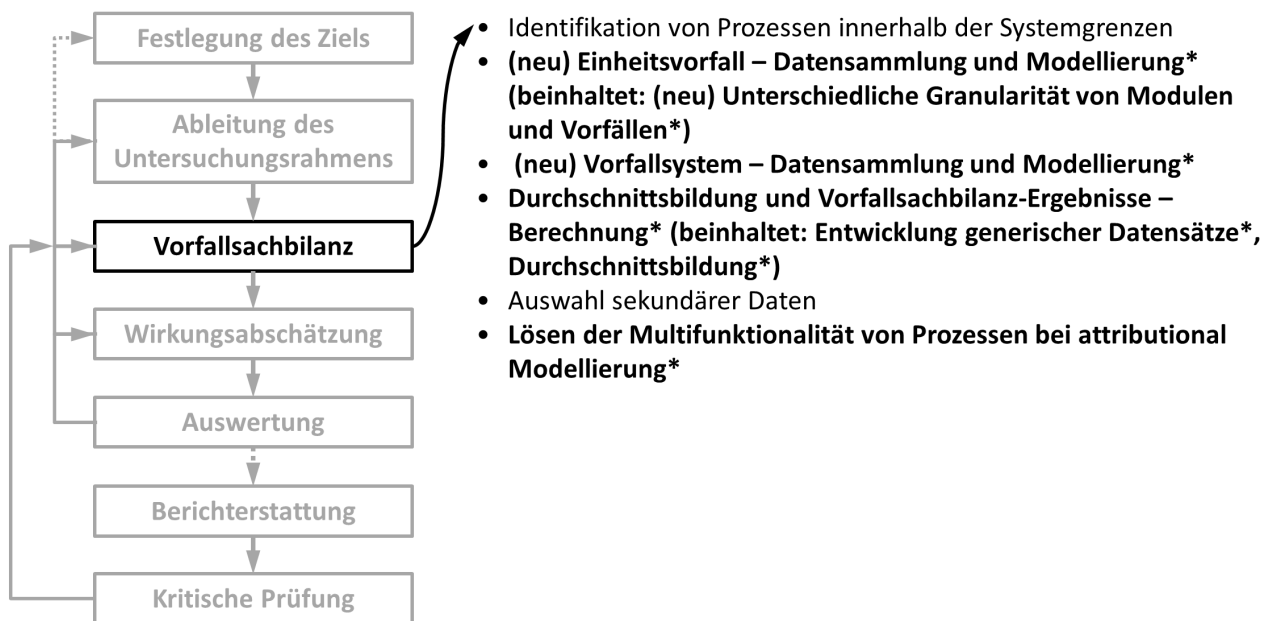
## 5.5 Vorfallsachbilanz

### 5.5.1 Kapitelübersicht

In Anlehnung an das *ILCD Handbook – General guide for LCA* [European Commission - JRC-IES 2010a] umfasst die Vorfallsachbilanz die folgenden Schritte, siehe Abb. 18:

---

<sup>74</sup> Es ist dabei zudem zu beachten, dass sowohl Todesfälle als auch Verletzte auf Ebene der Wirkkategorien in DALY gemessen werden, also formal gleichwertig sind (1 DALY Todesfälle = 1 DALY Verletzte). Die relativen Gewichtungsfaktoren zwischen Todesfällen und Verletzten sind entsprechend zu wählen, dass sie den unterschiedlichen Skalierungseffekt der Normierung wieder ausgleichen. Sollen zudem die DALY Werte aus Humantoxizität und anderen Wirkkategorien zum Thema „Menschliche Gesundheit“ die in DALY gemessen werden auch gleich behandelt werden, ist auch hier die Gleichwertigkeit sicher zu stellen. Mit Blick auf die besondere Bedeutung, die die Gesellschaft Vorfällen und insbesondere direkten Personenschäden zuweist, sind auch höhere Gewichtungen denkbar, als für die Auswirkungen aus Interventionen mit der Umwelt, dies wird hier aber nicht weiter verfolgt.

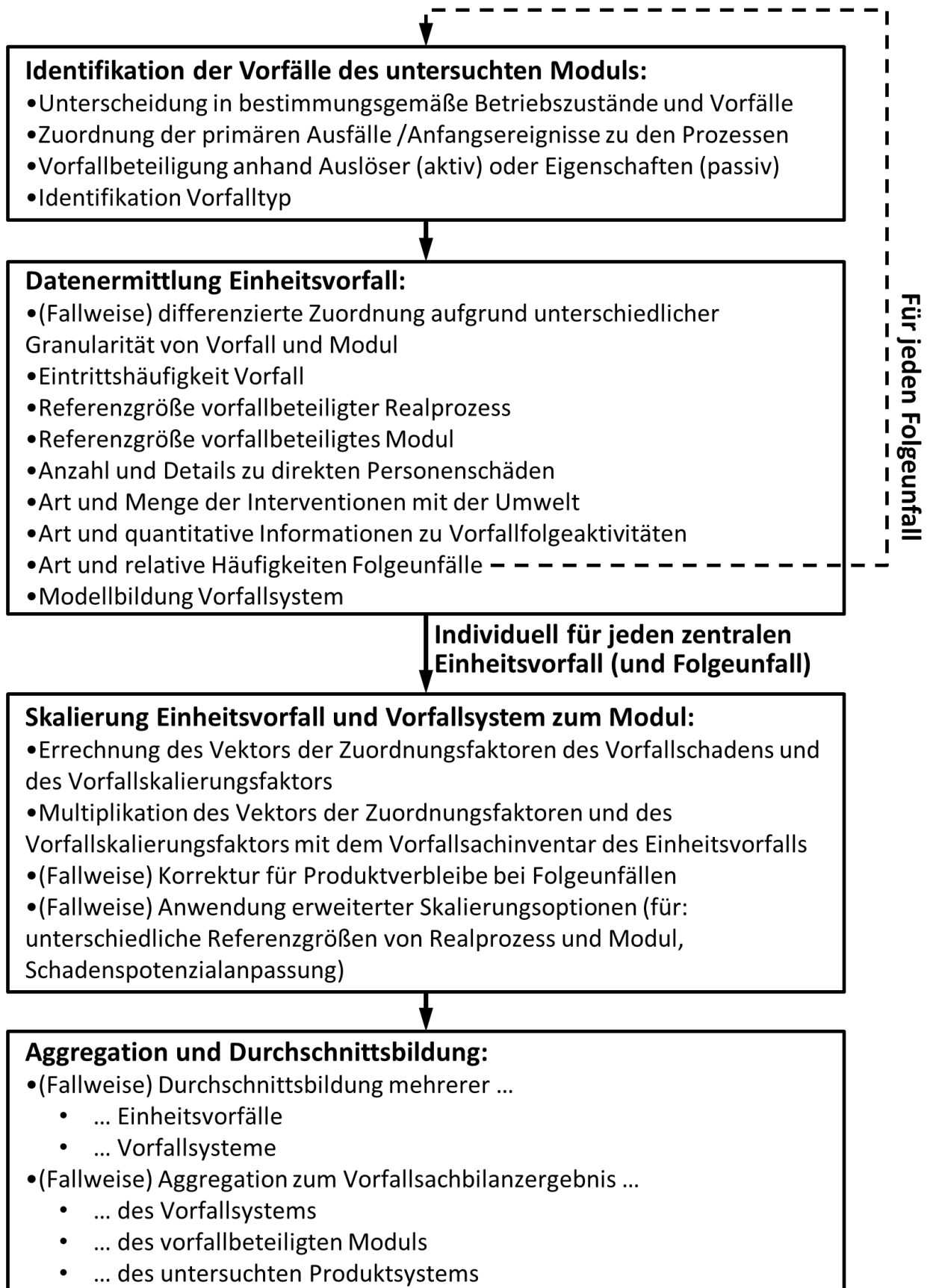


**Abb. 18. Hauptschritte der Vorfallsachbilanz in der LVA, Erläuterungen siehe folgender Text.**

Die in obiger Grafik unmarkierten Schritte werden hier nicht weiter behandelt, da sie analog zum Vorgehen in der Ökobilanzierung durchzuführen sind.

Teilweise werden dagegen **in der LVA spezielle methodische Lösungen** benötigt, die maßgeblich von denen der Ökobilanzierung abweichen oder gänzlich neu sind, diese sind wiederum mit einem „\*“ oder zusätzlich mit „(neu)“ gekennzeichnet. Die folgenden Unterkapitel behandeln ausschließlich diese Fälle.

Abb. 19 zeigt den **Ablauf der Vorfallsachbilanz** bei Anwendung der LVA Methode. Die dargestellte Gliederung und die Reihenfolge der Schritte weichen von den in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Methodenschritten ab, da letztere in ihrer Reihenfolge vor allem die einfachere Nachvollziehbarkeit der Methode zum Ziel haben. Die Reihenfolge vieler Schritte ist zudem flexibel.



**Abb. 19. Ablaufdiagramm der Vorfallsachbilanz eines Vorfalls. Nicht dargestellt ist der fallweise folgende Schritt der Lösung von Multifunktionalität, da dieser im Lebenswegmodell des untersuchten Produktsystems stattfindet.**

## 5.5.2 Einheitsvorfall - Datensammlung und Modellierung

### Kapitelübersicht

Der hier neu eingeführte Objekttyp des Einheitsvorfalls ist ein wesentlicher Objekttyp der LVA.

Einheitsvorfälle werden in Vorfallsystemen (siehe Folgekapitel) verwendet, um Vorfallauswirkungen zu inventarisieren: Der zentrale Einheitsvorfall enthält ein **Vorfallsachinventar** mit **einem Ereignis im Input**.

Dieses Ereignis bindet **das Vorfallsystem qualitativ und quantitativ** (siehe das spätere Kap. 5.5.3) **an das** jeweils vorfallbeteiligte **Modul** des untersuchten Produktsystems **an**. Folgeunfälle – falls vorkommend – werden innerhalb desselben Vorfallsystems mit weiteren Einheitsvorfällen erfasst.

Das Vorfallsachinventar des Einheitsvorfalls enthält neben Ereignissen – soweit im jeweiligen Vorfall vorkommend – **die Elementarflüsse, die direkten Personenschadenflüsse und die Produkt- und Abfallflüsse** (insbesondere diejenigen der Vorfallfolgeaktivitäten), die gemeinsam die Vorfallauswirkungen qualitativ und quantitativ erfassen.

**Kausale und weitere dokumentarische Informationen** zu Auslöser(n) (und bevorzugt auch den Ursache(n)), zur Eintrittshäufigkeit usw. des Vorfalls unterstützen die Modellierung und Auswertung.

### Inventarisierung der Ereignisse im Vorfallsachinventar

Das wesentliche Element im Vorfallsachinventar ist der hier neu eingeführte Objekttyp Ereignis<sup>75</sup>. Jeder Einheitsvorfall trägt im Vorfallsachinventar **genau ein Ereignis im Input**<sup>76</sup> sowie **0 bis n Ereignisse im Output**, letztere dienen ggf. dazu Folgeunfälle anzubinden. Ereignisse (*e*) werden in der Größe Anzahl und der Dimension 1 gemessen.

Man erhält den **Ereignisvektor**:

---

<sup>75</sup> Während ein Ereignis kein Fluss im physikalischen Sinne ist, wird er hier zwecks einfacherer Zugänglichkeit der Methode dennoch gemeinsam mit Flüssen im Vorfallsachinventar inventarisiert.

<sup>76</sup> Anstelle der Unterscheidung Input und Output mit positiven Werten aller Ereignisse (und der Flüsse) können für Elemente im Output auch negative Vorzeichen gesetzt werden, ohne Unterscheidung in Input und Output, dies ist in der Ökobilanzierung in manchen Softwaresystemen derart implementiert.

$$\text{Formel (j)} \quad \vec{E} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}$$

Das Ereignis im Input trägt den **Namen des unerwünschten Ereignisses des Vorfalls oder Vorfallszenarios** (z. B. "Rohölpipelinebruch ...", "Entzündung ausgelaufenes Benzin ..." jeweils mit weiteren qualifizierenden Angaben).

**Komplexe Vorfälle mit Folgeunfällen** können aber auch – je nach Detailtiefe des Erkenntnisinteresses – in einem gemeinsamen zentralen Einheitsvorfall zusammengefasst werden.

Alle **Werte im Vorfallsachinventar** sind bevorzugt in absoluter Höhe zu inventarisieren und nicht – wie in der Ökobilanzpraxis üblich – auf z. B. ein kg eines der Prozessprodukte bezogen<sup>77,78</sup>.

Werden allerdings nicht einzelne Vorfälle oder Vorfallszenarien verwendet, sondern die aus Vorfalldatenbanken und -statistiken abgeleiteten **Todesfallraten, Verletztenraten und Raten von umweltrelevanten Interventionen** (siehe dieses Kapitel weiter unten), ist eine der jeweiligen Rate entsprechende Vorfallhäufigkeit zu wählen. Da Todesfallraten allgemein in Fällen pro Jahr ausgedrückt werden, wird in diesen Fällen zweckmäßig die **Eintrittshäufigkeit auf 1 [a<sup>-1</sup>] gesetzt**.

### **Inventarisierung der Interventionen mit der Umwelt**

Vorfallbedingte Interventionen mit der Umwelt ( $f_i$ ), also Emissionen und Ressourcenentnahmen und -inanspruchnahmen<sup>79</sup>, werden **identisch erfasst wie in der Ökobilanzierung**.

<sup>77</sup> Die Abbildung des Vorfallausmaßes in absoluter Höhe macht die Modelle zudem anschaulicher und erleichtert daher die Plausibilitätskontrolle und die Übergabe der Werte aus Vorfallstatistiken und QRA. Bei Abbildung von Folgeunfällen, die eine relative Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf den Vorgängerunfall oder -vorfall tragen, ist zu beachten, dass die genannte absolute Höhe sich aus dem Produkt des Folgeunfall-Sachinventars und dessen relativer Eintrittshäufigkeit ergibt. Erst im Kontext des vorfallbeteiligten Produktsystems werden die Vorfallsachinventare unter anderem entsprechend der Eintrittshäufigkeit skaliert.

<sup>78</sup> Parametrisierung der Mengen und Arten der Flüsse, wie es in der Ökobilanzpraxis oft genutzt wird, ist denkbar. Dies erlaubt es noch weitergehend flexibel verwendbare Vorfallsysteme zu haben, wobei u. a. auf die Gültigkeit/Anpassung der Eintrittsfrequenz geachtet werden muss. Dieses Thema ist hier nicht näher betrachtet und wird in den Ausblick und die mögliche Umsetzung in ein Software-Tool verwiesen.

Man erhält den **Vektor der Interventionen mit der Umwelt**:

$$\text{Formel (k)} \quad \vec{F}_I = \begin{pmatrix} f_{I_1} \\ f_{I_2} \\ \vdots \\ f_{I_n} \end{pmatrix}$$

### Inventarisierung der direkten Personenschäden

Direkte Personenschäden werden als solche inventarisiert und in folgendem **Muster** aufgeschlüsselt, soweit die Datenlage eine entsprechende Differenzierung unterstützt:

#### Todesfälle:

- Flussbezeichnung: "<Tod>; <Geschlecht des Verstorbenen>; Alter <Alter des Verstorbenen>"
- Größe: „Anzahl“
- Einheit: Dimension 1 ("Stück")
- Flussmenge: Anzahl der Betroffenen

#### Verletzte:

- Flussbezeichnung: "<Verletzung>; <Art der Verletzung, verletztes Körperteil/Schwere/(un-)behandelt>; <kurzfristig/langfristig>; Alter <Alter des Verletzten>"
- Größe: „Zeit“
- Einheit: "Jahre"<sup>80</sup>
- Flussmenge: Anzahl der Jahre

Bei einigen Verletzungen werden bei der Umwandlung in DALYs die kurzfristige Behinderung (während der Behandlung) und die langfristigen bleibenden Schäden bis zum Lebensende unterschieden und es sind jeweils zwei Flüsse zu inventarisieren.

---

<sup>79</sup> Ressourcen-Elementarflüsse können dann in Vorfallsachinventaren enthalten sein, wenn Flächeninanspruchnahme oder -umwandlung (z. B. durch einen Waldbrand) auftritt oder wenn das Vorfallsachinventar Vorfalldolgeaktivitäten enthält, letzteres bedingt eine vorhergehende Aggregation eines Vorfallsystems zu einer Vorfallsachbilanz (siehe Kap. 5.5.4).

<sup>80</sup> Die Einheit Jahre wird hier aus Gründen der Anschaulichkeit anstelle der SI Einheit Sekunde vorgeschlagen, obwohl sie schlecht definiert ist. Es wird hier argumentiert, dass der Mangel an Genauigkeit deutlich kleiner ist als die Genauigkeit der Daten, weswegen die Ungenauigkeit in der Praxis in Kauf genommen werden kann.



### Vorfallbedingte Berufskrankheiten:

- Flussbezeichnung: "<Berufskrankheit>; <Bezeichnung der Krankheit, Schwere der Ausprägung>; <Alter des Erkrankten>"
- Größe: „Zeit“
- Einheit: "Jahre"
- Flussmenge: Anzahl der Jahre

Die zu verwendenden Klassifikationen für „Art der Verletzung, verletztes Körperteil / Schwere / (un-)behandelt“ und „Bezeichnung der Krankheit, Schwere der Ausprägung“ orientieren sich zweckmäßig an der jeweils verwendeten speziellen Klassifikation der in der Wirkanalyse zu nutzenden Gewichtungstabellen der Verletzungen und Krankheiten<sup>81</sup>.

Damit ergibt sich als **Vektor der Elementarflüsse der direkten Personenschäden** ( $f_D$ ):

$$\text{Formel (I)} \quad \vec{F}_D = \begin{pmatrix} f_{D_1} \\ f_{D_2} \\ \vdots \\ f_{D_n} \end{pmatrix}$$

Ein Elementarfluss ist dann **beispielsweise** "Verletzung; Fraktur Oberschenkel, behandelt; kurzfristig; Alter 25 Jahre" – 0,0833 Jahre Dauer<sup>82</sup>. Liegen die Vorfalldaten weniger detailliert vor, werden Flüsse erhalten in Form von z. B. „Tod“ – 1. Bei fehlender Angabe zur Dauer der Verletzung kann diese anhand statistischer Durchschnittswerte der jeweiligen Verletzung geschätzt werden. Gleiches gilt für Berufskrankheiten.

Die **Praktikabilität** der hier verwendeten Flüsse direkter Personenschäden wird im Anhang C diskutiert.

---

<sup>81</sup> Dieses Muster erfasst die wesentlichen Aspekte, in manchen DALY-Methoden werden weitere Aspekte unterschieden, siehe Kap. 3.1.3.

<sup>82</sup> Bei derart differenzierten Informationen zu den Vorfallopfen wird folglich jedes Opfer durch einen eigenen Fluss inventarisiert. Dies hat bei der späteren Aggregation der Vorfalldaten über den Lebensweg des untersuchten Produktsystems den Nachteil sehr langer Inventarlisten. Es ist denkbar, dies durch Zusammenfassung ähnlicher Unfalltypen und -schweren zu vermeiden, unter Inkaufnahme geringerer Präzision.

## Inventarisierung von Produkt- und Abfallflüssen

Die durch einen Vorfall bedingten Vorfallfolgeaktivitäten sind im Vorfallsachinventar als Produkt- und Abfallflüsse zu inventarisieren. Hierzu gehören folgende **Typen von Vorfallfolgeaktivitäten**:

- Prozesse der **Vorfallbekämpfung** und des Rettungsdienstes usw. (z. B. Löscheinsatz der Feuerwehr inkl. Anfahrt/Abfahrt, Löschmitteleinsatz und ggf. daraus entstehende Emissionen, zudem und besonders im Falle von Sabotage, Terroranschlägen usw. auch entsprechende Polizei- oder Militäreinsätze).
- Prozesse der **Wiederherstellung/Wiederbeschaffung oder Reparatur von Vermögenswerten**. Dies umfasst:
  - **Güter** (z. B. Wiederaufbau einer durch eine Explosion zerstörten Lagerhalle und Wiederherstellung der zerstörten Lagerinhalte<sup>83</sup>)
  - Prozesse der **erneuten Bereitstellung gestörter Dienstleistungen** oder zusätzlicher vorfallbedingter Dienstleistungsaufwendungen (z. B. Fahrten per Ersatzbus, Taxi usw. bei Verkehrsunfällen öffentlicher Verkehrsträger)
  - Prozesse der **Sanierung von Standorten** (z. B. *in-situ* Sanierung kontaminierten Erdreiches nach Öltankleckage)
  - Prozesse der **Entsorgung** (z. B. thermische Entsorgung des ausgekofferten kontaminierten Erdreiches, Deponierung zerstörter Güter inkl. deren Transportes)
  - Prozesse der **Evakuierung** (z. B. Evakuierung eines Stadtteils aufgrund Freisetzung einer Erdgaswolke als Folge eines Vorfalls)
  - **Sonstige** vorfallbedingte Folgeaktivitäten

Zudem werden fallweise Prozesse benötigt, die im Falle unvollständiger Angaben aus der QRA bestimmte Vorfallvorgänge in geeignete Vorfallsachbilanzgrößen überführen. Hierzu gehören z. B. Prozesse der **vorfallbedingten Stoffumwandlung** (z. B. Sachinventare der Emissionen aus

---

<sup>83</sup> Bei der Modellierung der Wiederherstellung geschädigter Vermögenswerte ist zu unterscheiden, ob es sich um neue oder neuwertige Vermögenswerte handelt (z. B. im genannten Beispiel die in der Lagerhalle gelagerten Güter) oder um bereits gealterte Güter (z. B. hier die Lagerhalle). Im letzteren Fall ist nur eine teilweise Wiederherstellung abzubilden, liegen keine spezifischen Informationen vor, kann vereinfacht bei in Nutzung befindlichen Gütern von einer halbierten Wertigkeit (d. h. Mitte der Nutzungsdauer) ausgegangen werden.

der generischen Verbrennung bestimmter Materialien, da in aller Regel aus einer QRA keine quantitativen Informationen zu den Emissionsmengen von Bränden vorliegen)<sup>84</sup>.

Als **Vektor der Produkt- und Abfallflüsse** ( $f_P$ ) ergibt sich dabei analog zum Sachinventar der Ökobilanzierung:

$$\text{Formel (m)} \quad \vec{F}_P = \begin{pmatrix} f_{P_1} \\ f_{P_2} \\ \vdots \\ f_{P_n} \end{pmatrix}$$

### **In Ereignissen und Flüssen hinterlegte prozess- und modulspezifische Skalierungsinformationen**

Die Einheitsvorfälle inventarisieren den Vorfall quantitativ und tragen zudem in sich die differenzierten quantitativen Zuordnungsinformationen zu allen vorfallbeteiligten Prozessen<sup>85</sup>:

Zu jedem **Ereignis** wird eine **Eintrittshäufigkeit** hinterlegt, die z. B. aus der entsprechenden Ereignisablaufanalyse, Fehlerbaumanalyse oder Vorfallstatistik entnommen oder abgeleitet wird. Die Eintrittshäufigkeit des zentralen Einheitsvorfalls ist dabei die **absolute Häufigkeit** je Jahr des erfassten Vorfalls oder Vorfallszenarios.

Die **Eintrittshäufigkeit von Folgeunfällen** bezieht sich, im Gegensatz zu derjenigen des zentralen Einheitsunfalls, auf den vorausgehenden Vorfall (oder Folgeunfall im Falle von Ketten von Folgeunfällen). Sie wird daher als **relative Häufigkeit** angegeben. Läuft z. B. bei einem Benzintransport aufgrund eines Verkehrsunfalls Benzin aus und gerät dieses in 10 % der Fälle in Brand, ist die relative Eintrittshäufigkeit des auf den Verkehrsunfall folgenden Folgeunfalls „Feuer“ gleich „0,1“.

Ausschließlich das zentrale Ereignis (d. h. das Ereignis im Input des zentralen Einheitsvorfalls) trägt in sich zudem spezifisch für jeden vorfallbeteiligten Prozess/Modul je eine **Referenzgröße**

---

<sup>84</sup> *Per conventionem* werden alle vom Vorfall „konsumierten“ Güter und Dienstleistungen im Input inventarisiert. Dies erleichtert die Anbindung der entsprechenden Produktsysteme, die in der Regel ihre Produkte als *output*-seitigen Produktfluss haben. Werden dagegen z. B. Stoffumwandlungen (z. B. die Emissionen aus einem Feuer eines ausgetretenen und frei brennenden Kraftstoff) in einem separaten Modul modelliert, so bietet sich an, diesen Kraftstoffaustritt als Produktfluss im Output des zentralen Einheitsvorfalls zu inventarisieren. In ähnlicher Weise ist die Inventarisierung anderer Produktflüsse nach Zweckmäßigkeitsgesichtspunkten zu wählen.

<sup>85</sup> Die Nutzung dieser Informationen zur Skalierung der Vorfälle und der Flüsse in den Einheitsvorfällen wird im folgenden Kapitel erläutert und formalisiert.

**des Vorfalls**<sup>86</sup>. Diese Referenzgröße(n) des Vorfalls (auch: des/der vorfallbeteiligten Realprozesse(s)) sind jeweils die Gesamtleistung des/der beteiligten Prozesse(s)/Produkte(s) z. B. über ein Betriebsjahr oder eine draus abgeleitete Prozessleistung<sup>87</sup>.

Zusätzlich sollte die spezifische (oder durchschnittliche) **absolute „Größe“** des vorfallbeteiligten Realprozesses angegeben werden. Diese „Größe“ kann als **Schadenspotenzial** verstanden werden und wird bei der Übertragung von Vorfallinformationen auf ähnliche Prozesse / Produkte benötigt, da Prozesse bei gleicher Leistung dennoch ein unterschiedliches Schadenspotenzial haben können<sup>88</sup>. Diese „Größe“ darf nicht mit der leistungsbezogenen Referenzgröße des Realprozesses und auch nicht mit der ebenfalls leistungsbezogenen Referenzgröße des vorfallbeteiligten Moduls verwechselt werden, siehe dort<sup>89</sup>.

Vorfallauswirkungen **multikausaler Vorfälle** werden gemäß Kap. 5.4.4 den vorfallbeteiligten Prozessen anteilig zugeordnet. Darüber hinaus werden im Basisbeteiligungsansatz und vollständigen Beteiligungsansatz auch individuell eigenschaftsbedingte Vorfallauswirkungen (d. h. Flüsse) multikausaler Vorfälle gemäß Kap. 5.4.5 den passiv vorfallbeteiligten Prozessen anteilig zugeordnet. Daher tragen alle Flüsse im Vorfallsachinventar je vorfallbeteiligtem Prozess einen spezifischen **Zuordnungsfaktor**  $\in [0, 1]$ <sup>90</sup>. Dies betrifft die Interventionen mit der Umwelt ebenso wie direkte Personenschäden und Produkt- und Abfallflüsse.

---

<sup>86</sup> Die Referenzgröße des Vorfalls ist weitgehend analog der Referenzgröße des Moduls – die vorfallbeteiligten Prozesse entsprechen dabei in etwa den Kofunktionen des Moduls.

<sup>87</sup> So ergeben sich Vorfälle in der Form z. B. „1 Wohnungsbrand, Auslöser Heizlüfter“ mit der Eintrittshäufigkeit  $0,00034 [a^{-1}]$  je Heizlüfter-Betriebsjahr bei angenommenen  $85 [h/a]$  Betriebsstunden je Betriebsjahr. Sowie für das Haus als eigenschaftsbedingt passiv vorfallbeteiligtes Produkt bei angenommenen  $1,2 [-]$  Heizlüftern je Haus und jeweils  $85 [h/a]$  Heizlüfter-Betriebsstunden je Jahr die Eintrittshäufigkeit  $0,00034 [a^{-1}] \cdot (85 [h/a] / 8.760 [h/a]) \cdot 1,2 [-] = 3,96 \cdot 10^{-6} [a^{-1}]$  je Nutzungsjahr des Hauses. Bei Auslösern, die nicht zeitdauerabhängig sondern z. B. fallabhängig sind (z. B. Wohnungsbrände durch Weihnachtsbaumbrand), wird die Eintrittshäufigkeit auf die entsprechende Bezugsgröße bezogen, z. B.  $2,5 \cdot 10^{-6}$  Brände je Weihnachtsbaum mit Kerzen. Oder auch: „1 Rohölpipelinebruch ...“ mit der quantitativen Referenz von z. B. „Betriebsjahr und 1.000 km Pipeline“ (also je „1000 [km/a]“).

<sup>88</sup> Da das Schadenspotenzial nicht immer ein Skalar ist, ist vorzusehen auch weiter differenzierte Schadenspotenziale zu dokumentieren und bei der Übertragung von Vorfalldaten auf ähnliche Prozesse und Produkte differenziert zu nutzen. Eine komplexere Möglichkeit ist es einen *worst-case* Vorfall der untersuchten Anlage zu modellieren und die Vorfallauswirkungen als Schadenspotenzial bei einer Übertragung zu nutzen. Dieser methodische Spezialfall wird hier allerdings nicht weiter vertieft.

<sup>89</sup> Ein Beispiel ist die „Größe“ eines abgebrannten Hauses. Diese Unterscheidung ist wichtig, da die maximalen Vorfallauswirkungen oft von der Prozessgröße abhängen, z. B. die maximal ausgelaufene Rohölmenge aus einer Tankerhavarie ist bedingt durch dessen Zuladung, die hier die geeignete „Größe“ ist. Diese Größe kann fallweise auch leistungsbezogen sein, z. B. die Durchsatzleistung einer Pipeline in  $[m^3/s]$ , die bei einer Pipeline-Zerstörung z. B. durch einen terroristischen Akt mit der potenzial auslaufenden Rohölmenge in engem Zusammenhang steht. Dieser Sachverhalt wird im Kap. 5.5.3 wieder aufgegriffen.

<sup>90</sup> Dies wird in den im folgenden Kapitel vorgestellten Berechnungsvorschriften als Zuordnungsvektor dargestellt, der mit dem jeweiligen Vorfallsachinventarvektor multipliziert wird.

## Zusammenführung zu Gesamtsachinventar

Die **Zusammenfassung** von Formel (j), Formel (k), Formel (l) und Formel (m) ergibt Formel (n), den Vektor des Vorfallsachinventars eines Einheitsvorfalls:

$$\text{Formel (n)} \quad \vec{V} = \begin{pmatrix} \vec{F}_P \\ \vec{F}_I \\ \vec{F}_D \\ \vec{E} \end{pmatrix}$$

Grafisch lässt sich der Einheitsvorfall zweckmäßig wie in Abb. 20 skizziert darstellen; vergleiche auch das Modul der Ökobilanzierung in Abb. 4.

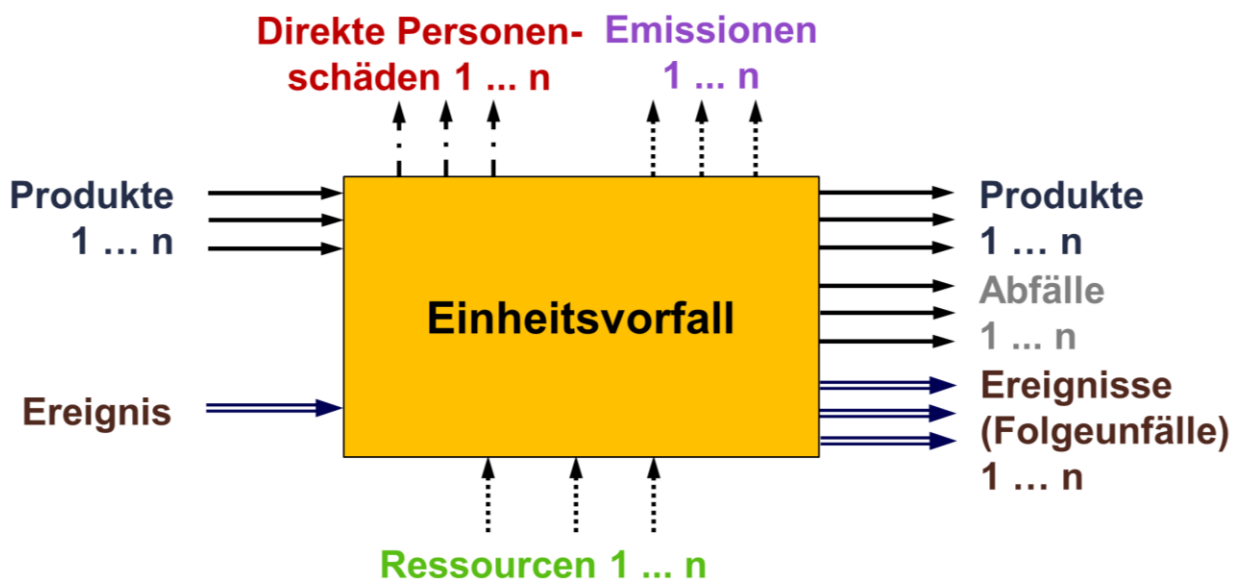


Abb. 20. Einheitsvorfall, schematisch. In Erweiterung und Anpassung des (Prozess-)Moduls, vgl. auch Abb. 4.

## Alternative Inventarisierung von Schadensraten im zentralen Einheitsvorfall

Je nach Detailinteresse kann es zielführend sein, neben einzelnen Vorfällen oder Vorfallszenarien die durchschnittlichen Schadensraten von Vorfällen zu inventarisieren. Dieses Vorgehen ist zudem ein vereinfachter alternativer Weg zur Durchschnittsbildung auf Vorfallebene.

Wird für eine LVA die durchschnittliche Anzahl an Todesfällen benötigt (also nicht Daten individueller Vorfälle oder Vorfallszenarien), können diese **Todesfallraten** aus **Häufigkeits-Anzahl-Kurven** (F-N-Kurven, siehe Kap. 3.2.4) abgeleitet werden.

In Analogie zur ursprünglichen todesfallbezogenen F-N-Kurve können entsprechende Kurven für Verletzte (Verletzten-F-N-Kurven) und für verschiedene Umweltschäden (spezifische Umweltschadens-F-N-Kurven) erhalten werden. Speziell für Umweltschäden haben bereits [Aelion et al. 1995] dies vorgeschlagen, siehe Kap. 4.4.

Aus derartigen Schadenskurven kann man die Zahl der Verletzten als **Verletztenrate** ( $R_{Ver}$ ) und die potenziellen Umweltschäden als **Vektor der Umweltschadensraten** ( $R_{Umw}$ ) errechnen. Jeweils bei Nutzung expliziter Vorfalldaten oder -szenarien erhält man für die **Verletztenrate**:

$$\text{Formel (o)} \quad R_{Ver} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot N_{V_i}$$

Mit

$i$  : Laufindex des spezifischen Vorfalls oder des Vorfalltyps bestimmter Schwere

$\mu_i$  : Eintrittshäufigkeit des spezifischen Vorfalls oder des Vorfalltyps bestimmter Schwere  $i$

$N_{V_i}$  : Anzahl der Verletztenfälle<sup>91</sup> des Vorfalls oder Vorfalltyps  $i$

Für **Umweltschäden** erhält man je individueller Intervention mit der Umwelt eine eigene F-N-Kurve und die entsprechende Interventionsrate als Fläche unter der F-N-Kurve (besser: F-I Kurve mit „I“ für Menge der „Intervention“ mit der Umwelt) der Umweltschäden als Umweltschadensrate gemäß:

$$\text{Formel (p)} \quad R_{Umw} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot f_{I_i}$$

Mit

$i$  : Laufindex des spezifischen Vorfalls oder des Vorfalltyps bestimmter Schwere hinsichtlich der fraglichen Intervention mit der Umwelt

$\mu_i$  : Eintrittshäufigkeit des spezifischen Vorfalls oder des Vorfalltyps bestimmter Schwere  $i$

$f_{I_i}$  : Menge einer bestimmten Intervention mit der Umwelt aufgrund des Vorfalls oder Vorfalltyps  $i$

---

<sup>91</sup> In diesem einfachen Fall werden unterschiedliche Formen und die Schwere von Verletzungen nicht unterschieden.

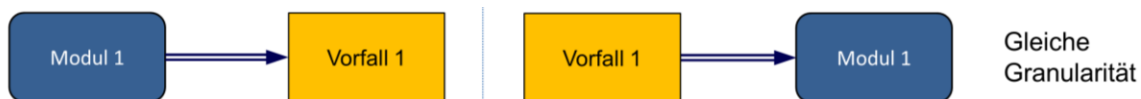
## Unterschiedliche Granularität von Modulen und Vorfällen

Bei der quantitativen Zuordnung von Vorfällen zu den vorfallbeteiligten Prozessen ist zudem die Granularität der Module zu beachten, die oft nicht identisch ist mit derjenigen der Einheitsvorfälle: Module können ganze Standorte umfassen, während QRA-Ergebnisse sich häufig auf einzelne Anlagen oder Anlagenteile beziehen. Andererseits können QRA-Ergebnisse aber auch weitere, durch einen Vorfall passiv betroffene, Anlagen umfassen. Primäre Ausfälle in Fehlerbäumen und Anfangsereignisse in Ereignisabläufen beziehen sich sogar regelmäßig auf Komponenten, die Teil des durch das Modul repräsentierten Prozesses sind. Umgekehrt kann das Prozessnetz der Module detaillierter vorliegen als die Einheitsvorfälle.

Die Zuordnung der Vorfälle auf die vorfallbeteiligten Prozesse/Module soll allerdings ohne relevante Mehrfachzählungen und Lücken erfolgen. Somit sind für die im Folgenden vorgestellten Varianten unterschiedlicher relativer Granularität von Vorfällen und Modulen geeignete Modellierungsansätze zu verfolgen.

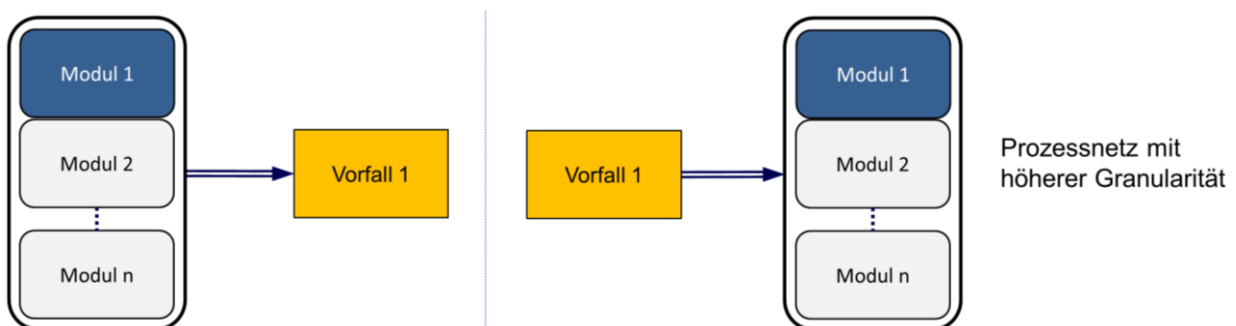
Die folgenden **Fälle relativer Granularität** müssen unterschieden werden. Sie bedingen **spezifische methodische Zuordnungslösungen**:

- Vorfall/Ereignis und Modul haben dieselbe Granularität, siehe Abb. 21
- Vorfall/Ereignis hat eine geringere Granularität als das Modul, siehe Abb. 22
- Vorfall/Ereignis hat eine höhere Granularität als das Modul, siehe Abb. 23



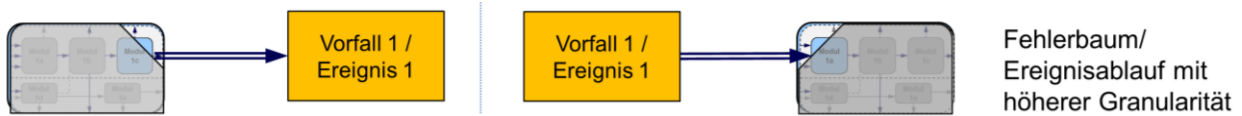
**Abb. 21. Vorfall/Ereignis und Modul haben dieselbe Granularität. Links: Modul ist auslösend vorfallbeteiligt. Rechts: Modul ist passiv vorfallbeteiligt.**

Im einfachsten Fall **gleicher Granularität** (Abb. 21) erfolgt die Zuordnung direkt und je nach angewendetem Zuordnungsprinzip entsprechend den Regeln in Tab. 3.



**Abb. 22. Vorfall hat eine geringere Granularität als das Modul. Links: Modul ist auslösend vorfallbeteiligt. Rechts: Modul ist passiv vorfallbeteiligt.**

Hat das Vorfallmodell (z. B. der Fehlerbaum)<sup>92</sup> eine geringere Granularität als das untersuchte Modul (Abb. 22), sind die Vorfallauswirkungen auf die verschiedenen vorfallbeteiligten Module mittels Ökobilanzmethoden zu verteilen, zusätzlich zur Anwendung des festgelegten Zuordnungsprinzips und den weiteren Skalierungsfaktoren (siehe weiter unten in diesem Kapitel).



**Abb. 23.** Vorfall/Ereignis hat eine höhere Granularität als das Modul. Links: Modul ist auslösend vorfallbeteiligt. Rechts: Modul ist passiv vorfallbeteiligt.

Wenn hingegen eine detaillierte QRA als Datenquelle herangezogen wird, hat der **Vorfall oder das Ereignis in Fehlerbäumen und Ereignisabläufen oft eine höhere Granularität als das untersuchte Modul** (Abb. 23). Dem Modul werden dann grundsätzlich alle Auswirkungen zugewiesen, die es im Fehlerbaum oder Ereignisablauf auslösend oder – bei passiver Vorfallbeteiligung – aufgrund seiner bestimmungsgemäßen Eigenschaften bedingt. Die speziellen Zuordnungsregeln des angewandten Zuordnungsansatzes sind zu beachten.

Diese **Zuordnung ist in der Praxis oft erleichtert**, z. B. wenn das Vorfallmodell zwar detaillierter ist als das Modul, aber alle Auslöser und betroffenen Prozesse innerhalb dieses einen Moduls liegen und die Zielsetzung der Studie nur an den Auswirkungen auf Ebene des Moduls interessiert ist. In derartigen Fällen kann der Vorfall als ein einziges Ereignis betrachtet werden und die Notwendigkeit einer differenzierten Zuordnung entfällt.

### **Verwendung wenig spezifischer Vorfalldatenbanken und -statistiken**

In Statistiken und Vorfallberichten sind die **vorfallbeteiligten Prozesse und Produkte nicht immer genau spezifiziert**: Zum Beispiel mag angegeben sein, dass ein Tanklastzug mit „Kraftstoff“ verunglückt und die Ladung ausgelaufen ist. Ob es sich hierbei um Benzin oder Diesel handelt, mag nicht angegeben sein und insbesondere bei Statistiken mangels weiterer Informationen auch nicht anderweitig ableitbar sein. In der LVA sind allerdings die Auswirkungen auf die vorfallbeteiligten Prozesse unter Anwendung von Formel (i) quantitativ aufzuteilen (hier: den Transport von Diesel oder den Transport von Benzin). Diese Zuordnung

<sup>92</sup> Dieser Fall bezieht sich auf Module von im untersuchten Lebensweg nicht direkt miteinander verknüpften Prozessen, z. B. Transportprozesse unterschiedlicher Stoffe, im Gegensatz zu unterschiedlichen Raffinerieprodukten, die im selben Standort oder Prozesssystem produziert werden. Im letztgenannten Fall handelt es sich um Multifunktionalität und die Regeln der Ökobilanzierung kommen zur Anwendung.



kann dann nach anderen geeigneten Kriterien erfolgen, diese sind zu dokumentieren<sup>93</sup>. Im vorliegenden Fall kann ein geeignetes Kriterium die relative Menge des im jeweiligen Land verbrauchten Benzins und Diesels sein. Sind beispielsweise 2/3 des nationalen Kraftstoffverbrauchs Diesel, kann die Eintrittshäufigkeit derartiger Unfälle zu 2/3 dem Diesel- und zu 1/3 dem Benzintransport zugeordnet werden<sup>94</sup>. Ähnliches gilt für die eigenschaftsbedingten passiv vorfallbeteiligten Prozesse.

Dieses Vorgehen ist gleichartig gültig für den Beteiligungsansatz und für den Verbesserungspotenzial-Ansatz.

### **Kausale und deskriptive Vorfallinformationen**

In der Anwendung der Methode und zur Unterstützung beim Aufbau wiederverwertbarer Vorfalldatenbanken ist die **Dokumentation weiterer kausaler und deskriptiver Vorfallinformationen** wichtig. Dies wird in Kap. 5.8 und im Anhang D beschrieben.

## 5.5.3 Vorfallsystem – Datensammlung und Modellierung

### **Kapitelübersicht**

Der hier eingeführte Objekttyp "**Vorfallsystem**" dient dazu, den Vorfall einschließlich Folgeaktivitäten abzubilden und die direkten und indirekten Auswirkungen zu modellieren, um ein zur Ökobilanz kompatibles Vorfallsachinventar zu erhalten.

Das Vorfallsystem enthält **mindestens einen Einheitsvorfall**, der als zentraler Einheitsvorfall das Vorfallsystem mittels eines Ereignisses an das jeweils untersuchte vorfallbeteiligte Modul anbindet und grundsätzlich skaliert. Im Fall von **Folgeunfällen** enthält das Vorfallsystem weitere Einheitsvorfälle, die am zentralen Einheitsvorfall über Ereignisse angebunden sind.

Jeder Einheitsvorfall kann zudem über die im Vorfallsachinventar enthaltenen Produktflüsse innerhalb des Vorfallsystems beliebig viele Module oder ganze Produktsysteme anbinden, die die **Vorfallfolgeaktivitäten** abbilden.

---

<sup>93</sup> Als Beispiel sei angenommen, dass Unfallstatistiken für Straßengütertransporte von Gefahrstoffen nicht weiter differenziert vorliegen, das untersuchte Modul sich allerdings auf Chlortransporte bezieht. Die Unfallhäufigkeit kann dann z. B. per gefahrenem Transport-km von Chlortransporten im Vergleich zu anderen Gefahrguttransporten verteilt werden.

<sup>94</sup> Die Grenzen derartiger Aufteilungen illustriert eine angenommene Unfallvariante der oben genannten Situation, bei der Brände im Unfallkontext geschehen, deren Häufigkeit und Schwere als häufiger für den Benzintransport angenommen werden kann, aufgrund des niedrigeren Flammpunktes von Benzin. Derartige Aufteilungen erhöhen also die Unsicherheit der Vorfallsachinventare.

Die **Modellierung detaillierter Ereignisabläufe** (d. h. über Folgeunfälle hinaus) innerhalb des Vorfallsystems ist **nicht vorgesehen**, wie in Kap. 5.2.2 motiviert worden war.

### **Module und Produktsysteme innerhalb von Vorfallsystemen**

Die in den Einheitsvorfallsachinventaren inventarisierten **Produkt- und Abfallflüsse** werden im Vorfallsystem vollends modelliert. Dabei ist zu beachten, dass **Vorfallszenarien** jeweils in einem eigenen Vorfallsystem modelliert werden<sup>95</sup>.

Die Modellierung und spätere Aggregation erfolgen mittels der Sachbilanzmethoden der Ökobilanzierung<sup>96,97</sup>.

Abb. 24 zeigt schematisch den Aufbau eines Vorfallsystems in den drei Hauptvarianten:

- **Vollständige Variante** mit einem zentralen Einheitsvorfall und Folgeunfällen sowie Produktsystemen, die Vorfollfolgeaktivitäten abbilden<sup>98</sup>, obere Grafik.
- **Einfachere Variante** mit nur einem zentralen Einheitsvorfall und dessen vorfallbedingten Produktsystemen. Es gibt keine Folgeunfälle oder derart komplexe Vorfälle sind in diesem Einheitsvorfall bereits zusammengefasst, Grafik unten links.
- **Einfachste Variante** mit einem zentralen Einheitsvorfall, in dessen Vorfallsachinventar bereits alle Vorfallauswirkungen als Elementarflüsse erfasst sind. Dies kann ein Vorfall ohne Folgeaktivitäten und -unfälle sein oder ein bereits aggregiertes Vorfallsystem, also ein Vorfallsachbilanz-Ergebnis (hierzu siehe Kap. 5.5.4), Grafik unten rechts.

---

<sup>95</sup> Eine informationstechnische Anbindung von FBA und EEA, sowie von QRA-Simulationen an die LVA würde die Methodenanwendung deutlich erleichtern.

<sup>96</sup> Zu beachten ist hierbei, dass Module und Produktsysteme, deren "Aktivierung" durch den Vorfall bedingt werden, notwendigerweise Teil des Vorfallsystems und dadurch Teil der Vorfallsachbilanzinventare werden.

<sup>97</sup> Heilbehandlungen verletzter Menschen sind nicht Teil der Vorfollfolgeaktivitäten, da auch bei der Ökobilanzierung das Gesundheitswesen nicht inbegriffen ist (methodische Konsistenz), sondern über die Bewertung/Gewichtung implizit mit abgedeckt werden kann. Die Einbeziehung von solchen indirekten Folgen von direkten Personenschäden könnte aber eine sinnvolle Erweiterung in beiden „Welten“ sein, siehe Kap. 8.

<sup>98</sup> Die Module der Produktsysteme in Vorfallsystemen können selbst wieder Vorfälle erleiden. Solche Vorfälle höherer Ordnung werden hier mangels quantitativer Relevanz jedoch ausgeklammert. Die Relevanz solcher Vorfälle ist in erster Näherung nur ein kleiner Bruchteil der Relevanz der Vorfälle erster Ordnung, da sich deren Eintrittshäufigkeiten mit denen der Vorfälle erster Ordnung multiplizieren. Zu unterscheiden von solchen Vorfällen höherer Ordnung, die unabhängig vom untersuchten Vorfall stattfinden, sind Folgeunfälle, die im kausalen Kontext des erfassten Vorfalles stehen und im Vorfallsystem grundsätzlich einbezogen werden.

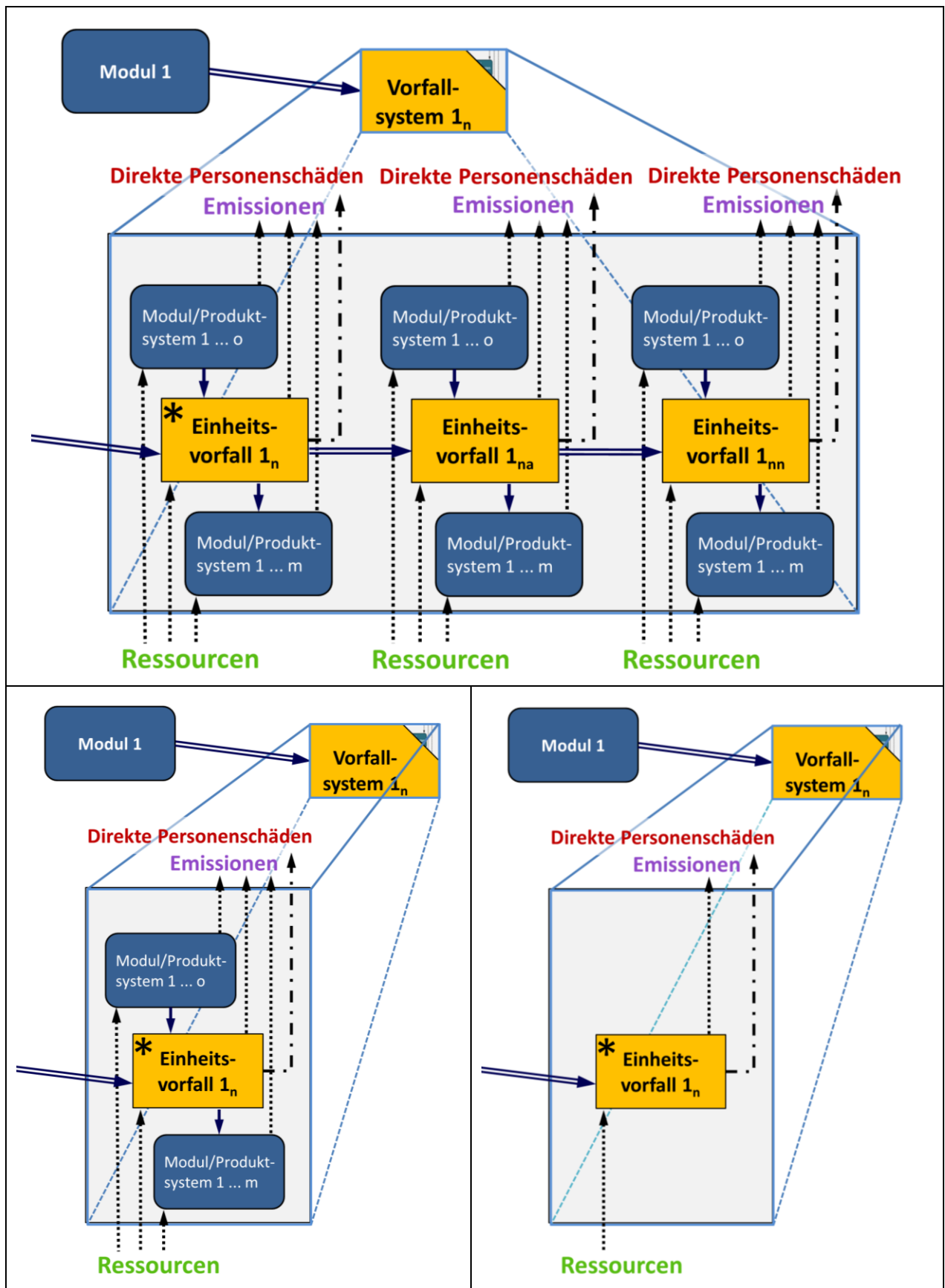


Abb. 24. Vorfallsystem mit Einheitsvorfällen, Produktsystemen innerhalb des Vorfallsystems, Ereignissen, Interventionen mit der Umwelt (Emissionen, Ressourcenentnahme und -inanspruchnahme) sowie direkten Personenschäden (einschließlich vorfallbedingter Berufskrankheiten), schematisch. Der zentrale Einheitsvorfall ist jeweils mit einem \* gekennzeichnet. Drei Varianten unterschiedlicher Komplexität. Weitere Erläuterungen siehe Text.

## Ereignisse im Sachinventar der Module des Lebenswegnetzes

Da das Ereignis dazu dient, den Vorfall an das vorfallbeteiligte Modul des untersuchten Produktsystems anzubinden, muss der neue Objekttyp Ereignis auch in den Modulen des untersuchten Lebensweges verwendet werden. Ein vorfallbeteiligtes Modul kann dabei im Sachinventar **beliebig viele Ereignisse im Output** enthalten. Jedes Ereignis identifiziert genau einen spezifischen Vorfall, ein Vorfallszenario oder einen eine Mehrzahl an Vorfällen mittels Schadensraten zusammenfassenden Vorfall. Daneben umfasst das **Sachinventar des Moduls**  $\vec{M}$  nach-wie-vor die aus der Ökobilanz bekannten Produktflüsse und Interventionen mit der Umwelt:

$$\text{Formel (q)} \quad \vec{M} = \begin{pmatrix} \vec{F}_P \\ \vec{F}_I \\ \vec{E} \end{pmatrix}$$

Mit

$\vec{F}_P$  : Vektor der Produkt- und Abfallflüsse

$\vec{F}_I$  : Vektor der Interventionen mit der Umwelt

$\vec{E}$  : Vektor der Ereignisse

## Skalierung Vorfallssystem zum vorfallbeteiligten Modul

Bei Vorfällen sind **mindestens drei Faktoren** bei der Skalierung relativ zu den vorfallbeteiligten Modulen zu berücksichtigen:

- die zuvor behandelte **Eintrittshäufigkeit** des Vorfalls
- das **Verhältnis der quantitativen Referenz** des zentralen Einheitsvorfalls (d.h. des vorfallbeteiligten Realprozesses) zu derjenigen des vorfallbeteiligten Moduls
- der **Zuordnungsfaktor** (d.h. die Aufteilung) der individuellen Flüsse im Einheitsvorfall zum jeweiligen vorfallbeteiligten Modul

Man erhält das **skalierte Vorfallsachinventar des zentralen Einheitsvorfalls** als:

$$\text{Formel (r)} \quad \vec{V}_{Zs} = \vec{V}_Z \cdot \mu_Z \cdot R_M / R_V \cdot \vec{A}_Z$$

Mit

$\vec{V}_Z$  : Vorfallsachinventar des zentralen Einheitsvorfalls

$\mu_Z$  : Eintrittshäufigkeit (i. d. R. Anzahl Ereignisse pro Jahr) des zentralen Einheitsvorfalls

$R_M$  : Referenzgröße des vorfallbeteiligten Moduls (meist Referenzflussmenge)

$R_V$  : Referenzgröße des vorfallbeteiligten Realprozesses/Vorfalls (meist Jahresproduktion des Referenzflusses des Moduls oder andere Leistungsangabe im vorfallbeteiligten Realprozess)

$\vec{A}_Z$  : Vektor der Zuordnungsfaktoren der individuellen Flüsse des zentralen Einheitsvorfalls; siehe Formel (i)

Der Ausdruck  $\mu_Z \cdot R_M / R_V$  kann dabei auch als **Vorfalskalierungsfaktor** verstanden werden.

Ein **Beispiel**: Die Eintrittshäufigkeit eines bestimmten Vorfalls einer Papierproduktionsanlage sei  $1,5 \cdot 10^{-2}$  Jahre. Die Referenzgröße des Moduls, das den vorfallbeteiligten Prozess abbildet, sei z. B. der Referenzfluss 1 kg Recyclingdruckerpapier. Als Referenzgröße dieses Vorfalls wird geeignet die Anlagenjahresproduktion<sup>99</sup> des Referenzflusses des Moduls im vorfallbeteiligten Realprozess festgelegt. Im vorliegenden Fall mögen das 120.000 Jahrestonnen dieses Recyclingdruckerpapiers sein. Zudem seien dem Herstellungsprozess des Recyclingdruckerpapiers als mitauslösendem Prozess gemäß dem Vorgehen in Kap. 5.4.5 gemäß Formel (i) z. B. 0,275 Anteile aller Flüsse des Vorfalls zugeordnet worden. Das Vorfallsachinventar ist in diesem Beispiel mit einem Vektor zu multiplizieren, der für alle Flüsse denselben Wert  $1,5 \cdot 10^{-2} [\text{a}^{-1}] \cdot 1 [\text{kg}] / 120.000 [\text{t/a}] \cdot 1/1000 [\text{kg/t}] \cdot 0,275 = 3,44 \cdot 10^{-11} [-]$  enthält und für alle ggf. existierenden Ereignisse von Folgeunfällen immer = 0 ist. D. h. gut drei 100-Milliardstel der Wirkungen des hier erfassten Vorfalls werden dem vorfallbeteiligten Modul und damit jedem kg des produzierten Recyclingdruckerpapiers zugeordnet. Der Vektor  $\vec{A}_Z$  kann aber auch individuelle Werte je Fluss tragen, wenn eigenschaftsbedingte Zuordnungsfaktoren für passiv vorfallbeteiligte Prozesse ermittelt worden sind.

### Vorfälle und Folgeunfälle

Das Vorfallsystem erlaubt es, mehrere Vorfälle oder komplexe Vorfälle mit Folgeunfällen abzubilden. Dieses Vorgehen ist auch notwendig, um mehrere ähnliche Vorfälle zusammen zu fassen.

---

<sup>99</sup> Jahresproduktion *per conventionem*, da Vorfallhäufigkeiten in der QRA meist in Anzahl pro Jahr angegeben werden.

**Folgeunfälle** werden dabei andersartig skaliert als die zentralen Einheitsvorfälle, wie bereits erwähnt: Die **Eintrittshäufigkeit** ist nicht in absoluter Anzahl an Ereignissen pro Jahr, sondern in relativer Anzahl an Ereignissen **je Eintrittsfall des direkt vorhergehenden zentralen Einheitsvorfalls oder Folgeunfalls** anzugeben. Auch ist eine Anpassung der quantitativen Referenzen nicht notwendig, da die Skalierung zum Modul indirekt über den zentralen Einheitsvorfall geschieht.

Man erhält demnach für das **skalierte Vorfallsachinventar eines direkt auf den zentralen Einheitsvorfalls folgenden Folgeunfalls**:

$$\text{Formel (s)} \quad \vec{V}_{Fs} = \vec{V}_F \cdot \mu_Z \cdot R_M / R_V \cdot \mu_F \cdot \vec{A}_F$$

Mit

$\vec{V}_F$  : Vorfallsachinventar eines direkt auf den zentralen Einheitsvorfall folgenden Folgeunfalls

$\mu_Z$  : Eintrittshäufigkeit (i. d. R. Ereignisse pro Jahr) des zentralen Einheitsvorfalls

$R_M$  : Referenzgröße des vorfallbeteiligten Moduls (meist Referenzflussmenge)

$R_V$  : Referenzgröße des vorfallbeteiligten Realprozesses/Vorfalls (z. B. Jahresproduktion des Referenzflusses des Moduls oder andere Leistungsangabe im vorfallbeteiligten Realprozess)

$\mu_F$  : Relative Eintrittshäufigkeit des Folgeunfalls bei Eintritt des zentralen Einheitsvorfalls

$\vec{A}_F$  : Vektor der Zuordnungsfaktoren der individuellen Flüsse des Folgeunfalls

In **Erweiterung des vorhergehenden Beispiels** der Papierherstellung sei angenommen, dass diesem Prozess auch ein Folgeunfall mit einer relativen Eintrittshäufigkeit von 0,05 zugeordnet worden ist. Das Vorfallsachinventar des Folgeunfalls ist dann zu skalieren mit einem Vektor, der für alle Flüsse den Wert  $1,5 \cdot 10^{-2} [\text{a}^{-1}] \cdot 1 [\text{kg}] / 120.000 [\text{t/a}] \cdot 1/1000 [\text{kg/t}] \cdot 0,05 \cdot 0,275 = 1,72 \cdot 10^{-12} [-]$  enthält.

Bei weiteren Folgeunfällen im Anschluss an den ersten Folgeunfall wird die Skalierung analog erweitert.

### **Korrektur für Produktverbleibe bei Folgeunfällen**

Bei den Vorfallsachinventaren von Folgeunfällen ist eine **Besonderheit** zu beachten: Oft **modifizieren Folgeunfälle** die Menge und Art von bereits im zentralen Einheitsvorfall (oder in

einem vorhergehenden Folgeunfall bei längeren Folgeunfallketten) erfassten Schädigungen von Vermögenswerten oder Stofffreisetzungen.

Ein **Beispiel** ist die angenommene Freisetzung von Benzin aus einem Benzintransporter-Verkehrsunfall. Wenn in diesem Unfall 10.000 [l] Benzin ausgelaufen sind, stehen diese 10.000 [l] Benzin zunächst im Output des zentralen Einheitsvorfalls. Es sei ferner angenommen, dass sich das ausgelaufene Benzin in 1 von 10 Fällen entzündet ( $\mu_F = 0,1$ ). Dieser Folgeunfall ist demnach über ein Ereignis an den zentralen Einheitsvorfall angebunden und nicht als Stoffumwandlungsprozess über einen Teilfluss des ausgelaufenen Benzins. Der Folgeunfall wandelt das Benzin in dessen Verbrennungsprodukte um. Da der Folgeunfall aber nur in 1 von 10 Fällen auftritt, müssen die Benzinmengen so angepasst werden, dass insgesamt im Vorfallsystem effektiv 9.000 [l] Benzin unverbrannt auslaufen (und diese in die Atmosphäre, Gewässer oder das Erdreich gelangen) und 1.000 [l] verbrennen. Dies kann erreicht werden, indem im Output des Vorfallsachinventars des zentralen Einheitsvorfalls die Menge des ausgelaufenen Benzins um die im Folgeunfall verbrannte Menge ( $= f_{P_i} \cdot \mu_F$  mit  $f_{P_i}$  als der Produktfluss des jeweiligen Produktes, hier Benzin) reduziert wird. Im vorliegenden Fall erhält man  $10.000 [l] - (10.000 [l] \cdot 0,1) = 9.000 [l]$ . Alternativ kann der Stoffverbleib des unverbrannt ausgelaufenen Benzins als komplementärer Folgeunfall mit  $\mu_F = 0,9$  modelliert werden, dann entfällt die Notwendigkeit der Mengenanpassung.

### **Erweiterte Skalierungsoptionen**<sup>100</sup>

Zusätzlich ist vorzusehen, dass die **Referenzgrößen des Vorfalls und des vorfallbeteiligten Moduls in unterschiedlichen Größen und/oder Maßeinheiten** vorliegen, z. B. in [m<sup>3</sup>] Volumen die eine und in [kg] Masse die andere. Dies erfordert eine zusätzliche Umrechnung, die voraussetzt, dass die Größenrelationen – hier die volumetrische Dichte des referenzierten Materials – bekannt sind<sup>101</sup>.

---

<sup>100</sup> Ein weiterer, hier nicht adressierter, Zuordnungsfaktor  $\in [0, 1]$  würde die Übertragung seltener Vorfälle auf ähnliche Prozesse skalieren, entsprechend der Übertragbarkeit. Dies wurde am Ende von Kap. 5.4.5 vorgeschlagen und in den Ausblick verwiesen.

<sup>101</sup> Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden können, dass das Ausmaß eines Vorfalles von der Anlagengröße abhängen kann (z. B. der Menge des in einem verunfallten Batch-Prozess vorhandenen Materials). Ferner kann es in der Praxis relevant sein zu berücksichtigen, dass Anlagen unterschiedlicher Größe eine unterschiedliche Häufigkeit desselben Vorfalldtyps haben können, z. B. aufgrund unterschiedlichen Aufwandes für die Unfallvermeidung.

Weiterhin ist es sinnvoll, das Vorfallsachinventar über einen weiteren Skalierungsfaktor anzupassen, wenn das **Schadenspotenzial** des vorfallbeteiligten Realprozesses von dem des Prozesses abweicht, der dem Modul zugrunde liegt.

Mit diesen beiden Faktoren erhält man eine **erweiterte Skalierung** – hier für den zentralen Einheitsvorfall – als:

$$\text{Formel (t)} \quad \vec{V}_{Zs} = \vec{V}_Z \cdot \mu_Z \cdot R_M / R_V \cdot \vec{A}_Z \cdot b \cdot c$$

Zusätzlich zu Formel (r) mit

$b$  : Größen- und Einheitsumrechnungsfaktor zwischen Referenzgröße Vorfall und Modul

$c$  : Schadenspotenzial-Anpassungsfaktor. Verwendet bei Übertragung von Vorfalldaten auf ähnliche Prozesse aber mit unterschiedlichem Schadenspotenzial

Denkbar sind darüber hinaus **differenzierte Anpassungen** für einzelne Interventionen, direkte Personenschäden oder Vorfallfolgeaktivitäten bei der Übertragung von Vorfalldaten auf ähnliche Prozesse und Produkte. In derartigen Fällen wird kann  $b$  auch ein Vektor sein. Dies wird hier nicht weiter ausgeführt.

#### 5.5.4 Durchschnittsbildung und Vorfallsachbilanz-Ergebnisse

##### Kapitelübersicht

Verschiedene **Formen und Stufen von horizontaler Durchschnittsbildung und vertikaler Aggregation** führen vom zentralen Einheitsvorfall hin zur aggregierten Vorfallsachbilanz des untersuchten Produktsystems. Abb. 25 zeigt die wichtigsten Stufen vertikaler Aggregation im Überblick.

##### Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Vorfallsystems

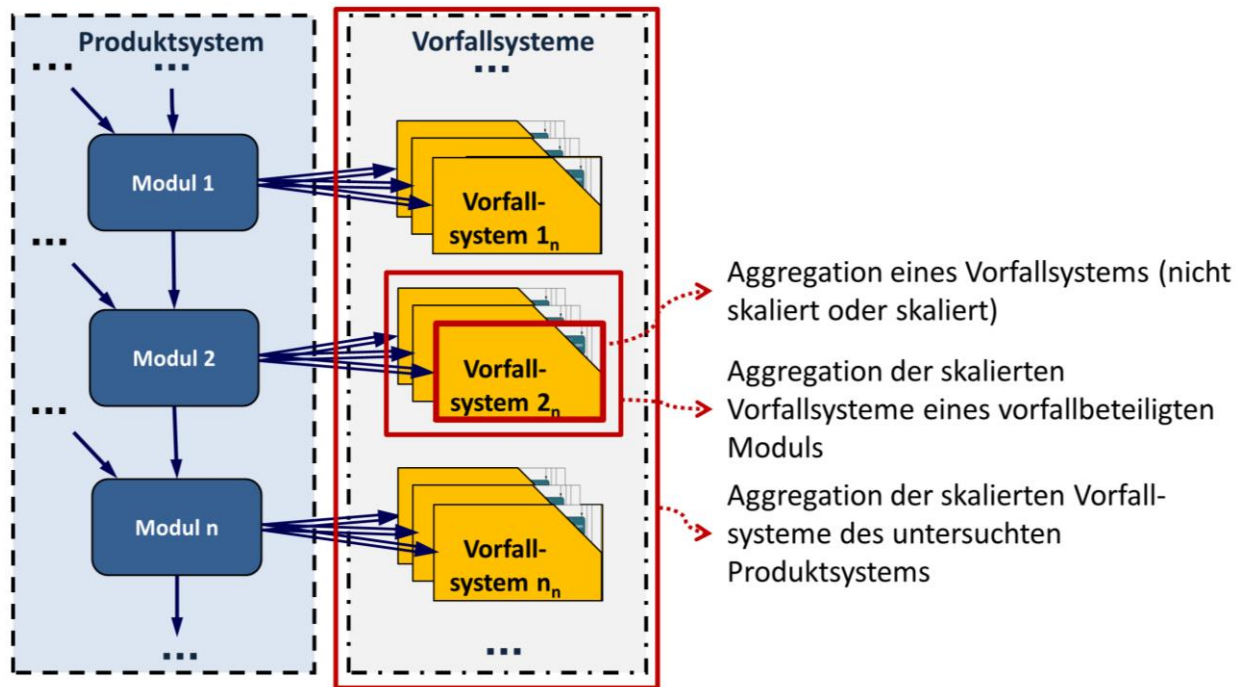
Der **erste Aggregationsschritt** der Vorfallsysteme auf dem Weg zur lebenswegbezogenen Vollaggregation ist die Berechnung vertikal aggregierter Vorfallsachbilanz-Ergebnisse individueller Vorfallsysteme<sup>102</sup>: Bei der vertikalen Aggregation werden die Vorfallsachinventare und die Sachinventare von in den Vorfallsystemen enthaltenen Modulen mittels Ökobilanz-

---

<sup>102</sup> Dies ist ferner hilfreich, um Vorfallsachbilanzergebnisse bei der Modellierung umfangreicherer Produktsysteme als wiederverwendbare Bausteine vereinfacht zugänglich zu machen. Der damit verbundene Leistungsgewinn an Berechnungsgeschwindigkeit und nicht zuletzt die Wahrung von Geheimhaltungsinteressen beim Aufbau von Vorfalldatenbanken sind dafür wesentliche Gründe.



methodik summiert. Alle Zwischenproduktflüsse und vorfallssysteminterne Ereignisse werden dabei analog zum Vorgehen in der Ökobilanz aufgerechnet, d. h. entfernt (siehe [Volz 1999], [Pfleiderer 1998]). Sofern die vorfallbedingten Produktsysteme vollständig modelliert sind, verbleiben neben dem zentralen Ereignis ausschließlich Elementarflüsse in der resultierenden Vorfallsachbilanz.



**Abb. 25. Wichtigste Stufen vertikaler Aggregation vom Vorfallssystem bis zum Vorfallsachbilanz-Ergebnis des untersuchten Produktsystems, schematisch. Erläuterungen siehe folgender Text.**

### Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Moduls

Die Vorfallsachinventare aller das jeweilige Modul betreffenden Vorfälle müssen zusammengefasst werden. Dies ist ein **Zwischenschritt** auf dem Weg zur weiteren Aggregation bezogen auf das untersuchte Produktsystem, ermöglicht aber auch den direkten Vergleich mehrerer Prozesse gleicher Leistung und dient dem Aufbau von LVA-Datenbanken.

Das **Vorfallsachbilanz-Ergebnis eines vorfallbeteiligten Moduls** kann **nur ein einzelnes ausgewähltes Vorfallssystem** umfassen, **alle zugeordneten Vorfallssysteme** oder aber die Vorfallssysteme können z. B. **nach Vorfalltyp gruppiert zusammengefasst** sein (z. B. alle Tankerkollisionen ohne Feuer, alle Tankerkollisionen mit Feuer, alle Tankeruntergänge ohne Kollision usw. oder alle Unfälle, alle Terrorismus- und Sabotageaktivitäten usw.). Die jeweilige Aufteilung richtet sich nach dem Erkenntnisinteresse. Im Folgenden wird das allgemeine Vorgehen beschrieben.

Das **Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Moduls** wird wie folgt ermittelt: Zunächst werden die Einheitsvorfälle, die das vorfallbeteiligte Modul mit den zusammenzufassenden Vorfallsystemen verbinden, entsprechend Formel (r) in Bezug auf den Referenzfluss des vorfallbeteiligten Moduls skaliert. Anschließend werden – wie bei der Errechnung der Vorfallsachbilanz des Vorfallsystems – alle entsprechend skalierten Inventare summiert. Dabei werden alle verbundenen Produktflüsse im Vorfallsystem analog zum Vorgehen in der Ökobilanz aufgerechnet, d. h. entfernt (siehe [Volz 1999], [Pfleiderer 1998]). Ebenso werden alle verbundenen Ereignisse im Vorfallsystem entfernt. Das Ergebnis ist die Vorfallsachbilanz des Moduls, bezogen auf dessen Referenzgröße. Sie enthält ausschließlich Emissionen, Ressourcenflüsse und direkte Personenschäden sowie jegliche in den Vorfallsystemen ggf. nicht vollständig modellierten Ereignisse und Produkt- und Abfallflüsse (analog zu teilaggregierten Datensätzen in der Ökobilanzierung).

Als **weiteren Zwischenschritt** der vollständigen Aggregation wird die Vorfallsachbilanz des Moduls entsprechend der Skalierung des Modus im untersuchten Produktsystem skaliert, in Analogie zum Vorgehen in der Ökobilanzierung ([Volz 1999])<sup>103</sup>. Damit erhält man die Vorfallsachinventare in der richtigen Mengenrelation zum vorfallbeteiligten Modul, d.h. wie dieses im Produktsystem skaliert ist.

Als weiterer Schritt der Aggregation der Vorfälle steht noch die vollständige Aggregation über alle Module des untersuchten Produktsystems aus:

### **Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Produktsystems**

Zum Vergleich kompletter Lebenswege von Produkten oder zur Bereitstellung von Vorfallsachbilanzen dieser Produkte in Vorfalldatenbanken müssen alle Vorfälle aller im Produktsystem enthaltenen Module bezogen auf die Referenzgröße des finalen Produktes des Produktsystems zusammengefasst werden. Man erhält das Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Produktsystems. Dieser **letzte Aggregationsschritt** erfolgt wiederum analog zur Aggregation der Sachinventare von Modulen in der Ökobilanzierung, Berechnungsvorschriften siehe [Volz 1999] und [Pfleiderer 1998].

Genau wie beim Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Moduls kann man als **Varianten** bei der Aggregation des Vorfallsachbilanz-Ergebnisses des Produktsystems entweder alle Vorfall-

---

<sup>103</sup> Ein Beispiel: Das Modul des Stahlreduktionsofens sei auf 1 [kg] skaliert. Wenn im untersuchten Produktsystem z. B. bei der Herstellung eines Kühlschranks 7,65 [kg] diesen Stahls benötigt werden, ist der Skalierungsfaktor 7,65.

systeme einbeziehen oder man kann diese je nach Erkenntnisinteresse nach Vorfalltyp separat aggregieren (z. B. alle Tankerkollisionen, alle Feuer auf Tanker, alle Tankeruntergänge usw. oder alle Unfälle, alle Terrorismus- und Sabotageaktivitäten usw.).

### Durchschnittsbildung von Modulen

Um **durchschnittliche oder anonymisierte Einheitsvorfälle** zu erhalten, werden die Vorfallsachinventare mehrerer ähnlicher Vorfälle gemittelt – gewichtet anhand deren Eintrittshäufigkeiten.

Die Eintrittshäufigkeiten selbst und die Referenzgrößen der Vorfälle werden linear gemittelt<sup>104,105</sup>.

Dieser Schritt ist **analog zur horizontalen Durchschnittsbildung in der Ökobilanzierung**, siehe z. B. [Volz 1999] und [Pfleiderer 1998] sowie [Broadbent et al. 2011] – siehe dort auch Abb. 3.1 und 3.2 hinsichtlich verschiedener Stufen der Durchschnittsbildung und Aggregation in der Ökobilanzierung.

## 5.5.5 Lösen der Multifunktionalität von Prozessen bei *attributional* Modellierung

### Einleitung

Die quantitative Zuordnung der Vorfallauswirkungen zu den vorfallbeteiligten Modulen (Kap. 5.4.5) bezieht sich auf das Modul als Ganzes. Oft haben Module aber **mehr als eine Funktion (z. B. Koproducte)**. Da von den Modulen meist nur eine der Funktionen Teil des untersuchten Produktlebensweges ist, sind die Vorfallauswirkungen geeignet den einzelnen Kofunktionen zuzuordnen. Dies geschieht im vorfallbeteiligten Modul im Lebenswegmodell des untersuchten Produktsystems.

Die Unterteilung von Modulen und die **Substitution/Systemraumerweiterung als die ersten beiden Schritte zur Lösung multifunktionaler Prozesse** laut [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] (Details siehe [European Commission - JRC-IES 2010a]) betreffen die Systemgrenzen der

---

<sup>104</sup> Unterscheiden sich die quantitativen Referenzen hinsichtlich Größe und/oder Einheit, müssen diese selbstverständlich zunächst auf dieselben Größe und Einheit gebracht werden.

<sup>105</sup> Die Mittelung von Vorfällen stark unterschiedlicher quantitativer Referenzen reduziert die Repräsentativität des Vorfallsachinventars bei der Verwendung für spezifische Prozesse. Auch relevante Unterschiede des Schadenspotenzials des verunfallten Prozesses/Anlage verringern die Repräsentativität der gemittelten Vorfallauswirkungen.

einbezogenen Module. Da sich jedoch keine Unterschiede zum Vorgehen in der Ökobilanzierung ergeben, wird dies in der vorliegenden Arbeit nicht weiter vertieft.

**Bei Nichtanwendbarkeit dieser beiden ersten Schritte** werden die Vorfallauswirkungen zwischen den Kofunktionen geeignet aufgeteilt, d.h. **alloziert**. Dies bedarf einiger vorfallspezifischer Erläuterungen und wird daher an dieser Stelle behandelt<sup>106</sup>:

### **Allokationsansätze in der LVA**

Laut [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und [European Commission - JRC-IES 2010a] werden Umweltlasten bei der Allokation anhand eines geeigneten Allokationsschlüssels zwischen den Kofunktionen der Module aufgeteilt. Dies gilt gleichartig für Vorfallauswirkungen.

Prioritär ist dabei die Aufteilung anhand der **physikalischen Kausalität der Umweltlasten anzuwenden**. Übertragen auf Vorfälle heißt dies, dass anhand der Variation der Mengenverhältnisse der Modulfunktionen (soweit technisch grundsätzlich möglich) die physikalische Kausalität der einzelnen Kofunktionen beim Zustandekommen der Vorfallauswirkungen ermittelt und die Auswirkungen der Vorfälle anhand dieser kausalen Beziehung aufgeteilt werden.

Ein **Beispiel** sind Feuer in Lagerhallen unterschiedlicher Güter bei Anwendung des vollständigen oder des Basis-Beteiligungsansatzes: Die materialspezifischen Emissionen werden anhand der Materialzusammensetzung der jeweiligen Güter aufgeteilt und damit sehr exakt möglich.

Diese Aufteilung ist dabei gleichwertig zur quantitativen Zuordnung von Vorfallauswirkungen anhand der **Eigenschaften der Güter** in Kap. 5.4.5. Dies ist zudem gleichwertig zur **virtuellen Unterteilung von Modulen in der Ökobilanzierung** (worauf [European Commission - JRC-IES 2010a] ebenfalls hinweist) und damit zum Vorgehen bei größerer Granularität der Module im Vergleich zu den Einheitsvorfällen wie in Kap. 5.5.2 beschrieben.

Vollständig analog zur Ökobilanzierung ist die Aufteilung in den nächsten Schritten der Allokationshierarchie: Können keine geeigneten kausalen physikalischen Zusammenhänge ermittelt werden, können **andere physikalische Kriterien** herangezogen werden, z. B. Masse oder Volumen der Produkte, Dauer von Kodienstleistungen u. a.

---

<sup>106</sup> Diese nicht direkt intuitive Aufteilung rührt daher, dass Unterteilung und Substitution/Systemraumerweiterung Teil der grundlegenden Lebenswegmodellierung sind und u. a. die grundlegenden Datenaufnahmefunktionen und die einzubeziehenden Module betreffen. Allokation ist dagegen ein nachgeschalteter Schritt, der erst erfolgen kann, wenn das Modell erstellt worden ist.

Ein **Beispiel** sind Feuer in Raffinerien mit den Vorfalldaten aus statistischen Quellen, zu denen keine näheren kausalen Angaben verfügbar sind: Die ermittelten oder geschätzten Auswirkungen dieser Feuer können z. B. nach „Jahresproduktionsmenge\*Heizwert“ der einzelnen Raffinerieprodukte auf diese aufgeteilt werden.

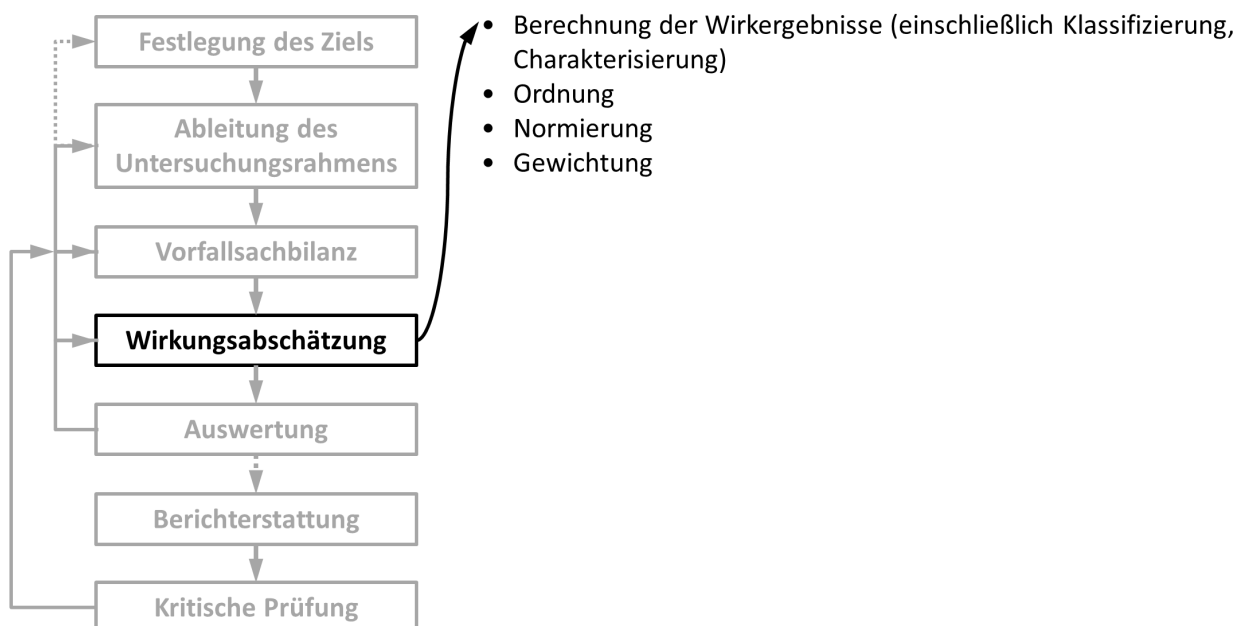
Haben die Kofunktionen keine gemeinsamen und geeigneten physikalischen Eigenschaften, können als letzte Option **andere Eigenschaften** herangezogen werden. In der Ökobilanzierung ist dies oft der **Marktpreis** der Kofunktionen.

Ein **Beispiel** ist der Abbau gemischter Erze, z. B. Blei-Silbererz. Vorfallauswirkungen werden hier anhand der Marktwerte der Koprodukte aufgeteilt und nicht anhand deren Masse oder anderer physikalischer Eigenschaften.

## 5.6 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung in der Ökobilanzierung dient dazu, die **Umweltbelastungen in Form von Interventionen in Wirkpotenzialen** auszudrücken und dabei zugleich die große Anzahl an Elementarflüssen durch Aggregation auf wenige Wirkkategorien zu reduzieren. Dies erleichtert maßgeblich die Interpretation, Entscheidungsunterstützung und Kommunikation der Ergebnisse.

Die Wirkungsabschätzung umfasst laut [European Commission - JRC-IES 2010a] die folgenden Elemente, siehe Abb. 26:



**Abb. 26.** Hauptschritte der Wirkungsabschätzung in der LVA. Die drei letztgenannten Elemente sind optional laut [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und [European Commission - JRC-IES 2010a].

Die in [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] zusätzlich genannte optionale Komponente „Zusätzliche Analyse der Datenqualität“ wird in [European Commission - JRC-IES 2010a] an anderer Stelle adressiert.

### **Berechnung der Wirkergebnisse**

Die Berechnung der Wirkergebnisse aus den Interventionen mit der Umwelt erfolgt **identisch zur Ökobilanzierung** und mittels der in Kap. 3.1.1 genannten Methoden.

**Direkte Personenschäden** werden mittels des **DALY-Ansatzes** in Wirkergebnisse überführt (siehe Kap. 3.1.3).

### **Durchführung der Ordnung, Normierung und der Gewichtung**

Die laut [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] **optionalen Schritte** der Wirkanalyse sind Ordnung, Normierung und Gewichtung. Insbesondere Normierung und Gewichtung helfen, Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse auf Ebene der unterschiedlichen Umweltthemen wie Klimaveränderung, Versauerung usw. nach Relevanz gewichtet zusammenzufassen.

Die wenigen Unterschiede zum Vorgehen in der Ökobilanzierung wurden bereits in Kap. 5.4.7 adressiert.

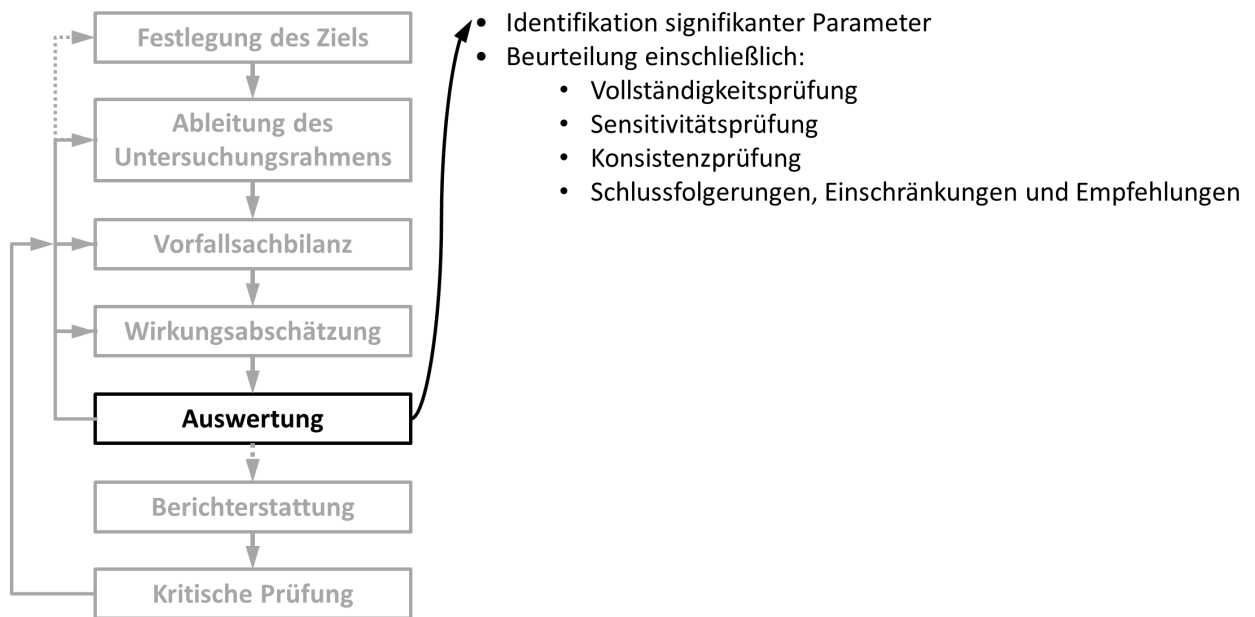
## **5.7 Auswertung**

Ziele der Auswertung sind laut [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und [European Commission - JRC-IES 2010a] die auf den Befunden der bereits abgeschlossenen Phasen der Ökobilanz- oder der Sachbilanzstudie beruhende **Ergebnisanalyse, die Ableitung von Schlussfolgerungen, die Erläuterung von Annahmen, Werthaltungen und anderen Einschränkungen**<sup>107</sup>, sowie ggf. das **Aussprechen von Empfehlungen**.

Die Auswertung umfasst gemäß dem *ILCD Handbook – General guide for LCA* ([European Commission - JRC-IES 2010a]), siehe Abb. 27:

---

<sup>107</sup> Aufgrund von Lücken und Ungenauigkeiten in Vorfalldaten wird angenommen, dass die erzielbare Genauigkeit der Werte der Interventionen mit der Umwelt in der LVA im Allgemeinen gleich oder geringer ist, als die der Sachbilanzen der Ökobilanzierung. Im Gegensatz dazu kann angenommen werden, dass die erzielbare Genauigkeit der Wirkungen auf die menschliche Gesundheit aus den direkten Personenschäden zumindest bei häufigeren Vorfällen gleich oder höher ist als aus den gesundheitsschädlichen Emissionen in der Ökobilanzierung, da die hohe Unsicherheit der Anwendung der ökobilanziellen Transport-, Umwandlungs- und Expositions-Modelle wegfällt: Direkte Personenschäden erfassen direkt die wesentlichen Wirkungen auf das Schutzgut Mensch.



**Abb. 27. Hauptschritte der Auswertung in der LVA, Erläuterungen siehe Text.**

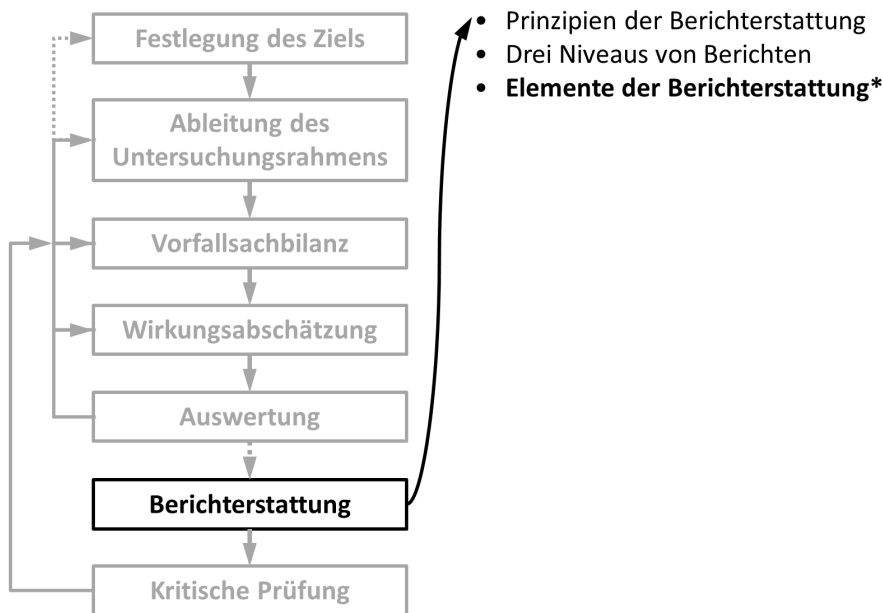
Dieser Umfang und das Vorgehen gelten **analog zur Ökobilanz** auch für die auf den verschiedenen Stufen vorliegenden Vorfallsach- und -wirkungsbilanz-Ergebnisse. Eine spezielle methodische Behandlung ist daher im Rahmen dieser Dissertation nicht notwendig, es sind insbesondere keine formalen Änderungen oder andersartigen Berechnungen notwendig.

## 5.8 Berichterstattung und Dokumentation

Die Dokumentation aller wichtigen Daten, von Annahmen und Einschränkungen sowie anderer relevanter Informationen auf allen Ebenen von einzelnen primären Ausfällen in Fehlerbäumen und Anfangsereignissen in Ereignisabläufen bis hin zur Ebene aggregierter Vorfallsachbilanzen und Wirkungsabschätzungen von Produktsystemen, ist **wesentlicher Bestandteil von LVA-Studien**.

Die resultierenden Berichte oder Dokumentationen anderer Form (z. B. elektronische Datensätze) dienen der wissenschaftlichen Nachvollziehbarkeit und kritischen Überprüfbarkeit der Studie, ihrer Ergebnisse, der Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Bereits während der Durchführung der Studie werden bestimmte Informationen und Daten zur korrekten weiteren Modellierung benötigt, z. B. zur qualitativen und quantitativen Zuordnung von Vorfällen zu vorfallbeteiligten Prozessen/Modulen.

In Anlehnung an [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und [European Commission - JRC-IES 2010a] umfasst die Berichterstattung auch für die LVA die folgenden Punkte, siehe Abb. 28:



**Abb. 28. Hauptschritte der Berichterstattung und Dokumentation in der LVA, Erläuterungen siehe folgender Text.**

Die **Prinzipien der Berichterstattung** sind gleichartig zur Ökobilanzierung. Auch die drei unterschiedlichen Niveaus von internen und externen Berichten beschreibender Studien und von Berichten vergleichender Studien haben analoge Anforderungen. Naturgemäß gibt es eine Anzahl andersartiger Informationen in der LVA, die zusätzlich<sup>108</sup> zum Dokumentationsumfang der Ökobilanzierung zu dokumentieren sind.

**Wesentliche Teile der Berichterstattung** von LVA-Studien sind identisch zur Ökobilanzierung. Dies ist insbesondere die Dokumentation des technischen Lebenswegnetzes des untersuchten Produktsystems.

Weitere Teile beziehen sich auf dieselben Aspekte, z. B. die anzuwendenden Wirkungsabschätzungs-Methoden, wenngleich bei der LVA andere oder zusätzliche Elemente dokumentiert werden – so die zusätzlichen Wirkmethoden für direkte Personenschäden.

Darüber hinaus gibt es einige vorfallspezifische Informationen, die strukturell über den Berichtsumfang der Ökobilanzierung hinausgehen.

Eine **vollständige mögliche Gliederung für einen LVA-Bericht ist im Anhang E bereitgestellt.**

<sup>108</sup> Da die LVA ebenso wie die Ökobilanzierung die Modellierung des technischen Lebenswegmodells umfasst und da Produktsysteme des Normalbetriebs als Vorfallfolgeaktivitäten Teil von Vorfallsystemen sind, umfasst die LVA den vollen Umfang von Ökobilanzaspekten und entsprechende Dokumentationsanforderungen. Bei Durchführung einer gemeinsamen Ökobilanzierung und LVA sind die gemeinsamen Teile nur einmal zu dokumentieren, insbesondere das technische Lebenswegmodell einschließlich der Lösung von Multifunktionalität.



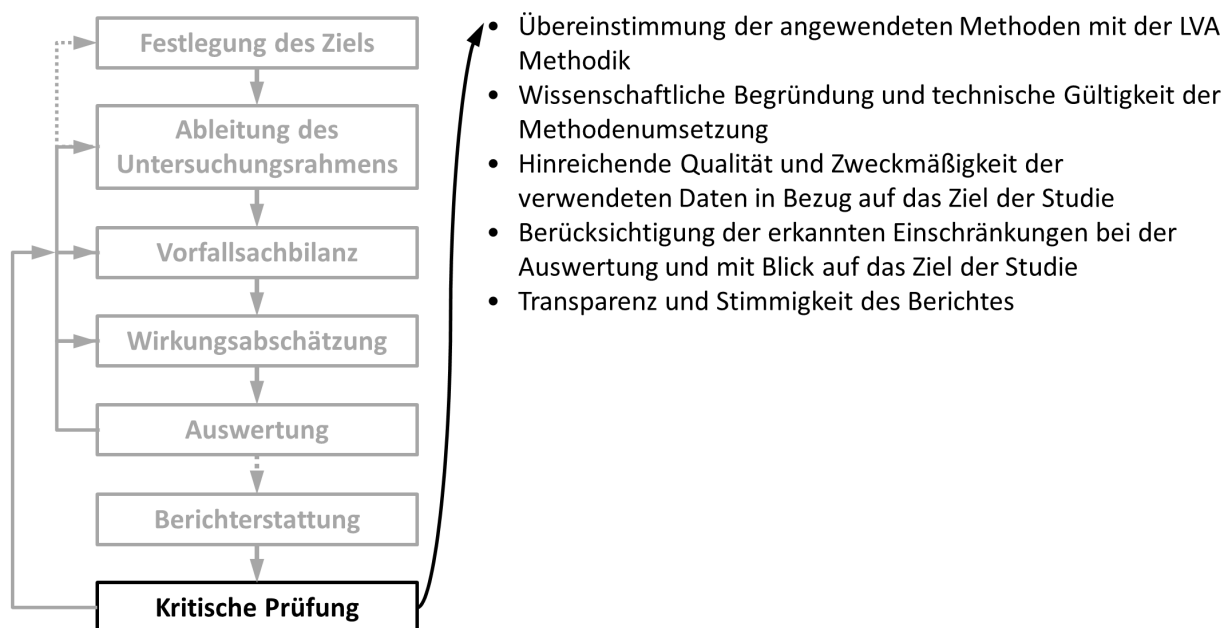
Details zum Dokumentationsumfang und -format werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgearbeitet, da dies nicht im Fokus der Zielsetzung steht<sup>109</sup>.

## 5.9 Kritische Prüfung

Die unabhängige, qualifizierte und kritische Prüfung von LVA-Studien hat einen ebenso hohen Stellenwert, wie die von Ökobilanzstudien. Anforderungen an die kritische Prüfung und den oder die Prüfer sind Teil der Festlegung des Untersuchungsrahmens.

Die **Anforderungen an die Prüfer** sind analog zur Ökobilanzierung und auch die Provisionen zur kritischen Prüfung in der Ökobilanzierung sind weitgehend analog auf die LVA anwendbar und werden hier nicht weiter ausgeführt. Die QRA-Studien oder andere Datenquellen sind in die kritische Prüfung in der LVA naturgemäß einzubeziehen.

Abb. 29 zeigt die wesentlichen Elemente der kritischen Prüfung von LVA-Studien:



**Abb. 29. Wesentliche Elemente der kritischen Prüfung in der LVA ([Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und [European Commission - JRC-IES 2010a]).**

<sup>109</sup> Die [Vornorm ISO/TS 14048:2002-04] zur Dokumentation von Modulen in der Ökobilanzierung umfasst 96 Seiten und benennt 90 Felder für zu dokumentierende Angaben, die zudem teilweise mehrfach auftreten können. Das darauf aufbauende weiterentwickelte ILCD Datensatzformat [European Commission - JRC-IES 2012] geht darüber noch hinaus. Das ILCD Format könnte ein geeigneter Startpunkt für ein Vorfalldokumentationsformat sein, bzw. die im Modul zu hinterlegenden Informationen könnten an das ILCD Format über den vorgesehenen *namespace*-Mechanismus angehängt werden. Die Ausarbeitung eines Datensatzdokumentations- und -austauschformates für die LVA ist außerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit und ggf. im Kontext der weiteren Erprobung und Implementierung der Methode vorzusehen.



## 6 Exemplarische Erprobung der Methode

### 6.1 Ansatz der Methodenerprobung

Zur Demonstration der grundsätzlichen Anwendbarkeit der LVA-Methode wird ein **repräsentatives Anwendungsbeispiel** benötigt. Kein Anwendungsbeispiel kann allerdings alle denkbaren Fragestellungen und methodischen Varianten abhandeln. Daher werden die in dieser Arbeit vorgestellten Methodenelemente in einem Fallbeispiel eines Industrieunfalls etwas ausführlicher erprobt. In einer Variante werden weitere methodische Elemente angewandt. In einem zweiten Fallbeispiel wird die Anwendbarkeit auf absichtlich herbeigeführte Vorfälle demonstriert, mit Fokus auf diejenigen Methodenelemente, die in derartigen Vorfällen Besonderheiten aufweisen.

Die Bearbeitung der Fallbeispiele führt **die notwendigen Methodenschritte der Zielsetzung und des Untersuchungsrahmens** durch, um dann **auf die Vorfallsachbilanz zu fokussieren**. **Fallweise** werden auch **Wirkungsabschätzung und Auswertung** durchgeführt.

Die zum Vergleich gerechneten **Ökobilanzergebnisse** sowie die im Vorfallsystem enthaltenen Produktsysteme (aufgrund Vorfalldatensätze) werden mittels Ökobilanzmethodik modelliert. Da dies aber nicht im Fokus der LVA-Methodenentwicklung steht, werden ausschließlich die diesbezüglichen Ergebnisse dargestellt.

Die Modellierung der Vorfälle wie auch der darin enthaltenen Produktsysteme wird mit **Fokus auf die Demonstration der methodischen Anwendbarkeit der LVA** durchgeführt. Die inhaltlichen Ergebnisse und Aussagen zu den untersuchten Vorfällen/Produktsystemen stehen dabei nicht im Vordergrund, ebenso wenig, wie etwa hochqualitative Vorfalldatensätze zu entwickeln.

### 6.2 Anwendungsbeispiel Zuckerstaubexplosion – basiert auf Fehlerbaum und historischem Unfallbericht

#### 6.2.1 Einleitung

Schwere Staubexplosionen in der Industrie treten in einer Vielzahl von Branchen auf, sind aber je Branche weltweit meist auf einzelne bis wenige Fälle beschränkt.

Dieses Beispiel dient zur Demonstration der Nutzung von aus Vorfallberichten abgeleiteten Daten zu Vorfallhäufigkeiten und -schäden, als wesentliche Datenquelle speziell für seltene Vorfälle. Zudem demonstriert es die Schätzung fehlender Daten. Um auf die Demonstration der LVA-Methode zu fokussieren, werden eine Reihe **vereinfachende Annahmen** getroffen hinsichtlich der Modellierungen der Auswirkungen der bestimmungsgemäßen Betriebszustände (d. h. des Ökobilanzteils und der Prozesse und Produkte innerhalb des Vorfallsystems). Diese Annahmen haben keine Auswirkungen auf die LVA-Methode selbst. Ähnlich werden **methodisch nicht im Fokus stehende Aspekte vereinfacht oder übersprungen**, insbesondere in den Phasen der Zielsetzung, der Ableitung des Untersuchungsrahmens und der Berichterstattung. Eine kritische Prüfung ist ebenfalls nicht Teil des Beispiels.

Eine Variante des Anwendungsbeispiels Zuckerstaubexplosion zur exemplarischen Erprobung der Zuordnung von Vorfällen bei multikausalen Vorfällen wird im Anschluss an dieses Kapitel vorgestellt.

## 6.2.2 Zielsetzung

Das hier illustrativ angenommene Ziel ist es, anhand von Fällen der historischen Praxis in Zuckerraffinerien zu erwartende Auswirkungen auf Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit aus **unfallbedingten Zuckerstaubexplosionen in den USA** abzuleiten, um die **schlimmste realistisch anzunehmende Situation** (Englisch *reasonable worst case*) zu erfassen. Die Daten sollen für LVA-Studien als **Vorfallsachinventarbeitrag für raffinierten Kristallzucker** („weißer Haushaltszucker“) nutzbar sein.

## 6.2.3 Untersuchungsrahmen

Entsprechend des Entscheidungskontextes, wird der **vollständige Beteiligungsansatz** zur Zuordnung der Vorfälle zu den Prozessen (hier: der Zuckerzwischenlagerung und -verpackung) festgelegt.

Der **Referenzfluss** des vorfallbeteiligten Prozesses ist **1 [kg] verpackter<sup>110</sup> Kristallzucker**.

---

<sup>110</sup> Die Packungsgröße wird aufgrund der von der Verpackungsgröße unabhängigen Vorfallcharakteristik als unabhängig von der qualitativen und quantitativen Vorfallzuordnung verstanden.

## 6.2.4 Vorfallsachbilanz

### Datentyp und -quelle

Als **Datentyp** für die Zuckerstaubexplosionen werden hier der **detaillierte Unfallbericht** [CSB 2009] und das darauf aufbauende Anwendungsbeispiel in der **Dissertation von [Abuswer 2012]** herangezogen. Die letztgenannte Arbeit hat diese bislang folgenreichste Zuckerstaubexplosion von Anfang 2008 aufbereitet und in eine detaillierte QRA überführt. Dieser Vorfall wird in der vorliegenden Arbeit als Beispiel für schlechte Praxis<sup>111</sup> und für die Situation bis Anfang 2008 gesetzt.

### Vorfallkurzcharakterisierung

Laut [CSB 2009] haben **eine Reihe von Zuckerstaubexplosionen** und darauf folgende Brände die Kristallzucker-Silos, Kristallzucker-Verpackungsanlagen und Puderzucker-Herstellungsanlagen der Imperial Sugar Raffinerie in Port Wentworth, Georgia, USA, am 7. Februar 2008 zerstört. Abb. 30 zeigt die Anlage etwa eine Woche nach dem Vorfall:



**Abb. 30. Imperial Sugar Raffinerie in Port Wentworth, Georgia, USA, nach den Zuckerstaubexplosionen und Folgebränden vom 7. Februar 2008. Aus [CSB 2009].**

Eine erste kleine Explosion ereignete sich in einem eingehausten Kristallzucker-Förderband unterhalb der Silos, gezündet wahrscheinlich durch ein überhitztes Lager im Förderband oder eine andere interne Quelle. Es wird im Bericht des CSB angenommen, dass die dabei entstehenden Erschütterungen in angrenzenden Gebäudebereichen akkumulierten Zucker-

<sup>111</sup> Als Folge des Vorfalles hat die für die Umsetzung der Sicherheits- und Gesundheitsgesetzgebung zuständige *US Occupational Safety and Health Administration (OSHA)* dem Betreiber der Raffinerie Bußgeldzahlungen wegen Verletzung von Sicherheitsvorschriften in Port Wentworth und in einer weiteren Anlage auferlegt, die im Juli 2010 in reduzierter Höhe von USD 6 Mio. seitens Imperial Sugar akzeptiert wurden [Muller 2013].

staub aufgewirbelt sowie von Simsen und Kabelschächten usw. geschüttelt und großräumig explosionsfähige Staub-Luft-Gemische erzeugt haben. Weitere schwere Explosionen und Brände traten auf. Die letzte der schweren Explosionen ereignete sich 15 Minuten nach der ersten Explosion. Es gab 14 Todesopfer und 36 Verletzte aufgrund einstürzender Gebäudeteile und durch die entstehenden Brände.

### **Abgrenzung als Vorfall, Vorfalltyp, Vorfallsituation**

Das Geschehnis fand statt unter Involvierung von **Zuckerprodukten** und von **Prozessen** des innerbetrieblichen Transports, der Weiterverarbeitung von kleinen Teilen des Zuckers zu Puderzucker und der Verpackung von Kristall- und Puderzucker sowie von nicht raffiniertem braunem Zucker. Das Geschehnis hat zu einer **Schädigung von Menschen, Vermögenswerten und der Umwelt** geführt – sowohl direkt im Zusammenhang des Ereignisses und aufgrund von Folgeaktivitäten. Das Geschehnis war seitens der Anlagenhersteller und -betreiber **offiziell nicht geplant**. Das Geschehnis ist demnach ein **Vorfall** im Sinne der Definition aus Kap. 5.2.3. Dieser Vorfall wird bezeichnet als **„Zuckerstaubexplosion Imperial Sugar Port Wentworth Februar 2008“**.

Sabotage und andere beabsichtige Auslöser werden im Unfallbericht nicht diskutiert und somit implizit ausgeschlossen. Der Vorfall ereignete sich während des seitens der Anlagenbetreiber so beabsichtigten bestimmungsgemäßen Betriebs. Dieser Vorfall ist demnach vom **Typ „Unfall im bestimmungsgemäßen Betrieb“** gemäß Tab. 1.

### **Qualitative Zuordnung des Vorfalles zu den vorfallbeteiligten Prozessen**

Die **erste kleine Explosion** fand statt ausschließlich unter Beteiligung **interner Transportprozesse (Abwurfschächte und Förderbänder)** des Kristallzuckers von den Silos zu den weiterverarbeitenden und verpackenden Prozessen. Diesen Prozessen wird der Vorfall laut der Definition in Kap. 5.4.3 aufgrund der **auslösenden Vorfallbeteiligung** qualitativ zugeordnet.

Am Aufbau der für die **sekundären schweren Explosionen und Brände entscheidenden Zuckerstaubakkumulationen in den verschiedenen Gebäudebereichen** waren ausschließlich diejenigen Prozesse beteiligt, die den Kristallzucker und den Puderzucker prozessieren oder verpacken [CSB 2009]<sup>112</sup>. Diese Vorgänge sind allerdings technisch bedingt und Teil der

---

<sup>112</sup> Laut [CSB 2009] hat Imperial Sugar bräunlichen Rohzucker aus Zuckerrohr zur Weiterverarbeitung bezogen, der als unwahrscheinliche Quelle für Zuckerstaubbildung charakterisiert wird.

bestimmungsgemäßen Betriebszustände. Die fortgesetzte Akkumulation des Zuckerstaubs ist hingegen kein bestimmungsgemäßer Betriebszustand, sondern beruht auf dem Versagen derjenigen Prozesse, die die Akkumulation eigentlich verhindern sollten: Die **unterdimensionierten Staubabsauganlagen und die unzureichende (un)regelmäßige Reinigung von Ablagerungsflächen im Kristallzuckerzwischenlagerungs- und -verpackungssystem**<sup>113</sup> sind demnach die „Auslöser“ im Sinne der Definition in Kap. 5.4.3. Die Zuordnung der Folgeunfälle der sekundären Explosionen und Feuer zu diesen Prozessen erfolgt laut der Definition in Kap. 5.4.3 aufgrund der **auslösenden Vorfallobeteiligung**. Weitere Auslöser sind die **Sauerstoffkonzentration oberhalb der Grenzkonzentration** und die vermuteten Zündquellen innerhalb des kristallzuckerverarbeiteten und -verpackenden Bereichs (insbesondere **elektrische Anlagen, die nicht für Betrieb in staubexplosionsgefährdeten Bereichen geeignet sind** laut [CSB 2009]) und die Abgeschlossenheit der Anlage (d. h. die unterdimensionierten Explosionsschutztüren).

### **Granularität Vorfallobsystem zu vorfallbeteiligtem Prozess**

Der anhand des detaillierten Unfallberichtes in [CSB 2009] durch [Abuswer 2012] abgeleitete Fehlerbaum (vgl. Tab. 7) ist detaillierter, als das hier zunächst betrachtete vorfallbeteiligte Modul. Da diese Detaillierung für die vorliegende Zielsetzung nicht benötigt wird, **wird der Vorfall hier zunächst in aggregierter Form betrachtet, d. h. der gesamte Vorfall dem Modul der Kristallzuckerzwischenlagerungs- und -verpackung zugeordnet**.

### **EAA/FBA, Eintrittshäufigkeit(en), Referenzgröße und Schadenspotenzial des Vorfalles**

Für die Zielsetzung interessiert hier ausschließlich die **Eintrittshäufigkeit des gesamten Unfalls**<sup>114</sup>, **d. h. ohne Differenzierung in Vorfall und Folgeunfälle**. [Abuswer 2012] hat diese Eintrittshäufigkeit mittels Fehlerbaumanalyse für die Situation vor dem Unfall von 2008 auf  **$3,8 \cdot 10^{-2} [a^{-1}]$**  geschätzt, d. h. im Mittel wird ein derartiger Vorfall ca. alle 26 Jahre erwartet.

Die Eintrittshäufigkeiten für die den Vorfall bedingenden und auslösenden primären Ausfälle, die zu der explosionsfähigen Staubwolke und alternativen Zündquellen beigetragen haben, wurden von [Abuswer 2012] mittels der von [Freeman 2011] zusammen gestellten *best guess*

---

<sup>113</sup> Um das Beispiel etwas zu vereinfachen und da der Puderzucker nur ein untergeordneter Beiträger ausschließlich der sekundären Explosionen ist, wird dessen Rolle hier vernachlässigt. Andere Zuckerprodukte werden in anderen Anlagenbereichen direkt aus dem bräunlichen Rohzucker hergestellt. Deren Prozesse sind also nicht auslösend am Vorfall beteiligt.

<sup>114</sup> Genauer: eines Unfalls dieses Typs und dieser Schwere.

und *confidence limit* Schätzmethoden geschätzt. Die spezifisch verwendete *best guess* Methode geht auf [Welker & Lipow 1974] zurück<sup>115</sup>. Detaillierte Regeln für die individuellen Ausfallhäufigkeiten der unfallbeteiligten Prozesse gibt [Abuswer 2012] nicht an<sup>116</sup>. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten werden von [Abuswer 2012] mittels der im Lehrbuch von [Crowl & Louvar 2002] veröffentlichten Formel aus den Ausfallhäufigkeiten umgerechnet und die Gesamteintrittswahrscheinlichkeit und -häufigkeit durch Auswertung des Fehlerbaums geschätzt.

Was der Fehlerbaum nicht enthält, sind die Prozesse der regelmäßigen Entfernung von Zuckerstaubakkumulationen, die sich trotz der Absauganlagen ansammeln, sowie die regelmäßige Entfernung von Kristallzuckerablagerungen u. a. unterhalb der Förderbänder und Anlagen, die durch Verschütten u. a. entstehen. In Gesamtsicht ist der Fehlerbaum allerdings geeignet für die Betrachtung auf Ebene des Vorfalls als Ganzes.

Die Gesamtproduktionsmenge der Anlage an Zuckerprodukten ist 700.000 [t] Jahresproduktion [CSB 2009]<sup>117</sup>. Da keine Zahlen zum anlagenspezifischen Produktionsprofil vorliegen, wird hier vereinfacht angenommen, dass das Port Wentworth Produktionsprofil dem durchschnittlichen US-amerikanischen Produktionsprofil für Rohrzuckerprodukte entspricht. Als größter Produktionsstandort der USA mit breitem Produktionsprofil erscheint dies angemessen, diese Annahme hat zudem keine methodischen Konsequenzen für die LVA: Laut [U.S. Census Bureau 2008] hat **Kristallzucker** 81,3 % Anteil an den Rohrzuckerprodukten in den USA. Als **Referenzgröße** des Vorfalls/Realprozesses bezogen auf den Prozessschritt Kristallzuckerzwischenlagerung und -verpackung ergibt sich demnach vereinfacht  $700.000 \text{ [t/a]} \cdot 0,813 = 569.000 \text{ [t/a]}$  (gerundet)<sup>118</sup>.

---

<sup>115</sup> Für die *confidence limit* Methode gibt auch [Freeman 2011] keine Originalquelle an.

<sup>116</sup> Die in der vorliegenden Arbeit verwendete abgeleitete F-N-Kurve liegt um drei Größenordnungen über den in vielen Ländern als noch akzeptabel geltenden Werten. Diese sehr hohe Eintrittshäufigkeit erscheint dennoch plausibel: Laut [CSB 2009] hatte es in der Imperial Sugar Raffinerie vor dem hier analysierten Vorfall mindestens eine kleinere Explosion in den frühen 1960er Jahren und eine weitere zwei Wochen vor dem Vorfall im Februar 2008 gegeben. Es gab zudem manchmal kleinere Brände und seit mindestens den frühen 1960er Jahren regelmäßig bis zu knietiefe Zuckerakkumulationen an verschiedenen Stellen in der Anlage.

<sup>117</sup> Der Bericht spricht von „über“ 700.000 [t]. Laut [U.S. Census Bureau 2008] sind dies ca. 9 % des 2007 in den USA produzierten Zuckers.

<sup>118</sup> Dies ist vereinfacht, da der innerbetriebliche Transportprozess, der die erste kleine Zuckerstaubexplosion ausgelöst hat, auch diejenigen Mengen Kristallzucker transportiert hat, die zu anderen Produkten weiterverarbeitet wurden, also Teile der 18,7 % anderer Zuckerprodukte. Einige Zuckerprodukte werden allerdings direkt aus dem Rohrzucker hergestellt, passieren also nicht dieses Förderband.



Das **Schadenspotenzial**<sup>119</sup> des Vorfalles ist die spezifische Speicher- und Gebäudegröße der Port Wentworth Anlage, die Mengen an zwischengespeichertem Kristallzucker und die zum Unfallzeitpunkt in den vom Vorfall betroffenen Bereichen anwesenden Mitarbeiter.

### Modellierung Vorfallsystem – Folgeunfälle

Der Vorfall ist durch eine Reihe mehrerer Explosionen und Brände als komplexer Vorfall mit Folgeunfällen charakterisiert.

Da hier der Unfall als Ganzes interessiert, werden die verschiedenen Explosionen und Brände **zu einem Vorfall zusammengefasst**.

### Modellierung Vorfallsystem – Schäden des spezifischen Unfalls

Der Unfall hat zu **14 Todesopfern** und **36 Verletzten** geführt (bei 120 seinerzeit im Unfallbereich anwesenden Mitarbeitern).

Es liegen aus einer anlässlich des 5. Jahrestages erstellten und in einer regionalen Zeitung als [Muller 2013] veröffentlichten Chronologie **genaue Altersangaben** der Verstorbenen vor, so dass die Todesfälle als einzelne Elementarflüsse inventarisiert werden und damit die exakten DALY-Werte ermittelt werden können<sup>120</sup>. Dieselbe Quelle enthält Angaben zur Dauer der Spezialklinikaufenthalte der schwerer verbrannten Opfer. Diese Informationen werden hier ebenfalls zur besseren Differenzierung verwendet.

Tab. 4 fasst die verfügbaren Angaben zu den Toten und Verletzten zusammen:

**Tab. 4** Detailinformationen zu den Toten und Verletzten der Port Wentworth Zuckerstaubexplosion und Feuer vom Februar 2008. Angaben aus [Muller 2013] und [CSB 2009].

<b>Tote</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Alter (Lebensjahre)</b>	<b>Kommentar</b>
Todesfälle – Männer	12	26, 30, 33, 40, 47, 50, 51, 54, 54, 55, 56, 56	
Todesfälle – Frauen	2	31, 45	
<b>Verletzte (Kurzfristbehandlung)</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Dauer</b>	<b>Kommentar</b>

<sup>119</sup> Die Schadenspotenzialinformation wird im Fallbeispiel nicht weiter verwendet, da keine Übertragung auf eine andere ähnliche Anlage stattfindet.

<sup>120</sup> Während dies mit Blick auf die Nutzung dieses Vorfalles als repräsentativer Unfall für die gesamte Branche als übergenau gelten kann, dient es hier zur Illustration der Nutzung derartig spezifizierter Daten und Zusammenführung auf Basis der gemeinsamen Wirkgröße DALY.

<b>Tote</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Alter (Lebensjahre)</b>	<b>Kommentar</b>
Verletzte – Verbrennung, leicht	26	Jeweils 14 Tage: $26 \cdot 14 \text{ [d]} = 364 \text{ [d]} = 1,00 \text{ [a]}$	Betroffene wurden nicht in Spezialklinik gebracht. Verbrennung <20 % der Haut hier angenommen. Durchschnittliche Heilungsdauer (ohne Langfristfolgen / Rekonvaleszenz) zu 14 Tagen angenommen.
Verletzte – Verbrennung, schwer	8	18, 24, 41, 65, 65, 71, 71, 94 Tage: in Summe = $449 \text{ [d]} = 1,23 \text{ [a]}$	Betroffene wurden in Spezialklinik gebracht. Verbrennung zu 20 bis 60 % der Haut hier angenommen. Entlassung nach höchstens 3 Monaten.
Verletzte – Verbrennung, schwer	2	195, 200 Tage: in Summe = $395 \text{ [d]} = 1,08 \text{ [a]}$	Betroffene wurden in Spezialklinik gebracht und nach über 3 Monaten entlassen; Verbrennung > 60 % der Haut angenommen. Zum zweiten Betroffenen liegt keine Angabe zum Entlassungszeitpunkt vor; 200 Tage werden hier angenommen.
<b>Verletzte (Langfristfolgen)</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Dauer</b>	<b>Kommentar</b>
Alle zuvor genannten Verletzten gemeinsam	36	Jeweils 40,6 Jahre: $36 \cdot 40,6 \text{ [a]} = 1.057 \text{ [a]}$	Bis zum Lebensende. Da keine Angaben zum Alter und Geschlecht der Verletzten vorlagen, wird von einem durchschnittlichen Alter der Erwerbstätigen von 40 Jahren und von Männern ausgegangen. Demnach verbleiben jeweils 40,6 Jahre bis zum statistischen Lebensende <sup>121</sup> .

Die **Emissionen aus den Explosionen und den ungeregelten Bränden** der Zuckerprodukte, von Verpackungen sowie von anderem Material und Gebäudeeinrichtungen sind mittels Brandumwandlungsdatensätzen zu schätzen, da entsprechende Daten im Unfallbericht nicht vorliegen. Die Verbrennung der Zuckerprodukte wird mittels eines Feuermoduls für die offene Verbrennung von N- und S-freier Biomasse aus [PE International AG 2013a] geschätzt. Die Verbrennung anderer Gegenstände wird mangels methodischer Relevanz hier vernachlässigt, Freisetzungen u. a. von toxischen Stoffen aus elektronischen Geräten (Bürogeräte, Mess- und Regeltechnik usw.) und anderen Gütern im Gebäude mögen allerdings relevante Beiträge zu den feuerbedingten Emissionen liefern.

<sup>121</sup> Laut [Murray et al.].

**Evakuierungen** von Anwohnern oder umliegenden Betrieben sind in [CSB 2009] nicht angegeben und werden hier als plausibel nicht vorkommend angenommen, da die Explosionen und Brände innerhalb des Betriebsgeländes im Wesentlichen ausschließlich den direkt betroffenen Gebäudekomplex und Nebengebäude zerstört haben. Zudem waren keine relevanten Mengen toxischer Materialien beteiligt oder explosionsfähige Güter gelagert, was andernfalls eine Evakuierung hätte veranlasst haben können.

Das Hauptfeuer war nach einem Tag unter Kontrolle, die Hauptphase der weiteren Brandbekämpfung dauerte insgesamt vier Tage und der Feuerwehreinsatz war erst nach einer Woche ganz abgeschlossen [CSB 2009] und [Muller 2013]. Neun **Feuerbrigaden und andere Rettungskraftorganisationen** waren im Einsatz [CSB 2009], laut [Muller 2013] über 200 Einsatzkräfte während der ersten vier Tage, genauere Zahlen sind nicht angegeben. Es wird hier vereinfacht angenommen, dass je Organisation zwei schwere Löschfahrzeuge oder andere schwere Fahrzeuge zum Einsatz kamen und während der gesamten ersten vier Tage Vollzeit im Einsatz waren, also  $9 \cdot 2 \cdot 4 \text{ [d]} \cdot 24 \text{ [h/d]} = 1728 \text{ [h]}$ . Zudem wird vereinfacht angenommen, dass Rettungswageneinsätze zum Transport der 36 Verletzten von insgesamt 1.000 km angefallen sind. Die weiteren Tage der Restbekämpfung der Feuer werden hier vereinfacht vernachlässigt. Mangels Informationen wird angenommen, dass der Dieserverbrauch beim Löschbetrieb und anderem schweren Gerät (z. B. Räumgerät) größenordnungsmäßig dem im Fahrbetrieb entspricht, bei angenommenen 20 [l/h] Diesel je Stunde und Fahrzeug, mithin  $1.728 \text{ [h]} \cdot 20 \text{ [l/h]} = 34.560 \text{ [l]}$  Diesel<sup>122</sup>. Hinzu kommen bei angenommenen 10 [l] / 100 [km] für die Rettungswagen  $1.000 \text{ [km]} \cdot 10 \text{ [l]} / 100 \text{ [km]} = 100 \text{ [l]}$  Diesel. Als Wasserquelle wird das Oberflächenwasser des direkt angrenzenden Flusses angenommen<sup>123</sup>.

Die **zerstörte Zuckerproduktmenge** wird hier vereinfacht wie folgt geschätzt:

Die Rohzuckerlager liegen laut Anlagenplan hinreichend weit von der verunfallten Anlage entfernt, es gibt keine Angaben zu deren Schäden und es wird angenommen, dass sie nicht betroffen waren.

---

<sup>122</sup> Die Fahrten zum Tanken werden hier vernachlässigt, respektive sind in dem angenommenen Dauereinsatz implizit enthalten.

<sup>123</sup> Der nicht verdampfte Teil des Löschwassers mitsamt seiner Fracht insbesondere an gelöstem Zucker gelangt in das Erdreich und den Fluss, was jedoch mangels Charakterisierungsfaktoren für organische Fracht in den hier zu verwendenden Wirkmethoden für Eutrophierung hier nicht berücksichtigt wird.

**Silos zur Zwischenlagerung des Kristallzuckers:** Anhand der in [CSB 2009] angegebenen Dimensionen der Silos wird die Zuckermenge geschätzt zu abgerundeten 11.200 [m<sup>3</sup>]. Bei angenommener Auslastung von 80 % und einer Lagerungsdichte von 0,95 [t/m<sup>3</sup>] laut [Mollet Füllstandtechnik GmbH 2011], ergibt dies abgerundet  $11.200 \text{ [m}^3\text{]} \cdot 0,8 \cdot 0,95 \text{ [t/m}^3\text{]} = \mathbf{8.500 \text{ [t]}}$ .

Angaben zur jeweils **in der Verarbeitung zu Puderzucker und anderen Produkten sowie zur Verpackung und im internen Transport befindlichen Mengen** liegen nicht vor. Es wird hier angenommen, dass diese Menge der Hälfte der pro Tag durchschnittlich verarbeiteten Zuckermenge entspricht, d. h.  $(569.000 \text{ [t]} / 337 \text{ [d]}) \cdot 0,5 \text{ [d]} = \mathbf{840 \text{ t}}$  (gerundet) zusätzlich zu den Mengen in den Silos<sup>124</sup>.

Die Menge der während der Explosionen und Brände **verbrannten Zuckerprodukte** wird mangels näherer Angaben vereinfacht auf 20 % der Gesamtmenge in den Silos und in der Weiterverarbeitung/Verpackung geschätzt, d. h. gerundet  $(8.500 \text{ [t]} + 840 \text{ [t]}) \cdot 0,2 = \mathbf{1.870 \text{ [t]}}$ <sup>125</sup>.

Es wird ferner angenommen, dass die **nicht verbrannten Zuckerprodukte** (= 9.310 [t] - 1.870 [t] = **7.440 [t]**) aufgrund der Kontamination mit Löschwasser und Rauch entsorgt werden mussten. Es wird hier angenommen, dass sie in **Abfallverbrennungsanlagen** unter teilweiser Energierückgewinnung in Form von Strom und Dampf entsorgt wurden. Ökobilanzdatensätze aus ([European Commission - JRC-IES 2013a]) wurden zur Erfassung der diesbezüglichen Emissionen und der Gutschriften für den erzeugten Strom und Dampf verwendet.

Vereinfacht wird hier die **Wiederherstellung aller verlorenen Zuckerprodukte** (8.500 [t] + 840 [t] = **9.340 [t]**) gemeinsam als **Kristallzucker (aus Zuckerrohr)** abgebildet, der Ökobilanzdatensatz der Zuckerproduktion in Brasilien (allerdings ohne Flächenumwandlung und Abbrennen der Felder vor der Ernte, um die US-amerikanische Situation besser zu repräsentieren) aus [PE International AG 2013a] wird zur Schätzung verwendet.

Die zerstörten Anlagenteile von Port Wentworth umfassen zwei aneinandergrenzende vierstöckige Weiterverarbeitungs- und Verpackungsgebäude und drei etwa 30 Meter hohe Silos zur Speicherung des Kristallzuckers sowie angrenzende Gebäudeteile (vgl. Fotos in Abb. 30). Die

---

<sup>124</sup> Eine vierwöchige Unterbrechung für Wartungs- und Instandhaltung sowie Hauptfeiertage pro Jahr wird angenommen.

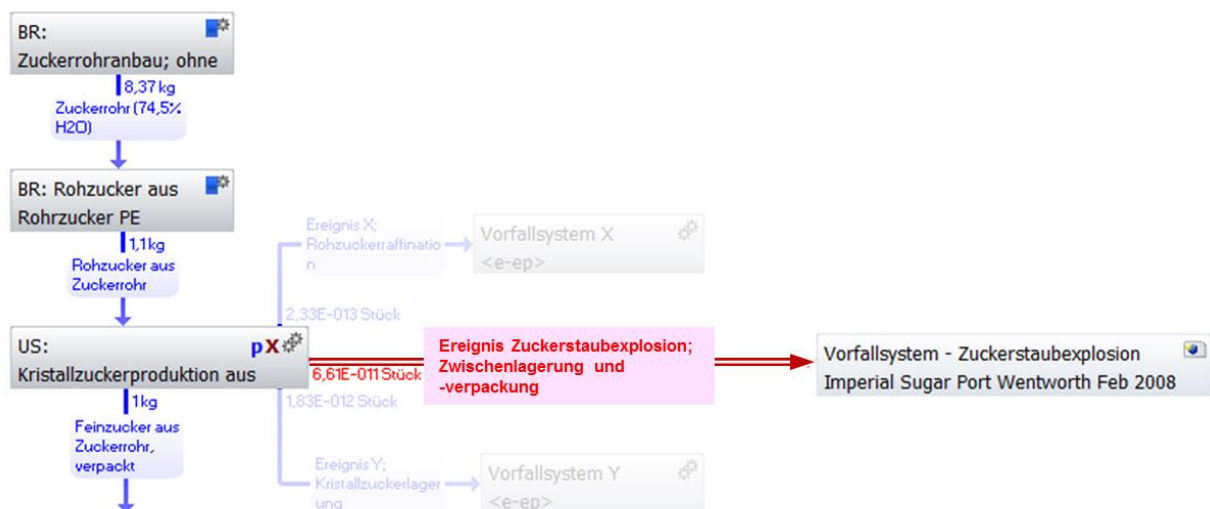
<sup>125</sup> Die im Betrieb akkumulierten Zuckerstaubmengen werden mangels quantitativer Relevanz hier vernachlässigt.

hälftige<sup>126</sup> **Anlagenwiederherstellung** wird stark vereinfacht geschätzt unter Nutzung der Arbeit von [Robertson et al. 2012] zu einem fünfstöckigen Bürogebäude mit ca. 14.000 [m<sup>2</sup>] Nutzfläche und drei Ebenen Tiefgarage, mit Fokus auf die wesentlichen Materialien Beton und Bewehrungsstahl als: 11.600 [m<sup>3</sup>] **Beton** mit 160 [kg/m<sup>3</sup>] Bewehrung = 1855 [t] **Baustahl**. Ökobilanzdatensätze aus den GaBi Datenbanken ([PE International AG 2013b]) und der ELCD ([European Commission - JRC-IES 2013a], Datensätze von des europäischen Stahlverbandes EUROFER) werden verwendet. Andere Anlagenbestandteile und Einrichtungsgegenstände werden mangels methodischer Relevanz nicht betrachtet.

Der **Baustahl** der zerstörten Anlage wird **recycelt** (Ökobilanzdatensatz EUROFER in den GaBi Datenbanken ([PE International AG 2013b]), der **Beton (Abbruch)** in einer **Inertstoffdeponie** abgelagert (Ökobilanzdatensatz der GaBi Datenbanken ([PE International AG 2013b])).

Erste Teile der Produktion liefen nach gut neun Monaten wieder an, die Anlage war erst Anfang 2010 vollständig wiederhergestellt [Muller 2013]<sup>127</sup>.

Abb. 31 zeigt den **vereinfachten Lebensweg des verpackten Zuckers**:



**Abb. 31. Lebensweg des Kristallzuckers, schematisch (links), mit Anbindung des hier betrachteten Vorfalles (rechts) und zwei angedeuteten (hier nicht betrachteten) weiteren Vorfällen (Mitte oben und unten, ausgebleichte Darstellung). GaBi screenshot.**

<sup>126</sup> Da die Anlage seit vielen Jahren im Betrieb war, wird mangels näherer Informationen - wie in Fußnote 83 erläutert - angenommen, dass die Anlage im Durchschnitt die Hälfte ihrer technischen Lebensdauer erreicht hat, mithin die Wiederherstellung nur hälftig angerechnet wird.

<sup>127</sup> Es ist eine methodisch offene Frage, wie die Produktionsausfälle umweltlich zu bewerten sind, sie wird daher hier ausgeklammert. Auch andere Folgeaktivitäten einschließlich der Untersuchung des Vorfalles, Gerichtsprozesse usw. werden nicht betrachtet, obschon angenommen werden kann, dass auch diese relevante Beiträge liefern mögen. Dies bedarf weiterer methodischer Arbeiten und ist daher ein Thema für den Ausblick.

Abb. 32 das Vorfallsystem der Zuckerstaubexplosion:

Vorfallsystem - Zuckerstaubexplosion Imperial Sugar Port Wentworth Feb 2008

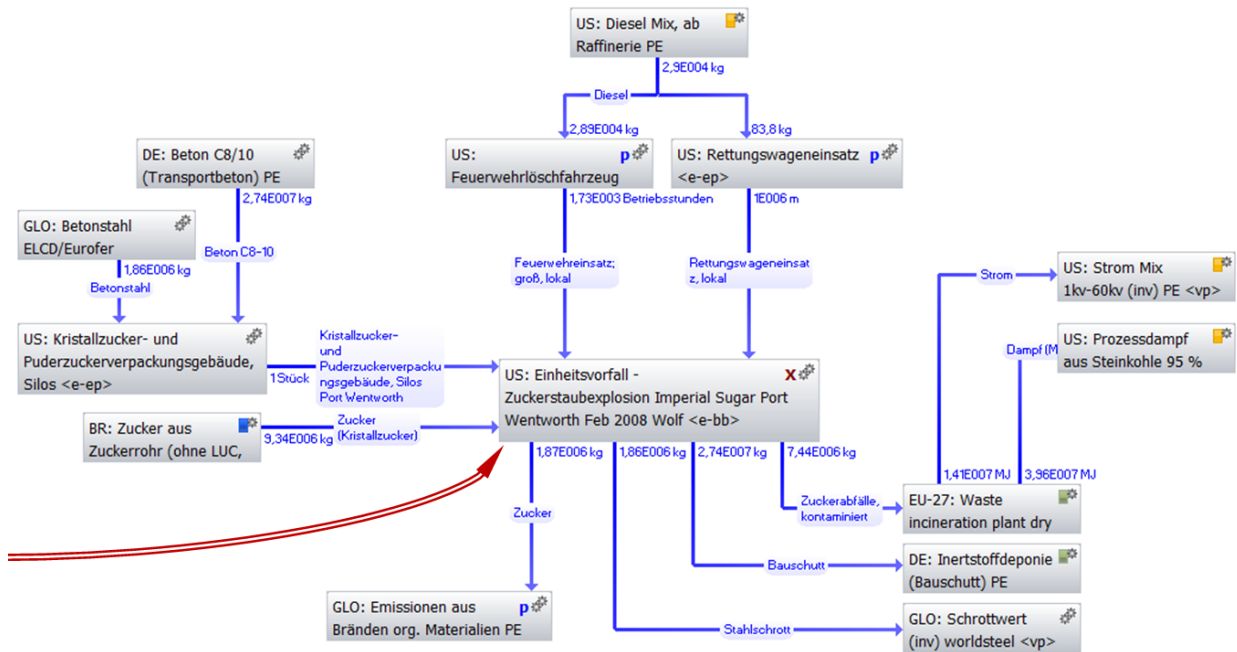


Abb. 32. „Vorfallsystem Zuckerstaubexplosion ...“, emuliert in GaBi Ökobilanzsoftware als Plan, unter Emulation des hier neu eingeführten Objekttyps Ereignis mittels des Objekttyps Fluss und unter Verwendung von Flussparametern. In der Mitte der zentrale Einheitsvorfall. Der Doppelpfeil deutet die – andernfalls nicht sichtbare – Anbindung an das Lebenswegmodell an.

Abb. 33 den zentralen Einheitsvorfall:

Inputs					
Fluss	Größe	Menge	Einheit	Wier	Kommentar
Ereignis Zuckerstaubexplosion; Kristallzuckerzwischenlagerung und -verpackung [Ereignisse2013]	Anzahl	1	Stück	X	Ereignis; emuliert als Fluss
Feinzucker; aus Zuckerrohr [Produkt- und Abfallflüsse2013]	Masse	9,34E006	kg	X	Wiederherzustellender, im Vorfall zerstörter Zucker
Feuerwehreinsatz; groß, regional [Produkt- und Abfallflüsse2013]	Betriebszeit	1,73E003	Betriebsstunden	X	Einsatz Feuerwehr und anderes schweres Gerät
Kristallzucker- und Puderzuckerverpackungsgebäude, Silos Port Wentworth [Baugruppen]	Anzahl	1	Stück	X	Wiederherzustellende Gebäude und Silos
Rettungswageneinsatz, lokal [Produkt- und Abfallflüsse2013]	Länge	1E003	km	X	Rettungswageneinsätze

Outputs					
Fluss	Größe	Menge	Einheit	Wier	Kommentar
Zucker [Produkt- und Abfallflüsse2013]	Masse	1,87E006	kg	X	In Explosionen und Feuern verbrannter Zucker; geht in Stoffumwandlungsprozess.
Bauschutt [Haldengüter]	Masse	2,74E007	kg	*	Zu entsorgender Silo- und Gebäudeschutt (Beton)
Stahlschrott [Abfälle zur Verwertung]	Masse	1,86E006	kg	*	Zu recycelnder Stahlschrott aus den zerstörten Gebäuden und Silos
Zuckerabfälle, kontaminiert [Produkt- und Abfallflüsse2013]	Masse	7,44E006	kg	*	Zu entsorgender Zucker aus den Silos; duch Rauch und Löschwasser kontaminiert
Tod; Frau; 31 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Frau; 45 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 26 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 30 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 33 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 40 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 47 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 50 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 51 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 54 [Tote]	Anzahl	2	Stück		
Tod; Mann; 55 [Tote]	Anzahl	1	Stück		
Tod; Mann; 56 [Tote]	Anzahl	2	Stück		
Verletzung; Verbrennung; <20% - kurzfrist, behandelt; Berufsalter (40) [Verletzte]	Zeit	1	Jahre		
Verletzung; Verbrennung; <20% - langfrist, behandelt; Berufsalter (40) [Verletzte]	Zeit	1,06E003	Jahre		
Verletzung; Verbrennung; >20% to 60% - kurzfrist, behandelt; Berufsalter (40) [Verletzte]	Zeit	1,23	Jahre		
Verletzung; Verbrennung; >20% to 60% - langfrist, behandelt; Berufsalter (40) [Verletzte]	Zeit	325	Jahre		
Verletzung; Verbrennung; >60% - kurzfrist, behandelt; Berufsalter (40) [Verletzte]	Zeit	1,08	Jahre		
Verletzung; Verbrennung; >60% - langfrist, behandelt; Berufsalter (40) [Verletzte]	Zeit	81,2	Jahre		

Abb. 33. Zentraler Einheitsvorfall „US: Einheitsvorfall ...“, modelliert in GaBi Ökobilanzsoftware unter Emulation des hier neu eingeführten Objekttyps Einheitsvorfall mittels des Objekttyps Prozess.

Das **Modell** wurde mithilfe der **Ökobilanzsoftware GaBi 6** ([PE International AG 2013c]) erstellt und die hier neu eingeführten Ereignisse wurden mithilfe des Objekttyps Fluss **emuliert**, Vorfallsysteme mittels Plänen. Die Übergabe von Eintrittshäufigkeiten und Größenangaben sowie die relative Skalierung des zentralen Einheitsvorfalls zum vorfallbeteiligten Modul wurden mithilfe von Flussgrößen und der Flussparametrisierungs-Funktion der GaBi Software emuliert.

### Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Vorfallsystems

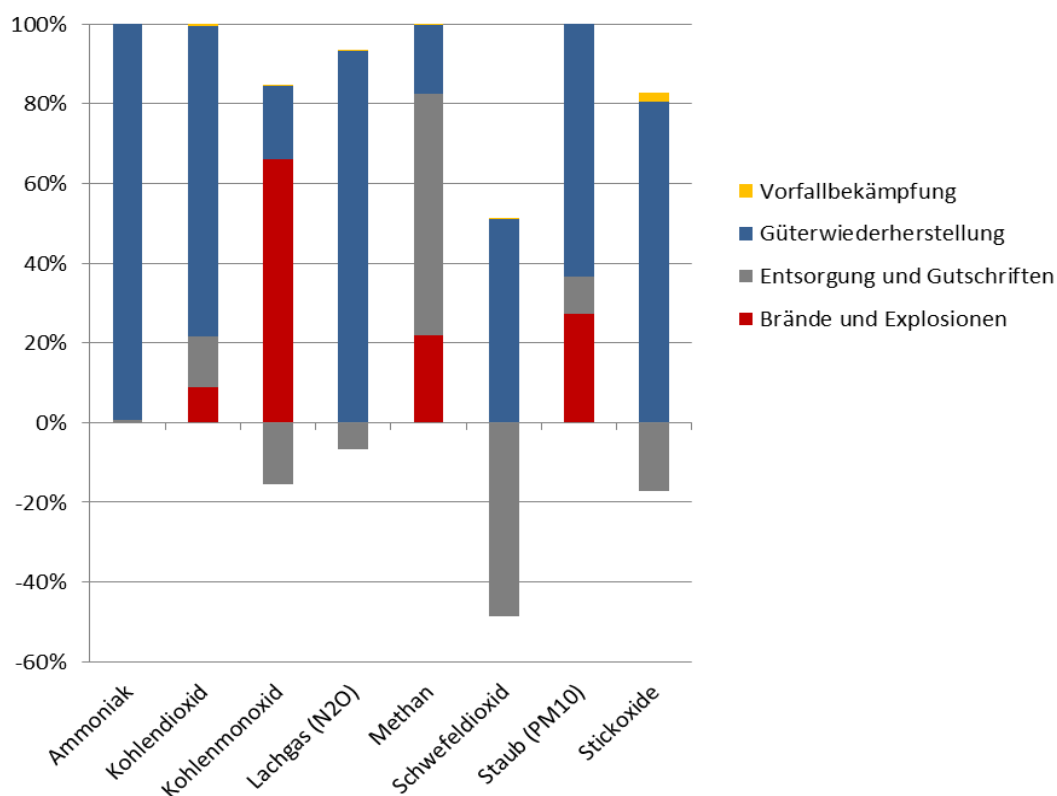
Die Aggregation des Vorfallsystems analog zum Vorgehen in der Ökobilanzierung (vgl. Kap. 3.1.1) erzielt das Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Vorfallsystems (vgl. auch Abb. 25). Tab. 5 zeigt einen Auszug, das vollständige Vorfallsachbilanz-Ergebnis ist im Anhang in Tab. 12 dokumentiert:

**Tab. 5 Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Vorfallsystems „Zuckerstaubexplosion Port Wentworth Feb. 2008“, Auszug.**

<b>Interventionen und direkte Personenschäden, Emissions-Kompartimente und Kategorien nach dem letzten Spiegelstrich; alles Outputs</b>	<b>Größe</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Ammoniak – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$1,64 \cdot 10^4$	kg
Kohlendioxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$2,85 \cdot 10^7$	kg
Kohlenmonoxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$1,76 \cdot 10^5$	kg
Distickstoffmonoxid (Lachgas) – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$1,56 \cdot 10^3$	kg
Methan – Organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC)	Masse	$5,04 \cdot 10^4$	kg
Schwefeldioxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$1,51 \cdot 10^3$	kg
Staub (PM 2,5) – Partikel in Luft	Masse	$5,33 \cdot 10^4$	kg
Stickoxide – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$3,52 \cdot 10^4$	kg
Tod; Frau; 31 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Frau; 45 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 26 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 30 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 33 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 40 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 47 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 50 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück

Tod; Mann; 51 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 54 Jahre – Tote	Anzahl	2	Stück
Tod; Mann; 55 Jahre – Tote	Anzahl	1	Stück
Tod; Mann; 56 Jahre – Tote	Anzahl	2	Stück
Verletzung; Verbrennung; < 20 % – kurzfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	1	a
Verletzung; Verbrennung; < 20 % – langfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	1.055	a
Verletzung; Verbrennung; > 20 % bis 60 % – kurzfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	1,23	a
Verletzung; Verbrennung; > 20 % bis 60 % – langfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	325	a
Verletzung; Verbrennung; > 60 % – kurzfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	1,08	a
Verletzung; Verbrennung; > 60 % – langfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	81,2	a

Neben den direkt **vorfallobedingten Toten und Verletzten** enthält dieses Vorfallsachinventar eine erhebliche Menge an **Emissionen in die Umwelt**. Abb. 34 zeigt die Anteile der beitragenden Prozesse zu ausgewählten Emissionen aus Tab. 5:



**Abb. 34. Relative Anteile der Beiträge im Vorfallsystem zu den Mengen ausgewählter Emissionen in Luft. Erläuterungen siehe folgenden Text.**



Diese Emissionen stammen zum einen von den Explosionen und Bränden, zum anderen von den Vorfallfolgeaktivitäten, wie z. B. den Brandbekämpfungseinsätzen und der Wiederherstellung des verbrannten Zuckers und der zerstörten Gebäude. Diese Vorfallfolgeaktivitäten sind also als die aggregierten Ökobilanzsachinventare der im Vorfallsystem enthaltenen Produktsysteme erfasst.

Mit Blick auf das Vorfallsystem ist interessant, welcher **Beitrag zu den Gesamtemissionen** aus welchen Aktivitäten stammt (Abb. 34):

Die Güterwiederherstellung (blau) ist der **wichtigste Beiträger** für Emissionen in Luft von Ammoniak, Kohlendioxid, Lachgas ( $N_2O$ ), Schwefeldioxid, Partikeln und Stickoxiden. Für Methan überwiegen dagegen die Emissionen aus der Müllverbrennung und anderer Abfallbehandlungs- und Recyclingprozesse (grau). Gleichzeitig führt die Gutschrift <sup>128</sup> von vermiedenen Schwefeldioxidemissionen aus Kohlekraftwerken (die durch die energetische Entsorgung des kontaminierten Zuckers vermieden werden) und aus Stahlwerken (die durch den recycelten Stahl aus den zerstörten Fabrikgebäuden vermieden werden) zu hohen negativen Beiträgen für diese Emissionen. Weitere, kleine Beiträge durch die Gutschriften treten für einige andere Emissionen auf (grau). Der Brand des Zuckers während des Vorfalls und an den folgenden Tagen bis zum Löschen der Brände (rot) dominiert ausschließlich die Kohlenmonoxid Emissionen und trägt relevant zu einigen <sup>129</sup> anderen Emissionen bei. Die Prozesse der Vorfallbekämpfung – trotz eines Aufwandes an gut 30 [t] Diesel für die Feuerbekämpfungsfahrzeuge und für anderes schweres Gerät (orange) – haben nur eine untergeordnete Bedeutung mit dem höchsten Beitrag zu den Stickoxidemissionen.

### **Vorgehen quantitative Zuordnung Vorfall zu Prozess/Modul**

Die quantitative Zuordnung des zentralen Einheitsvorfalls zum vorfallbeteiligten Modul erfolgt entsprechend der Regel aus Tab. 3 und Formel (i). Demnach wird der **Gesamtschaden zu 100 % der hier betrachteten Kristallzuckerzwischenlagerung und -verpackung zugeordnet**, der Vektor der **Zuordnungsfaktoren** für das entsprechende Modul hat demnach den **Wert 1 für alle Flüsse des zentralen (und einzigen) Einheitsvorfalls**.

---

<sup>128</sup> Die negativen Werte bei bestimmten Flüssen stammen wiederum aus der Gutschrift für die in einer Müllverbrennungsanlage unter Energierückgewinnung verbrannten Zuckerreste und den wiedergewonnenen Stahl.

<sup>129</sup> Das vereinfachte Model zur offenen Verbrennung des Zuckers vernachlässigt die Entstehung von thermischem und spontanem  $NO_x$ , andernfalls wäre auch hier ein Beitrag zu erwarten.

## Skalierung und Aggregation des Vorfallsystems bezogen auf das vorfallbeteiligte Modul

Als **Vorfallskalierungsfaktor** ( $\mu z \cdot R_M / R_V$ , vgl. Text in Kap. 5.4.5) erhält man  $3,8 \cdot 10^{-2} [a^{-1}] \cdot (1 [kg] / (569.000 [t/a]) \cdot 0,001 [t/kg]) = 6,68 \cdot 10^{-11} [-]$ .

Über den gesamten Lebensweg – allerdings mit der Zuckerstaubexplosion als einzigem hier einbezogenen Vorfall – erhält man mittels Formel (r) das skalierte Vorfallsachbilanz-Ergebnis je Referenzfluss des Moduls (d. h. je 1 [kg] verpackter<sup>130</sup> Kristallzucker). Ferner erhält man das **Sachbilanzergebnis** der bestimmungsgemäßen Betriebszustände (also das Ökobilanzergebnis des untersuchten Produktsystems). Wenn man als *worst-case* vereinfacht annimmt, dass diese Anlage repräsentativ für die Situation in den USA<sup>131</sup> bis 2008 war, ist dies zugleich die Situation für die USA mit dem in Tab. 6 dargestellten Ergebnis (Auszug aus den genannten skalierten Vorfallsachbilanz- und Sachbilanzergebnissen):

**Tab. 6 Gegenüberstellung Sachbilanz- und Vorfallsachbilanz-Ergebnis je 1 kg Kristallzucker USA, Auszug. Einbezogene Vorfälle: ausschließlich Zuckerstaubexplosionen während Kristallzuckerzwischenlagerung und -verpackung mit der hier erfassten Zuckerstaubexplosion als repräsentativ für die USA angenommen. Erläuterungen siehe vorausgehender Text.**

Interventionen und direkte Personenschäden, Emissions-Kompartimente und Kategorien nach dem Spiegelstrich, alles Outputs	Größe	Wert bestimmungsgemäßer Betriebszustände (Sachbilanzergebnis)	Wert Vorfälle (Vorfallsachbilanz)	Einheit
Ammoniak – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	0,00191	$1,09 \cdot 10^{-06}$	kg
Kohlendioxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,16	0,00189	kg
Kohlenmonoxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$2,28 \cdot 10^{-03}$	$1,16 \cdot 10^{-05}$	kg
Distickstoffmonoxid (Lachgas) – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$1,87 \cdot 10^{-04}$	$1,03 \cdot 10^{-07}$	kg
Methan – Organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC)	Masse	$5,98 \cdot 10^{-04}$	$3,33 \cdot 10^{-06}$	kg

<sup>130</sup> Eine Unterscheidung in die verschiedenen Verpackungstypen von Großgebinden für Weiterverarbeiter und den gewerblichen Einsatz sowie für Haushalte ist nicht relevant, da angenommen werden kann, dass die Verpackungsgröße keine relevante Einflussgröße hinsichtlich des Unfalls ist.

<sup>131</sup> „Repräsentativ für die Situation in den USA“ bedeutet, dass hier angenommen wird, dass Vorfälle schwere und -häufigkeit dieses Ereignisses repräsentativ sind und das weniger schwere (ebenso wie schwerere) Zuckerstaubexplosionsvorfälle mit einer Häufigkeit eintreten, die proportional zu deren Auswirkungen ist. In anderen Worten: ..., dass die F-N-Kurven aller Auswirkungen mit einer Steigung von -1 durch den Punkt dieses Ereignisses verlaufen.

Schwefeldioxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$1,21 \cdot 10^{-05}$	$-6,30 \cdot 10^{-08}$	kg
Staub (PM10) – Partikel in Luft	Masse	0,00665	$3,62 \cdot 10^{-06}$	kg
Stickoxide – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	0,00435	$2,33 \cdot 10^{-06}$	kg
Tod; Frau; 31 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Frau; 45 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 26 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 30 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 33 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 40 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 47 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 50 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 51 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 54 Jahre – Tote	Anzahl	0	$1,32 \cdot 10^{-10}$	Stück
Tod; Mann; 55 Jahre – Tote	Anzahl	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	Stück
Tod; Mann; 56 Jahre – Tote	Anzahl	0	$1,32 \cdot 10^{-10}$	Stück
Verletzung; Verbrennung; < 20 % – kurzfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	0	$6,61 \cdot 10^{-11}$	a
Verletzung; Verbrennung; < 20 % – langfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	0	$6,98 \cdot 10^{-08}$	a
Verletzung; Verbrennung; > 20 % bis 60 % – kurzfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	0	$8,13 \cdot 10^{-11}$	a
Verletzung; Verbrennung; > 20 % bis 60 % – langfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	0	$2,15 \cdot 10^{-08}$	a
Verletzung; Verbrennung; > 60 % – kurzfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	0	$7,14 \cdot 10^{-11}$	a
Verletzung; Verbrennung; > 60 % – langfristig, behandelt; Berufsalter (40 Jahre) – Verletzte	Zeit	0	$5,37 \cdot 10^{-09}$	a

Die Werte für Emissionen aus dem Vorfall sind im Vergleich zu denen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb über den Lebensweg zwei bis drei Größenordnungen geringer.

Dabei ist aber zu beachten, dass hier nur ein einziger Vorfalldatentyp in zwei Prozessschritten einbezogen worden ist: Zuckerstaubexplosionen während der Kristallzuckerzwischenlagerung und -verpackung.

Direkte Personenschäden können definitionsgemäß ausschließlich in Vorfällen auftreten, haben daher den Wert 0 während bestimmungsgemäßer Betriebszustände. Je  $10^9$  [kg] verpackter Zucker ist dies etwa ein Todesfall (als Summe über die einzelnen Fälle, ohne Differenzierung des Alters der Verstorbenen).

Nimmt man dagegen – ebenfalls vereinfacht – an, dass alle anderen Anlagen in den USA ohne jegliches Risiko von Zuckerstaubexplosionen betrieben wurden<sup>132</sup> und unter Berücksichtigung, dass die Anlage von Port Wentworth etwa 9 % der US-amerikanischen Zuckerproduktion ausmacht, verringern sich die Werte entsprechend auf 9 % des zuvor tabellierten Wertes.

### **Modellierung Vorfalldatensystem – Gesellschaftliche Schäden mittels F-N-Kurve**

Da F-N-Kurven und Todesfallraten in der Risikoanalyse von Interesse sind, sollen die entsprechenden Ergebnisse hier kurz vorgestellt werden:

Aus dem vorliegenden Unfall hat [Abuswer 2012] verschiedene Unfallszenarien abgeleitet und eine lineare sowie fast direkt proportionale F-N-Kurve abgeleitet, d. h. 10-mal schwerere Unfälle treten 10-mal häufiger auf. Die F-N-Kurve für Zuckerstaubexplosionen in der Port Wentworth Anlage liegt dabei um etwa drei Größenordnungen oberhalb der z. B. in den Niederlanden, Hong Kong oder dem brasilianischen Staat Sao Paulo als „*acceptable risk*“ designierten Bereiches [CCPS 2009]. [Abuswer 2012] errechnet die entsprechend sehr hohe Todesfallrate der Anlage zu:

- **Todesfallrate ( $R_{Tod}$ ) Port Wentworth = 2,28 [1/a].**

---

<sup>132</sup> Diese hier zu rein illustrativen und methodischen Zwecken getroffene Annahme ist stark vereinfacht und kann nicht für realitätsbezogene Aussagen genutzt werden, da andere Anlagen in den USA historisch keine derartig schweren Vorfälle erlitten haben und auch nicht in ähnlichem Maße mit Strafzahlungen wegen sicherheitsrelevanter Unterlassungen seitens der OSHA belegt wurden, wie die Anlagen von Imperial Sugar. Bei einer Recherche nach Zuckerstaubexplosionen weltweit mit Verletzten oder Toten in den letzten 20 Jahren wurden die folgenden fünf Fälle gefunden: 1996, Zuckerstaubexplosion in einer Zuckerfabrik in Omaha, Nebraska tötet einen Arbeiter. 1998, Zuckerstaubexplosion in der Imperial Sugar Anlage in Sugar Land, Texas verletzt zwei Arbeiter. 2007, nicht tödliche Zuckerstaubexplosion in der Western Sugar Co. Anlage in Scottsbluff, Nebraska, mit einem Toten und 15 Verletzten. 2007, Zuckerstaubexplosion in der Domino Zuckerraffinerie in Baltimore. Quelle für die zuvor beschriebenen Vorfälle: [Peterson 2009]. 2013, Zuckerstaubexplosion in der Iscal Zuckerfabrik in den Niederlanden verletzt einen Arbeiter ([N.N. 2013a]). Mangels einer zentralen weltweiten Erfassung kann man davon ausgehen, dass es weitere Fälle gab, der hohe Anteil von Unfällen in den USA kann u. U. auf eine bessere Erfassung zurückgeführt werden und nicht notwendigerweise auf eine tatsächlich höhere Unfallrate.

Wenn man wiederum annimmt, dass diese Anlage repräsentativ für die Situation in den USA bis 2008 war, entspricht dies zugleich der Todesfallrate der USA Für die alternative Annahme ohne weitere derartige Vorfälle in den USA errechnet sich die Todesfallrate für die USA zu:

- **Todesfallrate ( $R_{Tod}$ ) US-weit** =  $2,28 [a^{-1}] \cdot 0,09 = 0,205 [a^{-1}]$

Das Verhältnis Todesfälle zu Verletzten im hier betrachteten Vorfall beträgt 14 zu 36. Es wird hier vereinfacht angenommen, dass sich dieses Verhältnis auch auf die anderen Szenarien anwenden lässt, womit man gerundet die folgenden Raten erhält:

- **Verletztenrate ( $R_{Ver}$ ) US-weit** =  $0,205 [a^{-1}] \cdot 36/14 = 0,528 [a^{-1}]$

Mangels Angaben zu den spezifischen Umweltschäden der modellierten Vorfallszenarien wird hier vereinfacht angenommen, dass auch die Umweltschadens-F-N-Kurven parallel zur Todesfall-F-N-Kurve laufen. Aus dem Verhältnis der Todesfallrate zur Anzahl der Todesfälle im tatsächlichen Vorfall erhält man:

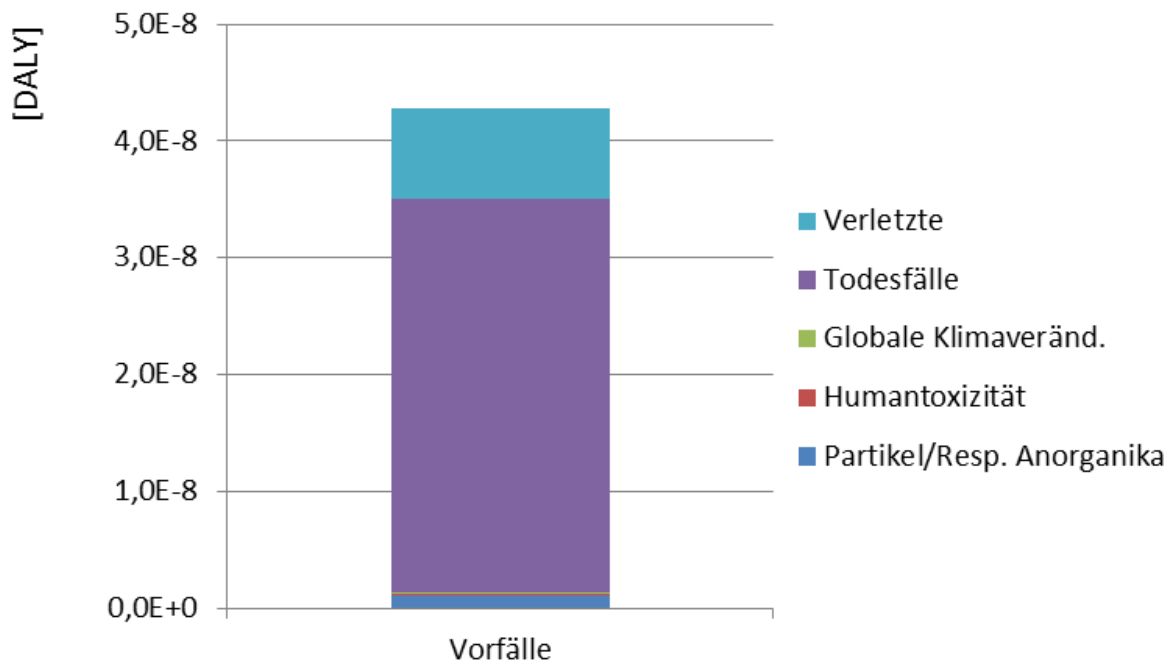
- **Umweltschadensrate ( $R_{Umw}$ ) US-weit** =  $0,205 [a^{-1}] / 14 = 0,0146 [a^{-1}]$

Dieser Umweltschadensraten-Faktor kann als Skalar auf alle geschätzten umwelt- und vermögenswertbezogenen Vorfallsachinventardaten des tatsächlichen Vorfalls angewandt werden, um – wie wiederholt erwähnt rein methodisch illustrativ – die Umweltwirkungen derartiger Anlagen in den USA abzuschätzen und auf 1 [kg] verpackten Kristallzucker herunterzubrechen.

Durch Kombination des Vorfallskalierungsfaktors mit den US-weiten Todesfall- und Verletztenraten ergeben sich **je kg Kristallzucker** aus dem Lagerungs- und Verpackungsprozess anteilig  $0,205 [a^{-1}] \cdot 6,68 \cdot 10^{-11} [-] = 1,37 \cdot 10^{-11} [a^{-1}]$  **Todesfälle** und  $0,528 [a^{-1}] \cdot 6,68 \cdot 10^{-11} [-] = 3,53 \cdot 10^{-11} [a^{-1}]$  **Verletzte**. Die diversen Umweltschäden können analog berechnet werden.

## 6.2.5 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung des Vorfallsachbilanz-Ergebnisses ergibt – ausschließlich hinsichtlich der Wirkungen auf den Menschen auf Ebene der Wirkendpunkte – das in Abb. 35 dargestellte Ergebnis über den Lebensweg der Herstellung von je 1 [kg] verpackter Kristallzucker; als einziger Vorfalltyp sind Zuckerstaubexplosionen während der Kristallzucker-Zwischenlagerung und -Verpackung enthalten:



**Abb. 35. Beiträge zu den Auswirkungen auf den Menschen aus Zuckerstaubexplosionen während Zuckerzwischenlagerung und -verpackung, in DALY aus ausgewählten Wirkkategorien und je 1 kg verpackter Kristallzucker.**

Dargestellt sind Werte für ausgewählte, auf die menschliche Gesundheit bezogene, Wirkkategorien der ReCiPe Methode als Wirkungsendpunkt<sup>133</sup> und damit für die verschiedenen direkten und indirekten Formen der **Schädigung der menschlichen Gesundheit durch Emissionen**, ausgedrückt in DALY. Die **direkten Personenschäden** sind ebenfalls in DALY ausgedrückt. Die numerischen Werte sowohl der Vorfallwirkungsabschätzung als auch der Wirkungsabschätzung sind im Anhang in Tab. 13 dokumentiert. Dort sind auch die ebenfalls geschätzten Wirkungen auf die Umwelt und die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen dokumentiert.

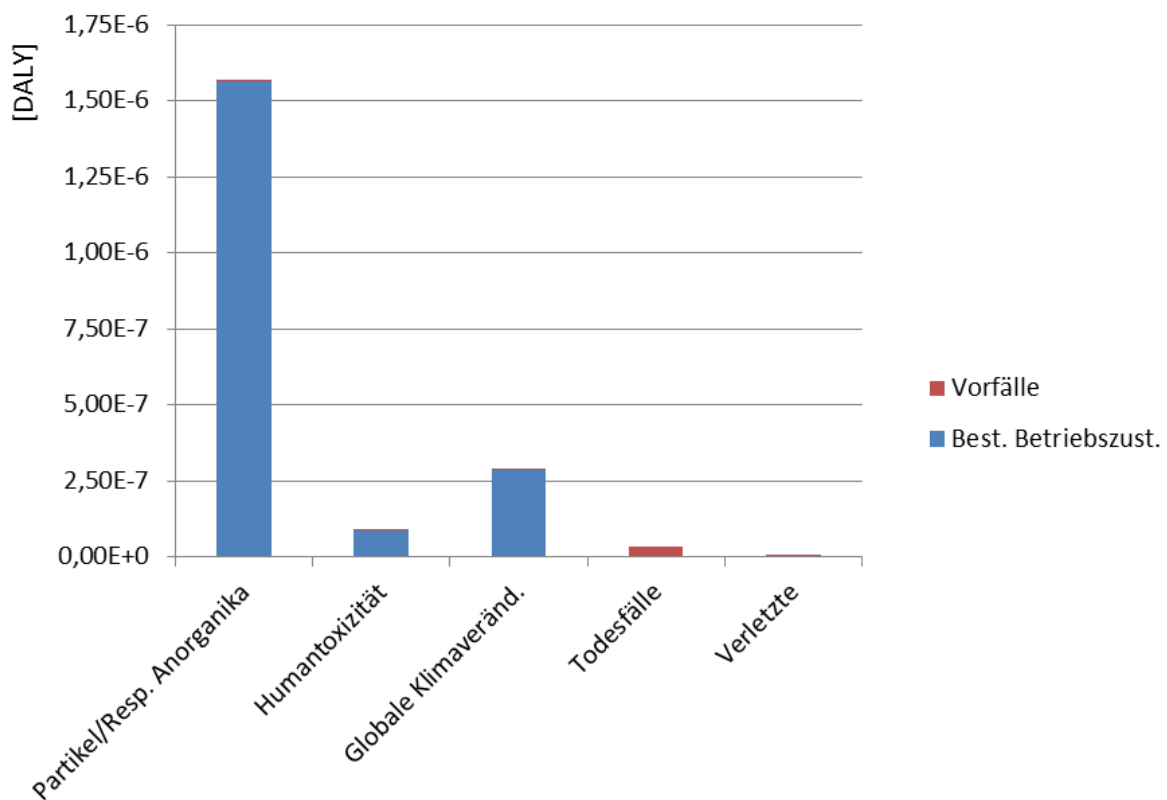
Den **größten Beitrag zum Schutzgut menschliche Gesundheit und bezogen auf den Produktionsweg des 1 [kg] Kristallzucker** liefern die **direkten Todesfälle** mit 79,3 % (siehe Abb. 35), was mit Blick auf die Schwere des hier als repräsentativ angenommenen Vorfalls nicht überrascht. Die **Verletzten** tragen 18,1 % bei.

**Emissionen aus den Bränden und aus den Vorfallbekämpfungsmaßnahmen** sowie aus der Güterwiederherstellung (in den drei Wirkkategorien Partikel/Respirative Anorganika,

<sup>133</sup> Bei der Modellierung von Endpunkten findet keine Normierung und Gewichtung statt, sondern die Schädwirkungen werden mittels naturwissenschaftlichen und teilweise sozialwissenschaftlichen (insbesondere Vergleichbarkeit der Schwere von Krankheiten, ausgedrückt in DALY) Methoden geschätzt. Dies ermöglicht insbesondere Schäden auf den Menschen in derselben Größe und Einheit DALY zu erfassen.

Humantoxizität und Globale Klimaveränderung) tragen insgesamt 2,6 % zu den DALY Werten bei. Da DALYs aus Emissionen gleichwertig zu denen aus direkten Personenschäden<sup>134</sup> sind, kann dieser Anteil auch in Form von Verletzten und Toten veranschaulicht werden: Die Schadwirkungen dieser Emissionen entsprechen **einem zusätzlichen Todesopfer im Alter von etwa 65 Jahren oder zwei zusätzlichen schweren Verbrennungsoffern im Alter von etwa 40 Jahren**. Das zeigt – mit Blick auf die hier vorgenommenen Vereinfachungen, Annahmen und Einschränkungen in der Repräsentativität der Modelle und Daten als rein illustrativ zu verstehen – die Relevanz, die auch die Emissionen in die Umwelt und aus Vorfallfolgeaktivitäten im Kontext von Vorfällen haben können, selbst bei Vorfällen mit sehr vielen direkten Opfern.

Abb. 36 zeigt die Wirkungsabschätzungs- und Vorfallwirkungsabschätzungs-Ergebnisse je 1 [kg] verpackter Kristallzucker für ausgewählte Wirkkategorien.



**Abb. 36. Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse (blau) und Vorfallwirkungsabschätzungs-Ergebnisse (rot) je 1 [kg] verpackter Kristallzucker, Auszug. Einbezogene Vorfälle: ausschließlich Zuckerstaubexplosionen während Kristallzuckerzwischenlagerung und -verpackung. (Wirkmethodik ReCiPe 2008 (H), Untermethoden mit Wirkungsendpunkt „Menschliche Gesundheit“ [Goedkoop et al. 2009]).**

<sup>134</sup> Die Unsicherheit ist dabei wesentlich größer für die Auswirkungen aus Emissionen in die Umwelt, da diese indirekt nach Transport und Umwandlung in der Umwelt auf den Menschen wirken.

Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung separat für den bestimmungsgemäßen Betrieb (d. h. die Ergebnisse der Ökobilanz) und Vorfälle.

In **Gesamtsicht über den Lebensweg der Kristallzuckerproduktion** dominieren die Emissionen in die Umwelt aus bestimmungsgemäßen Betriebszuständen mit mindestens zwei Größenordnungen höheren Werten in den einzelnen Wirkkategorien im Vergleich zu den Auswirkungen aus dem Vorfall (Abb. 36).

Dabei ist wiederum zu beachten, dass hier nur ein einziger Vorfalluntertyp in zwei Prozessschritten einbezogen worden ist: Zuckerstaubexplosionen während der Kristallzuckerzwischenlagerung und Verpackung. Eine **vergleichende Aussage der relativen Relevanz ist daher nicht möglich**.

### 6.2.6 Auswertung

Eine **tiefer gehende Auswertung** - unter Nutzung der in der Ökobilanz üblichen Methoden - wird hier **unterlassen**: Die Modelle und Daten sind im Wesentlichen illustrativ und nicht belastbar und spezielle Methoden der Auswertung wurden in der vorliegenden Arbeit nicht entwickelt. Methodisch ist die Auswertung analog zur Auswertung in der Ökobilanzierung.

## 6.3 Variante des Zuckerstaubexplosionsbeispiels – Quantitative Zuordnung multikausaler Vorfälle zu einzelnen vorfallbeteiligten Prozessen und Produkten

### Einleitung

Ausschließlich zur **Illustration der quantitativen Zuordnung der Vorfalllasten auf die individuellen vorfallbeteiligten Prozesse** gemäß Kap. 5.4.5 wird als Variante angenommen, dass Vorfalldaten nicht nur auf Ebene des Produktes Zucker benötigt werden, sondern für die verschiedenen **Anlagenteile und Prozesse**, die jeweils spezifische Rollen im Zustandekommen der auf die erste kleine Explosion<sup>135</sup> im eingehausten Förderband unter den Silos folgenden **großen Explosionen (Folgeunfälle)** gespielt haben.

---

<sup>135</sup> Es wird vereinfacht angenommen, dass diese erste kleine Explosion keine quantitativ relevanten direkten Auswirkungen hatte.



Die die **primäre Explosion** mitauslösende Einhausung des Förderbandes (oder eigentlich: die fehlende Absauganlage innerhalb der Einhausung)<sup>136</sup>, der abrasive und den Zuckerstaub dispergierende Transport des Zuckers von den Silos auf das Förderband und das zündende heiß gelaufene Lager als wahrscheinlichster Auslöser sowie die Anwesenheit von hinreichend Sauerstoff (alle hier nicht im Detail ausgearbeitet) sind primäre Ausfälle/Beiträger.

Die **Prozesse im Rest der Anlage** sind gemeinsam eine weitere UND-Verknüpfung für das Zustandekommen der großen Folgeexplosionen, die hier als ein Folgeunfall betrachtet werden. Als Startpunkt für die Ermittlung der individuellen Zuordnungsfaktoren, für die an diesem Folgeunfall beteiligten Prozesse, dient der von [Abuswer 2012] aufgestellte Fehlerbaum<sup>137</sup>. Dieser **Fehlerbaum** enthält als primäre Ausfälle – zusätzlich zur Absauganlage, den möglichen Zündquellen, der Sauerstoffkonzentration oberhalb der Grenzkonzentration sowie der Abgeschlossenheit der Anlage (d. h. die unterdimensionierten Explosionsschutztüren) – auch eine Vielzahl von Transport-, Lager- und Verpackungsprozessen. Letztere sind nach den vorliegenden Informationen allerdings in bestimmungsgemäßen Betriebszuständen gewesen, also als Beiträger/Zustände zu verstehen. Auslöser für die Zuckerstaubakkumulation gemäß der Definition in Kap. 5.4.3 waren – wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt – die mangelhafte Absauganlage und die unzureichende Entfernung der Zuckerstaubakkumulationen auf Ablageflächen (Lampen, Kabelschächte usw.), sowie die unzureichende Entfernung der Kristallzuckerakkumulationen auf dem Boden. Es hängt vom spezifischen Erkenntnisinteresse ab, ob die Reinigungsprozesse als distinkte primäre Ausfälle verstanden werden oder ob die Vorfallauswirkungen implizit den verschiedenen Prozessen zugeordnet werden, die anteilig zur Zuckerstaubakkumulation beigetragen haben. Die folgende Auswertung stellt beide Varianten dar, beginnend mit dem von [Abuswer 2012] aufgestellten Fehlerbaum, gefolgt von einem im Kontext der vorliegenden Arbeit erstellten angepassten Fehlerbaum.

### **Fehlerbaum von [Abuswer 2012]**

Im linken Bereich der Tab. 7 ist die **Fehlerbaumauswertung** wiedergegeben mit Eintrittswahrscheinlichkeiten der Primärausfälle/-zustände (in Fettdruck, nummeriert) und den

---

<sup>136</sup> Obschon die Einhausung und fehlende Absauganlage Teil des so offiziell geplanten Betriebes und Betriebszustandes sind, ist diese Situation dennoch ein Auslöser im Sinne der vorliegenden Arbeit, da ein „institutioneller Vorgang“ vorliegt, der zu dem nicht geplanten schädlichen Ereignis/Vorfall geführt hat, vgl. Definitionen in Kap. 5.4.3.

<sup>137</sup> Dieser Fehlerbaum ist vereinfacht durch zusammengefasste gleichartige Prozesse (z. B. der diversen Förderschnecken) und die Zuweisung einer gemeinsamen Ausfallwahrscheinlichkeit.

errechneten Eintrittswahrscheinlichkeiten der sekundären Ausfälle. Die deutschen Normzeichen **&** und **≥** geben an, ob die jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten der primären und sekundären Ausfälle/Zustände über eine UND- oder eine ODER-Verknüpfung anzubinden sind (vgl. Tab. 2).

Unter Nutzung der Formel (i) werden die **Zuordnungsfaktoren** gemäß dem Beteiligungsansatz<sup>138</sup> errechnet (Spalte ganz rechts). Bei Weiterberechnung (hier nicht vollzogen) würden diese später **als identischer Faktor allen individuellen Flüssen im Einheitsvorfall** zugewiesen. Hierbei werden die Prozesse, die zu der ersten kleinen Explosion geführt haben, der Übersichtlichkeit halber in der Darstellung ausgelassen.

Die vorletzte Spalte zeigt zudem die Zuordnungsfaktoren gemäß Verbesserungspotenzial-Ansatz.

---

<sup>138</sup> Die Unterscheidung in die drei Varianten des Beteiligungsansatzes ist hier nicht notwendig, da die untersuchten Prozesse alle auslösend vorfallbeteiligt waren.

Tab. 7 Fehlerbaumauswertung des Fehlerbaums von [Abuswer 2012] mit Errechnung der Zuordnungsfaktoren (Spalte ganz rechts, in Prozent) für die auslösenden/beitragenden Prozesse und Zustände (als primäre Ausfälle, nummeriert) hinsichtlich der auf die erste Explosion im eingehausten Förderband folgenden schweren Explosionen und Vorfallauswirkungen (zusammengefasst als ein Folgeunfall), errechnet gemäß vollständigem Beteiligungsansatz. Die Prozesse (und deren Zuordnungsfaktoren), die zu der ersten Explosion im eingehausten Förderband geführt haben, sind nicht dargestellt. Erläuterungen siehe vorausgehender Text.

Primäre und sekundäre Ausfälle und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten		Unerwünschtes Ereignis / Vorfall	$W$ Eintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls	$W_i$ Eintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls bei primärem Ausfall $i = 0$	$\frac{(W - W_i)}{W}$ Zuordnungsfaktor mit Mehrfachzählung, in %	$A_i$ Zuordnungsfaktor laut Beteiligungsansatz, in %
		ZUCKERSTAUB-EXPLOSION &	0,0376			
	EXPLOSIONSFÄHIGE STAUBWOLKE &	0,133				
	VERMISCHUNG $\geq 1$					
	0,0325			0,0370	1,60 %	0,247 %
1 Füllen und abpacken						
2 Zuckerstaubsammelanlage	0,065			0,0364	3,30 %	0,510 %
TRANSFER $\geq 1$	0,0953					
3 Silos und andere Behälter	0,0325			0,0370	1,60 %	0,247 %
4 Kartuschen	0,0325			0,0370	1,60 %	0,247 %
5 Sacklager	0,0325			0,0370	1,60 %	0,247 %

6 Sonstige	0,001							0,0376	0,0476 %	0,0073 %
	TRANSPORT <b>≥1</b>	0,5785								
7 Förderbänder	0,25						0,0317	15,8 %	2,45 %	
8 Materialaufzüge	0,25						0,0317	15,8 %	2,45 %	
9 Förderschnecken	0,25						0,0317	15,8 %	2,45 %	
10 Sonstige	0,001						0,0376	0,0476 %	0,0073 %	
	11 Stoßwellen	0,065					0,0364	3,30 %	0,510 %	
	12 Sonstige	0,001					0,0376	0,0476 %	0,0073 %	
		EXPLOSIONSFÄHIGES MATERIAL <b>&amp;</b>	0,245							
	13 Brennbares Material (Zucker)	0,99					0	100 %	15,4 %	
	14 Konzentration Staub > MEC	0,99					0	100 %	15,4 %	
	15 Partikelgröße < nicht explosionsfähiger Durchmesser	0,25					0	100 %	15,4 %	
	16 Sauerstoffkonzentration > SGK	0,8					0	100 %	15,4 %	
		ZÜNDSQUELLE <b>≥1</b>	0,2861							
	17 Funken aus mechanischen Stößen	0,065					0,0311	17,3 %	2,68 %	



## **Auswertung basierend auf dem Fehlerbaum von [Abuswer 2012]**

Die **größten Beiträge** zum Vorfall sind die Brennbarkeit des Zuckers, die Staubkonzentration oberhalb der Explosionsgrenze, die geringe Partikelgröße, die Anwesenheit von hinreichend Sauerstoff und die Abgeschlossenheit der Anlage (d. h. die unterdimensionierten Explosionsschutztüren), die jeweils 15,4 % der Vorfallauswirkungen (d. h. der Flussmengen der individuellen Flüsse des Einheitsvorfalles) zugeordnet bekommen. Die diversen Zündquellen für die Folgeexplosionen tragen gemeinsam 13,4 % der Vorfallauswirkungen.

Diese Zuordnungsfaktoren für die Vorfallauswirkungen können grundsätzlich entsprechend Kap. 5.5.3 verwendet werden, um die Vorfallsachbilanz-Ergebnisse und –wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der einzelnen vorfallbeteiligten Prozesse und Produkte (Förderbänder, Zuckerstaubsammelanlage usw.) zu errechnen. Während die Brennbarkeit des Zuckers produktimmanent und die Anwesenheit von Sauerstoff anlagenbedingt sind, sind die anderen Beiträge technisch besser zu handhaben. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass dieser Fehlerbaums aus [Abuswer 2012] **nicht in allen Fällen direkt die auslösenden primären Ausfälle** abbildet, weswegen die Zuordnung zu den Prozessen und Modulen in diesen Fällen nicht direkt möglich ist: Einige der als „primär“ gekennzeichneten Zustände sind Ergebnis eines oder mehrerer nicht identifizierter Prozesse. Dies trifft zu auf die Staubkonzentration in der Luft und die Partikelgröße, die eigentlich auf Transportprozesse des Kristallzuckers zurückzuführen sind, die zum Abrieb der Partikel in Menge und feiner Partikelgröße sowie deren Dispersion in der Luft geführt haben (vergleiche auch den neu aufgestellten Fehlerbaum weiter unten in diesem Kapitel). Andere als „primär“ gekennzeichnete Ausfälle gruppieren mehrere alternative Ausfälle. Hierzu gehören die verschiedenen Zündquellen: Z. B. können „Elektrische Funken“ von mehreren, hier nicht genannten Komponenten stammen: denkbar sind defekte Zuleitungen zur Beleuchtung und zu anderen elektrischen Verbrauchern, nicht für staubbelastete Umgebungen geeignete Anlagen (die in der Anlage laut [CSB 2009] vorgefunden wurden) usw. Zur weiter differenzierten Auswertung wäre der Fehlerbaum – bei entsprechend detailliertem Erkenntnisinteresse – entsprechend anzupassen, d. h. die zu den genannten Zuständen führenden Ereignisabläufe abzubilden und die gruppierten Ausfälle als einzelne Ausfälle aufzuführen.

Die oben genannten und quantitativ wichtigsten **primären Ausfälle** werden wie folgt **Prozessen/Modulen im Produktlebensweg zugeordnet:**

- **Brennbarkeit des Zuckers:** Dem Produkt Zucker und dem Prozess der Zuckerzwischenlagerung und -verpackung zugeordnet, was zu einer Charakterisierung als passive Vorfallobeteiligung aufgrund der bestimmungsgemäßen Eigenschaft der Brennbarkeit führt.
- **Staubkonzentration oberhalb der Explosionsgrenze:** Kann nicht direkt zugeordnet werden, bedingt die Modellierung der zu der hohen Konzentration beitragenden Ausfälle/Vorgänge.
- **Geringe Partikelgröße:** Kann nicht direkt zugeordnet werden, bedingt die Modellierung der zu der geringen Partikelgröße beitragenden Ausfälle/Vorgänge.
- **Anwesenheit von hinreichend Sauerstoff:** Dem Prozess der Zuckerzwischenlagerung und -verpackung zugeordnet, was – da Teil des bestimmungsgemäßen Anlagenkonzeptes mit Zugang von Personal und Zugang der Umgebungsluft – als passive Vorfallobeteiligung zu charakterisieren ist.
- **Abgeschlossenheit der Anlage** (d. h. die unterdimensionierten Explosionsschutztüren): Teil der ungeeigneten Anlagenplanung oder -erstellung und damit direkt dem Prozess der Zuckerzwischenlagerung und -verpackung zugeordnet, wiederum als bestimmungsgemäße Eigenschaft der Anlage und somit passive Vorfallobeteiligung.

Auf die hier nicht dargestellten Beiträge zur primären kleinen Explosion im eingehausten Förderband wurde bereits hingewiesen.

### **Neuer, angepasster Fehlerbaum**

Entsprechend der am Anfang dieses Kapitels durchgeführten Einschätzung wurde in der vorliegenden Arbeit ein angepasster Fehlerbaum erstellt, der **anstelle der Prozesse, die zur Zuckerstaubbildung beitragen, die zur Vermeidung von Zuckerstaubbakkumulation eingesetzt und ausgefallenen Prozesse** setzt: Dies sind die unterdimensionierte Staubsammelanlage und die unzureichend häufige manuelle Entfernung von Zuckerstaubbakkumulationen auf Ablagerungsflächen.

Für die Situation der mangelhaften manuellen Entfernung von Zuckerstaubbakkumulationen wird hier illustrativ eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,8 angenommen. Mit Blick auf den Bericht des CSB und Fotos während des Betriebs mit teils kniehohen Kristallzucker-

Ablagerungen auf dem Boden und einem weißen Film auf höher gelegenen Ablagerungsflächen (u.a. Rohrleitungen, Kabelschächten, Lampen) wird dies hier als plausibel eingeschätzt.

Die Brennbarkeit des Zuckers wird zudem in diesem Fehlerbaum nur implizit erfasst; sie ist zwar Voraussetzung für den Vorfall, aber methodisch hier ohne Belang, da alle vorfallbeteiligten Prozesse der Zuckerverarbeitung dienen.

Um eine bessere Vergleichbarkeit mit der ursprünglichen Analyse durch [Abuswer 2012] beizubehalten, wurde der Einfachheit halber hier die Gesamteintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls innerhalb eines Betriebsjahres gleich belassen (d. h. 0,0376); dies hat keine Auswirkungen auf die Demonstration der LVA-Methode.

Es ergibt sich dann für unzureichende Staubabfuhr durch die Zuckerstaubsammelanlage eine Eintrittswahrscheinlichkeit innerhalb eines Betriebsjahres von 0,12. Dies ist ebenfalls in Übereinstimmung mit dem CSB-Bericht, der diese Anlage als unterdimensioniert kennzeichnet, was auch in Gesamtsicht den sehr unsicheren Betrieb der Anlage bestätigt.

Die **Auswertung des derart modifizierten Fehlerbaums** ergibt das in Tab. 8 dargestellte Bild:



Tab. 8 Fehlerbaumauswertung des angepassten Fehlerbaums mit Errechnung der Zuordnungsfaktoren (Spalte ganz rechts, in Prozent) für die auslösenden/beitragenden Prozesse und Zustände (als primäre Ausfälle, nummeriert) hinsichtlich der auf die erste Explosion im eingehausten Förderband folgenden schweren Explosionen und Vorfallauswirkungen (zusammengefasst als ein Folgeunfall), errechnet gemäß vollständigem Beteiligungsansatz. Die Prozesse und deren Zuordnungsfaktoren, die zu der ersten Explosion im eingehausten Förderband geführt haben, sind nicht dargestellt. Erläuterungen siehe vorausgehender Text.

Primäre und sekundäre Ausfälle und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten		Unerwünschtes Ereignis / Vorfall	$W$ Eintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls	$W_i$ Eintrittswahrscheinlichkeit des Vorfalls bei primärem Ausfall $i = 0$	$\frac{(W - W_i)}{W}$ Zuordnungsfaktor mit Mehrfachzählung, in %	$A_i$ Zuordnungsfaktor laut Beteiligungsansatz, in %
		IMPERIAL SUGAR ZUCKERSTAUB-EXPLOSION &	0,0376			
	EXPLOSIONSFÄHIGE STAUBWOLKE ALS PRIMÄRER AUSFALL ODER ALS FOLGEUNFALL $\geq 1$					
	0,1658					
1	Zuckerstaubsammelanlage unzureichend (explosionsfähige Staubwolke)		0,12	0,0118	68,6 %	16,7 %
	EXPLOSIONSFÄHIGE STAUBWOLKE ALS					
	0,052					

	FOLGEUNFALL &										
2 Manuelle Entfernung von Zuckerstaubakkumulationen unzureichend	0,8							0,0272	27,6 %		6,71 %
3 Stoßwellen	0,065							0,0272	27,6 %		6,71 %
		4 Sauerstoffkonzentration > SGK	0,8					0	100 %		24,3 %
		ZÜNDSOURCE ≥ 1	0,2861								
	5 Funken aus mechanischen Stößen	0,065						0,0310	17,5 %		4,25 %
	6 Funken aus Reibung	0,065						0,0310	17,5 %		4,25 %
	7 Flammen und direkte Hitze	0,065						0,0310	17,5 %		4,25 %
	8 Elektrische Funken	0,065						0,0310	17,5 %		4,25 %
	9 Statische Elektrizität	0,065						0,0310	17,5 %		4,25 %
	10 Sonstige	0,001						0,0375	0,056 %		0,0137 %
		11 Abgeschlossenheit der Anlage	0,99					0	100 %		24,3 %
								<b>Summe:</b>	<b>411 %</b>		<b>100 %</b>

## **Auswertung basierend auf dem angepassten Fehlerbaum**

Die **größten Beiträger** zum Vorfall sind jetzt die Anwesenheit von hinreichend Sauerstoff und die Abgeschlossenheit der Anlage (d. h. die unterdimensionierten Explosionsschutztüren), die jeweils 24,3 % der Vorfallauswirkungen (d. h. der Flussmengen der individuellen Flüsse des Einheitsvorfalles) zugeordnet bekommen. Die unterdimensionierte Staubsammelanlage erhält 16,7 %, die diversen Zündquellen für die Folgeexplosionen tragen gemeinsam 21,3 % der Vorfallauswirkungen.

In diesem angepassten Fehlerbaum wird besser sichtbar, dass er schwere Zuckerstaubexplosionen der untersuchten Anlage insgesamt repräsentiert: Derartige Explosionen können direkt vorkommen, d. h. durch direkte Zündung explosionsfähiger Zuckerstaubwolken aufgrund der unterdimensionierten Staubsammelanlage (primärer Ausfall 1 in Tab. 8). Oder sie sind Folgeunfälle, wie im in Port Wentworth tatsächlich aufgetretenen Vorfall: Die im Fehlerbaum genannten Stoßwellen – in diesem Fall die erste kleine Primärexplosion – wirbeln akkumulierten Zuckerstaub von Ablagerungsflächen auf. Die beiden diesbezüglichen primären Ausfälle der unzureichend häufigen manuellen Entfernung der Zuckerstaubakkumulationen (primärer Ausfall 2) einerseits und der Stoßwellen (primärer Ausfall 3) andererseits bekommen jeweils 6,7 % der Vorfallauswirkungen zugeordnet.

Die hier ermittelten **Zuordnungsfaktoren** für die Vorfallauswirkungen können wiederum grundsätzlich entsprechend Kap. 5.5.3 verwendet werden, um die Vorfallsachbilanz-Ergebnisse und -wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der einzelnen vorfallbeteiligten Prozesse und Produkte (Staubsammelanlage, Abgeschlossenheit der Anlage/Explosionstüren usw.) zu errechnen.

Bei der **Umsetzung von spezifischen Maßnahmen** der Vermeidung derartiger Vorfälle oder der Minderung der Schwere, sind neben der Frage der Effektivität (d. h. des quantitativen Effektes auf die Eintrittshäufigkeit und Schwere) selbstverständlich auch die **Kosten** zu berücksichtigen. Da die Brennbarkeit des Zuckers produktimmanent und die Anwesenheit von Sauerstoff anlagenbedingt sind, kann angenommen werden, dass Maßnahmen an den anderen, technischen Beiträgern ansetzen. Im vorliegenden Fall könnte eine leistungsfähigere Staubsammelanlage und eine häufigere Entfernung der – dann geringeren aber unvermeidbaren – Zuckerstaubakkumulationen die Gesamteintrittshäufigkeit deutlich vermindern. Auch die Reduktion der diversen Zündquellen können mögliche technische Maßnahmen sein. In der Tat wurde die neu aufgebaute Anlage in Port Wentworth nach

neuesten Sicherheitsstandards erstellt und die sicherheitsrelevanten Maßnahmen während des Betriebs umfassen insbesondere solche zur Verminderung, Erfassung und Entfernung von Zuckerstaubakkumulationen ([EHS Today 2010]).

Auf übergeordneter Ebene zeigt die hier notwendige Anpassung des Fehlerbaums auch auf, dass je nach Erkenntnisinteresse einer Studie **bestehende Fehlerbäume u. U. angepasst werden müssen**.

## 6.4 Anwendungsbeispiel „Attentate auf Rohölfördereinrichtungen“

### 6.4.1 Einleitung

Als Beispiel für absichtlich herbeigeführte Vorfälle werden hier die **Beschädigung und Inbrandsetzung der Rohölförderanlagen in Kuwait durch abziehende irakische Truppen während des Golfkrieges im Januar und Februar 1991** erfasst; vgl. das zweite Foto in Abb. 1.

Ähnlich wie vom Menschen ausgelöste Wildfeuer, die global in ganz erheblichem Maße zu Belastungen von Mensch und Umwelt beitragen<sup>139</sup>, waren Partikelemissionen und andere Umweltbelastungen aus den brennenden Ölquellen damals im Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit.

### 6.4.2 Zielsetzung

Das hier angenommene Ziel ist es, den **Beitrag der Auswirkungen der brennenden Ölquellen im Kontext des ersten Golfkrieges zur globalen Produktion von Rohöl** abzuschätzen.

### 6.4.3 Untersuchungsrahmen

Entsprechend des Entscheidungskontextes wird der **vollständige Beteiligungsansatz** zur Zuordnung der Vorfälle zu den Prozessen (hier: Rohölproduktion) festgelegt.

Der **Referenzfluss** des vorfallbeteiligten Prozesses ist **1 [MJ] Rohöl**.

---

<sup>139</sup> Laut ([Johnston et al. 2012]) bedingen alleine die Partikelemissionen aus vom Menschen ausgelösten Wildfeuern bei konservativen Annahmen jährlich 339.000 Todesfälle weltweit, dies entspricht fast der Hälfte der Todesfälle aus der gesamten globalen städtischen Luftverschmutzung.

## 6.4.4 Vorfallsachbilanz

### Datentyp und -quelle

Die Informationsquellen für das Fallbeispiel sind Berichte verschiedener staatlicher Stellen der USA sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen, die die Schäden und Bekämpfungsaufwendungen der brennenden kuwaitischen Ölquellen dokumentiert haben, u. a. mit dem Zweck die gesundheitlichen und umweltlichen Auswirkungen zu ermitteln.

### Vorfallkurzcharakterisierung

Während des ersten sogenannten Golfkriegs und im Kontext des Rückzugs der irakischen Truppen aus Kuwait, haben die irakischen Streitkräfte im Januar und Februar 1991 laut [US Army Environmental Hygiene Agency 1991] mindestens 605 Ölquellen mittels Explosivstoffen beschädigt und in Brand gesetzt. Weitere 108 Quellen wurden beschädigt und weitere 46 hatten Rohölfreisetzen ohne Feuer. Bis im November 1991 alle Feuer gelöscht und die Quellen geschlossen werden konnten, wurden nach Schätzungen von [Husain & Amin 1995] über 130 Millionen [t] Rohöl sowie 10 Millionen [t] Erdgas effektiv freigesetzt, der größte Teil davon verbrannte.

### Abgrenzung als Vorfall, Vorfalltyp, Vorfallsituation

Das Geschehnis fand statt unter passiver Beteiligung der Rohölfördereinrichtungen und militärischer Explosivstoffe. Es hat zu einer **Schädigung von Vermögenswerten und der Umwelt** geführt – sowohl direkt im Zusammenhang des Ereignisses und aufgrund von Folgeaktivitäten. Das Geschehnis war seitens der Anlagenhersteller und -betreiber **nicht offiziell geplant**. **Das Geschehnis ist** demnach ein **Vorfall** im Sinne der Definition in Kap. 5.2.3. Dieser Vorfall wird bezeichnet als „**Zerstörung Rohölfördereinrichtungen Golfkrieg Kuwait Februar 1991**“.

Dieser Vorfall war **beabsichtigt** seitens der abziehenden irakischen Truppen als externer Auslöser und ist demnach vom Typ „**Kriegsauswirkungen**<sup>140</sup>“ gemäß Tab. 1.

### Qualitative Zuordnung des Vorfalls zum untersuchten Prozess

Die Zuordnung des Vorfalls zum hier untersuchten Prozessschritt der Rohölförderung erfolgt entsprechend der Definition in Kap. 5.4.3 aufgrund der **eigenschaftsbedingten passiven**

---

<sup>140</sup> Im Unterschied zu „Sabotage“ außerhalb von Kriegsgeschehen.

**Vorfallbeteiligung der Brennbarkeit des Rohöls und Sensitivität der Anlagen. Die Zuordnung erfolgt zudem zum eingesetzten Sprengstoff und zu den irakischen Truppen<sup>141</sup>.**

### **Granularität Vorfallsystem zu vorfallbeteiligtem Prozess**

Eine detaillierte Betrachtung des Ablaufs der Beschädigung und Inbrandsetzung der Ölquellen sowie des anschließenden Löschens und Abdichtens der Quellen bis November 1991 wird für den hier interessierenden Prozessschritt der Rohölförderung nicht benötigt.

### **EAA/FBA, Eintrittshäufigkeit(en), Referenzgröße und Schadenspotenzial des Vorfalls**

Für die Zielsetzung interessiert hier ausschließlich die **Eintrittshäufigkeit des unerwünschten Ereignisses, d. h. hier zusammengefasst für die Gesamtheit aller brennenden Ölquellen**. Mangels Informationen zu kleineren derartigen Vorfällen in anderen Konflikten, wird die **Eintrittshäufigkeit illustrativ zu 0,025 [a<sup>-1</sup>] angenommen**, d. h. einmal alle 40 Jahre.

Die **Referenzgröße** des Vorfalls ist die globale Jahresproduktion an Rohöl. Im Durchschnitt der letzten 40 Jahre sind dies etwa  $3,2 \cdot 10^9$  [t/a] ([IEA 2012]).

Ein einfaches **Schadenspotenzial** kann hier nicht angegeben werden, da der Vorfall eine differenzierte Charakteristik hat, einschließlich des Überdruckes in den Quellen und deren Zugänglichkeit, um sie wieder zu schließen. Bei der möglichen Übertragung auf ähnliche Vorfälle wären die entsprechenden speziellen Umstände zu berücksichtigen.

### **Modellierung Vorfallsystem - Schäden des spezifischen Unfalls**

[Husain & Amin 1995] hat die Menge des in den hier betrachteten Ölquellenfeuern **verbrannten Rohöls** auf über  $1,25 \cdot 10^8$  [t] und des **Erdgases** auf über  $9,46 \cdot 10^6$  [t] geschätzt<sup>142</sup>. Dabei wurden laut [Ferek et al. 1992] und [Weiss & Hobbs 1992] die in Tab. 9 aufgeführten Mengen an Emissionen je kg verbrannten Rohöls freigesetzt.

---

<sup>141</sup> Die Zuordnung zu den hier nicht im Fokus stehenden verwendeten Explosivstoffen erfolgt entsprechend der Definition in Kap. 5.4.3 ebenfalls ausschließlich aufgrund der eigenschaftsbedingten passiven Beteiligung, da der Sprengstoff nicht durch Fehlfunktion o. ä. beteiligt war, sondern aufgrund seiner bestimmungsgemäßen Eigenschaften benutzt wurde. Die Zuordnung zum Irak (als Institution anstelle als Prozess) erfolgt als institutioneller aktiver Auslöser. Eine tiefer gehende Zuordnung zu den Ursachen wird hier nicht durchgeführt, siehe entsprechende Anmerkungen in Fußnote 55 zur Fehler-Ursachen-Analyse als mögliche Erweiterung der LVA-Methode. Die zur Entzündung der Brände und Sprengsätze wahrscheinlich eingesetzten Zünder, Kabel, Streichhölzer u.ä. werden entsprechend der am Ende von Kap. 5.4.5 erläuterten systematischen Ausnahme der nicht selbst substantiell am Schaden beteiligten Produkte nicht in die Zuordnung einbezogen.

<sup>142</sup> Umrechnung der ursprünglichen Angabe von über 1 Milliarde Barrel bei 7 % des Kohlenstoffs als Erdgas, bei 159 [l] pro Barrel und einer Dichte des Rohöls von 0,85. Wasser- und Salzgehalt des Rohöls sind nicht in den Zahlen beinhaltet.

Hinzu kommen etwa  $2,2 \cdot 10^6$  [t] Rohöl, die laut [Husain & Amin 1995] aus beschädigten, aber nicht brennenden, Quellen in die Umgebung gelaufen sind und hier als **Emission in den Boden** erfasst werden (nach erfolgtem Abzug von 50 % der ursprünglich ausgelaufenen Menge, die laut [Husain & Amin 1995] zurückgewonnen werden konnten).<sup>143</sup>

**Tab. 9 Emissionen in die Umwelt aus den brennenden Ölquellen in Kuwait von Januar bis November 1991 (zusammengestellt aus [Ferek et al. 1992] und [Weiss & Hobbs 1992]). Emissionen in den Boden aus den brennenden Quellen werden mangels Daten vernachlässigt, für Daten zu Freisetzungen in den Boden aus nicht brennenden beschädigten Quellen siehe vorhergehender Text.**

Vorfallbedingte Interventionen mit der Umwelt (mit Emissionskompartments nach dem Spiegelstrich)	Größe	Wert	Einheit	Kommentar
Kohlendioxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$3,9 \cdot 10^{11}$	kg	98 % des Kohlenstoffs im Rohöl zu CO <sub>2</sub> umgesetzt <sup>144</sup>
Staub (PM10) – Partikel in Luft	Masse	$7,4 \cdot 10^8$	kg	<sup>145</sup>
Kohlenmonoxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$2,2 \cdot 10^9$	kg	
Schwefeldioxid – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$6,1 \cdot 10^9$	kg	4,88 % des Rohöls als SO <sub>2</sub> (bei 2,44 % S im Rohöl)
Stickoxide – Anorganische Emissionen in Luft	Masse	$5,7 \cdot 10^8$	kg	0,46 % des Rohöls als NO <sub>x</sub> (ausschließlich Brennstoff-NO <sub>x</sub> berücksichtigt als NO <sub>2</sub> bei 0,14 % N im Rohöl)
VOC – Organische Emissionen in Luft	Masse	$9,4 \cdot 10^8$	kg	0,75 % des Rohöls
Vanadium – Metalle in Luft	Masse	$3,5 \cdot 10^6$	kg	28 ppm V im Rohöl
Nickel – Metalle in Luft	Masse	$9,6 \cdot 10^5$	kg	7.7 ppm Ni im Rohöl

<sup>143</sup> Nicht einbezogene Freisetzungen und Prozesse, da methodisch nicht relevant: Wiederherstellung/-gewinnung der insgesamt  $1,47 \cdot 10^8$  [t] Rohöl und  $9,46 \cdot 10^6$  [t] Erdgas. Bei dem damaligen Preis von etwa USD 18 per Barrel [IEA 2012] entsprechend über USD 18 Milliarden alleine für das Rohöl, wobei Aufwendungen für den Transport bis zum Hafen/Raffinerie hier nicht berücksichtigt sind, der monetäre Wert also überschätzt ist. Da methodisch ebenfalls nicht relevant, werden auch die Aufwendungen für das Löschen der Ölquellenfeuer (zu Kosten von USD 1,5 Milliarden und Einsatz von bis zu 10.000 eingereisten Facharbeitern laut [Husain & Amin 1995]) und die Wiederherstellung der beschädigten Anlagen (einschließlich der hier nicht betrachteten zerstörten Raffinerien zu erwarteten Kosten von über USD 5 Milliarden laut [US Embassy Kuwait 1991]) hier nicht betrachtet.

<sup>144</sup> Die weitgehend vollständige Verbrennung rührt aus dem Versprühen des Öls und der guten Vermischung mit der Umgebungsluft. Die Partikelmenge je kg Rohöl aus brennenden Rohöllachen, die in diesem Vorfall bis zu 5% des verbrannten Rohöls beitragen, ist laut [Husain & Amin 1995] ungleich höher als hier, mit bis zu 40 % des Kohlenstoffs emittiert als Rußpartikel.

<sup>145</sup> Ursprünglich angegeben als PM 3,5 und ausschließlich als Ruß (Kohlenstoff), d. h. ohne NaCl Salzpartikel, mangels Informationen zur Umrechnung wird dieser Wert hier konservativ als PM 10 erfasst.

## Vorfallsystem

Das Vorfallsystem hat in diesem Beispiel lediglich **einen zentralen Einheitsvorfall**, da Vorfalldolgeaktivitäten hier vereinfacht ausgeklammert wurden. Auf die grafische Darstellung wird daher hier verzichtet.

## Zuordnungsvektor

Die quantitative Zuordnung zu den vorfallbeteiligten Prozessen gemäß Kap. 5.4.5 und Formel (i) ergibt **je ein Drittel für den Rohölförderungsprozess, den Sprengstoff und die irakischen Streitkräfte**<sup>146</sup>.

Es erscheint allerdings auch nachvollziehbar, die verwendeten **Sprengstoffe** aus der Zuordnung **auszuklammern** (wie bereits hinsichtlich von Zündern, Kabeln usw. erfolgt), da der Beitrag der Sprengstoffe zu den Vorfallschäden als nicht substantiell eingeschätzt werden kann. In diesem Fall trügen alleinig die irakischen Truppen und das Rohöl die Vorfalldlasten jeweils hälftig. Diese Entscheidung hängt im Einzelfall zudem von der Fragestellung der Studie ab; im Folgenden werden die Sprengstoffe in die Zuordnung mit einbezogen.

## 6.4.5 Wirkungsabschätzung und Auswertung

Die Wirkungsabschätzung der Vorfallsachbilanz in absoluter Höhe ergibt alleinig für die **Emissionen aus den Bränden** in den drei Wirkkategorien Partikel/Respirative Anorganika (542.204 DALY), Humantoxizität (6.930 DALY) und Globale Klimaveränderung (546.000 DALY) (alle Werte errechnet mittels der ReCiPe 1.07 Endpoint (H) Methode) insgesamt  $1,1 \cdot 10^6$  DALYs. Dies ist **äquivalent zu fast 27.000 Todesfällen von Männern im Alter von 40 Jahren** unter Verwendung der Lebenserwartungstabelle in Anhang Tab. 11. Dabei ist wiederum zu beachten, dass hier **relevante Vereinfachungen und Annahmen** getroffen wurden und die Wirkmodelle mit relevanten Unsicherheiten behaftet sind.

Dem Rohöl wird ein Drittel aller Flüsse und damit aller Wirkungen zugeordnet. Bei der hier angenommenen 40-jährigen Wiederholungsrate und der vereinfachten<sup>147</sup> Zuordnung auf die

---

<sup>146</sup> Genau genommen würden allerdings die Emissionen aus dem Sprengstoffeinsatz und die zerstörten Anlagen sowie deren Wiederherstellung ausschließlich dem Sprengstoff und den irakischen Streitkräften zugeordnet, also nicht dem Rohölprozess. Da hier lediglich die feuerbedingten Emissionen erfasst wurden, trägt der Zuordnungsvektor für jeden der drei Prozesse/Institutionen und alle Flüsse den Wert  $\frac{1}{3}$ .

<sup>147</sup> Eine verbesserte Zuordnung ergäbe sich, wenn nicht die weltweite Rohölförderung als Referenzgröße herangezogen würde, sondern die Wahrscheinlichkeit einbezogen würde, dass derartige Vorfälle erwartet werden können. Im vorliegenden Fall wäre das die politische Stabilität der Förderregionen.



gesamte durchschnittliche Rohölförderung weltweit von  $3,6 \cdot 10^9$  [t] im Mittel der 33 Jahre 1980 bis inklusive 2012 laut [US EIA 2013] ergeben sich  $1,1 \cdot 10^6$  DALY /  $3,6 \cdot 10^9$  [t] Rohöl =  $3,1 \cdot 10^{-7}$  DALY per [kg] Rohöl.

Die Modelle und Daten sind im Wesentlichen illustrativ und nicht belastbar. Eine **vergleichende Aussage der relativen Relevanz ist daher nicht möglich.**



## 7 Diskussion der Methode

### Stärken der LVA-Methode

Die hier vorgestellte neue Methode der Lebensweg-Vorfallanalyse (LVA) hat mit Blick auf die Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Kap. 2.1) **die folgenden Stärken:**

Die LVA-Methode ist eine **erste allgemein anwendbare Methode**, die es erlaubt, die schädlichen Auswirkungen **nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände** auf Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit quantitativ und bezogen auf die Leistung von Produkten und Prozessen und über deren gesamten Lebensweg differenziert und detailliert zu erfassen. Die Vorfallsachinventare und -wirkungsabschätzungs-Ergebnisse sind **im gemeinsamen Rahmen mit der Ökobilanzierung, aber auch separat auswertbar.**

Für die im Anschluss an die Darstellung und Analyse des Standes der Technik genannten **bisher noch offenen oder weiter zu entwickelnden Methodenelemente** (siehe Kap. 4.10) werden in allen Fällen **Lösungen ausgearbeitet:**

So **grenzt die LVA Vorfälle (= nicht bestimmungsgemäße Betriebszustände) geeignet von bestimmungsgemäßen Betriebszuständen ab.**

Neben **Unfällen**, die bisher im Fokus lebenswegbezogener Erfassung nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände standen, erfasst die LVA auch die Auswirkungen von **Sabotage, Terrorismus, Kriegsgeschehen, Selbstmorden und anderen kriminellen Akten** in einem gemeinsamen Methodenrahmen. Auch Ausschuss/Fehlproduktion kann erfasst werden, dies wurde aber in der vorliegenden Arbeit methodisch nicht weiter vertieft.

Die LVA definiert zudem erstmals Regeln für eine systematische **qualitative Zuordnung von Vorfällen zu Prozessen und damit den Modulen im Lebensweg des untersuchten Produktsystems.**

Zur **quantitativen Zuordnung** der Auswirkungen insbesondere von multikausalen Vorfällen zu vorfallbeteiligten Prozessen/Modulen entwickelt und formalisiert die LVA erstmals **genaue Zuordnungsregeln**. Diese sind zudem **spezifisch je Art der Zielsetzung der Studie** und dem – werthaltigen – Grad der Übernahme von Produktverantwortung seitens der Hersteller und Prozessbetreiber.

Da Daten zu Vorfällen in sehr unterschiedlicher Form und Differenzierung vorliegen, beschreibt die vorliegende Arbeit wie **sowohl aggregierte Vorfalldaten und -statistiken** als auch

Informationen aus differenzierten *ex ante* und *ex post* **QRA-Modellen** mit Fehlerbäumen und Ereignisabläufen genutzt werden können. Ebenfalls im Kontext der Nutzung unterschiedlich differenzierter Datenquellen beschreibt die Arbeit erstmals Regeln der quantitativen Zuordnung von Vorfallauswirkungen bei **unterschiedlicher relativer Granularität** der Vorfallmodelle und der vorfallbeteiligten Module des untersuchten Produktsystems.

Erstmals im Kontext der lebenswegbezogenen Erfassung von Vorfallauswirkungen wird zudem die Frage der Modellierung von Vorfällen in „*attributorial*“ und „*consequential*“ Studien adressiert.

Durch **Kombination** der neu entwickelten methodischen Elemente mit bestehenden Lösungen und durch die Anbindung an die Ökobilanzierung wird eine vollständige operationale Methode erhalten.

### **Derzeitige Schwächen der LVA-Methode**

Den Stärken der LVA-Methode stehen **folgende Schwächen** gegenüber:

Ein verhältnismäßig **hoher manueller Aufwand** ist derzeit in vielen Fällen notwendig, um Ergebnisse aus QRA-Modellen sowie Fehlerbäumen und Ereignisabläufen in die LVA zu übertragen. Dies beinhaltet insbesondere die Notwendigkeit, innerhalb von Fehlerbäumen oder Ereignisablaufmodellen die **relativen Beiträge** der vorfallbeteiligten Prozesse anhand deren Beiträgen zur Gesamteintrittshäufigkeit des unerwünschten Ereignisses (Vorfall) zu **errechnen**. Dieses Vorgehen ist allerdings inhaltlich notwendig und unabhängig von der speziellen Methode, da in Vorfällen anders als in der Ökobilanzierung eine Aufteilung der Vorfallauswirkungen auf die beteiligten Prozesse über einfache Zuordnungs-(Allokations-)Schlüssel nicht geeignet ist: Die Vorfallmodifikation aufgrund der spezifischen Eigenschaften eines vorfallbeteiligten Prozesses oder Produktes und seiner Stellung im Fehlerbaum oder Ereignisablauf bedingt die Notwendigkeit einer nicht linearen Zuordnung, zumindest in vielen Fällen. Zudem **müssen Fehlerbäume und Ereignisabläufe fallweise angepasst werden**, wie in der Detailvariante des Fallbeispiels Zuckerstaubexplosion gezeigt wurde. Allerdings ist auch diese Notwendigkeit weitgehend unabhängig von der speziellen Methode der Erfassung von Vorfallauswirkungen über den Lebensweg.

**Softwareunterstützung** – insbesondere zur Anbindung von QRA-Modellen und Fehlerbäumen sowie Ereignisabläufen – könnte diese Schwäche erheblich mindern, siehe Ausblick in Kap. 8. Die **Möglichkeit eines vereinfachten Vorgehens** der LVA-Methodenanwendung unter

Inkaufnahme geringerer Repräsentativität ist zudem zu prüfen. Die Anwendung des in der vorliegenden Arbeit definierten, aber nicht erprobten Verbesserungspotenzial-Ansatzes benötigt eine datenbankweite Kennung aller an allen multikausalen Vorfällen beteiligten Module und eine darauf beruhende Aufteilung der Auswirkungen. Dies könnte maßgeblich durch eine bisher nicht bestehende **Softwarefunktionalität** unterstützt werden.

Der auch von anderen Autoren (z. B. [Kurth et al. 2004], [Burgherr et al. 2011]) genannte **Mangel an detaillierten Vorfalldaten** führt in der LVA – wie in allen Methoden der lebenswegbezogenen Erfassung von Vorfallauswirkungen – zu relevanten Lücken und Unsicherheiten der Ergebnisse. Eine eigentlich sehr einfach verfügbare, aber in Berichten zu Vorfällen meist nicht dokumentierte Angabe ist die in der Lebensweganalyse wichtige Angabe zur Leistung der vorfallbeteiligten Prozesse. Mittelfristig werden LVA-Studien und -Datenbanken diesbezüglich eine gewisse Ungenauigkeit in Kauf nehmen müssen. Eine geringfügige Erweiterung der gesetzlichen Dokumentationspflichten von Vorfällen könnte die erreichbare Datenqualität maßgeblich verbessern. Diese Situation ist sehr ähnlich zur Ökobilanzierung in ihren Anfängen. Siehe auch das folgende Kap. "Ausblick".

### **Nutzen der Methode, Zielgruppen**

Die LVA ermöglicht die Erfassung der Schadwirkungen auf Mensch und Umwelt aus nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen und deren Aggregation über den Produktlebensweg und parallel zur Ökobilanzierung. Vorfälle stehen nicht mehr isoliert, sondern ihre Wirkungen können in Gesamtsicht produktbezogen dargestellt und analysiert werden. **Dies ist die Voraussetzung, um die potenzielle Verlagerung von Schadwirkungen** zwischen Lebenswegabschnitten und auch zwischen bestimmungsgemäßen und nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen zu quantifizieren und effektiv zu verhindern oder zu verringern. **Finanzielle und personelle** Ressourcen können dann auf die wesentlichen Lebenswegabschnitte und Prozesse oder Vorfälle fokussiert werden. **Produktbezogene Risiken aus der Zuliefererkette** (einschließlich Imageschäden) können effektiver erkannt und gehandhabt werden<sup>148</sup>.

---

<sup>148</sup> Zum Beispiel kann im Rahmen der Produktverantwortung die Entstehung von Dioxin bei der Verbrennung PVC-haltiger Produkte bei Feuern bei den PVC-Herstellern und den Herstellern der PVC-haltigen Produkte gesehen werden. Das tatsächliche Ausmaß und die Relevanz dieser Dioxin-Emissionen kann quantitativ untersucht und im Kontext anderer Umweltauswirkungen und im Vergleich zu Alternativmaterialien quantitativ und objektiv untersucht werden. Z. B. findet in China eine illegale, aber in großem Maßstab betriebene Elektronikschrotterwertung mit Extraktion von Gold mithilfe von Quecksilber und offener Verbrennung der Platinen statt. Die Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen und auf die Umwelt wird im Rahmen der Produktverantwortung u. a. bei den Elektronikherstellern gesehen [BAN 2013].

**In der externen Unternehmenskommunikation** kann der innerbetriebliche Beitrag an vorfallbedingten Personenschäden und Interventionen mit der Umwelt denen aus vor- und nachgelagerten Lebenswegabschnitten gegenüber gestellt werden.

Ein spezifisches, potenzielles Anwendungsgebiet der hier vorgestellten Methode der LVA ist die Untersuchung und umfassende Bewertung von **Sicherheitstechnologie**, beispielsweise von Schutzzäunen, Auffangbehältern, Sprinkleranlagen und Überdruckventilen; siehe Anhang G.

Die durch Sicherheitsbeauftragte und Ökobilanzpraktiker durchgeführten LVA-Studien können in die Entscheidungsvorbereitung in vielen Anwendungsfeldern eingehen und haben somit eine Vielzahl indirekter **Zielgruppen** wie z. B.:

- Entwickler und Vorentwickler
- Designer
- Produktionsplaner
- Einkauf
- Abfall- und Abwasserverantwortliche
- Ersteller von Notfallplänen/betrieblicher Katastrophenschutz
- Unternehmensleitung (für strategische Fragestellungen)
- Gesetzgeber und Fachbehörden (für die Gesetzgebung und -vorbereitung)

Die **Entscheidungsunterstützung**<sup>149</sup> bezieht sich dabei vor allem auf:

- Produkt- und Technologieentwicklung
- Rohstoff-, Material-, Produkt- und Technologiewahl
- Anlagenintegration
- Lieferantenauswahl

---

<sup>149</sup> Es ist wichtig hervorzuheben, dass die LVA nicht dazu dient, alternative Bauteile oder Funktionsgruppen hinsichtlich ihrer Vorfallauswirkungen isoliert miteinander zu vergleichen, da die LVA immer die spezifische Verwendung der Bauteile und Funktionsgruppen und mithin ihre Stellung im Ereignisablauf berücksichtigt.

# 8 Ausblick

## Einleitung

Drei Ebenen von Ausblick lassen sich adressieren:

- Offene Punkte innerhalb der Zielsetzung dieser Arbeit
- Praxisumsetzung und -erprobung sowie Softwareunterstützung
- Angrenzende und vertiefende Fragen und Methoden

### Offene Punkte innerhalb der Zielsetzung dieser Arbeit

Während keine wesentlichen offenen Punkte ungelöst bleiben mussten, gibt es eine Reihe nicht im Kern stehender Aspekte, die noch nicht vollständig gelöst wurden. Hierzu gehört z. B. die Frage, ob und wenn ja wie Produktionsausfälle und andere ebenfalls zu den Folgeaktivitäten gehörende, hier aber noch ausgeklammerte, Aktivitäten einbezogen werden sollen. Dies sind die Aufwendungen zur Untersuchung des Vorfalls, Gerichtsprozesse usw.

Auch die Verbesserung der Zuordnung der Vorfallauswirkungen zu den vorfallbeteiligten Prozessen, insbesondere bei seltenen Vorfällen mittels eines systematisch abzuleitenden zusätzlichen Zuordnungsfaktors zwischen 0 und 1, ist noch offen – dies wurde am Ende von Kap. 5.4.5 kurz skizziert.

### Praxisumsetzung und -erprobung, Softwareunterstützung

Eine **weitere Erprobung** der LVA für andere Vorfalltypen und der Nutzung weiterer Datenquellen wäre wünschenswert, ebenso wie die Erprobung des Verbesserungspotenzial-Ansatzes und die Überprüfung inwieweit eine hinreichend genaue Ermittlung der vorfallbedingten anteiligen Fälle von Berufskrankheiten datenseitig durchführbar ist.

Für die **Berichterstattung und das Review** wurde in der vorliegenden Arbeit eine analoge Anwendbarkeit der Vorgaben der Ökobilanzierung angenommen. Eine Überprüfung in einer **Fallstudie und in allen Details** könnte dies bestätigen oder zu Anpassungen führen.

Ein wichtiger Bereich der Praxisumsetzung ist zudem die **Verbesserung der Datenlage**:

- Wesentliche Zusatzinformationen (z. B. zum jährlichem Produktionsvolumen einer betroffenen Anlage, Mengen verbrannter Produkte usw.) könnten ohne größeren Aufwand zusammen mit Vorfällen dokumentiert werden, da diese Informationen meist direkt bekannt sind oder zumindest geschätzt werden können, d. h. keinen zusätzlichen Erhebungs- oder gar Messaufwand bedürfen.
- Sind aus Untersuchungen relative Häufigkeiten von mittleren und schweren Vorfällen bekannt, können diese Informationen genutzt werden, um die Häufigkeiten und Schwere anderer kleinerer Vorfälle zu schätzen. Zudem ist es denkbar, F-N-Kurven für häufigere und kleinere Vorfälle zu extrapolieren. Oder diese können mittels Kombination der Form der F-N-Kurven aus Ländern mit besserer Datenlage mit den Daten schwerer Vorfälle aus Ländern mit schlechterer Datenlage geschätzt werden.
- In Arbeiten verschiedener Autoren sind hilfreiche, ergänzende Informationen aus Statistiken geschätzt worden, so in [Ronza et al. 2006] z. B. das Verhältnis von Todesfällen zu Verletzten nach Art des Vorfalls (Explosion, Feuer usw.), was zur Schätzung von Verletztanzahlen aus den meist gut dokumentierten Zahlen von Todesfällen genutzt werden kann. Derartige Arbeiten gilt es zu identifizieren und für die LVA auszuwerten.
- Der Aufbau einer ersten umfangreicheren Vorfalldatenbank mit Einheitsvorfällen und aggregierten Vorfallsachinventardatensätzen mit Vorfallsachinventar, Basis-Eintrittshäufigkeit (variierbar), Referenzgröße (variierbar), „Größe“ des verunfallten Realprozesses (skalierbar), Unsicherheitsinformationen usw. könnte den Aufwand von LVA-Studien mittelfristig maßgeblich verringern.

Auch die Definition und Implementierung eines weiterentwickelten **Dokumentationsformates** und einer **Nomenklatur** für Vorfälle, die die Nutzung der LVA und ähnlicher Methoden unterstützen, wäre sinnvoll.

Die Implementierung von vorfallspezifischen **Softwarefunktionalitäten** (u. a. Modellierung Vorfallsystem und quantitative Anbindung an Module des Produktlebensweges) – z. B. als Erweiterung von Ökobilanzsoftware – würde die Durchführung von LVA-Studien etwas erleichtern. In der vorliegenden Arbeit wurden die vorfallspezifischen Objekttypen mithilfe bestehender Funktionalitäten in der Ökobilanzsoftware GaBi 6 emuliert.



Die **Softwareanbindung von QRA-Modellen und LVA-Modell** zur halbautomatischen Übergabe von Informationen an das Vorfallsystem und zur Errechnung der quantitativen Zuordnungsfaktoren der Vorfallauswirkungen zu den vorfallbeteiligten Modulen würde die Durchführung von LVA-Studien entscheidend erleichtern.

**Softwareunterstützung zur Vermeidung lebensweginterner Mehrfachzählung** bei LVA-Studien, die den Verbesserungspotenzial-Ansatz anwenden, würde die Durchführung derartiger LVA-Studien erheblich erleichtern.

### **Angrenzende und vertiefende Fragen und Methoden – methodischer Ausblick**

Während Schadwirkungen von **Ausschuss und Fehlchargen** über den Produktlebensweg nicht im Fokus dieser Arbeit stehen, können sie grundsätzlich mit derselben LVA-Methodik erfasst werden. Die methodische Verfeinerung und u. U. Lösung spezifischer methodischer Probleme steht noch aus.

In einer möglichen, in Fußnote 55 kurz skizzierten **Variante der LVA-Methode**, werden die Vorfallauswirkungen nicht den Auslösern, sondern den diesen zugrunde liegenden **Ursachen** zugeordnet. Die außerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit liegende praktische Erprobung und die methodische Ausarbeitung von Besonderheiten in der Anbindung der Ursachen an die Auslöser sowie in der Auswertung wäre wünschenswert.

Als einfache Erweiterung der LVA könnten **Kosten von Vorfällen** miterfasst und über den Lebensweg aggregiert werden. Die Zuordnung der Kosten zu den vorfallbeteiligten Modulen kann dabei unter Nutzung der hier vorgestellten Zuordnungsansätze erfolgen.

Direkte Unfallopfer werden bisher mittels Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse (LWAA) oder Sozialbilanz erfasst. Da Unfälle und Vorfälle jedoch eine andere Qualität haben, als die anderen im Kontext bestimmungsgemäßer Betriebszustände stehenden Inventarwerte, war in Kap. 5.2.5 argumentiert worden, dass eine separate Erfassung in Form einer LVA geeigneter ist, als die gemischte Erfassung dieser speziellen Untermenge von Vorfallauswirkungen in LWAA oder Sozialbilanz. Es wäre demnach vorteilhaft, wenn **Unfallopfer aus LWAA und Sozialbilanz zukünftig ausgeklammert** würden bzw. die LWAA in der breiteren Sozialbilanz aufgehen würde und die **LVA komplementär zur Sozialbilanz und Ökobilanz** eingesetzt würde.

Auch die Aufwendungen und Auswirkungen auf die Schutzgüter durch **Heilbehandlungen von Verletzungen und von durch Umweltschadstoffe ausgelösten Krankheiten** werden bisher

weder in der Ökobilanzierung noch der LVA erfasst. Die Ökobilanzierung erfasst ferner nicht diejenigen **Belastungen und Wirkungen**, die während der **bestimmungsgemäßen Nutzung von Produkten direkt auf den Menschen** eingehen. Dies sind insbesondere direkte Auswirkungen auf den Menschen aus der bestimmungsgemäßen Anwendung von Körperpflegeprodukten sowie der Einnahme von Medikamenten sowie Nahrungs- und Genussmitteln<sup>150</sup>. Derartige Gesundheitseffekte werden bisher mit Risikoanalyse-Methoden adressiert – ein systematischer Ansatz zur Lebenswegaggregation fehlt ([Wolf et al. 2012]).

Die Erarbeitung entsprechender Methoden würde die Methoden der Ökobilanzierung und der LVA ergänzen und damit die Erfassung aller relevanten produktbezogenen Wirkungen auf die Schutzgüter Menschliche Gesundheit, Natürliche Umwelt und Natürliche Ressourcen in einem konsistenten Rahmen ermöglichen.

---

<sup>150</sup> Die Ökobilanzierung erfasst allerdings die durchschnittliche Aufnahme und potenzielle Schäden aus Schadstoffen, die während bestimmungsgemäßer Betriebszustände in die Umwelt gelangt und über Transport und Umwandlungsprozesse von Nahrungsmittelgrundprodukten (d. h. Landwirtschaft, Fischerei) aufgenommen werden. In manchen Ansätzen wird auch die Exposition von Pflanzenschutzmitteln aufgrund direkter Applikation im Feld, also ohne Umweg über die Umwelt, erfasst.

## 9 Literaturverzeichnis

12. BImSchV: Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Störfall-Verordnung. 12. BImSchV. Fassung 26.04.2010

2003/105/EC: Directive 2003/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2003 amending Council Directive 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances

2006/1907/EC: Regulation (EC) no 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC

2009/125/EC: Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast)

2010/66/EC: Regulation (EC) no 66/2010 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the EU Ecolabel. vol. 2009

2012/18/EU: Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates. (Seveso-Richtlinie)

2013/179/EU: Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations

Abuswer, Meftah Ali: *A quantitative risk management framework for dust and hybrid mixture explosions*, Dalhousie University, Dissertation, 2012

Aelion, Vital ; Weston, Roy F ; Chester, West: Life Cycle Inventory Analysis of Chemical Processes. In: *Environmental Progress* vol. 14 (1995), Nr. 3, S. 193–200

Aissani, Lynda ; Jabouille, Florent ; Bourgois, Jacques ; Rousseaux, Patrick: A new methodology for risk evaluation taking into account the whole life cycle (LCRA): Validation with case study. In: *Process Safety and Environmental Protection* vol. 90, Institution of Chemical Engineers (2012), Nr. 4, S. 295–303

Andersson, Petra ; Simonson, Margaret ; Rosell, Lars: *Fire-LCA Model: Furniture Study*. Gothenburg, 2003 — ISBN 91-7848-958-X

Andersson, Petra ; Simonson, Margaret ; Stripple, Håkan: *Fire safety of upholstered furniture, A Life-Cycle Assessment – Summary Report* : Swedish National Testing and Research Institute, 2003

- Andersson, Petra ; Simonson, Margaret ; Tullin, Claes ; Stripple, Håkan ; Sundqvist, Jan Olov ; Paloposki, Tuomas: *Fire-LCA guidelines*. Oslo : Nordic Innovation Centre, 2005
- Antonsson, Ann-Beth ; Carlsson, Helene: The basis for a method to integrate work environment in life cycle assessments. In: *Journal of Cleaner Production* vol. 3 (1995), Nr. 4, S. 215–220
- Baitz, Martin: *Die Bedeutung der funktionsbasierten Charakterisierung von Flächen-Inanspruchnahmen in industriellen Prozesskettenanalysen - ein Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2002
- Baitz, Martin ; Kreissig, Johannes ; Wolf, Marc-Andree: Methode zur Integration der Naturraum-Inanspruchnahme in Ökobilanzen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* vol. 119 (2000), Nr. 1-6, S. 128–149
- Baitz, Martin ; Wolf, Marc-Andree: Metals and Plastics - Competition or Synergy? In: Gleich, A. von ; Ayres, R. U. ; Gößling-Reisemann, S. (eds.): *Sustainable Metals Management. Securing Our Future - Steps Towards a Closed Loop Economy* : Springer Netherlands, 2006 — ISBN 978-1-4020-4007-8, S. S. 519–534
- Ball, David J ; Floyd, Peter J: *Societal Risks : Risk Assessment Policy Unit (RAPU) of the Health & Safety Executive (HSE), UK, 1997*
- BAN: *Basel Action Network*. URL <http://www.ban.org/>. - abgerufen am 2013-09-12
- Beddies, H.: *Parametrisierte Lebenszyklusanalyse zur umweltlichen Optimierung eines Polyurethan wärmegeämmten Kühlschranks*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1999
- Bedford, Tim ; Cooke, Roger: *Probabilistic Risk Analysis - Foundations and Methods* : Cambridge University Press, 2001 — ISBN 0-521-77320-2
- Bengtsson, G. ; Berglund, R: *Life Cycle Assessment including the Working Environment : summary of method and case studies* ( Nr. IVF-skript 95859): Institutet för Verkstadsteknisk Forskning (IVF), 1996
- Benoît, Catherine ; Norris, Gregory A ; Aulisio, Deana: Social Hotspots Database: The guidelines for social life cycle assessment of products (Oral presentation with slides), 2009
- Benoît-Norris, Catherine ; Vickery-Niederman, Gina ; Valdivia, Sonia ; Franze, Juliane ; Traverso, Marzia ; Ciroth, Andreas ; Mazijn, Bernard: Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* vol. 16 (2011), Nr. 7, S. 682–690
- Bickel, Peter ; Friedrich, Rainer: *ExternE. Externalities of Energy. Methodology 2005 Update*. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2004, 2005 — ISBN 9279004239
- BIOFOAM consortium: Bio-source Based Recyclable Poly(ester-co-amide)s and Poly(ester-co-urethane)s for Industrial Foam Applications. Forschungsprojekt im 5.

Forschungsrahmen-Programm der Europäischen Kommission. Project QLK5-1999-1298 (Project)

Blum, Arlene: *The Case against Candle Resistant TVs*. Green Science Policy Institute, USA. URL [http://greensciencepolicy.org/sites/default/files/Current Case against Candle Resistant TVs IEC March 28 2012.pdf](http://greensciencepolicy.org/sites/default/files/Current%20Case%20against%20Candle%20Resistant%20TVs%20IEC%20March%2028%202012.pdf). - abgerufen am 2012-07-10

Bohnacker, J. Arnulf: *Einfluß von Recyclingverfahren auf die umweltliche Produktbilanz*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1998

Broadbent, Clare ; Stevenson, Martha ; Caldeira-Pires, Armando ; Cockburn, David ; Lesage, Pascal ; Martchek, Ken ; Réthoré, Olivier ; Frischknecht, Rolf: Chapter3. Aggregated Data Development. In: *Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases. A Basis for Greener Processes and Products. "Shonan Guidance Principles"*: United Nations Environment Programme, 2011, S. S. 67–83

Broberg, Ole ; Rasmussen, E.: *Working Environment from Cradle to Grave : Research report. (Arbejdsmiljø fra vugge til grav)*. Copenhagen, 1996

Bundesministerium des Inneren: Schutz Kritischer Infrastrukturen – Basisschutzkonzept. Empfehlungen für Unternehmen (Broschüre), 2005

Burgherr, Peter: In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources. In: *Journal of hazardous materials* vol. 140 (2007), Nr. 1-2, S. 245–256

Burgherr, Peter ; Eckle, Petrisa ; Hirschberg, Stefan: Comparative assessment of severe accident risks in the coal, oil and natural gas chains. In: *Reliability Engineering & System Safety* vol. 105, Elsevier (2012), S. 97–103

Burgherr, Peter ; Eckle, Petrisa ; Hirschberg, Stefan ; Cazzoli, Erik: *Final Report on Severe Accident Risks including Key Indicators. Deliverable No 5.7.2a of Project SECURE (Security of Energy Considering its Uncertainty, Risk and Economic implication). Project No 213744. Seventh Framework Programme*, 2011

Burgherr, Peter ; Hirschberg, Stefan: A Comparative Analysis of Accident Risks in Fossil, Hydro, and Nuclear Energy Chains. In: *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* vol. 14 (2008), Nr. 5, S. 947–973

Calabresi, Guido: The Decision for Accidents : An Approach to Non- Fault Allocation of Cost-The decision for accidents : an approach. In: *Faculty Scholarship Series* vol. 78 (1965), Nr. 4

CCPS: *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. Second. ed. New York : American Institute of Chemical Engineers, 2000 — ISBN 081690720X

CCPS: Survey of Worldwide Risk Criteria - Applications. In: *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria* : American Institute of Chemical Engineers, Inc., 2009, S. S. 119–169

- Coale, A.J. ; Demeny, P.: *Regional Model Life Tables and Stable Population*. Princeton, New York : Princeton University Press, 1966 — ISBN 978-0121770808
- COM(2003) 302 final: Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Integrated Product Policy - Building on Environmental Life-Cycle Thinking
- COM(2005) 666: Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Taking sustainable use of resources forward: A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste
- COM(2005) 670: Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Thematic Strategy on the sustainable use of natural resources
- COM(2008) 397: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the Sustainable Consumption and Production and Sustainable Industrial Policy Action Plan
- COM(2011) 21: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - A resource-efficient Europe – Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy
- Consoli, F. ; Allen, D. ; Boustead, I. ; Fava, J. ; Franklin, W. ; Jensen, A. ; Oude, N. ; Parrish, R. ; Perriman, R. ; Postlethwaite, D. ; Quay, B. ; Séguin, J. ; Vigon, B.: *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice."* Brussels : Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 1993
- Crowl, Daniel A. ; Louvar, Joseph F.: *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. 2. ed. : Pearson Education Inc., 2002 — ISBN 9780130181763
- Crowl, Daniel A. ; Louvar, Joseph F.: *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. 3. ed. Boston : Paul Boger of Pearson Education Inc., 2011 — ISBN 978-0-13-278283-8
- CSB: *U.S. Chemical Safety Board (CSB) Homepage*. URL <http://www.csb.gov>. - abgerufen am 2013-07-23
- CSB: *INVESTIGATION REPORT: Sugar dust explosion and fire. Imperial Sugar Company. Port Wentworth, Georgia. February 7, 2008.* : U.S. Chemical Safety Board, 2009
- CSB: CSB - Completed investigations. URL <http://www.csb.gov/investigations/completed-investigations/?Type=2>. - abgerufen am 2013-01-20
- Debray, B. ; Piatyszek, E. ; Cauffet, F. ; Londiche, H.: *APPENDIX 7: Frequencies and probabilities data for the fault tree. ARAMIS project D1C* : Ecole Nationale Supérieure de Mines de Saint Etienne (France), 2004

- Dekorsy, T.: *Ganzheitliche Bilanzierung als Instrument zur bauteilspezifischen Werkstoff- und Verfahrensauswahl*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1993
- DNV: Phast and Safeti QRA software is the comprehensive software for consequence modelling and Quantitative Risk Assessment (Software) : Det Norske Veritas
- DNV: Safeti WOAD software - Worldwide Offshore Accident Databank (Software) : Det Norske Veritas
- Dreicer, M. ; Tort, V. ; Manen, P.: *ExternE. Externalities of energy*. Luxembourg : ETSU, Metro-economica; European Commission - DGXII Science, Research and development, 1995
- Dreyer, Louise Camilla ; Hauschild, Michael Z ; Schierbeck, Jens: A Framework for Social Life Cycle Impact Assessment. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* vol. 11 (2006), Nr. 2, S. 88–97
- Duce, Andrea Del ; Egede, Patricia ; Öhlschläger, Gerlind ; Dettmer, Tina ; Althaus, Hans-Jörg ; Bütler, Thomas ; Szczechowicz, Eva: Guidebook for LCA studies in the context of e-mobility (eLCAR), 2013
- EC: Work programme 2013 cooperation theme 2 food, agriculture and fisheries, and biotechnology (FP7 Waste call) (Call). Luxembourg : European Commission, 2012
- Eckle, Petrisa ; Burgherr, Peter: Bayesian data analysis of severe fatal accident risk in the oil chain. In: *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis* vol. 33 (2013), Nr. 1, S. 146–60
- Eckle, Petrisa ; Burgherr, Peter ; Michaux, Edouard: Risk of large oil spills: a statistical analysis in the aftermath of Deepwater Horizon. In: *Environmental science & technology* vol. 46 (2012), Nr. 23, S. 13002–8
- Eckle, Petrisa ; Cazzoli, Erik ; Burgherr, Peter ; Hirschberg, Stefan: *Analysis of Terrorism Risk for Energy Installations - Executive summary. Deliverable No 5.7.2b of the project SECURE (Security of Energy Considering its Uncertainty, Risk and Economic implications). Project No 213744. Seventh Framework Programme*, 2011
- ecoinvent: ecoinvent database (Database Nr. 3) : ecoinvent centre, Switzerland, 2013
- EHS Today: *OSHA: Imperial Sugar Will Pay More Than \$6 Million, Implement Safety and Health Abatement Measures.* URL <http://ehstoday.com/standards/osha/imperial-sugar-implement-safety-health-abatement-measures-3012>. - abgerufen am 2013-09-03
- Ekener-Petersen, Elisabeth ; Finnveden, Göran: Potential hotspots identified by social LCA—part 1: a case study of a laptop computer. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* vol. 18 (2012), Nr. 1, S. 127–143
- Ericson, Clifton A.: Fault Tree Analysis – A History. In: *The 17th International System Safety Conference*. Orlando, Florida : SEWORLD - System Safety Society, 1999

- Etkin, Dagmar Schmidt: Analysis of Oil Spill Trends in the United States and Worldwide. In: *International Oil Spill Conference Proceedings* vol. 2001 (2001), Nr. 2, S. 1291–1300
- European Commission - JRC: Major Accident Reporting System (MARS) (database), 2012
- European Commission - JRC-IES: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. 1. ed. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2010 — ISBN 9789279190926
- European Commission - JRC-IES: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Review schemes for Life Cycle Assessment*. 1. ed. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2010 — ISBN 9789279190940
- European Commission - JRC-IES: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Reviewer qualification for Life Cycle Inventory data sets*. 1. ed. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2010 — ISBN 9789279158568
- European Commission - JRC-IES: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. 1. ed. : Publications Office of the European Union, 2011 — ISBN 9789279174513
- European Commission - JRC-IES: ILCD reference format (Format Nr. 1.1 Maintenance Release (MR) 2) : European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2012
- European Commission - JRC-IES: European Reference Life Cycle Database (ELCD) (Database Nr. 3) : European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2013
- European Commission - JRC-IES: *LCA Resources Directory*. URL <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/databaseList.vm>. - abgerufen am 2013-09-12
- Eyerer, Peter: *Ganzheitliche Bilanzierung*. first. ed. : Springer, 1996 — ISBN 978-3540593560
- Ezzati, Majid ; Rodgers, Anthony ; Lopez, Alan D ; Hoorn, Stephen Vander ; Murray, Christopher J L: Mortality and burden of disease attributable to individual risk factors. In: *Comparative Quantification of Health Risks*, 2002, S. S. 1347–1360
- Faltenbacher, M.: *Modell zur ökologisch-technischen Lebenszyklusanalyse von Nahverkehrsbus-systemen*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2006
- Farmer, F.R.: Reactor Safety and Siting: A Proposed Risk Criterion. In: *Nuclear Safety* vol. 8 (1967), Nr. 6, S. 539–548
- Ferek, Ronald J. ; Hobbs, Peter V. ; Herring, John A. ; Laursen, Krista K. ; Weiss, Ray E. ; Rasmussen, Rei A.: Chemical composition of emissions from the Kuwait oil fires. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* vol. 97 (1992), Nr. D13, S. 14483–14489



- Fleischer, Günter: *Systematische Auswahlkriterien für die Entwicklung von Verbundwerkstoffen unter Beachtung ökologischer Erfordernisse (EuroMat). Förderkennzeichen BMFT 01-ZC9513/0; 01-ZC95156; 01-ZC9516/9*. Berlin, 1998
- Forster, Piers ; Ramaswamy, Venkatachalam ; Artaxo, Paulo ; Berntsen, Terje ; Betts, Richard ; Fahey, David W. ; Haywood, James ; Lean, Judith ; Lowe, David C. ; Myhre, Gunnar ; Nganga, John ; Prinn, Ronald ; Raga, Graciela ; Schulz, Michael ; Dorland, Robert Van: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Nakajima, T. ; Ramanathan, V. (eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York, 2007, S. S. 131–215
- Freeman, Raymond Randy: What to Do When Nothing Has Happened ? In: *Process Safety Progress* vol. 30 (2011), Nr. 3, S. 204 – 211
- French Ministry of Ecology: Analysis, research and information on accidents (ARIA) (Database) : French Ministry of Ecology
- Freund, J. ; Stute, H. ; Riedel, U. ; Fett, H. J. ; Philip, G: *Sicherheitstechnische Grundbegriffe : Kerntechnischer Ausschuß (KTA)*, 1989
- Friedrich, Rainer: *New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies - New Ext* ( Nr. ENG1-CT2000-00129). Stuttgart, 2004
- Friedrich, Rainer: Integrated Assessment of Electricity Generation Technologies. Presentation held at: European Energy Conference – E2C., 2012
- Gabriel, R.: *Optimierung der Metallzerspanung am Beispiel unterschiedlicher Schmierkonzepte - Ein Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2004
- Gawrich, Stefan: *Analyse der Einsatzmöglichkeiten und Validierung des globalen Gesundheitsmaßes "Disability adjusted life years" (DALY) mit Mikrodaten am Beispiel des United States Renal Data System*. Ruhr-Universität Bochum, Diss., Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2002
- Gediga, Johannes: *Methode der standort-spezifischen Wirkungsanalyse anhand von SO2-Emissionen - ein Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung -*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2001
- Global Terrorism Database: National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism (START) (Database), 2012
- globalincidentmap.com: *Global Incident Map*. URL <http://www.globalincidentmap.com/>. - abgerufen am 2013-03-21
- Goedkoop, Mark ; Heijungs, Reinout ; Huijbregts, Mark ; Schryver, An De ; Struijs, Jaap ; Zelm, Rosalie van: *ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I:*

*Characterisation*. 1. ed. The Hague, The Netherlands: VROM : Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009

Gooijer, Leendert ; Cornil, N ; Lenoble, C.L.: *An international comparison of four quantitative risk assessment approaches* : National Institute for Public Health and the Environment, The Netherlands (RIVM), 2011

Grams, Timm ; Mildenerger, O. (ed.): *Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements* : Springer Vieweg, 2001 — ISBN 978-3-663-10227-4

Guinée, J. ; Huppes, G. ; Lankreijer, R.M. ; Haes, H.A. Udo Dd ; Sleswijk, A. Wegener ; Ansems, A.M.M. ; Eggels, P.G. ; Van Duin, R ; De Goede, H.P.: *Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide - October 1992. I - Guide. II: Backgrounds*. Leiden, 1992 — ISBN 90-5191-064-9

Guinée, J.B. ; Gorrée, M. ; Heijungs, R. ; Huppes, G. ; Kleijn, R. ; Koning, A. de ; Oers, L. van ; Wegener Sleswijk, A. ; Suh, S. ; Udo de Haes, H.A. ; Bruijn, H. de ; Duin, R. van ; Huijbregts, M A J ; Guinée, J. B. (ed.): *Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002 — ISBN 1-4020-0228-9

Hamzi, R. ; Londiche, H. ; Bourmada, N.: Fire-LCA model for environmental decision-making. In: *Chemical Engineering Research and Design* vol. 86 (2008), Nr. 10, S. 1161–1166

Harsch, M.: *Modellierung und Optimierung verfahrenstechnischer Prozesse in der Lackiertechnik-Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1998

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen: *Anlagezustände eines Kernkraftwerks. Richtlinie für schweizerische Kernanlagen*. Villigen, Schweiz, 1993

Hauptmanns, U. ; Hertrich, M. ; Werner, W.: *Technische Risiken : Ermittlung und Beurteilung*. Berlin : Springer, 1987 — ISBN 978-3540181859

Hauschild, M. ; Wenzel, H.: *Environmental Assessment of Products. Volume 2 : Scientific background*. London : Chapman & Hall, 1998 — ISBN 978-0-412-80810-4

Hauschild, Michael ; Potting, José: *Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology* : Danish Ministry of the Environment - Environmental Protection Agency, 2005

Hesel, D.: Erfahrungen aus Störfallabläufen. In: Uth, H.-J. (ed.): *Krisenmanagement bei Störfällen : Vorsorge und Abwehr der Gefahren durch chemische Stoffe*. Berlin : Springer, 1994

Hirschberg, S ; Spiekerman, G ; Dones, R: *Project GaBE: Comprehensive Assessment of Energy Systems. Severe Accidents in the Energy Sector*. 1. ed. Villigen, Switzerland, 1998

Hirschberg, Stefan ; Burgherr, Peter ; Spiekerman, Gerard ; Cazzoli, Erik ; Vitazek, Jirina ; Cheng, Lulian: *China Energy Technology Program. Comparative Assessment of Severe Accidents in the Chinese Energy Sector*. Villigen, Switzerland, 2003

- Hofstetter, Patrick: *Perspectives in life cycle impact assessment a structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and valuesphere*, Swiss Federal Institute of Technology Zurich - Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1998
- Hofstetter, Patrick ; Hammitt, James K.: *Human health metrics for environmental decision support tools : Lessons from health economics and decision analysis*. Cincinnati : United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development., 2001
- Hofstetter, Patrick ; Norris, Gregory A.: Policy Analysis Why and How Should We Assess Occupational Health Impacts in Integrated Product Policy ? In: *Environmental Science & Technology* vol. 37 (2003), Nr. 10, S. 2025–2035
- Homedes, Nuria: *The Disability-Adjusted Life Year (DALY) Definition, Measurement and Potential Use*. Sant Cugat del Valle, 1996
- Hong Kong Planning Division: *Chapter 12 - Miscellaneous Planning Standards and Guidelines*. URL [http://www.pland.gov.hk/pland\\_en/tech\\_doc/hkpsg/full/ch12/ch12\\_text.htm](http://www.pland.gov.hk/pland_en/tech_doc/hkpsg/full/ch12/ch12_text.htm)
- Hong Kong Planning Division: *Figure 3: Societal Risk Guidelines for Acceptable Risk Levels*. URL [http://www.pland.gov.hk/pland\\_en/tech\\_doc/hkpsg/full/ch12/ch12\\_text.htm](http://www.pland.gov.hk/pland_en/tech_doc/hkpsg/full/ch12/ch12_text.htm). - abgerufen am 2013-03-06
- HSE: *Failure Rate and Event Data for use within Land Use Planning Risk Assessments* : UK Health and Safety Executive, 2010
- Hunt, Robert G ; Franklin, William E: *LCA History L C A - How it Came About - Personal Reflections on the Origin and the Development of*. In: *Int. J. LCA* vol. 1 (1990), Nr. 1, S. 4–7
- Huppes, Gjalt ; Ishikawa, Masanobu: *A Framework for Quantified Eco-efficiency Analysis*. In: *Journal of Industrial Ecology* vol. 9, MIT Press (2005), Nr. 4, S. 25–41
- Husain, Tahir ; Amin, Mohamed Bakr: *Kuwaiti Oil Fires: Regional Environmental Perspectives*. First. ed. Oxford : BPC Wheatons Ltd., 1995 — ISBN 978-0-08-042418-7
- IEA: *Key World Energy Statistics (Broschüre)*. Paris : International Energy Agency, 2012
- ifeu: *Ökobilanz von Folien aus Ethylen-Vinyl-Alkohol-Copolymer und Aluminium zur Verpackung von Kaffeeprodukten*. Heidelberg : Institut für Energie und Umwelt (ifeu) im Auftrag der Firma Jacobs-Suchard Bremen. Unveröffentlicht., 1990
- IKP: *Ganzheitliche Bilanzierung von Baumaterialien und Gebäuden* : Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung (IKP), Universität Stuttgart. Projekt im Auftrag mehrerer Industrieunternehmen und Baustoffverbände. Unveröffentlicht., 1994
- IKP: *Ganzautobilanz Golf III* : Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung (IKP), Universität Stuttgart. Projekt im Auftrag der Volkswagen AG. Unveröffentlicht., 1995
- IMPACT World+ consortium: *IMPACT World+ LCIA methodology*. URL <http://www.impactworldplus.org/en/publications.php>. - abgerufen am 2013-09-12

- INL: Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) (Software Nr. 8.0.9.0) : Idaho National Laboratory
- Itsubo, Norihiro: *LIME 3*. URL <http://www.yc.tcu.ac.jp/news/image/20121028/program.pdf>. - abgerufen am 2013-09-12. — International Symposium on Life Cycle Impact Assessment - Towards development of global scale LCIA method
- Itsubo, Norihiro ; Inaba, Atsushi: A new LCIA method: LIME has been completed. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* vol. 8 (2003), Nr. 5, S. 305–305
- Jaggy, Michael: *Methodik der Risikoanalyse von Deponien*. Zürich : Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1995
- Jensen, Allan Astrup ; Leif, Hoffman ; Møller, Birgitte T. ; Schmidt, Anders ; Christiansen, Kim ; Elkington, John ; Dijk, Franceska van: *Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources*. Copenhagen : EEA (European Environment Agency), 1997 — ISBN 92-9167-079-0
- Johnston, Fay H ; Henderson, Sarah B ; Chen, Yang ; Randerson, James T ; Marlier, Miriam ; Defries, Ruth S ; Kinney, Patrick ; Bowman, David M J S ; Brauer, Michael: Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. In: *Environmental health perspectives* vol. 120 (2012), Nr. 5, S. 695–701
- Jolliet, Olivier ; Margni, Manuele ; Charles, Raphaël ; Humbert, Sébastien ; Payet, Jérôme ; Rebitzer, Gerald ; Rosenbaum, Ralph: IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* vol. 8, Ecomed (2003), Nr. 6, S. 324–330
- Jones, David A.: *Nomenclature for hazard and risk assessment in the process industries*. 2. ed. : Institution of Chemical Engineers (UK), 1992 — ISBN 0 85295 297 X
- Kaplan, S.: Applying the General Theory of Quantitative Risk Assessment (QRA) to Terrorism Risk. In: Haimes, Y. Y. ; Moser, D. A. ; Stakhiv, E. Z. ; Zisk, G. I. ; Dirickson, D. ; Zisk, B. I. (eds.): *Risk-Based Decisionmaking in Water Resources X*: American Society of Civil Engineers, 2003, S. S. 77–81
- Kleindorfer, P. R.: Industrial Ecology and Risk Analysis. In: Ayres, R. U. ; Ayres, L. (eds.): *A Handbook of Industrial Ecology* : Edward Elgar Publishing Limited, 2002, S. S. 467–475
- Krewitt, W: *Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1996
- Krewitt, Wolfram: Telefon-Interview mit Dr. Wolfram Krewitt am 09.09.2004. (Persönliche Mitteilung), 2004
- Kupfer, Thilo: *Prognose von Umweltauswirkungen bei der Entwicklung chemischer Anlagen : ein Beitrag zur ganzheitlichen Bilanzierung*, University Stuttgart, Dissertation, 2005

Kurth, Stephan ; Klöpffer, Walter ; Renner, Isa: *Entwicklung eines Modells zur Berücksichtigung der Risiken durch nicht bestimmungsgemäße Betriebszustände von Industrieanlagen im Rahmen von Ökobilanzen. Forschungsbericht UFOPLAN Nr. 201 48 309*. Berlin : Umweltbundesamt, 2004

LAI: *Leitfaden zur Erfassung, Aufklärung und Auswertung von Störfällen und Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs im Sinne der Störfall-Verordnung : von 1993 in der Fassung von 2002*. : Umweltbundesamt, Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen, 2002

LC-Impact: *LC-Impact*. URL <http://www.lc-impact.eu/>. - abgerufen am 2013-09-11

Lees, Frank P.: *Loss Prevention in the Process Industries - Hazard identification, Assessment and Control*. vol. 1. 2. ed. : Butterworth-Heinemann - Reed Educational and Professional Publishing, 1996 — ISBN 0-7506-1547-8

Lewis, Steve: An Overview of Leading Software Tools for QRA. In: *7th Professional Development Conference & Exhibition*. Bahrain, 2005

Lim, Stephen S ; Vos, Theo ; Flaxman, Abraham D ; Danaei, Goodarz ; Shibuya, Kenji ; Adair-Rohani, Heather ; Amann, Markus ; Anderson, H Ross ; Andrews, Kathryn G ; Aryee, Martin ; Atkinson, Charles ; Bacchus, Loraine J ; Bahalim, Adil N ; Balakrishnan, Kalpana ; Balmes, John ; Barker-Collo, Suzanne ; Baxter, Amanda ; Bell, Michelle L ; Blore, Jed D ; Blyth, Fiona ; et al.: A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. In: *Lancet* vol. 380 (2012), Nr. 9859, S. 2224–60

Lozanovski, A. ; Schuller, O. ; Faltenbacher, M.: *Guidance Document for performing LCAs on Fuel Cells and H<sub>2</sub> Technologies (Hyguide)*. Stuttgart, 2011

Lundie, Sven ; Citroth, Andreas ; Huppel, Gjalte: *Inventory methods in LCA : towards consistency and improvement. Life Cycle Inventory (LCI) Programme - Task Force 3: Methodological Consistency. Final report* : UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2007

Makishi Colodel, Cecilia Tiemi: *Systematischer Ansatz zur Abschätzung von länderspezifischen Sachbilanzdaten im Rahmen der Ökobilanz*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2010

Marx, Jeffrey D ; Cornwell, John B: What is a QRA and what can it tell you? In: *2001 Annual Symposium Beyond Regulatory Compliance, Making Safety Second Nature*. College Station, Texas, 2001

Mayer-Spohn, Oliver: *Parametrised life cycle assessment of electricity generation in hard-coal-fuelled power plants with carbon capture and storage*, University Stuttgart, Dissertation, 2009

Mollet Füllstandtechnik GmbH: *Schüttgüter Schüttdichte/Schüttgewicht. Informationsbroschüre*. URL [http://www.mollet.de/uploads/tx\\_cinproducts/Schüttgutdichte\\_de\\_01.pdf](http://www.mollet.de/uploads/tx_cinproducts/Schüttgutdichte_de_01.pdf)

- Moore, David A.: Chapter 23. Security. In: Green, Don A.; Perry, R. H. (ed.): *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8. ed., 2007
- Mujiyanto, Arief ; Susetyo, Priyojati: Life Cycle Assessment on Autoliv's Driver Airbag (Master thesis). Göteborg, 2010
- Muller, Julia: TIMELINE : Imperial Sugar explosion from 2008 until today. In: *SavannahNow.com*, Savannah Morning News (2013), Nr. 347
- Murray, C J L ; Ahmad, O B ; Lopez, A D ; Salomon, J A: *WHO System of Model Life Tables* : World Health Organization
- Murray, Christopher J L: Quantifying the burden of disease. In: *WHO Bulletin* vol. 72 (1994), Nr. 3, S. 429–445
- Murray, Christopher J. L. ; Acharaya, Arnab K.: *Understanding DALYs*. Cambridge : Harvard Center for Population and Development Studies, 1996
- N.N.: *Dust explosion at Iscal Sugar injures one employee*. URL [http://www.sugarinfo.co.uk/news/website\\_contents/view/1208918](http://www.sugarinfo.co.uk/news/website_contents/view/1208918). - abgerufen am 2013-09-12. — sugar online.com
- N.N.: *Nuklearkatastrophe von Tschernobyl*. URL [http://de.wikipedia.org/wiki/Nuklearkatastrophe\\_von\\_Tschernobyl](http://de.wikipedia.org/wiki/Nuklearkatastrophe_von_Tschernobyl). - abgerufen am 2013-09-11
- NASA's Earth Observatory: Oilwell fires Kuwait. Landsat image. April 1991., 1991
- Norm DIN 25419:1985: Ereignisablaufanalyse – Verfahren, graphische Symbole und Auswertung
- Norm DIN 25424 Teil 1:1981: Fehlerbaumanalyse – Methode und Bildzeichen
- Norm DIN 25424 Teil 2:1990: Fehlerbaumanalyse – Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes
- Norm DIN 40041:1990-12: Zuverlässigkeit; Begriffe
- Norm DIN EN 31010:2010: Risikomanagement - Verfahren zur Risikobeurteilung.
- Norm DIN EN ISO 12100-1:2004: Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodologie. Germany
- Norm DIN EN ISO 14021:1999: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II)
- Norm DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen

Norm DIN EN ISO 14044:2006-10: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen

Norm DIN EN ISO 9000:2005-12: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe

Norm ISO 14040:2006: Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework

Norm ISO 14044:2006 (E): Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines

OECD: *Descriptions of selected key generic terms used in chemical hazard/risk assessment* : Organisation for Economic Co-operation and Development, 2003 — ISBN 9789264079120

OECD ; ITF: International Road Traffic and Accident Database (IRTAD). Road Transport Research Programme : Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) and International Transport Forum (ITF)

OGP: *Assessment Risk Data Directory: Blowout frequencies* : International Oil and Gas Producers Association, 2010

OGP: *Assessment Risk Data Directory: Guide to finding and using reliability data for QRA* : International Oil and Gas Producers Association, 2010

OGP: *Assessment Risk Data Directory: Process release frequencies* : International Association of Oil & Gas Producers, 2010

OGP: *Assessment Risk Data Directory: Storage incident frequencies* : International Oil and Gas Producers Association, 2010

Öko-Institut: *Produktlinienanalyse. Bedürfnisse, Produkte und ihre Folgen*. Köln : Institut für angewandte Ökologie e.V. - Projektgruppe Ökologische Wirtschaft, 1987

Ozawa, Mamoru: *Towards Risk-based Life Cycle Assessment*. International Institute for Advanced Studies., 2002

PE Europe ; IKP Universität Stuttgart: GaBi Software (Software Nr. 4), 2003

PE International AG: *Database for social LCA to be released*. URL <http://www.pe-international.com/international/company/newsroom/news/2008/news-2008-detail/article/database-for-social-lca-to-be-released/>. - abgerufen am 2013-02-14

PE International AG: *GaBi powers latest CAD design tool from SolidWorks*. URL <http://www.pe-international.com/company/newsroom/news/2011/news-2011-detail/article/gabi-powers-latest-cad-design-tool-from-solidworks/>. - abgerufen am 2011-12-06

PE International AG: Data-on-demand. GaBi@PE-International.com, 2013

PE International AG: GaBi Datenbanken (Database), 2013

PE International AG: GaBi Software (Software Nr. 6), 2013

Pelletier, Nathan ; Maas, Rob ; Goralczyk, Malgorzata ; Wolf, Marc-Andree: *Towards a European Sustainability Footprint Framework: Theory, Concepts, Applications*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2012 — ISBN 978-92-79-26280-7

Peterson, Larry: *Imperial execs mulled over implications of 1996 sugar plant blast, CFO says*.  
URL <http://m.savannahnow.com/news/2009-10-18/imperial-execs-mulled-over-implications-1996-sugar-plant-blast-cfo-says>. - abgerufen am 2013-09-12. — Savanna Now Newspaper

Pfleiderer, I.: *Ein Allgemeines Modell zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung von Produktlebenswegen*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1998

Pirhonen, Päivi: *Hazard assessment as a tool for companies for managing accidental releases to the environment*, Helsinki University of Technology, Dissertation, 1995

Prüss-Üstün, Annette ; Mathers, Colin ; Corvalán, Carlos ; Woodward, Alistair ; Prüss-Üstün, A. ; Campbell-Lendrum, D. ; Corvalán, C. ; Woodward, A. (eds.): *Introduction and methods Assessing the environmental burden of disease at national and local levels*. Geneva : World Health Organization 2003, 2003 — ISBN 92 4 154620 4

PSI: ENSAD – Energy-Related Severe Accident Database : Paul Scherrer Institut, 1998

Robertson, Adam B. ; Lam, Frank C. F. ; Cole, Raymond J.: A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete. In: *Buildings* vol. 2 (2012), Nr. 4, S. 245–270

Ronza, Andrea ; Muñoz, Miguel ; Carol, Sergi ; Casal, Joaquim: Consequences of major accidents: assessing the number of injured people. In: *Journal of hazardous materials* vol. 133 (2006), Nr. 1-3, S. 46–52

Saling, P. ; Kicherer, A. ; Dittrich-Krämer, B. ; Wittlinger, R. ; Zombik, W. ; Schmidt, I. ; Schrott, W. ; Schmidt, S.: Eco-efficiency Analysis by BASF : The Method. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* vol. 7 (2002), Nr. 4, S. 203–218

Saling, Peter ; Analysis, Eco-efficiency: *Social impacts evaluated with the SEEBALANCE method*.  
URL [http://www.greendelta.com/uploads/media/BASF\\_Mueller.pdf](http://www.greendelta.com/uploads/media/BASF_Mueller.pdf). - abgerufen am 2013-09-09

Sangobpai, Siriporn: Refinery fire Bangchak (Photo). Bangkok : The Nation, Thailand, 2012

Scheumann, René ; Wolf, Kirana ; Chang, Ya-Ju ; Neugebauer, Sabrina ; Finkbeiner, Matthias: A new indicator framework for LCSA considering safeguard subjects. In: *Proceedings of the SETAC Europe 23rd Annual Meeting*. Glasgow : SETAC Europe, 2013

Schmidt, Anders ; Brunn-Poulsen, Pia ; Andreasen, Jacob ; Fløe, Thomas ; Poulsen, Knud E.: *LCA and the working environment*. Copenhagen : Danish Environmental Protection Agency, 2004



- Schmidt, Anders ; Bruun-Poulsen, Pia ; Andreasen, Jacob ; Fløe, Thomas ; Poulsen, Knud Erik: Integration of the working environment in life cycle assessment (LCA): a new methodology : Danish Environmental Protection Agency, 2000
- Schmidt, Anders ; Poulsen, Pia Brunn ; Andreasen, Jacob ; Floe, Thomas ; Poulsen, Knud Erik: *The working environment in LCA. A new approach* : Danish Environmental Protection Agency, 2004
- Schmidt, I. ; Meurer, M. ; Saling, P. ; Kicherer, A. ; Reuter, W. ; Gensch, C: SEEbalance - Managing Sustainability of Products and Processes with the Socio-Eco-Efficiency Analysis by BASF. In: *Greener Management International* (2004), Nr. 45, S. 79–94
- Schuckert, Manfred: *Ganzheitliche Bilanzierung - vom Bauteil zum system am Beispiel von Verkehrsträgern.*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1996
- Schuller, O.: *Methode zur Bestimmung von Umweltprofilen der zukünftigen Erdölversorgung und erdölbasierten Kraftstoffbereitstellung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2011
- Schütz, H. ; Wiedemann, P ; Hennings, W ; Mertens, J ; Clauberg, M: *Vergleichende Risikobewertung Konzepte , Probleme und Anwendungsmöglichkeiten. Abschlußbericht zum BfS-Projekt StSch 4217 "Risikobewertung und -management: Ausarbeitung von Konzepten eines integrierten und vergleichenden Risikoansatzes,"* 2003
- SFK: *Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung* : Störfall-Kommission, 2004
- Sharp, Jerry: Train crash in Painesville Ohio (Photo), 2010
- Sheehan, Ivan Sascha: Assessing and Comparing Data Sources for Terrorism Research. In: Lum, C. ; Kennedy, L. W. (eds.): *Evidence-Based Counterterrorism Policy*. New York, NY : Springer New York, 2012 — ISBN 978-1-4614-0952-6, S. S. 13–40
- Shibasaki, Maiya: *Methode zur Prognose der Ökobilanz einer Großanlage auf Basis einer Pilotanlage in der Verfahrenstechnik - ein Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2008
- Simonson, M. ; Andersson, P. ; Blomqvist, P. ; Stripple, H.: Environmental Assessment Of Fires In Products Using The Fire-lca Model. In: *Fire Safety Science* vol. 8 (2005), S. 1071–1082
- Simonson, M. ; Blomqvist, P. ; Boldizar, A. ; Möller, K. ; Rosell, L. ; Tullin, C. ; Stripple, H. ; Sundqvist, J. O.: *Fire-LCA Model : TV Case Study*, 2000
- Simonson, Margaret: Telefon-Interview mit Margaret Simonson zur Fire-LCA Methode am 14.06.2004, 2004
- Simonson, Margaret ; Andersson, Petra ; Rosell, Lars ; Emanuelsson, Viktor ; Stripple, Håkan: *Fire-LCA Model : Cables Case Study*, 2001

- Simonson, Margaret ; Boldizar, Antal ; Tullin, Claes ; Stripple, Hakan ; Sundqvist, Jan Olov: *The Incorporation of Fire Considerations in the Life-Cycle Assessment of Polymeric Composite Materials : A Preparatory Study*. Gothenburg, 1998
- Sonnemann, Guido ; Vigon, Bruce ; Broadbent, Clare ; Curran, Mary Ann ; Finkbeiner, Matthias ; Frischknecht, Rolf ; Inaba, Atsushi ; Schanssema, Aafko ; Stevenson, Martha ; Ugaya, Cássia Maria Lie ; Wang, Hongtao ; Wolf, Marc-Andree ; Valdivia, Sonia: Process on "global guidance for LCA databases". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* vol. 16 (2010), Nr. 1, S. 95–97
- TNO: *Failure and Accidents Technical information System (FACTS)*. URL <http://www.factsonline.nl/>. - abgerufen am 2013-07-21
- Tong, Hui ; Wang, Ying: Social LCA case study of Autoliv's driver airbag system Comparing life years saved by a driver airbag system with life (Master thesis). Göteborg, 2011
- U.S. Census Bureau: *Economic Census 2007*. URL <http://www2.census.gov/econ2007/EC/sector31/EC0731I2.zip>. - abgerufen am 2013-04-27
- UBA: *Zentrale Melde- und Auswertestelle (ZEMA)*. URL <http://www.umweltbundesamt.de/nachhaltige-produktion-anlagensicherheit/zema/>. - abgerufen am 2013-07-15
- US Army Environmental Hygiene Agency: *Interim: Kuwait Oil Fire Health Risk Assessment* ( Nr. No. 39-26-L192-91), 1991
- US EIA: *Total Oil Supply per Country 1980 to 2012*. URL <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=5&pid=53&aid=1&cid=all,&syid=1980&eyid=2012&unit=TBPD>. - abgerufen am 2013-09-10
- US Embassy Kuwait: Overview of current business conditions in Kuwait (Memorandum, Grey literature), 1991
- Volz, Thorsten: *Integration systematischer Analyse und Prognose in die Ganzheitliche Bilanzierung : Instrumentarium zur rechnergestützten Modellierung*. Aachen : Shaker Verlag, 1999 — ISBN 3-8265-6049-3
- Vornorm ISO/TS 14048:2002-04: Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format
- Weidema, Bo: *Market information in life cycle assessment. Environmental Project No. 863 2003* : Danish Environmental Protection Agency, 2003
- Weiss, Ray E. ; Hobbs, Peter V.: Optical extinction properties of smoke from the Kuwait oil fires. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* vol. 97 (1992), Nr. D13, S. 14537–14540

- Welker, Everett L. ; Lipow, Myron: Estimating the exponential failure rate from data with no failure events. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Los Angeles, Calif., 1974, S. S. 420–427
- WHO: *National tools. National burden of disease supplementary files. Disability weights table*. URL <http://www.who.int/healthinfo/bodreferencedisabilityweights.xls>. - abgerufen am 2013-06-25
- WHO: *National tools. National burden of disease supplementary files. Standard life table*. URL <http://www.who.int/healthinfo/bodreferencestandardlifetable.xls>. - abgerufen am 2013-06-24
- Wittstock, Bastian ; Gantner, Johannes ; Lenz, Katrin ; Saunders, Tom ; Anderson, Jane ; Carter, Claire ; Gyetvai, Zsoka ; Kreißig, Johannes ; Braune, Anna ; Lasvaux, Sébastien ; Bosdevigie, Boris ; Bazzana, Manuel ; Schiopu, Nicoleta ; Jayr, Emmanuel ; Nibel, Sylviane ; Chevalier, Jacques ; Hans, Julien ; Fullana i Palmer, Pere ; Gazulla, Cristina ; Mundy, Jo-Anne ; et al.: EeB Guidance Document Part A: Products - Operational guidance for Life Cycle Assessment studies of the Energy Efficient Buildings Initiative. FP7 Coordination and Support Action – EeB.ENV.2011.3.1.5-2, 2012
- Wolf, Hagen Reiner: Interview zur Nutzung von Fehlerbaumanalysen in der Qualitätssicherung in der Automobilzuliefererindustrie mit Herrn Dipl.-Ing. Hagen Reiner Wolf, Hauptabteilungsleiter Qualitätssicherung i. R. der Bergmann Kabelwerke, Brake, am 09.05.2012, 2012
- Wolf, Marc-Andree: After forest slash-and-burn fire near Manaus (Brazil) (Photo), 1995
- Wolf, Marc-Andree: Integrating accident-related methods and impacts into the life cycle toolbox. In: *SETAC Europe Annual Meeting*. vol. 14. Berlin : SETAC Europe, 2012
- Wolf, Marc-Andree ; Baitz, Martin ; Kreissig, Johannes: Assessing the Sustainability of Polymer Products. In: Eyerer, P. ; Weller, M. ; Hübner, C. (eds.): *Polymers - Opportunities and Risks II*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010 — ISBN 978-3-642-02796-3, S. S. 1–53
- Wolf, Marc-Andree ; Baitz, Martin ; Kupfer, Thilo: Process-level Life Cycle Working Time (LCWT) inventories as basis for the social extension of LCA / LCE. In: *12th SETAC Europe Annual Meeting*. Vienna, 2002
- Wolf, Marc-Andree ; Kupfer, Thilo ; Baitz, Martin: Life Cycle Sustainability – R&D of biosource based polymers. In: *The Fifth Conference on Ecomaterials*. Hawaii, USA, 2001
- Wolf, Marc-Andree ; Pant, Rana ; Chomkhamsri, Kirana ; Sala, Serenella ; Pennington, David: *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook (online version)*. first. ed. Luxembourg : European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2012 — ISBN 9789279216404
- Wolf, Marc-Andree ; Pennington, David: European Platform on Life Cycle Assessment. Kick-off meeting for European Business. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. 21.11.2005 (Oral presentation with slides). Brussels

Zamagni, A ; Buttol, P ; Porta, P L ; Buonamici, R ; Masoni, P ; Guinee, Jeroen ; Ekvall, Tomas:  
*Critical review of current research needs and limitations related to ISO-LCA practice. Annex  
2 – Reports of the topics and approaches analyzed. D7 of FP6 Project no. 037075 (CALCAS),  
2008*

Zamagni, A ; Buttol, P. ; Buonamici, R. ; Masoni, P. ; Guinée, J.B. ; Huppes, G. ; Heijungs, R. ;  
Voet, E. van der ; Ekvall, T. ; Rydberg, T.: *Blue Paper on Life Cycle Sustainability Analysis.  
D20 of FP6 Project no. 037075 (CALCAS), 2009*

# Anhänge

# **Anhang A Diskussion: Zweckmäßigkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Definition „nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand“ (= Vorfall)**

## **Prozess- oder produktbezogen**

Geschehnisse ohne Prozess- oder Produktbezug sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit ohne Belang. Beispiele sind Stürze von Klippen, Ertrinken bei Überschwemmungen usw., sofern (technische) Prozesse oder Produkte keine Rolle gespielt haben. Findet das Ertrinken dagegen in einem Schwimmbad statt oder fallen bei einem Erdbeben Gebäudeteile auf eine Person, ist der Prozess- und Produktbezug gegeben und die Analyse der Abläufe samt Eintrittshäufigkeit und Schwere der Vorfälle bietet grundsätzlich die Möglichkeit prozess- oder produktbezogener technischer Einflussnahme.

## **Schädigung**

Ohne direkte oder indirekte Schädigungen von Mensch oder Umwelt interessieren Geschehnisse in der LVA nicht. Die genannten "direkten" Schädigungen von Menschen adressieren die im unmittelbaren Vorfallkontext entstehenden Schädigungen (Tod, Verletzung, Intoxikation, Verstrahlung usw.). Hierzu zählen Stürze von Arbeitern ebenso, wie die direkten Folgen größerer Vorfälle (z. B. Explosion verfahrenstechnischer Anlage, Sabotageakt) einschließlich auf benachbarte Gebiete. Indirekte Schädigungen, die erst nach Ausbreitung schädlicher Stoffe in der Umwelt zusätzlich oder alternativ auftreten, werden zweckmäßigerweise mittels der Inventarisierung der vorfallbedingt emittierten Stoffe adressiert.

Die in der Definition enthaltene Einbeziehung von durch den Vorfall indirekt bedingten Schädigungen und Interventionen bezieht sich auf Vorfälle, die keine direkten schädlichen Auswirkungen oder Interventionen haben, sie aber indirekt im Rahmen oben genannter Maßnahmen bedingen: Ein nicht bestimmungsgemäßer, als gefährlich eingestuft Betriebszustand (z. B. ein überhitzter Kernreaktor, eine Terrorismusdrohung) kann Evakuierungen, Feuerwehreinsätze, Produktionsausfälle usw. bedingen und damit indirekt zu Schädigungen führen, ohne am Ende zu einem tatsächlichen Vorfall geführt zu haben. Solche Fälle werden durch die erweiterte Definition eingeschlossen.

### **Nicht offiziell geplant (aber u. U. technisch antizipiert)**

Das Auslaufen von Produkten aus einem undichten Vorratstank für Raffinerieprodukte in die Sicherheitsauffangwanne ist nicht vorgesehen, sondern ausschließlich technisch antizipiert. Dieser Vorgang ist demnach ein Vorfall gemäß obiger Definition. Emissionen beim Verdampfen von Teilen des Raffinerieproduktes und die Entsorgung oder Aufarbeitung des in der Auffangwanne befindlichen Produktes werden demnach im Vorfallsystem abgebildet.

Ähnliches gilt für Überfüllverluste beim Betanken (z. B. eines PKW an der Tankstelle): Diese sind nicht vorgesehen, sondern lediglich technisch antizipiert (abdichteter Boden, Ablauf mit Ölabscheider) und gelten demnach als Vorfall. Gewisse Verdampfungsverluste im Rahmen des bestimmungsgemäßen Betankens sind dagegen vorgesehen, also bestimmungsgemäße Betriebszustände, und werden in der Ökobilanzpraxis auch als solche erfasst.

# Anhang B Weitere methodische Details zum Verbesserungspotenzial-Ansatz

## Allgemeine Aspekte

Die Logik des Verbesserungspotenzial-Ansatzes ist, dass bereits die Vermeidung eines einzelnen Auslösers einen multikausalen Vorfall vermeidet oder relevant modifiziert. Die beteiligten Prozesse und Produkte können dabei gleichzeitig wirken (logisches UND im Fehlerbaum) oder alternativ (logisches ODER im Fehlerbaum). Zudem können sie in der Ereignisfolge logisch parallel auftreten oder nacheinander über mehrerer Schritte hinweg unterschiedliche Phasen des Vorfalls einschließlich von Folgeunfällen spezifisch modifizieren.

Beim Verbesserungspotenzial-Ansatz werden demnach die Vorfalllasten nach einer Was-wäre-wenn-Logik zugeordnet: Es wird angenommen, dass der jeweilige Prozess nicht mehr vorhanden/vorfallbeteiligt wäre. Die Differenz der Vorfallsachinventare mit und ohne den Ausfall des jeweiligen Prozesses werden diesem Prozess zugeordnet<sup>151</sup>. Dieses Inventar stellt das maximale Verbesserungspotenzial dar<sup>152</sup>.

## Quantitative Zuordnung von Vorfällen zu Prozessen/Modulen

Grundsätzlich werden beim Verbesserungspotenzial-Ansatz den vorfallbeteiligten Prozessen die Vorfallsachinventare nach den gleichen Regeln zugeordnet, wie beim vollständigen Beteiligungsansatz, allerdings ggf. unter Mehrfachzählung. Formel (i) wird demnach modifiziert zu:

$$\text{Formel (u)} \quad A_i = \frac{W - W_i}{W}$$

Die zweitletzte Spalte in Tab. 2 zeigt für das ausgewählte Beispiel den Zuordnungsfaktor gemäß dem Verbesserungspotenzial-Ansatz.

---

<sup>151</sup> Formal: Die Eintrittshäufigkeiten der vorfallbezogenen Ereignisse dieses Prozesses werden in der EEA oder FBA auf „0“ gesetzt.

<sup>152</sup> Die Zuordnung zu den vorfallbeteiligten Prozessen hängt in der Praxis von den verfügbaren Vorfallinformationen ab: Bei detaillierten QRA-Studien können die Vorfallsachinventare durch Ein- und Ausschalten der prozessbedingten Ereignisse in den Ereignisabläufen der Fehlerbäumen exakt ermittelt und zugeordnet werden. Vorfallbeteiligte Module, die Auslöser des Vorfalls sind, tragen alle Vorfallauswirkungen inklusive denen aus möglichen Folgeunfällen, Vorfallbekämpfungsmaßnahmen, Aufräumarbeiten, Güter-Wiederherstellung usw.



Zusätzlich tragen vorfallbeteiligte Prozesse/Module, die aufgrund ihrer Eigenschaften den Vorfall modifizieren, alle spezifischen eigenschaftsbedingten Vorfallauswirkungen. Wenn beispielsweise die PVC-basierte Isolierung des Kabelbaums in einem PKW verbrennt, können die PVC-bedingten Emissionsarten und -mengen von HCl, CO, NO<sub>x</sub>, Dioxinen usw. der Nutzung der PVC-basierten Leitungsisolierung regelbasiert zugeordnet werden<sup>153,154,155</sup>.

### **Mehrfachzählungsphänomen beim Verbesserungspotenzial-Ansatz**

Bei der Anwendung des Verbesserungspotenzial-Ansatzes kommt es zu zwei Formen der Mehrfachzählung der Vorfallsachinventare:

Zum einen, und in jedem Fall, werden die Vorfallsachinventare auf globaler Ebene mehrfachgezählt, da sie den vorfallbeteiligten Prozessen überlappend zugeordnet werden. Zum Beispiel werden in dem in Kap. 5.4.4 skizzierten Beispiel die Lasten aus der Gaswolkenexplosion sowohl dem Chemikalienproduktionsprozess als auch dem die Explosion auslösenden, nicht im untersuchten Lebensweg beinhalteten, Prozess zugeordnet. Diese Form der Mehrfachzählung wird als angemessen verstanden, wenn es in der Studie darum geht, Verbesserungspotenziale zu identifizieren oder Produkte zu vergleichen: Bei der Wahl für eines von zwei Produkten werden alle über den Lebensweg des jeweiligen Produktes beteiligten Vorfälle berücksichtigt.

Zum anderen kommt es zu einer Mehrfachzählung innerhalb des untersuchten Produktlebensweges genau dann, wenn die an einem Vorfall beteiligten Prozesse Teil desselben Produktsystems sind. Ein Beispiel ist die Variante der in Kap 5.4.4 skizzierten Gaswolkenexplosion, in der die Explosion auslösende Funke aus einem Prozess stammen mag, der Teil derselben Chemikalienherstellungsanlage ist. Diese Art der Mehrfachzählung ist

---

<sup>153</sup> Dies ist ähnlich zum in [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] gelisteten Allokationsansatz der „physischen Kausalität“, also der verursacherorientierten Zuordnung von Interventionen zu Kofunktionen von multifunktionellen Prozessen. Es ist damit auch analog zur virtuellen Unterteilung von Modulen wie sie im *ILCD Handbook – General guide for LCA* [EC 2010] beschrieben ist.

<sup>154</sup> Das vorfallbeteiligte Modul trägt immer auch selbst zu einem Vorfall bei und sei es die – wenngleich in der Praxis nicht immer zu vermeidende – technische Nicht-Berücksichtigung eines möglichen externen Vorfall-Auslösers, d. h. seine Eigenschaften, Sensitivität.

<sup>155</sup> Das heißt für das in Kap. 5.4.4 beschriebene Beispiel des Gaswolkenaustritts aus dem geplatzten Rohr unter Beteiligung von Prozessen anderer Produktsysteme: Der Chemikalie werden aufgrund des Kriteriums „Eigenschaften“ alle Vorfallschäden zugeordnet, also Emissionen der Chemikalie ebenso wie die Emissionen und Schäden aufgrund eines Brandes oder einer Explosion der Chemikalie. Der Produktionsanlage (genauer: dem geplatzten Rohr) werden gemäß des Kriteriums „Auslöser“ ebenfalls alle Vorfallschäden zugeordnet. Der Fackel (und damit dem externen Prozess) werden gemäß des Kriteriums „Auslöser“ ausschließlich die Emissionen und Schäden aus dem Brand oder der Explosion zugeordnet, nicht aber die Wiederherstellung der Chemikalie (die bereits zuvor ausgetreten war). Kann die Entzündung der ausgetretenen Chemikalie alternativ durch eine andere Zündquelle stattfinden, werden dieser die Schäden aus der entsprechenden Brand oder Explosion zugeordnet.

notwendig, wenn es um die Identifikation von einzelnen Verbesserungsoptionen innerhalb eines Produktlebensweges geht, da die Verbesserung eines jeden einzelnen Prozesses das ausgewiesene Vorfalvermeidungs- oder -minderungspotenzial in sich trägt. Nicht angemessen ist dagegen diese Form der lebensweginternen Mehrfachzählung, wenn es um Vergleiche mehrerer Produkte geht: In dem Fall dürfen Vorfälle, die unter Beteiligung von Prozessen desselben Produktlebensweges entstehen, nur einmal diesem Produkt zugeordnet werden, da die Wahl für dieses Produkt den jeweiligen Vorfall nur einmal vermeiden oder verringern kann. Für diesen Anwendungsfall sind lebensweginterne Mehrfachzählungen zu vermeiden, weswegen für Produktvergleiche der Beteiligungsansatz zu wählen ist.

## **Anhang C    Diskussion: Art der Inventarwerte/Indikatoren für Vorfälle**

### **Diskussion zu geeigneten Indikatoransätzen**

Manche Autoren, die sich mit der Frage der Kombination von Ökobilanz und Vorfallaanalyse befasst haben, wie z. B. [Kurth et al. 2004], schlagen den Rückgriff auf Risikoindikatoren oder die sachbilanzunabhängige, qualitative Erfassung von Vorfallrisiken vor. [Kurth et al. 2004] begründen dies mit dem Mangel an Daten zu Eintrittswahrscheinlichkeiten und Emissionsinventaren von Vorfällen. Auch andere Autoren arbeiten u. a. aus diesen Gründen mit qualitativen Indikatoren oder adressieren nur bestimmte Inventargrößen (z. B. Vorfalltote). [Kurth et al. 2004] schließen ferner, dass RA-Methoden nur bedingt als Grundlage oder Gerüst für die Integration mit der Ökobilanz geeignet seien, weswegen ein Ansatz der Integration in die Ökobilanzierung oder eine Methodenentwicklung analog zur Ökobilanz dort nicht weiter verfolgt wurden. Stattdessen wird vorgeschlagen, Risikoindikatoren zu verwenden, die allerdings nicht allgemein vergleichbar sondern fallspezifisch sind.

Dieser Argumentation kann hier nicht gefolgt werden, da insbesondere die Ergebnisse aus QRA-Studien sowie Informationen aus Fehlerbaumanalyse und Ereignisablaufanalyse sehr gut geeignet sind, um Vorfallauswirkungen über den Lebensweg von Produkten zu erfassen und zu aggregieren, wie im Methodenkapitel und im Anwendungsbeispiel der vorliegenden Arbeit gezeigt wird. Es wird hier argumentiert, dass die dadurch ermöglichte absolute Quantifizierung und direkte Vergleichbarkeit von Vorfallauswirkungen entscheidend ist für differenzierte und gute Entscheidungsunterstützung, was den fallweise höheren Aufwand der Datenerhebung rechtfertigt.

### **Nutzen Sachinventar**

Der Nutzen direkter und absoluter Vergleichbarkeit von Auswirkungen aus bestimmungsgemäßen und nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen auf Inventar- und Wirkebene wird auch anhand der wenigen vorliegenden Fallstudien als sehr hoch eingeschätzt, siehe das Anwendungsbeispiel in Kap. 6.2 und vgl. die Studien im Rahmen des Fire-LCA-Modells ([Simonson et al. 1998] und Folgestudien im selben Institut).

Ferner ist die Möglichkeit gegeben, weiterverwendbare Datenbanken mit Vorfallsachinventaren zu erarbeiten. Im Vergleich zur Datenlage während der Anfänge der Ökobilanzierung

ist die Verfügbarkeit der wichtigen Informationen zur Eintrittsfrequenz von Vorfällen sowie wichtiger Auswirkungen aufgrund in der Industrie weitverbreitet eingesetzter Fehlerbaumanalysen sogar als besser einzuschätzen.

### **Sachinventar vs. Wirkinventar im Fall von Vorfallauswirkungen auf den Menschen**

Im Unterschied zu den Interventionen mit der Umwelt als typischerweise physikalische (d. h. insbesondere stoffliche, energetische oder mechanische) Flüsse, haben die direkten Personenschäden als Inventarwerte aus Vorfällen eine andere Natur: Eine Explosion, die direkte Personenschäden bedingt, ist physikalisch ein Phänomen schneller Druckschwankungen bestimmter Stärke. Verletzte und Tote als Folge einer Explosion sind daher formal keine Inventargrößen, sondern Wirkgrößen (sogar Wirkungsendpunkte, da sie mit dem Schutzgut – hier: Menschliche Gesundheit – identisch sind). Die Druckschwankungen als eigentliche Inventarwerte bewirken erst über ihre Ausbreitung und Exposition auf in der Nähe anwesende Menschen die Verletzungen oder Todesfälle ([Hesel 1994]). Formal gehören Personenschäden daher eigentlich nicht in das Sachinventar. Da aber die Vorfallinformationen bereits auf der Ebene der Wirkungsendpunkte vorliegen, besteht auch kein Grund die eigentlichen Interventionen zu inventarisieren und bei der modellhaften Transformation zu Personenschäden sogar Informationen zu verlieren. Die im Falle von Emissionen und Ressourcen in der Ökobilanz strikte Trennung von Sachinventar und Wirkinventar wird hier daher ausschließlich im Falle von direkten Personenschäden bewusst nicht beibehalten.

Die Inventarisierung der Wirkungen in Form von Personenschäden wird auch von anderen Autoren z. B. in der Lebensweg-Arbeitsumfeldanalyse so durchgeführt, wobei der Zusammenhang in anderen Veröffentlichungen zum Thema Vorfalleinbeziehung in Lebensweganalysen bisher nicht thematisiert wurde.

### **Datenlage und Praktikabilität**

Zum Thema „Daten“ ist auch ein kurzer Blick in die Geschichte der Ökobilanzierung hilfreich:

Situation Ökobilanzierung ca. 1990: Die LVA steht heute datenseitig vor in etwa der gleichen Situation wie die Ökobilanzierung zu Beginn vor etwa 25 Jahren – es waren praktisch keine Umweltinventar-Informationen vorhanden, da nur sehr wenige Emissionen gemessen wurden und es keine durchgängigen produktbezogenen Prozesskettenmodelle gab. Daher waren anfangs keine Sachinventardatenbanken vorhanden und der Mangel an Daten war eine grundlegende Einschränkung für Ökobilanz-Studien. Auch auf der Ebene der

204

Wirkungsabschätzung fehlten weitgehend die heute genutzten integrierten Transport-, Expositions- und Wirkmodelle bzw. die damit ermittelten Wirkfaktoren.

Situation Ökobilanzierung 2014: Inzwischen hat sich die Datensituation in der Ökobilanz stark geändert: Umfangreiche Sachinventardatenbanken zu tausenden Werkstoffen, Bauteilen und Produkten aus globalen Prozessketten liegen vor und gute Wirkmodelle wurden für die wichtigsten Umweltproblemfelder erarbeitet. Die Ökobilanz kann inzwischen als in der industriellen Praxis etablierte Methode verstanden werden: Viele namhafte Unternehmen in praktisch allen Branchen haben bereits interne Arbeitsgruppen für Ökobilanzierung. Das Lebenswegdenken findet in den letzten 10 Jahren ebenfalls einen stark zunehmenden Eingang in die Gesetzgebung (siehe Kap. 3.1.2). Die dahinter stehende Akzeptanz und praktische Anwendbarkeit der Ökobilanzmethode beruht zu wesentlichen Teilen auf der inzwischen hinreichend guten Ausgangslage von Lebenswegsachinventaren objektiv messbarer Emissionen und Ressourcenverbräuche.

Fazit: Es wird daher hier angenommen, dass bei Vorliegen einer geeigneten Methode zur LVA und entsprechender Nachfrage seitens Unternehmen und/oder Politik, Vorfallsachinventar-Datenbanken durch Forschungsgruppen und Beratungsunternehmen in geeigneter Qualität mittelfristig entwickelt werden.

# Anhang D Korrekturfaktoren der Unfallschwere und Eintrittshäufigkeit

## Unfallschwere-Korrekturfaktor

Das zu erfassende Ausmaß z. B. der Stofffreisetzung eines Vorfalles hängt vom Schadenspotenzial des Realprozesses ab, z. B. von der zum Zeitpunkt des Vorfalles in der Anlage verarbeiteten Materials oder der Anzahl anwesender Mitarbeiter. Die Notwendigkeit einen diesbezüglichen Korrekturfaktor zu verwenden, tritt immer genau dann auf, wenn Vorfalldaten aus Statistiken und anderen Realprozessen auf ein spezifisches, nicht identisches Modul übertragen werden. Hier handelt es sich also um einen Faktor, um Einheitsvorfälle bestimmter oder repräsentativer Anlagen auf andere Anlagen abweichender Größe usw. anpassen zu können.

Wichtig ist die relative (idealerweise: lineare) Skalierbarkeit des Zuordnungsvektors und damit der Vorfallauswirkungen zur Referenzgröße des vorfallbeteiligten Moduls.

## Eintrittshäufigkeiten-Korrekturfaktor

Neben der unterschiedlichen Schwere von Vorfällen ist darüber hinaus vorzusehen, dass Anlagen unterschiedlicher Größe eine unterschiedliche Häufigkeit desselben Vorfalltyps haben können. Dies kann dadurch bedingt sein, dass größere Anlagen umfangreichere Sicherheitsmaßnahmen vorsehen usw., also dass der ursprünglich ermittelte oder modellierte Vorfall für eine etwas unterschiedliche Anlage gültig ist. Auch für eine derartige Übertragung der Vorfallhäufigkeiten benötigt man einen Korrekturfaktor.

## Andere Anpassungen

Weitere Korrekturfaktoren und spezifische Anpassungen sind denkbar, um die spezifischen Unterschiede zwischen dem vorfallbeteiligten Prozess und dem Modul im Lebensweg zu berücksichtigen und auch Unterschiede im Vorfall an sich (z. B. spezifische Unterschiede der Anlagen und Sicherheitstechnologien). Dies wird hier nicht weiter ausgeführt sondern in den Ausblick verwiesen.

Die in das Verhältnis der Referenzgrößen und die Korrekturfaktoren eingehenden Angaben sind im input-seitigen Ereignis des zentralen Einheitsvorfalls und ggf. von Folgeunfällen zu hinterlegen.

## Anhang E    Berichterstattung – Elemente und Gliederung

Für die Berichterstattung von LVA-Studien sind die folgenden Elemente und die dargestellte Hauptgliederung vorgesehen. Sie verwenden die Formulierungen der [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] sind aber im Umfang und der Reihenfolge angepasst auf das *ILCD Handbook – General guide for LCA* [European Commission - JRC-IES 2010a] (Übersetzungen der ILCD Erweiterungen durch den Verfasser) und erweitert für die LVA (Änderungen und Ergänzungen gegenüber dem *ILCD Handbook* unterstrichen):

### a) Allgemeine Aspekte

- Titel
- Auftraggeber und andere einflussrelevante Akteure einschließlich Ersteller der Studie (intern oder extern);
- Datum des Berichtsabschlusses;
- Erklärung, dass die Ökobilanzteile der Studie nach den Anforderungen der [Norm DIN EN ISO 14040:2009-11], [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und ggf. weiter spezifizierter Anleitungen (z. B. *ILCD Handbook* ([European Commission - JRC-IES 2010a])) sowie die Vorfälle mittels der LVA-Methode und ggf. weiter spezifizierter Anleitungen durchgeführt wurden.

### b) Ziel der Studie

- Vorgesehene Verwendung;
- Einschränkungen aufgrund von getroffenen Annahmen oder ausgeschlossener Wirkkategorien;
- Gründe für die Durchführung der Studie und Entscheidungskontext;
- Zielgruppen;
- Angabe darüber, ob die Studie als Grundlage für zur Veröffentlichung vorgesehene vergleichende Aussagen bestimmt ist.

### c) Untersuchungsrahmen der Studie

- Funktion einschließlich
  - Angabe der Leistungsmerkmale;
  - Auslassung zusätzlicher Funktionen bei Vergleichen.
- Funktionelle Einheit (oder andere, anwendbare Referenzgröße) einschließlich

- i) Übereinstimmung mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen;
  - ii) Ihrer Festlegung;
  - iii) Ergebnis der Leistungsmessung (bei anderer quantitativer Referenz: quantitative Bezugsgröße oder technischen Spezifikation bei unspezifischen Produkten);
  - iv) Referenzfluss oder -flüsse;
  - v) Angewandtes Ökobilanz-Sachinventarmodellierungsprinzip (z. B. ILCD Situation A, B, C1, C2; oder *attributitional* oder *consequential* gemäß [European Commission - JRC-IES 2010a]);
  - vi) Methodischer Rahmen der Vorfalldmodellierung einschließlich: angewandtes Vorfalldzuordnungsprinzip und quantitative Zuordnungsregeln, Behandlung multikausaler Vorfälle und von Folgeunfällen sowie Behandlung unterschiedlicher Granularität von Modulen und Vorfalldinformationen;
  - vii) Einheitliche Anwendung der Methoden und Angabe zu deren Übereinstimmung mit der Zielsetzung und dem Untersuchungsrahmen der Studie.
- Systemgrenze einschließlich
    - i) Typen der die Systemgrenzen überschreitenden Elementarflüsse;
    - ii) Entscheidungskriterien zur Festlegung der Systemgrenzen und zu individuellen oder systematischen Einbeziehungen oder Ausgrenzungen;
    - iii) Auslassungen von notwendigen Lebenswegabschnitten, Aktivitätstypen, Prozessen, Flüssen oder Daten;
    - iv) Quantifizierung von Energie- und Materialinputs und Energie- und Materialoutputs;
    - v) Annahmen über die Elektrizitätserzeugung und Transporte<sup>156</sup>
  - Abschneidekriterien für die anfängliche Einbeziehung von Inputs und Outputs sowie von Vorfällen/Ereignissen einschließlich
    - i) Beschreibung der Abschneidekriterien und Annahmen;
    - ii) Wirkung der Auswahl auf die Ergebnisse;

---

<sup>156</sup> In Abweichung von ISO und ILCD Handbuch werden die dort genannten Elektrizitätsprozesse hier durch Transportprozesse erweitert, da diese in der LVA oft einen quantitativ besonders hohen Beitrag leisten.



- Einbeziehung von Massen-, Energie und Abschneidekriterien bezogen auf die Wirkung auf die Umwelt und den Menschen sowie bezogen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit oder Schwere von Vorfällen.
- Datenqualitätsanforderungen (zusätzlich zur letztlich erreichten Datenqualität);
- Entscheidungen zum Umfang der Wirkungsabschätzung einschließlich
  - Untersuchte Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren einschließlich einer Begründung für ihre Auswahl und eines Verweises auf ihre Quelle;
  - Beschreibung aller angewandten Charakterisierungsmodelle, Charakterisierungsfaktoren und Verfahren einschließlich aller Annahmen und Einschränkungen oder eines Verweises auf diese;
  - Angaben zu jeglichen Differenzierungen, Ergänzungen oder Veränderungen der verwendeten Wirkungsmethoden mit Begründungen;
  - Beschreibungen aller Werthaltungen, die im Hinblick auf Wirkungskategorien, Charakterisierungsmodelle, Charakterisierungsfaktoren, Normierung, Ordnung, Gewichtung und anderweitig in der Wirkungsabschätzung angewendet werden, Begründung für ihre Anwendung und ihren Einfluss auf die Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen, oder der Verweis auf diese;
  - Angabe, dass die Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse relative Aussagen sind und keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen. Und – sofern Teil der Studie – auch:
    - Beschreibung und Begründung der Festlegung und Beschreibung sämtlicher neuer für die Wirkungsabschätzung verwendeter Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle;
    - Angabe und Begründung sämtlicher verwendeter Ordnungsansätze der Wirkungskategorien;
    - Alle sonstigen Verfahren, die die Indikatorwerte transformieren und eine Begründung für die ausgewählten Referenzen, Gewichtungsfaktoren usw.;
- Beinhaltete Vergleiche zwischen (Produkt)systemen;
- Änderungen der ursprünglichen Angaben zum Untersuchungsrahmen sowie deren Begründungen;

#### **d) Vorfallsachbilanz und Sachbilanz**

- Verfahren der Datenerhebung;
- qualitative und quantitative Beschreibung von Prozessmodulen und Einheitsvorfällen, zumindest für das Vordergrundsystem;
- Spezifische Verfahren und Kriterien bei der Zuordnung der Auswirkungen von in Produktsystemsicht signifikanten Vorfällen zu den vorfallbeteiligten Prozessen, einschließlich Begründung der spezifischen Verfahren.
- Quellen aller öffentlich zugänglichen Datenquellen (Quellen aller verwendeten Daten und individuelle Identifikation der signifikanten Prozesse und Produktsysteme sowie Vorfälle);
- Berechnungsverfahren (bevorzugt einschließlich der Schritte von den Rohdaten zu den Prozessmodulen und Einheitsvorfällen des Vordergrundsystems);
- Datenvalidierung einschließlich
  - Bewertung der Datenqualität;
  - Behandlung fehlender Daten.
- Sensitivitätsanalyse für die Anpassung der Systemgrenzen;
- Spezifische Verfahren der Substitution und Allokation für signifikante multifunktionelle Prozesse (und Produkte im Fall direkter Vergleiche multifunktionaler Produkte) einschließlich Begründung der spezifischen Verfahren.

#### **e) Wirkungsabschätzung, falls durchgeführt**

- Verfahren und Berechnungen der Wirkungsabschätzung und ihre Ergebnisse für die Studie;
- Einschränkungen der Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse in Bezug zum festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie;
- Beziehung der Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse zum festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen;
- Beziehung der Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse zu den Ergebnissen der Sachbilanz und Vorfallsachbilanz;
- Alle Analysen der Indikatorwerte, z. B. Sensitivitätsanalyse und Fehlerabschätzung oder die Verwendung von Umweltdaten, einschließlich aller Auswirkungen auf die Ergebnisse;

- Daten und Indikatorwerte, die vor der Durchführung aller Normierungs-, Ordnungs- und Gewichtungsverfahren erhalten wurden, müssen zusammen mit den normierten, geordneten oder gewichteten Ergebnissen zur Verfügung gestellt werden;

#### **f) Auswertung**

- Ergebnisse;
- Methoden- und datenabhängige Annahmen und Einschränkungen, die mit der Auswertung der Ergebnisse zusammenhängen;
- Beurteilung der Datenqualität;
- Uneingeschränkte Transparenz hinsichtlich der Werthaltungen, der rationalen Grundlagen und der Sachverständigenabschätzungen.

#### **g) Kritische Prüfung, falls durchgeführt**

- Name und institutionelle Zugehörigkeit von Gutachtern;
- Berichte zur kritischen Prüfung;
- Stellungnahmen zu Empfehlungen.

#### **h) Anhang, sollte beinhalten**

- Fragebögen/Datenerhebungsvorlage und Rohdaten;
- Liste aller Annahmen (einschließlich solcher, die als nicht relevant identifiziert wurden);
- Volle Sachbilanzergebnisse und Vorfallsachbilanz-Ergebnisse;
- Vertraulicher Bericht:
  - Falls benötigt sollte dieser all jene Daten und Informationen enthalten, die vertraulich oder anderweitig geschütztes Eigentum sind und nicht außerhalb des Projektes verfügbar gemacht werden können. Dieser Bericht muss jedoch den kritischen Prüfern unter Vertraulichkeit verfügbar gemacht werden.
  - Bericht für Vergleichsstudien: Berichte zu vergleichenden Studien, die zur Veröffentlichung vorgesehen sind, müssen zusätzlich auch folgende Sachverhalte beinhalten:
    - Analyse von Stoff- und Energieflüssen, um deren Einbeziehung oder Ausschluss zu begründen;
    - Beurteilung der Präzision, Vollständigkeit und Repräsentativität der verwendeten Daten;

- Beschreibung der Äquivalenz von Systemen, die nach [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] Kapitel 4.2.3.7 verglichen werden;
  - Angaben zum durchgeführten Ansatz der Vermeidung von lebensweginternen Mehrfachzählungen;
  - Beschreibung des kritischen Prüfungsverfahrens;
  - Beurteilung der Vollständigkeit der Wirkungsabschätzung;
  - Angabe, ob die ausgewählten Wirkungsindikatoren international akzeptiert sind und eine Begründung für ihre Anwendung;
  - Erläuterung der wissenschaftlichen und technischen Gültigkeit sowie der Relevanz für Mensch und Umwelt der in der Studie verwendeten Wirkungsindikatoren;
  - Ergebnisse von Fehlerabschätzungen und Sensitivitätsanalysen;
  - Beurteilung der Signifikanz der festgestellten Unterschiede.
- Ordnung
    - Wenn der Verfahrensschritt der Ordnung in der Studie enthalten ist, ist Folgendes hinzuzufügen:
      - Verfahren und Ergebnisse, die für die Ordnung angewendet wurden;
      - Angabe, dass Schlussfolgerungen und Empfehlungen, die aus der Ordnung abgeleitet wurden, auf Werthaltungen beruhen;
      - Begründung der für die Normierung und Ordnung verwendeten Kriterien (das können Werthaltungen einer Einzelperson, einer Organisation oder eines Staates sein);
      - Angabe „DIN EN ISO 14044:2006 [Norm DIN EN ISO 14044:2006-10] und die LVA Methodik legen weder spezifische Verfahren fest, noch unterstützen sie die zugrunde liegenden, für die Ordnung der Wirkungskategorien verwendeten Werthaltungen“;
      - Angabe „Die Werthaltungen und Beurteilungen innerhalb der Ordnungsverfahren liegen in alleiniger Verantwortung des Auftraggebers der Studie (z. B. Regierung, Gemeinde, Organisation usw.)“.

## Anhang F Behinderungsgewichtungs- und Lebenserwartungstabellen

Die folgende Tab. 10 ist ein Auszug der Behinderungsgewichtungstabelle der WHO [WHOa] mit Schwerpunkt auf physische Verletzungen. Die vollständige Tabelle umfasst insgesamt Faktoren für über 350 Zustände, überwiegend Krankheiten. Ein Wert von 0 steht für gesundes unbehindertes Leben, ein Wert von 1 für Tod.

Die Tabelle unterscheidet zudem für manche Zustände die kurzfristige (d. h. die Tage und Wochen direkt nach einer erlittenen Verbrennung) und langfristige (d. h. die Jahre bis zum Lebensende) Schwere der Behinderung sowie ob der Zustand eine medizinische Behandlung und Rehabilitation erfahren hat oder nicht. Für manche Zustände werden altersklassenabhängige Gewichte verwendet, die hier nicht verwendet und daher ausgeblendet wurden.

**Tab. 10 Behinderungsgewichte ausgewählter Verletzungen einschließlich Vergiftungen und Verbrennungen (letztere durch Fettdruck hervorgehoben), unterschieden nach behandelter und unbehandelter Form ([WHOa]). Hier ausgeblendet sind Unterscheidungen nach Altersklassen, da sie mit Ausnahme von Vergiftungen bei Verletzungen nicht gemacht werden.**

<i>Injury type</i>	<i>Disability weights</i>	
	<i>Untreated form</i>	<i>Treated form</i>
[...]		
<i>Poisoning – Episodes</i>	0,607	0,607
<i>Fractures</i>		
<i>Skull -- Short term</i>	0,431	0,431
<i>Skull -- Long term</i>	0,411	0,350
<i>Face bones</i>	0,223	0,223
<i>Vertebral column</i>	0,266	0,266
<i>Injured spinal cord</i>	0,725	0,725
<i>Fractures</i>		
<i>Rib or sternum</i>	0,199	0,199
<i>Pelvis</i>	0,247	0,247
<i>Clavicle, scapula, or humerus</i>	0,137	0,137
<i>Radius or ulna</i>	0,180	0,180
<i>Hand bones</i>	0,100	0,100

<b>Injury type</b>	<b>Disability weights</b>	
	<b>Untreated form</b>	<b>Treated form</b>
<i>Femur -- Short term</i>	0,372	0,372
<i>Femur -- Long term</i>	0,272	0,272
<i>Patella, tibia, or fibula</i>	0,271	0,271
<i>Ankle</i>	0,196	0,196
<i>Foot bones</i>	0,077	0,077
<i>Dislocated shoulder, elbow, or hip</i>	0,074	0,074
<i>Sprains</i>	0,064	0,064
<i>Intracranial injury</i>		
<i>Short term</i>	0,359	0,359
<i>Long term</i>	0,359	0,359
<i>Internal injuries</i>	0,000	0,208
<i>Open wound</i>	0,108	0,108
<i>Injury to eyes</i>	0,354	0,299
<i>Amputations</i>		
<i>Thumb</i>	0,165	0,165
<i>Finger</i>	0,102	0,102
<i>Arm</i>	0,102	0,102
<i>Toe</i>	0,078	0,064
<i>Foot</i>	0,300	0,300
<i>Leg</i>	0,300	0,300
<i>Crushing</i>	0,218	0,218
<b>Burns</b>		
<b>&lt;20% -- Short term</b>	<b>0,186</b>	<b>0,158</b>
<b>&lt;20% -- Long term</b>	<b>0,041</b>	<b>0,011</b>
<b>&gt;20% and &lt;60% -- Short term</b>	<b>0,469</b>	<b>0,441</b>
<b>&gt;20% and &lt;60% -- Long term</b>	<b>0,255</b>	<b>0,255</b>
<b>&gt;60% -- Short term</b>	<b>0,469</b>	<b>0,441</b>
<b>&gt;60% -- Long term</b>	<b>0,255</b>	<b>0,255</b>

Tab. 11 listet die von der WHO länderunabhängig verwendete statistische Model-Lebenserwartung für Männer und Frauen nach Coale & Demeny's „West Level 26“ (ursprünglich entwickelt von [Coale & Demeny 1966]) bei Erreichung eines vorgegebenen Alters ([WHO]):

**Tab. 11 Lebenserwartungstabelle in Abhängigkeit des erreichten Lebensalters – Angabe in Anzahl verlorener Lebensjahre (YLL) in [a] ([WHO]).**

<b>Todesalter</b>	<b>YLL Männer</b>	<b>YLL Frauen</b>	<b>Todesalter</b>	<b>YLL Männer</b>	<b>YLL Frauen</b>
<b>0</b>	80,00	82,50	<b>50</b>	30,99	33,99
<b>1</b>	79,36	81,84	<b>51</b>	30,06	33,07
<b>2</b>	78,36	80,87	<b>52</b>	29,12	32,14
<b>3</b>	77,37	79,90	<b>53</b>	28,19	31,22
<b>4</b>	76,38	78,92	<b>54</b>	27,26	30,29
<b>5</b>	75,38	77,95	<b>55</b>	26,32	29,37
<b>6</b>	74,39	76,96	<b>56</b>	25,42	28,46
<b>7</b>	73,39	75,97	<b>57</b>	24,52	27,55
<b>8</b>	72,39	74,97	<b>58</b>	23,61	26,65
<b>9</b>	71,40	73,98	<b>59</b>	22,71	25,74
<b>10</b>	70,40	72,99	<b>60</b>	21,81	24,83
<b>11</b>	69,40	72,00	<b>61</b>	20,95	23,95
<b>12</b>	68,41	71,00	<b>62</b>	20,09	23,07
<b>13</b>	67,41	70,01	<b>63</b>	19,22	22,20
<b>14</b>	66,41	69,01	<b>64</b>	18,36	21,32
<b>15</b>	65,41	68,02	<b>65</b>	17,50	20,44
<b>16</b>	64,42	67,03	<b>66</b>	16,71	19,59
<b>17</b>	63,42	66,04	<b>67</b>	15,93	18,74
<b>18</b>	62,43	65,06	<b>68</b>	15,15	17,90
<b>19</b>	61,43	64,07	<b>69</b>	14,36	17,05
<b>20</b>	60,44	63,08	<b>70</b>	13,58	16,20
<b>21</b>	59,44	62,10	<b>71</b>	12,89	15,42
<b>22</b>	58,45	61,12	<b>72</b>	12,21	14,63
<b>23</b>	57,46	60,13	<b>73</b>	11,53	13,85
<b>24</b>	56,46	59,15	<b>74</b>	10,85	13,06

<b>Todesalter</b>	<b>YLL Männer</b>	<b>YLL Frauen</b>	<b>Todesalter</b>	<b>YLL Männer</b>	<b>YLL Frauen</b>
<b>25</b>	55,47	58,17	<b>75</b>	10,17	12,28
<b>26</b>	54,48	57,19	<b>76</b>	9,62	11,60
<b>27</b>	53,49	56,21	<b>77</b>	9,08	10,93
<b>28</b>	52,50	55,23	<b>78</b>	8,53	10,25
<b>29</b>	51,50	54,25	<b>79</b>	7,99	9,58
<b>30</b>	50,51	53,27	<b>80</b>	7,45	8,90
<b>31</b>	49,52	52,29	<b>81</b>	7,01	8,36
<b>32</b>	48,53	51,31	<b>82</b>	6,56	7,83
<b>33</b>	47,54	50,34	<b>83</b>	6,12	7,29
<b>34</b>	46,55	49,36	<b>84</b>	5,68	6,76
<b>35</b>	45,57	48,38	<b>85</b>	5,24	6,22
<b>36</b>	44,58	47,41	<b>86</b>	4,90	5,83
<b>37</b>	43,60	46,44	<b>87</b>	4,56	5,43
<b>38</b>	42,61	45,47	<b>88</b>	4,22	5,04
<b>39</b>	41,63	44,50	<b>89</b>	3,88	4,64
<b>40</b>	40,64	43,53	<b>90</b>	3,54	4,25
<b>41</b>	39,67	42,57	<b>91</b>	3,30	3,98
<b>42</b>	38,69	41,61	<b>92</b>	3,05	3,71
<b>43</b>	37,72	40,64	<b>93</b>	2,80	3,43
<b>44</b>	36,74	39,68	<b>94</b>	2,56	3,16
<b>45</b>	35,77	38,72	<b>95</b>	2,31	2,89
<b>46</b>	34,81	37,77	<b>96</b>	2,14	2,71
<b>47</b>	33,86	36,83	<b>97</b>	1,97	2,53
<b>48</b>	32,90	35,88	<b>98</b>	1,80	2,36
<b>49</b>	31,95	34,94	<b>99</b>	1,63	2,18
			<b>100</b>	1,46	2,00



## Anhang G Nutzung der LVA zur Bewertung von Unfallvermeidungs- und -minderungstechnologien

Manche Prozesse haben vermeidende oder vermindernde Auswirkungen auf Vorfälle, in die sie weder als Auslöser noch aufgrund ihrer bestimmungsgemäßen Eigenschaften einbezogen sind.

Deren Nettowirkungen auf Mensch und Umwelt können mittels gemeinsamer Ökobilanzierung und LVA analysiert und verglichen werden<sup>157, 158</sup>: Während deren Herstellung und Betrieb/Bereitschaft bedingen diese Technologien Umweltlasten. Kommt es zu (potenziellen) Vorfällen, tragen sie zur Verminderung der Häufigkeit und/oder Schwere von Vorfällen bei.

Ein Beispiel ist eine Sprinkleranlage: Ist eine Sprinkleranlage Teil verglichener Produktsysteme – in je einer Variante mit und ohne Sprinkleranlage – wird die unterschiedliche Feuerhäufigkeit und -schwere im Vorfallsachinventar sichtbar. Dem gegenüber stehen in der Ökobilanz die zusätzlichen Lasten für Herstellung, Wartung, Betrieb etc. der Sprinkleranlage.

Ist nur die Sprinkleranlage das untersuchte Produktsystem bzw. genauer der Sprinkler in einem bestimmten Anwendungsfall, so werden bei Ermittlung der Zuordnungsfaktoren mittels Formel (i) der Sprinkleranlage Teile der Vorfalldaten zugeordnet. Dies mag zunächst unlogisch erscheinen, aber diese Lasten werden nur für die Fälle (verringertes Vorkommen) zugeordnet in denen die Sprinkleranlage ausfällt, gleichwertig zu allen anderen Komponenten und Beiträgern. Wenn also der verringere Effekt der Sprinkleranlage ermittelt werden soll, ist stattdessen die Sprinkleranlage im Fehlerbaum auszulassen, z. B. durch Setzen der Eintrittswahrscheinlichkeit des Ausfalls auf 1. Die Differenz der Vorfalldaten-Ergebnisse einerseits unter Verwendung der tatsächlichen Ausfallwahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage und andererseits derjenigen mit

---

<sup>157</sup> Die LVA erlaubt die Nettowirkungen derartiger Produkte zu quantifizieren und deren Effizienz zu untersuchen. Ebenfalls ermöglicht sie es, verschiedene Produktlösungen zu vergleichen, z. B. verschiedene Feuerlöschsysteme, Flammenschutzmittel, Airbagsysteme usw. Derartige Studien haben bisher die vorfallbedingten Vorteile ausgeklammert (z. B. zu Airbags in [Mujiyanto & Susetyo 2010]) oder sind mit einer *ad-hoc*-Methodik durchgeführt worden (z. B. zu denselben Airbags wie zuvor genannt und im selben Institut durch [Tong & Wang 2011]) oder mit spezifischen Methodenlösungen (z. B. für Flammenschutzmittel in den Fire-LCA-Studien in [Simonson et al. 1998] und Folgestudien im selben Institut).

<sup>158</sup> Zum Beispiel führen bromierte Flammenschutzmittel in Möbeln zu Emissionen von giftigen halogenierten Kohlenwasserstoffen im Falle von Bränden, weswegen ihr Einsatz in der Öffentlichkeit teils heftig kritisiert wurde. Gleichzeitig verringern Flammenschutzmittel die Häufigkeit der Brände, indem sie deren Entstehung oder Ausbreitung unterdrücken. Sie vermindern dadurch andere feuerbedingte Emissionen und Personenschäden. Hier gilt es Nettoeffekte und *trade-offs* nachzuweisen, was [Andersson et al. 2003b] in eben diesem Fall getan haben (mit dem Ergebnis, dass der positive Flammuschutzeffekt die zusätzlichen negativen toxischen Emissionen bei weitem überwiegt).

auf 1 gesetzter Häufigkeit ist der Nettovorfallvermeidungs- und -minderungseffekt der Sprinkleranlage. Zusammen mit dem Sachinventar des Lebensweges der Sprinkleranlagenherstellung, Nutzung und Entsorgung erhält man das Gesamtbild.

Es ist allerdings auch denkbar, dass Herstellung, Betrieb und Entsorgung bestimmter Schutztechnologien höhere Schädwirkungen auf Mensch, Umwelt und Ressourcenverfügbarkeit bedingen, als sie im Falle von Vorfällen vermeiden oder vermindern.

## Anhang H Vorfallsachbilanz- und -wirkungsabschätzungs-Ergebnisse des Fallbeispiels Zuckerstaubexplosion

Die folgenden beiden Tabellen dokumentieren die Vorfallsachbilanz-Ergebnisse der Zuckerstaubexplosion Port Wentworth in absoluter Höhe und die Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse aus diesem Vorfall bezogen auf 1 kg Kristallzucker:

**Tab. 12 Vorfallsachbilanz-Ergebnis des Vorfallsystems „Zuckerstaubexplosion Port Wentworth Feb. 2008“; siehe Kap. 6.2.4. Ergänzende Hinweise: Negative Werte für Ressourcen in den Inputs und Emissionen in den Outputs sind Ergebnis der Substitutionsmethode, d. h. der Gegenrechnung von Gutschriften, hier u. a. für vermiedene Stahlprimärproduktion aufgrund des Recyclings des Stahls aus der recycelten Anlage. Die enthaltenen Abfallflüsse stammen von nicht vollständig modellierten Datensätzen im Hintergrundsystem.**

<b>Inputs</b>				
<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Ereignis Zuckerstaubexplosion; Kristallzucker-zwischenlagerung und -verpackung - Ereignisse	Anzahl	1,00E+00	Stück	X <sup>159</sup>
Abfall zur Wiederaufbereitung (unspezifisch) - Abfälle zur Verwertung	Masse	7,75E+02	kg	*
Altpapier - Abfälle zur Verwertung	Masse	6,71E-07	kg	*
Aluminiumoxid (Tonerde) - Abfälle zur Verwertung	Masse	6,45E+01	kg	*
Chemikalien (unspezifisch) - Abfälle zur Verwertung	Masse	1,09E+01	kg	*
Erzaufbereitungsrückstände radioaktiv - Radioaktive Abfälle	Masse	4,40E+02	kg	*
giftiger, nicht organischer Abfall zur Beseitigung (unspezifisch) - Sonderabfälle (anorganisch, zur Beseitigung)	Masse	6,09E+02	kg	*
giftiger, organischer Abfall zur Beseitigung (unspezifisch) - Sonderabfälle (organisch, zur Beseitigung)	Masse	6,18E+00	kg	*
Gips - Abfälle zur Verwertung	Masse	1,09E+03	kg	*
Gips (REA) - Abfälle zur Verwertung	Masse	3,02E+02	kg	*
Hochradioaktive Abfälle - Radioaktive Abfälle	Masse	2,47E-02	kg	*
Holz - Abfälle zur Verwertung	Masse	1,85E-01	kg	*

<sup>159</sup> Wertstoff = X; Abfall = \*; Elementarfluss = *kein Eintrag*

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Holzpalette (EURO) - Abfälle zur Verwertung	Masse	6,08E-08	kg	*
Kunststoff (unspezifisch) - Abfälle zur Verwertung	Masse	1,63E+00	kg	*
Mittelradioaktive Abfälle - Radioaktive Abfälle	Masse	1,64E+01	kg	*
Natriumoxid - Sonderabfälle zur Beseitigung	Masse	6,79E+01	kg	*
Neutralisierte Rückstände - Produktionsrückstände im Lebensfluss	Masse	5,68E+01	kg	*
Produktionsrückstände (unspezifisch) - Abfälle zur Verwertung	Masse	8,54E-06	kg	*
Rotschlamm (trocken) - Sonderabfälle zur Beseitigung	Masse	5,90E+03	kg	*
Schlacke (Mn 6,5%) - Abfälle zur Verwertung	Masse	1,11E+04	kg	*
Schlacke (V-haltig) - Abfälle zur Verwertung	Masse	3,12E+01	kg	*
Schlamm (Bearbeitung) - Abfälle zur Verwertung	Masse	9,06E+02	kg	*
Schwachradioaktive Abfälle - Radioaktive Abfälle	Masse	3,48E+01	kg	*
Sondermüll - Sonderabfälle	Masse	2,85E+01	kg	*
ungefährlicher, anorganischer Abfall zur Beseitigung (unspezifische Schlacke und Staub) - Abfall (anorganisch, zur Beseitigung)	Masse	3,85E+02	kg	*
Walzzunder - Abfälle zur Verwertung	Masse	1,58E-13	kg	*
Anoden (gebraucht) - Metalle	Masse	1,00E+01	kg	
Antimon - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	6,55E-05	kg	
Bariumsulfat - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-5,48E-07	kg	
Basalt - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-8,49E+02	kg	
Bauxit - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-9,41E+03	kg	
Bentonit - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	5,34E+03	kg	
Biotische Produktion - Okkupation	Biotische Produktion (Okk.)	1,03E+05	kg	
Biotische Produktion - Transformation	Biotische Produktion (Transf.)	8,06E+03	kg/a	
Blei - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	1,89E+00	kg	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Blei - Zink - Silber - Erz (5,49% Pb; 12,15% Zn; 57,4 gpt Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,45E+04	kg	
Blei - Zinkerz (4,6%-0,6%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,05E+04	kg	
Boden - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	5,40E+06	kg	
Brauchwasser - Betriebsstoffe	Masse	1,64E+04	kg	
Braunkohle (in kg) - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,00E-02	kg	
Braunkohle (in MJ) - Braunkohle (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	4,50E+06	MJ	
Braunkohle Australien - Braunkohle (Ressource)	Masse	-6,62E+03	kg	
Braunkohle Bosnien und Herzegowina - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,56E+02	kg	
Braunkohle Bulgarien - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,56E+01	kg	
Braunkohle Deutschland - Braunkohle (Ressource)	Masse	-5,64E+00	kg	
Braunkohle Deutschland (Lausitz) - Braunkohle (Ressource)	Masse	2,82E+04	kg	
Braunkohle Deutschland (Mitteldeutschland) - Braunkohle (Ressource)	Masse	9,60E+03	kg	
Braunkohle Deutschland (Rheinisch) - Braunkohle (Ressource)	Masse	4,88E+04	kg	
Braunkohle Frankreich - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,01E+00	kg	
Braunkohle Griechenland - Braunkohle (Ressource)	Masse	-9,22E+02	kg	
Braunkohle GUS - Braunkohle (Ressource)	Masse	-7,52E+02	kg	
Braunkohle Indien - Braunkohle (Ressource)	Masse	-8,52E+02	kg	
Braunkohle Kanada - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,35E+03	kg	
Braunkohle Mazedonien - Braunkohle (Ressource)	Masse	-1,74E+01	kg	
Braunkohle Österreich - Braunkohle (Ressource)	Masse	-1,15E+01	kg	
Braunkohle Polen - Braunkohle (Ressource)	Masse	-1,11E+03	kg	
Braunkohle Rumänien - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,47E+00	kg	
Braunkohle Serbien - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,39E+01	kg	
Braunkohle Slowakei - Braunkohle (Ressource)	Masse	-4,33E+01	kg	
Braunkohle Slowenien - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,86E+02	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Braunkohle Spanien - Braunkohle (Ressource)	Masse	1,86E+04	kg	
Braunkohle Tschechien - Braunkohle (Ressource)	Masse	6,73E+01	kg	
Braunkohle Türkei - Braunkohle (Ressource)	Masse	-2,96E+01	kg	
Braunkohle Ungarn - Braunkohle (Ressource)	Masse	-1,51E+01	kg	
Braunkohle USA (lignite) - Braunkohle (Ressource)	Masse	-7,77E+01	kg	
Calciumchlorid - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-5,62E-05	kg	
Carbonylsulphid - Organische Vorprodukte	Masse	4,50E-02	kg	
Chrom - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	6,62E+02	kg	
Chromerz (39%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,06E+01	kg	
Colemaniterz - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	4,91E+01	kg	
Dolomit - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-3,13E+04	kg	
Edelmetallerz (R.O.M) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-4,83E+01	kg	
Eisen - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	4,91E+04	kg	
Eisenerz (56,86 %) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,64E+06	kg	
Eisenerz (65%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	3,88E+03	kg	
Eisensulfatlösung - Anorganische Vorprodukte	Masse	1,44E+02	kg	
Erdgas (in kg) - Erdgas (Ressource)	Masse	7,00E+04	kg	
Erdgas (in MJ) - Erdgas (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	-5,71E+07	MJ	
Erdgas Ägypten - Erdgas (Ressource)	Masse	2,62E+00	kg	
Erdgas Algerien - Erdgas (Ressource)	Masse	1,02E+04	kg	
Erdgas Angola - Erdgas (Ressource)	Masse	2,80E+01	kg	
Erdgas Argentinien - Erdgas (Ressource)	Masse	2,08E+02	kg	
Erdgas Australien - Erdgas (Ressource)	Masse	4,85E+02	kg	
Erdgas Bolivien - Erdgas (Ressource)	Masse	2,37E+03	kg	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Erdgas Brasilien - Erdgas (Ressource)	Masse	4,68E+03	kg	
Erdgas Brunei - Erdgas (Ressource)	Masse	1,30E+03	kg	
Erdgas Bulgarien - Erdgas (Ressource)	Masse	-5,23E-03	kg	
Erdgas Chile - Erdgas (Ressource)	Masse	-5,90E+00	kg	
Erdgas China - Erdgas (Ressource)	Masse	2,11E+03	kg	
Erdgas Dänemark - Erdgas (Ressource)	Masse	1,91E+02	kg	
Erdgas Deutschland - Erdgas (Ressource)	Masse	6,01E+03	kg	
Erdgas Ecuador - Erdgas (Ressource)	Masse	-1,18E+00	kg	
Erdgas Frankreich - Erdgas (Ressource)	Masse	2,68E+02	kg	
Erdgas Gabun - Erdgas (Ressource)	Masse	-3,97E-01	kg	
Erdgas Griechenland - Erdgas (Ressource)	Masse	-2,09E-01	kg	
Erdgas Großbritannien - Erdgas (Ressource)	Masse	2,48E+04	kg	
Erdgas GUS - Erdgas (Ressource)	Masse	3,13E+03	kg	
Erdgas Indien - Erdgas (Ressource)	Masse	-3,32E+02	kg	
Erdgas Indonesien - Erdgas (Ressource)	Masse	3,44E+03	kg	
Erdgas Irak - Erdgas (Ressource)	Masse	3,85E+01	kg	
Erdgas Iran - Erdgas (Ressource)	Masse	3,06E+02	kg	
Erdgas Irland - Erdgas (Ressource)	Masse	2,55E+00	kg	
Erdgas Italien - Erdgas (Ressource)	Masse	2,77E+01	kg	
Erdgas Japan - Erdgas (Ressource)	Masse	3,83E+02	kg	
Erdgas Kamerun - Erdgas (Ressource)	Masse	9,11E+01	kg	
Erdgas Kanada - Erdgas (Ressource)	Masse	8,89E+02	kg	
Erdgas Katar - Erdgas (Ressource)	Masse	2,93E+03	kg	
Erdgas Kolumbien - Erdgas (Ressource)	Masse	1,19E+00	kg	
Erdgas Kuwait - Erdgas (Ressource)	Masse	1,38E+02	kg	
Erdgas Libyen - Erdgas (Ressource)	Masse	4,66E+02	kg	
Erdgas Malaysia - Erdgas (Ressource)	Masse	2,17E+03	kg	
Erdgas Mexiko - Erdgas (Ressource)	Masse	1,22E+02	kg	
Erdgas Neuseeland - Erdgas (Ressource)	Masse	-2,02E+01	kg	
Erdgas Niederlande - Erdgas (Ressource)	Masse	3,25E+04	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Erdgas Nigeria - Erdgas (Ressource)	Masse	1,43E+03	kg	
Erdgas Norwegen - Erdgas (Ressource)	Masse	7,02E+03	kg	
Erdgas Oman - Erdgas (Ressource)	Masse	1,02E+03	kg	
Erdgas Österreich - Erdgas (Ressource)	Masse	4,63E-02	kg	
Erdgas Polen - Erdgas (Ressource)	Masse	-7,14E+00	kg	
Erdgas Rumänien - Erdgas (Ressource)	Masse	5,23E-01	kg	
Erdgas Saudi Arabien - Erdgas (Ressource)	Masse	4,50E+02	kg	
Erdgas Slowakei - Erdgas (Ressource)	Masse	-8,82E-01	kg	
Erdgas Spanien - Erdgas (Ressource)	Masse	3,07E+02	kg	
Erdgas Südafrika - Erdgas (Ressource)	Masse	-2,20E+00	kg	
Erdgas Syrien - Erdgas (Ressource)	Masse	-1,01E-02	kg	
Erdgas Trinidad und Tobago - Erdgas (Ressource)	Masse	3,12E+02	kg	
Erdgas Tschechien - Erdgas (Ressource)	Masse	2,45E-01	kg	
Erdgas Tunesien - Erdgas (Ressource)	Masse	1,88E+01	kg	
Erdgas Türkei - Erdgas (Ressource)	Masse	-2,41E-02	kg	
Erdgas Ungarn - Erdgas (Ressource)	Masse	-6,48E+00	kg	
Erdgas USA - Erdgas (Ressource)	Masse	-1,11E+02	kg	
Erdgas Venezuela - Erdgas (Ressource)	Masse	4,12E+01	kg	
Erdgas Vereinigte Arabische Emirate - Erdgas (Ressource)	Masse	1,59E+03	kg	
Erdöl (in kg) - Erdöl (Ressource)	Masse	8,07E+04	kg	
Erdöl (in MJ) - Erdöl (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	2,34E+07	MJ	
Erdöl Ägypten - Erdöl (Ressource)	Masse	9,21E+01	kg	
Erdöl Algerien - Erdöl (Ressource)	Masse	6,63E+02	kg	
Erdöl Angola - Erdöl (Ressource)	Masse	2,23E+02	kg	
Erdöl Argentinien - Erdöl (Ressource)	Masse	3,07E+01	kg	
Erdöl Australien - Erdöl (Ressource)	Masse	-2,70E+03	kg	
Erdöl Bolivien - Erdöl (Ressource)	Masse	1,23E+00	kg	
Erdöl Brasilien - Erdöl (Ressource)	Masse	8,25E+02	kg	



<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Erdöl Brunei - Erdöl (Ressource)	Masse	1,45E-01	kg	
Erdöl Bulgarien - Erdöl (Ressource)	Masse	-1,77E-02	kg	
Erdöl Chile - Erdöl (Ressource)	Masse	-2,55E-02	kg	
Erdöl China - Erdöl (Ressource)	Masse	-5,81E+01	kg	
Erdöl Dänemark - Erdöl (Ressource)	Masse	1,02E+03	kg	
Erdöl Deutschland - Erdöl (Ressource)	Masse	1,53E+02	kg	
Erdöl Ecuador - Erdöl (Ressource)	Masse	-2,02E+01	kg	
Erdöl Frankreich - Erdöl (Ressource)	Masse	3,41E+01	kg	
Erdöl Gabun - Erdöl (Ressource)	Masse	-3,21E+00	kg	
Erdöl Griechenland - Erdöl (Ressource)	Masse	4,43E+00	kg	
Erdöl Großbritannien - Erdöl (Ressource)	Masse	5,48E+03	kg	
Erdöl GUS - Erdöl (Ressource)	Masse	5,74E+03	kg	
Erdöl Indien - Erdöl (Ressource)	Masse	-5,73E+01	kg	
Erdöl Indonesien - Erdöl (Ressource)	Masse	-4,91E+02	kg	
Erdöl Irak - Erdöl (Ressource)	Masse	6,36E+02	kg	
Erdöl Iran - Erdöl (Ressource)	Masse	2,89E+03	kg	
Erdöl Irland - Erdöl (Ressource)	Masse	1,10E-03	kg	
Erdöl Italien - Erdöl (Ressource)	Masse	1,60E+02	kg	
Erdöl Japan - Erdöl (Ressource)	Masse	1,26E-01	kg	
Erdöl Kamerun - Erdöl (Ressource)	Masse	3,65E+02	kg	
Erdöl Kanada - Erdöl (Ressource)	Masse	-5,26E+02	kg	
Erdöl Katar - Erdöl (Ressource)	Masse	1,05E+03	kg	
Erdöl Kolumbien - Erdöl (Ressource)	Masse	-5,67E+00	kg	
Erdöl Kuwait - Erdöl (Ressource)	Masse	1,39E+03	kg	
Erdöl Libyen - Erdöl (Ressource)	Masse	2,21E+03	kg	
Erdöl Malaysia - Erdöl (Ressource)	Masse	1,28E-01	kg	
Erdöl Mexiko - Erdöl (Ressource)	Masse	1,17E+03	kg	
Erdöl Neuseeland - Erdöl (Ressource)	Masse	-1,22E+02	kg	
Erdöl Niederlande - Erdöl (Ressource)	Masse	1,34E+02	kg	
Erdöl Nigeria - Erdöl (Ressource)	Masse	1,46E+03	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Erdöl Norwegen - Erdöl (Ressource)	Masse	3,66E+03	kg	
Erdöl Oman - Erdöl (Ressource)	Masse	8,24E+02	kg	
Erdöl Österreich - Erdöl (Ressource)	Masse	4,00E+01	kg	
Erdöl Polen - Erdöl (Ressource)	Masse	1,50E+01	kg	
Erdöl Rumänien - Erdöl (Ressource)	Masse	1,66E+01	kg	
Erdöl Saudi Arabien - Erdöl (Ressource)	Masse	5,17E+03	kg	
Erdöl Slowakei - Erdöl (Ressource)	Masse	1,28E-02	kg	
Erdöl Spanien - Erdöl (Ressource)	Masse	8,13E+00	kg	
Erdöl Südafrika - Erdöl (Ressource)	Masse	1,68E-03	kg	
Erdöl Syrien - Erdöl (Ressource)	Masse	-9,37E-02	kg	
Erdöl Trinidad und Tobago - Erdöl (Ressource)	Masse	-1,69E+01	kg	
Erdöl Tschechien - Erdöl (Ressource)	Masse	9,69E+00	kg	
Erdöl Tunesien - Erdöl (Ressource)	Masse	1,64E+02	kg	
Erdöl Türkei - Erdöl (Ressource)	Masse	-2,39E-01	kg	
Erdöl Ungarn - Erdöl (Ressource)	Masse	1,76E+01	kg	
Erdöl USA - Erdöl (Ressource)	Masse	-1,65E+03	kg	
Erdöl Venezuela - Erdöl (Ressource)	Masse	6,29E+02	kg	
Erdöl Vereinigte Arabische Emirate - Erdöl (Ressource)	Masse	2,88E+03	kg	
Erosionswiderstand - Okkupation	Erosionswiderstand (Okk.)	1,11E+05	kg	
Erosionswiderstand - Transformation	Erosionswiderstand (Transf.)	9,05E+01	kg/a	
Feldspat (Aluminiumsilikat) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	3,65E-16	kg	
Ferromangan - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-3,90E-04	kg	
Flußspat (Calciumfluorid) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	5,65E+01	kg	
Gips - Mineralische Werkstoffe	Masse	1,08E+02	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Gips (Naturgips) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	9,99E+04	kg	
Gips (verunreinigt) - Abfälle zur Verwertung	Masse	2,97E-03	kg	
Gold - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	2,05E-04	kg	
Granit - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-2,90E-11	kg	
Grubengas (in kg) - Erdgas (Ressource)	Masse	-8,35E-02	kg	
Grubenmethan (in kg) - Erdgas (Ressource)	Masse	-9,75E+03	kg	
Grubenmethan (in MJ) - Erdgas (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	-4,54E+05	MJ	
Grundwasserneubildung - Okkupation	Grundwasserneubildung (Okk.)	1,12E+07	mm*m2	
Grundwasserneubildung - Transformation	Grundwasserneubildung (Transf.)	8,75E+04	(mm*m2)/a	
Ilmenit (Titanerz) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,39E+02	kg	
Inanspruchn., konventionelles Kulturland - Hemerobie	Flächenzeit	9,51E+06	m2*a	
Inanspruchn., Waldgebiet - Hemerobie	Flächenzeit	7,25E-01	m2*a	
Iridium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	1,12E-05	kg	
Kaliumchlorid - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	8,52E-02	kg	
Kalkstein (Calciumcarbonat) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	7,54E+06	kg	
Kaolinerz - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,28E+04	kg	
Kobalt - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	6,05E-03	kg	
Kohlendioxid - Regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	3,34E+07	kg	
Kreide (Calciumcarbonat) - Nicht regenerierbare	Masse	-4,73E-30	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
stoffliche Ressourcen				
Kühlwasser (Meerwasser) - Wasser	Masse	2,85E+06	kg	
Kühlwasser (Oberflächenwasser) - Wasser	Masse	1,57E+06	kg	
Kupfer - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	2,25E+02	kg	
Kupfer - Gold - Erz (1,07% Cu; 0,54 g/t Au) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-3,45E+01	kg	
Kupfer - Gold - Silber - Erz (0,51% Cu; 0,6 g/t Au; 1,5 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-9,94E+01	kg	
Kupfer - Gold - Silber - Erz (1,0% Cu; 0,4 g/t Au; 66 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,63E+01	kg	
Kupfer - Gold - Silber - Erz (1,1% Cu; 0,01 g/t Au; 2,86 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-5,34E+03	kg	
Kupfer - Gold - Silber - Erz (1,13% Cu; 1,05 g/t Au; 3,72 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,07E+03	kg	
Kupfer - Gold - Silber - Erz (1,16% Cu; 0,002 g/t Au; 1,06 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-3,01E+03	kg	
Kupfer - Gold - Silber - Erz (1,7% Cu; 0,7 g/t Au; 3,5 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-8,07E+01	kg	
Kupfer - Molybdän - Gold - Silber - Erz (1,13% Cu; 0,02% Mo; 0,01 g/t Au; 2,86 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,21E+01	kg	
Kupfer - Silber - Erz (3,3% Cu; 5,5 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-5,58E+01	kg	
Kupfererz (0,14%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,92E+03	kg	
Kupfererz (1,2%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,69E+00	kg	
Kupfererz (4%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,38E-07	kg	
Kupfererz (sulfidisch, 1,1%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,64E-04	kg	
Landnutzung - Okkupation	Flächenzeit	1,32E+05	m2*a	
Landumwandlung - Transformation	Fläche	7,00E+03	qm	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Luft - Regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,30E+08	kg	
Magnesit (Magnesiumcarbonat) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	4,07E+00	kg	
Magnesium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-6,46E-11	kg	
Magnesiumchloridlauge (40%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	9,19E+03	kg	
Mangan - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	1,99E+02	kg	
Manganerz - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	8,04E-01	kg	
Manganerz (R.O.M) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-3,02E+04	kg	
Mechanische Filterung - Transformation	Mechanische Filterung (Transf.)	-1,07E+04	cm*m2/d	
Mechanische Filterung - Okkupation	Mechanische Filterung (Okk.)	1,19E+08	cm*m2	
Molybdän - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-8,10E+01	kg	
Molybdänit (Mo 0,24%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	7,39E+00	kg	
Nachwachsende Brennstoffe - Regenerierbare energetische Ressourcen	Masse	-8,79E+01	kg	
Natriumchlorid (Steinsalz) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,44E+04	kg	
Natriumnitrat - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,50E-13	kg	
Natriumsulfat - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-5,65E-02	kg	
Nickel - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-2,89E+01	kg	
Nickelerz (1,5 %) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-4,54E+03	kg	
Nickelerz (1,6%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,99E+03	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Nukleare Energie - Uran (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	-8,18E+03	MJ	
Olivin - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-4,03E-03	kg	
Ölsand (10 % Bitumen) (in MJ) - Erdöl (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	4,03E+04	MJ	
Ölsand (100 % Bitumen) (in MJ) - Erdöl (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	3,52E+04	MJ	
Osmium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	1,37E-05	kg	
Palladium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	1,98E-04	kg	
Phosphaterz - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-6,35E-03	kg	
Phosphor - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	6,03E+04	kg	
Phosphorerz (29% P2O5) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-7,10E+02	kg	
Phosphorminerale - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,26E-01	kg	
Physikochemische Filterung - Transformation	Physikochemische Filterung (Transf.)	-2,06E+03	(cmol*m2)/kg	
Physikochemische Filterung - Okkupation	Physikochemische Filterung (Okk.)	1,90E+05	(cmol*m2*a)/kg	
Platin - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	3,36E-04	kg	
Primärenergie aus Erdwärme - Regenerierbare energetische Ressourcen	Energie (unterer Heizwert)	-2,32E+05	MJ	
Primärenergie aus Sonnenenergie - Regenerierbare energetische Ressourcen	Energie (unterer Heizwert)	3,57E+08	MJ	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Primärenergie aus Tidenhub - Regenerierbare energetische Ressourcen	Energie (unterer Heizwert)	-2,50E+00	MJ	
Primärenergie aus Wasserkraft - Regenerierbare energetische Ressourcen	Energie (unterer Heizwert)	1,92E+07	MJ	
Primärenergie aus Windkraft - Regenerierbare energetische Ressourcen	Energie (unterer Heizwert)	3,54E+05	MJ	
Primärwald - Regenerierbare energetische Ressourcen	Masse	6,97E-01	kg	
Quarzsand (Siliciumdioxid) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	6,55E+05	kg	
Quecksilber - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-2,80E-03	kg	
Recyclinggut - Abfälle zur Verwertung	Masse	5,84E+00	kg	
Rhodium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	3,36E-05	kg	
Rohbims - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,33E+03	kg	
Rohkali (Carnall, Hartsalz, 10%K <sub>2</sub> O) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	9,82E+05	kg	
Rohkies - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,47E+07	kg	
Ruthenium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	6,63E-05	kg	
Rutil (Titanerz) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-6,79E-30	kg	
Sand - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,19E-01	kg	
Sauerstoff - Regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,36E+03	kg	
Schiefer - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,33E-05	kg	
Schwefel - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-2,11E+00	kg	
Schwefel (gebunden) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	2,37E-04	kg	
Schwerspat (BaSO <sub>4</sub> ) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	4,10E+02	kg	
Sekundärbrennstoff - Produktionsrückstände im Lebensfluss	Energie (unterer	6,18E+06	MJ	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
	Heizwert)			
Sekundärbrennstoff erneuerbar - Produktionsrückstände im Lebensfluss	Energie (unterer Heizwert)	5,95E+05	MJ	
Seltene Erden - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-1,08E+02	kg	
Silber - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	8,67E-03	kg	
Silicium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-1,14E-01	kg	
Steine aus Gebirge - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,20E+03	kg	
Steinkohle (in kg) - Steinkohle (Ressource)	Masse	4,95E+05	kg	
Steinkohle (in MJ) - Steinkohle (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	-5,32E+07	MJ	
Steinkohle Australien - Steinkohle (Ressource)	Masse	-2,73E+05	kg	
Steinkohle Belgien - Steinkohle (Ressource)	Masse	3,61E-01	kg	
Steinkohle Bosnien und Herzegowina - Steinkohle (Ressource)	Masse	-1,11E+02	kg	
Steinkohle Brasilien - Steinkohle (Ressource)	Masse	-4,70E+03	kg	
Steinkohle Chile - Steinkohle (Ressource)	Masse	-2,72E+00	kg	
Steinkohle China - Steinkohle (Ressource)	Masse	-6,21E+05	kg	
Steinkohle Deutschland - Steinkohle (Ressource)	Masse	-1,57E+04	kg	
Steinkohle Frankreich - Steinkohle (Ressource)	Masse	-4,77E+03	kg	
Steinkohle Großbritannien - Steinkohle (Ressource)	Masse	8,01E+03	kg	
Steinkohle GUS - Steinkohle (Ressource)	Masse	-1,43E+05	kg	
Steinkohle Indien - Steinkohle (Ressource)	Masse	-4,12E+04	kg	
Steinkohle Indonesien - Steinkohle (Ressource)	Masse	-4,84E+04	kg	
Steinkohle Italien - Steinkohle (Ressource)	Masse	-5,27E-01	kg	
Steinkohle Japan - Steinkohle (Ressource)	Masse	4,17E-04	kg	
Steinkohle Kanada - Steinkohle (Ressource)	Masse	-5,32E+04	kg	
Steinkohle Kolumbien - Steinkohle (Ressource)	Masse	-8,77E+03	kg	
Steinkohle Malaysia - Steinkohle (Ressource)	Masse	4,69E-03	kg	



<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Steinkohle Mexiko - Steinkohle (Ressource)	Masse	-3,01E+03	kg	
Steinkohle Neuseeland - Steinkohle (Ressource)	Masse	-4,35E+03	kg	
Steinkohle Polen - Steinkohle (Ressource)	Masse	-2,65E+04	kg	
Steinkohle Portugal - Steinkohle (Ressource)	Masse	2,10E-03	kg	
Steinkohle Spanien - Steinkohle (Ressource)	Masse	5,61E+03	kg	
Steinkohle Südafrika - Steinkohle (Ressource)	Masse	-2,45E+04	kg	
Steinkohle Tschechien - Steinkohle (Ressource)	Masse	-1,23E+04	kg	
Steinkohle Türkei - Steinkohle (Ressource)	Masse	-1,00E+03	kg	
Steinkohle USA - Steinkohle (Ressource)	Masse	-8,61E+04	kg	
Steinkohle Venezuela - Steinkohle (Ressource)	Masse	-9,92E+03	kg	
Steinkohle Vietnam - Steinkohle (Ressource)	Masse	-1,18E+03	kg	
Stickstoff - Regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-8,34E-01	kg	
Talkum - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	5,11E-02	kg	
Tantal - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	3,38E+00	kg	
Taubes Gestein - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-8,82E+06	kg	
Titan - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-5,71E-01	kg	
Titanerz (Sand, Rutil(TiO <sub>2</sub> )-haltig) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,65E+03	kg	
Ton - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,06E+06	kg	
Torf (in kg) - Torf (Ressource)	Masse	-1,39E+02	kg	
Torf (in MJ) - Torf (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	3,38E+03	MJ	
Uran ab Erz - Uran (Ressource)	Masse	-2,21E-03	kg	
Uran natürlich (in MJ) - Uran (Ressource)	Energie (unterer Heizwert)	-2,80E+05	MJ	
Vanadium - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	1,46E-02	kg	
Vanadiumerz (ROM) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-5,30E+04	kg	
Wasser - Wasser	Masse	6,97E+06	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Wasser (entsalzt, deionisiert) - Betriebsstoffe	Masse	1,55E-06	kg	
Wasser (Flußwasser) - Wasser	Masse	5,99E+08	kg	
Wasser (Grundwasser) - Wasser	Masse	2,27E+09	kg	
Wasser (Meerwasser) - Wasser	Masse	-2,20E+07	kg	
Wasser (Oberflächenwasser) - Wasser	Masse	7,73E+04	kg	
Wasser (Prozesswasser) - Betriebsstoffe	Masse	6,83E+00	kg	
Wasser (Quellwasser) - Wasser	Masse	-2,00E-03	kg	
Wasser (Regenwasser) - Wasser	Masse	6,53E+09	kg	
Wasser (Seewasser) - Wasser	Masse	5,40E+09	kg	
Wasser (Süßwasser) - Wasser	Masse	-7,53E+06	kg	
Wasser (Trinkwasser) - Wasser	Masse	-7,80E+02	kg	
Wasser (Uferfiltrat) - Wasser	Masse	-7,28E-08	kg	
Zink - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	-4,99E+03	kg	
Zink - Blei - Kupfererz (12%-3%-2%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-4,51E+03	kg	
Zink - Blei - Silber - Erz (7,5% Zn; 4,0% Pb; 40,8 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-4,42E+04	kg	
Zink - Blei - Silber - Erz (8,54% Zn; 5,48% Pb; 94 g/t Ag) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-3,03E+01	kg	
Zink - Bleierz (4,21%-4,96%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	4,71E-08	kg	
Zink - Kupfererz (4,07%-2,59%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	-1,06E+04	kg	
Zinkerz (sulfidisch, 4%) - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	9,53E-08	kg	
Zinn - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	2,94E-10	kg	
Zinnerz - Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen	Masse	1,02E-01	kg	
Zirkon - Nicht regenerierbare elementare Ressourcen	Masse	3,31E-14	kg	
<b>Outputs</b>				
Abfall (unspezifisch) - Siedlungsabfälle	Masse	9,36E+05	kg	*
Abraum (abgelagert) - Haldengüter	Masse	-7,72E+06	kg	*
Schlacke (Sekundärmetallurgie) - Abfall (anorganisch,	Masse	7,06E+04	kg	*

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
zur Beseitigung)				
Staub (Elektrolichtbogenofen) - Sonderabfälle (anorganisch, zur Beseitigung)	Masse	5,10E+03	kg	*
1,1,1-Trichlorethan - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-8,51E-07	kg	
1,2-Dibromethan - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,13E-06	kg	
1,3,5-Trimethylbenzol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	5,54E-07	kg	
Abfall (abgelagert) - Haldengüter	Masse	2,89E+07	kg	
Abfall radioaktiv - Radioaktive Abfälle	Masse	3,21E+00	kg	
Abgas - Sonstige Emissionen in Luft	Masse	1,76E+08	kg	
Abluft - Sonstige Emissionen in Luft	Masse	1,08E+06	kg	
Abwärme - Sonstige Emissionen in Salzwasser	Energie (unterer Heizwert)	-7,83E+02	MJ	
Abwärme - Sonstige Emissionen in Frischwasser	Energie (unterer Heizwert)	5,82E+05	MJ	
Abwärme - Sonstige Emissionen in Luft	Energie (unterer Heizwert)	8,20E+07	MJ	
Abwasser - Sonstige Emissionen in Frischwasser	Masse	-9,21E+06	kg	
Acenaphthene - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	-6,72E-05	kg	
Acenaphthene - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	3,52E-04	kg	
Acenaphthylen - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	1,44E-05	kg	
Acenaphthylen - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	1,84E-04	kg	
Acetaldehyd (Ethanal) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,96E+01	kg	
Aceton (Dimethylketon) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,74E+01	kg	
Acrolein (Propenal) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-1,57E-04	kg	
Acrylnitril - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	2,48E-08	kg	
Acrylnitril - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	4,13E-05	kg	
Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX) - Analysewerte Emissionen in Salzwasser	Masse	-1,10E-07	kg	
Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX)	Masse	1,29E+02	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
- Analysewerte Emissionen in Frischwasser				
Aldehyde (unspezifisch) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-3,71E-02	kg	
Alkane (unspezifisch) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	1,33E-10	kg	
Alkane (unspezifisch) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	6,31E+01	kg	
Alkene (unspezifisch) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	5,93E+01	kg	
Aluminium - Partikel in Luft	Masse	1,22E-03	kg	
Aluminium (+III) - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	-3,47E-05	kg	
Aluminium (+III) - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	1,84E+01	kg	
Aluminium (+III) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-2,41E+00	kg	
Aluminium Ion (+III) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	8,40E-10	kg	
Aluminium Ion (+III) - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	1,67E-11	kg	
Aluminiumoxid (Staub) - Partikel in Luft	Masse	6,03E-03	kg	
Americium (Am241) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	6,72E+03	Bq	
Ammoniak - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	1,84E+01	kg	
Ammoniak - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	-2,31E-03	kg	
Ammoniak - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,64E+04	kg	
Ammoniak - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	2,69E+02	kg	
Ammonium - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-2,02E-01	kg	
Ammonium (gesamt N) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-8,58E+01	kg	
Ammonium (gesamt N) - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	6,61E-03	kg	
Ammonium / Ammoniak - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	2,44E+02	kg	
Ammonium / Ammoniak - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	1,16E-05	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Ammoniumnitrat - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,46E-06	kg	
Anorg. Salze und Säuren (unspezifisch) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-2,02E-10	kg	
Anorganische gelöste Stoffe (unspezifisch) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	2,06E-10	kg	
Anthracen - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	2,11E-04	kg	
Anthracen - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	-2,05E-04	kg	
Anthracen - Gruppe PAH in Luft	Masse	-2,23E-05	kg	
Antimon - Schwermetalle in Luft	Masse	-5,33E-02	kg	
Antimon - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-2,85E-07	kg	
Antimon - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	-9,71E-07	kg	
Antimon (Sb124) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-6,45E+04	Bq	
Antimon (Sb124) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,89E+03	Bq	
Antimon (Sb125) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-7,54E+04	Bq	
Argon - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,34E-01	kg	
Argon (Ar41) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,03E+08	Bq	
Aromatische Kohlenwasserstoffe (unspezifisch) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	-1,22E-03	kg	
Aromatische Kohlenwasserstoffe (unspezifisch) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	8,53E-02	kg	
Arsen (+V) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	1,76E-04	kg	
Arsen (+V) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	2,62E-01	kg	
Arsen (+V) - Schwermetalle in Luft	Masse	-6,09E-01	kg	
Arsen (+V) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-4,11E-02	kg	
Arsentrioxid - Schwermetalle in Luft	Masse	-8,54E-05	kg	
Arsenwasserstoff - Schwermetalle in Luft	Masse	-7,09E-03	kg	
Barit - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	9,96E-10	kg	
Barium - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,98E+02	kg	
Barium - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	2,42E+00	kg	
Barium - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,03E+00	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Benzo{a}anthracen - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	8,84E-05	kg	
Benzo{a}anthracen - Gruppe PAH in Luft	Masse	-1,12E-05	kg	
Benzo{a}anthracen - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	1,53E-05	kg	
Benzo{a}pyren - Gruppe PAH in Luft	Masse	-5,09E-03	kg	
Benzo{ghi}perylen - Gruppe PAH in Luft	Masse	-1,00E-05	kg	
Benzofluoranthen - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	2,50E-06	kg	
Benzofluoranthen - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	6,19E-05	kg	
Benzofluoranthen - Gruppe PAH in Luft	Masse	-2,00E-05	kg	
Benzol - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	3,34E-01	kg	
Benzol - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	8,22E-01	kg	
Benzol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-1,58E+01	kg	
Beryllium - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	-9,91E-08	kg	
Beryllium - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-3,25E-05	kg	
Beryllium - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	3,30E-04	kg	
Beryllium - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,44E-02	kg	
Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB) - Analysewerte Emissionen in Salzwasser	Masse	-2,33E-01	kg	
Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB) - Analysewerte Emissionen in Frischwasser	Masse	6,23E+02	kg	
Biomasse (fest) - Biomassebrennstoffe	Masse	9,89E+00	kg	
Blei (+II) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	5,32E-02	kg	
Blei (+II) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	1,84E+01	kg	
Blei (+II) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	8,18E-01	kg	
Blei (+II) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	9,04E-04	kg	
Blei (+II) - Schwermetalle in Luft	Masse	1,42E+00	kg	
Blei (Pb210) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,28E+04	Bq	
Bleioxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	7,38E-07	kg	
Bodenaushub (abgelagert) - Haldengüter	Masse	4,59E+06	kg	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Bor - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	-1,26E-03	kg	
Bor - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-2,87E-04	kg	
Bor - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,55E+01	kg	
Borverbindungen (unspezifisch) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-1,02E+01	kg	
Brom - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-4,98E+00	kg	
Brom - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,10E-05	kg	
Bromat - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-3,87E-06	kg	
Bromid - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	8,95E-04	kg	
Bromwasserstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,57E-03	kg	
Butadien - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,20E-05	kg	
Butan - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	6,19E+00	kg	
Butan (n-Butan) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-1,24E+02	kg	
Buten - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	7,71E-04	kg	
Cadmium (+II) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	6,59E+00	kg	
Cadmium (+II) - Schwermetalle in Luft	Masse	-1,80E-03	kg	
Cadmium (+II) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	3,39E-01	kg	
Cadmium (+II) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	9,61E-02	kg	
Cadmium (+II) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	9,76E-05	kg	
CaF2 (schwach radioaktiv) - Radioaktive Abfälle	Masse	5,40E-01	kg	
Calcium (+II) - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	-1,37E-01	kg	
Calcium (+II) - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	7,24E+04	kg	
Calcium (+II) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,72E+03	kg	
Caprolactam - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,84E-06	kg	
Carbonat - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,23E+04	kg	
Carbonat - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	1,52E+02	kg	
Carbondisulfid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-2,09E-04	kg	
Cäsium (Cs134) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	1,57E+03	Bq	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Cäsium (Cs134) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	3,06E+05	Bq	
Cäsium (Cs134) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,25E+04	Bq	
Cäsium (Cs137) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,67E+05	Bq	
Cäsium (Cs137) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	3,02E+06	Bq	
Cäsium (Cs137) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	3,38E+03	Bq	
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) - Analysewerte Emissionen in Frischwasser	Masse	1,38E+06	kg	
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) - Analysewerte Emissionen in Salzwasser	Masse	1,53E+01	kg	
Chlor - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,90E-06	kg	
Chlor - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,64E+01	kg	
Chlor - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	-7,44E-04	kg	
Chlor (gelöst) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-8,03E+00	kg	
Chlorat - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-4,06E-01	kg	
Chlorid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-2,05E+04	kg	
Chlorid - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	1,24E+03	kg	
Chlorid - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	1,20E+04	kg	
Chloride (unspezifisch) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,03E+00	kg	
Chlorkohlenwasserstoffe (unspezifisch) - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	3,53E-10	kg	
Chlormethan (Methylchlorid) - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	2,30E-04	kg	
Chlormethan (Methylchlorid) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	1,30E+02	kg	
Chlorwasserstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	5,10E+04	kg	
Chlorwasserstoff - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-2,61E+02	kg	
Chrom (+III) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	-1,63E-04	kg	
Chrom (+III) - Schwermetalle in Luft	Masse	6,16E-02	kg	



<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Chrom (+III) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	4,36E+00	kg	
Chrom (+III) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	8,54E-01	kg	
Chrom (+VI) - Schwermetalle in Luft	Masse	-8,22E-07	kg	
Chrom (+VI) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	-3,19E-06	kg	
Chrom (+VI) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	4,83E-01	kg	
Chrom (unspezifisch) - Schwermetalle in Luft	Masse	2,07E+00	kg	
Chrom (unspezifisch) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-1,76E+00	kg	
Chrom (unspezifisch) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	-1,97E-02	kg	
Chrom (unspezifisch) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	1,24E-02	kg	
Chrom (unspezifisch) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	-1,63E+00	kg	
Chrysen - Gruppe PAH in Luft	Masse	-2,75E-05	kg	
Chrysen - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	6,89E-05	kg	
Chrysen - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	4,38E-04	kg	
Cobalt (Co58) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-3,22E+05	Bq	
Cobalt (Co58) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-2,71E+03	Bq	
Cobalt (Co60) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-8,54E+03	Bq	
Cobalt (Co60) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,99E+04	Bq	
Cobalt (Co60) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	9,52E+05	Bq	
Cumol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-6,38E-07	kg	
Curium (Cm alpha) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	8,91E+03	Bq	
Cyanid - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	3,60E-09	kg	
Cyanid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-6,50E-01	kg	
Cyanide (unspezifisch) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	5,54E-02	kg	
Cyanwasserstoff (Blausäure) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	2,53E-10	kg	
Cyanwasserstoff (Blausäure) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-7,63E-03	kg	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Cyclohexan (Hexahydrobenzol) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-4,73E-03	kg	
Dibenz(a)anthracen - Gruppe PAH in Luft	Masse	-6,23E-06	kg	
Dichlorethan (Ethylendichlorid) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-1,48E-07	kg	
Dichlorethan (Ethylendichlorid) - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	-3,22E-09	kg	
Dichlormethan (Methylenchlorid) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-6,85E-07	kg	
Dichlorpropan - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	5,65E-10	kg	
Diethylamin (Ethylenamin) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,32E-06	kg	
Dimethylamin - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	2,60E-08	kg	
Dioxine (unspez.) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	1,85E-05	kg	
Edelgase - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,52E-17	Bq	
Eisen - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	7,11E-02	kg	
Eisen - Schwermetalle in Luft	Masse	-4,36E+00	kg	
Eisen - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	1,13E+03	kg	
Eisen - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	4,99E+00	kg	
Eisenion (+II/+III) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	4,15E-09	kg	
Erosionsverlust in Wasser - Partikel in Frischwasser	Masse	8,78E+05	kg	
Essigsäure (Ethansäure) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	7,31E-04	kg	
Essigsäure (Ethansäure) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	1,28E-02	kg	
Essigsäure (Ethansäure) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-5,27E+00	kg	
Ethan - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-2,00E+02	kg	
Ethanol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	2,03E+00	kg	
Ethen (Ethylen) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	5,15E+00	kg	
Ethylbenzol - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	1,83E-02	kg	
Ethylbenzol - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	4,94E-02	kg	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Ethylbenzol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	6,21E+01	kg	
Feststoffe (gelöst) - Analysewerte Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,51E+01	kg	
Feststoffe (suspendiert) - Partikel in Frischwasser	Masse	4,44E+02	kg	
Feststoffe (suspendiert) - Partikel in Salzwasser	Masse	-9,04E+01	kg	
Fluor - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-9,02E-01	kg	
Fluor - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,90E-04	kg	
Fluoranthren - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-7,26E-05	kg	
Fluoranthren - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	-6,48E-05	kg	
Fluoranthren - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	-1,49E-04	kg	
Fluoren - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-2,30E-04	kg	
Fluorid - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	5,64E-01	kg	
Fluorid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,50E+01	kg	
Fluorid - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	5,80E-03	kg	
Fluorid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-7,07E+03	kg	
Fluoride - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,05E-02	kg	
Fluorwasserstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-1,11E+01	kg	
Fluorwasserstoff (Flußsäure) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,10E+00	kg	
Formaldehyd (Methanal) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	6,57E-10	kg	
Formaldehyd (Methanal) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-4,58E+01	kg	
Gesamter gelöster organisch gebundener Kohlenstoff - Analysewerte Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,03E-03	kg	
Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (TOC) - Analysewerte Emissionen in Frischwasser	Masse	1,18E+02	kg	
Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (TOC) - Analysewerte Emissionen in Salzwasser	Masse	-1,18E-01	kg	
Haldengüter (abgelagert) - Haldengüter	Masse	-2,45E+04	kg	
Halon (1301) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	2,11E-12	kg	
Helium - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,32E-03	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Heptan (Isomere) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,48E+00	kg	
Hexamethyldiamin (HMDA) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	7,04E-07	kg	
Hexan (Isomere) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	-1,90E-06	kg	
Hexan (Isomere) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	-2,43E-06	kg	
Hexan (Isomere) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	8,72E+00	kg	
Holz (Staub) - Partikel in Luft	Masse	2,10E-05	kg	
Hydroxid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,28E+01	kg	
Indenpyren - Gruppe PAH in Luft	Masse	-7,44E-06	kg	
Iod (I129) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	9,72E+05	Bq	
Iod (I129) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	1,46E+04	Bq	
Iod (I131) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-7,05E+06	Bq	
Iod (I131) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,82E+05	Bq	
Iod (I131) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-1,81E+04	Bq	
Iodid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,02E-10	kg	
Isopropanol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,50E-03	kg	
Jodwasserstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,72E-06	kg	
Kalium - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	2,21E-08	kg	
Kalium - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,65E+04	kg	
Kalium (+I) - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	2,98E+01	kg	
Kalkstein - Mineralische Werkstoffe	Masse	1,75E+00	kg	
Kobalt - Schwermetalle in Luft	Masse	2,90E-02	kg	
Kobalt - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	5,76E-03	kg	
Kobalt - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	-9,15E-04	kg	
Kobalt - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	3,18E-02	kg	
Kohlendioxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-6,89E+05	kg	
Kohlendioxid (biogen) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,92E+07	kg	
Kohlendioxid (biogen) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-2,07E-01	kg	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Kohlenmonoxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,76E+05	kg	
Kohlenstoff (C14) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,04E+06	Bq	
Kohlenstoff (C14) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,51E+08	Bq	
Kohlenstoff (C14) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	3,42E+05	Bq	
Kohlenstoff, organisch gebunden - Organische Emissionen in Frischwasser	Masse	9,41E+04	kg	
Kohlenwasserstoffe (unspezifisch) - Organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC)	Masse	2,98E+01	kg	
Kohlenwasserstoffe (unspezifisch) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	2,06E-07	kg	
Kohlenwasserstoffe (unspezifisch) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	-5,13E-01	kg	
Kohlenwasserstoffe, aromatisch - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	3,99E-01	kg	
Kohlenwasserstoffe, Chlor-/Fluor- - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	3,34E-07	kg	
Kohlenwasserstoffe, halogeniert - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-6,25E-06	kg	
Kresol (Methylphenol) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	-2,26E-05	kg	
Kresol (Methylphenol) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	-1,74E-05	kg	
Krypton (Kr85) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	2,51E+11	Bq	
Krypton (Kr85m) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,14E+09	Bq	
Kupfer (+II) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	1,49E+00	kg	
Kupfer (+II) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	3,65E-01	kg	
Kupfer (+II) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	2,52E+00	kg	
Kupfer (+II) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	4,72E-01	kg	
Kupfer (+II) - Schwermetalle in Luft	Masse	-1,13E-02	kg	
Kupferion (+II/+III) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	7,09E-08	kg	
Lachgas (Distickstoffmonoxid) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,56E+03	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Lanthan - Schwermetalle in Luft	Masse	1,71E-06	kg	
Magnesium - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	-5,45E-02	kg	
Magnesium (+II) - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	4,86E+01	kg	
Magnesium (+II) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-4,68E+02	kg	
Magnesiumchlorid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,27E-03	kg	
Magnesiumionen (+II) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	5,14E-06	kg	
Mangan (+II) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	5,20E+01	kg	
Mangan (+II) - Schwermetalle in Luft	Masse	2,59E+01	kg	
Mangan (+II) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	1,94E-02	kg	
Mangan (+II) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	7,33E-03	kg	
Mangan (Mn54) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	1,72E+05	Bq	
Mercaptane (unspezifisch) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	2,41E+01	kg	
Meta-Cresol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,68E-07	kg	
Metalle (unspezifisch) - Partikel in Frischwasser	Masse	-2,90E-01	kg	
Metalle (unspezifisch) - Partikel in Luft	Masse	-3,08E-02	kg	
Metallionen (unspezifisch) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	3,01E-03	kg	
Methacrylat (MA) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	2,92E-08	kg	
Methan - Organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC)	Masse	5,04E+04	kg	
Methanol - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	8,58E+01	kg	
Methanol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-1,20E-01	kg	
Methylbromid - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	1,23E-10	kg	
Methylmethacrylat (MMA) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	4,84E-06	kg	
Molybdän - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-2,73E-01	kg	
Molybdän - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	-6,68E-06	kg	
Molybdän - Schwermetalle in Luft	Masse	-1,80E-02	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Naphthalin - Organische Emissionen in Salzwasser	Masse	3,35E-02	kg	
Naphthalin - Gruppe PAH in Luft	Masse	-3,31E-02	kg	
Naphthalin - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	1,19E-02	kg	
Natrium (+I) - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	1,92E+01	kg	
Natrium (+I) - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	-2,44E+00	kg	
Natrium (+I) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,22E+03	kg	
Natriumchlorid (Steinsalz) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	4,03E-02	kg	
Natriumhypochlorit - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	3,11E+02	kg	
Natriumsulfat - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	4,72E+00	kg	
n-Butylacetat - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-2,50E-06	kg	
Neutralsalze - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-3,60E-04	kg	
Nickel (+II) - Schwermetalle in Luft	Masse	2,42E-01	kg	
Nickel (+II) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	1,79E+01	kg	
Nickel (+II) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	1,39E-01	kg	
Nickel (+II) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	3,46E-04	kg	
Nickel (+II) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	2,55E-01	kg	
Nickelion (+III) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	5,55E-11	kg	
Nitrat - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	5,94E-01	kg	
Nitrat - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,14E+05	kg	
Nitrit - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	5,65E-03	kg	
Nitrit - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-9,35E-04	kg	
NMVOC (unspezifisch) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,43E+04	kg	
Oktan - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	8,16E-01	kg	
Öle (unspezifisch) - Organische Emissionen in Industrieboden	Masse	-1,21E+00	kg	
Öle (unspezifisch) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	4,60E+00	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Öle (unspezifisch) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	8,58E+01	kg	
Organische Chlorverbindungen - Organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC)	Masse	-5,39E-05	kg	
Organische Chlorverbindungen (unspezifisch) - Organische Emissionen in Frischwasser	Masse	-2,50E-02	kg	
Organische Verbindungen (gelöst) - Organische Emissionen in Frischwasser	Masse	-3,33E-03	kg	
Organische Verbindungen (unspezifisch) - Organische Emissionen in Frischwasser	Masse	4,81E+02	kg	
Palladium - Schwermetalle in Luft	Masse	-1,55E-09	kg	
Para-Cresol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	1,67E-07	kg	
Pentachlorphenol (PCP) - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	3,20E-07	kg	
Pentan (n-Pentan) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-9,56E+01	kg	
Phenanthren - Gruppe PAH in Luft	Masse	-7,35E-04	kg	
Phenol (Hydroxybenzol) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-2,42E-02	kg	
Phenol (Hydroxybenzol) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	7,82E-02	kg	
Phenol (Hydroxybenzol) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	9,33E-01	kg	
Phosphat - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,45E+03	kg	
Phosphor - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	1,00E+01	kg	
Phosphor - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,01E+02	kg	
Phosphor - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	1,01E-04	kg	
Phosphorwasserstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-2,51E-05	kg	
Plutonium (Pu alpha) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	5,48E-01	Bq	
Plutonium (Pu alpha) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	2,68E+04	Bq	
Plutonium als Reststoff - Radioaktive Abfälle	Masse	3,21E-03	kg	
Polonium (Po210) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,91E+04	Bq	
Polychlorierte Biphenyle (PCB unspezifisch) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	1,70E-04	kg	



Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Polychlorierte Dibenzop-dioxine (2,3,7,8 - TCDD) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	5,62E-06	kg	
Polychlorierte Dibenzop-dioxine (2,3,7,8 - TCDD) - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	-3,53E-11	kg	
Polyzyklische aromat. Kohlenwasserst (PAH un spez.) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	1,46E-01	kg	
Polyzyklische aromat. Kohlenwasserstoffe (un spez.) - Organische Emissionen in Industrieboden	Masse	-2,42E-04	kg	
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) - Gruppe PAH in Luft	Masse	4,11E+01	kg	
Polyzyklische Kohlenwasserstoffe - Organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC)	Masse	1,21E-24	kg	
Propan - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-1,12E+02	kg	
Propen (Propylen) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	5,37E+00	kg	
Propionsäure (Propansäure) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	7,14E-07	kg	
Propylenglycolmethyletheracetat - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	3,13E-04	kg	
Protactinium (Pa234m) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	2,44E+04	Bq	
Protactinium (Pa234m) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	5,23E+00	Bq	
Quecksilber (+II) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	-8,72E-06	kg	
Quecksilber (+II) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-2,21E-03	kg	
Quecksilber (+II) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	8,55E-03	kg	
Quecksilber (+II) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	5,43E-04	kg	
Quecksilber (+II) - Schwermetalle in Luft	Masse	8,42E-01	kg	
R 11 (Trichlorfluormethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	4,10E-02	kg	
R 114 (Dichlortetrafluorethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-5,04E-02	kg	
R 116 (Hexafluorethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-3,34E-02	kg	
R 12 (Dichlordifluormethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	8,81E-03	kg	
R 124 (Chlortetrafluorethan) - Halogenhaltige	Masse	3,23E-11	kg	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
organische Emissionen in Luft				
R 125 (Pentafluorethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-3,55E-06	kg	
R 13 (Chlortrifluormethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	5,53E-03	kg	
R 134a (Tetrafluorethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-2,20E-06	kg	
R 143 (Trifluorethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-3,17E-06	kg	
R 22 (Chlordifluormethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	9,62E-03	kg	
R 23 (Trifluormethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-2,36E-05	kg	
R 245fa - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-6,31E-05	kg	
R 32 (Difluormethan) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-5,32E-07	kg	
Radioaktive Isotope (unspezifisch) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	2,18E-05	Bq	
Radioaktive Substanzen allgemein - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	2,37E-03	Bq	
Radium (Ra224) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	5,10E-08	Bq	
Radium (Ra226) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-2,02E+07	Bq	
Radium (Ra226) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-8,60E+04	Bq	
Radium (Ra228) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	1,02E-07	Bq	
Radon (Rn222) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-2,73E+09	Bq	
Reingas - Sonstige Emissionen in Luft	Masse	7,35E+04	kg	
Reinigungsmittel (unspezifisch) - Sonstige Emissionen in Frischwasser	Masse	5,61E-14	kg	
Rhodium - Schwermetalle in Luft	Masse	-1,50E-09	kg	
Ruthenium (Ru106) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	1,15E+04	Bq	
Ruthenium (Ru106) - Radioaktive Emissionen in	Aktivität	5,60E+05	Bq	

<b>Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse</b>	<b>Größe</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Typ</b>
Salzwasser				
Salpetersäure - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	3,14E-09	kg	
Sauerstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,73E+04	kg	
Säure (ger. als H+) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,89E+00	kg	
Scandium - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	8,72E-07	kg	
Schlamm (Urankonversion) - Radioaktive Abfälle	Masse	3,58E+00	kg	
Schwefel - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	1,95E-04	kg	
Schwefel - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-8,71E-04	kg	
Schwefel - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	6,23E-04	kg	
Schwefel - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-2,47E-03	kg	
Schwefeldioxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,51E+03	kg	
Schwefelhexafluorid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-1,04E-05	kg	
Schwefelsäure - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-4,54E-01	kg	
Schwefelsäure - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-3,21E+01	kg	
Schwefeltrioxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-1,68E+00	kg	
Schwefeltrioxid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	5,47E-04	kg	
Schwefelwasserstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-6,82E+02	kg	
Schwermetalle in Luft (unspezifisch) - Schwermetalle in Luft	Masse	2,68E-02	kg	
Schwermetalle in Wasser (unspezifisch) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	4,88E-04	kg	
Selen - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	-1,09E-05	kg	
Selen - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-2,47E-02	kg	
Selen - Schwermetalle in Luft	Masse	-1,68E+00	kg	
Silber - Schwermetalle in Luft	Masse	-6,70E-03	kg	
Silber - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	-1,98E-05	kg	
Silber - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	6,43E-02	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Silber (Ag110m) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-9,42E+04	Bq	
Siliciumdioxid - Partikel in Frischwasser	Masse	-4,67E-06	kg	
Siliciumdioxid - Partikel in Luft	Masse	1,15E-04	kg	
Siliciumtetrafluorid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	8,76E-07	kg	
Silikatpartikel - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,16E-02	kg	
Sondermüll (abgelagert) - Haldengüter	Masse	6,19E+03	kg	
Staub (> PM10) - Partikel in Luft	Masse	-9,54E+02	kg	
Staub (PM10) - Partikel in Luft	Masse	-9,16E+01	kg	
Staub (PM2,5 - PM10) - Partikel in Luft	Masse	6,49E+03	kg	
Staub (PM2,5) - Partikel in Luft	Masse	4,68E+04	kg	
Staub (unspezifisch) - Partikel in Luft	Masse	-1,02E+03	kg	
Stickoxide - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	3,52E+04	kg	
Stickstoff - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	9,00E-08	kg	
Stickstoff - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	2,13E+01	kg	
Stickstoff (als gesamt N) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-1,68E-02	kg	
Stickstoff (Luftstickstoff) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,61E+02	kg	
Stickstoff organisch gebunden - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	6,10E+03	kg	
Stickstoffdioxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-2,53E+01	kg	
Stickstoffhaltiges Material (unspezifisch, als N) - Analysewerte Emissionen in Salzwasser	Masse	1,34E-02	kg	
Stickstoffhaltiges Material (unspezifisch, als N) - Analysewerte Emissionen in Frischwasser	Masse	-2,14E+02	kg	
Stickstoffmonoxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	5,75E+02	kg	
Stickstofftrifluorid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	4,80E-06	kg	
Strontium - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	2,01E+00	kg	
Strontium - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	-1,66E-02	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Strontium - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	3,33E-05	kg	
Strontium - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-1,61E+01	kg	
Strontium (Sr90) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	3,19E+05	Bq	
Strontium (Sr90) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	2,82E+04	Bq	
Styrol - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	-1,04E-06	kg	
Sulfat - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	6,42E+01	kg	
Sulfat - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	2,78E+00	kg	
Sulfat - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-4,66E+03	kg	
Sulfid - Anorganische Emissionen in Salzwasser	Masse	2,77E+01	kg	
Sulfid - Anorganische Emissionen in Industrieboden	Masse	2,04E+00	kg	
Sulfid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	1,13E+01	kg	
Sulfit - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	-4,69E+00	kg	
Tantal - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	1,65E-09	kg	
Tellur - Schwermetalle in Luft	Masse	8,27E-03	kg	
Tetrachlorethen (Perchlorethylen) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	2,00E-10	kg	
Tetrachlorethen (Perchlorethylen) - Halogenhaltige org. Emissionen in Salzwasser	Masse	1,75E-12	kg	
Tetrachlorethen (Perchlorethylen) - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	4,26E-09	kg	
Tetrafluormethan - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	-3,03E-01	kg	
Thallium - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-3,01E-03	kg	
Thallium - Schwermetalle in Luft	Masse	2,66E-02	kg	
Thorium (Th228) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	2,04E-07	Bq	
Thorium (Th230) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-2,94E+06	Bq	
Thorium (Th230) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,91E+04	Bq	
Thorium (Th234) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	5,23E+00	Bq	
Thorium (Th234) - Radioaktive Emissionen in	Aktivität	2,44E+04	Bq	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Frischwasser				
Titan - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-2,25E-01	kg	
Titan - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	-2,42E-06	kg	
Titan - Schwermetalle in Luft	Masse	1,76E-02	kg	
Tod; Frau; 31 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Frau; 45 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 26 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 30 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 33 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 40 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 47 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 50 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 51 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 54 - Tote	Anzahl	2,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 55 - Tote	Anzahl	1,00E+00	Stück	
Tod; Mann; 56 - Tote	Anzahl	2,00E+00	Stück	
Toluol (Methylbenzol) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	5,05E-01	kg	
Toluol (Methylbenzol) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	3,17E+01	kg	
Toluol (Methylbenzol) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	2,10E-01	kg	
Trichlorethen (Isomere) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	3,94E-05	kg	
Trichlormethan (Chloroform) - Halogenhaltige org. Emissionen in Frischwasser	Masse	4,26E-09	kg	
Triethylen-Glykol - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	5,60E-11	kg	
Ungenutzte Primärenergie aus Geothermie - Sonstige Emissionen in Frischwasser	Energie (unterer Heizwert)	4,38E+02	MJ	
Ungenutzte Primärenergie aus Sonnenenergie - Sonstige Emissionen in Luft	Energie (unterer Heizwert)	1,34E+05	MJ	
Ungenutzte Primärenergie aus Wasserkraft -	Energie	2,90E+06	MJ	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Sonstige Emissionen in Frischwasser	(unterer Heizwert)			
Ungenutzte Primärenergie aus Windkraft - Sonstige Emissionen in Luft	Energie (unterer Heizwert)	9,92E+04	MJ	
Uran (gesamt) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	6,04E+04	Bq	
Uran (U) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	8,49E+05	Bq	
Uran (U234) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,66E+03	Bq	
Uran (U234) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-6,76E+04	Bq	
Uran (U234) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-1,11E+06	Bq	
Uran (U235) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-2,63E+03	Bq	
Uran (U235) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,59E+02	Bq	
Uran (U238) - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	-1,10E+06	Bq	
Uran (U238) - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,66E+03	Bq	
Uran (U238) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	6,21E+06	Bq	
Uran angereichert - Radioaktive Abfälle	Masse	3,70E+00	kg	
Vanadium (+III) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	3,95E-03	kg	
Vanadium (+III) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	-2,81E-02	kg	
Vanadium (+III) - Schwermetalle in Luft	Masse	7,70E+00	kg	
Verletzung; Verbrennung; <20% - kurzfrist, behandelt; Berufsalter (40) - Verletzte	Zeit	1,00E+00	Jahre	
Verletzung; Verbrennung; <20% - langfrist, behandelt; Berufsalter (40) - Verletzte	Zeit	1,06E+03	Jahre	
Verletzung; Verbrennung; >20% to 60% - kurzfrist, behandelt; Berufsalter (40) - Verletzte	Zeit	1,23E+00	Jahre	
Verletzung; Verbrennung; >20% to 60% - langfrist, behandelt; Berufsalter (40) - Verletzte	Zeit	3,25E+02	Jahre	
Verletzung; Verbrennung; >60% - kurzfrist, behandelt; Berufsalter (40) - Verletzte	Zeit	1,08E+00	Jahre	
Verletzung; Verbrennung; >60% - langfrist, behandelt; Berufsalter (40) - Verletzte	Zeit	8,12E+01	Jahre	
Vinylchlorid (Chlorethen; VCM) - Halogenhaltige org.	Masse	6,63E-07	kg	

Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Emissionen in Frischwasser				
Vinylchlorid (Chlorethen; VCM) - Halogenhaltige organische Emissionen in Luft	Masse	1,82E+00	kg	
VOC (unspezifisch) - Organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC)	Masse	-1,31E-01	kg	
Wasser (Evapotranspiration) - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	8,73E+09	kg	
Wasser (Flusswasser aus Technosphäre, Abwasser) - Sonstige Emissionen in Frischwasser	Masse	1,09E+08	kg	
Wasser (Flusswasser aus Technosphäre, Kühlwasser) - Sonstige Emissionen in Frischwasser	Masse	-7,66E+06	kg	
Wasser (Flusswasser aus Technosphäre, turbiniert) - Sonstige Emissionen in Frischwasser	Masse	5,68E+09	kg	
Wasser (Meerwasser aus Technosphäre, Abwasser) - Sonstige Emissionen in Salzwasser	Masse	-1,77E+04	kg	
Wasserdampf - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,53E+08	kg	
Wasserstoff - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,57E+03	kg	
Wasserstoff - Anorganische Vorprodukte	Masse	5,00E+00	kg	
Wasserstoff-3, Tritium - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-3,08E+08	Bq	
Wasserstoff-3, Tritium - Radioaktive Emissionen in Frischwasser	Aktivität	4,61E+09	Bq	
Wasserstoff-3, Tritium - Radioaktive Emissionen in Salzwasser	Aktivität	1,36E+09	Bq	
Wasserstoffperoxid - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	2,30E-01	kg	
Wolfram - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	9,31E-05	kg	
Xenon (Xe131m) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,33E+08	Bq	
Xenon (Xe133) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,76E+09	Bq	
Xenon (Xe133m) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-1,00E+08	Bq	
Xenon (Xe135) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-4,14E+09	Bq	
Xenon (Xe135m) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-2,27E+08	Bq	
Xenon (Xe137) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-7,66E+08	Bq	
Xenon (Xe138) - Radioaktive Emissionen in Luft	Aktivität	-8,41E+08	Bq	



Fluss- oder Ereignisname - Flusskategorie oder Ereignisse	Größe	Menge	Einheit	Typ
Xylol (Dimethylbenzol) - Gruppe NMVOC in Luft	Masse	2,51E+02	kg	
Xylol (Isomere; Dimethylbenzol) - Kohlenwasserstoffe in Frischwasser	Masse	7,86E-02	kg	
Xylol (Isomere; Dimethylbenzol) - Kohlenwasserstoffe in Salzwasser	Masse	1,99E-01	kg	
Zink (+II) - Schwermetalle in Agrarboden	Masse	1,83E+00	kg	
Zink (+II) - Schwermetalle in Industrieboden	Masse	7,62E-03	kg	
Zink (+II) - Schwermetalle in Luft	Masse	4,77E+01	kg	
Zink (+II) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	1,33E+01	kg	
Zink (+II) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	1,14E-01	kg	
Zinkchlorid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	2,98E-11	kg	
Zinkionen (+II) - Anorganische Emissionen in Frischwasser	Masse	6,35E-11	kg	
Zinkoxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	1,14E-07	kg	
Zinksulfat - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	-1,79E-01	kg	
Zinn (+IV) - Schwermetalle in Salzwasser	Masse	-2,37E-05	kg	
Zinn (+IV) - Schwermetalle in Luft	Masse	-5,34E-01	kg	
Zinn (+IV) - Schwermetalle in Frischwasser	Masse	2,15E-02	kg	
Zinnoxid - Anorganische Emissionen in Luft	Masse	5,69E-08	kg	

**Tab. 13 Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse und Vorfalldarstellungs-Ergebnisse (ReCiPe 2008, Wirkendpunkt, H (Hierarchische Perspektive)) aus Zuckerstaubexplosionen während Zuckerzwischenlagerung und -verpackung je 1 kg verpackter Kristallzucker unter vereinfachter Annahme der Repräsentativität des Vorfalles in Port Wentworth als repräsentativ für die gesamte US-Kristallzuckerproduktion aus Rohrzucker bis 2008, siehe Kap. 6.2.5.**

Wirkmethodik und -kategorie	Größe [Einheit]	Ökobilanz	Vorfälle	Summe
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Eutrophierung, Frischwasser	Arten*Zeit [Anzahl*a]	2,94E-12	1,72E-15	2,94E-12
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Feinstaubbildung	DALY [a]	1,56E-06	1,14E-09	1,56E-06
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Frischwasser Ökotoxizität	Arten*Zeit [Anzahl*a]	1,16E-12	7,56E-16	1,16E-12
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Humantoxizität	DALY [a]	8,84E-08	7,48E-11	8,85E-08

ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Ionisierende Strahlung	DALY [a]	1,45E-06	-1,60E-09	1,45E-06
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Klimawandel, menschliche Gesundheit	DALY [a]	2,85E-07	9,58E-11	2,86E-07
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Klimawandel, Ökosystem	Arten*Zeit [Anzahl*a]	1,62E-09	5,42E-13	1,62E-09
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Landwirtschaftliche Landnutzung	Arten*Zeit [Anzahl*a]	2,20E-08	1,24E-11	2,20E-08
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Ozonabbau	DALY [a]	4,64E-14	3,91E-16	4,67E-14
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Photochemische Oxidation	DALY [a]	1,85E-10	1,50E-13	1,85E-10
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Seewasser Ökotoxizität	Arten*Zeit [Anzahl*a]	7,66E-14	4,98E-17	7,66E-14
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Terrestrische Ökotoxizität	Arten*Zeit [Anzahl*a]	6,99E-12	1,75E-14	7,01E-12
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Terrestrische Versauerung	Arten*Zeit [Anzahl*a]	5,74E-11	2,36E-14	5,74E-11
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Verbrauch fossiler Rohstoffe	[USD]	-1,47E-02	-2,40E-05	-1,47E-02
ReCiPe 1.07 Endpoint (H) - Verbrauch von Metallen	[USD]	3,03E-03	-5,17E-04	2,51E-03

# Anhang I Lebenslauf

## Persönliche Angaben

14.01.1968 - geboren in Bremen als Marc-Andree Wolf

Eltern Sigrid Wolf (geb. Klatt) und Hagen Reiner Wolf

Verheiratet mit Kirana Wolf (geb. Chomkhamsri)

## Berufliche Tätigkeit

Seit 01.05.2012	Inhaber von maki Consulting (Einzelunternehmen), Berlin
01.06.2005 bis 31.01.2012	Wissenschaftlicher Mitarbeiter/Scientific Officer bei der Europäischen Kommission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (JRC-IES) in Ispra, Italien
01.01.2003 bis 31.05.2005	Leiter der Forschungsabteilung der PE Europe GmbH in Echterdingen (jetzt PE International AG), 50 % Stelle
01.09.1998 bis 31.05.2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (01.09.1998 bis 31.07.2002) und Abteilungsleiter (01.08.2002 bis 31.05.2005, ab 01.01.2003 50 % Stelle) in der Abteilung GaBi des Instituts für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart

## Wissenschaftliche Ausbildung

WS 1997 und SS 1998	Studium der Wirtschaftsinformatik, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
WS 1990 bis einschl. SS 1997	Studium der Geoökologie (Diplom), Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Abschluss Diplom-Geoökologe mit Gesamtnote „sehr gut“ am 29.09.1997. Diplomarbeit <i>“Accumulation of biomass and nutrients in the above-ground organs of four local tree species in monoculture and polyculture systems in central Amazonia”</i> .
WS 1989 und SS 1990	Studium der Chemie (Diplom), Universität des Saarlandes
02.11.1987 bis 30.06.1989	Zivildienst in der Umweltstelle der Gemeindeverwaltung Isernhagen
04.06.1987	Allgemeine Hochschulreife, KGS Stuhr-Brinkum

## Auszeichnungen

Auszeichnung für „Beste Politikunterstützung“ in 2006 mit dem Projekt *„European Platform on Life Cycle Assessment“*, gemeinsam mit zwei Kollegen, durch die Europäische Kommission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (JRC-IES).

Aufnahme in die Studienstiftung des Deutschen Volkes im März 1993.





